



## Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Yaprak Yay Sistemi Titreşim Karakteristiğinin Modellenmesi

### Modeling of the Vibration Characteristics of Leaf Spring Systems using Radial Based Artificial Neural Networks

Mehmet Bahadır Çetinkaya<sup>1\*</sup>, Muhammed İşçi<sup>2</sup>, Naciye Nisanur Urat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Kayseri Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, Kayseri, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author\*: cetinkaya@erciyes.edu.tr

#### Öz

Bu çalışmada, yaprak yay sistemleri üzerinde oluşan ivme etkilerini modellemek amacıyla Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağı (RTYSA) yapısı önerilmiştir. Deneysel çalışmalarda, bir hidrolik piston tarafından çelik yaprak yay sistemine 4 ve 22 saniyelik sürelerde 25, 31.25, 37.5, 43.75 ve 50 bar basınç değerleri uygulanmış ve ardından oluşan ivme etkileri tek eksenli ivme sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlardan, yüksek basınç değerlerinde ivme genliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalardan sonra, yaprak yay sisteminden ilgili çalışma şartları altında ölçülen ivme verileri yayılma sabiti 0.5 ve 1.0 olan RTYSA yapıları ile analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarından, 0.5 yayılma sabitine sahip RTYSA yapısının yaprak yay sisteminde meydana gelen gerçek zamanlı ivme değerlerini daha yüksek doğrulukla tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, önerilen RTYSA yapısı ile bir yaprak yay sisteminde meydana gelen gerçek zamanlı ivme etkilerinin başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları, Titreşim Analizi, Yaprak Yay Sistemi

#### Abstract

In this work, a Radial Basis Artificial Neural Network (RBANN) structure was proposed to model the acceleration effects occurring on leaf spring systems. In the experimental studies, pressure values of 25, 31.25, 37.5, 43.75 and 50 bar were applied to the steel leaf spring system by a hydraulic piston for 4 and 22 seconds and the acceleration effects that occur have been measured by a uniaxial accelerometer. From the experimental results, it was observed that the magnitude of acceleration was increasing at high pressure values. After the experimental studies, the acceleration data measured from the leaf spring system under the relevant working conditions were analyzed with RBANN structures having spread constant values of 0.5 and 1.0. From the simulation results, it was observed that the RBANN structure with a spread constant value of 0.5 predicts the real-time accelerations in the leaf spring system with higher accuracy. Consequently, it was observed that the real-time acceleration effects occurring on a leaf spring system can successfully be predicted with the proposed RBANN structure.

**Keywords:** Radial Basis Artificial Neural Networks, Vibration Analysis, Leaf Spring System

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Leaf spring systems are used to weaken or absorb the external forces that vehicles expose due to the adverse conditions. Especially, vibrations occurring as a result of the external forces may cause structural deformations over the leaf spring system. Therefore, modeling of the vibration data occurring on leaf spring systems with high accuracy is extremely important. Artificial intelligence approaches may provide significant advantages in modeling vibration data having stochastic structure. In this work, real-time vibrations occurring on a steel leaf spring system

shown in Figure 1 have been measured by using high-precision Brüel&Kjaer 4524 B 001 type 1-axial accelerometer. The vibration data obtained then modelled via RBANN structure.

In literature, the researchers frequently focus on static analysis, dynamic analysis, material properties, fatigue prediction analysis and geometric analysis. From the literature review, it can be concluded that this work is one of the limited number of studies that include experimental and simulation based modeling of real-time vibration effects on leaf spring systems.

##### Materials and Methods

The real-time measurements have been carried out on a leaf spring system test stand designed by Çetinkaya and Topaç and represented in Figure 2. The steel leaf spring system designed includes 10 upper leaves and 7 lower leaves and also it is designed to withstand approximately 3 tons of force. This system is also designed as a flexible system where the number of lower and upper leaf springs can be increased or decreased. Table 1 represents the detailed geometric properties of the steel leaf spring system used in the experimental system. As seen in Figure 2, the experimental system also includes an asynchronous electric motor and a hydraulic system. Technical properties of the asynchronous electric motor, force values occurring on the system against each pressure value and technical properties of the hydraulic system have been represented in Tables 2-4, respectively. In order to evaluate and model the vibration data obtained, the RBANN structure shown in Figure 3 have been applied under different pressure, application time and spread constant values.

In experimental studies, 25, 31.25, 37.5, 43.75 and 50 bar pressure values have been applied to the leaf spring system for periods of 4 and 22 seconds. In simulation studies, the vibration data have been modeled via RBANN structures having the spread constant values of 0.5 and 1.0.

The experimental results and RBANN based modeling results obtained for different working conditions have been compared in Figures 4-13. Furthermore, the performances of the RBANN structures used have also been compared in terms of Mean Squared Error (MSE) and the results are given in Table 5. In order to prove the robustness of the proposed RBANN structure,

the statistical  $R^2$  test has also been applied and the statistical results obtained have been compared in Table 6.

## Results and Discussion

When the experimental and RBANN results are examined, it is seen that RBANN can successfully predict the experimental results at each working condition. Especially, it has been observed that more accurate prediction results have been obtained with the RBANN structures having lower spread constant value. It has also been observed from the simulation results that the RBANN structures having lower spread constant value reach to the lower MSE values at each working condition.

The statistical  $R^2$  test results represent that RBANN structure produce superior statistical performance in predicting the experimental results. The RBANN structure having lower spread constant especially seems more stable due to its  $R^2$  values close to 1.

## Conclusion

In this work, firstly, the real-time vibration measurements have been carried out and then the experimental results obtained have been modelled via simulation studies. It is observed from the experimental results that increases in the pressure value also cause a proportional increases in the amplitude of the vibration data throughout the entire spectrum. In the simulation studies, it is found that the spread constant parameter has a direct effect on the performance of the RNANN structure. Consequently, it can be concluded that the RNANN structure can successfully be used in modelling the stochastic vibration data.

## 1. Giriş

Yaprak yay sistemleri, hareket esnasında araçların şasi ve aktarma organlarına etki eden anlık veya süreli darbelerin ortaya çıkardığı enerjileri üzerlerinde depolayan donanımlardır. Basınç, kuvvet, frenleme, viraj alma ve çarpma gibi farklı tür ve yoğunluktaki dış kuvvetlerin etkilerini diğer yay türlerine göre daha etkin bir şekilde sönmümlendirebilme yeteneğine sahiptirler [1]. Bu dış kuvvetler sonucunda ortaya çıkan titreşimler de yaprak yay sisteminde gerilmelere, sehimlere ve yüzey deformasyonlarına neden olabilmektedir. Bu etkilerin her birinin yüksek doğrulukla analiz edilmesi ve buna göre yaprak yay sisteminin geliştirilmesi güvenlik ve maliyet açısından oldukça önemlidir. Mekanik sistemler üzerinde ortaya çıkan titreşim verileri stokastik yapıya sahip işaretlerdir. Literatürde titreşim verilerini analiz etmeye yönelik üç farklı yöntem önerilmiştir. Bunlar; yer değiştirme ile titreşim analizi, hız ölçümü ile titreşim analizi ve ivme ölçümü ile titreşim analizi yöntemleridir. Hız ölçümü ile titreşim analizi literatürde en yaygın kullanılan yöntem olup yer değiştirme ile titreşim analizine göre daha güvenilir sonuçlar üretebilmektedir. Ancak, yüksek frekanslar ile çalışırken ivme ölçümü ile titreşim analizinin hız ölçümü ile titreşim analizine göre daha iyi sonuçlar ürettiği bilinmektedir [2]. Bu nedenle bu çalışma kapsamında ivme verileri üzerinden titreşim analizi gerçekleştirilmiştir.

Yaprak yay sistemleri ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalarda statik analiz, dinamik analiz, malzeme özellikleri, yorulma tahmini analizleri ve geometrik analizler gerçekleştirilmiştir. Yaprak yay sistemlerinde statik analiz üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; [3] numaralı çalışmada statik dış kuvvetleri hatasız bir şekilde taşıma kapasitesine sahip hafif bir yaprak yay sistem geometrisi önerilmiştir. [4] numaralı çalışmada ise MacPherson sistem, çift

salıncaklı sistem ve yaprak yay sistemleri arasında gerilme ve deformasyon açısından bir ön karşılaştırma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar mukayese edilmiştir. Dinamik analiz üzerine literatür çalışmaları incelendiğinde ise; [5] numaralı çalışmada, cam elyafı ile güçlendirilmiş polimerler kullanılarak geliştirilmiş bir kompozit yaprak yay sistemi önerilmiştir ve önerilen bu sistem için şekil değiştirme, gerilme ve sehim modelleme metriklerine yönelik ANSYS analizleri gerçekleştirilmiştir. Venkatesan ve Devaraj'nın çalışmalarında bir yaprak yay sisteminin güvenli yükünü belirlemek amacıyla ayrıntılı bir ANSYS tabanlı analiz sunulmuştur [6]. Kong ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada frenleme, viraj alma ve çukura düşme gibi dış faktörlerin etkilerini azaltmak için farklı yaprak yaylı göz tasarımları geliştirmiştir [7]. Dinamik analize yönelik bir başka çalışmada ise beklenen çalışma ömründen çok daha erken deforme olan bir yaprak yay sistemi üzerinde ayrıntılı yüzey analizleri ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir [8]. Malzeme özelliklerini temel alan çalışmalar incelendiğinde ise; Zhou ve ark., 2021 tarafından yapılan çalışmada yaprak yay sistemlerinde çalışma yükünü azaltmak, doğrusalılığı sağlamak ve genlik değişimlerini düzenlemek için yeni bir elastik bileşen tasarlanmıştır [9]. Öztoprak ve arkadaşları tarafından malzeme etkisinin analiz edildiği bir diğer çalışmada, tek yapraklı metal yaprak yay yapılarının yerine kompozit esaslı tek yapraklı yay sistemi tasarlanmış ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir [10]. Koçhan ve Belevi'nin çalışmalarında ise çift çelik yaprak yaylar yerine kullanılabilir fiber takviyeli polimerik kompozit yaprak yaylar üzerine araştırmalar sunulmuştur [11]. Satyanarayana ve Lakshmi [12], stres ve sapma kısıtlamalarını dikkate alarak yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve ağırlık tasarrufu açısından kompozit ve çelik yaprak yay sistemlerinin performanslarını mukayese etmişlerdir. Son olarak, yaprak yay sistemlerinde yorulma tahmini üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde;

Abdullah ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yaprak yay sistemi üzerine uygulanan rastgele gerinim yüklemesi altında yaprak yayın tahmin edilen yorulma ömrüne dayalı bir güvenilirlik değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir [13]. Çetinkaya ve İçi tarafından yapılmış olan bir diğer çalışmada ise 3-eksenli ivme sensörü kullanılarak farklı basınç değerleri altında yaprak yay sisteminin uzun ömür testine yönelik RTYSA tabanlı titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir [14]. Jung ve arkadaşları ise çalışmalarında sayısal gerilme analizi yaparak elde edilen sonuçlara göre yaprak yayın yorulma mukavemetini değerlendirmişler ve yaprak yay montajı için YSA tabanlı ekonomik bir yorulma tasarım kriteri tahmin yöntemi geliştirmişlerdir [15]. Juliyana ve diğerleri tarafından sunulan çalışmada [16], değişen kalınlık ve genişliğe sahip bir mono kompozit yaprak yay sistemi, statik lineer ve modal analiz sonuçları açısından analiz edilmiştir. Son olarak, Aher ve Sonawane, çok yapraklı çelik bir yaprak yay sistemi önermişler ve ardından önerdikleri sistemin yük taşıma kapasitesini ve yaşam döngülerini araştırmak için statik ve yorulma analizlerini gerçekleştirmişlerdir [17].

Görüldüğü gibi literatürde yaprak yay sistemleri ile ilgili statik analiz, dinamik analiz, malzeme özellikleri ve yorulma tahminini analizlerini içeren çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, yaprak yay sistemleri üzerinde meydana gelen gerçek zamanlı titreşim etkilerinin deneysel ve simülasyon tabanlı modellerini içeren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, yaprak yay sistemi üzerine belirli sürelerle gelen ve tek eksenli bir ivme sensörü ile elde edilen titreşimlerin radyal tabanlı bir yapay sinir ağı aracılığıyla tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Yaprak yay sistemleri kullandıkları araç tipine göre farklı geometrilerde tasarlanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ve birbirine bağlı fakat ayrı iki yaprak yay sistemi içeren blok yapı aşağıda Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan yaprak yay sistemi

Figure 1. The leaf spring system used in this work

Şekil 1'den görüldüğü gibi yaprak yay sisteminin ana gövdesini 10 adet çelik yaprak yay içeren bir blok yapı oluşturmaktadır. Ayrıca, ana gövdenin güçlendirilmesi amacıyla 7 adet yaprak yay içeren bir sistemin daha ana gövdeye eklendiği görülmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bu yaprak yay sisteminin detaylı geometrik özellikleri aşağıda Tablo 1 ile verilmiştir.

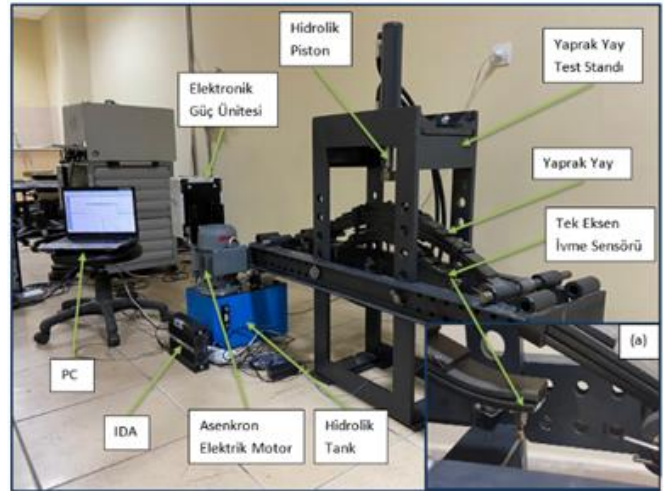
Yaprak yay sistemlerinin uzun ömür testine yönelik Çetinkaya ve Topaç tarafından geliştirilen ve bu çalışma kapsamında da kullanılan uzun ömür test standı detaylı görüntüsü Şekil 2 ile verilmiştir [18]. Şekil 2'den de görüldüğü gibi deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği test standı yaprak yaylar, hidrolik sistem bileşenleri, elektronik güç ünitesi ve bir adet tek eksenli ivme sensörü içermektedir.

Tablo 1. Deneysel sistemde kullanılan yaprak yay sisteminin geometrik özellikleri

Table 1. Geometric properties of the leaf spring system used in the experimental system

Geometrik Özellikler (cm)	
Her bir yaprak yayın genişliği	0.8
Her bir yaprak yayın kalınlığı	5.786
U civatalar arası mesafe	9.8
Her bir gözün dış çapı	0.53
Her bir gözün iç çapı	0.37

Deneysel sistemde, farklı şiddetlerdeki harici kuvvetler bir hidrolik sistem aracılığıyla üretilmektedir. Hidrolik sistem içerisinde; elektrik motoru, hidrolik valf, hidrolik pompa, hidrolik silindir, hidrolik tank, kampana ve kaplin, emiş ve dönüş filtreleri, hidrolik tank seviye göstergesi ve bağlantı elemanları mevcuttur. Bu sistem içerisinde ayrıca hidrolik iletimin gerçekleşmesi için hidrolik hortum ve rekorlar da bulunmaktadır.



Şekil 2. Titreşim ölçümlerinin gerçekleştirildiği deneysel sistem, (a) Tek eksenli ivme sensörünün bağlantı noktası

Figure 2. Experimental system on which the vibration measurements carried out, (a) Connection point of the uniaxial acceleration sensor

Deneysel sistem içerisinde hidrolik üniteye ek olarak bu üniteyi aktif hale getiren bir elektronik güç ünitesi de tasarlanmıştır. Bu entegre güç ünitesi içerisinde; otomatik sigorta, aç-kapa butonları, zaman rölesi, kontaktör ve acil stop şalteri kullanılmıştır. Elektronik güç ünitesi, Tablo 2 aracılığıyla teknik özellikleri verilen ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılan asenkron elektrik motorunu devreye almakta olup hidrolik sistemin istenilen şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Deneysel çalışmada titreşim verileri Brüel&Kjaer 4534-B-001 tip tek eksenli ivme sensörü kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen sensör verilerini daha anlamlı hale getirmek için Brüel&Kjaer 3560 B tipi akıllı veri toplama (IDA) aracı kullanılmıştır. Tek eksenli ivme sensörü, Şekil 2'de (a) bölgesinde detaylı bir şekilde gösterildiği gibi uygulanan basınç ile aynı yönde olacak şekilde yaprak yay üzerine yerleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Deneysel sistemde kullanılan asenkron elektrik motoru teknik özellikleri

**Table 2.** Technical properties of the asynchronous electric motor used in the experimental system

Maksimum akım	10.8 (A)
Frekans	50 (Hz)
Motor gücü	1.5 (kW)
Gerilim	220 (V)
Ağırlık	14.5 (kg)

Tasarlanan sistemde kullanılan silindir çapı 6 cm olarak tercih edilmiştir. Buna göre silindirin toplam alanı da 28.26 cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Bu tasarım kriterlerine göre deneysel sistemde kullanılan her bir basınç değerine karşılık gelen kuvvet değerleri aşağıda Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Basınç verilerinden elde edilen kuvvet değerleri

**Table 3.** Force values obtained from the pressure data

Basınç (bar)	≈ Kuvvet (kg)
25	720
31.25	900
37.5	1080
43.75	1260
50	1440

Bu çalışmada uygulanan basınçlar hidrolik enerji kullanılarak üretilmiştir. Deneysel düzenekte kullanılan hidrolik sistemin donanımsal özellikleri aşağıda Tablo 4 ile verilmiştir.

**Tablo 4.** Deneysel sistemde kullanılan hidrolik sistemin teknik özellikleri

**Table 4.** Technical properties of the hydraulic system used in the experimental system

Hidrolik silindir güç kapasitesi	10 Ton
Hidrolik silindir strok uzunluğu	400 mm
Hidrolik tank kapasitesi	25 l
Hidrolik dönüş filtresi	15 lt/dk

### 2.1. Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), beyin sinir sisteminin aktivitelerini esas alan ve yüksek doğrulukta tahmin etme yetenekleri sebebiyle literatürde oldukça fazla tercih edilen paralel hesaplama sistemlerinden birisidir [19].

Broomhead ve Lowe tarafından önerilen radyal tabanlı yapay sinir ağları, Gauss aktivasyon fonksiyonuna dayalı etkin bir ileri beslemeli ağ yapısına sahiptir [20]. Radyal tabanlı bu ağ yapısı, yapay sinir ağlarında olduğu gibi giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanından oluşur. Bu çalışmada kullanılan RTYSA ağ yapısının şematik gösterimi Şekil 3 ile verilmiştir.

Giriş parametreleri olarak titreşim üzerinde oluşturdukları etkilerden dolayı Uygulanan Basınç Değeri ve Uygulama Süresi

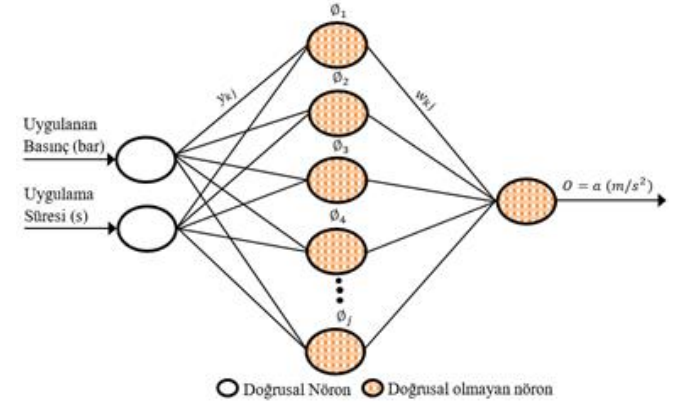
parametreleri tanımlanmıştır. Çıkış katmanı ise tek eksenli ivme sensöründen alınan ivme verileri ile oluşturulmuştur.

RTYSA ağ yapısında, Denklem 1'de verilen Gauss aktivasyon fonksiyonu kullanılarak giriş katmanından gizli katmana doğrusal olmayan bir dönüşüm uygulanır. Öte yandan, gizli katman ile çıkış katmanı arasında doğrusal bir dönüşüm gerçekleştirilir.

$$\phi_j = e^{-\left(\frac{\|x - c_j\|}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

burada;  $x$ , giriş vektörünü ve  $c_j$  ise  $j$ 'inci Gauss fonksiyonunun merkezini temsil etmektedir.  $\sigma > 0$  ise yayılma sabiti parametresidir.  $\|x - c_j\|$  ifadesi  $x$  ve  $c_j$  vektörleri arasındaki Öklid mesafesini belirtmektedir.  $\phi_j$  ise  $j$ . gizli nöronun aktivasyon seviyesi olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada iki farklı yayılma sabiti değeri ( $\sigma = 0.5$  ve  $\sigma = 1.0$ ) kullanılarak radyal tabanlı yapay sinir ağlarının performans mukayeseleri gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.** Radyal tabanlı yapay sinir ağının genel yapısı

**Figure 3.** General structure of radial basis neural network

Genel bir yaklaşım olarak veri setinin %70'i yapay sinir ağına uygulanarak ağ eğitimi gerçekleştirilir. Daha sonra veri setinin kalan %30'luk kısmı ağa uygulanarak önceden eğitilen ağın performansı test edilir. Bu çalışmada, 4 saniyelik çalışma şartında 925 adet veriden rasgele seçilen 647 adet veri ağın eğitimi için sisteme uygulanırken geriye kalan 278 adet veri ağın testi için kullanılmıştır. 22 saniye çalışma şartı altında ise deneysel sonuçlarda elde edilen 2385 veriden rastgele seçilen 1669 adet veri ağın eğitimi için sisteme uygulanmıştır. Kalan 716 veri ise ağın testi için kullanılmıştır.

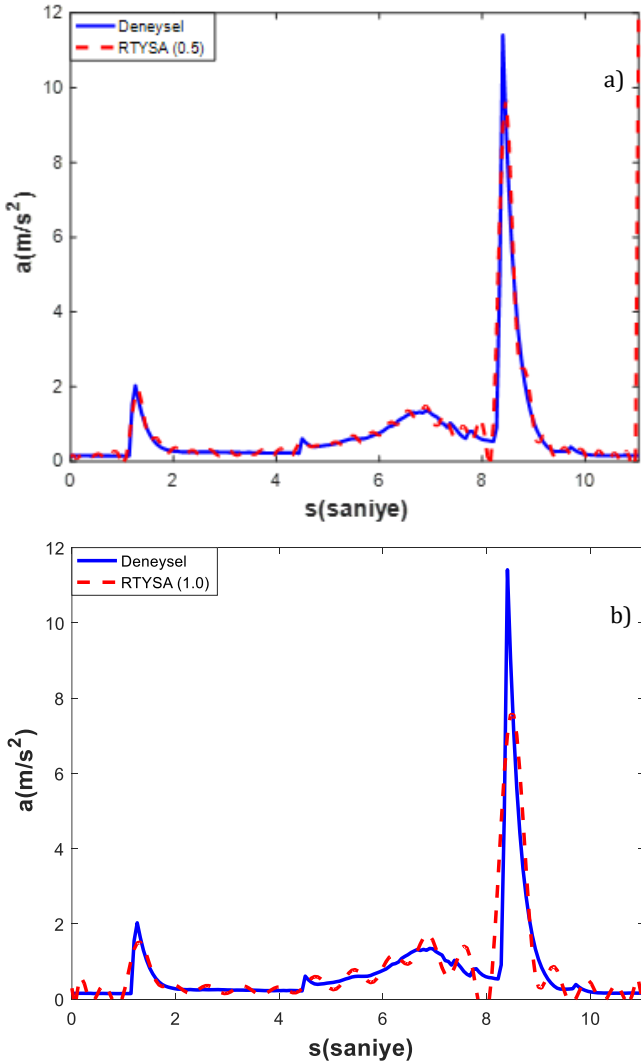
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, farklı uygulama süreleri ve basınç değerleri altında bir yaprak yay sisteminde oluşan gerçek zamanlı yerel titreşimleri ölçmek için deneysel bir ölçüm sistemi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın deneysel aşamasında, yaprak yay sistemi üzerinde oluşan anlık ivme değerleri ve bunlara bağlı olarak titreşim verileri daha önce de ifade edildiği gibi Brüel&Kjaer 4534-B-001 tip tek eksenli ivme sensörü ile ölçülmüştür. MATLAB Neural Network Tool (MATLAB - NNTool) kullanılarak gerçekleştirilen benzetim aşamasında ise bu gerçek zamanlı titreşim verileri, farklı uygulama süreleri ve basınç değerleri altında 0.5 ve 1.0 yayılma sabitlerine sahip doğrusal olmayan RTYSA yapıları ile analiz edilmiştir.

Deneysel ölçümler 4 ve 22 saniyelik uygulama süreleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve her uygulama süresinde saniyenin %6'sı hassasiyetle veriler alınmıştır. Yaprak yay sistemi her uygulama

zamanı için sırasıyla 25, 31.25, 37.5, 43.75 ve 50 bar basınç değerlerine maruz bırakılmıştır. Her bir deneyde standart olarak 120 saniye boyunca titreşim verileri toplanmıştır. Daha sonra ilgili uygulama süresi içerisinde elde edilen en uygun dalga aralığı belirlenerek ilgili dalga aralığına ait veriler yapay sinir ağı için düzenlenmiştir. Buna göre, 4 saniyelik çalışma şartı dikkate alındığında 185 adet verinin YSA tarafından tahmin etme işlemi gerçekleştirilirken, bu veri sayısının 22 saniyelik çalışma şartı için 477 adet olduğu ifade edilebilir.

4 saniye ve 25 bar çalışma şartı için elde edilen deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Çalışma şartları içerisindeki en düşük basınç değeri olan 25 bar için beklendiği gibi sistemde zayıf tepe dalgalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Yayılma sabiti düşük olan RTYSA yapısının özellikle tepe dalgalarındaki kestirim performansının yayılma sabiti yüksek olan yapıya göre daha iyi olduğu görülmüştür.

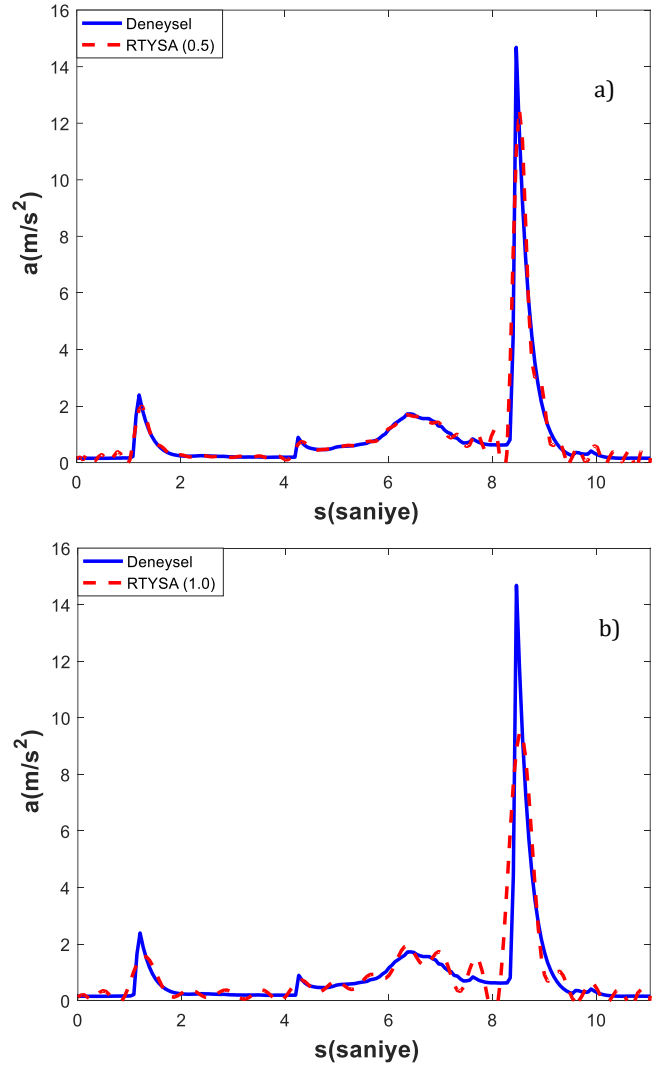


**Şekil 4.** 4 saniye 25 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 4.** Experimental and neural network results for 4 seconds and 25 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

Uygulama süresi 4 saniye ve basınç değeri 31.25 bar için elde edilen ivme sonuçları Şekil 5 ile gösterilmiştir. Özellikle tepe dalgalarında olmak üzere tüm çalışma aralığı süresince yaprak yay sisteminin titreşim özelliklerini tahmin etmede düşük yayılma

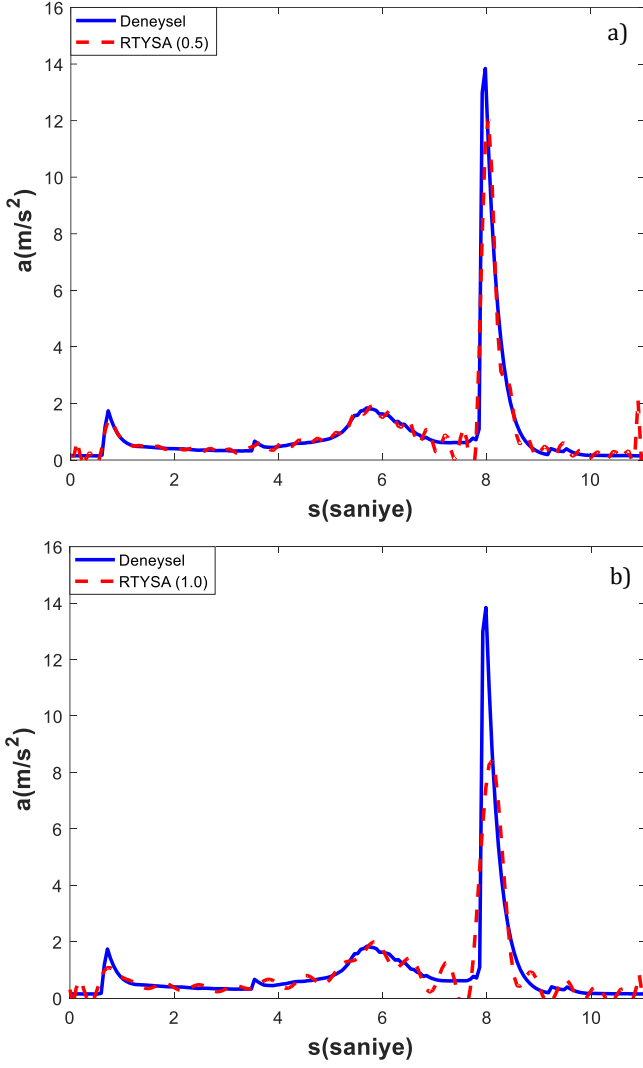
sabitine sahip ağ yapısının diğer ağ yapısına göre daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.** 4 saniye 31.25 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 5.** Experimental and neural network results for 4 seconds and 31.25 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

Şekil 6'da deneysel sistemde 37.5 bar olarak belirlenen basınç değeri için 4 saniyelik uygulama süresinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde, düşük yayılma sabitine sahip ağ yapısı tarafından üretilen kestirim sonuçlarında daha düşük genlik sapmalarının oluştuğu yani deneysel sonuçların daha etkin bir şekilde modellendiği görülmüştür.

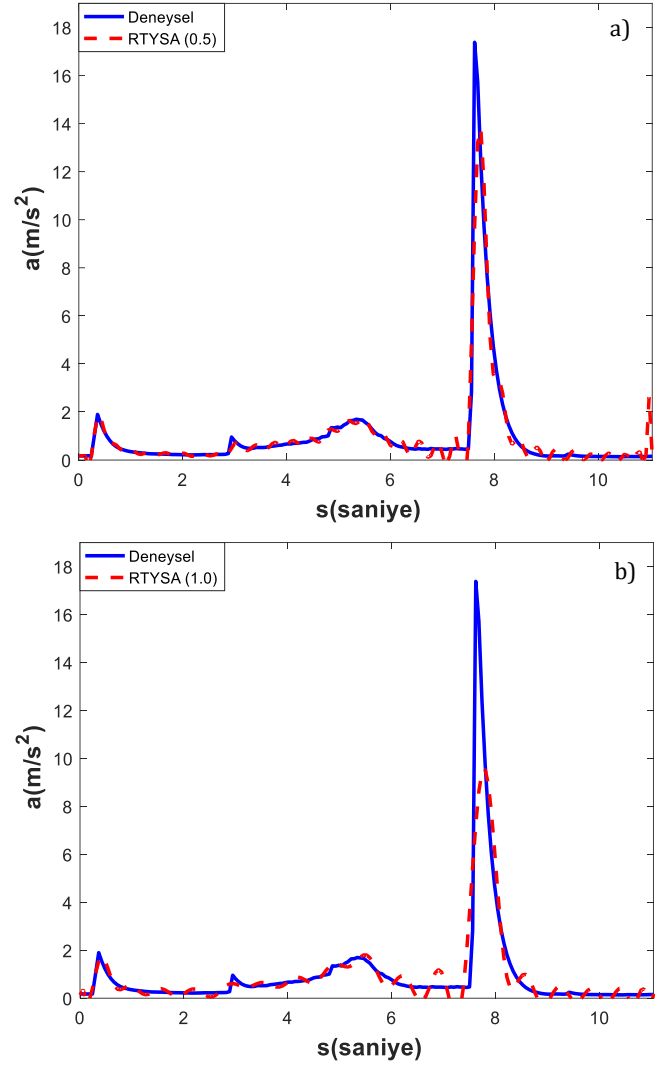


**Şekil 6.** 4 saniye 37.5 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti.

**Figure 6.** Experimental and neural network results for 4 seconds and 37.5 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

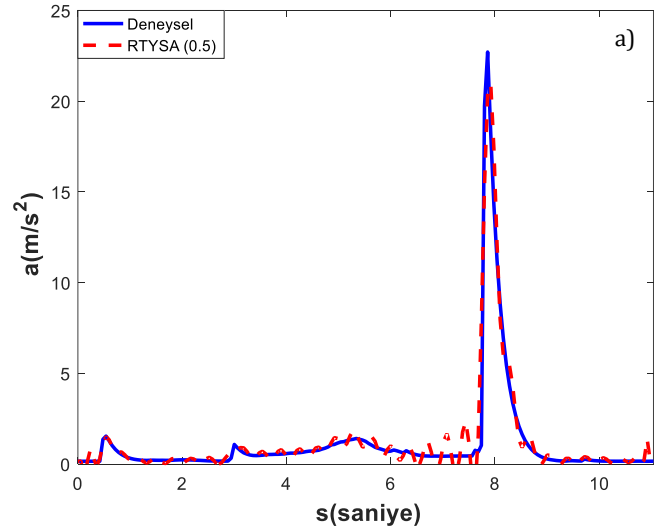
Aynı uygulama süresi içerisinde dördüncü basınç değeri olarak belirlenen 43.75 bar için elde edilen deneysel ve RTYSA sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan RTYSA ağı yapısının 0.5 yayılma sabiti değerinde deneysel sonuçları daha yüksek doğrulukta modellediği gözlemlenmiştir. 4 saniyelik uygulama süresi içerisinde en yüksek basınç değeri olarak belirlenen 50 bar basınç değerinin deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. En yüksek genlikli ivme ölçümlerinin elde edildiği bu basınç değerinde her iki ağı yapısının da kestirim açısından karakteristik olarak gerçek değerleri yakalayabildiği ancak önceki deney şartlarına göre daha kötü performans sergiledikleri tespit edilmiştir. Bununla birlikte, düşük yayılma sabitine sahip ağı yapısının önceki sonuçlarda olduğu gibi gerçek zamanlı sonuçları tahmin etme açısından daha etkin bir performans sergilediği de görülmüştür. Analiz edilen ikinci uygulama süresi olan 22 saniye için 25 bar çalışma şartında elde edilen sonuçlar Şekil 9 ile gösterilmiştir. Basınç uygulandıktan sonra pistonun ayrılma anında meydana gelen ivmelenmenin karakteristik özelliklerinin 4 saniyelik çalışma şartına göre daha düşük genlikli olduğu gözlemlenmiştir. Düşük yayılma sabitine sahip RTYSA yapısının özellikle  $\approx 0-5$  sn

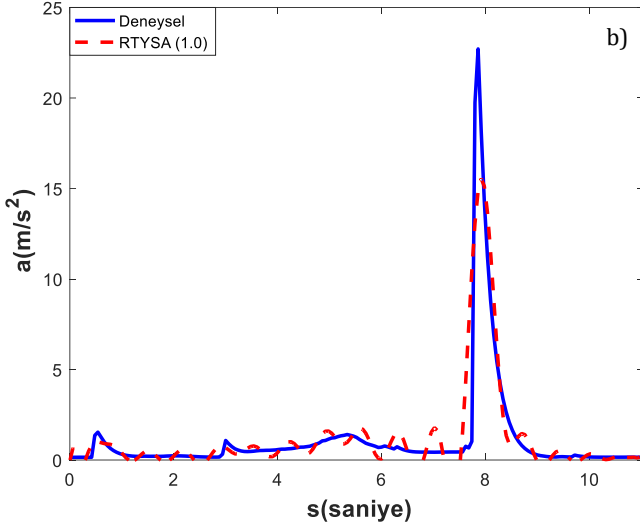
ve  $\approx 23-30$  sn aralıklarında deneysel ivme sonuçlarını daha yüksek doğrulukta modellediği görülmektedir.



**Şekil 7.** 4 saniye 43.75 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

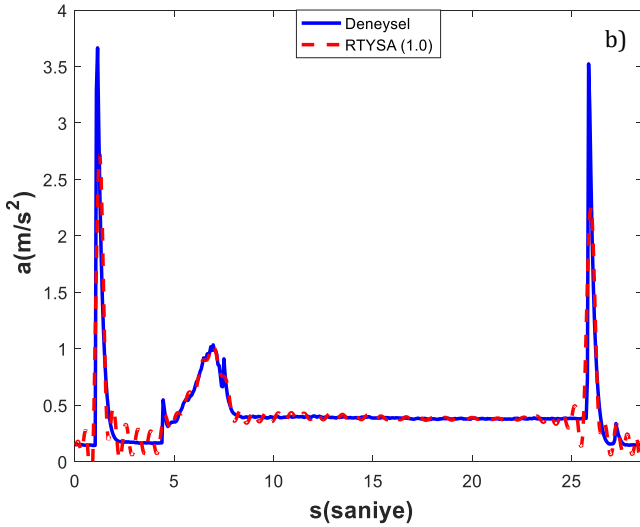
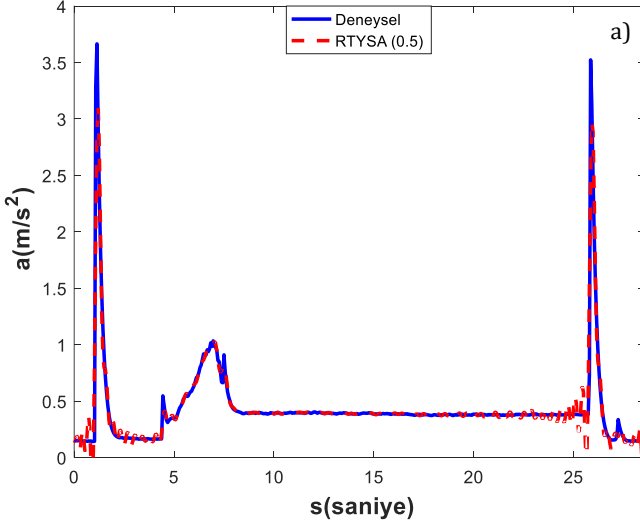
**Figure 7.** Experimental and neural network results for 4 seconds and 43.75 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant





**Şekil 8.** 4 saniye 50 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

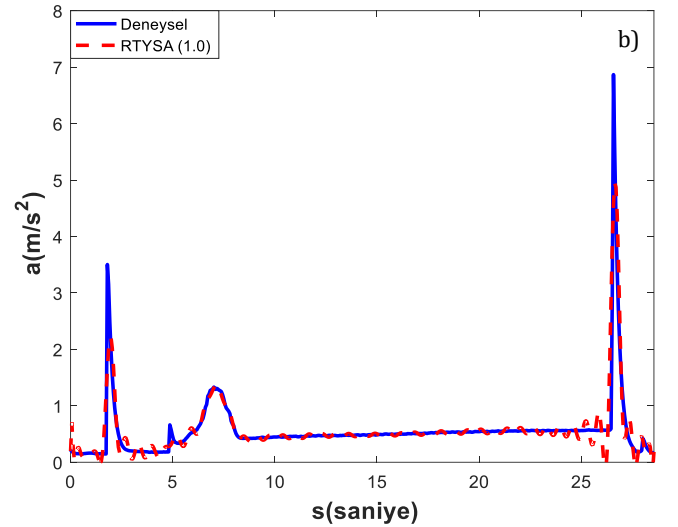
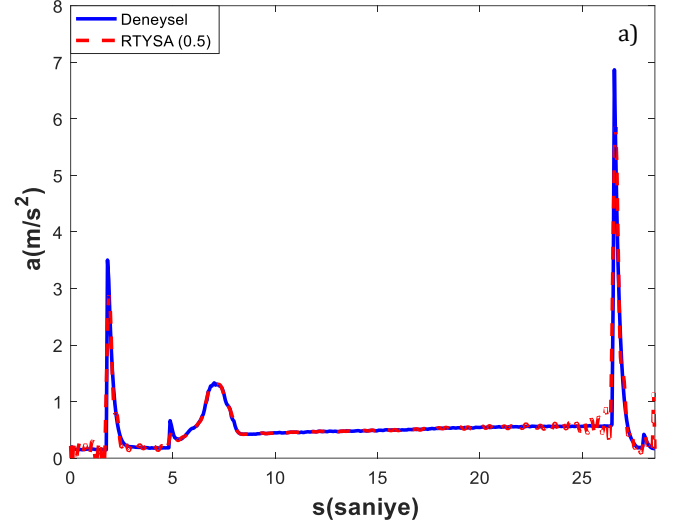
**Figure 8.** Experimental and neural network results for 4 seconds and 50 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant



**Şekil 9.** 22 saniye 25 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 9.** Experimental and neural network results for 22 seconds and 25 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

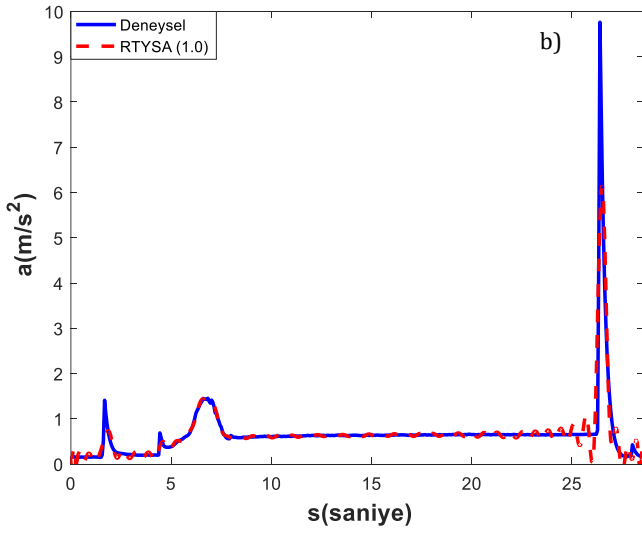
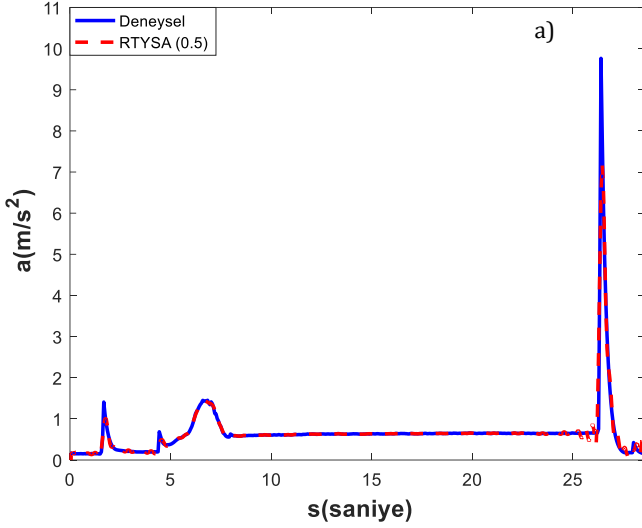
Uygulama süresi 22 saniye ve basınç değeri 31.25 bar olduğunda elde edilen deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. 22 saniyelik süre içerisinde artan basınç değerinin yaprak yay üzerindeki ivme genliğini arttırdığı gözlemlenmektedir. Düşük yayılma sabitli RTYSA yapısının deneysel verileri modellemede diğer yapıya benzer fakat nispeten daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür.



**Şekil 10.** 22 saniye 31.25 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 10.** Experimental and neural network results for 22 seconds and 31.25 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

Şekil 11'de, 37.5 bar ve 22 saniye çalışma şartı için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Hidrolik pistonun basınç uyguladığı andan ayrıldığı ana kadar geçen  $\approx 3-27$  sn aralığında artan basınç değerinin yaprak yay üzerindeki ivmelenme genliğine belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda yapay sinir ağı yapılarından düşük yayılma sabitine sahip olan ağ yapısı önceki sonuçlarda olduğu gibi daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

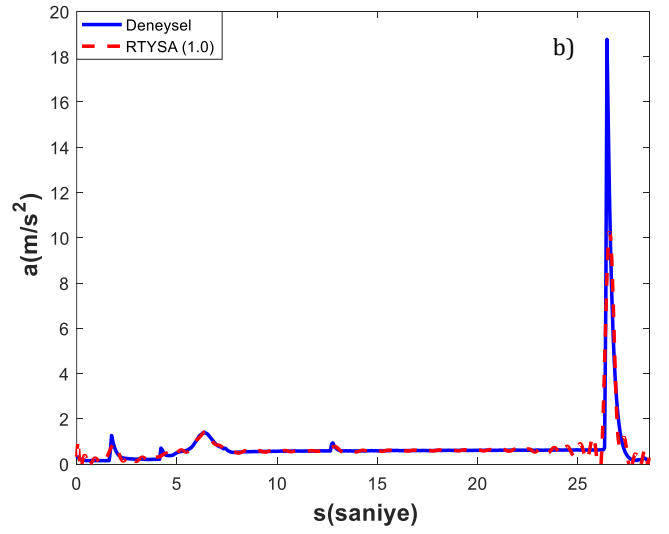
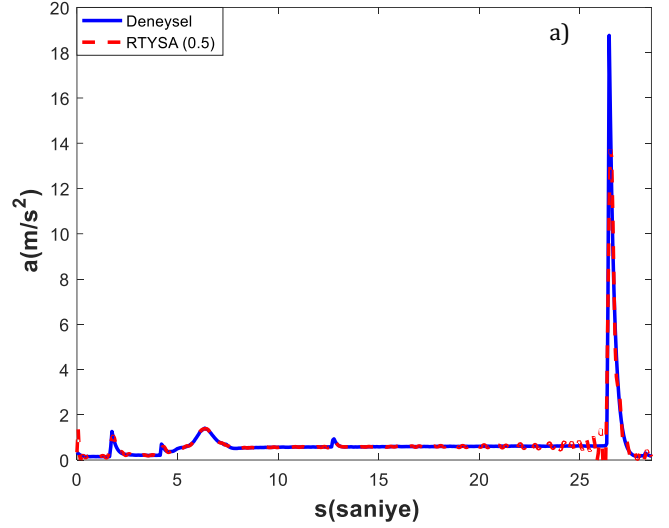


**Şekil 11.** 22 saniye 37.5 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 11.** Experimental and neural network results for 22 seconds and 37.5 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

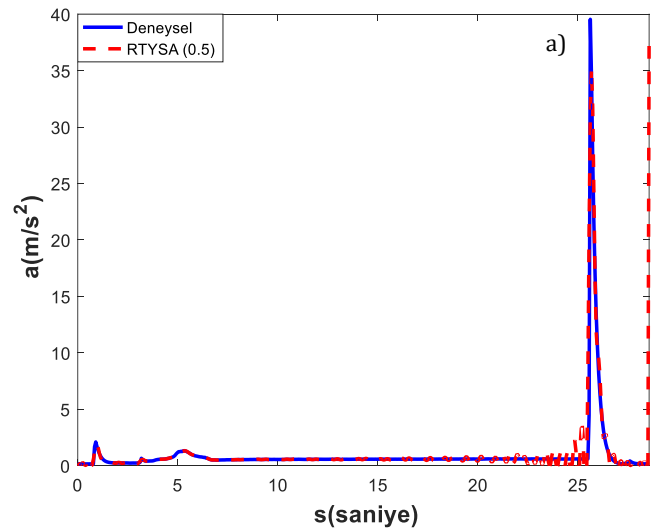
Aynı uygulama süresi içerisinde dördüncü basınç değeri olarak belirlenen 43.75 bar basınç değeri için elde edilen deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları Şekil 12’de verilmiştir. Bu çalışma şartında da artan basınç değeri ile birlikte sistem üzerine etkileyen ivme genliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, 0.5 yayılma sabitine sahip ağ yapısının tüm gerçek zamanlı verileri ve özellikle tepe genliklerini daha yüksek doğrulukta modellediği görülmüştür.

22 saniyelik uygulama süresi içerisinde 50 bar basınç değeri için elde edilen deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları Şekil 13’te verilmiştir. Yaprak yay sistemi üzerinde oluşan ivme genliklerinin artması sonucunda her iki RTYSA ağ yapısında da kestirim performansının diğer çalışma şartlarına göre düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, düşük değerli yayılma sabitleri için ağ yapılarının kestirim performanslarının arttığı gözlemlenmiştir.

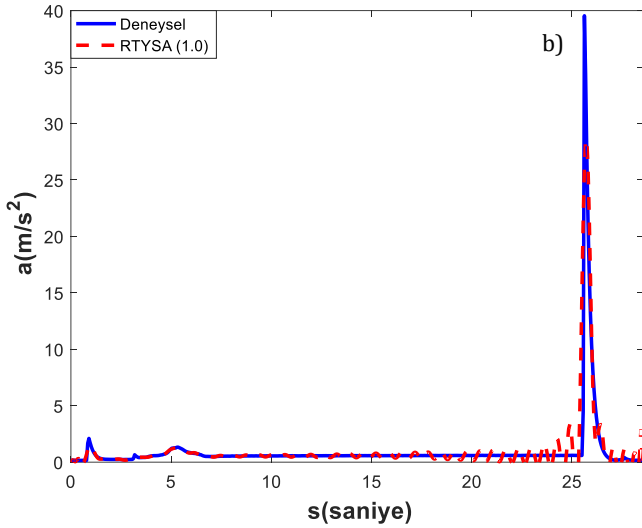


**Şekil 12.** 22 saniye 43.75 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 12.** Experimental and neural network results for 22 seconds and 43.75 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant







**Şekil 13.** 22 saniye 50 bar basınç değerleri için deneysel ve yapay sinir ağı sonuçları, a) 0.5 yayılma sabiti, b) 1.0 yayılma sabiti

**Figure 13.** Experimental and neural network results for 22 seconds and 50 bar pressure value, a) 0.5 spread constant, b) 1.0 spread constant

Tüm çalışma şartlarına ait YSA tabanlı tahmin etme işlemlerinin Ortalama Kareysel Hata (MSE) performanları Tablo 5 ile verilmiştir. Bu değerlere göre 4 ve 22 saniye çalışma şartlarında ve tüm basınç değerlerinde 0.5 yayılma sabitine sahip RTYSA modelinin performansının 1.0 yayılma sabitine sahip RTYSA modeline göre daha iyi hata performansına sahip olduğu gözlemlenmektedir. 22 saniyelik çalışma şartında, 4 saniyelik çalışma şartına göre her iki yayılma sabiti için de ağların genel olarak daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Deneysel sistemden elde edilen verilerin tahmin edilmesi amacıyla geliştirilen YSA modelinin farklı çalışma şartları altındaki istatistiksel performansı R<sup>2</sup> yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 6 ile gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, daha yüksek R<sup>2</sup> değerleri üreten 0.5 yayılma sabitine sahip ağ yapısının diğer ağ yapısına göre daha iyi bir performans gösterdiği ifade edilebilir. Elde edilen tüm R<sup>2</sup> değerleri incelendiğinde ise YSA tabanlı analizlerde 1'e yakın yüksek R<sup>2</sup> değerlerine ulaşıldığı yani modelleme sonuçlarının istatistiksel olarak yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.** Tüm çalışma şartlarında YSA modelleri için elde edilen MSE değerleri

**Table 5.** MSE values obtained for the ANN models under all working conditions

	Çalışma Şartı (Süre)			
	4 Saniye		22 Saniye	
	0.5	1.0	0.5	1.0
25	0.1250	0.3685	0.0136	0.0281
31.25	0.2342	0.6029	0.0269	0.0586
37.5	0.2921	0.7272	0.0514	0.1080
43.75	0.4718	1.1034	0.1611	0.3755
50	0.6806	1.7889	1.0699	2.1812

**Tablo 6.** Geliştirilen YSA modeli için farklı çalışma şartları altında elde edilen R<sup>2</sup> değerleri

**Table 6.** R<sup>2</sup> values obtained for the improved ANN model under different working conditions

	Çalışma Şartı (Süre)			
	4 Saniye		22 Saniye	
	0.5	1.0	0.5	1.0
25	0.9350	0.8060	0.9090	0.8110
31.25	0.9240	0.7970	0.9150	0.8150
37.5	0.9150	0.7930	0.9030	0.7960
43.75	0.9050	0.7780	0.9220	0.8210
50	0.9260	0.7940	0.6810	0.7080

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir yaprak yay sistemi üzerine 4 ve 22 saniyelik uygulama süreleri için sırasıyla 25, 31.25, 37.5, 43.75 ve 50 bar değerlerinde basınçlar uygulanmıştır. Her bir çalışma şartı için Brüel&Kjaer tek eksenli ivme sensörü kullanılarak deneysel ivme verileri elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarında ise 0.5 ve 1.0 yayılma sabiti değerlerine sahip RTYSA ağ yapıları kullanılarak elde edilen deneysel ivme verileri modellenmiştir. Bu çalışma şartlarına göre;

- Elde edilen deneysel ivme sonuçları incelendiğinde, uygulanan basınç değerlerinin artırılması ile tüm zaman aralığında ve özellikle tepe dalgalarında orantısız genlik artışlarının olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, basınç değerlerindeki artış ile birlikte yaprak yay üzerinde meydana gelen ivme genliklerinin de orantılı olarak artırdığı gözlemlenmiştir.

- Elde edilen gerçek zamanlı ivme verilerinin yapay sinir ağlarıyla modellenmesinde, tüm çalışma şartları altında, 0.5 yayılma sabitine sahip RTYSA ağ yapılarının daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

- RTYSA ağ yapılarının doğrusal olmayan gerçek zamanlı ivme ölçüm sonuçlarının modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

#### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "FYL-2021-11142" kodlu proje ile desteklenmiştir.

#### Yazar katkılarının beyanı

Mehmet Bahadır Çetinkaya fikir oluşturma, deney tasarımı, analizlerin gerçekleştirilmesi, yazım ve eleştirel inceleme aşamalarında çalışmaya katkı sunmuştur.

Muhammed İşçi fikir oluşturma, deney tasarımı, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması aşamalarında çalışmaya katkı sunmuştur.

Naciye Nisanur Urat veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması aşamalarında çalışmaya katkı sunmuştur.

## Kaynaklar

- [1] Younesian, D., Fallahzadeh, M. S., 2014. Numerical and Experimental Analysis of Nonlinear Parabolic Springs Employed in Suspension System of freight cars, *Automotive Science and Engineering*, Cilt. 4, s. 812-826.
- [2] İsci, M. 2020. CNC Torna Tezgahlarda 5 Eksende Titreşim Ölçümü ve Yapay Sinir Ağlarıyla Modellenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Kayseri.
- [3] Shokrieh, M.M., Rezaei, D., 2003. Analysis and Optimization of a Composite Leaf Spring, *Composite Structure*, Cilt. 60, s. 317-325. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00349-5.
- [4] Odabaşı, V., Maglio, S., Martini, A., Sorrentino, S. 2019, Static Stress Analysis of Suspension Systems for a Solar-Powered Car, *FME Transaction*, Cilt. 47, s. 70-75. DOI: 10.5937/fmet19010700
- [5] Ali, K. A., Manuel, D. J., Balamurugan, M., Murugan, M. S. 2021. Analysis of Composite Leaf Spring Using ANSYS Software, *Materials Today: Proceedings*, Cilt. 37, s. 2346-2351. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.068
- [6] Venkatesan, M., Devaraj, D. H. 2012. Design and Analysis of Composite Leaf Spring in Light Vehicle, *International Journal of Modern Engineering Research*, Cilt. 2, s. 213-218.
- [7] Kong, Y.S., Abdullah, S., Omar, M.Z., Haris, S.M. 2016, Failure Assessment of a Leaf Spring Eye Design under Various Load Cases, *Engineering Failure Analyses*, Cilt. 63, s. 146-159. DOI:10.1016/j.engfailanal.2016.02.017
- [8] Cheng, G., Chen, K., Zhang, Y., Chen, Y. 2022. The Fracture of Two-Layer Leaf Spring: Experiments and Simulation: *Engineering Failure Analysis*, Cilt. 133, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105971
- [9] Zhou, J., Hu, C., Wang, Z., Ren, Z., Wang, X., Mao, K. 2021. Study on Dynamic Characteristics of Leaf Spring System in Vibration Screen, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Cilt. 40, s. 1818-1832. DOI: 10.1177/14613484211022974
- [10] Oztoprak, N., Gunes, M.D., Tanoglu, M., Aktas, E., Egilmez, O.O., Senocak, C., Kulac, G. 2018. Developing Polymer Composite-Based Leaf Spring Systems for Automotive Industry, *Science Engineering Composite Materials*, Cilt. 25, s. 1167-1176. DOI: 10.1515/secm-2016-0335
- [11] Koçhan, C., Belevi, M. 2017. Experimental Investigation of Fiber Reinforced Composite Leaf Springs, *Materials Testing*. Cilt. 59, s. 853-858. DOI: 10.3139/120.111078
- [12] Lakshmi, B.V., Satyanarayana, I. 2012. Static and Dynamic Analysis on Composite Leaf Spring in Heavy Vehicle, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, Cilt. 2, s. 80-84.
- [13] Abdullah, L., Singh, S. S. K., Azman, A. H., Abdullah, S., Ihsan, A. K. A. M., Kong, Y. S. 2019. Fatigue Life-Based Reliability Assessment of a Heavy Vehicle Leaf Spring, *International Journal of Structural Integrity*, Cilt. 10, s. 726-736. DOI: 10.1108/IJSI-04-2019-0034
- [14] Çetinkaya, M. B., İsci, M. 2022. Analysis of the Vibration Characteristics of a Leaf Spring System Using Artificial Neural Networks, *Sensors*, Cilt. 22. DOI: 10.3390/s22124507
- [15] Jung, W. S., Bae, D. H., Song, G. W., Hyun, J. S., Kim, B. S. 2006. Fatigue Design of Leaf Spring Using Artificial Neural Network, In *Key engineering materials*. Cilt. 326, s. 1083-1086. Trans Tech Publications Ltd.
- [16] Juliyana, S. J., Prakash, J. U., Pallavi, P., Sadhana, A. D. 2017. Finite Element Analysis of Mono Composite Leaf Spring of Varying Thickness and Varying Width Used in Automotives, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, Cilt. 7, s. 247-254. DOI: 10.24247/ijmperddc201727
- [17] Aher, V.K., Sonawane, P.M. 2012. Static and Fatigue Analysis of Multi Leaf Spring Used in the Suspension System of LCV, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Cilt. 2, s. 1786-1791.
- [18] Topaç, C. 2019. Araçlarda Makas Sistemlerinin Uzun Ömür Testine Yönelik Stant Tasarımı ve Prototip Uygulaması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 61s, Kayseri.
- [19] Haykin, S. S. 2009. *Neural Networks and Learning Machines*, Pearson: Upper Saddle River, NJ.
- [20] Broomhead, D. S., Lowe, D., 1988. Radial Basis Functions, Multi-Variable Functional Interpolation and Adaptive Networks, Royal Signals and Radar Establishment Malvern, United Kingdom.