



Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Yapay Zeka Destekli Kısa Dönemli Kestirimi

Müslüm KUZU^{1, a}, Serhat Berat EFE^{2, b}

¹Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

²Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doęa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

^aORCID:0009-0009-1927-0792; ^bORCID: 0000-0001-6076-4166

✉ Sorumlu Yazar: muslumkuzu@ogr.bandirma.edu.tr

Geliř tarihi: 16/06/2023

Kabul tarihi: 11/08/2023

Özet: Elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması beraberinde daha verimli sistemlerin kullanımı gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte birçok alanda yarı iletken malzemelerin kullanılması, güç sistemlerinde doğrusal olmayan karakterli yüklerin artmasına neden olmuştur. Söz konusu yüklerin güç sistemi üzerindeki bozucu etkileri filtreleme yolu ile giderilmekle birlikte, önceden bilinen önlem alınması sistem işletme güvenliği açısından büyük fayda sağlayacaktır. Bu çalışmanın temel motivasyonu bu kapsam üzerine tesis edilmiştir. Çalışmada öncelikle bir veri seti oluşturulması amacıyla MATLAB/Simulink platformunda bir güç sistemi tasarlanmış, bu sistemde ortaya çıkan harmonik bozulmalar Hızlı Fourier Dönüşümü aracılığıyla tespit edilmiştir. Analiz vasıtasıyla oluşturulan veri seti, yapay sinir ağları modeli ile işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve grafikler üzerinden sistemin başarımı incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Harmonikler, Güç Sistem Analizi, Kısa Dönemli Kestirim, Yapay Zekâ.

Artificial Intelligence Based Short-Term Estimation of Harmonics in Power Systems

Abstract: The increasing demand for electrical energy has led to the need for more efficient systems. With the advancement of technology, the use of semiconductor materials in many areas has led to an increase in nonlinear loads in power systems. Although the disturbing effects of these loads on the power system can be eliminated by filtering, taking precautions by knowing in advance will be of great benefit in terms of system operational safety. The main motivation of this study is based on this scope. In the study, firstly, a power system is designed in MATLAB/Simulink platform in order to create a data set and the harmonic distortions occurring in this system are detected by means of Fast Fourier Transform. The data set generated by the analysis was processed with an artificial neural network model. The performance of the system is analyzed through the obtained results and graphs.

Keywords: Harmonics, Power System Analysis, Short Term Estimation, Artificial Intelligence.

1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte yüklerin çeşitlenmesi, elektrik enerjisi kalitesinin bozulmasına neden olan çeşitli teçhizatların kullanıma girmesine yol açmıştır. Elektrik enerjisinin iletilmesi ve dağıtılmasında, enerjinin kesintisiz ve kaliteli bir şekilde son tüketiciye ulaşması amaçlanmaktadır. Kaliteli enerji kavramı ile enerjinin sabit frekanslı, sabit genlikli ve sinüzoidal yapıda olduğu anlatılmaktadır. Ancak sisteme bağlı çeşitli yükler nedeniyle akım ve gerilim dalga şekillerinde tam sinüzoidal yapının sağlanması çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Doğrusal olmayan sistem elemanları, harmonik olarak tanımlanan bozulmalara ve tüketiciye düşük kaliteli enerji ulaşmasına neden olur.

Harmonikler elektriksel anlamda bozulmayı ifade etmektedir. Harmonik bozulmanın toplamı (THD) belirtilen sınırı aşması elektriksel olumsuzluğa neden olmaktadır.

Harmonikler, çeşitli elektrikli ekipmanların normal çalışmasını olumsuz etkiler. Harmonikler güç sistemlerinde enerji kayıplarına neden olur, aynı zamanda, güç sistemlerinde gürültü, aşırı gerilim ve aşırı ısınmaya da neden olur.

Elektrik enerji kalitesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde oldukça geniş bir yelpazede yer bulmaktadır. Bu çalışmalar temelde harmoniklerin filtrelenmesi üzerine yoğunlaşsa da özellikle son yıllarda akıllı sistemlerin gelişme göstermesi ile yapay zekâ uygulamalarının işleme katılmasını arttırmıştır. Bu sayede harmoniklerin sınıflandırılması, belirlenmesi, kestirimi gibi birçok alanda çalışmalar ortaya konmuştur.

Harmonik bileşenlerinin etkin RMS değerlerinin ana bileşenin etkin değerine oranı THD olarak adlandırılır ve dalga şeklindeki yüzdelik bozulma olarak ifade edilir. Bu değer matematiksel olarak akım ve gerilim için sırasıyla 1 ve 2'deki gibi tanımlanır.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)} \quad (1)$$

$$THD_V = \frac{1}{U_1} \sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)} \quad (2)$$

Harmonik analizi için Hızlı Fourier dönüşümü (HFD) [1] yaklaşımı, hızlı cevap vermesi nedeniyle kullanılmakla birlikte, son yıllarda, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler yapay zekâ modellerinin uygulamadaki ağırlığını artırmıştır [2], [3].

Bu çalışmada güç sistemlerinde oluşacak harmoniklerin, öncesinde doğru bir şekilde kestirimi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, MATLAB/Simulink platformu altında doğrusal olmayan bir yükü besleyen bir güç sistemi modellenmiştir. Bu model doğrusal olmayan yüklü güç sistemi için analiz edilmiş ve oluşan harmonikler kaydedilerek bir harmonik veri seti oluşturulmuştur. Daha sonra bu veri seti eğitim ve test setleri olarak ayrılmış, yapay sinir ağları modeli yardımı ile eğitimin ardından test verileriyle kestirim yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Güç sistemleri, dinamik çalışma karakteri taşıyan sistemlerdir. Bu durum, sistemin işletilmesi esnasında farklı yapılarla problemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Bu sorunların başında gelen enerji kalitesi bozulmaları, eliminasyon yaklaşımları ile aktif ve pasif filtreler kullanılarak giderilmektedir. Ancak bu yaklaşımlar, bozulmalar oluşuktan sonra alınan önlem kategorisinde değerlendirilmektedir. Söz konusu bozulmaların kestirimi halinde önceden alınabilecek önlemler sayesinde gerek daha hassas koruma gerekse daha düşük maliyetli sistem tesisi mümkün olabilecektir.

Yapay zekâ ve makine öğrenme sistemlerindeki gelişmeler sayesinde, güç sistemi problemleri için kestirim çalışmaları ivmelenerek artmış ve zaman içerisinde farklı kestirim algoritmaları geliştirilmiştir [4]–[10]. Bu algoritmalarından biri olan NARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs) modeli, zaman serisi tahmini ve öngörüsü için kullanılan bir tür sinir ağı modelidir. Doğrusal olmayan ve dinamik sistemlerle çalışılırken oldukça etkili sonuçlar alınabilmesine olanak tanımaktadır.

NARX modeli, hedef değişkenin gecikmeli değerlerine ek olarak dışsal girdileri de dahil edip geleneksel otoregresif (AR) modelinin genişletilmiş versiyonu olarak tanımlanabilir. Bu yapıya kavuşması sayesinde model, hedef değişken ile dışsal girdiler arasındaki doğrusal olmayan bağımlılıkları yakalayabilir.

NARX modelinin mimarisi tipik olarak otoregresif (AR) bileşen ve dışsal girdi bileşeni olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Otoregresif (AR) bileşen, hedef değişkenin gecikmeli değerlerini girdi olarak kullanılıp hedef değişkenin zamansal bağımlılıklarını yakalar. AR bileşeni, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) veya Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU) ağları gibi tekrarlayan sinir ağı (RNN) mimarileri kullanılarak uygulanabilir [11]–[13]. Bu ağlar zamansal bağımlılıkları modellemek için çok uygundur ve uzun vadeli bağımlılıkları etkili bir şekilde ele alabilir [14].

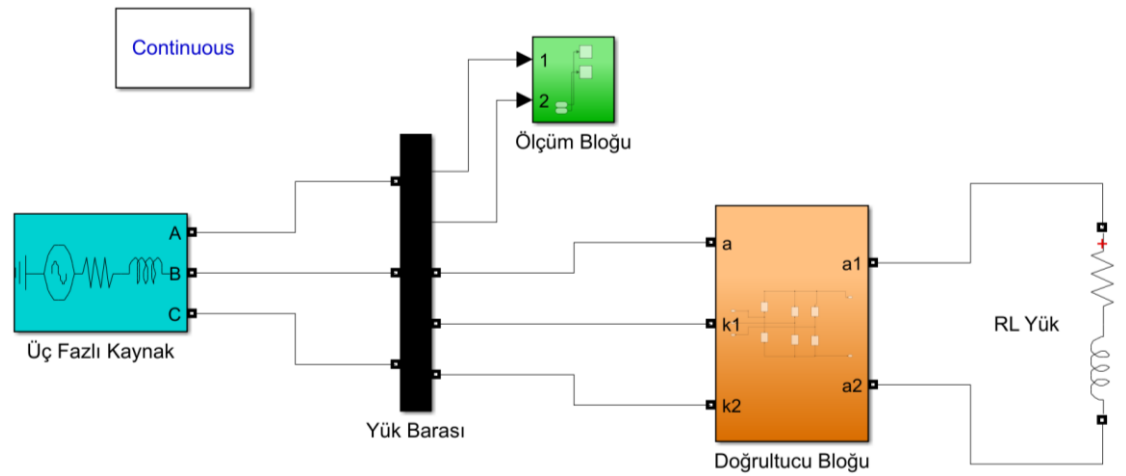
Dışsal (eXogenous) girdi bileşeni ise hedef değişken üzerinde etkisi olduğuna inanılan dışsal girdileri içerir. Dışsal girdiler, hedef değişkenin kendisinden etkilenmeyen, zamanla değişen değişkenlerdir. Bu girdiler dış değişkenler, çevresel koşullar veya diğer ilgili özellikler gibi faktörleri içerebilir. Dışsal girdi bileşeni tipik olarak ileri beslemeli sinir ağları veya tam bağlı katmanlar kullanılarak uygulanır.

Eğitim aşamasında NARX modeli, hedef değişkenin ve dışsal girdilerin bilindiği geçmiş veriler kullanılarak eğitilir. Model, hem hedef değişkenin hem de dışsal girdilerin geçmiş değerlerine dayanarak hedef değişkenin gelecekteki değerlerini tahmin etmeyi öğrenir. Eğitildikten sonra NARX modeli, hedef değişkenin ve dışsal girdilerin geçmiş değerlerini modele girdi olarak sağlayıp tahminler yapmak için kullanılabilir. Model daha sonra gelecek zaman adımları için hedef değişkenin tahmini değerlerini üretir.

Genel olarak, NARX modeli, özellikle hedef değişken ile dışsal girdiler arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı ve dinamik olduğu durumlarda, zaman serisi tahmini için güçlü bir araçtır. NARX modeli, hem hedef değişkenin hem de dışsal girdilerin gecikmeli değerlerini dahil ederek karmaşık örüntüleri yakalayabilir ve doğru tahminler yapabilir [15].

Güç kalitesi sorunlarının uygun şekilde yönetilmesinde en önemli bileşenlerin başında harmoniklerin tespiti gelmektedir [16], [17]. Güç sistemleri dinamik yapıda olduğu için harmonikler zaman içinde sürekli olarak değişir. Bu nedenle sistem, harmonikler bakımından sürekli izlenmelidir. Öte yandan, yüksek maliyetler nedeniyle güç sistemindeki her noktayı izlemek için analiz veya ölçüm cihazları kullanmak her zaman mümkün değildir. Bu durumda yapay zekâ çözümleri devreye girmekte ve ölçüm-analiz açısından kolaylık sağlamaktadır.

Bu çalışmada, güç sistemlerinde enerji kayıpları ve bozulmalara sebep olan harmoniklerin kestirimi için NARX algoritmasından yararlanılmıştır. Bu kapsamda öncelikle, bir veri seti oluşturulması amacıyla MATLAB/Simulink platformu altında endüktif yükü besleyen bir güç sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistem şekil 1’de, sistem parametreleri ise tablo 1’de verilmiştir.



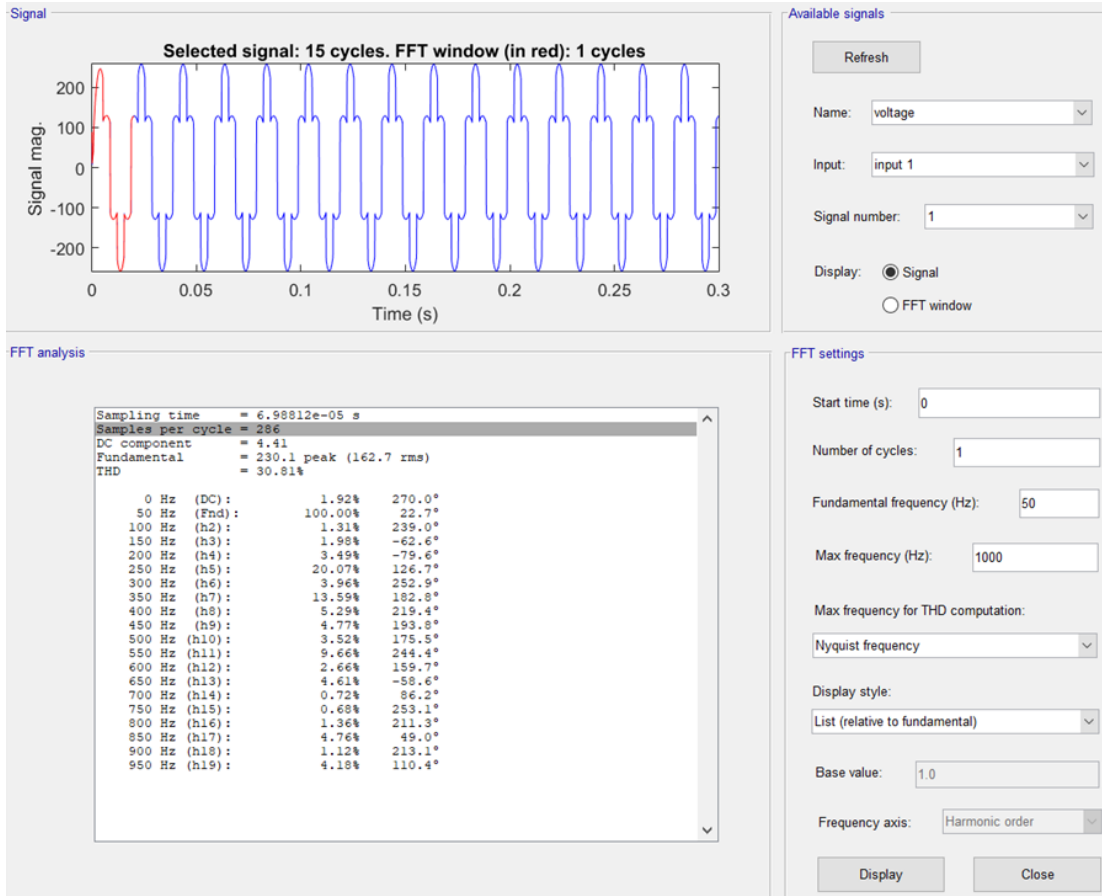
Şekil 1. Endüktif yüklü güç sistemi

Tablo 1 Sistem parametreleri

Parametreler	Değer
Kaynak Gerilimi	380V
Kaynak Frekansı	50 Hz
Yük Reaktif Gücü	100 VAr
Yük Aktif Gücü	10 kW

Güç sistemi tasarlandıktan sonra elde edilen harmonik verilerin belirlenmesi için HFD analiz modelinden yararlanılmıştır. Bu modül, tasarlanan modeldeki powergui bloğu içerisinde bulunmaktadır.

olup, ilgili analiz bu bölüm üzerinden gerçekleştirilmiştir. Gerilim dalgası için HFD analiz sonuçları şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan sistemde gerilime ait HFD sonuçları

Şekilden görüleceği üzere, gerilim dalgası %30,81 seviyesinde THD oluşmaktadır. IEEE 519-2014 standardına göre güç sistemi gerilim harmonikleri için sınır değerler tablo 2’de verilmiştir [18].

Tablo 2 Gerilim Harmonikleri Sınır Değerleri (IEEE 519-2014)

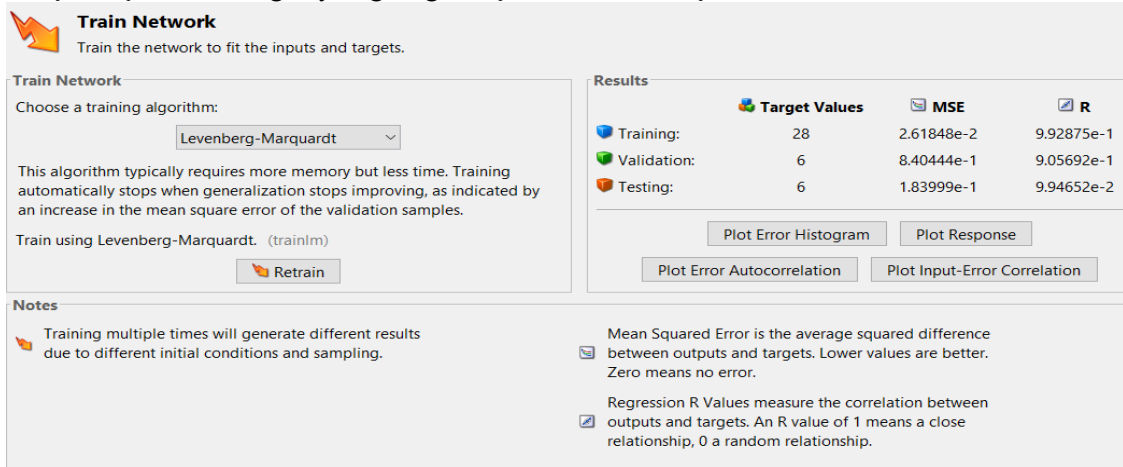
Gerilim Seviyesi	Bağımsız Harmonikler (%)	Toplam Harmonik Bozulma (%THD)
$V \leq 1$ kV	5	8
$1\text{kV} < V \leq 69$ kV	3	5
$69\text{kV} < V \leq 161$ kV	1,5	2,5

Standart değerler incelendiğinde mevcut sistemde gerilim harmonik seviyelerinin gerek bireysel gerek THD bakımından oldukça yüksek olduğu sonucuna ulaşılır.

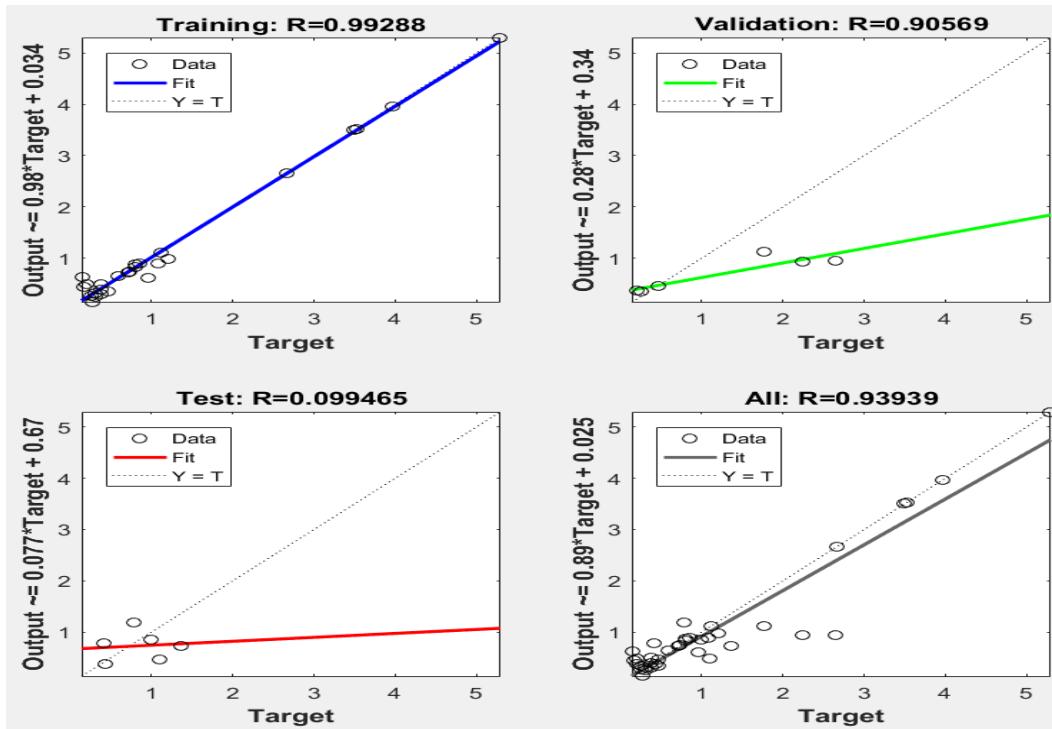
3. Bulgular

Bu çalışmada tasarlanan güç sistemindeki harmoniklerin kestirimi için NARX modeli tercih edilmiştir. NARX ağının eğitim işlemine Levenberg-Marquart algoritması kullanılarak başlanmıştır. NARX ağının performansı, yapılan işlemlerin çıktıları ve hedeflerin kıyaslanıp arasındaki ortalama kare farkının ifade edilmesini kapsayan Mean Square Error (MSE) yaklaşımı ile test edilmektedir. Yapılan kestirim sonucunda elde edilen değerler düşük ise başarılı olduğu, sıfır ise hatanın hiç olmadığı anlamına gelmektedir. Eğitim, performans ve test işlemleri tasarlanan modelden elde edilen verilerin kullanılması

yoluyla oluşturulan veri setinin modele giriş olarak tanımlanması ve eş zamanlı olarak hedef değerlerinin belirlenmesi ile başlatılmıştır. Elde edilen veriler grafikler ve tablolarla gösterilmiştir. Ağın eğitim işlemi şekil 3'te, regresyon grafiği ise şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. NARX modelinin eğitimi



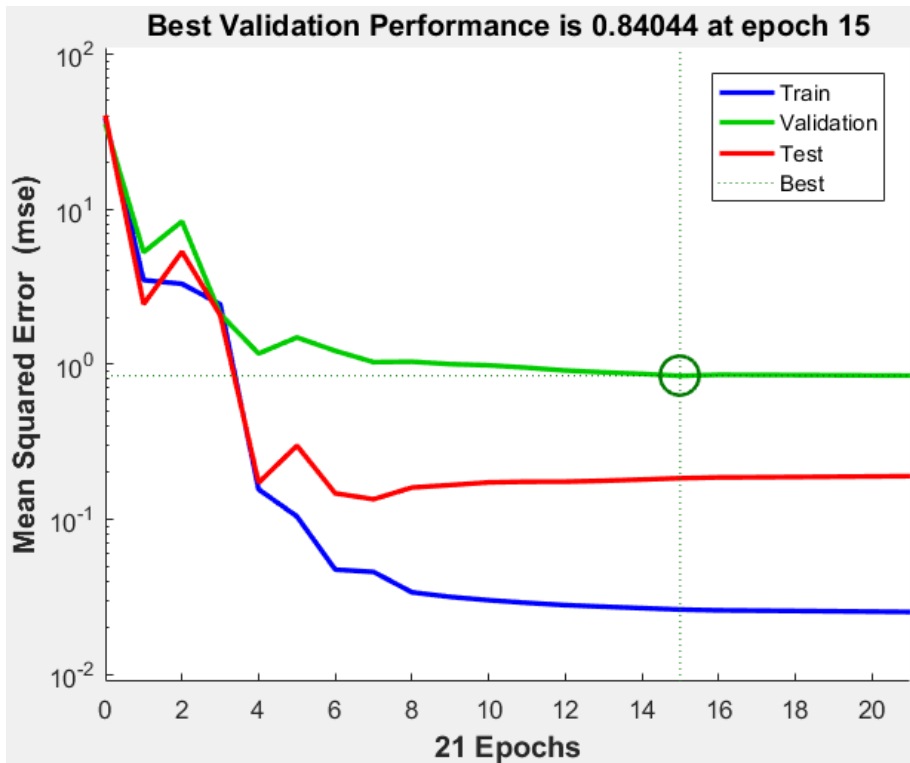
Şekil 4. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği

NARX modelinin eğitim, doğrulama ve test değerleri tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. NARX modelinin eğitim, doğrulama ve test değerleri

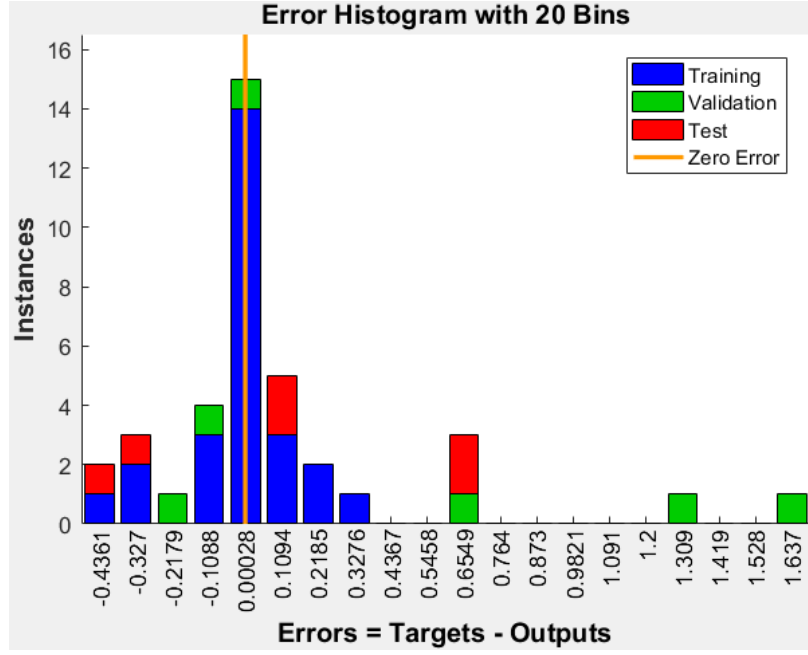
Veri Seti	Nöron Sayısı	MSE	REGRESYON
%70 Eğitim	10	0.0261848	0.99288
%15 Doğrulama	10	0.840444	0.90569
%15 Test	10	0.183999	0.099465

Çıktılar ve hedefler arasındaki ilişkiyi sonuçlandırmak için eğitim, test ve doğrulama analizi yapılır. Regresyon parametresi ve hata oranı, eğitim işleminin başarı seviyesini göstermektedir. Hedeflenen değerler için eğitim değeri 0.99288 ve test değerinin 0.0994652 olduğu, doğrulama değerinin 0.905692 olduğu ve bu değerlerin ise 1'e yakınsadığı tespit edilmiştir. Regresyon sonuçlarının genel olarak 0.9'a eşit ve büyük olması, değerler arasındaki bağlantının uygun ve sonucun başarılı olduğunu anlamını taşımaktadır. R değerleri 0.9'dan büyükse gerçek ve kestirim değerleri arasındaki uyuşmanın tam, 0.8 ile 0,9 arasındaki değerlerde olması durumunda uygun ,0,65 ile 0,80 arasında ise kabul edilebilir, 0,65'in altında ise zayıf olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Şekil 5'te MSE performans grafiği verilmiştir.

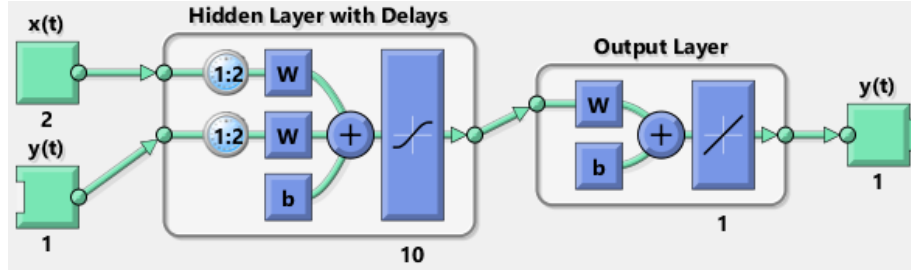


Şekil 5. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği

Eğitim 21. İterasyonda tamamlanmış ve 15. iterasyonda en düşük MSE değeri elde edilmiştir. En iyi doğrulama performansının 0.84044 olduğu görülmektedir. Eğitimin daima aşağı yönde olması sistemin öğrenme performansının iyi olduğunu göstermektedir. Test ve doğrulama değerlerinin belirli bir noktadan sonra birbirine yakın devam etmesi de eğitimin iyi bir doğrulama gerçekleştirdiğini ifade etmektedir. Şekil 6'da hata histogramı, şekil 7'de NARX ağ modelinin yapısı verilmiştir.



Şekil 6. Zaman serisi hatalarının histogramı



Şekil 7 NARX Ağ Modelinin Yapısı

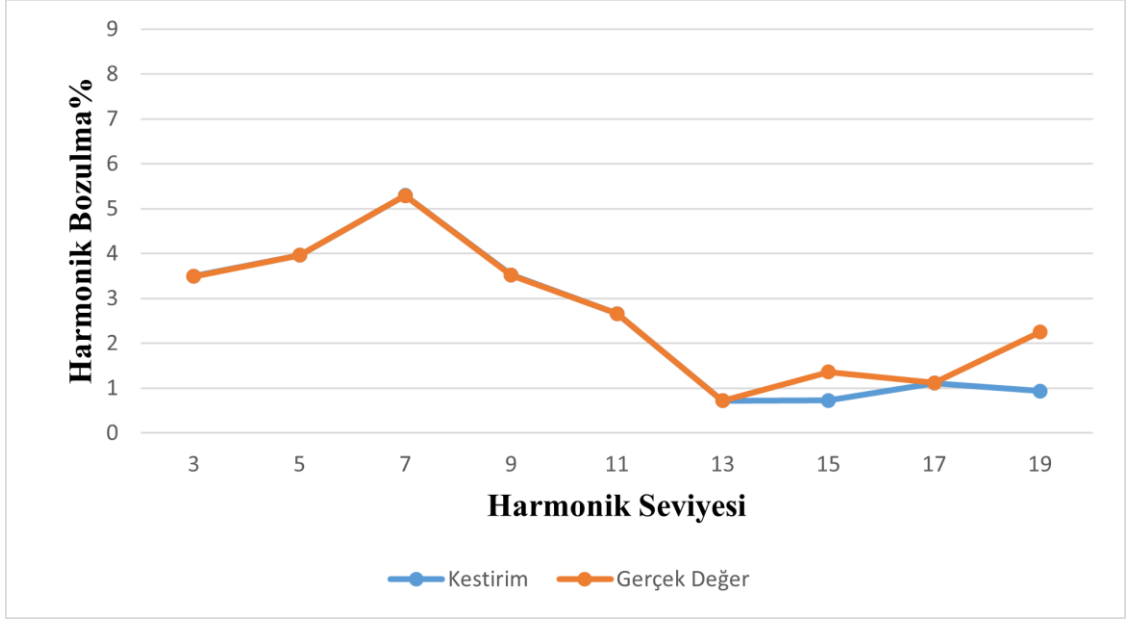
NARX sinir ağının çıktısı, yalnızca o andaki ağ girişine bağlı olarak değişmez. Birkaç anda değişen sinir ağının girişine, çıkışına ve durumuna da bağlıdır [19].

NARX ağ modelinin eğitiminde kullanılan iki mod vardır. Bunlardan birincisi, çıkışın standart NARX mimarisinin bir parçası olarak, ileri beslemeli sinir ağının girişine uygulanan geri beslemeli paralel mod olarak adlandırılır. İkincisi ise, tahmini çıktıyı geri beslemek yerine gerçek çıktının kullanıldığı seri paralel mod olarak isimlendirilir [20].

Tahmin teknikleri, zaman periyodu içinde ölçülen veri değişimine göre, zaman serileri ve regresyon analizini kullanır; burada NARX, YSA'nın en uygun türü olarak kabul edilir [21].

Hatanın 0.00028 değerinde yoğunlaştığı, diğer değerlerin de düşük seviyede olduğu görülmektedir. Sistemin hata histogramının sıfır noktasında yoğunlaşması, hatanın azaldığını ifade eder.

Kestirim performansının daha iyi anlaşılması bakımından gerçek ve kestirim değerleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8 Kestirim ve Gerçek Değer Grafiği

4. Tartışma ve Sonuç

Burada NARX modeli üzerinden güç sistem harmoniklerinin kestirimi çalışması yapılmıştır. Güç sistemlerinde oluşan harmoniklerin zaman içerisinde sürekli bir değişim içinde olması, takibinin zorlaşmasına sebep olmaktadır. Harmonik ölçerler, güç analizörleri gibi maliyetlerinin fazla olduğu cihazlarla harmoniklerin sürekli izlenebilmesi mümkün olmayabilir. Çalışmada MATLAB/Simulink platformu altında doğrusal olmayan endüktif yüklü bir güç sistemi tasarlanıp HFD analiz ile harmonik değerleri ve THD oranı tespit edilmiştir. Bu veriler, giriş değerleri olarak kullanılmış; hedefte hata oranının minimuma indirilmesi için kestirim yapılmıştır. NARX modeli ile kestirim yapılmasındaki temel amaç, sistemde oluşacak olası bozulmaların önceden tespit edilip gerekli önlemlerin alınması için yol gösterici rol oynamasıdır.

Yapılan modelleme sonucunda her iterasyondaki eğitim, doğrulama ve test değerlerinin ne şekilde değiştiği grafikler üzerinden tartışılmıştır. Eğitim işlemi için belirli iterasyonla en düşük MSE değeri elde edilmiştir. NARX ağının performansı MSE ile ölçülüp bulunan değerler, 1'e yakınsadığı için kestirimde uygun bir sonuç elde edildiği gösterilmiştir. Regresyon analizinde ise eğitim değeri 0.99288, test değeri 0.0994652 ve doğrulama değeri 0.905692 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen model ile hata oranının düşük ve başarılı bir kestirim yapıldığı görülebilecektir. İleriki araştırmalarda farklı kestirim yaklaşımları kullanılarak daha hassas değerler elde edilmesiyle harmoniklerin oluşturduğu kayıpları azaltmak için gerekli tedbirlerin alınması sağlanabilir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Yazarların Katkı Oranı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan etmişlerdir.

Etik Beyan

Bu çalışmada sunulan veri, bilgi ve belgeler akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde edilmiştir.

Finansal Destek

Bu araştırma herhangi bir fon sağlayan kurumdan / sektörden hibe almadı.

Açıklama

Bu çalışma Müslüm KUZU adlı öğrenciye ait hazırlanmakta olan yüksek lisans tezinden türetilmiş olup Serhat Berat EFE,adı geçen öğrencinin tez danışmanıdır.

Kaynakça

- [1] J. Valenzuela and J. Pontt, "Real-time interharmonics detection and measurement based on FFT algorithm," *2009 Applied Electronics International Conference, AE 2009*, no. 1, pp. 259–264, 2009.
- [2] N. Severoglu and O. Salor, "Statistical Models of EAF Harmonics Developed for Harmonic Estimation Directly from Waveform Samples Using Deep Learning Framework," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 57, no. 6, pp. 6730–6740, 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3114127.
- [3] N. Severoglu and O. Salor, "Amplitude and phase estimations of power system harmonics using deep learning framework," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 19, pp. 4089–4096, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1491.
- [4] N. Mohan, K. P. Soman, and R. Vinayakumar, "Deep power: Deep learning architectures for power quality disturbances classification," *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy: Exploring Energy Solutions for an Intelligent Power Grid, TAP Energy 2017*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/TAPENERGY.2017.8397249.
- [5] J. Ma, J. Zhang, L. Xiao, K. Chen, and J. Wu, "Classification of Power Quality Disturbances via Deep Learning," *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)*, vol. 34, no. 4, pp. 408–415, 2017, doi: 10.1080/02564602.2016.1196620.
- [6] S. Wang and H. Chen, "A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network," *Appl Energy*, vol. 235, no. September 2018, pp. 1126–1140, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.160.
- [7] E. M. Kuyunani, A. N. Hasan, and T. Shongwe, "Improving voltage harmonics forecasting at a wind farm using deep learning techniques," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/ISIE45552.2021.9576357.
- [8] J. Mazumdar, R. G. Harley, F. C. Lambert, and G. K. Venayagamoorthy, "Neural network based method for predicting nonlinear load harmonics," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 22, no. 3, pp. 1036–1045, May 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.897109.
- [9] P. M. Ivry, O. A. Oke, D. W. P. Thomas, and M. Sumner, "Predicting Harmonic Distortion of Multiple Converters in a Power System," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/7621413.
- [10] Y. Dong *et al.*, "Nonlinear Load Harmonic Prediction Method Based on Power Distribution Internet of Things," *Sci Program*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9978900.
- [11] İ. Özer, S. B. Efe, and H. Özbay, "CNN / Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13204.
- [12] E. M. Kuyumani, A. N. Hasan, and T. Shongwe, "A Hybrid Model Based on CNN-LSTM to Detect and Forecast Harmonics: A Case Study of an Eskom Substation in South Africa," *Electric Power Components and Systems*, 2023, doi: 10.1080/15325008.2023.2181883.
- [13] R. Cahuantzi, X. Chen, and S. Güttel, "A comparison of LSTM and GRU networks for learning symbolic sequences," *arXiv:2107.02248v3*, Jul. 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2107.02248>
- [14] P. T. Yamak, L. Yujian, and P. K. Gadosey, "A comparison between ARIMA, LSTM, and GRU for time series forecasting," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Dec. 2019, pp. 49–55. doi: 10.1145/3377713.3377722.
- [15] A. Y. Hatata and M. Eladawy, "Prediction of the true harmonic current contribution of nonlinear loads using NARX neural network," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 3, pp. 1509–1518, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.03.050.

- [16] Y. Liu, H. Yang, and C. Ma, "A New Method For Estimation Of Harmonics And Inter-Harmonics," in *2012 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012)*, Shanghai: IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [17] V. A. Katic and A. M. Stanisavljevic, "Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 5, pp. 5331–5342, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2819621.
- [18] F. Tariq, R. Shareef, and T. Mahmood, "Investigating the Effect of Non-Linear Loads on Sizing of Voltage Source in Microgrid with Distributed Energy Resources," in *2022 5th International Conference on Energy Conservation and Efficiency, ICECE 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICECE54634.2022.9758974.
- [19] S. Chatterjee , S. Nigam , JB Singh , LN Upadhyaya "Software fault prediction using Nonlinear Autoregressive with eXogenous Inputs (NARX) network " *App Intell* , vol. 37 no. 1, pp. 121-129, 2012.
- [20] XIE, H., TANG, H., & LIAO, Y. (2009). "Time Series Prediction Based On NARX Neural Networks: An Advanced Approach". *Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Baoding, 12-15 Haziran: 1275- 1279.*
- [21] S. Khaleghi , D. Karimi , SH Beheshti , MS Hosen , H. Behi , M. Berecibar , J. Van Mierlo "Online health diagnosis of lithium-ion batteries based on nonlinear autoregressive neural network" *Applied Energy* , vol. 282, 2021.