



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Yapay sinir ağlarıyla asenkron motor çoklu arızalarının tespiti ve sınıflandırılması

Detection and classification of multiple faults of induction motors by using artificial neural networks

Yazar(lar) (Author(s)): Kadir KAYA¹, Abdurrahman ÜNSAL²

ORCID¹: 0000-0003-1255-9576

ORCID²: 0000-0002-7053-517X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kaya K., Ünsal A. ,“Yapay sinir ağlarıyla asenkron motor çoklu arızaların tespiti ve sınıflandırılması ”, *Politeknik Dergisi*, 25(4): 1687-1699, (2022).

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

DOI: 10.2339/politeknik.933826

Yapay Sinir Ağlarıyla Asenkron Motor Çoklu Arızalarının Tespiti ve Sınıflandırılması

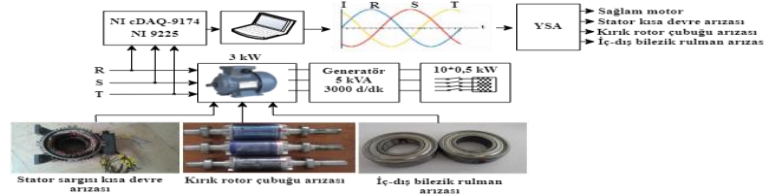
Detection and Classification of Multiple Faults of Induction Motors by Using Artificial Neural Networks

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Asenkron motorlar (Induction motors),
- ❖ Arıza tipleri (Fault types), Çoklu arıza (Multiple faults),
- ❖ Arıza tespiti (Fault detection),
- ❖ Geri yayılım yapay sinir ağları (Backpropagation artificial neural networks)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, asenkron motorların stator kısa-devre arızaları, kırık rotor çubuğu arızaları ile bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir. / In this study, the detection and classification of stator short-circuit faults, broken rotor bars, inner and outer race bearing faults of an induction motor are implemented.



Şekil. Çoklu arıza tespit şeması /Figure. Multiple fault detection diagram

Amaç (Aim)

Asenkron motorlarda yüksek başarımla çoklu arıza tespiti yapmak. /To detect multiple faults of induction motors with high accuracy rate.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Asenkron motorda, yapay olarak stator kısa devre arızası, kırık rotor çubuğu ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları oluşturulmuştur. Motor tam yük altında çalıştırılarak stator akım sinyalleri kaydedilmiş ve geri yayılım algoritmasına sahip çok katmanlı Yapay Sinir Ağları (YSA) ile çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılması yapılmıştır. / Stator short-circuit faults, broken rotor bars, inner and outer race bearing faults of an induction motor were implemented. The motor was tested under full load and the stator current signals were recorded and the faults were detected by using a multilayered Artificial Neural Network (ANN) with back propagation algorithm.

Özgünlük (Originality)

Asenkron motorların arıza tespitine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak çoklu arıza tespitine yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, asenkron motorlarda çoklu arıza tespitine özgü geri yayılım algoritmasına sahip YSA topolojileri tasarlanmıştır. Farklı arıza senaryolarının tespitindeki başarımlar ortaya konulmuştur. / There are many studies on the detection of faults of induction motors but few studies on the detection of multiple faults are reported. In this study, ANN topologies with back propagation algorithm for the detection of multiple faults of induction motors are designed. Performance ratios for different fault scenarios are presented.

Bulgular (Findings)

Donanımsal olarak uygulanabilirliği olan probleme özgü çok katmanlı YSA'lar tasarlanarak yüksek başarımla çoklu arıza tespiti yapılmıştır. / A problem-specific multi-layer ANNs with hardware applicability is designed and implemented with high accuracy rate.

Sonuç (Conclusion)

Asenkron motorlarda YSA ile çoklu arıza tespitinde en yüksek başarımla %87 olarak gerçekleştirilmiştir. / The highest performance rate in detection of multiple faults with ANN of induction motors was 87%.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

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

Yapay Sinir Ağlarıyla Asenkron Motor Çoklu Arızalarının Tespiti ve Sınıflandırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Kadir KAYA*, Abdurrahman ÜNSAL

Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 06.05.2021 ; Kabul/Accepted : 10.08.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 23.08.2021)

ÖZ

Asenkron motor arızalarının tespiti asenkron motorların bakımı için kritik bir konudur. Stator akımı analizi motor arızalarını tespit etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Asenkron motor arızalarının tespitine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, 3 kW bilezikli bir asenkron motorun stator kısa-devre arızaları, kırık rotor çubuğu ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının tespiti ve sınıflandırılması çok katmanlı geri yayılım algoritmasına sahip yapay sinir ağı (YSA) modelleri ile gerçekleştirilmektedir. Çalışma üç aşamada gerçekleştirildi. Birinci aşamada asenkron motor tekil arızalarla birlikte test edildi. Asenkron motor stator sargısı %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında kısa-devre edilerek, rotorda üç çubuk kırılarak ve motorun yük tarafı rulmanının iç bileziğinde ve dış bileziğinde arızalar oluşturularak ayrı ayrı test edildi. İkinci aşamada motor, %3 ve %5 stator sargısı kısa-devre arızalarıyla birlikte üç çubuğu kırık rotor ile test edildi. Üçüncü aşamada ise asenkron motor %3 ve %5 stator sargısı kısa-devre arızası, üç çubuğu kırık rotor, iç bileziği ve dış bileziği arızalı rulman ile birlikte test edildi. Bütün testlerde motor tam yük altında çalıştırılmıştır. Sunulan yöntem ile çoklu arızaların tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, çoklu arıza tespitinde en yüksek başarı oranı %87 olarak elde edildi. Elde edilen sonuçlarla sunulan yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motorlar, arıza tipleri, çoklu arıza, arıza tespiti, geri yayılım yapay sinir ağları.

Detection and Classification of Multiple Faults of Induction Motors by Using Artificial Neural Networks

ABSTRACT

Detection of induction motor faults is a critical issue for the maintenance of induction motors. Analysis of the stator current is a widely used method to detect the faults of induction motors. There are many of studies on the detection of faults of induction motors but few studies on the detection of multiple faults are reported. In this study, the detection and classification of short-circuit faults of stator winding, broken rotor bars and inner/outer race bearing faults of a 3 kW square-cage induction motor are implemented by ANN. The study was carried out in three stages. In the first stage, the induction motor was tested with single faults including 1%, 2%, 3%, 4% and 5% short-circuited stator windings, three broken rotor bars, and inner/outer race bearing faults. In the second stage, induction motor was tested with 3% and 5% short-circuit stator windings and with three broken rotor bars. In the third stage, induction motor was tested with 3% and 5% short-circuit stator windings, rotor with three broken bars and inner/outer race bearing faults. The induction motor has been tested under full load. The detection and classification of multiple faults were realized by the proposed method. The highest performance rate in the detection of multiple faults was achieved with 87% accuracy rate. The results shows the applicability of the proposed method.

Keywords: Induction motors, fault types, multiple faults, fault detection, backpropagation artificial neural network.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar diğer elektrik motorlarına nazaran basit yapılı olup bakım ihtiyacı az olan elektrik makinelerdir. Bu özelliklerinden dolayı endüstride çok tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan elektrik makinalardır. Yaygın kullanım alanına sahip olan asenkron motorların ağır çalışma şartlarında sorunsuz çalışmaları önem arz etmektedir.

Kritik çalışma koşullarında kullanılan asenkron motorların olası arızalarının erken evrede tespiti ve müdahale edilmesi bakım maliyetlerini düşürerek motor kullanım verimini doğrudan artırmaktadır. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar ağırlıklı olarak stator sargılarında, rotor ve rulmanlarda meydana gelmektedir

[1]. Stator sargı arızaları, motorun aşırı ısınma, mekanik, elektriksel ve çevresel etkilere maruz kalması sonucu meydana gelir [2].

Stator sargı arızaları bobin-bobin kısa-devre, sargı-sargı kısa-devre, faz-faz kısa-devre, açık-devre, ve bobin-toprak kısa-devre arızaları şeklinde meydana gelir [2-3]. Rotor arızaları genelde rotor çubukları ile kısa-devre halkasının (sincap kafesli motorlarda) çatlaması veya kırılması sonucu meydana gelir. Rotor çubukları zamanla termal, manyetik, dinamik ve mekanik zorlamalara maruz kalmakta zaman içinde çatlamakta ve kırılarak arızalara sebep olabilmektedirler [4-6]. Rotoru sargılı asenkron motorlarda rotor sargılarında ve bilezik mekanizmalarında da arızalar meydana gelebilir. Rotor arızaları, zamanında müdahale edilmezse daha büyük arızalara ve maddi kayıplara sebep olabilir. Asenkron

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : kkaya4214@gmail.com

motorlarda görülen bir diğer arıza çeşidi ise rulman arızalarıdır. Rulmanlar iç bilezik, dış bilezik, bilye ve kafesten meydana gelir. Motor arızalarının %51'den fazlasının doğrudan veya dolaylı olarak rulmanlardan kaynaklandığı literatürde rapor edilmektedir [2-7]. Büyük güçlü motorlarda rulman arızalarının oranı %90'a kadar çıkabilmektedir [8]. Rulman arızaları, montaj hataları, aşırı yüklenme, aşırı ısınma, elektrik kaçağı, karıncalanma, eksen kaçıklığı, kirlenme, korozyon, aşırı rotor hızı, yağlanma eksikliği veya fazlalığı, motor-yük denegesizlikleri ve hatalı kaplin ayarı gibi nedenlerden ötürü meydana gelir. Rulman arızaları motordaki sürtünme kayıplarını doğrudan etkiler ve aşırı ısınma ile titreşimlere sebep olur. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalardan dolayı motor veriminde düşme ve enerji tüketiminde artış meydana gelir.

Stator sargı arızalarının analizi, tespiti ve izleme yöntemlerinde genellikle stator akım, gerilimi, manyetik akı, titreşim sinyalleri, gürültü/ses analizi, anlık açılma hız, sıcaklık, hava boşluğu momenti, güç, kısmi boşalma, gaz analizi vb. gibi yöntemler kullanılmaktadır [3, 5, 6, 9]. Kırık rotor çubuğu ve rulman arızalarının analizi, tespiti ve izlenmesinde stator akım sinyallerine ilavete olarak titreşim sinyallerinin ileri sinyal işleme metotlarıyla işlenmesine dayalı yöntemler kullanılmaktadır [10-17].

Literatürde yapılan çalışmalarda her arıza çeşidinin farklı yöntemler kullanılarak tespit edildiği görülmektedir. Ancak çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Asenkron motor arızalarının aynı anda meydana gelme olasılığının somut olarak belirlendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte sargı ve rulman arızaların birlikte meydana geldiği bir çalışma [18]'de, statik aksel kaçıklık ve kırık rotor çubuğu arızalarının birlikte meydana geldiği bir çalışma [19]'da, ve stator sargı arızaları ile kırık rotor çubuğu arızalarının birlikte ele alındığı bir çalışma [20]'de verilmektedir. Arızaların birlikte meydana gelme olasılığı ile ilgili somut çalışma olmamasına rağmen bu arızaların birlikte ortaya çıkma ve bir arızanın diğerinin sonucunda ortaya çıkma ile ilgili çalışmalar literatürde yayınlanmıştır.

Örnek olarak, rulman arızası sonucu meydana gelen titreşimler rotor çubuklarının kırılmasına, kırık rotor çubukları da (erken müdahale edilmezse) parçaların kopmasına ve stator sargılarının arızalanmasına sebep olur. Bundan dolayı bu çalışmada stator sargı arızaları, kırık rotor çubuğu arızaları ve rulman arızalarının birlikte meydana geleceği değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın özgün değeri çoklu arızaların tespiti ve sınıflandırılmasıdır. Çalışmada YSA yöntemi kullanılarak asenkron motorlarda meydana gelen çoklu arızaların tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilerek literatüre katkı sunulmuştur. Değerlendirmeye alınan çoklu arızalar, stator sargısı kısa-devre arızaları (%1, %2, %3, %4, %5), kırık rotor çubuğu arızaları (üç çubuğu kırık rotor) ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarından oluşmaktadır. Arıza tespiti ve

sınıflandırılmasında asenkron motorun tam yük stator akım sinyalleri kullanılmaktadır.

Sonraki bölümde asenkron motor arıza tespitinde yaygın olarak kullanılan sinyal tabanlı yaklaşımlar ve yapay zekâ algoritmaları ile yapılan başlıca çalışmalara değinilmektedir. İkinci bölümde önerilen yöntemin detayları açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışmanın önemi ve katkısı irdelenmektedir.

1.1 Çoklu Arıza Tespiti ile İlgili Yapılan Çalışmalar (Studies on Multiple Faults)

Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak asenkron motor arızalarının tespit yöntemlerinde de büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Günümüzde kullanılan en popüler yöntemler sinyal tabanlı yaklaşımlardır. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar neticesinde motorun akım, gerilim, moment, titreşim vb. sinyalleri izlenerek ve yapay zekâ algoritmaları gibi ileri sinyal işleme metotları ile işlenerek arızaların tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir [21]. Özellikle son 30 yıla bakıldığında asenkron motorların arıza tespitinde, YSA, bulanık mantık algoritmaları (BM), destek vektör makineleri (DVM) algoritmaları ve derin öğrenme yöntemleri gibi makine öğrenmesine dayalı yöntemlerin yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Çalışmaların ortak hedefi arızaların en yüksek başarımla tespiti ve sınıflandırılmasının gerçekleştirilmesidir. Sri R. Kolla ve Shawn D. Altman tarafından yapılan çalışmada [22], üç-fazlı bir asenkron motor yüksek ve düşük besleme gerilimi ile aşırı yük altında ve tek-faz stator arızası gibi çeşitli anormal çalışma şartları altında çalıştırılmıştır. Stator faz gerilimleri ile faz akımları YSA ile işlenerek arıza sınıflandırılması yapılmıştır. Bazan G.H. ve diğ. tarafından yapılan çalışmada [23] sağlam ve stator sargısı arızalı asenkron motorların stator akım sinyalleri karşılaştırmalı olarak YSA ile işlenmiş ve stator sargı arızalarının sınıflandırılması %93 başarımla gerçekleştirilmiştir. Jordi B.V. ve diğ. tarafından yapılan çalışmada [24], üç-fazlı bir asenkron motorun stator akımları, sağlam ve kırık-rotor ile farklı yüklenme kademeleri altında kaydedilmiş ve DVM ve YSA ile işlenerek arıza sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Her iki sınıflandırma yönteminde de %97 oranından daha yüksek bir başarımla elde edilmiş ve asenkron motorların diğer arıza tiplerinin de önerilen yöntemle ele alınmasının uygun olacağı öne sürülmüştür.

Godoy W.F. ve diğ yaptıkları çalışmada [25], inverter ile üç farklı frekansta/hızda çalışan bir asenkron motorun kırık rotor çubuklarının sınıflandırılması için makine öğrenme algoritmalarına dayalı kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Önerilen yaklaşım ile stator akımı analizi ile motor arızaları çeşitli seviyelerde sınıflandırılmıştır. Merabet H. ve diğ. tarafından yapılan çalışmada [26], uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile sağlam ve dört çubuğa kadar kırık rotora sahip bir asenkron motorun arızaları stator akım sinyalleri kullanılarak yüksek başarımla tespit edilmiştir.

Lashkari N. ve diğ. tarafından yapılan çalışmada [27], stator sargı akımları YSA ile işlenerek üç fazlı bir asenkron motorun stator kısa-devre arızaları ile besleme gerilimindeki dengesizlikler teşhis/tespit edilmiştir.

J. F. Martins ve diğ. tarafından yapılan çalışmada [28], üç fazlı bir asenkron motorun stator arızalarının on-line olarak tespit edilmesi için yapay sinir ağlarını temel alan otomatik bir algoritma tasarlanmıştır. Gupta ve Kaur yaptıkları çalışmada [29] üç fazlı asenkron motorlarda rotor arızalarını YSA kullanarak sınıflandırmışlardır. YSA ile yapılan sınıflandırmada stator akımları kullanılmıştır. Arabacı H. ve Bilgin O. tarafından yapılan çalışmada [30] kırık rotor arızaları 6 grupta YSA algoritması kullanılarak %98,83 başarımla sınıflandırılmıştır. Ali M. Z. ve diğ. tarafından yapılan çalışmada [31] iki farklı motorda yapay olarak elektriksel ve mekaniksel arızalar meydana getirmiştir. Stator akımı ve titreşim sinyalleri DVM ve YSA ile işlenerek arızaların sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. On yedi farklı ağ algoritması tasarlanarak her iki yöntem ile %100 başarımla oranı elde edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların stator ve rotor arızalarına yoğunlaştıkları görülmektedir. Ancak çoklu motor arızalarının ele alındığı çalışmaların son derece sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik olarak stator sargısı kısa-devre arızaları, kırık rotor çubuğu arızaları ile iç ve dış bilezik rulman arızaları değerlendirmeye alınmıştır. Asenkron motorlarda çoklu arızaların aynı anda meydana gelmesi çok yaygın olmamakla birlikte nadir de olsa karşılaşılan bir durumdur. Örnek olarak rotor çubuklarının kırılması manyetik akı dağılımının bozulmasına neden olabilir. Manyetik akı dağılımı bozulan bir rotor dengesiz olarak dönerek rulmanların arızalanmasına ve rotorda olası parça kopmalarına veya stator sargılarıyla temas ederek stator sargılarının kısa-devre olmasına sebep olabilir. Ayrıca asenkron motorlarda meydana gelen çoklu arızaların benzer karakteristik özellikler gösterdiği de bilinen bir durumdur. Benzer karakteristik özellikler gösteren arızaların klasik yöntemlerle tespit edilmesi oldukça zordur. Bundan dolayı bu çalışma ile çoklu arızaların tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilerek literatüre katkı sunulması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmanın yöntemi sonraki bölümde sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Yapılan çalışmada asenkron motorlarda meydana gelen çoklu arızaların tespit edilmesi hedeflenmiştir. Çoklu arızalar stator kısa-devre arızaları, kırık rotor çubuğu arızaları ve rulman arızaları olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, etiket değerleri Çizelge 1’de verilen asenkron motor kullanılmıştır.

Çizelge 1. Asenkron motor etiket değerleri (Nameplate parameters of induction motor)

Marka	GAMAK
Model	AGM2E 100 L 2
Faz	3 Fazlı
Güç	3 kW
Kutup Sayısı	2
Rotor Dönüş Hızı	2850 d/dk
Nominal Akım	10,2 A
Güç Katsayısı	0,87
Verim	%84,6

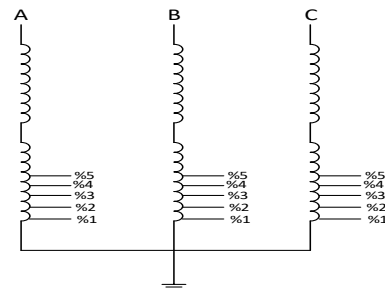
2.1. Arızaların Oluşturulması (Implementation of Faults)

Deneysel çalışmada stator kısa-devre arızaları, kırık rotor çubuğu arızaları ve rulman arızaları değerlendirilmektedir. Stator kısa-devre arızalarında stator sargılarının kısa devre durumu ve arıza şiddetinin (% olarak) incelenmesi hedeflenmektedir. Arıza şiddeti kısa-devre sargı sarım sayısının toplam sarım sayısına oranı olarak ele alınmaktadır.

Bu amaçla Çizelge 1’de etiket değerleri verilen bir asenkron motor stator sargıları Şekil 1’de görüldüğü gibi arıza oluşturularak yeniden sarıldı. Şekil 2’de görüldüğü üzere arıza şiddeti %1, %2, %3, %4 ve %5 olmak üzere beş farklı kademede oluşturuldu. Örnek olarak %5 oranındaki bir arıza şiddeti için bir faz stator sargısı toplam sarım sayısının %5’i kısa devre edildi ilgili fazın %95 sarım sayısı ile çalışması gerçekleştirildi. Arıza tek fazda olacağı gibi iki veya üç fazda aynı şiddette veya farklı şiddetlerde de olabilir. Ancak bu çalışmada arıza tek fazda olacak şekilde çalışılmıştır.



Şekil 1. Arızalı stator sargıları (Faulty stator windings)



Şekil 2. Stator kısa-devre arızaları (Stator short-circuit faults)

Kırık rotor çubuğu arızaları rotor çubukları üzerinde matkapla delik açılarak oluşturuldu.

Şekil 3’te çubukları kırık (bir kırık, iki kırık ve üç kırık) rotorlar görülmektedir. Deneysel çalışmada üç çubuğu kırık rotor arızası çalışıldı.



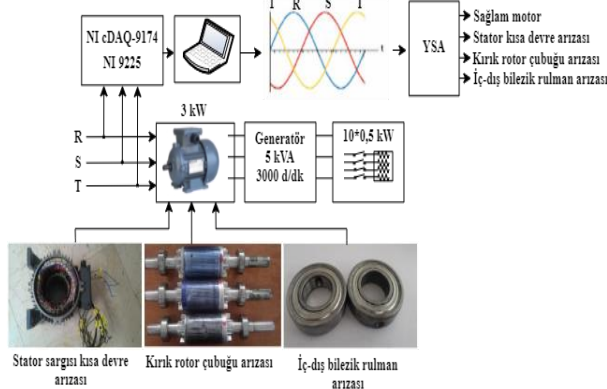
Şekil 3. Kırık rotor çubuğu arızalarının oluşturulması (Implementation broken rotor faults)

Bu çalışmada iç bileziği ve dış bileziği arızalı rulman olmak üzere iki tip rulman arızası ayrı ayrı olarak çalışıldı. Arızalar, rulmanların iç ve dış bileziklerine matkapla delik açılarak oluşturuldu. Şekil 4'te deneysel çalışmada kullanılan arızalı rulmanlar görülmektedir.



Şekil 4. İç ve dış bilezik rulman arızalarını oluşturulması (Implementation inner and outer race bearing faults)

Arızaların tespit edilmesi ve sınıflandırılmasında asenkron motor stator akım sinyalleri kullanıldı. Stator akım sinyalleri Şekil 5'te verilen deney düzeneği kullanılarak kaydedildi. Sinyalleri National Instrument (NI cDAQ-9174) veri toplama sistemi, NI 9225 modülü ile 25 kHz örnekleme frekansıyla kaydedildi.



Şekil 5. Deney düzeneği (The test-bed)

Motor önce sağlam rulman, sağlam stator ve sağlam rotor ile birlikte %100 oranında yüklenerek test edildi. Sonraki aşamada asenkron motor önce, kısa-devre stator sargı arızaları ile birlikte test edildi. Daha sonra stator kısa-devre sargı arızaları ve üç çubuğu kırık rotor ile birlikte test edildi. Son olarak motor iki aşamada test edildi. Önce stator kısa-devre sargı arızaları, üç çubuğu kırık rotor ve iç bileziği arızalı rulmanla birlikte test edildi. En son olarak asenkron motor stator kısa-devre sargı arızaları, üç çubuğu kırık rotor ve dış bileziği arızalı rulmanla birlikte test edildi. Her test için motor %100 oranında yüklenerek çalıştırıldı ve stator akımları kaydedildi.

2.2. YSA ile Çoklu Arıza Sınıflandırılması

(Classification of Multiple Fault by Using ANN)

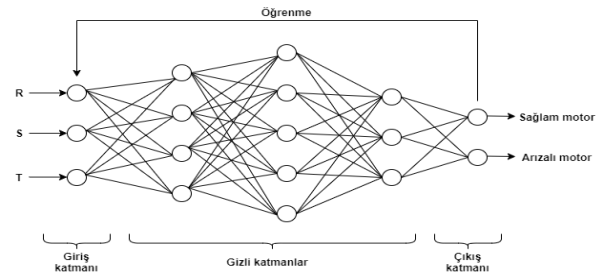
Bir asenkron motor bir veya birden fazla arızaya aynı anda maruz kalabilir. Bu arızaların tespiti için sağlam motor verileri ile arızalı motor verileri karşılaştırılarak yapılır. Çoklu arızaların bazıları aynı karakteristik özellikler gösterdiğinden dolayı harmonik tabanlı yöntemlerle tespit edilmeleri oldukça zordur. Bu durumlarda genellikle makine öğrenmesine dayalı yöntemler tercih edilir.

Bu çalışmada, YSA ile stator sargı akım sinyallerinin işlenmesine dayalı bir yöntemle üç fazlı bir asenkron motorda meydana gelen stator kısa-devre arızaları, kırık rotor çubuğu arızaları ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının tespitine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Literatüre incelendiğinde asenkron motorlarda çoklu arıza tespitine yönelik sınırlık sayıda çalışmanın yapıldığı, yapılan çalışmalarda en fazla iki arıza çeşidinin çalışıldığı ve en yaygın olarak YSA ve DVM gibi makine öğrenmesine dayalı yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir.

Bilindiği üzere lineer olmayan ve geleneksel yöntemlerle çözülemeyen problemlerin çözümünde YSA çok tercih edilen bir yöntemdir. YSA'nın eğitim verileri arasındaki ilişkiye daha fazla duyarlı olduğu ve bu nedenle orantısız veri kümelerinin eğitimlerinde üstün öğrenme performansı gösterdiği rapor edilmiştir [32-34].

Çalışmada önce stator sargı kısa devre arızaları, üç kırık rotor arızası, iç/dış bilezik rulman arızaları olmak üzere üç farklı arıza türünün tekil olarak tespiti ve sınıflandırılması yapılmıştır.

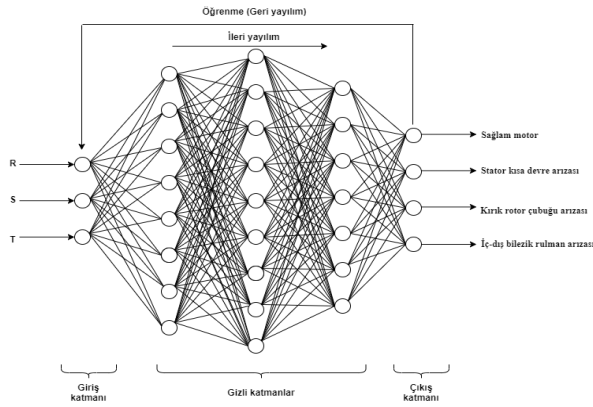
Sonra ise bu üç farklı arıza türünün tek bir motorda aynı anda görülebilme olasılığından hareketle bütünsel arıza kombinasyonlarından oluşan çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılması yapılmıştır. En son aşamada ise de üç farklı arıza türünün ayrık kombinasyonlarının yer aldığı çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da tekil ve birleşik çoklu arızalarının tespiti ve sınıflandırılmasında kullanılan geri yayımlı (backpropagation) çok katmanlı YSA'nın ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 6. Tekli arıza tespiti için tasarlanan çok katmanlı YSA mimarisi (ANN architecture with multi-layer algorithm designed for single fault detection)

Kullanılan YSA mimarisi 3 katmanlı geri yayımlı algoritmasına sahiptir. Giriş katmanında 3 nöron, gizli katmanda 12 nöron ve çıkış katmanında da 2 adet nöron

bulunmaktadır. Bu topolojiye sahip YSA ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen toplam 8 farklı kategorideki tekil arıza grupları sırasıyla sağlam motor durumu ile kıyaslanarak arızaların tespit başarımları kıyaslanmıştır. Aynı ağ topolojisi ile çoklu arıza grubunda yer alan bütünleşik arıza kombinasyonlarından oluşan ilk 6 gruba ait çoklu arıza tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. En az sayıda nöron kullanılarak en fazla başarımların elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede donanımsal olarak uygulanabilir bir YSA mimarisi elde edilmiştir. Bir diğer çoklu arıza türü olan sargı arızaları, üç kırıklı rotor arızası, iç/dış bilezik rulman arızası olmak üzere üç farklı arıza türünün ayrık kombinasyonlarının yer aldığı çoklu arızanın tek bir YSA modeli ile tespiti ve sınıflandırılması için Şekil 7'de görülen YSA modeli tasarlanmıştır. YSA modelinin giriş katmanında 3 nöron, çıkış katmanında 4 nöron, gizli katmanında ise 24 adet nöron bulunmaktadır.



Şekil 7. Çoklu arıza tespiti için tasarlanan çok katmanlı öğrenme (geri yayılım) algoritmasına sahip YSA mimarisi (ANN architecture with multi-layer learning (back propagation) algorithm designed for multiple fault detection)

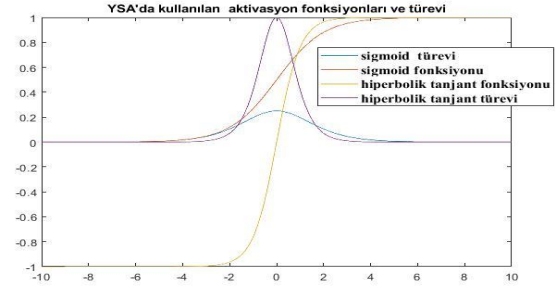
Tasarlanan her iki YSA modelinde de geri yayılım (backpropagation) algoritması uygulanmış delta öğrenme kuralı ile geri yayılım yapılarak hata minimize edilmiştir. YSA'larda aktivasyon fonksiyonu kilit rol oynamaktadır.

Doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonlarına bakıldığında sigmoid fonksiyonu ve hiperbolik tanjant fonksiyonları en çok tercih edilen fonksiyonlardır. Bu iki aktivasyon fonksiyonunun birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. YSA'nın kullanım amacına göre aktivasyon fonksiyonu işlerlik kazanmaktadır [35]. Şekil 8'de sigmoid fonksiyonu ile hiperbolik tanjant fonksiyonlarının alabilecekleri değer aralıkları ile türev fonksiyonları gösterilmektedir.

Şekil 8 incelendiğinde x değişkeninin -10 ile +10 arasında değişimi karşısında hiperbolik tanjant fonksiyonunun türevi, sigmoid fonksiyonu türevine kıyasla daha dik yükselmektedir.

Hiperbolik tanjant fonksiyonunun sigmoid fonksiyonuna göre avantajı daha fazla y değeri almasıdır. Fakat

özellikle sınıflandırma çalışmalarında x eksenindeki en küçük değer değişikliğinin y ekseninde daha fazla karşılığının olması istenmektedir. Bu da şekilde görüldüğü üzere sigmoid fonksiyonunun türevi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle tasarlanan çok katmanlı geri yayımlı YSA ağında aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Tasarlanan ağın başarımlarının tespitinde ortalama karesel hata (Mean squared error, MSE) kriteri referans alınmıştır.



Şekil 8. YSA aktivasyon fonksiyonu ve türev grafikleri (ANN activation functions and their derivatives)

Literatürde çok katmanlı geri yayılım algoritmasına sahip YSA modellerinde öğrenme katsayısının yanında momentum katsayısı da kullanılmaktadır. Momentum katsayısının kullanılması tamamen çalışma yapılacak verilerin özelliğine bağlıdır [36-38].

Özellikle çok katmanlı geri yayılıma sahip YSA ağ modellerinde momentum katsayısı ağırlık sunmuyorsa matematiksel işlem yoğunluğunun azaltılması adına kullanılmamaktadır. Yapılan sınıflandırmada, momentum katsayısı kullanmadan en düşük MSE hata değerleri yakalanmaktadır. Bu nedenle momentum katsayısı kullanılmamıştır.

YSA giriş sinyallerinin toplamının sıfır olması durumunda öğrenme olayı gerçekleşmediğinden dolayı önyargı (bias) değer her bir nöron için bir (1) olarak alınmıştır. YSA temel olarak girdi, ağırlık, toplama işlemi, aktivasyon (eşik) fonksiyonu ve çıktı kısmından meydana gelir. Çok katmanlı geri yayılım algoritması kullanılan YSA modelinde nöronlar giriş çıkış kısımları birbirine ara bağlantılarla bağlanır ve başlangıçta bu bağlantıların ağırlıkları genelde 0-1 arası rastgele atanır. Ağırlık eğitilmesi için giriş verileri girilen bilginin önemine göre ağırlık kazanır. Girdi kısmı ağırlık öğretilen bilgilerden oluşur. Girdideki her bilgi bir ağırlığa sahiptir. Çok katmanlı geri yayılım algoritmasına sahip YSA algoritmasında kullanılan matematiksel denklemler aşağıda verilmiştir [39].

$$E(n) = NET_j^a = \sum_{i=1}^m w_{ji}(n) * x_i(n) \quad (1)$$

Toplama fonksiyonu eşitlik 1'de görüldüğü gibi gelen bilgileri ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak her n'inci eğitim verisi sonrası toplar. Burada w_{ji} j'inci katmanın bir önceki işlem elemanına bağlayan i'inci ara bağlantı ağırlığını, x_i ise girdi değerini ifade eder.

Aktivasyon fonksiyonu olarak geri yayılım algoritmasına dayalı YSA'larda delta öğrenme kuralında yüksek

sınıflandırma başarımlarının yakalandığı sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. Eşitlik 2’de B değeri j. işlem elemanına bağlanan eşik (bias) değerinin ağırlığını ifade etmektedir.

$$\zeta = \frac{1}{1 + e^{-(NET_j^a + B_j^a)}} \quad (2)$$

İleri yayılım tamalandıktan sonra eşitlik 3’te görüldüğü üzere ağ çıkışındaki her bir işlem elemanının hatası bulunur ve geri yayılım bu hataya bağlı olarak yapılır. Burada j. İşlem elemanı için H_j beklenen hedef değer olmak üzere hata hesabı yapılır.

$$E_j = H_j - \zeta_j \quad (3)$$

Ağın toplam hatası eşitlik 4’teki denklem ile bulunur. Tüm yapılan çalışmalarda ortak hedef hatanın minimum değerinde olmasıdır. Hatanın minimum değerinde olması için geri yayılım yapılarak ağırlık güncellemeleri yapılmaktadır.

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum E_j^2(n) \quad (4)$$

Eşitlik 5’te ağırlık güncelleme işlemi yapılmaktadır. Burada Δw ağırlığın değişim miktarını α öğrenme katsayısını göstermektedir. Her katman için t iterasyon sayısı kadar j. ve n. İşlem elemanları arası ağırlık güncellemesi yapılmaktadır.

$$\Delta w_{jn}^a(t) = \delta_n \zeta_j^a + \alpha w_{jn}^a(t-1) + \alpha \quad (5)$$

Hatanın geri yayılımındaki ağırlık güncellemesinde eşitlik 6’daki delta kuralı uygulanmaktadır. Burada aktivasyon fonksiyonu olarak kullanılan sigmoid fonksiyonunun türevi alınmış şekli ile n. işlem elemanı hatası çarpılmaktadır.

$$\delta_n = \zeta_n \cdot (1 - \zeta_n) \cdot E_n \quad (6)$$

Veri eğitiminde t. iterasyon sonrası ağırlıkların yeni değeri eşitlik 7’deki gibi bulunur.

$$\Delta w_{jn}^a(t) = w_{jn}^a(t-1) + \Delta w_{jn}^a(t) \quad (7)$$

Özellikle geri yayılım algoritmasına dayalı delta kuralı uygulanan YSA’larda katman sayısı ve nöron sayısının fazla olması geri yayılımda hatanın önceki katmanlara etkisini azaltmakta, matematiksel işlem yükünü ve eğitim işlem süresi artırmaktadır.

Asenkron motorda arıza tespiti çalışmalarında veri eğitiminde veriler ağa tekil (online) olarak ve toplu (batch) olarak 2 farklı şekilde uygulanmıştır. Tekil eğitimde rastgele seçilen veri ağa uygulanır uygulanmaz hatanın geri yayılımı yapılmakta ve ağırlık güncellenmesi yapılmaktadır. Toplu (batch) eğitimde ise tüm veriler ağda bir defa eğildikten sonra ağırlık güncellenmesi yapılmaktadır [40]. Şekil 9’da tasarlanan geri yayılım algoritmasına sahip YSA ve arıza tespit sınıflandırma algoritması görülmektedir.

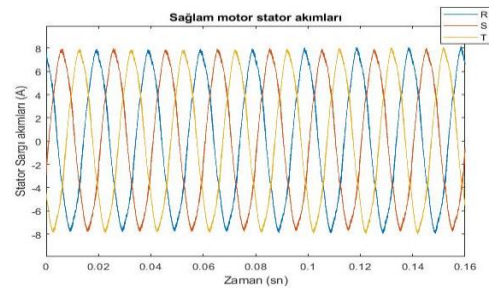


Şekil 9. Çoklu arıza tespiti akış diyagramı (Flow diagram of multiple fault detection)

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Stator Kısa-Devre Sargı Arızaları (Stator Short-Circuit Faults of Stator Windings)

Deneysel çalışmada, Çizelge 1’de özellikleri verilen üç fazlı bir asenkron motorun R fazına ait stator sargısı sırasıyla %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında kısa-devre edilerek %100 yük altında çalıştırıldı. Her bir test için stator akımı 25 kHz örnekleme frekansı ile örnekleterek kaydedildi. Sinyal analizinde MATLAB yazılımı kullanıldı. Şekil 10’da sağlam asenkron motorun %100 yük altında şebekeden çektiği faz akımları görülmektedir.



Şekil 10. Stator sargısı %5 oranında kısa-devre motorun faz akımları (Stator current of motor with 5% short-circuited stator windings)

Çizelge 2’de görüldüğü gibi bir faza ait sargılar arası kısa-devre arıza tipinde kısa-devre oranı arttıkça arızalı sargıdan geçen akım da artmaktadır.

Çizelge 2. Stator sargı akımı tepe değerleri (Peak stator phase currents)

Arıza Tipi	R fazı	Akım değişim o	S fazı	Akım değişim o	T fazı	Akım değişim o
Sağlam Stator	8,390 A	-	8,397 A	-	8,399 A	-
%1 kısa devre	8,648 A	3,075	8,303 A	(-) 1,119	8,399 A	-
%2 kısa devre	9,003 A	7,306	8,325 A	(-) 0,857	8,503 A	1,238
%3 kısa devre	9,207 A	9,737	8,221 A	(-) 2,095	8,448 A	0,583
%4 kısa devre	9,486 A	13,063	8,177 A	(-) 2,619	8,488 A	0,583
%5 kısa devre	9,841A	17,294	8,125 A	(-) 3,239	8,577A	1,881

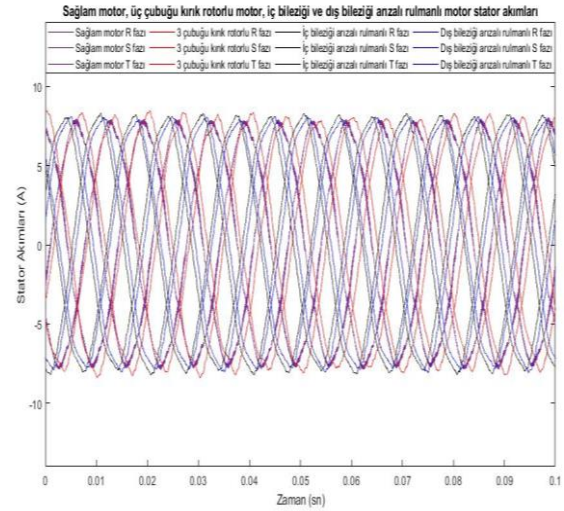
Sağlam motora göre, stator sargısı %1 oranında kısa-devre motorun arızalı fazdan çekilen akımı %3,07 oranında artarken stator sargısı %5 kısa-devre motorun arızalı fazın akımında %17,294 bir artış meydana gelmiştir.

Bir fazda meydana gelen stator sargısı kısa-devre arızası sonucu faz akımlarında dengesizlikler meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak S-fazın akım değerlerinde çok düşük bir azalma meydana gelirken ise T-fazın akım değerlerinde sağlama motora göre küçük bir artış meydana gelmiştir. Stator sargısı kısa-devre arızası durumunda faz akımlarında meydana gelen artış sonucu sargılarda ısı artışı ve yalıtım problemleri ortaya çıkabilir. Bu durum şebekenin de dengesiz olarak yüklenmesine neden olur. Bundan dolayı sargı kısa-devre arızalarının tespit edilmesi önem arz etmektedir.

3.2. Üç Kırıklı Rotor Arızası ile İç-bilezik ve Dış-Bilezik Rulman Arızaları (Inner-ring and Outer-ring Bearing Failures with Triple Fracture Rotor Failure)

Üç fazlı asenkron motorun rotorunda yapay olarak 3 kırık meydana getirildi ve motor tam yükte çalıştırıldı. Stator akımı 25 kHz örnekleme frekansı ile örneklenecek kaydedildi. Daha motorun yük tarafı rulmanında iç bilezik ve dış bilezik arızaları oluşturuldu. Motor iç bilezik ve dış bilezik rulmanlarla ayrı ayrı olarak çalıştırıldı.

Şekil 11'de sağlam motor, 3 çubuğu kırık rotorlu motor, iç bileziği ve dış bileziği arızalı rulmanlı motor stator faz akımları görülmektedir. Arızalar sonucu stator faz akımı sinüzoidal formunda bozulmalar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 11. Sağlam motor, üç çubuğu kırık rotorlu motor, iç bileziği ve dış bileziği arızalı rulmanlı motor stator faz akımları (Phase currents of healthy, motor with three broken rotor bars, inner and outer race bearing faults of induction motor)

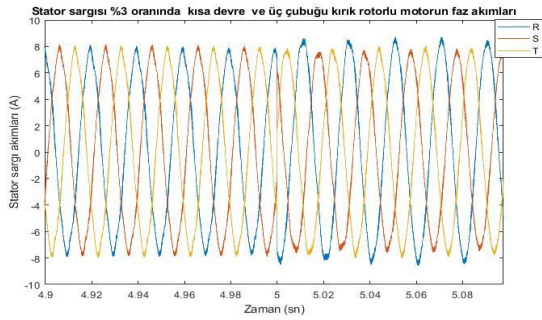
Çizelge 3'de sağlam motor, üç kırıklı rotorlu motor ve iç bileziği ile dış bileziği arızalı rulmanlı motorun tam yük stator faz akımları görülmektedir. Sağlam motora göre, 3 kırıklı rotor çubuğu arızasında en düşük akım değişimi % 0,893'lük bir azalma ile S-faz stator akımında meydana gelmiştir. En yüksek akım değişimi ise % 4,870'lik bir azalma ile dış bilezik rulman arızasında meydana gelmiştir.

Çizelge 3. Sağlam motor, 3 çubuğu kırık rotorlu motor, iç bileziği ve dış bileziği arızalı rulmanlı motorun stator faz akımı tepe değerleri (Peak stator phase currents of healthy motor, motor with three broken rotor bars, with inner and outer race bearing faults)

Arıza Tipi	R fazı	Akım değişim oranı (%)	S fazı	Akım değişim oranı (%)	T fazı	Akım değişim oranı (%)
Sağlam Stator	8,390 A	-	8,397 A	-	8,399 A	-
3 kırıklı rotor	8,515 A	1,489	8,322 A	(-) 0,893	8,554 A	1,845
Rulman iç bilezik	8,329 A	(-) 0,727	8,199 A	(-) 2,357	8,351A	(-) 0,571
Rulman dış bilezik	8,130 A	(-) 3,098	7,988 A	(-) 4,870	8,227 A	(-) 2,047

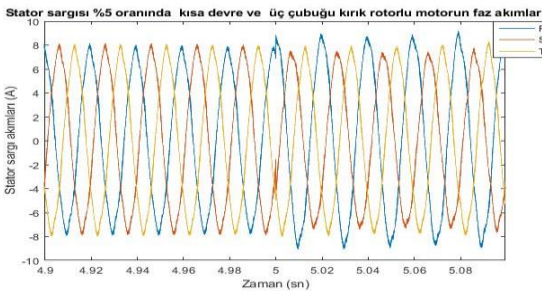
3.3 Stator Kısa-Devre Sargı Arızaları, Kırık Rotor Çubukları ile İç Bilezik ve Dış Bilezik Rulman Arızaları (Stator Short-Circuit Winding Faults, Broken Rotor Bars, and Inner and Outer Race Bearing Faults)

Asenkron motorun bir faz stator sargısı sırasıyla, %3 ve %5 oranlarında kısa-devre iken üç çubuğu kırık rotor ile %100 oranında yüklenerek çalıştırıldı. Sonrasında stator arızalı motor önce iç bilezik rulman arızası ile sonrasında ise dış bileziği arızalı rulman ile birlikte %100 oranında yüklenerek çalıştırıldı. Şekil 12’de stator sargısı %3 oranında kısa-devre edilmiş asenkron motorun üç çubuğu kırık rotor ile çalışmada şebekeden çektiği akımlar verilmektedir. Motorun arızalı faza ait akımın arttığı görülmektedir. Sağlam motorda stator akımı tepe değeri 8,390 A iken statoru %3 kısa-devre edilmiş üç kırıklı rotorlu asenkron motorun arızalı faz stator akımı tepe değeri 9,005 ampere ulaşmıştır.



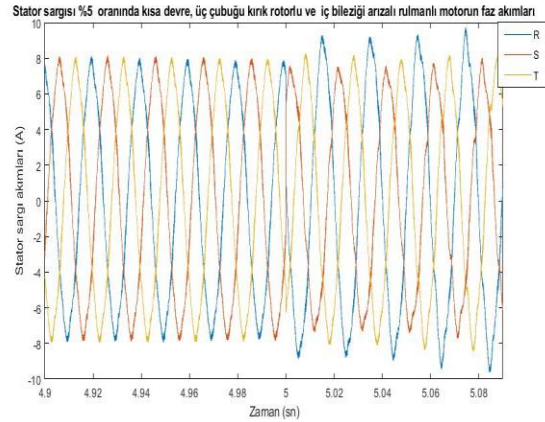
Şekil 12: Stator sargısı %3 oranında kısa-devre ve üç çubuğu kırık rotorlu motorun faz akımları (Stator phase current of motor with 3% short-circuited stator windings and three broken rotor bars)

Şekil 13’de stator sargısı %5 oranında kısa-devre ve üç çubuğu kırık rotorlu asenkron motorun tam yük altında şebekeden çektiği faz akımları verilmektedir. Motorun arızalı fazına ait akımın %3 stator sargısı kısa-devre arızasına göre daha fazla arttığı görülmektedir.



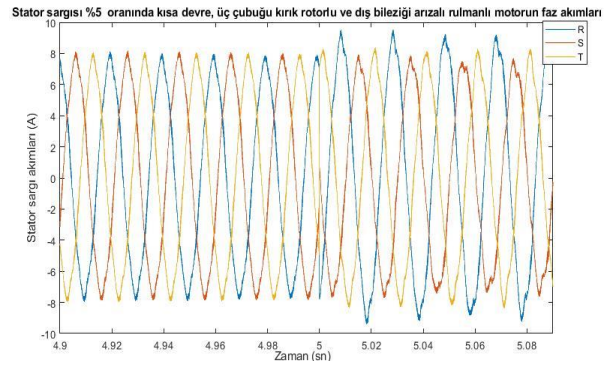
Şekil 13. Stator sargısı %5 oranında kısa-devre ve üç çubuğu kırık rotorlu motorun faz akımları (Stator phase current of motor with 5% short-circuited stator windings and three broken rotor bars)

Şekil 14’de R-fazı stator sargısı %5 oranında kısa-devre edilmiş asenkron motorun üç çubuğu kırık rotor ve iç bilezik rulman arızası ile tam yük altında şebekeden çektiği stator faz akımları görülmektedir.



Şekil 14: Stator sargısı %5 oranında kısa-devre, üç çubuğu kırık rotorlu ve iç bileziği arızalı rulmanlı motorun faz akımları (Stator phase currents of motor with 5% short-circuited stator windings, three broken rotor bars and inner race bearing fault)

Şekil 15’de stator bir faz sargısı %5 oranında kısa-devre edilmiş asenkron motorun üç çubuğu kırık rotor ve dış bileziği arızalı rulman ile tam yük altında şebekeden çektiği stator faz akımları görülmektedir.



Şekil 15: Stator sargısı %5 oranında kısa-devre üç çubuğu kırık rotorlu ve dış bileziği arızalı rulmanlı motorun faz akımları (Stator phase currents of motor with 5% short-circuited stator windings, three broken rotor bars and outer race bearing fault)

Çizelge 4’te görüldüğü üzere stator sargı akımlarındaki dengesizliğe en fazla stator kısa-devre arızası neden olmaktadır. Kısa-devre oranı arttıkça rotor kırığı ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının etkisi daha fazla belirginleşmektedir.

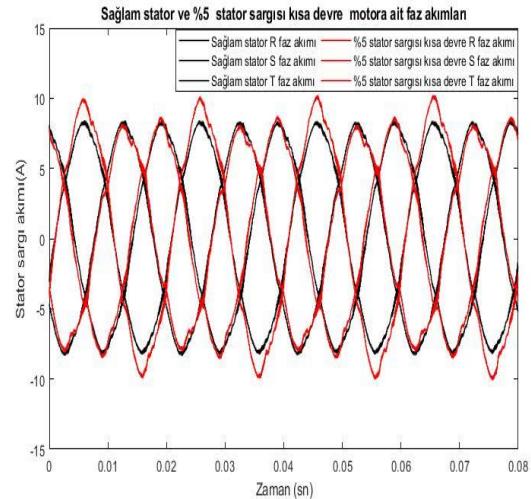
Çizelge 4. Arıza tiplerine göre stator akımı tepe değerleri (Peak stator currents of induction motor verses fault types)

Arıza tipleri	R	S	T
% 3 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, sağlam rulman	9,005 A	8,380A	8,475 A
% 3 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, iç bileziği arızalı rulman	8,989 A	8,380 A	8,365 A
% 3 kısa devre, üç çubuğu kırık rotor, dış bileziği arızalı rulman	9,027 A	8,380 A	8,489 A
% 5 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, sağlam rulman	9,396 A	8,380 A	8,403 A
% 5 kısa devre, üç çubuğu kırık rotor, iç bileziği arızalı rulman	9,910 A	8,380 A	8,720 A
% 5 kısa devre, üç çubuğu kırık rotor, dış bileziği arızalı rulman	9,686 A	8,380 A	8,608 A

3.4. Arıza Tespiti ve Sınıflandırma (Detection and Classification of Faults)

Deneyel çalışma kapsamında asenkron motor arızalarının tespiti ve başarımlarının belirlenmesi için elde edilen deneysel veriler toplam 8 grupta toplanmıştır. Her bir gruptaki arızalara ait stator akımları sağlam motor stator akımları ile kıyaslanarak arıza tespiti yapılmıştır. Kullanılan 3 giriş 2 çıkışlı çok katmanlı geri yayılım algoritmasına sahip YSA modelinde (Şekil 6) girdi olarak asenkron motor stator faz akımları kullanılmıştır. Çıktı kısmında ise sağlam statora sahip motorun faz akımları ile Çizelge 5'te verilen 8 gruba ait arızalı motorun stator faz akımları kıyaslanarak, lineer olmayan periyodik 3 faz dalga fonksiyonları sigmoid fonksiyonu için 0-1 arası verilere dönüştürülerek gruplandırılmıştır.

Literatürde gizli katmandaki nöron tespitine yönelik sabit bir kural yoktur. Bu nedenle 8 grup için oluşturulan YSA ağ yapısında gizli katmanlardaki nöron sayısı, öğrenme katsayısı deneme yanılma yöntemi ile en yüksek başarımların tespit edilinceye kadar denenmiştir. YSA modellerinin donanımsal olarak uygulanabilirliğinin gösterilmesi açısından ve asenkron motorda arıza tespitindeki başarımların performansını göstermesi amacıyla tüm çalışmalarda verilerin %60'ı eğitim, %40'ı test için kullanılmıştır. Her bir arıza grubu için 400 adet veri kullanılmıştır. Başarımların kıyaslanmasında eğitim başarımları yanında test başarımları da referans alınmıştır. Ağa ham veriler uygulanarak test başarımları elde edilmiştir. Şekil 16'da görüldüğü üzere sağlam stator ve %5 oranında kısa devre edilen stator faz akımları simetrik bir yapıya sahip olduğundan dolayı stator akım analizinde genlik farkından yararlanarak sınıflandırma çalışması yapılmaktadır.



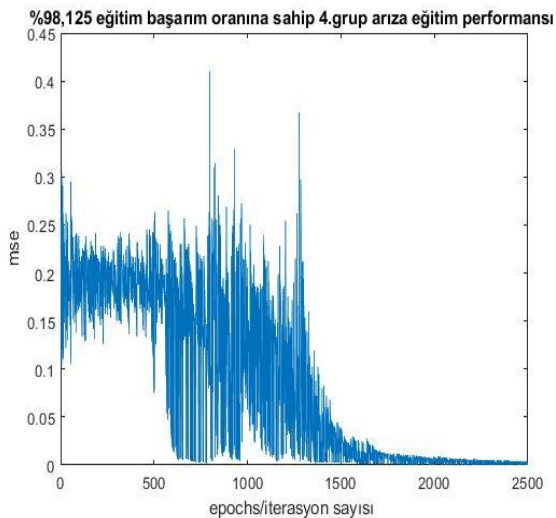
Şekil 16: Sağlam stator ve %5 stator sargısı kısa devre motora ait faz akımları (Phase currents of healthy motor and motor with 5% stator winding fault)

Çizelge 5'te görüldüğü gibi en düşük arıza tespit başarımları 1. grupta yer alan %1 oranındaki stator sargısı kısa-devre arızasının tespitinde elde edilmiştir. Bu arızanın tespit oranı eğitim ve test için %75'dir. En yüksek arıza tespit başarımları eğitimde %98,125 ile 4. grupta yer alan % 4 kısa-devre arızasında elde edilmiştir. Üç çubuğu kırık rotor arızasında test başarımları %89,3 ile 6. grupta elde edilmiştir. YSA MSE hata değerleri ve öğrenme katsayıları tamamen veri türüne bağlı olarak değişmektedir. Eğitimle test başarımlarının birbirine yakın çıkması, sistemin daha verimli olduğunun ve en ideal ağırlık değerlerinin ezberlemeden bulunduğu göstermektedir.

Çizelge 5. Arızaları YSA ile tespit başarımlar oranları (ANN performances fault identification)

Arıza grupları	Arıza türleri	Mse-öğrenme katsayısı	Başarı oranları	YSA başarı oranı (%)
1.Grup	%1 kısa-devre	0,0093-1,6	Eğitim Test	75 75
2. Grup	%2 kısa-devre	0,0020-1,6	Eğitim Test	88,125 75
3.Grup	%3 kısa-devre	0,038-1,6	Eğitim Test	91,25 83,75
4.Grup	%4 kısa-devre	0,0535-1,6	Eğitim Test	98,125 86,25
5.Grup	%5 kısa-devre	0,0102 -1,6	Eğitim Test	88,75 91,875
6.Grup	Üç çubuğu kırık rotor	0,0017-0,9	Eğitim Test	88,3 89,3
7.Grup	İç bileziği arızalı rulman	0,0049-0,9	Eğitim Test	85,125 82
8.Grup	Dış bileziği arızalı rulman	0,0013-0,9	Eğitim Test	83,075 81,25

Şekil 17’de %98,125 eğitim başarımlar oranına sahip 4. grup (% 4 stator kısa-devre arızası) eğitim performans grafiği görülmektedir. Arıza verilerinin eğitiminde tekil eğitim yöntemi uygulanmıştır. Her veri rastgele ağı uygulanarak bulunan hata sonrası ağırlık güncellemesi yapılmıştır. Öğrenme katsayısının yüksek olması daha düşük iterasyon değerlerinde daha düşük hata değerini yakalamaya yani daha yüksek başarımlar elde etmeye yol açmaktadır. Fakat grafikte görüldüğü üzere verilerin eğitimi aşamasında yüksek sıçramalara neden olmaktadır. Özellikle geri yayılım algoritmasına sahip çok katmanlı YSA’larda eğitim verilerinin rastgele alınması eğitim ve test başarımlar oranlarının arttırdığı görülmüştür.



Şekil 17: %98,125 eğitim başarımlar oranına sahip % 4 stator kısa-devre arızası eğitim performans grafiği (4% stator short-circuit fault training performance with 98,125% training success rate)

3.5. Çoklu Arıza Tanıma ve Sınıflandırma (Detection and Classification of Multiple Faults)

Çoklu Arıza tespitinde en az üç adet arızanın birleşik ve ayrık olarak farklı kombinasyonlarının tespiti hedeflenmiştir. Bu arızalar Çizelge 6’da görüldüğü üzere 7 ayrı grupta sınıflandırılmıştır. Çoklu arıza tespitinde ilk 6 grup için 3 giriş 2 çıkışlı YSA ağı yapısı (Şekil 6) kullanılmıştır. 7. Grup arıza için ise 3 giriş 4 çıkışlı YSA ağı yapısı (Şekil 7) kullanılmıştır Her iki grup arıza sınıflandırmasında 500 adet veri kullanılmıştır. Tasarlanan ağı tahmin gücünü göstermesi amacıyla tüm verilerin %60’i eğitim, %40’ı test için kullanılmıştır.

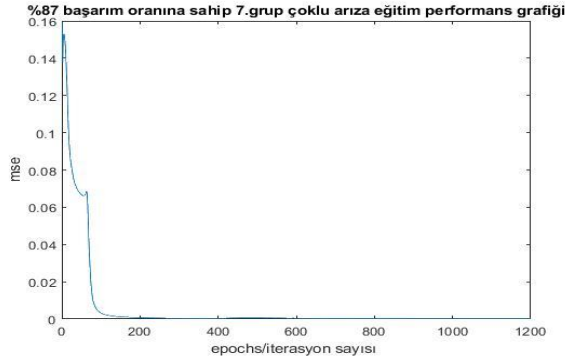
Çizelge 6’da görüldüğü üzere ilk 6 grupta farklı oranlardaki stator kısa devre sargı arızaları ve kırık rotor çubuğu arızası ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarından oluşan birleşik çoklu arıza kombinasyonlarının tespiti ve sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. En yüksek başarımlar test oranı %95 ile %5 stator kısa devre, üç çubuğu kırık rotor ile sağlam rulmana sahip motorun çoklu arıza tespitinde ve sınıflandırması elde edilmiştir.

7. Grupta stator kısa devre, üç çubuğu kırık rotor arızası ile iç bilezik - dış bilezik rulman arızasından oluşan 4 farklı arıza türünün kombinasyonunda arıza tespiti ve sınıflandırması %87 test başarımlar oranı ile gerçekleştirilmiştir. Arıza tespiti YSA başarımlar oranları incelendiğinde, arıza türü çeşitlendikçe arıza tespit başarımlar oranları değişse bile makul sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6. Çoklu arıza tespit başarımları (Detection rate of multiple faults detection)

Arıza grupları	Arıza türleri	Mse-öğrenme katsayısı	Başarımları	YSA başarımları (%)
1.Grup	% 3 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, sağlam rulman	0,0017-0,9	Eğitim Test	100 85
2.Grup	%3 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, dış bileziği arızalı rulman	0,0049-0,9	Eğitim Test	88,75 87,5
3.Grup	%3 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, iç bileziği arızalı rulman	0,0135-0,9	Eğitim Test	81,250 85
4.Grup	%5 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, sağlam rulman	0,0100-0,9	Eğitim Test	99,375 95
5.Grup	%5 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, dış bileziği arızalı rulman	0,0251-0,9	Eğitim Test	83,125 81,875
6.Grup	%5 kısa-devre, üç çubuğu kırık rotor, iç bileziği arızalı rulman	0,0171-0,9	Eğitim Test	82,5 84,375
7. Grup	Stator kısa devre, üç çubuğu kırık rotor, iç bileziği ve dış bileziği arızalı rulman	0,0001-0,03	Eğitim Test	87 87

Şekil 18'de %87 başarımlarına sahip eğitim performans grafiği görülmektedir. Eğitim hata oranı performans grafiğinin direk minimuma ulaşması eğitim verilerinin toplu (batch) yöntemi ile uygulanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 18: %87 eğitim ve test başarımlarına sahip 7.Grup arıza tespiti YSA eğitim performans grafiği (Fault detection ANN training performance graph with 87% training and test success rate of Group 7)

Çizelge 7. Arıza tespiti performans kriterleri (Fault detection performance criteria)

Arıza grupları	Arıza türleri	YSA Modeli	Başarımları Eğitim-Test (%)	YSA Eğitim süresi (sn)	YSA Test süresi(sn)
1.Grup (Tekil arıza)	%5 stator kısa devre arızası	3 giriş-2çıkış 3 gizli katman 12 nöron	88,75-91,875	6,057	0,191
2.Grup (Çoklu arıza)	Stator kısa devre, üç çubuğu kırık rotor, iç ve dış bilezik rulman arızası	3 giriş-4 çıkış 3 gizli katman 24 nöron	87-87	22,468	0,398

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, üç fazlı bir asenkron motorun kısa-devre stator sargı arızası, kırık rotor çubukları ile iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Arıza tespit çalışmaları, üç faz stator akımları çok katmanlı geri yayılım algoritmasına dayalı YSA modelleri ile işlenerek gerçekleştirilmiştir. Stator kısa-devre arızalarının %1 ve %2 oranlarında olduğu durumlarda başarı oranının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle özellikle yüksek güce sahip motorlarda stator arıza tespitinde stator akımlarının analizine ilaveten titreşim sinyallerinin de YSA ile işlenmesi arıza tespit başarı oranını arttıracığı değerlendirilmektedir. Çoklu arıza tespitinde, stator sargısı kısa-devre arızalarına nazaran kırık rotor çubukları ile iç ve dış bilezik rulman arızalarının motorun stator akımında daha az değişim meydana getirdiği ve YSA ile arıza tespitinin daha zor olduğu gözlemlenmiştir. Kırık rotor çubukları ile iç ve dış bilezik rulman arızalarında stator akımına ilaveten titreşim gibi farklı sinyallerin de YSA ile analiz edilmesi başarı oranının yükselmesine olumlu katkı sunacaktır. Çoklu arızaların tespitinde, arıza çeşitliliği arttıkça tespit başarımının azaldığı, tasarlanan YSA modellerine bağlı olarak matematiksel işlem yükünün ve arıza tespit süresinin arttığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar kullanılan yöntemin sahada kullanılabilirliğini göstermiştir. MATLAB ortamında YSA ile çoklu arıza tespitinde en yüksek başarı oranı 398 ms sürede %87 olarak kaydedilmiştir. Aynı yöntemin FPGA (Field Programmable Gate Array - Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) ile donanımsal olarak gerçekleştirilmesi ile arıza tespit süresinin düşeceği değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada kullanılan deneysel veriler TÜBİTAK 116E302 nolu projesi kapsamında elde edilmiştir. TÜBİTAK Başkanlığına teşekkür ederiz.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Kadir KAYA: Deneysel yapımları ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Abdurrahman ÜNSAL: Deneysel yapımları ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yeh C., Sayed-Ahmed A., Povinelli R., "A Reconfigurable motor for experimental emulation of stator winding inter-turn and broken bar faults in polyphase induction machines", *IEEE Trans. Energy Convers.*, 23(4), 1005-1014, (2008).
- [2] Bonnet A.H., "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", *IEEE Transaction on Industry Applications*, 28(4), 921-437, (1992).
- [3] Eftekhari M., Moallem M., Sadri S., Shojaei A., "Review of induction motor testing and monitoring methods for inter turn stator winding faults", *Iranian Conference on Electrical Engineering*, 13-18, (2013).
- [4] Nandi S., Toliyat H.A., Li X., "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A Review", *IEEE Trans. Energy Convers.*, 20(4), 719-729, (2005).
- [5] Siddique A., Yadava G.S., and Singh B., "A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1), 106-114, (2005).
- [6] IEEE, IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines, (2004).
- [7] Bonnett A., Yung C., "Increased efficiency versus increased reliability", *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 14(1), 29-36, (2008).
- [8] Immovilli F., et al., "Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 46(4), 1350-1359, (2010).
- [9] Ukil A., Chen S., Andenna A., "Detection of stator short circuit faults in three-phase induction motors using motor current zero crossing instants", *Electric Power Systems Research*, 81(4), 1036-1044, (2011).
- [10] Leite V., Borges da Silva J.G., "Detection of localized bearing faults in induction machines by spectral kurtosis and envelope analysis of stator current", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62(3), 1855-1865, (2015).
- [11] Frosini L., Bassi E., "Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57(1), 244-251, (2010).
- [12] Siddiqui K.M., Sahay K., Giri V.K., "Health-monitoring-and-fault-diagnosis-in-induction-motor-a-review", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(1), 6549-6564, (2014).
- [13] Henao H., et al., "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques", *IEEE ind. Electron. Mag.*, 8(2), 31-42, (2014).
- [14] Kang, M., Kim j., Kim J.M., "High-performance and energy-efficient fault diagnosis using effective envelope analysis and denoising on a general-purpose graphics processing unit", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(5), 2763-2776, (2015).
- [15] Puche Panadero R., et al., "Improved resolution of the MCSA method via hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip", *IEEE Trans. Energy Convers.*, 24(1), 52-59, (2009).

- [16] Konar P., Chattopadhyay P., "Multi-class fault diagnosis of induction motor using hilbert and wavelet transform". *Applied Soft Computing*, 30, 341-352, (2015).
- [17] Frosini L., Harlisa C., and Szabo L., "Induction Machine Bearing Fault Detection by Means of Statistical Processing of the Stray Flux Measurement". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3),1846-1854, (2015).
- [18] Frosini L., et al. "Multiple faults detection in low voltage inverter-fed induction motors." 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines", *Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, *IEEE*, 323-329, (2019).
- [19] Kaikaa, Mohamed Y., Marouane H., Adjami, and Abdelmalek K., "Effects of the simultaneous presence of static eccentricity and broken rotor bars on the stator current of induction machine", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2452-2463, (2013).
- [20] Ojaghi M., Sabouri M., Faiz, J., "Performance analysis of squirrel-cage induction motors under broken rotor bar and stator inter-turn fault conditions using analytical modeling", *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5,(2018).
- [21] Soualhi A., Clerc G, Razik H., and Ondel O., "Detection of Induction Motor Faults by an Improved Artificial Ant Clustering", *In IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* ,3346-3451, (2011).
- [22] Kolla S.R., Altman S.D., "Artificial neural network based fault identification scheme implementation for a three-phase induction motor", *ISA Transactions*, 46(2), 261 – 266, (2007).
- [23] Bazan G.H., Scalassara P.R., Endo W., Goedel A., Godoy W.F., Palacios R.H.C., "Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural Networks", *Electric Power System Research*, 143, 347–356, (2017).
- [24] Burriel Valencia J., Puche-Panadero R., Martinez-Roman J., Sapena-Bano A., Pineda-Sanchez M. , Perez-Cruz J., Riera-Guasp M., "Automatic fault diagnostic system for induction motors under transient regime optimized with expert systems", *Electronics*, 8(6), 1-16, (2018).
- [25] Godoy W.F., Da Silva I.N., Goedel A, Palacios R.H.C., Lopes T.D., "Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter, IET Electr". *Power Appl.*, 10(5), 430–439, (2016).
- [26] Merabet H., Bahi T., Drici D., Halam N., " Bedoud K., Diagnosis of rotor fault using neuro-fuzzy inference system, Journal of Fundamental and Applied Sciences", 9(1), 170–182, (2017).
- [27] Lashkari N., Poshtan J., Azgomi H.F., "Simulative and experimental investigation on stator winding turn and unbalanced supply voltage fault diagnosis in induction motors using Artificial Neural Networks", *ISA Transactions*, 59, 334-342, (2015).
- [28] Martins J.F., Ferno V., Pires A.J., "Unsupervised neural-network-based algorithm for an on-line diagnosis of three-phase induction motor stator fault", *IEEE Transactions on industry applications*, 54(1), 259-264, (2007).
- [29] Gupta K., Kaur A., "A Review on fault diagnosis of induction motor using artificial neural Networks", *International Journal of Science and Research*, 3(7),680-684, (2014).
- [30] Arabaci H., Bilgin O., "Automatic detection and classification of rotor cage faults in squirrel cage induction motor", *Neural Computing And Applications*, 19(5), 713-723, (2010).
- [31] Ali M.Z., Shabbir N.S.K., Liang X., Zhang Y., Hu T., "Machine learning-based fault diagnosis for single- and multi-faults in induction motors using measured stator currents and vibration signals", *Industry Applications IEEE Transactions* , 55(3), 2378-2391, (2019).
- [32] Moraes R., Valiati J.F., Neto W.P.G. , "Document-level sentiment classification: An empirical comparison between DVM and Ann", *Expert Systems with Application*, 40(2), 621-633, (2013).
- [33] Ren J., Ann vs. "svm: Which one performs better in Classification of mccs in mammogram imaginig", *Knowledge-Based Systems*, 26, 144-153, (2012).
- [34] Yabanova İ., Kaya K., "Kaynak değeri olan yaban hayvanlarının görüntü işleme tekniği ile tespiti ve sayımı", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(2), 174-187,(2019).
- [35] Kazuyuki H., and Kenji N., "Selection of Activate Function for Multilayer Neural Networks", *Reports of the Tokyo Metropolitan Technical College*, (2000).
- [36] Pedamonti, Dabal. "Comparison of non-linear activation functions for deep neural networks on MNIST classification task." *arXiv preprint arXiv:1804. 02763*, (2018).
- [37] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*, Pearson. Upper Saddle River, NJ, USA, 3,(2009).
- [38] Arı, Ayşe, and Murat Erşen Berberler. "Yapay sinir ağları ile tahmin ve sınıflandırma problemlerinin çözümü için arayüz tasarımı." *Acta Infologica* 1.2, 55-73, (2017).
- [39] Rojas R "7. The backpropagation algorithm", *Neural networks: a systematic introduction*, *Springer Science & Business Media*, Berlin, (2013).
- [40] Mohri, Mehryar, Afshin Rostamizadeh, and Ameet Talwalkar. "Foundations of Machine Learning. Adaptive computation and machine learning." *MIT Press*, 31:32, (2012)