

Yapay Sinir Ağları ile Transformatörlerdeki Demir Kayıplarının Tahmini Prediction of Transformer Iron Losses by Artificial Neural Networks

Turev SARIKURT, Abdulkadir BALIKÇI

Elektronik Mühendisliği
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
turev@gyte.edu.tr, abalikci@gyte.edu.tr

Özet

Günümüzde çevresel ve ekonomik nedenlerle enerji verimliliği oldukça önemli bir konudur. Transformatörlerin verimliliğinin artırılması da bu konuda önemli bir yer tutmaktadır. Transformatörlerin verimliliği yük altında çalışma ve yüksüz çalışma kayıplarına bağlıdır. Tasarım sürecinde bu kayıpların belirlenebilmesi verimliliğin artırılması açısından önemlidir. Bu çalışmada transformatörün yüksüz çalışma kayıplarını belirlemek için var olan çalışmalar incelenerek özellikle Yapay Sinir Ağları metodu irdelenmiş, bu metot kullanılarak hassas bir şekilde tahmin yapabilen bir ağ geliştirilmiştir. Regresyon eğrileri ve bağlı sapma grafikleri verilmiştir.

Abstract

Because of environmental and economical concerns energy efficiency is an important issue today. The efficiency of transformers has a major place in this issue. Transformer efficiency is related to no-load losses and load losses of a transformer. It is important to determine these values in manufacturing process in order to increase the efficiency. In this study an accurate prediction network to determine no-load losses of a transformer is proposed. Existing studies in literature is examined and the studies about Artificial Neural Networks are evaluated. Regression curves and relative deviation plots are generated.

1. Giriş

Gelişen teknoloji ve çevresel kaygılar doğrultusunda enerji verimliliği günümüzde oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Transformatör üretiminde de verimlilik en önemli gerekliliklerden birisidir. Transformatörlerde verimin artırılması transformatör kayıplarının azaltılması ile mümkün olmaktadır. Transformatör tasarlanırken üstesinden gelinmesi gereken problemlerden birisi transformatörü düşük kayıplara sahip olacak şekilde üretmektir.

Transformatör kayıpları yüksüz çalışma kayıpları (demir kayıpları) ve yük altında çalışma kayıpları (bakır kayıpları) olarak ikiye ayrılmaktadır. Demir kayıpları, kayıplar içinde özellikle önem arz etmektedir. Bunun nedeni transformatörlerin sürekli enerjili halde olmasıdır. Böyle bir durumda transformatörler yük altında olmasalar da önemli miktarda enerji nüvede kayıp olmaktadır. Bu nedenler demir kayıpları transformatörlerdeki kaliteye etki eden ana sebeplerden birisidir. Demir kayıplarının hassas bir şekilde hesaplanması transformatör üretiminin önemli aşamalarından birisidir.

Demir kayıplarının analitik olarak belirlenmesi ve modellenmesi ile ilgili çalışmalar 1950'lere kadar gitmektedir. [1]'de katı ve lamine edilmiş demir yapılarıdaki eddy akımı hesaplamak için bir yöntem geliştirilmiştir. [2]'de ise farklı sarım sayılarına ve farklı sarım şekillerine sahip transformatörler için eddy akım yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş bir metot sunulmuştur. [3]'te ısı kayıpları azaltmak için kullanılan metotlar değerlendirilmiş, [4]'de ise transformatör üreticilerinin demir kayıpları ve yük kayıplarını azaltma teknikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. [5]'de yüksek güçlü transformatörlerde eddy akımı kayıplarının tahmini ile ilgili analitik bir model önermiştir.

Kayıpların belirlenmesine dair çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. [6]'de kayıpların belirlenmesi için gerçek zamanlı bir yöntem önerilmiştir. Deneyler yoluyla transformatörün yapısına ve çalışma prensibine dayanarak transformatörün açık devre ve kısa devre kayıplarına ilişkin formüller elde edilmiştir. [7]'de ise darbe genlik modülasyonlu (PWM) eviricilerle sürülen transformatörler için PWM geriliminin demir kayıpları üzerindeki etkisini incelemiş, eddy akım kayıpları ile anahtarlama frekansı ve modülasyon oranı arasındaki ilişkileri göstermiştir.

Son 20 yılda hesaplama teknolojilerindeki ilerlemeye bağlı olarak yapılan çalışmalarda gelişmiş analiz metotlarının kullanıldığı matematiksel yöntemler ve yapay zeka uygulamaları ağırlık kazanmıştır. Matematiksel yöntemlerde genel olarak Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar metotları tercih edilmektedir. Ancak hesaplamaların uzunluğu göz önüne alındığında bu tip modellerin benzetim programlarında uygulanması pratik değildir [8]. [9]'da sonlu elemanlar metodu ve yüzey empedans metodu birlikte kullanılmıştır. [8]'de ise demir kayıplarına etki eden bileşenler deneyler sonucu elde edilen istatistiksel verilerin matematiksel gösterimi kullanılarak tanımlanmıştır. Bu çalışmaların dezavantajı sonuçların sadece deneyler yoluyla elde edilmiş parametrelerde tutarlı olmasıdır. Deney setlerinde yer almayan yeni örnekler üzerinde denendiğinde çoğunlukla doğruluk kaybolmaktadır [10].

Diğer taraftan [11]'de demir kayıplarının doğru olarak belirlenebilmesi için "simüle edilmiş tavlama"(Simulated Annealing) metodu önerilmiştir. Bu yöntem optimizasyon problemleri ve katı maddelerin fiziksel olarak tavlama arasındaki benzerlikten yola çıkılan bir yöntemdir [12]. [13]'de ise SA'nın daha ileri uygulamaları mevcuttur.

İstatistiksel çözümlerin yanı sıra Yapay Sinir Ağları (YSA) da kayıpların belirlenmesi ve optimize edilmesi için alternatif bir yöntemdir. Bu alandaki ilk çalışma [14]'tür. [15]'de iyi eğitilmiş bir Yapay Sinir Ağının etki eden parametrelerin demir kayıpları, tahrik gerilimi ve gürültü gibi çıkışları olan bir "kara kutu" sisteminin çözümünde kullanılabileceği gösterilmiştir. [16]'de ise demir kayıpları nüve tasarım parametreleri kullanılarak yapay sinir ağları yardımıyla belirlenmiştir. [17]'de transformatörün demir kayıplarının azaltılması için yapay sinir ağları ve genetik algoritma birlikte kullanılmıştır.

Bu çalışmada transformatörlerin demir kayıplarına ait bir yapay sinir ağı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan gizli katman sayısı ve test verilerinin ağırlığı değiştirilerek testler tekrarlanmıştır. Problem bir fonksiyon uydurma problemi olduğundan Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması tercih edilmiştir.

2. Transformatörlerde Demir Kayıpları

Genel olarak demir kayıpları nüvede kullanılan sacın kalınlığına ve kalitesine, akımın frekansına, manyetik akı yoğunluğuna ve nüve ağırlığına bağlıdır. Bu temel faktörlerin yanı sıra saçların laminasyonunda kullanılan yalıtkan malzemenin özellikleri, nüvenin inşaa şekli ve özellikleri gibi diğer bazı faktörlerin de demir kayıplarında etkisi vardır. Tüm bu faktörlerin kayıplar üzerindeki etkilerinin analitik olarak belirlenmesi mümkün değildir. [17]

Demir kayıpları trafoda temelde üç kısımda meydana gelir:

- Trafo nüvesini oluşturan saç paketindeki yükstüz durumda çekilen akımdan dolayı ortaya çıkan kayıplar, histerisiz kayıpları ve eddy kayıpları.
- Saç paketi kelepçeleri ve civatalardaki stray ve eddy akımı kayıpları.
- Yalıtkan malzemedeki kayıplar.

Yüksek verimlilik için yukarıda belirtilen kayıpların hepsinin minimize edilmesi gereklidir. Bunun için aşağıdaki yöntemlerden bir veya birkaçının uygulanması gereklidir:

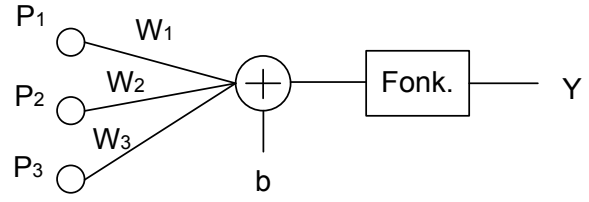
- Düşük kayıplı nüve malzemesinin kullanılması
- Nüve akı yoğunluğunun azaltılması
- Akı yolu uzunluğunun kısaltılması

3. Yapay Sinir Ağları

YSA geleneksel sayısal bilgisayar mantığının aksine insan beyninin bilgi işleme yapısı taklit edilerek geliştirilmiş bir metottur. Biyolojik sinir ağlarından esinlenilerek geliştirilmiş bu teknik yapısal olarak onlardan çok daha basittir. YSA kabaca, girdiler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olarak sınıflandırılabilir beş bölümden oluşmaktadır. Şekil 1'de tek katmanlı bir YSA hücrenin genel şeması görülmektedir.

Şekildeki P_1 , P_2 ve P_3 girdiler, W_1 , W_2 , ve W_3 , ağırlıklar, b sapma (bias) ve Y çıktısıdır. Girdiler bir diğer hücreden veya doğrudan dış dünyadan YSA hücresine gelen verilerdir. Ağırlıklar girdilerin çıktı üzerindeki etkisini ayarlayabilmek için kullanılan katsayılardır. Ağırlıklar reel sayılar kümesinden seçilir ve değerleri öğrenme algoritmaları yardımıyla

belirlenir. Birleştirme fonksiyonu ise ağırlıklar ve girdi çarpımlarını toplayarak sistemin net girdisini hesaplayan fonksiyondur.



Şekil 1. Genel YSA hücresi şeması

4. YSA ile Demir Kayıplarının Tahmini

YSA ile demir kayıplarının tahmininde ilk adım olarak transformatörün üretimi sırasında kayıplara etki eden faktörler için veriler alınır. Bu veriler öğrenim kümesi oluşturmak için kullanılır. Verilerin yapılarına uygun olarak bir model geliştirilip, bu model öğrenim kümesindeki veriler kullanılarak eğitilir.

4.1. Girdi Parametrelerinin Seçilmesi

Kayıpları belirlemek için YSA oluşturulurken belirli transformatör parametreleri YSA'nın girdileri olarak kullanılmış aynı transformatöre ait demir kaybı ise çıktı olarak sisteme tanıtılmıştır. YSA'da sistem girdilerinin skaler büyüklükler olması gerekmektedir. Bu durumu göz önünde bulundurarak seçilen parametreler şunlardır:

- C_{Loss} , Kayıp katsayısı (W/kg)
- B , İndüksiyon (T)
- F , Çalışma frekansı (Hz)
- C_W , Nüve ağırlığı (kg)
- C_{Dist} , Nüve kolları arasındaki mesafe (mm)
- C_H , Nüve yüksekliği (mm)
- C_{Dia} , Nüve çapı (mm)
- C_{CS} , Nüvenin kesit alanı (cm²)

Bu parametrelerden C_{Dist} , C_H , C_{Dia} ve C_{CS} nüvenin şekilsel büyüklüğüdür. C_W nüvenin şekli yanında nüvenin yapımında kullanılan malzemeye de bağlıdır. C_{Loss} ise her nüve tipi için ayrı olarak belirlenen bir katsayıdır. Bu katsayı 1,5 T ve 50 Hz'deki boşta çalışma kayıplarının spesifik değeridir. Tablo 2'de YSA'da test için ayrılmış örneklere ait transformatör parametreleri görülebilmektedir.

4.2. YSA'nın özellikleri

Öncelikle YSA'nın girdilerini oluşturmak için yukarıdaki parametrelerden müteşekkil 1243 örnek veri seti toplanmıştır. Set 8 elemanlı bir girdi setine karşılık gelen, demir kaybını sembolize eden tek bir çıktı değerinden oluşmaktadır. Ancak verilerin içinde aynı girdi setine karşılık gelen farklı çıktılar da bulunmaktadır. YSA'yı sağlıklı bir şekilde kurmak için bir 8 elemanlı bir girdi setine karşılık gelen çıktının tek olması gerekmektedir. Başka bir deyişle her girdi setine bağlı olarak belirlenmiş bir adet demir kaybı değeri olması gerekmektedir.

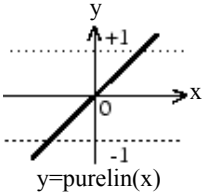
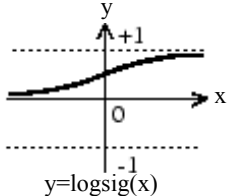
Toplanan 1243 veriden oluşan girdi seti bu bakımdan kirlidir. Bu nedenle kirli veriler ayıklanmıştır. Aynı sete ait farklı çıktı

değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınmış sonuç olarak her girdi setine ait tek çıktı kalana kadar set ayıklanmıştır. Bunun sonucunda örnek sayısı 247 veriye kadar düşmüştür.

4.3. YSA'nın kurulması

YSA MATLAB yazılımının "Neural Networks" araç kutusu aracılığıyla oluşturulmuştur. İşlem yükü söz konusu olmadığından fazla sayıda gizli katman kullanılabilir. Yapısı gereği bir adet de çıkış katmanı bulunmaktadır. Gizli katmanlarda birleştirme fonksiyonu olarak log-sigmoid, çıkış katmanında ise lineer fonksiyon kullanılmıştır. Bu tip bir kombinasyon çok boyutlu haritalama problemlerinde oldukça kullanışlıdır.[18]. Lineer ve log-sigmoid fonksiyonlara ait detaylar Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1: Log-Sigmoid ve Lineer Fonksiyonlar

Lineer Fonksiyon	Log-Sigmoid Fonksiyon
 <p>$y = \text{purelin}(x)$</p>	 <p>$y = \text{logsig}(x)$</p>
$y = x$	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$

YSA'nda öğrenme amaçlı kullanılan birçok algoritma bulunmakla birlikte Levenberg-Marquardt eğitim algoritması probleme uygunluğu açısından tercih edilmiştir. [18]

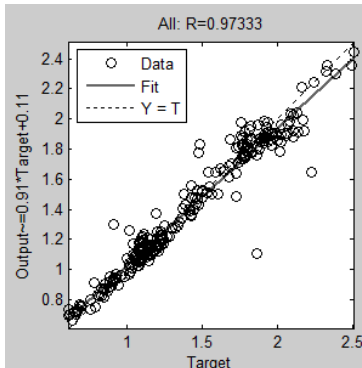
5. Testler

Test süresince denenen 2 faktör vardır. Bunların birisi gizli katman sayısı ikincisi ise verilerin paylaşılmasıdır.

5.1. Gizli Katman Sayısı

Bu testte gizli katman sayısı değiştirilerek eğitim tekrarlanmış her durum için regresyon eğrileri elde edilmiştir. Verilerin yaklaşık %80'i eğitim için (197 örnek) % 10'luk iki grup ise (25'er örnek) validasyon ve test için ayrılmıştır.

5.1.1. Gizli katman sayısı 5



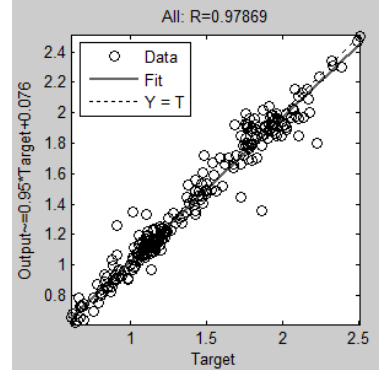
Şekil 2. 5 gizli katman içeren YSA'ya ait regresyon eğrisi

Eğitim örneklerinde uyum % 96.7, validasyon örneklerinde

% 99 test örneklerinde ise % 99.1'dir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum % 97.3 olmakla birlikte regresyon eğrisi Şekil 2'de görülmektedir.

5.1.2. Gizli katman sayısı 10

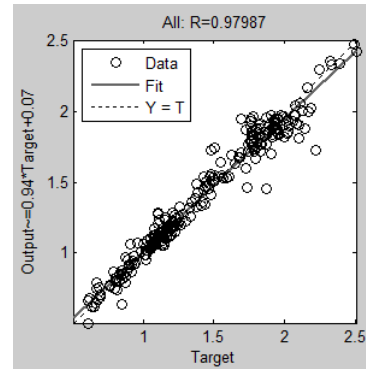
Eğitim örneklerinde uyum % 98, validasyon örneklerinde % 97.6 test örneklerinde ise % 97.1'dir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %97.8 olmakla birlikte regresyon eğrisi Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. 10 gizli katman içeren YSA'ya ait regresyon eğrisi

5.1.3. Gizli katman sayısı 20

Eğitim örneklerinde uyum % 98.2, validasyon örneklerinde % 97 test örneklerinde ise % 97.6'dır. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %97.9 olmakla birlikte regresyon eğrisi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. 20 gizli katman içeren YSA'ya ait regresyon eğrisi

5.2. Örneklerin dağılımı

YSA'da verilerin 3 ana gruba paylaşılmasıdır. Bunlar eğitim, validasyon ve test gruplarıdır. Her ağ kurulurken sahip olunan girdiler bu gruplar arasında belirli ağırlıklarla dağıtılırlar.

Bu testte elimizdeki 247 veri farklı ağırlıklarda eğitim, validasyon ve test için ayrılarak ağ kurulmuş ve regresyon eğrileri çizdirilmiştir. Deneylerin tamamı 5 gizli katmanla yapılmıştır.

5.2.1. Eğitim %30, Validasyon %35, Test %35

Bu testte eğitim için ayrılan örneklerin sayısı mümkün olan en aza indirilmiştir. 75 örnek eğitim, 86'şar örnek validasyon ve test için ayrılmıştır.

Sonuç olarak eğitim örneklerinde uyum % 97,2, validasyon örneklerinde % 96,7 test örneklerinde ise % 95,7'dir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %96,4'tür.

5.2.2. Eğitim %60, Validasyon %35, Test %5

Bu deneyde test için ayrılan örneklerin sayısı mümkün olan en aza indirilmiştir. 149 örnek eğitim, 86 örnek validasyon ve 12 örnek test için ayrılmıştır.

Sonuç olarak eğitim örneklerinde uyum % 98,9, validasyon örneklerinde % 96,4 test örneklerinde ise % 89,5'tir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %97,4'tür.

5.2.3. Eğitim %60, Validasyon %5, Test %35

Bu deneyde test için ayrılan örneklerin sayısı mümkün olan en aza indirilmiştir. 149 örnek eğitim, 12 örnek validasyon ve 86 örnek test için ayrılmıştır.

Sonuç olarak eğitim örneklerinde uyum % 97, validasyon örneklerinde % 97,7 test örneklerinde ise % 97,5'tir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %97,2'dir

5.2.4. Eğitim %90, Validasyon %5, Test %5

Bu deneyde eğitim için ayrılan örneklerin sayısı mümkün olan en fazla olacak şekilde seçilmiştir. 223 örnek eğitim, 12 örnek validasyon ve yine 12 örnek test için ayrılmıştır.

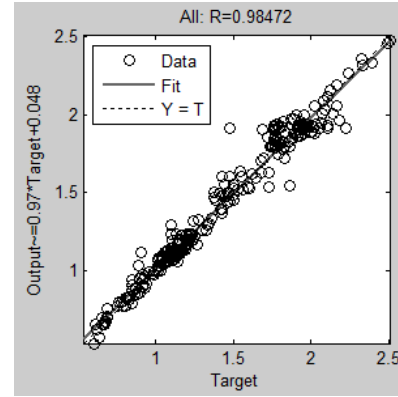
Sonuç olarak eğitim örneklerinde uyum % 97,3, validasyon örneklerinde % 99,2 test örneklerinde ise % 99,3'tir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %97,5'tir

5.3. En Uygun YSA

Gizli katman sayısı ile ilgili testlerin sonuçlarında dramatik bir fark görülmemekle birlikte katman sayısının 20 olarak seçildiği durumda genel uyum daha yüksektir. Örneklerin dağılımı testlerinin sonuçlarında da benzer şekilde büyük farklılıklar görülmemektedir. Bu durumda da eğitim örneklerinin sayısının en fazla olduğu durumda genel uyum en yüksek çıkmıştır.

Bu bağlamda 20 gizli katmandan oluşan ve örneklerinin dağılımı %90 eğitim, %5 validasyon ve %5 test şeklinde olan bir YSA oluşturulmuştur. Sonuç olarak eğitim örneklerinde uyum % 98,7, validasyon örneklerinde % 94 test örneklerinde

ise % 98,3'tir. Tüm örnekler bir araya getirildiğinde uyum %98,4 olmakla birlikte regresyon eğrisi Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. En uygun YSA'nın regresyon eğrisi

Çizelge 2'de test olarak rastgele seçilmiş 12 örneğin parametreleri, bu örneklere ait ölçülmüş demir kaybı değerleri, YSA tarafından tahmin edilmiş kayıp değerleri ve bağlı sapmalar görülmektedir. Şekil 6'da ise örneklere ait ölçüm, tahmin ve sapma grafikleri görülmektedir.

6. Sonuçlar

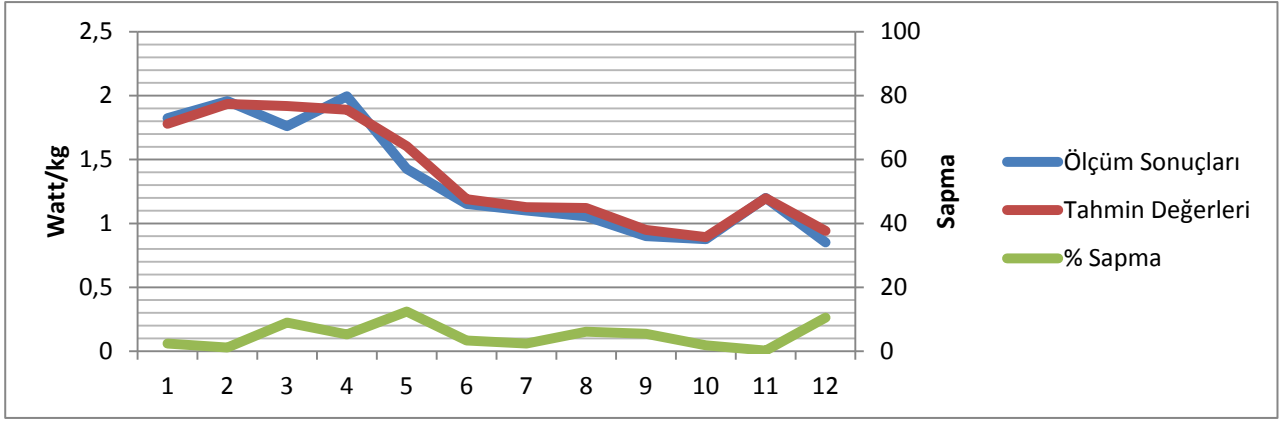
Bu çalışmada YSA ile transformatörlerde demir kayıplarının tahmini yapılmıştır. YSA'nı oluşturmak için bir dizi teste bağlı olarak en uygun kombinasyon belirlenmeye çalışılmış, belirlenen YSA verilerine sahip olunan bir transformatöre uygulanmıştır.

Oluşturulan YSA test, değerlendirme ve eğitim için ayrılan örneklerin değerlerine bağlı olarak her eğitimde farklı sonuçlar verebilmektedir. Sonuçta en büyük bağlı sapması %12,4 olan, ortalama sapması %5 seviyesinde bulunan tahminler elde edilmiştir. Ortalama sapma değerinin makul bir seviyede olmasına rağmen maksimum sapma hedeflenenin üstündedir. Çalışmanın devamında hedeflenen maksimum sapmanın %5'ler mertebesine çekilmesidir.

Çizelge 2. Test için ayrılmış örneklere ait parametreler, örneklerin demir kaybına ilişkin ölçüm sonuçları ve YSA tahmini.

C _{Loss} (W/Kg)	B (T)	F (Hz)	C _w (kg)	C _{Dia} (mm)	C _{Dist} (mm)	C _H (mm)	C _{CS} (cm ²)	Ölçüm	Tahmin	% Sapma
1,16	1,882	50	2211,28	299	520	638	629,2475	1,8233	1,7797	2,391269
1,16	1,876	50	622,94	140	312	544	258,3112	1,9576	1,9348	1,164691
1,16	1,864	50	462,16	130	295	544	197,1302	1,7612	1,9194	8,982512
1,16	1,834	50	175,4	116	269	396,5	92,254	1,9954	1,8906	5,25208
1,16	1,731	50	227,73	100	231	430	123,2209	1,4271	1,6045	12,4308
1,16	1,642	50	778,29	150	347	618	287,8498	1,1516	1,1899	3,325808
1,16	1,596	50	555,78	130	309	544	232,7966	1,1008	1,1270	2,380087
1,16	1,579	50	667,88	140	328	620	253,4476	1,0563	1,1209	6,115687
1,16	1,460	50	542,88	130	301	544	229,7472	0,9005	0,9497	5,463631
1,16	1,440	50	838,85	150	373	620	300,8773	0,8766	0,8927	1,836642
1,01	1,678	50	748,71	140	335	620	281,8186	1,1999	1,1974	0,208351

0,77	1,593	50	417,8	120	301	466,5	191,9868	0,8520	0,9414	10,49296
------	-------	----	-------	-----	-----	-------	----------	--------	--------	----------



Şekil 6. Örneklerle ait ölçüm sonuçları, tahmin değerleri ve bağlı sapma grafiğleri.

YSA'larda eğitim verilerinin sayısı büyük önem arz etmektedir. Eğitim verilerinin sayısı arttırıldığında bu rakamların daha aşağı çekilebileceğine inanılmaktadır. Bunun yanında bu çalışmada kelepçelerin türleri veya nüve şekilleri gibi skaler olmayan transformatör parametreleri değerlendirmeye alınmamıştır. Bu bilgilerin de göz önünde bulundurulmasıyla tahminlerin daha da aşağılara çekilebileceği görülmüştür.

7. Kaynaklar

- [1] Agarwal, P. D., "Eddy-current losses in solid and laminated iron," AIEE Trans., Vol. 78, pp. 169–181, May 1959.
- [2] Mullineux, N., and Reed, J. R., "Eddy-current shielding of transformer tanks," IEE Proc., Vol. 113, pp. 815–818, May 1966.
- [3] Kazmierski, K., Kozłowski, M., Lasocinski, J., Pinkiewicz, I., and Turowski, J., "Hot spot identification and overheating hazard preventing when designing a large transformer," Conseil International Réseaux Électriques Conference (CIGRE), Paper No. 12-12, Paris, August 1984.
- [4] Harrison, T. H., and Richardson, B., "Transformer loss reduction," Conseil International Réseaux Électriques Conference (CIGRE), Paper No. 12-04, Paris, August 1988.
- [5] Szabados, B., El Nahas, I., El Sobki, M. S., Findlay, R. D., and Poloujadoff, M., "A new approach to determine eddy current losses in the tank walls of a power transformer," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, pp. 810–816, July 1987.
- [6] Hu G., He W., Wu X., Zhang L., Li X., and Song X., "The on-line detecting method for transformer loss" APPEEC 2011, p:1-4, 25-28 March, 2011.
- [7] Liu R., Mi C. C., and Gao D. W., "Modeling of Iron Losses of Electrical Machines and Transformers fed by PWM Inverters" Power Eng. Society General Meeting, 2007.
- [8] Elleuch M., and Poloujadoff M., "Analytical model of iron losses in power transformers" IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 39, No. 2, March 2003
- [9] Holland, S. A., O'Connell, G. P., and Haydock, L., "Calculating stray losses in power transformers using surface impedance with finite elements," IEE Trans. Magnetics, Vol. 28, pp. 1355–1358, March 1992.
- [10] Georgilakis P. S., Doulamis N. D., Doulamis A. D., Hatziaargyriou N. D., Kollias S. D., "A Novel Iron Loss Reduction Technique for Distribution Transformers Based on a Combined Genetic Algorithm—Neural Network Approach" IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—Part C: Applications And Reviews, Vol. 31, No. 1, February 2001
- [11] Aarts G. E., Korst J., Simulated Annealing and Boltzmann Machines. New York: Wiley, 1989.
- [12] Alfonzetti, S., Dilettoso, E. and Salerno, N., "Simulated annealing with restarts for the optimization of electromagnetic devices," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 4, pp. 1115–1118, Apr. 2006.
- [13] Kefalas, T. D., Georgilakis, P. S., Kladas, A. G., Souflaris, A. T., and Paparigas, D. G., "Multiple grade lamination wound core: A novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model," IEEE Trans. Magnet., Vol. 44, pp. 1082–1085, 2008
- [14] Mohammed, O. A., Park, D. C., Üler, F. G., and Ziqiang, C., "Design optimization of electromagnetic devices using artificial neural networks," IEEE Trans. Magn., vol. 28, pp. 2805–2807, 1992.
- [15] Nussbaum, C., Booth, T., Ilo, A., and Pfützner, H., "A neural network for the prediction of performance parameters of transformer cores," J. Magnetism Magn. Mater., vol. 160, pp. 81–83, 1996.
- [16] Nussbaum C., Pfützner H., Booth T., Baumgartinger N., Ilo A., and Clabian B. "Neural Networks for the Prediction of Magnetic Transformer Core Characteristics" IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 36, No. 1, January 2000
- [17] Georgilakis, P.; Hatziaargyriou, N.; Paparigas, D.; Bakopoulos, J.; "On-Line Combined Use of Neural Networks and Genetic Algorithms to the Solution of Transformer Iron Loss Reduction Problem" International Conference on Electric Power Engineering, 1999.
- [18] Hagan, M.T.; Demuth, H.B.; , "Neural networks for control," American Control Conference, 1999.