

Aşırı Öğrenme Makinası Yöntemi ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Verileri Kullanılarak Sargı İzolasyonu Arızasının Tespiti

Detection of Winding Insulation Fault by Using Moment Data of Permanent Magnet Synchronous Motor with Extreme Learning Machine Method

Ferhat ÇIRA^{1*} 

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye
fcira@dicle.edu.tr

Öz

Elektrik makinalarının arızalarının erken tespitinin yapılmaması, felaketle sonuçlanabilecek arızalara neden olduğu bilinmektedir. Endüstride en çok kullanılan motorların asenkron motorlar olması sebebiyle durum izleme ve arıza tespiti bu makinalar üzerine yoğunlaşmıştır. Oysa hassas hız ve konum kontrolü gerektiren uygulamalarda sürekli mıknatıslı motorların (SMSM) kullanılmaya başlanmasıyla birçok araştırmacı bu motorların arıza tespiti çalışmaları yaygınlaştı. SMSM'lerin hassas hız ve konum kontrolü kabiliyetleri tamamen sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. En küçük bir arıza sonucu bu hassasiyet kaybolabileceğinden bu tür motorlarda arızanın erkenden tespit ve teşhis edilebilmesi çok önemlidir. Bu çalışmada SMSM'lerde sıkça meydana gelen stator izolasyon arızasının erken evrede arıza tespiti için bir boyutlu yerel ikili desenler (1b-YİÖ) tabanlı öznelik çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla sağlıklı ve farklı kısa devre arıza oranlarına sahip SMSM'lerden labview programı tabanlı veri toplama kartı ile moment verileri alınmıştır. Sağlıklı ve arızalı motorlardan alınan moment işaretlerine 1b-YİÖ uygulanmış ve histogramları elde edilmiştir. Elde edilen histogramlar ile sağlıklı ve arızalı motorların öznelikleri oluşturularak aşırı öğrenme makinesi (AÖM) yöntemi ile işaretler sınıflandırılmıştır. Arızanın tespitinin erken evrede yapılabilmesi için önerilen bu yaklaşım ile oldukça büyük bir başarı sağlandığı görülmüştür. Bu amaçla üretilen farklı arıza şiddetine sahip motorların farklı hız ve yüklenme koşulları altında yapılan deneyler ile yöntemin başarısı doğrulanmıştır. Böylece daha önce literatürde olmayan bir yöntem ile SMSM'nin stator izolasyon arızasının tespiti yüksek güvenilirlikli ve başarıyla yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tek boyutlu İkili örüntü yöntemi; Öznelik çıkarım; Arıza tespiti; Sınıflandırma;

Abstract

Failure in early detection of faults of electrical machines is known to cause catastrophic malfunction. As induction motors are most common motors in industry, condition monitoring and fault detection are concentrated on these machines. However, with the use of permanent magnet motors (PMSM) in applications requiring precise speed and position control, many researchers have studied the fault detection of motors. The precise speed and position control capabilities of the PMSMs totally depend on their healthy operation. Since this precision can be lost due to the slightest failure, it is very important to detect and diagnose the fault early on such motors. In this study, a feature extraction method based on one dimensional local binary pattern (1D-LBP) method which is a distinctive method, has been used for feature extraction. It has been proposed for fault detection of early stage stator insulation fault occurring frequently in PMSMs. In this study, torque data were obtained from PMSMs with healthy and different short circuit fault rates. 1b-YİÖ was applied to these data, and the histograms of torque signals were obtained. Healthy and faulty motors could be classified at high success rates applying one of the extreme learning machine (ELM) technique, to histograms. Using these features, ELM method is used to classify the signals. It has been observed that great success has been achieved with this approach in order to detect the fault in an early stage. The success of the method has been confirmed by experiments performed under different speed and loading conditions of motors with different fault severities.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Machine, Local Binary Pattern, Texture Analysis, Fault Detection.

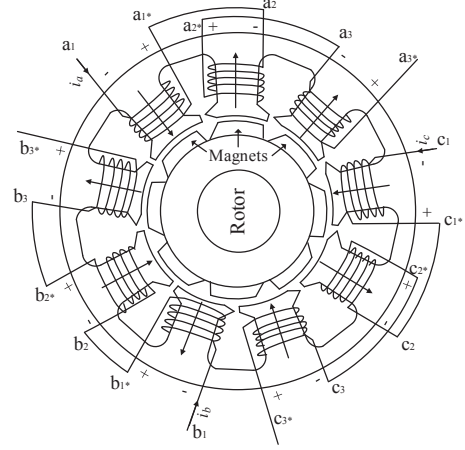
1. Giriş

Yolcu güvenliğinin ön planda olduğu havataşıtlarında itme ve diğer güvenlik tertibatının kontrolünü sağlayan elektrik motorlarında olası bir arızanın erken tespit edilmesi hayati derecede önemlidir. Benzer şekilde endüstriyel bir üretim tesisinde örneğin bir nükleer santralde hayati bir kontrol mekanizmasının motor arızası kaynaklı çalışmaması çok büyük felaketlere çok açabilmektedir. Bu nedenle, felaketle ilgili arıza riskini en aza indirmek ve güvenilir operasyonlar için erken arıza teşhisinin yapılması önemlidir.

Havacılık ve uzay sanayi, endüstri ve silah sistemlerinde Sürekli mıknatıslı motorlar (SMSM) son yıllarda pazar payına hakim duruma gelmiştir. Özellikle hassas kontrol gerektiren uygulamalardaki kararlılığı ve verimliliği nedeniyle tercih edilmektedir [1]–[3]. Ayrıca, yüksek güç / tork yoğunluğuna sahip olan bu motorlar, yüksek mekanik, ısı ve elektriksel gerilimlere maruz kalmaktadırlar. Bu da arızalara daha yatkın hale gelmesine neden olmaktadır. Özellikle, SMSM’de sarğı yalıtımının bozulması ile ilgili arızaların teşhisi, anahtarlama frekansı ve sarğı iletkenlerinin termal stresi arttıkça daha fazla önem kazanmaktadır [4].

SMSM’leri yapısal olarak diğer motorlardan ayırt eden en önemli farkı rotorlarındaki mıknatıslardır [5]. Şekil-1’de bir SMSM’nin iç yapısının şematik gösterimi görülmektedir. SMSM’lerin hassas çalışması sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. Arızalı bir SMSM ‘nin çalışma hassasiyeti beklenenden düşüktür. Bunun yanı sıra henüz başlangıç aşamasındaki arızanın tespit edilememesi durumunda çok büyük zararlara yol açtığı bilinmektedir. Çok küçük bir stator sarğı izolasyonu arızası yayılarak kısa zamanda tüm motoru etkileyeceğinden, erkenden tespit edilmesi oldukça önemlidir. Elektrik motorlarının arıza tespiti için önerilen birçok öznelik çıkarma yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden birçoğu akım, gerilim, titreşim, moment ve sıcaklık gibi motor parametrelerine dayalı olarak geliştirilmiştir. En kolay ve maliyeti en düşük yoldan elde edilebilen motor sinyalleri işlenerek yapılan ve başarıya ulaşan arıza tespit yöntemleri endüstride kullanılabilirliği daha yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedir [6]–[10].

Bu yöntemler motorlardan elde edilen bahsedilen parametreleri sinyal işleme yöntemleri kullanılarak karakteristik özelliklerinin çıkarılması esasına dayanmaktadır. Böylece arızalı ve sağlıklı motorları birbirinden ayırt edebilecek sinyal karakteristikleri elde edilmektedir [11]. Öznelikler çıkarılırken uygulanan yöntemin başarısı motorun sağlıklı veya arızalı olduğunun tespitinin başarısıyla ölçülmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda sinyallerin farklı işleme tekniklerinden yararlanılmıştır. Elektrik motorlarının stator kısa devre arızalarının erken evrede tespitinin yapılmaması, telafisi mümkün olmayan zararlara yol açabilmektedir [12]–[14].



Şekil 1. SMSM'nin stator ve rotor modeli

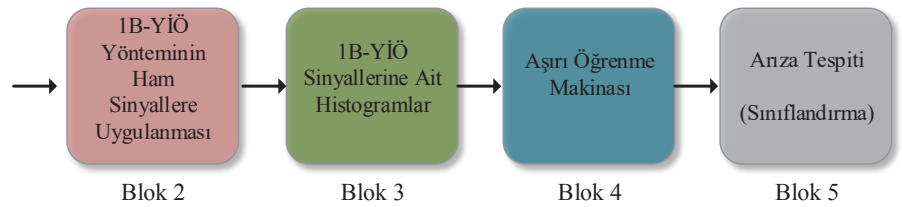
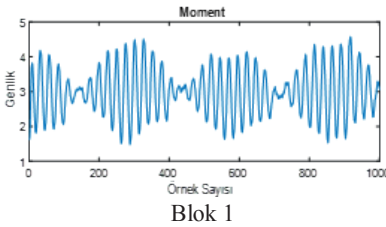
İlk stator arıza tespit çalışmaları 1980'lerde indüksiyon motorlar (IM) ve senkron makineleri (SMs) üzerinde yapıldı. Geniş çapta yapılan bir motor güvenilirlik anketinin sonucu, IM'lerde arızaya sebebiyet veren nedenlerinin % 30'undan ve SM'lerde arıza başlatıcıların % 40'ından fazlasının stator arızası ile ilişkili olduğunu göstermektedir [15]. SMSM'lerin kullanım alanı genişledikçe, arıza tespiti çalışmaları da artmaktadır. Bu alandaki kapsamlı çalışmalardan biri Gandhi ve ark. [16] tarafından 2011 yılında, SMSM'lerde stator kısa devre arızasının teşhisi ve modellenmesi özetlenmiştir. Ayrıca, Hamiti ve ark. [17] ve Arumugam ve ark. [18] SMSM için kısa devre arıza tespit yöntemlerini incelemiştir. SMSM'nin stator izolasyon arızasının erken evrede tespitinin yapılmasının zorluğu birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir.

Vektör kontrollü SMSM'ler bir dq-ekseni çerçevesi ile senkronize olduğundan ve normal olarak bir SMSM'yi kontrol etmek için kullanıldığından q-ekseni akımının ikinci harmoniğinin değişimi bu şekilde kolayca izlenebilir [19], [20]. Basit frekans spektrum analizine dayalı arıza tespit teknikleri ile arıza tespiti [21] ve [22]'de yapılmıştır. Stator kısa devre arızasının zamana göre değişen imzasını durağan olmayan ve dinamik bir durumda değerlendirmek için, stator kısa devre arızası tespiti için frekans-zaman analizi yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerde, stator akım sinyali frekans-zaman dilimlerine ayrıştırılır ve farklı dönüşüm yaklaşımları kullanarak hatanın imzalarını oluşturur. Kısa süreli Fourier dönüşümü (STFT), WT, Hilbert Huang dönüşümü (HT), Gabor spektrogramı ve Cohen-sınıf ikinci dereceden dağılımları, endüstriyel olmayan uygulamalarda arızalı makine analizi için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. STFT, sinüzoidal frekans ve zaman içinde değişen bir sinyalin yerel bir seçiminin faz bileşenlerini belirlemek için kullanılan güçlü bir araçtır. Stator kısa devre arızasının neden olduğu arıza harmonik bileşenlerini ortaya çıkarmak (belirlemek) için, [23]'de STFT uygulanmıştır. STFT'nin hesaplama açısından daha karmaşık olduğu ve normalde işlemden önce seçilen sabit pencere işlevi nedeniyle esneklikten yoksun olduğu görülüyor. Sabit pencere fonksiyonu, çalışma sırasındaki hız ve yükteki her türlü değişimi yakalamaz. Bu sorunun üstesinden gelmek için, geniş bantlı ve durağan olmayan sinyalleri sabit durumlu bir zaman-frekans domeni ve zaman domenine bölme kabiliyetine sahip olan farklı bir zaman-frekans dağıtım metodu (WT) uygulanabilir [23]–[25].

Stator kısa devre arızasının tespiti için gerilim sinyallerinin ölçülmesine dayalı birkaç teknik önerilmiştir. Gerilim analizine dayalı arıza tespit yaklaşımlarının çoğu, stator akımı ve gerilimindeki düşük ve yüksek dereceli harmoniklerin izlenmesine bağlıdır. Bununla birlikte, bu harmoniklerin genliği, sürücünün geri besleme döngüleri, değişken yük ve hız gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir.

Gerilim sıfır bileşenleri (ZSVC'ler), stator kısa devre arızasını tespit etmek için kullanılabilir [26]–[28]. ZSVC tabanlı yöntem arıza tespit yöntemi makine tahrikinin etkisinden bağımsız olduğundan etkili olabilmektedir. Ancak, motor stator sargılarının nötr noktasına erişim gereklidir. ZSVC tabanlı arıza teşhis yaklaşımı, arızaya dayanıklı sürücü sistemleri (fault tolerant schemes) için çekici bir çözümdür. Arızaya dayanıklı invertörler normalde bir arıza durumunda, motorun nötr noktasına bağlı olan dördüncü bir invertör bacağı kullanır [29]. [30]'da, ZSVC, FFT ve HHT kullanılarak hem geçici hem de sürekli durum koşullarında incelenmiştir ve temel harmoniğinin, yıldız bağlantılı bir SMSM'de stator kısa devre arızasının bir göstergesi (imzası) olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Değişken hızda ve yükte motorun tüm çalışma bölgesi üzerindeki bu harmoniği izlemek için Vold-Kalman filtreleme sırası takibi (VKF-OT) uygulanmıştır [30].

Özellikle akım, gerilim, moment, titreşim, moment ve gürültü gibi elektriksel sinyallerden öznitelikler çıkarılarak yapılan arıza tespiti üzerine yapılan çalışmalarda Fast Fourier Transform (FFT) [31], [32], Wavelet Transform (WT) [33], Wigner-Ville distribution (WVD) [34], [35], Principle component analysis (PCA) [36], Zero-sequence voltage component (ZSVC) [10], Hilbert-Huang transform (HHT) [37]–[39] gibi çok sayıda öznitelik çıkarma tekniklerinden yararlanılmıştır. [40]'de SMSM stator kısa devre arızası PWM ripple yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca moment verilerini kayıt edebilmek için kullanılan sensörlerin maliyetleri dikkate alındığında, bu verilerle arıza tespitinin daha az maliyetli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada yalnızca moment verileri kullanılarak yeni bir arıza tespit yöntemi önerilmektedir. Daha önceki çalışmalarda motor arıza tespitinde kullanılmayan yeni bir yöntem olan 1b-YİÖ yöntemi ile arıza tespitinin büyük bir doğruluk yüzdesi ile tespiti sunulmaktadır. Bu yöntemin diğer yöntemlerden en önemli avantajı moment sinyallerinin frekans spektrumuna dönüştürülmeden doğrudan zaman bölgesinde analiz edilmesi ve karakteristik özniteliklerinin çıkarılmasına dayanmaktadır. Böylece fazladan dönüşümler uygulanmadığından ön işleme karmaşıklığının önüne geçilmiş ve daha hızlı sonuç alınması sağlanmıştır. Elde edilen karakteristik öznitelikler, makine öğrenmesi metodlarından AÖM algoritması ile eğitilmiş ve yüksek bir başarıyla arızanın tespitinin yapılabildiği gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışma Diyagramı

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Önerilen Yöntem Ve Deneysel Düzenek

Bu bölümde sürekli mıknatıslı senkron motorda meydana gelen stator kısa devre arızası deney düzeneğinin nasıl oluşturulduğu, hangi bileşenlerden oluştuğu, motorun moment verilerinin nasıl elde edildiği, arıza tespiti için önerilen yöntem ve çalışma diyagramı anlatılmaktadır.

2.2. Çalışma Diyagramı

Bu çalışmada SMSM'lerin statorlarında meydana gelen sargı kısa devre arızalarının tespiti için, literatürde geleneksel öznitelik çıkarım teknikleri olan frekans spektrum analizi veya zaman frekans analizi ve Motor akım imza analizi (MCSA) yöntemleri yerine bu motor ve arıza türü için özgün bir yöntem olan 1b-YİÖ metodu öznitelik çıkarmada kullanılmıştır. Önerilen yöntem moment işaretleri üzerindeki her değer komşuları arasındaki karşılaştırmalar sonucu elde edilen yeni işaretlerin histogramını kullanan istatistiksel bir yaklaşımdır. Sağlıklı ve arızalı SMSM'lerin tespiti için önerilen yaklaşıma ait blok diyagram Şekil 2'de verilmiştir. Her aşamada gerçekleştirilen işlemler özetlenmiştir.

Blok 1: Farklı şartlarda alınan sağlıklı ve arızalı motorlara ait ham sinyallerdir.

Blok 2: Bu evrede ham sinyallere 1b-YİÖ dönüşümü uygulanmıştır. Dönüşüm sonucunda 0-63 değerleri arasında değişen öznitelikler elde edilmiştir. Bu özniteliklerden elde edilen sinyale ise 1b-YİÖ sinyali adı verilmektedir. Bu sinyal analiz edildiğinde ham sinyale oranla daha anlamlı bir veri elde edildiği görülmektedir. Çünkü karışık ve uç değerlere sahip olan ham sinyal belirli bir aralığa indirgenmiş olur ve işaretlerin ayrıştırılması daha belirgin hale gelmiş olur.

Blok 3: Bu aşamada, her bir değer sinyalin içerisinde ne sıklıkla görüldüğünü belirleyen, 1b-YİÖ sinyalinin histogramları elde edilmiştir. Histograma ait değerlerin her biri, bir özniteliği ifade etmektedir. Bu çalışmada $P=6$ değerini aldığından, sınıflandırma yöntemleri için toplam 64 öznitelik kullanılmıştır.

Blok 4: Sağlıklı ve arızalı motorlara ait sinyallerin 1b-YİÖ işaretlerini birbirinden ayırtmak için aşırı öğrenme makinası (AÖM) yöntemi kullanılmıştır. Sınıflandırma işlemi; 10-katlı çapraz doğrulama yöntemine göre gerçekleştirilmiştir.

Blok 5: Arıza tespit sonuçları tablolarda verilmiştir.

2.3. Bir Boyutlu Yerel İkili Örüntüler

Yerel ikili örüntü, parametrik olmayan bir operatördür. YİÖ kodu bir örnek ve komşuları arasındaki farklılıkları kullanarak verileri açıklayabilir [41], [42]. YİÖ'ler özellikle yüz tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [42], [43]. Sabit bir piksel konumunda, YİÖ operatörü, merkez piksel ile komşu pikseller arasındaki piksel yoğunluklarının düzenli bir ikili karşılaştırmalar kümesi olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, görüntüler için kullanılan YİÖ'ler, piksel komşusunu 2b-YİÖ olarak adlandırılan iki boyutta kullanır. Yaygın olarak kullanılmamasına rağmen, 1b-YİÖ, 2b-YİÖ'ye benzer özellikler sağlayabilir. Örneğin, [44] 'de N.Chatlani ve ark., konuşma sinyalinin belirli özelliklerinin ayırt edici bir özelliğini belirlemiştir; burada 1b-YİÖ özellikleri, seslendirilmemiş ve seslendirilmiş ses sinyallerini ayırt edebilmiştir. Ek olarak, [45]'de Q. Zhu ve ark. konuşma sinyalinin Voice Active Detection'ı (VAD) bölümlenmek ve ayırmak için 1b-YİÖ'yi kullanmışlardır.

1b-YİÖ operatörü, titreşim sinyalinin her bir değerini mahallelerini dikkate alarak ve merkez pozisyonunu değerini mahalleler için bir eşik olarak kullanarak etiketler. Komşu değeri merkez değerden düşükse, komşunun değeri 0 olur; aksi takdirde 1'e döner. Bir komşuluk için yerel bir ikili şablon kodu üretilir. YİÖ ikili kodunun ondalık değeri, sabit değerlerin etrafındaki yerel yapısal bilgiyi sunar [41].

Bu çalışmada, motor arıza işaretleri ilgili önemli bilgileri yakalayabilmek için özellik çıkarma yöntemi olarak 1b-YİÖ kullanılmıştır. 1b-YİÖ metodu, görüntü işlemede öznelik çıkarımında sıkça kullanılan bir yöntem olan YİÖ'den geliştirilmiştir, yapısal ve işleyiş yönünden YİÖ ile benzerlik göstermektedir. YİÖ operatörü iki boyutlu görüntüler için kullanılmaktadır. Ancak 1b-YİÖ metodu, zaman serisi şeklindeki bir boyutlu dizilimi olan sinyaller için veri işlemede farklı uygulama alanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [44]. İşaret üzerindeki merkez değer olarak belirlenen her bir değer, belirlenen komşu değerleri ile ikili karşılaştırmalar yapılarak ikili kodlar elde edilir. Bu işlem, tüm sinyal boyunca tekrarlanır. Bu ikili kodların onluk karşılıklarından elde edilen değerler 1b-YİÖ sinyalini oluşturmaktadır.

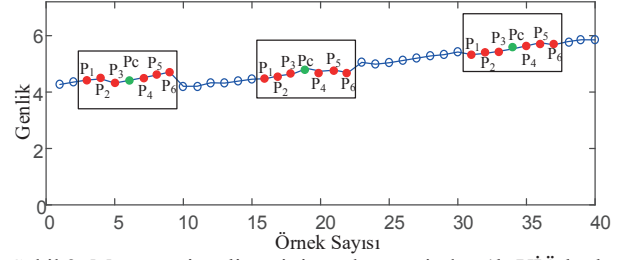
İkili karşılaştırmanın matematiksel formülü aşağıdaki gibidir. Burada $x[i]$: sinyali, P: Komşu sayısını, $f(x)$: İkili sistemdeki sayıyı gösterir.

$$LBP_p(x[i]) = \sum_{r=0}^{(P/2)-1} \left\{ f \left[x \left[i + r - \frac{P}{2} \right] - x[i] \right] 2^r \right\}$$

$$f = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

1b-YİÖ metodu öznelik çıkarma yöntemi adım adım örnek sinyalinin bir bölümü üzerinde açıklanmıştır. Şekil 3'te 1b-YİÖ

metodunu uygulamak için sinyalden alınan merkez nokta ve komşulukları göstermektedir.



Şekil 3. Moment sinyaline ait işaretler üzerinden 1b-YİÖ kodu hesaplama

1b-YİÖ kodun hesaplanması için gereken aşamalar aşağıdaki gibidir.

Birinci aşamada; Verilen bu sinyalde 1b-YİÖ operatörü merkez değer ile komşu değerleri arasındaki ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilmektedir. Sinyal üzerindeki her bir değer için öncesinden ve sonrasında toplamda P adet komşu değer seçilir. Öncesinden P/2 ve sonrasında P/2 komşu alınmaktadır. Bu çalışmada P=6 için 6 tane komşu nokta belirlenmiştir. Her bir nokta merkez değer (Pc) olarak alındığında merkez değeri (Pc) den önce (P1, P2, P3) ve sonra (P4, P5, P6) yer almaktadır. Yukarıdaki sinyal üzerindeki bir bölüm aşağıdaki gibi gösterilip sinyal üzerinde Pc ve Pi değerleri gösterilmiştir.

P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
4.5	4.7	4.4	4.5	4.7	4.8	4.9

Şekil 4. Sinyal üzerindeki örnek değerler

İkinci aşamada; Şekil 4'te belirtilen $P = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6\}$ değerleri Pc değeri ile karşılaştırılarak ikili değerler elde edilmektedir. Komşu Pi değeri merkezi değerden büyük veya eşitse bir(1), aksi takdirde sıfır(0) değerini alır. (Şekil 5).

P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
1	1	0	4.5	1	1	1

Şekil 5. Pc ve Pi komşu değerlerinin karşılaştırılması (Denklem 1'in uygulanması)

Üçüncü aşamada; Karşılaştırmalarda merkez değerler için ikili YİÖ kodlar meydana gelir. Bu ikili kodlar ondalık değeri verilen Pc noktalarının çevresindeki yerel yapı bilgisini temsil eder. Daha sonra elde edilen bu ikili dizge ondalık değere dönüştürülür. Şekil 6'dan görüldüğü gibi merkez değerinin ilk değeri 4.5 iken 1b-YİÖ dönüşümünden sonra yeni değeri 59 olarak elde edilmiştir.

P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
4.5	4.7	4.4	4.5	4.7	4.8	4.9
P1	P2	P3	Pc	P4	P5	P6
1	1	0	4.5	1	1	1

$$(110111)_2=59$$

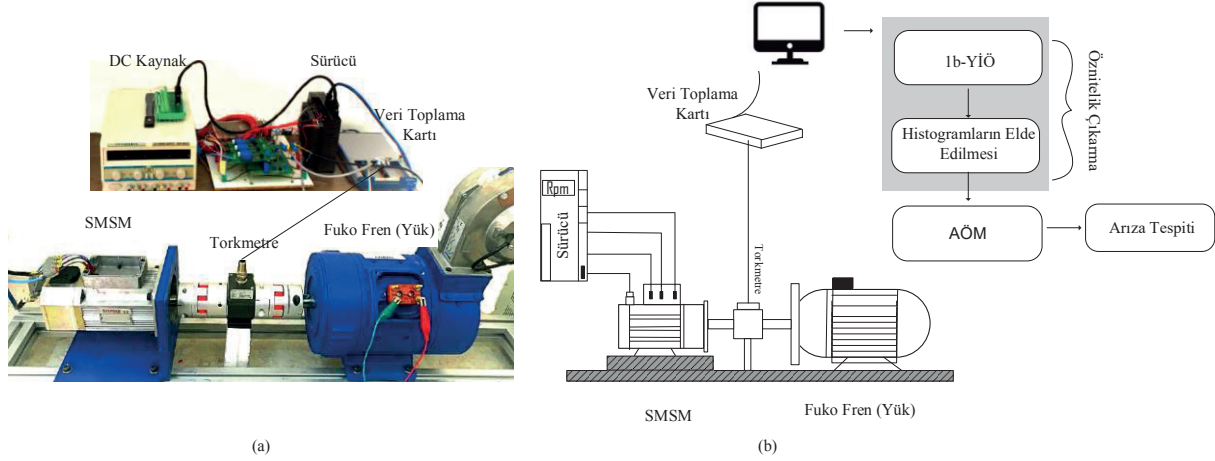
Şekil 6. Sinyalden elde edilmiş olan 1b-YİÖ kodu

Dördüncü aşamada yukarıdaki adımlar tek tek sinyal üzerindeki tüm değerler için gerçekleştirilir. Uygulanan bu yöntem ile işaretlerden 0-64 aralığında değerlere sahip 1b-YİÖ sinyali elde edilmiş olur. Diğer bir deyişle 1b-YİÖ sinyali 0-64 aralığındaki değerlerden oluşmaktadır. Elde edilen her bir değer frekansı; bir örüntünün ifadesidir. 1b-YİÖ işaretlerine ait histogram makine öğrenmesi yöntemleri için öznitelik vektörü olarak kullanılmaktadır. 1b-YİÖ yönteminin en önemli özelliği işaretlerdeki en küçük değişimlerine karşı yüksek hassasiyet ve hesaplama kolaylığıdır. 1b-YİÖ işaretleri elde edildikten sonra bu işaretlerin histogramları öznitelik olarak kullanılmaktadır. Elde edilen histogramlar makine öğrenmesi ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

2.4. Deneysel Düzeneğin Kurulması

Evirici beslemeli SMSM'nin farklı hız, yüklenme ve arıza şiddeti koşullarındaki, karakteristik arıza imzasını tanımlamak

amacıyla bazı deneyler yapılmıştır. Sağlıklı ve farklı arıza oranlarına sahip birbirine özdeş 1,2 kW gücünde her bir fazında 200 sarım bulunan SMSM'lerden 800 rpm-2000 rpm hız aralığında ve %0 (Yüksüz)-%100 (tam yük) yüklenme oranlarında her durum için moment sinyalleri 10 kHz örnekleme ile 12 saniye süresince kayıt altına alınmıştır. Yüklenme oranını ayarlamak amacıyla DC gerilimle çalışan Fuko freni kullanılmıştır. SMSM ile fuko freni milleri arasında yerleştirilen Drbk-10 serisi hassas torkmetre ile anlık olarak moment sinyalleri NI 6343 usb model DAQ kartı ile bilgisayara kayıt edilmiştir. SMSM ile fuko frenin birbirine bağlanmasında mekanik kayıpları ve küçük eksentrik arızalarını önlemek amacıyla fleksible kaplinler kullanılmıştır. Böylece hem sağlıklı hem de stator sargılarının tek fazında oluşturulan 2 sarım, 4 sarım ve 8 sarımlık 3 farklı kısa devre arıza şiddetine sahip SMSM'lerden arıza şiddetlerinin etkisiyle oluşan moment sinyalleri kayıt edilmiştir. (şekil 7)



Şekil 7. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Stator Kısa Devre Arızası a-) Test düzeneği b-) Şematik gösterimi

2.5. Aşırı Öğrenme Makinası Algoritması

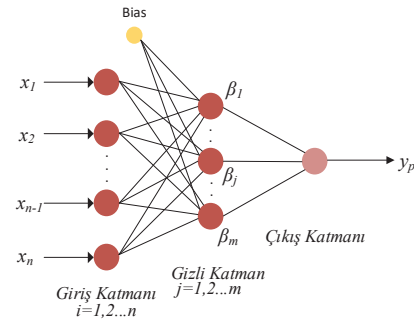
AÖM tek bir gizli katmana sahip ileri beslemeli yapay sinir ağlarını eğitmek için önerilmiş bir yöntemdir [46], [47]. Tek gizli katmanlı YSA'nın yapısı Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8'de gösterilen yapay sinir ağının çıkışı:

$$y_p = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot g \left(\sum_{i=1}^n w_{i,j} x_i + b_j \right) \quad (2)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada $x_{1..n}$ giriş vektörlerini, $y_{1..p}$ çıkış vektörlerini, $\beta_{1..m}$ çıkış katmanı ağırlıklarını, $w_{1..m}$ giriş katmanı ile gizli katman arasındaki bağlantı ağırlıklarını, $b_{1..m}$ eşik değerlerini ve $g(\cdot)$ ise aktivasyon fonksiyonunu göstermektedir [48]. YSA'nın başarısı ağırlıklar, eşik değerleri ve transfer fonksiyonu modellenecek sistemin karakterine en uygun şekilde seçimiyle mümkündür.

Geri yayımlı öğrenme algoritması gibi gradyan temelli öğrenme yaklaşımlarında ağırlıklar ve eşik değerlerinin tamamı iteratif olarak en uygun değeri alıncaya kadar değiştirilmektedir. Bu sebeple genel olarak yavaş ve yerel minimumlar nedeniyle eğitim hata oranı yüksek değerler alabilmektedir. AÖM'de ise giriş katmanı ağırlıkları ve eşik değerleri rastgele atanmakta ve çıkış ağırlık değerleri buna bağlı olarak hesaplanmaktadır [47], [49].



Şekil 8. Aşırı Öğrenme Makinası Ağ Yapısı

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada sabit mıknatıslı senkron motorlardan farklı hız ve yük koşulları altında sağlıklı ve farklı kısa devre oranına sahip arızalı motorlardan elde edilen 10 kHz'lik örnekleme ile 12 saniye süresince kayıt altına alınan moment sinyallerinden motorun arızalı mı yoksa sağlıklı mı olduğunu belirleyebilmek için yeni bir öznitelik çıkarım ve arıza tespit yaklaşımı önerilmiştir

Burada SMSM'nin farklı hız ve farklı yük koşullarında çalışırken kayıt altına alınan moment işaretlerine 1b-YİÖ yöntemi uygulanarak elde edilen özniteliklerin arıza tespitinde

nasıl bir sonuç verdiğini görmek amacıyla AÖM algoritması eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda tablolar halinde gösterilmektedir.

Farklı arıza şiddeti oranları için ayrı ayrı hazırlanan tablolarda her işaret için arıza tespit başarı yüzdesi gösterilmektedir. Stator kısa devre arıza tespitinin yüke, hız ve arıza şiddetine bağlı değişimini göstermek amacıyla Tablo-1, Tablo-2 ve Tablo-3 oluşturulmuştur. Tablo-1’de kısa devre arıza şiddeti en düşük boyuttaki tek fazında 2 sarım kısa devre edilen SMSM’nin moment verileri ile yapılan arıza tespit başarı yüzdesine bakıldığında, arıza tespit başarısının motor dönüş hızı ile doğru orantılı, yüklenme ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

Tablo- 1. Arıza şiddeti 2 Sarım Kısa Devreli Motorun arıza tespit başarı yüzdesi

Rpm →	800	1200	1600	2000	Ort. Başarı (%)
%0 yüklü	93.33	96.66	100	100	97.50
%25 yüklü	80	88	100	100	92.00
%50 yüklü	76.67	93.33	96.66	100	91.67
%75 yüklü	76.67	93.33	96.66	100	91.67
%100 yüklü	76.67	93.33	93.33	100	90.80
Ort. Başarı (%)	80.67	92.93	97.33	100	92.73

Dolayısıyla düşük hızlı çalışma koşullarında daha az yüklenme ile arızanın daha kolay tespit edildiği görülmektedir. Aynı şekilde kısa devre arıza şiddeti arttığında tablo-2’den arıza tespit başarı yüzdesinin genel ortalamasının yükseldiği görülmektedir.

Tablo- 2. Arıza şiddeti 4 Sarım Kısa Devreli Motorun arıza tespit başarı yüzdesi

Rpm →	800	1200	1600	2000	Ort. Başarı (%)
%0 yüklü	93.33	100	100	100	98.33
%25 yüklü	93.33	100	100	100	98.33
%50 yüklü	88	96.66	100	100	96.17
%75 yüklü	88	96.66	100	100	96.17
%100 yüklü	86	96.66	100	100	95.67
Ort. Başarı (%)	89.73	98	100	100	96.93

Böylece 2 sarım kısa devreli SMSM’nin arıza tespitinin tüm yük ve hız koşullarının ortalaması alındığında başarı %92.73 iken arıza şiddetinin 4 sarımın kısa devre olduğu durumda beklendiği gibi ortalama arıza tespit başarısının %96.93’e çıktığı görülmektedir. Arıza şiddetini daha da arttırıp 8 sarım kısa devre edildiği durumun sonuçları tablo-3’de verilmiştir. Tablo-3’den arıza şiddetinin yüksek olduğu durumda tüm yük ve hız koşullarının ortalama arıza tespit başarısının %98.5’e yükselmesi yöntemin doğru çalıştığını net biçimde göstermektedir.

Tablo-3. Arıza şiddeti 8 Sarım Kısa Devreli Motorun arıza tespit başarı yüzdesi

Rpm →	800	1200	1600	2000	Ort. Başarı (%)
%0 yüklü	96.66	100	100	100	99.17
%25 yüklü	96.66	100	100	100	99.17
%50 yüklü	96.66	100	100	100	99.17
%75 yüklü	93.33	96.66	100	100	97.50
%100 yüklü	93.33	96.66	100	100	97.50
Ort. Başarı (%)	95.33	98.66	100	100	98.50

Beklendiği gibi arıza şiddeti düşük olan motor verilerinden yapılan arıza tespit yüzdesi arıza şiddeti yüksek olanla kıyaslandığında daha düşük çıkmaktadır. Böylece SMSM’nin stator sargı yalıtım arızalarının tespitinde 1b-YİÖ yönteminin başarılı ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Z. Q. Zhu and D. Howe, “Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, Apr. 2007.
- [2] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, “Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245–254, Oct. 2015.
- [3] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, “Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58–75, Mar. 2017.
- [4] M. Zafarani, E. Bostanci, Y. Qi, T. Goktas, and B. Akin, “Interturn Short-Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 2173–2191, Dec. 2018.
- [5] F. Çıra, “Automatic determination of stator short circuit fault and fault severity of permanent magnet synchronous motor,” Inonu University, 2017.
- [6] B. L. Rajalakshmi Samaga and K. P. Vittal, “Comprehensive study of mixed eccentricity fault diagnosis in induction motors using signature analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 180–185, Feb. 2012.
- [7] B. M. Ebrahimi, J. Faiz, S. Lotfi-fard, and P. Pillay, “Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 30, pp. 131–145, Jul. 2012.
- [8] A. Soualhi, G. Clerc, and H. Razik, “Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4053–4062,

Sep. 2013.

- [9] Y. Nyanteh, C. Edrington, S. Srivastava, and D. Cartes, "Application of Artificial Intelligence to Real-Time Fault Detection in Permanent-Magnet Synchronous Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 3, pp. 1205–1214, 2013.
- [10] J. C. Urresty, J. R. Riba, and L. Romeral, "A back-emf based method to detect magnet failures in PMSMs," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 1, pp. 591–598, 2013.
- [11] F. Cira, M. Arkan, B. Gumus, and T. Goktas, "Analysis of stator inter-turn short-circuit fault signatures for inverter-fed permanent magnet synchronous motors," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 1453–1457.
- [12] A. Sarikhani and O. A. Mohammed, "Inter-turn fault detection in PM synchronous machines by physics-based EMF estimation," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1254–1261.
- [13] J. Ahmed Farooq, T. Raminosoa, A. Djerdir, and A. Miraoui, "Modelling and simulation of stator winding inter-turn faults in permanent magnet synchronous motors," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 27, no. 4, pp. 887–896, 2008.
- [14] M. Hadeif, M. R. Mekideche, and A. Djerdir, "Vector controlled Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) drive with stator turn fault," in *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010*, 2010.
- [15] "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865–872, 1985.
- [16] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent Advances in Modeling and Online Detection of Stator Interturn Faults in Electrical Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 5, 2011.
- [17] T. Hamiti, P. Arumugam, and C. Gerada, "Turn–turn short circuit fault management in permanent magnet machines," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 9, pp. 634–641, Nov. 2015.
- [18] P. Arumugam, C. Gerada, T. Hamiti, C. Hill, and S. Bozhko, "A review on turn-turn short circuit fault management," in *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, 2015, pp. 1–5.
- [19] J. A. Rosero, L. Romeral, J. Cusido, A. Garcia, and J. A. Ortega, "On the short-circuiting Fault Detection in a PMSM by means of Stator Current Transformations," in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1936–1941.
- [20] Y. Lee and T. G. Habetler, "An On-Line Stator Turn Fault Detection Method for Interior PM Synchronous Motor Drives," in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2007, pp. 825–831.
- [21] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, "Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous motors using stator-current monitoring," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 10, pp. 2673–2682, 2010.
- [22] A. Stavrou, H. G. Sedding, and J. Penman, "Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 1, pp. 32–37, 2001.
- [23] W. G. Zanardelli, E. G. Strangas, and S. Aviyente, "Identification of Intermittent Electrical and Mechanical Faults in Permanent-Magnet AC Drives Based on Time–Frequency Analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 971–980, 2007.
- [24] O. A. Mohammed, Z. Liu, S. Liu, and N. Y. Abed, "Internal Short Circuit Fault Diagnosis for PM Machines Using FE-Based Phase Variable Model and Wavelets Analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, 2007.
- [25] A. P. Zheng, J. Yang, and L. Wang, "Fault detection of stator winding interturn short circuit in PMSM based on wavelet packet analysis," in *Proceedings - 2013 5th Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2013*, 2013, pp. 566–569.
- [26] M. A. Cash, T. G. Habetler, and G. B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 6, pp. 1234–1239, 1998.
- [27] J. C. Urresty, J. R. Riba, M. Delgado, and L. Romeral, "Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 1, pp. 42–51, 2012.
- [28] J.-C. Urresty, J.-R. Riba, H. Saavedra, and L. Romeral, "Detection of inter-turns short circuits in permanent magnet synchronous motors operating under transient conditions by means of the zero sequence voltage," *Proc. 2011 14th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, pp. 1–9, 2011.
- [29] O. Wallmark, L. Harnfors, and O. Carlson, "Control Algorithms for a Fault-Tolerant PMSM Drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 1973–1980, Aug. 2007.
- [30] J.-C. Urresty, J.-R. Riba, and L. Romeral, "Diagnosis of Interturn Faults in PMSMs Operating Under Nonstationary Conditions by Applying Order Tracking Filtering," *IEEE Trans. POWER Electron.*, vol. 28, no. 1, 2013.
- [31] J. Hang, J. Zhang, M. Cheng, and Z. Wang, "Fault diagnosis of mechanical unbalance for permanent magnet synchronous motor drive system under nonstationary condition," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 3556–3562.

- [32] F. Cira, M. Arkan, and B. Gumus, "Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 416–424, 2016.
- [33] M. Khan and M. A. Rahman, "Development and Implementation of a Novel Fault Diagnostic and Protection Technique for IPM Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 1, pp. 85–92, Jan. 2009.
- [34] W. J. Staszewski, K. Worden, and G. R. Tomlinson, "TIME-FREQUENCY ANALYSIS IN GEARBOX FAULT DETECTION USING THE WIGNER-VILLE DISTRIBUTION AND PATTERN RECOGNITION," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 11, no. 5, pp. 673–692, Sep. 1997.
- [35] J. a. Rosero, L. Romeral, J. a. Ortega, and E. Rosero, "Short-circuit detection by means of empirical mode decomposition and Wigner-Ville distribution for PMSM running under dynamic condition," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4534–4547, 2009.
- [36] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "Unsupervised Neural-Network-Based Algorithm for an On-Line Diagnosis of Three-Phase Induction Motor Stator Fault," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 259–264, Feb. 2007.
- [37] C. Wang, X. Liu, and Z. Chen, "Incipient Stator Insulation Fault Detection of Permanent Magnet Synchronous Wind Generators Based on Hilbert-Huang Transformation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2014.
- [38] J. Rosero, A. Garcia, J. Cusido, L. Romeral, and J. A. Ortega, "Fault detection by means of Hilbert Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization," *2007 IEEE Int. Symp. Intell. Signal Process. WISP*, vol. 25, no. 2, pp. 312–318, 2007.
- [39] C. P. SALOMON *et al.*, "Electrical Signature Analysis for Condition Monitoring of Permanent Magnet Synchronous Machine," *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 91–98, Nov. 2018.
- [40] J. Wang and B. Sen, "Stator Inter-turn Fault Detection in SPM Machines Using PWM Ripple Current Measurement," in *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, 2014, pp. 2.2.03-2.2.03.
- [41] T. Ojala, M. Pietikainen, and T. Maenpaa, "Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, Jul. 2002.
- [42] T. Ahonen, A. Hadid, and M. Pietikainen, "Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 28, no. 12, pp. 2037–2041, Dec. 2006.
- [43] C. K. Tran, T. F. Lee, L. Chang, and P. J. Chao, "Face Description with Local Binary Patterns and Local Ternary Patterns: Improving Face Recognition Performance Using Similarity Feature-Based Selection and Classification Algorithm," in *2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control*, 2014, pp. 520–524.
- [44] N. Chatlani and J. J. Soraghan, "Local binary patterns for 1-D signal processing," in *Proceedings of the 18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO'10)*, 2010, pp. 95–99.
- [45] Q. Zhu, N. Chatlani and J. J. Soraghan "1-D Local binary patterns based VAD used INHMM-based improved speech recognition," in *Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO '12)*, pp. 1633–1637.
- [46] G.-B. Huang, D. H. Wang, and Y. Lan, "Extreme learning machines: a survey," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 2, no. 2, pp. 107–122, Jun. 2011.
- [47] G.-B. Huang, Q.-Y. Zhu, and C.-K. Siew, "Extreme learning machine: Theory and applications," *Neurocomputing*, vol. 70, no. 1–3, pp. 489–501, 2006.
- [48] H.-J. Rong, Y.-S. Ong, A.-H. Tan, and Z. Zhu, "A fast pruned-extreme learning machine for classification problem," *Neurocomputing*, vol. 72, no. 1–3, pp. 359–366, Dec. 2008.
- [49] S. Suresh, S. Saraswathi, and N. Sundararajan, "Performance enhancement of extreme learning machine for multi-category sparse data classification problems," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 23, no. 7, pp. 1149–1157, Oct. 2010.

Ferhat ÇIRA



Ferhat ÇIRA, 1983 Batman doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Batman’da tamamladı 2006 yılında KTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu, aynı yıl Dicle Üniversitesinde öğretim elemanı sınavını kazandı Şubat 2017’de İnönü Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden Doktora derecesi aldı. Uzmanlık alanları Elektrik Makinaları, Arıza Tespiti ve Makine öğrenmesidir. Halen Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde olarak görev yapmaktadır.