

Sıkı Geçme Operasyonu için ANFIS ve Yapay Sinir Ağları Modellemesinin Matematiksel Model ile Karşılaştırılması

Comparison of ANFIS and Artificial Neural Network Modeling with Mathematical Model for Press-Fitting

Oğuzhan Şimsir, Ali Fuat Ergenç

Mekatronik Müh. / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

simsir@itu.edu.tr, ergenca@itu.edu.tr

Özetçe

Üretim sahalarında sıkı gecme operasyonları, ürün kalitesini etkileyen önemli bir operasyondur. Bu nedenle, birçok farklı yöntemle matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ancak, bu modellerde bilinmeyen faktörlerin hesaba katılması, geliştirilen modellerin sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle, güncel modelleme yöntemleri kullanılarak bu bilinmeyen faktörler veriler üzerinden hesaba katılarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmada, geleneksel matematiksel modelleme yöntemleri yanı sıra, yapay sinir ağları ve bulanık modelleme yöntemleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Test edilmiş olan üretimler eğitim modeli olarak kullanılmış ve diğer üretimler için doğruluğu kontrol edilmiştir. Ayrıca mevcut kural tabanlı sistem de değerlendirilmiş ve ürettiği sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda geleneksel matematiksel modelleme yöntemleriyle elde edilen sonuçların, yapay sinir ağları ve bulanık modelleme yöntemleriyle elde edilen sonuçlara göre gerçek çalışma koşullarında daha az doğruluk elde edildiği görülmüştür. Bu nedenlere güncel modelleme yöntemlerinin, sıkı geçme geçme operasyonlarında daha doğru modeller sağlayabileceği gösterilmiştir.

Abstract

Press-fitting operations in production areas are an important operation that affects product quality. Therefore, many mathematical models have been developed. However, many unknown factors cannot be taken into calculation in these models. Therefore, more accurate results can be obtained by taking these unknown factors into calculation using modern modeling methods.

In this study, calculations were made using artificial neural networks and fuzzy modeling methods as well as traditional mathematical modeling methods. Tested productions were used as a training model and their accuracy was checked by labeling method for other productions. In addition, the existing rule-based system was also evaluated and the results it produced were compared.

As a result of the calculations, it has been revealed that the results obtained with traditional mathematical modeling methods are less accurate than the results obtained with artificial neural networks and fuzzy modeling methods. Therefore, current modeling methods can be used to model press-fitting operations more accurately.

1. Giriş

Hareketli parçalar içeren birçok üründen; çamaşır makineleri, otomobiller, hidrolik presler ve oyuncaklar dahil hayatımızın her noktasında rulmanlar kullanılmaktadır. Bir rulmanın temel amacı iki yapı arasında yük ileterek, konumlandırma ve dönme özgürlüğü sağlamaktır.

Rulmanlar hareketli parçalar arasındaki sürtünme etkisini en aza indireyecek şekilde tasarlanırlar [1]. Rulmanlar genellikle iç ve dış halka denilen iki yapının arasında bilyalar olacak şekildedir. Bu halkalara parça montajı ise genellikle sıkı geçme yöntemi ile gerçekleştirilir [2].

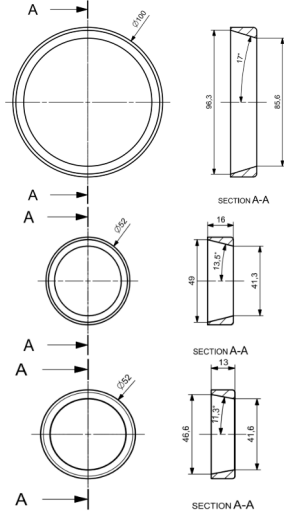
MESS Teknoloji Merkezi'nde bulunan üretim hattında dışlı kutusu üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu üretim sürecinde, çelik rulman dış halkaları (Şekil 1), eloksallı alüminyum gövde (Şekil 2) üzerine servo pres ile montajlanmaktadır. Bu operasyon sırasında piezoelektrik kuvvet sensörü ile yapılan baskı ve rulman dış halkasının yatağa girişi ölçülmektedir (Şekil 3).

Bu montaj sırasında bazı sorunlar gözlemlenmiştir.

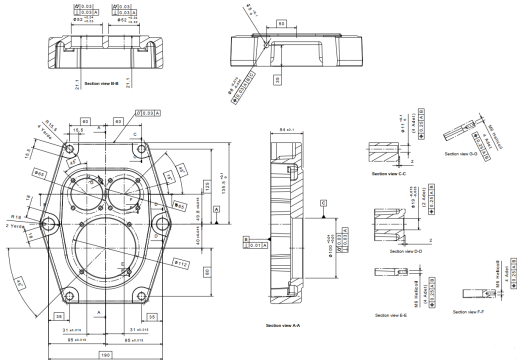
1. Dış halkanın yatağa istenen seviyeden az girmesi, dışlı kutusunun montajlanmasına engel olmaktadır.
2. Dış halkanın yatağa istenen seviyeden çok girmesi bilyaların yeteri kadar dış halka ile temas edememesine ve test sırasında fazladan titreşime sebep olmaktadır.
3. Dış halka montajı sırasında düşük kuvvet gözlemlenmesi, iki parça arasında yeteri kadar girişim (interference) olmamasına, bu nedenle de dış halkanın yataktan daha kolay çıkabilmesine neden olmaktadır.

4. Belirli bir kuvvetin üzerini ise servo pres karşılayamamakta ve işlem tamamlanmadan operasyon sonlanmaktadır.

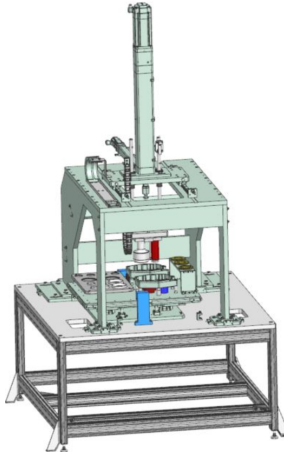
Sıkı geçme operasyonu parçaya yüksek seviyelerde kayma verilmesi ve şekil değiştirme gerilmesi uygulamaktadır [3]. Rulman montajı zor olduğu kadar, sorunlu rulmanların sökülmesi de bir o kadar zordur. Parçalarda bozulma yarattığı için de ge-



Şekil 1: Rulman halkaları



Şekil 2: Dişli Kutusu Teknik Resim



Şekil 3: Pres CAD çizimi

Slocum 1997 yılında yayınlamış olduğu kitabında sıkı geçme modellemesi ile detaylı bir matematiksel model sunmuştur. Bu matematiksel modelde, parça tipi, etkileşim mesafesi, çap, sürtünme katsayısı gibi bir çok parametre ele alınmıştır [5]. Bu hesaplamalardaki birçok fiziksel parametre hakkında bilgiler elimizde mevcuttur. Ancak modelleme sırasında sürtünme katsayısı değerine de ihtiyacımız olacaktır. Sürtünme katsayısı, malzeme sertliği, pürüzlülük, yağlama miktarı ve tipi, sıcaklık, nem gibi bir çok farklı parametreden etkilenen bir yapıya sahiptir. Benuzzi ve Donzella 2004 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme katsayısı, deneysel olarak hesaplamışlardır [6]. Wang ve ekibi 2017 yılında yayınladıkları "A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts" başlıklı yayınlarında, bir sıkı geçme operasyonu için, çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada F_x grafiği için analitik bir tahminleme geliştirmişlerdir [7]. 2015 yılında You ve ekibi "Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force" başlıklı çalışmalarında kalite odaklı bir modelleme çalışması yapmışlardır [8].

Bu çalışma için mevcut sistemden her iki kapak için ayrı ayrı olmak üzere, toplam 2430 adet çevrimin verisi toplanmıştır. Mevcut sistemde OK ve NOK etiketlemeleri sensörden alınan bilgilerle otomatik olarak gerçekleştirilmesine rağmen, bu etiketlemeler kural bazlıdır. Doğru olduğundan emin olunan OK çevrimler üzerinden bulanık modelleme ve yapay sinir ağları ile modelleme yöntemleri ile hesaplamalar yapılacaktır. Doğruluğu kanıtlanmış örnekler ile diğer sonuçların farkları incelenecektir. Hesaplamalar arasındaki hatalar değerlendirilecektir. Ardından da tüm çevrimler için doğru etiketlemeler gerçekleştirilecektir.

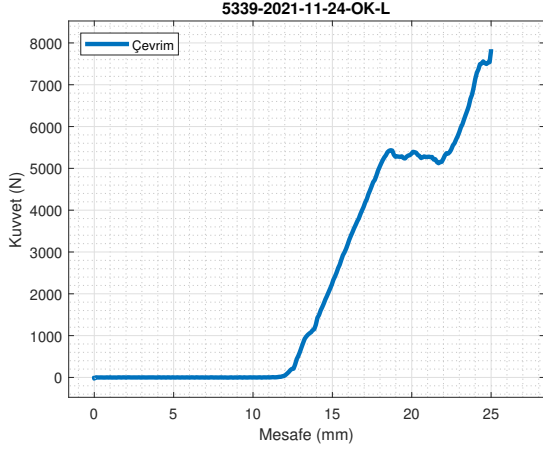
2. Sistem Modelleme

Sıkı geçme operasyonu için öncelikle, toplanan çevrim verileri arasından, dişli kutusu testi yapılabilecek uygun olan çakma işlemlerinden biri seçilmiştir. MEXT Model Fabrika içerisinde, üretilen dişli kutuları, sürekli olarak sökülüp yeniden montajı yapılmaktadır. Bu da malzemelerde zamanla bozulmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle modeller oluşturulurken, öncelikle eski tarihli olan çevrimler tercih edilmiştir. Ardından bu modeller arasından hat sonu testi yapılabilecek uygun olduğu görülenler içerisinden tercih yapılmıştır. Sistem modellemek ve karşılaştırmak için seçilen çevrim 24 Kasım 2021 tarihli bir çevrimdir. Çevrimin kuvvet-yol grafiği Şekil 4'teki gibidir. Bu grafikte, lineer esnek davranış ve üstel plastik bozulma bölgeleri net bir şekilde görülebilmektedir [12].

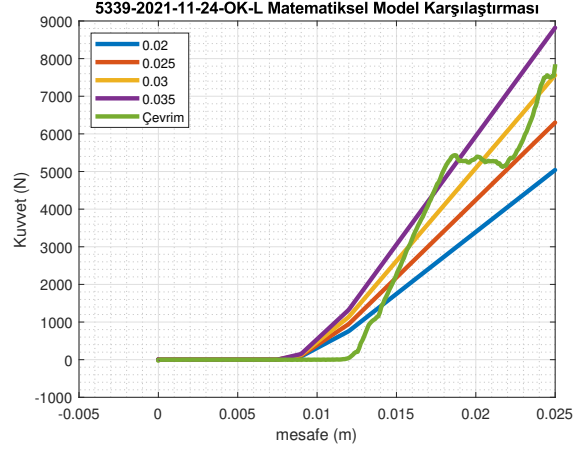
2.1. Matematiksel Modelleme

Sistemin matematiksel modellemesinde, esnek davranış bölgesi modellenmiştir. Bu bölgenin hesaplanabilmesi için 3 ve 2 numaralı formüller [7] kullanılmıştır. Formülde Z giriş miktarını, r ortak çapını, r_1 rulman çapını, r_2 yatak dış çapını, f ise sürtünme katsayısını göstermektedir. Aynı zamanda formül sonucu malzeme özelliklerinden de etkilenmektedir. Rulman malzemesi 304 çelik iken, kasa ise alüminyum alaşımlı bir malzemedir (AlSi10Mg). Malzeme ile ilgili bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

leneksel yöntemlerle sökmek parçanın tekrar kullanımını riske atmaktadır [4].



Şekil 4: 5339-2021-11-24-OK-L Çevrimi için F-X grafiği



Şekil 5: 5339-2021-11-24-OK-L-Matematiksel Model Karşılaştırması

$$P = \frac{Z}{\frac{r}{E_{steel}} * \left(\frac{r^2 + r_{in}^2}{r^2 - r_{in}^2} + \mu_{steel} \right) + \frac{r}{E_{alu}} * \left(\frac{r_{out}^2 + r^2}{r_{out}^2 - r^2} + \mu_{alu} \right)} \quad (1)$$

$$F = 2\pi r P L f \quad (2)$$

Tablo 1: Malzeme Özellikleri

Malzeme Tipi	Young Modülü(GPa) (E)	Poisson Oranı (μ)
304 Çelik	193 [10]	0.33 [11]
AlSi10Mg	69 [9]	0.265 [11]

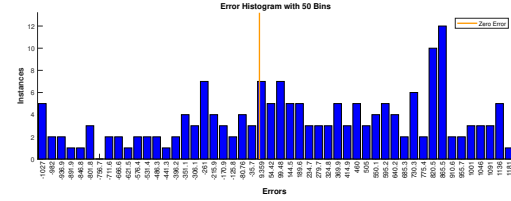
Dışli kutusunda rulman çakılan 3 adet yatak vardır. Rulmanlar farklı yüksekliklerde olduğu için 3 rulman da farklı zamanlarda kuvvete maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle hesaplama sırasında mesafe değeri her bir rulmanın, yatak ile etkileşime girmesi gereken noktadan başlatılacaktır. 3 farklı rulman için hesaplanan değerler, toplanarak, gereken kuvvet hesaplanmıştır. Girişim miktarı, iki malzeme arasındaki tolerans olan 0,03 mm alınmıştır. Bu miktar malzemeden malzemeye değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle, burada 0,02 mm ile 0,035 mm aralığı da bir bant oluşturmak amacıyla ayrıca gösterilmiştir. Hata hesaplaması ise 0,03 mm üzerinden yapılacaktır. Yatak dış çapı, yatak kısmının genişlemesini doğrudan etkilemektedir. Ancak, bu uygulama özelinde, yatak dış çapı düzgün değildir. Bu nedenle, yatak dış çapı için, en düşük olan bölge hesaba katılmıştır.

3 farklı çevrim için sonuçlar karşılaştırılmıştır. 5339-2021-11-24-OK-L (Şekil 5), 7002-2022-06-16-OK-L (Şekil 7), 7363-2022-10-13-NOK-R (Şekil 8) çevrimleri için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

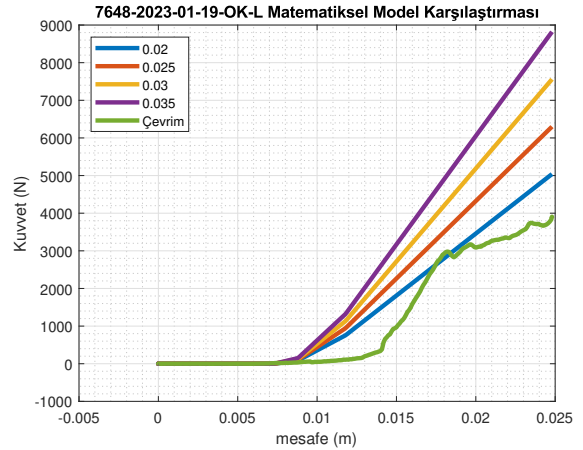
Bu sonuca göre hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE), sırasıyla 629,39, 1953.3 ve 2958.4 bulunmuştur.

NOK olan çevrimler için, bariz bir şekilde hata oranı yüksek çıkmaktadır. Hatalı pozitif sonuçlar için ise mevcut sistemde, belirli eşik değerlerine göre etiketleme yapıldığı için aynı söylememeyebilir.

Bu sonuçlara göre matematiksel model ile değerlendirme yapabilmek için, sonlu elemanlar yöntemi ile benzetimler yapıl-



Şekil 6: 5339-2021-11-24-OK-L Hata Histogramı

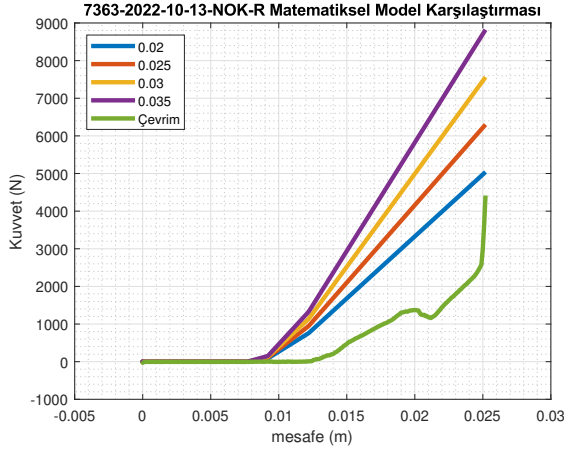


Şekil 7: 7648-2023-01-19-OK-L-Matematiksel Model

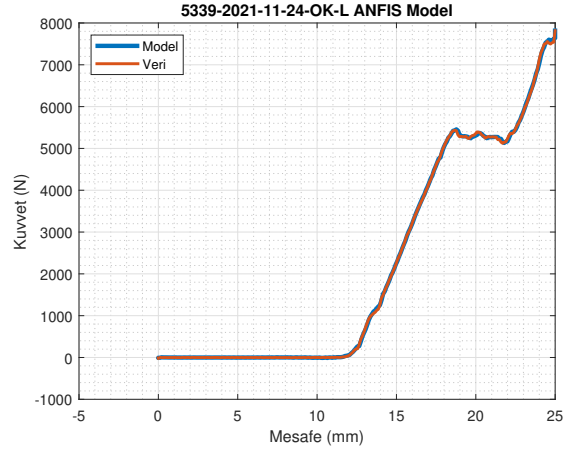
ması gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. Ancak, yağlama ve tolerans gibi değişken ve bilinmeyen parametreler sebebiyle çevrimler her zaman aynı davranmamaktadır.

2.2. ANFIS ile Modelleme

Bulanık modelleme için öncelikle sistemin giriş parametreleri, t anındaki mesafe ile t-1 anındaki mesafe ve kuvvet olarak alındı. Bu şekilde seçim yapılmış olmasının sebebi, baskı kuvvetinin

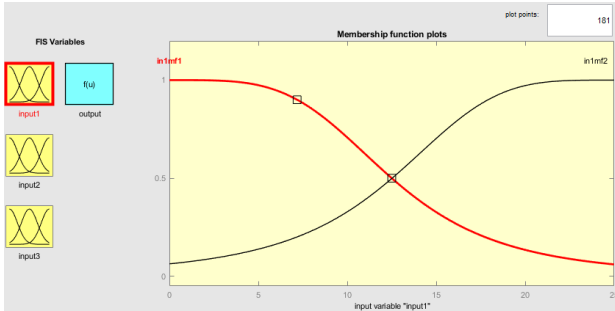


Şekil 8: 7363-2022-10-13-NOK-R-Matematiksel Model

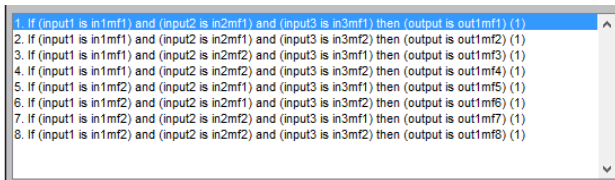


Şekil 11: 5339-2021-11-24-OK-L Bulanık Model

formül 2'den de görülebileceği üzere, malzemeye o an etki eden tüm kuvvetlere ve rulmanın yatağa ne kadar girdiğine bağlı olmaktadır.



Şekil 9: Bulanık Üyelik Fonksiyonları

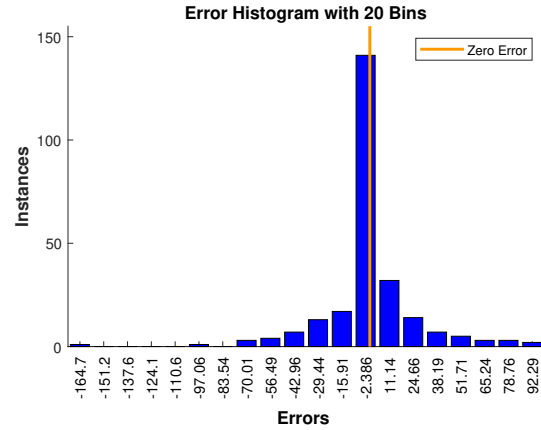


Şekil 10: Bulanık Kural Tablosu

Modelleme için Takagi-Sugeno modeli seçilmiştir. 3 giriş ve 1 çıkış olarak seçilen sistem modeli için diğer hesaplamalar bilgisayar tarafından gerçekleştirilmiştir. Üyelik fonksiyonları (Şekil 9) ve kural tablosu (Şekil 10) oluşturulmuştur.

Buna göre sistem yeniden çalıştırılmış ve öğretim modelinin nasıl cevap verdiği incelenmiştir (Şekil 11).

Bu sonuçlara göre eğitim modeli için RMSE 26,504 olarak hesaplanmıştır. Hata histogramı (Şekil 12) incelendiğinde ise, hataların genel olarak -90:+90 N arasına yığıldığı görülmektedir.

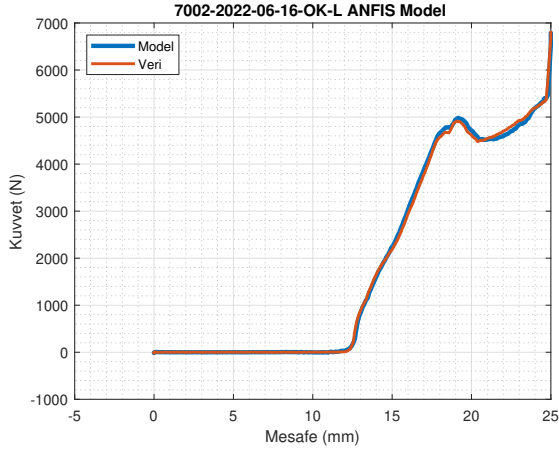


Şekil 12: Bulanık Model Hata Histogramı

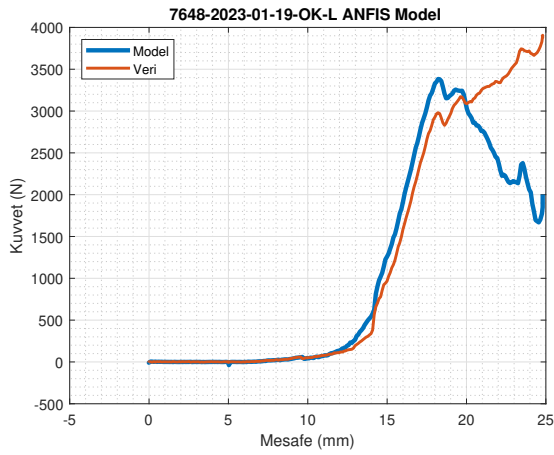
Bu model bazı farklı çevrimler ile de test edilmiştir. Öncelikle 7002-2022-06-16-OK-L çevrimi için bu model yeniden çalıştırıldığında cevap şekil 13'teki gibi olmuştur. Bu sonuç için RMSE 60,905 olarak hesaplanmıştır.

7648-2023-01-19-OK-L çevrimi için bu model yeniden çalıştırıldığında cevap şekil 14'teki gibi olmuştur. Bu sonuç için RMSE 588,24 olarak hesaplanmıştır. Bu çevrim mevcut sistem tarafından OK olarak işaretlenmiştir. Bu çevrim için, maksimum kuvvet değerinin olması gerekenden çok düşük olması sebebiyle, hatalı sayılması gerektiği söylenebilir. Modelin de çok yüksek hata vermesi ile birlikte bunun bir hatalı pozitif olduğu sonucu çıkarılabilir.

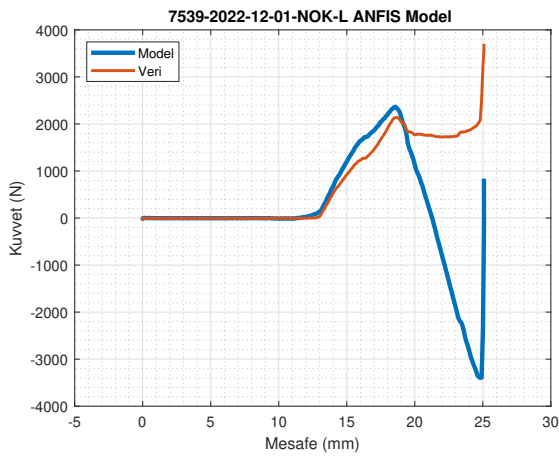
7539-2022-12-01-NOK-L çevrimi için bu model yeniden çalıştırıldığında cevap şekil 15'teki gibi olmuştur. Bu sonuç için RMSE 1588,4 olarak hesaplanmıştır. Mevcutta kural bazlı çalışan sistem, bu çevrimi NOK olarak etiketlemiştir. Hesaplanan bulanık model, bu çevrim için çalıştırıldığında bariz bir şekilde, model olması gerekenden çok uzak bir sonuç vermiştir.



Şekil 13: 7002-2022-06-16-OK-L Bulanık Model



Şekil 14: 7648-2023-01-19-OK-L Bulanık Model



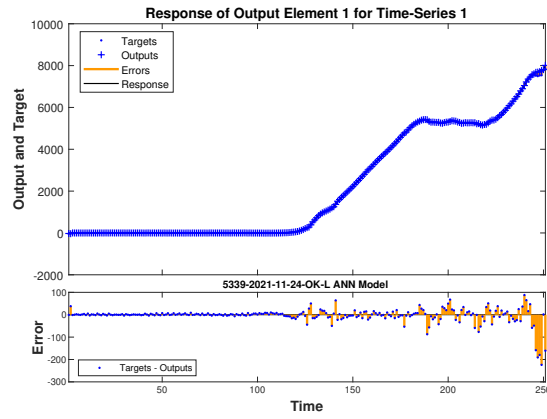
Şekil 15: 7539-2022-12-01-NOK-L Bulanık Model

2.3. Yapay Sinir Ağları ile Modelleme

Yapay sinir ağları modellemesi için, yine 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi eğitim için seçildi. Sistemin modellenmesi için NARX (Nonlinear Otoregresif Eksojen) yapı kabul edildi [13]. ANFIS modelinde olduğu gibi, bu yapının seçilmesinin sebebi, gereken kuvvetin hesaplanmasında, sürtünme ve anlık kuvvetlerin etkisini hesaba katabilmektir.

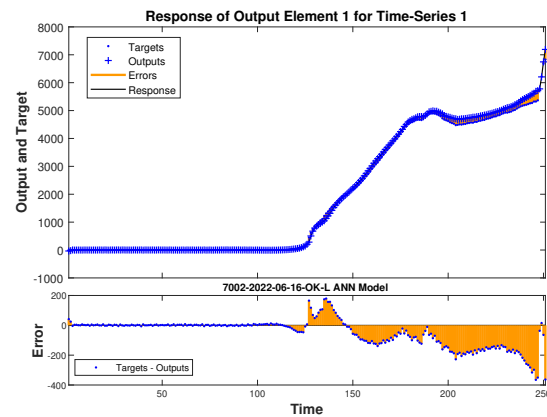
Eğitim fonksiyonu olarak da görece hızlı ve daha kararlı sonuçlar veren Levenberg-Marquardt fonksiyonu tercih edilmiştir [14]. Sistemin giriş parametreleri, t-1 anındaki mesafe ve kuvvet olarak alındı. Ardından bilgisayar aracılığı ile modelendi. 164 iterasyon ile model tamamlandı.

Eğitilen sistem modeli, öncelikle eğitim veri seti ile çalıştırıldı. Bu çalışma sonrasında RMSE değeri 33.09 olarak hesaplandı (Şekil 16).



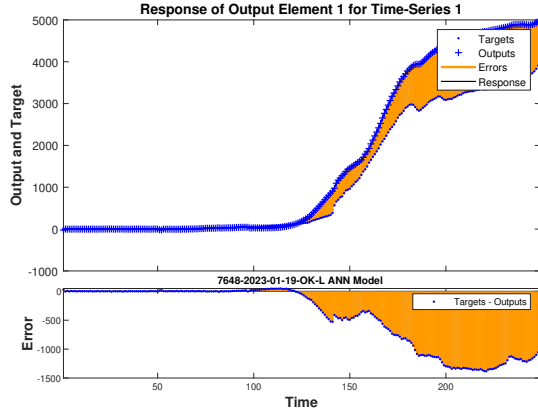
Şekil 16: 5339-2021-11-24-OK-L Yapay Sinir Ağları Modeli

Ardından test amacıyla başka çevrimler ile model çalıştırıldı. 7002-2022-06-16-OK-L çevrimi ile çalıştırıldığında, RMSE değeri 105.1 olarak hesaplandı (Şekil 17).



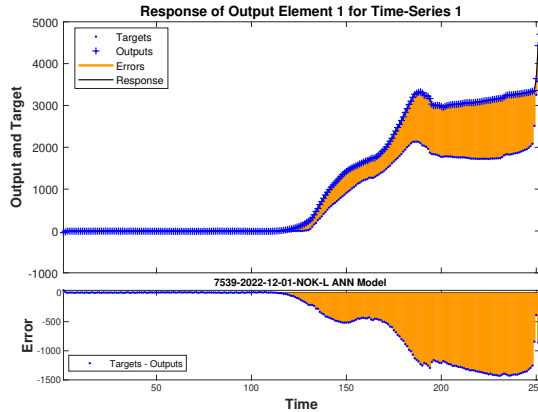
Şekil 17: 7002-2022-06-16-OK-L Yapay Sinir Ağları Modeli

7648-2023-01-19-OK-L çevrimi ile yapılan çalışma sonucunda görece daha yüksek bir hata hesaplandı. RMSE 687.11 oldu. Ayrıca grafik de incelendiğinde hatalı pozitif bir sonuç olduğu değerlendirildi ANFIS ile hesaplanan modelde olduğu gibi yapay sinir ağları ile hesaplanan model için de söylenebilir (Şekil 18).



Şekil 18: 7648-2023-01-19-OK-L Yapay Sinir Ağları Modeli

Sistem tarafından hatalı ürün olarak etiketlenen 7539-2022-12-01-NOK-L çevrimi için model yeniden çalıştırıldı. RMSE 714.5 gibi bir değer bulundu. Belirgin bir şekilde hatalı olan bu çevrim için hatalı üretim etiketlemesi yapay sinir ağları ile hesaplanan model ile doğrulanmış oldu (Şekil 19).



Şekil 19: 7539-2022-12-01-NOK-L Yapay Sinir Ağları Modeli

3. Karşılaştırma

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, matamatiksel modelin birçok farklı bilinmeyene bağlı olması sebebiyle gerçeğe yaklaşımadığı görülmektedir. Sürtünmenin ve malzeme toleransların değişmesi sebebiyle, sonuçların öngörülebilmesi zor olmaktadır. Diğer taraftan matamatiksel modellemede elastik ve plastik bölgeler arasında nasıl geçiş olacağı, yine bu bilinmezler dolayısıyla ko-

laylıklı hesaplanamayacaktır. Sonlu elemanlar metodu gibi yöntemler de genel bir fikir verecek olsa da her bir bilinmeyen için, ayrı hesaplamalar yapmayı gerektirecektir.

Yapay sinir ağları ve bulanık modelleme yöntemleri ile bu bilinmeyenlerin etkisi de modele dahil edilebilmektedir. Bir önceki durum bilgisinden de yararlanan bu modeller ile sistemin davranışı daha kolay izlenebilmektedir. Hesaplanan modelden çok uzak davranan çevrimler için, doğrudan doğruya hatalı üretim gerçekleştirildiği söylenebilir. Mevcut sistemde kural bazlı etiketlemeden kaynaklanan hatalı pozitif etiketlemeler ile bu modeller ile ayrıştırılabilmektedir.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Buradan çıkarılan sonuçların mevcut sisteme entegre edilmesi ile hatalı üretim oranı azaltılabilir. Mevcut üretimde karşılaşılan ve revizyon gerektiren üretimler daha kolay tespit edilebilir. Presleme operasyonunun malzeme için yıkıcı sonuçları olması sebebiyle, hatalı ürünlerin erken tespit edilebilmesi ve ayrıştırılması sayesinde, hem gereksiz üretimin önüne geçilebilir hem de hurda ürün miktarı azaltılabilir.

5. Teşekkür

Bu bildirinin hazırlanmasında bana destek olan kıymetli eşim Öykü Can Şimşir ve sahadaki çalışmalar için destek olan iş arkadaşlarım Aytaç Pürtaş, Hasan Uyaniker ve Orkun Seçer'e teşekkür ederim.

6. Kaynakça

- [1] B. J. Hamrock, "Rolling-Element Bearings" NASA Technical Reports Server (NTRS), Jun. 01, 1983.
- [2] SKF Group, Rolling bearings. SKF, 2018.
- [3] S. Niu, "Numerical Simulation of Interference Assembly of Shaft and Sleeve," International Journal of Engineering and Advanced Research Technology (IJEART), vol. 1, no. 2, pp. 35-38, Aug. 2015.
- [4] F. Wang, S. Zhang, H. Shuaifei, and H. Shu, "The Non-destructive Disassembly Method of Interference Fit of Sleeve-Base Structure in the Case of Cooling Excitation," in Smart innovation, systems and technologies, Springer Nature, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-9271-9_38.
- [5] A. H. Slocum, Precision Machine Design. Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [6] D. Benuzzi and G. Donzella, "Prediction of the press-fit curve in the assembly of a railway axle and wheel," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 218, no. 1, pp. 51-65, Jan. 2004, doi: 10.1243/095440904322804439.
- [7] X. Wang, Z. Lou, and C. Xu, "A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts," Journal of Materials Processing Technology, vol. 250, pp. 16-24, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.022.
- [8] B. You, Z. Lou, Y. Luo, Y. Xu, and X. Wang, "Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting

Force,” International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2015, pp. 1-10, Jan. 2015, doi: 10.1155/2015/823019.

- [9] EOS GmbH, ”EOS Aluminium AlSi10Mg,” Material Data Sheet, May 2014, [Online]. Available: bit.ly/3JNo7yF
- [10] thyssenkrupp, ”Stainless Steel 1.4301-304,” Material Data Sheet, Jan 2018, [Online]. Available: bit.ly/3rhtOyw
- [11] R. T. Barrett, Fastener Design Manual. NASA Reference Publication, 1990. friction
- [12] H. D. Young and R. A. Freedman, Üniversite Fiziği Cilt 1, 12th ed., p. 368-369. Pearson, 2009.
- [13] A. Tatli and S. Kahvecioglu, ”Zaman Serilerinde NARX Sinir Ağları Modeliyle Uçuşa Elverişlilik Süresinin Kes-tirimi,” ResearchGate, Dec. 2016
- [14] H. P. Gavin, ”The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems,” Department of Civil and Environmental Engineering Duke University, Nov. 2022.