



**T.C.**

**TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA AKI SİNYALİ  
KULLANILARAK STATOR SARGI ARIZASI TEŞHİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Rumeysa SELÇUK AKSOY**

**Danışman: Doç. Dr. Zafer DOĞAN**

**TOKAT- 2022**

## ETİK SÖZLEŞME



## JÜRİ KABUL VE ONAY



## ÖZET

### SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORDA AKI SİNYALİ KULLANILARAK STATOR SARGI ARIZASI TEŞHİSİ

Selçuk Aksoy, Rumeysa

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zafer Doğan

Haziran 2022, xvi + 97 sayfa

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve elektrikli araçlar, havayolu ulaşımı, robotik gibi birçok uygulamada kullanılan cihazlardır. Elektrik motorlarının arızalanması, bakım maliyetlerinin artmasına, üretim bantlarının durmasına ve dolayısıyla işletme maliyetinin artmasına neden olabilir. Bu ve benzer sebeplerden dolayı arıza teşhisinin yapılması büyük önem arz etmektedir. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM), basit yapıya sahip olmaları, yüksek verimlilikleri, kolay kontrol edilebilmeleri ve küçük yapıya sahip olmaları gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. Dolayısıyla SMSM'nin arıza teşhisinin ve tespitin yapılması önemlidir. Bu tez çalışmasında SMSM'de meydana gelen stator sargı arızasının tespiti için ayırıştırma ve makine öğrenmesi tabanlı arıza teşhis ve tespit yöntemi önerilmiştir. Kararlı ve dinamik çalışma koşulları için motor boşa ve tam yükte çalıştırılmıştır. Sağlam ve arızalı motora ait akım, hız ve akı sinyalleri kayıt altına alınmış, arıza teşhis ve tespiti için akı sinyali kullanılmıştır. Toplanan akı sinyalleri Komple Uyarlamalı Gürültülü Toplu Ampirik Kip Ayırışımı yöntemi kullanılarak İçkin Kip Fonksiyonlarına ayırıştırılmıştır. Permütasyon Entropisi ve Hausdorff Uzaklığı yöntemleri kullanılarak sinyalin yüksek frekanslı bileşenleri filtrelenmiştir ve arıza bilgisini taşıyan düşük frekanslı bileşenlerin kullanılması sağlanmıştır. Filtrelenmiş sinyale pencereleme işlemi uygulanarak sinyal pencerelere ayrılmıştır. Her bir sinyal penceresine zaman ve frekans boyutunda istatistiksel analiz yöntemleri uygulanarak sinyal özellikleri çıkarılmıştır ve özellik matrisi oluşturulmuştur. Bu özellik matrisi Destek Vektör Makinesine aktarılmıştır ve arıza sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem ile arıza teşhisi ve tespiti için yüksek başarımlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor, Arıza Teşhisi, Komple Uyarlamalı Gürültülü Toplu Ampirik Kip Ayırışımı, Stator Sargı Arızası, Destek Vektör Makinesi

## **ABSTRACT**

### **STATOR WINDING FAULT DIAGNOSIS USING FLUX SIGNAL IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**

Selçuk Aksoy, Rumeysa

Master's Thesis, Electrical Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Zafer Doğan

June 2022, xvi + 97 pages

Electric motors are devices that convert electrical energy into mechanical energy and are used in many applications such as electric vehicles, airline transportation and robotics. Failure of electric motors can cause increased maintenance costs, breakdowns in production lines. For these and similar reasons, fault diagnosis is of great importance. Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) are widely preferred due to their advantages such as simple structure, high efficiency and easy control. Therefore, fault diagnosis and detection of PMSM is important. In this thesis, a decomposition and machine learning based fault diagnosis and detection method is proposed for the detection of stator winding faults in PMSM. For stable and dynamic operating conditions, the motor has been operated at no load and at full load. The current, speed and flux signals of the healthy and faulty motor are recorded and the flux signal is used for fault diagnosis and detection. The collected flux signals are decomposed into Intrinsic Mode Functions using the Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise method. By using Permutation Entropy and Hausdorff Distance methods, high frequency components of the signal are filtered and low frequency components carrying fault information are used. The signal is divided into windows by applying windowing to the filtered signal. By applying statistical analysis methods in time and frequency dimension to each signal window, the signal features were extracted and the feature matrix was created. This feature matrix has been transferred to the Support Vector Machine and fault classification has been performed. With the results obtained, it has been proven that the proposed method gives successful results for fault diagnosis and detection.

**Keywords:** Permanent Magnet Synchronous Motors, Fault Detection, Complete ensemble empirical mode decomposition, Winding Fault, Support Vector Machine

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini paylaşan, çalışmalarımı yakından takip eden ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Zafer Doğan'a teşekkürlerimi sunarım.

Birlikte çalışmaktan onur duyduğum, bilgileriyle çalışma hayatıma ışık tutan, tez çalışmam boyunca yardım ve önerileri ile desteğini hiç esirgemeyen Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Özlem Feyza Erkan'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında kullanılan donanım için destek sağlayan, değerli yardım ve önerilerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mehmet Akar'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca teknik konularda destek sağlayan FEMSAN Elektrik Motorları A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çocukluk ve eğitim hayatım boyunca sonsuz sabırları, hoşgörülerini, sevgileri ve destekleri için sevgili annem Hayriye Selçuk'a ve babam Prof. Dr. Burhan Selçuk'a minnetlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi tez çalışmam süresince de bana yardımcı olan, desteğini, sevgisini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, beni cesaretlendiren ve moral veren sevgili eşim Onur Han Aksoy'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ETİK SÖZLEŞME.....                                                                  | iii          |
| JÜRİ KABUL VE ONAY .....                                                            | iv           |
| ÖZET .....                                                                          | v            |
| ABSTRACT.....                                                                       | vi           |
| ÖNSÖZ .....                                                                         | vii          |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                   | viii         |
| SİMGE VE KISALTMALAR .....                                                          | x            |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                  | xiii         |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                               | xvi          |
| 1. GİRİŞ.....                                                                       | 1            |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ .....                                                            | 5            |
| 3. MATERYAL YÖNTEM.....                                                             | 24           |
| 3.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM).....                                   | 24           |
| 3.1.1. Stator.....                                                                  | 25           |
| 3.1.2. Rotor .....                                                                  | 25           |
| 3.1.3. Sürekli mıknatıslı senkron motorların çalışma prensibi .....                 | 26           |
| 3.1.4. Sürekli mıknatıslı senkron motorların avantajları ve dezavantajları .....    | 28           |
| 3.1.5. Sürekli mıknatıslı senkron motorların kullanım alanları .....                | 28           |
| 3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Matematiksel Modeli .....                | 29           |
| 3.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Arızaların Sınıflandırılması.....        | 30           |
| 3.3.1. Mekanik arızalar .....                                                       | 31           |
| 3.3.2. Manyetik arızalar .....                                                      | 32           |
| 3.3.3. Elektriksel arızalar .....                                                   | 33           |
| 3.3.4. Sabit mıknatıslı senkron motorlarda stator sargı arızaları ve etkileri ..... | 35           |
| 4. ARIZA TEŞHİSİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER .....                                      | 37           |
| 4.1. Sinyal İşleme .....                                                            | 38           |
| 4.1.1. Komple uyarlamalı gürültülü toplu ampirik kip ayrışımı (CEEMDAN)...          | 39           |

|                                                                             | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.1.2. Filtreleme İşlemi .....                                              | 41                  |
| 4.2. Arıza Özelliklerinin Çıkartılması .....                                | 42                  |
| 4.3. Arıza Teşhisi ve Sınıflandırma .....                                   | 44                  |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                                | 47                  |
| 5.1. Giriş.....                                                             | 47                  |
| 5.2. Deney Düzeneği ve Veri Toplama .....                                   | 47                  |
| 5.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Stator Sargı Arızası Modeli..... | 50                  |
| 5.4. Deneysel Çalışma Sonuçları.....                                        | 55                  |
| 5.4.1. Kararlı çalışma .....                                                | 55                  |
| 5.4.2. Dinamik çalışma .....                                                | 68                  |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                  | 83                  |
| KAYNAKLAR .....                                                             | 85                  |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                              | 97                  |

## SİMGE VE KISALTMALAR

| Simge                                                           | Açıklama                                         |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $V_a, V_b$ ve $V_c$                                             | Faz voltajı                                      |
| $R_a, R_b$ ve $R_c$                                             | Omik direnç                                      |
| $i_a, i_b, i_c$ ve $i_f$                                        | Faz akımları ve arızalı faz akımı                |
| $L_a, L_b$ ve $L_c$                                             | Faz öz indüktansı                                |
| $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}$ ve $L_{cb}$            | Ortak indüktans                                  |
| $e_a, e_b$ ve $e_c$                                             | Zıt EMK                                          |
| $\lambda_{SM,a}, \lambda_{SM,b}, \lambda_{SM,c}$ ve $\lambda_f$ | Faz akıları ve kaçak akı                         |
| $\omega_e$                                                      | Rotorun elektriksel hızı                         |
| $\theta_e$                                                      | Rotorun elektriksel pozisyonu                    |
| $T_e$                                                           | Tork                                             |
| $X(n)$                                                          | Sinyal                                           |
| $X_i(n)$                                                        | Beyaz gürültü ile karıştırılmış sinyal           |
| $\beta$                                                         | Beyaz gürültü varyans                            |
| $\omega_i(n)$                                                   | Birim varyans beyaz gürültü                      |
| $r_k(n)$ ve $R(n)$                                              | $k$ . artık sinyal ve Nihai artık sinyal         |
| $\varepsilon_k$                                                 | $k$ . Gürültünün standart sapması                |
| $E_k$                                                           | Sinyalden $k$ . İMF'yi çıkartan bir operatördür. |
| $p(x_i)$                                                        | Olasılık                                         |
| $x[m]$                                                          | Sinyal zaman serisi                              |

|            |                                        |
|------------|----------------------------------------|
| $\bar{x}$  | Aritmetik ortalama                     |
| $\sigma_x$ | Standart sapma                         |
| $a(i)$     | Otoregresif için model parametresi     |
| $n$        | Örnekleme zamanı                       |
| $\eta_i$   | Lagrange çarpanı                       |
| $z_i$      | Gözlem                                 |
| $y_i$      | Gözlem yanıtı                          |
| $w$        | Hiper düzlemin uzaydaki oryantasyonunu |
| $b$        | Hiper düzlemin orijinden uzaklığı      |
| $\mu$      | Kısa devre sargı oranı                 |
| $f$        | Frekans                                |

### **Kısaltmalar**

SMSM

FFT

STFT

HHD

EMD

İMF

CEEMDAN

### **Açıklamalar**

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Hızlı Fourier Dönüşümü

Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü

Hilbert Huang Dönüşümü

Ampirik Kip Ayırışımı

İçkin Kip Fonksiyonu

Komple Uyarlamalı Gürültülü Toplu Ampirik Kip Ayırışımı

|       |                                              |
|-------|----------------------------------------------|
| DVM   | Destek Vektör Makinesi                       |
| FBG   | Fiber Bragg Grating                          |
| SEY   | Sonlu Elemanlar Yöntemi                      |
| DC    | Doğru Akım                                   |
| AC    | Alternatif Akım                              |
| EMK   | Elektromotor Kuvveti                         |
| MMK   | Manyeto Motor Kuvveti                        |
| HU    | Hausdorff Uzaklığı                           |
| PE    | Permütasyon Entropisi                        |
| OEU   | Ortalama Eğri Uzunluğu                       |
| SS    | Standart Sapma                               |
| HAP   | Hjort Aktivite Parametresi                   |
| BF    | Birinci Fark                                 |
| İF    | İkinci Fark                                  |
| OTE   | Ortalama Teager Enerjisi                     |
| SVLKT | Sıralı Varyasyonların Logaritmik Kök Toplamı |
| MD    | Maksimum Değer                               |
| OR    | Otoregresif                                  |
| BG    | Bant Gücü                                    |
| PLC   | Programlanabilir Mantıksal Denetleyici       |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Şekil No

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 24 |
| Şekil 3.2. Sürekli mıknatıslı senkron motorun yapısı (Fidan, 2019) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Şekil 3.3. (a) Stator bağlantısı (b) Uygulanan gerilim grafiği .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 |
| Şekil 3.4. Motor manyetik alanının dönme adımları .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 27 |
| Şekil 3.5. SMSM elektriksel eşdeğer devresi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 29 |
| Şekil 3.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda arızaların sınıflandırılması .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 31 |
| Şekil 3.7. Rulman kesiti (Bakşiyev ve Selçuk, 2017).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 32 |
| Şekil 3.8. Sargı arızalarının sınıflandırılması (Doğan, 2012) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 35 |
| Şekil 4.1. DVM sınıflandırma (Reis ve Yılcı, 2020) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 45 |
| Şekil 5.1. Önerilen arıza tespit yönteminin blok diyagramı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 47 |
| Şekil 5.2. Deney düzeneği .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 48 |
| Şekil 5.3. SMSM'nin hız grafikleri: (a) Kararlı çalışma profili, (b) Dinamik 1 (Üçgen hız profili), (c) Dinamik 2 (Yamuk hız profili) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 49 |
| Şekil 5.4. Stator sargı arızalı SMSM'nin elektriksel eşdeğer devresi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 50 |
| Şekil 5.5. SMSM'nin zaman ve frekans boyutunda akım grafikleri: (a) Zaman boyutunda S motorun %0y ve %100y grafikleri, (b) Zaman boyutunda $A_1$ motorun %0y ve %100y grafikleri, (c) Zaman boyutunda $A_2$ motorun %0y ve %100y grafikleri, (d) Frekans boyutunda S motorun %0y ve %100y grafikleri, (e) Frekans boyutunda $A_1$ motorun %0y ve %100y grafikleri, (f) Frekans boyutunda $A_2$ motorun %0y ve %100y grafikleri ..... | 53 |
| Şekil 5.6. SMSM'nin zaman ve frekans boyutunda akı grafikleri: (a) Zaman boyutunda S motorun %0y ve %100y grafikleri, (b) Zaman boyutunda $A_1$ motorun %0y ve %100y grafikleri, (c) Zaman boyutunda $A_2$ motorun %0y ve %100y grafikleri, (d) Frekans boyutunda S motorun %0y ve %100y grafikleri, (e) Frekans boyutunda $A_1$ motorun %0y ve %100y grafikleri, (f) Frekans boyutunda $A_2$ motorun %0y ve %100y grafikleri .....  | 54 |
| Şekil 5.7. %0y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 56 |
| Şekil 5.8. %0y'te $A_1$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 57 |
| Şekil 5.9.%0y'te $A_2$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 58 |

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.10. %0y'te S motor için İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği.....                                                   | 59 |
| Şekil 5.11. %0y'te $A_1$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                             | 60 |
| Şekil 5.12. %0y'te $A_2$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                             | 60 |
| Şekil 5.13. %0y için filtrelenmiş ve pencerelemiş sinyalden elde edilen öz nitelik bar grafikleri.....                                                                   | 61 |
| Şekil 5.14. %0y için hata matrisi .....                                                                                                                                  | 62 |
| Şekil 5.15. %100y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri .....     | 63 |
| Şekil 5.16. %100y'te $A_1$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri ..... | 64 |
| Şekil 5.17. %100y'te $A_2$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri.....  | 65 |
| Şekil 5.18. %100y'te S seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                               | 66 |
| Şekil 5.19. %100y'te $A_1$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                           | 66 |
| Şekil 5.20. %100y'te $A_2$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                           | 67 |
| Şekil 5.21. %100y için filtrelenmiş ve pencerelemiş sinyalden elde edilen öz nitelik bar grafikleri.....                                                                 | 67 |
| Şekil 5.22. %100y için hata matrisi .....                                                                                                                                | 68 |
| Şekil 5.23. %100y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri .....     | 69 |
| Şekil 5.24. %100y'te $A_1$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri ..... | 70 |
| Şekil 5.25. %100y'te $A_2$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri ..... | 71 |
| Şekil 5.26. %100y'te S seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                               | 72 |

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.27. %100y'te $A_1$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                           | 72 |
| Şekil 5.28. %100y'te $A_2$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                           | 73 |
| Şekil 5.29. %100y için filtrelenmiş sinyalden elde edilen öznitelik bar grafikleri.....                                                                                  | 73 |
| Şekil 5.30. %100y için hata matrisi .....                                                                                                                                | 74 |
| Şekil 5.31. %0y'te hata matrisi .....                                                                                                                                    | 74 |
| Şekil 5.32. %100y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri .....     | 76 |
| Şekil 5.33. %100y'te $A_1$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri ..... | 77 |
| Şekil 5.34. %100y'te $A_2$ motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri ..... | 78 |
| Şekil 5.35. %100y'te S seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                               | 79 |
| Şekil 5.36. %100y'te $A_1$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                           | 79 |
| Şekil 5.37. %100y'te $A_2$ seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği .....                                           | 80 |
| Şekil 5.38. %100y için filtrelenmiş sinyalden elde edilen öznitelik bar grafikleri.....                                                                                  | 80 |
| Şekil 5.39. %100y için hata matrisi .....                                                                                                                                | 81 |
| Şekil 5.40. %0y'te hata matrisi .....                                                                                                                                    | 81 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Çizelge No

### Sayfa

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 5.1. Deneysel çalışmadan kullanılan motorun özellikleri.....                      | 48 |
| Çizelge 5.2. Tez çalışmasında elde edilen DVM sonuçları .....                             | 82 |
| Çizelge 5.3. Literatürde stator sargı arızası teşhisi üzerine yapılmış çalışma sonuçları. | 82 |



## 1. GİRİŞ

Nüfusun ve ekonominin büyümesiyle enerjiye olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Dünyanın enerji arzının ana unsurlarını fosil yakıtlar ve petrol oluşturmaktadır. Endüstri üretimi ve ulaşım açısından ihtiyaç duyulan enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği önem arz etmektedir. Mevcut endüstriyel toplumda elektrik enerjisine olan ilgi oldukça fazladır (Chuang ve ark., 2017). Bunun yanı sıra fosil yakıtların tükenmesi, çevre kirliliği, küresel ısınma gibi sorunları çözebilmek için akademik ve endüstriyel topluluklar elektrikli araçların geliştirilmesine büyük çaba sarf ederek yeni ulaşım çözümleri geliştirmektedirler (Ming ve ark., 2017; Sun ve ark., 2019). Dolayısıyla elektrik enerjisine olan talep ilerleyen teknoloji ile hayli artmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu motorlar tarafından kullanılmaktadır (Chuang ve ark., 2017). Elektrik motoru, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren aygıttır. Rüzgâr enerjisi, elektrikli araçlar, demiryolu taşımacılığı, havayolu ulaşımı, robotik gibi birçok uygulamada elektrik motorları yer almaktadır (Lee ve ark., 2018; Sheela ve ark., 2020).

Kutup sayısı ve frekans ile orantılı olarak hareket eden ve sabit bir hızda dönen motorlar Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) olarak adlandırılır. SMSM, basit yapı, yüksek verimlilik, yüksek tork, güç ve akı yoğunluğu, geniş hız aralıkları, uzun ömür, hassas tork kontrolü gibi avantajlarından dolayı iyi bir performans sergiler (Li ve ark., 2018; Moosavi ve ark., 2015a). SMSM'ler sağladıkları avantajlardan dolayı elektrik motorları içerisinde sıklıkla tercih edilen motorlardır (Obeid ve ark., 2017; Yousri ve ark., 2019).

Çevre faktörü, sürekli değişen yük, yüksek çalışma gerilimi, imalat ve kurulum hataları gibi çeşitli nedenlerden dolayı her elektrik motorunda olduğu gibi SMSM'lerde de arızalar ile karşılaşılmaktadır (Li ve ark., 2018). Motor arızası, motorda hasara yol açan ve sistemi olumsuz yönde etkileyen koşullara maruz bırakıldığında motorun normal davranışındaki değişiklik olarak tanımlanabilir (Usman ve ark., 2019). Mühendislik yapılarında, herhangi bir arıza, üretim prosedüründe olduğu gibi, tüm sistemlerin davranışını etkileme potansiyeline sahiptir (Dakheel ve ark., 2019). Örneğin, motorlarda oluşan bir arıza sistemin durmasına sebep olabilir. Sistemde oluşan bu kesintiler hem üretim zamanının hem de ham maddenin boşa gitmesine sebep olarak maliyeti artırabilir.

Motorda meydana gelmiş küçük bir arıza ilerleyerek daha büyük arızalara sebep olabilir ve bakım maliyetini artırabilir.

Motorlarda meydana gelen arızaların sınıflandırılması mekanik arıza, manyetik arıza ve elektriksel arıza olmak üzere üç başlık altında yapılmaktadır (Liang ve ark., 2018; Mohammed ve ark., 2019). Mekanik arızalar esas olarak mıknatıs hasarını, shaftın bükülmesini, cıvataların gevşemesini, yatak arızalarını ve hava boşluğu eksantrikliğini içerir (Chen ve ark., 2019). Manyetik arızalar, kalıcı mıknatısların, yüksek sıcaklığa, yüksek stator akımlarına, stator sargı arızalarından dolayı meydana çıkan büyük kısa devre akımlarına, mıknatısın yaşlanmasına, mıknatıs hasarlanmalarına maruz kalmaları ile meydana gelir (Gao ve ark., 2019). Elektriksel arızalar, topraklama hataları, motor sargılarının yanlış bağlantısı, stator faz sargılarının kısa devresi, açık faz devrelerinden oluşmaktadır (Chen ve ark., 2019). Stator sargı arızası, motor arızaları içerisinde çok yaygın görülen arızalardan biridir (Gurusamy ve ark., 2021; Mohammed ve ark., 2019). Motorun uzun süre çalışması veya aşırı yük ile çalışması, motor sargı yalıtımında aşınmaya sebep olur ve yalıtım aşınması sonucu stator sargılarında kısa devre arızası oluşabilir (Kumar ve ark., 2021). Stator sargısında kısa devre meydana geldiğinde, kısa devre yolunda sirkülasyon akımı üretilir. Eğer kısa devre arızasının tespiti sağlanmaz ve arızalı olarak çalıştırılmaya devam edilirse, oluşacak yüksek akım, diğer tellerdeki yalıtımı azaltarak kısa devrenin büyümesine yol açar (Lale ve ark., 2018). Giderek artacak olan kısa devre arızası, faz kaybına, motor kaybına ve hatta insan hayatını tehlikeye atabilecek kazalara sebebiyet verebilir. Oluşabilecek kayıplar, motor maliyetinden çok daha büyüktür. Dolayısıyla bir arızanın tespitini sağlamak, arıza oranını azaltmak, kaza zararını azaltmak, bakım maliyetlerini azaltmak ve üretim güvenliğini sağlamak için çok büyük öneme sahiptir.

SMSM'lerin gelişen teknolojinin en önemli parçalarından biri haline gelmesiyle, arıza teşhisi üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmış, çeşitli teoriler ve teknikler önerilmiştir. Arıza izleme için kullanılan çalışma parametreleri, voltaj, akım, manyetik akı, motor hızı veya motorun titreşimi gibi sinyallerdir (Luo ve ark., 2018). Bu parametreler içerisinde akım sinyali, arıza tespitini başarılı bir şekilde sağlamanın yanı sıra düşük maliyetli olması ve de kolay elde edilebilmesi nedeniyle yaygın kullanıma sahiptir (Minaz, 2020). Motordan elde edilen sinyal verileri kullanılarak zaman, frekans, zaman-frekans

boyutlarında analizler gibi çeşitli yöntemler kullanılarak özellik çıkartımı yapılır ve arıza durumu incelenir (Quiroz ve ark., 2018). Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT), geleneksel frekans analiz yöntemidir (Usman ve ark., 2019). Kararlı durum arıza teşhisinde, frekans sabit kabul edildiği için başarılı sonuçlar veren FFT, durağan olmayan sinyallerde başarı gösterememektedir (Senanayaka ve ark., 2018). Durağan olmayan sinyal analizlerinde Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT), Hilbert Huang Dönüşümü (HHD) ve Wigner Ville Dağılımı gibi zaman-frekans analizleri kullanılmaktadır (Hu ve ark., 2021; Lee ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2021).

Bu tez çalışmasında SMSM'lerde stator sargı arızasının tespiti için ayırıştırma ve makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Motorda stator sargı arızası, motor statorundan çıkarılmış olan uçların kısa devre edilmesi ile yapay olarak elde edilmiştir. Boşta ve tam yükte çalıştırılan motordan kararlı ve dinamik çalışma koşullarında akım, hız ve akı sinyalleri toplanmıştır. Arıza teşhisi ve tespiti için motorun sağlam ve arızalı fazlarına ait akı sinyali kullanılmıştır. Toplanan akı sinyalleri Komple Uyarlamalı Gürültülü Toplu Ampirik Kip Ayırışımı (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise (CEEMDAN)) yöntemi ile İçkin Kip Fonksiyonlarına (Intrinsic Mode Function (İMF)) ayırıştırılmıştır. Yüksek frekans harmoniklerini barındıran sinyallerin filtrelenmesi için Permütasyon Entropisi (PE) ve Hausdorff Uzaklığı (HU) yöntemleri kullanılmıştır. Filtrelenen sinyale pencereleme işlemi uygulanmıştır ve her bir sinyal penceresinin zaman ve frekans boyutlarındaki özellikleri çıkartılmıştır. Özellik çıkarma işlemi ile elde edilen özellik vektörü Destek Vektör Makinesine (DVM) iletilerek arıza sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar önerilen yöntemin başarısını göstermektedir.

Bu tez çalışması 6 bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölüm GİRİŞ bölümüdür ve bu bölümde genel olarak SMSM'lere ve SMSM'lerde meydana gelen arızalara değinilmiş ve tez çalışmasında gerçekleştirilen işlem adımlarından kısaca bahsedilmiştir. İkinci bölüm LİTERATÜR ÖZETİ bölümüdür ve bu bölümde SMSM'lerde stator sargı arızasının tespiti ve teşhisi üzerine yapılmış son 14 yıla ait çalışmalar anlatılmıştır. Üçüncü bölüm MATERYAL YÖNTEM bölümüdür ve bu bölümde SMSM'nin yapısı, çalışma prensibi, avantajları ve dezavantajları, kullanım alanları, matematiksel modeli, SMSM'lerde meydana gelebilecek arızalar detaylı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölüm

ARIZA TEŞHİSİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER bölümüdür ve bu bölümde kullanılan sinyal işleme yöntemi, ayrıştırma için CEEMDAN ve filtreleme işlemi için PE ve HD yöntemleri, sinyal özelliklerinin çıkartılmasında kullanılmış olan özellikler ve sınıflandırıcı olarak kullanılan DVM detaylı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölüm DENEYSEL ÇALIŞMALAR bölümüdür ve bu bölümde deney düzeneği, deney düzeneğinden veri toplanması, stator sargı arızasının matematiksel modeli ve stator sargı arızasının oluşturulması, toplanan verilerin işlenmesi ve yapılan deneylerin sonuçları detaylı olarak anlatılmıştır. Altıncı bölüm SONUÇLAR bölümüdür ve bu bölümde yapılan çalışma sonuçları açıklanmıştır.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Motorlarda meydana gelen arızaların tespit edilememesi ve arızalı olarak çalıştırılmaya devam edilmesi durumunda ciddi sorunlara yol açabilir. Motorda oluşan kısa devre arızasından dolayı motor daha yüksek akım çekerek ısınır. Zamanla yalıtım azalabilir, kısa devre olan sarım sayısı artabilir, arızanın meydana geldiği faz tamamen kaybedilebilir, mekanik arızalara yol açabilir ve hatta daha da ilerleyerek motorun tamamen kaybedilmesine sebep olabilir. Dolayısıyla arızanın başka problemlere yol açmadan tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada SMSM’lerde kısa devre arızasının teşhisi üzerine yeni bir yöntem önerilmiştir. Tezin bu bölümünde son 14 yılda SMSM’lerde meydana gelen kısa devre arızalarının tespiti üzerine yapılan çalışmalar açıklanmıştır.

Rosero ve ark., (2009), bu çalışmalarında SMSM’lerde kısa devre arıza tespiti için bir yöntem önermişlerdir. Stator akımının Ampirik Kip Ayrışımı (Empirical Mode Decomposition (EMD)) yöntemi ile İMF’lerine ayırmışlar ve arıza bilgilerini taşıyan İMF<sub>1</sub>’in ve İMF<sub>2</sub>’in toplamına Wigner-Ville ve Zhao-Atlas-Mark gibi ikinci dereceden zaman frekans dağılımları uygulamışlardır. Simülasyonlar ve deneysel laboratuvar testleri ile algoritmalarını doğrulamış, arıza teşhisi için yöntemin uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir. Önerilen yöntemin, düşük hız ve dinamik çalışma koşullarında SMSM’de meydana gelen kısa devre arızalarının tespiti ve teşhisi için kullanılabilir olduğunun göstermişlerdir.

Da ve Krishnamurthy (2010), bu çalışmalarında SMSM’lerde sağlık izleme ve arama bobinleri ile doğrudan akı ölçümü yaparak çoklu arıza tespiti önermektedirler. Arama bobinlerini, hava boşluğu akı yoğunluğunu ölçmek kullanmışlardır. Güç elektroniği cihazlarının neden olduğu harmoniklerden etkilenmemesi için arıza tespitinde sadece birinci dereceden harmonik kullanmışlardır. Bu çalışmada ele alınan arızalar, statik ve dinamik eksantrik arızası, sarım-sarım kısa devre arızası, faz-toprak kısa devre arızası ve demanyetizasyon arızasıdır. Sonuçların farklı arızaları tespit edilebilmede önerilen yöntemin başarısını gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Urresty ve ark., (2011), bu çalışmalarında, geçici koşullar altında çalışan SMSM’de stator sargılarında meydana gelen kısa devre arızasını algılamak için sıfır dizi voltaj bileşeni

yöntemini önermişlerdir. Elde edilen sıfır dizi voltaj bileşeni zamansal sinyali HHD ile işlemişlerdir. Bu çalışmada sunulan deneysel sonuçlar, stator kısa devre arızalarının çevrimiçi teşhisi için yöntemin avantajlarını göstermektedir.

Vinson ve ark., (2012), bildirdikleri bu çalışmada, SMSM'ler için arıza tespit sistem tasarımı gerçekleştirmişlerdir. SMSM'lerde meydana gelen stator sargı kısa devre arızası ve rotorda demanyetizasyon arızalarını karakterize etmişlerdir. SMSM analitik modelini MATLAB/Simulink'de geliştirmiş ve simüle etmişlerdir. Her arıza için özel göstergeler önermişlerdir. SMSM kontrolörü tarafından kullanılan mevcut sinyalleri arıza teşhisi için kullanmalarından dolayı ek bir sensör kullanmamışlardır. Faz akımları ve rotor stator konum bilgisini alarak Fresnel diyagram ile kısa devre arıza teşhisi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile önerilen yöntemin başarısını göstermişlerdir.

Sarikhani ve Mohammed (2012), bu çalışmalarında zıt EMK tahmincisi kullanarak SMSM'lerde stator kısa devre arızasının tespitini sunmuşlardır. Zıt EMK tahmincisini, mevcut bir mod izleme şemasına dayalı olarak tasarlamışlardır. Tahmin edicinin tasarımında makinenin termal ve doygunluk yönleri göz önünde bulundurmuşlardır. Arıza tespitini, tahmini zıt EMK ile referans zıt EMK arasındaki farka dayalı olarak gerçekleştirmişlerdir. SMSM'lerde farklı seviyelerde meydana gelen stator sargı arızasını hem sayısal olarak hem deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal modelleme, termal ağ ile birleştirilmiş ve stator sargı arızası oluşturulmuş Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı bir model tarafından gerçekleştirmişlerdir. Simüle edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırarak modelleme sonuçlarını doğrulamışlardır.

Liu ve ark., (2012), bu çalışmalarında, SMSM'nin stator sargı arızasının yerini ve ciddiyetini modellemiş ve tespit etmişlerdir. Hem sağlam hem de arıza koşullarını tanımlayabilen bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını kullanarak arıza teşhisi gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri model üzerinde hem sağlam hem de arızalı koşullar altında yaptıkları simülasyon çalışmalarıyla, önerilen algoritmanın performansını göstermişlerdir.

Gu ve ark., (2013), bu çalışmalarında, seri ve paralel sargılı bağlantıların kullanıldığı SMSM'lerin stator sargı arıza modellerini hem arıza sargı akı bilgilerine hem de aynı sargıların dağılımına bağlı çapraz akı bağlantılarının neden olduğu indüktans

değişimlerine dayalı olarak deforme akı modelleri kullanarak geliştirmişlerdir. Paralel sargı modelinde, arıza ve sağlam sargılar arasındaki paralel bağlantının neden olduğu akım dağılımındaki değişiklikleri tanımlamak için ek bir dinamik analiz kullanmışlardır. Deforme akı modellemesi ve pozitif dizi akım varsayımlarına dayalı olarak, önerilen modeli hem pozitif hem de negatif dizi senkronize referans çerçevelerinde türetmişlerdir. Önerilen SMSM modelini doğrulamak için SEY dayalı simülasyon uygulamışlardır.

Nyanteh ve ark., (2013), bu makalelerinde, SMSM'lerde arıza teşhisi için bir yöntem sunmuşlardır. Odaklanmış zaman gecikmeli sinir ağı kümesini parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile birleştirmişlerdir. Kümedeki her sinir ağını, sıfır akım bileşenini stator sargılarındaki kısa devreli sarımların sayısı ile ilişkilendirmek için eğitmişlerdir. Sıfır akım bileşenini arıza teşhisi esnasında tüm fazlardaki anlık akım değerlerini toplayarak elde etmişlerdir. Sinir ağıları hem bilgisayar simülasyonlarından hem de gerçek bir SMSM'den alınan arıza verileri kullanılarak Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemiyle çevrimdışı olarak eğitilmiştir. Alınan sonuçlar önerilen yöntemin performansını göstermek için sunulmuştur.

Refaat ve ark., (2013), bu çalışmada stator akım ve besleme voltajı sinyallerinin FFT ile analizinden elde edilen üçüncü harmonik bileşenin büyüklüğünün temel bileşenine oranına dayanan ve yapay sinir ağı kullanılarak sarım-sarım kısa devre arızası teşhisi sağlayan bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemi iki aşamadan oluşturmuşlardır. Birinci aşamada, üç fazlı motor akımları geleneksel akım transformatörleri ve hat voltajları potansiyel transformatörler kullanılarak ölçmüşlerdir. Stator akımları, kesme frekansları senkron frekanstan çok daha düşük olan alçak geçiren filtrelerden filtrelenmiş ve yüksek frekans bileşenlerini kaldırmışlardır. Örnekleyici ve ön işlemciyle, zaman alanındaki stator akım sinyallerini kullanabilir bir frekans alanına dönüştürmüşlerdir, daha sonra üç fazlı stator hat akımlarının ve besleme voltajının FFT analizinden elde edilen üçüncü harmonik bileşen büyüklüğünün temel bileşene oranını elde etmişlerdir. İkinci aşamada, birinci aşamadan elde edilen oranı, değişikliklerini gözlemlemek için yapay sinir ağı algoritmasına beslemişlerdir. Bu orandaki değişikliğe göre arıza şiddetinin belirlendiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada geri yayılım algoritması kullanılarak eğitilmiş iki gizli katman ileri besleme yapay sinir ağı kullanmışlardır.

Dengesiz beslenme gerilim arızası ile stator sargı arızası ayırımı yapmak için de oldukça etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Saavedra ve ark., (2014), bu çalışmalarında, SMSM'lerdeki stator sargı arızalarının teşhisi için hem stator akımlarını hem de sıfır dizi voltaj bileşenlerini kullanmışlardır. Farklı stator sargı konfigürasyonlarından alınan stator akım ve sıfır dizi voltaj bileşenlerinin harmoniklerini incelenmişlerdir. Stator akımı üçüncü harmonikten faydalanarak arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Sıfır dizi voltaj bileşeni için ise birinci, beşinci ve yedinci harmonikleri kullanmışlardır. Çalışmalarını SEY simülasyonu ile gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile önerilen yöntemin arıza teşhisi için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Zhang ve ark., (2014), bu çalışmada elektrikli araçlar için stator yuvasındaki iletken sayısını değiştirerek SMSM'ler için sarım-sarım kısa devre arızasının sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Yaptıkları simülasyonları, 1 tur, 3 tur ve 5 tur kısa devre arızaları ve farklı çalışma koşulları ile sağlam motor ve arızalı motorlar üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Sonuçların arıza seviyesi arttıkça motorların manyetik alanının ve çeşitli parametrelerinin değiştiğini göstermişlerdir. Sarım-sarım kısa devre arızasının tespiti için rotor hızına ve stator akımı genlik frekansının veya faz frekansının dokuzuncu harmoniğini özellik vektörü olarak çıkartmışlardır. Sonlu elemanlar simülasyon yönteminin, sarım-sarım kısa devre arızası üzerine yapılan çalışmalar için temel sağladığını ifade etmişlerdir.

Alvarez-Salas ve ark., (2015), bu çalışmada stator akımını kullanarak SMSM stator sargı arızasının teşhisi için bir yöntem önermişlerdir. Park'ın vektör modülünü, SMSM'nin kararlı durum çalışmasında yeni başlayan sargı arızaları için bir teşhis aracı olarak kullanmışlardır. Bu yaklaşımın sonuçları, Park'ın vektör geometrisini değiştirdiğinde her fazın bobinlerinde kısa devre varlığını tespit etmek için kullanışlı olduğunu göstermektedir.

Moosavi ve ark., (2015b), stator akımının FFT analizi ile özellik çıkartımı yapmış ve daha sonra çok katmanlı yapay sinir ağı kullanarak SMSM'lerde sarım-sarım kısa devre arızasının tespiti ve sınıflandırılmasını gerçekleştirmişlerdir. SEY kullanılarak elde edilen sonuçları, deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır. Yapay sinir ağının eğitilmesi için

deneysel veriler kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar ile arıza teşhisinde yapay sinir ağının başarılı bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır.

Hang ve ark., (2015), bu makalede, sıfır dizi bileşenlerine dayanan SMSM’lerde sarım-sarım kısa devre arızasının çevrim içi teşhisi için geliştirilmiş bir yöntem sunmaktadırlar. Sarım-sarım kısa devre arızasının matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Sıfır dizi voltaj bileşeni ve sıfır dizi akım bileşenleri ile analiz gerçekleştirmişlerdir. Arızayı, sıfır dizi voltaj bileşenlerinin veya sıfır dizi akım bileşenlerinin başlangıç faz açıları arasındaki farka göre belirlemişlerdir. Rotor hızındaki değişim etkisini ortadan kaldırmak için arıza göstergeleri tanımlamışlardır ve arıza göstergelerini çıkartmak için frekans izleme algoritması sunmuşlardır. Önerilen yöntem ile arıza, arıza şiddeti ve arızanın meydana geldiği fazı tespit etmişlerdir. Yöntemi doğrulamak için, deneyleri farklı arıza dereceleri ve rotor hızı altında gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçları önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamıştır.

Foster ve ark., (2016), SMSM’lerde yüksek dirençli stator sargı arızalarının tespiti için bir yöntem önermişlerdir. Bu makalede, yüksek dirençli dönüşler arası arızaların, d-q ekseninde gerilimlerin değişikliklere yol açtığını göstermişlerdir. Önerilen teknikte, stator sargı arızasını tespit etmek için referans gerilimdeki DC değişimlerini kullanmışlardır. Hem sonlu elemanlarla hem de deneylerle, yüksek dirençli dönüşler arası arızaların d-q eksen gerilimleri aracılığıyla tespit edilebileceğini göstermişlerdir.

Obeid ve ark., (2016), bu çalışmalarında SMSM’lerde mekanik titreşimler sebebiyle meydana gelen stator sargı arızalarının başlangıçta tespit edilebilmesi için bir yöntem önermişlerdir. Stator sargılarında meydana gelen arıza akım değerinde değişmelere sebep olduğunu, dolayısıyla da akım kontrolörünün çıkışındaki d-q eksenindeki referans gerilim değerinde bozulmalar meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada yazarlar, referans gerilimde oluşan bozulmaları arıza işareti olarak kullanmışlardır. Referans gerilimine dalgacık dönüşümü uygulayarak arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda önerilen yöntem başarılı bir şekilde sonuç vermiştir.

Yoo ve Jung (2016), bu çalışmalarında SMSM’lerde stator sargı arızasının ve rotor kalıcı mıknatıslarının demanyetizasyon arızasının teşhisi için yüksek frekanslı düşük voltajlı enjeksiyon kullanan arıza teşhis yöntemi önermişlerdir. Önerilen arıza teşhis yöntemini,

araç çalıştırma ve rölantide durma modunda, sistem kontrol işlemi esnasında SMSM'lerde meydana gelen arızaların tespiti için kullanmışlardır. Her fazın akım dalga biçimlerini ölçmüşlerdir ve SMSM arızalarını teşhis etmek için akım dalga biçiminin frekans özelliklerini analiz etmişlerdir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ve kullanılabilirliğini sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmışlardır.

Çıra ve ark., (2016), bu çalışmalarında motor akım imza analizini kullanarak SMSM'lerde stator sargı arızasının tespiti üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı yük, hız ve arıza koşulları altında analiz gerçekleştirmişlerdir. Motordan aldıkları akım ve gerilim sinyallerinin uzay vektörlerine dönüştürmüşler ve sonrasında FFT analizi uygulayarak negatif ve pozitif harmonikleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri arıza imzalarını kullanarak stator sargı arızasının tahminini doğru bir şekilde tespit etmişlerdir.

Otava (2016), bu makalede, SMSM stator sargı arızasının teşhisi için motor akım imza analizine dayanan bir yöntem sunmuştur. Cortex-M4 mikro denetleyici üzerinde alan yönelimli kontrol algoritması ile birlikte çalışan spektral analiz arıza algılama yönteminin uygulanmasını açıklamaktadır. Gerçekleştirilen uygulama MATLAB/Simulink ortamında test edilmiş ve deney seti üzerinde doğrulanmıştır.

Fitouri ve ark., (2016), bu çalışmalarında SMSM'ler stator sargı arızasının tespiti için yöntem sunmuşlardır. Maxwell 2D ve Simplorer tabanlı PWM motor sürücü beslemeli SMSM destekli SEY ve eşdeğer devre simülasyonunu birlikte içeren dinamik bir model oluşturmuşlardır. SEY'e dayalı olarak, dönüşler arası arızanın çeşitli koşullar ve şiddet altında SMSM davranışı üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Simülasyon testleri ile elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır ve önerilen SEY modelini doğrulamışlardır. Simüle edilmiş modeli kullanan bu çalışma, MATLAB/Simulink kullanarak stator sargı arızasını tespit etmek için stator akımı ve elektromanyetik torku kullanarak, FFT analizine dayalı bir yöntem önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda kullanılan teknik ile arıza tespitinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermişlerdir.

Jeong ve ark., (2016), bu çalışmalarında negatif dizi bileşenlerini kullanarak SMSM'lerde sarım-sarım kısa devre arızasının teşhisi için bir yöntem önermişlerdir. Kullanılan yöntemin rotor hızındaki değişikliklerden kolayca etkilenmeyen bir arıza göstergesi hesapladığını ve aynı zamanda arıza şiddetini doğru bir şekilde tespit ettiğini ifade

etmişlerdir. Negatif dizi bileşenleri yönteminin başarısını göstermek için sıfır dizi bileşenleri yöntemi ile de sonuçlar almışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda sıfır dizi bileşenleri yönteminin düşük hızlarda uygulanamayacağı ve bu yüzden negatif dizi bileşenleri yönteminin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Yassa ve ark., (2016), bu çalışmada aynı anda birkaç fazda meydana gelen sarım-sarım kısa devre arızasını temsil edebilen beş fazlı SMSM'nin genel modelini önermişlerdir. Bu modelin, diferansiyel denklemlerle ifade edilen manyetik devre yaklaşımına dayandığını ifade etmişlerdir. Elde edilen zaman diferansiyel durum denklemleri sistemini, MATLAB ortamında uygulamışlardır ve elektromanyetik tork aracılığıyla rotorun her yer değiştirmesinde düzeltilen değişken adım zamanı ile dördüncü dereceden Rung-Kutta yöntemini kullanarak sayısal olarak çözümleme yapmışlardır. Ayrıca frekans spektrumunu tespit etmek için faz akım sinyaline FFT analizi uygulamış ve sınıflandırma yöntemi olarak spektral güç yoğunluğunu seçmişlerdir. Önerilen teşhis yönteminin performansını doğrulamak için MATLAB/Simulink kullanılarak çalışmalarını yapmışlardır.

Moon ve ark., (2016), bu çalışmada SMSM'lerde sarım-sarım kısa devre arızasını, gerilimlerin artık bileşenlerini kullanarak analiz etmişlerdir. Üç faz arasındaki arızalı fazı, her fazın artık voltaj bileşeninden çıkarılan arıza indeksinin karşılaştırılmasıyla belirlemişlerdir. Arızanın ciddiyeti doğrudan arıza indeksinin değerinden elde etmişlerdir. Arıza indeksini elde etme için en küçük kareler yöntemini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçların önerilen yöntemin çeşitli arıza koşullarında iyi çalıştığı sonucuna varmışlardır.

Biernat (2017), bu makalesinde, SMSM'lerde yüksüz çalışma durumunda indüklenen voltaj sinyalini kullanarak stator sargı arızası teşhisi gerçekleştirmiştir. Önerilen yöntem ile gerilim uzayı fazör büyüklük spektrumunun frekans-frekans haritasını kullanmış, sağlam ve arızalı motorun sinyal farklarını bulmayı ve yorumlamayı sağlamıştır. Karakteristik frekansa göre uzaktaki frekans bileşenlerinin genlik ortalama değerine dayalı teşhis ölçümü, analiz edilen makine arızasına yeterli hassasiyeti göstermiştir.

Obeid ve ark., (2017), bu çalışmalarında, hibrit ve elektrikli araçlar için SMSM'nin stator başlangıç arıza teşhisini ve izlenmesini incelemişlerdir. d-q çerçevesinde referans gerilim

sinyaline uyarlamalı dalgacık dönüşümü uygulayarak arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Sunulan çalışmada arızanın konumunu tespit etmek için faz-faz gerilimleri kullanmışlardır. Uygulama sonuçları doğrultusunda önerilen yöntemin başarılı sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Faiz ve ark., (2017), bu çalışmalarında, SMSM’lerde sarım-sarım kısa devre arızasını teşhis etmek için bir yöntem önermişlerdir. Motorun üç fazının akımlarını kullanarak farklı seviyelerde meydana getirilmiş sarım-sarım kısa devre arızasını modellemişlerdir ve Park vektörü uygulayarak arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, stator akımlarının Park dönüşümünün AC bileşeninin etkin değerinin, arızayı ve arıza seviyesini iyi tespit edebileceğini kabul etmişlerdir.

Mazzoletti ve ark., (2017), bu çalışmada SMSM’lerde kısa devre arıza tespiti için model tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemi, SMSM terminallerinde akım ve voltaj ölçümü yaparak gerçekleştirmişlerdir. Voltaj ölçümü ile rotor hızı tahmini yapmışlardır ve böylece ek sensörlere ihtiyaç duyulmadığını göstermişlerdir. Arıza tespitini, ölçülen stator akımları ve bir durum gözlemcisi ile tahmin edilen stator akımları arasındaki fark tarafından üretilen artık akım vektörüne dayanarak gerçekleştirmişlerdir. Ortaya çıkan artık akım vektör sinyali, model parametre belirsizlikleri, asimetrik akımlar, ölçüm gürültüsü gibi durumlar tarafından üretilebildiği sonucuna varmışlardır. Bu istenmeyen bozulmalardan kaynaklanacak yanlış alarmları önlemek için artık akım vektörünün dizi ayrışımı farklı referans çerçeveleri kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. SMSM prototipi kullanılarak elde edilen deneysel testlerin sonuçlarında, herhangi bir sargıda %1.85’lik bir kısa devre arızasının tespit edilmesi ve izole edilmesinin mümkün olduğu sonucuna varmışlardır.

Chuang ve ark., (2017), bu çalışmalarında, dalgacık ve sinir ağına dayanan tanı yöntemi önermişlerdir. Bu makalede stator akımındaki yüksek frekans enerjisini, dalgacık yöntemi kullanarak çıkartmışlardır ve daha sonra normalizasyon işlemi yapılarak arıza özelliği olarak kullanmışlardır. Uygulanan bu yöntem çok sayıda veri toplama gerektirmediğini ve tanılama sürecini basitleştirdiğini göstermişlerdir. SMSM’deki stator sargı arızasının teşhisi için kısa öğrenme süresi ve güçlü tanımlama yeteneği özelliklerine sahip kendi kendini organize eden özellik haritası sinir ağı kullanmışlardır ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Ahsanullah ve ark., (2017), yaptıkları çalışmada yüzeye monte edilmiş SMSM’de sarım-sarım kısa devre arızasını ve demanyetizasyon arızasını tespit etmek için çevrimiçi bir yaklaşımı analiz etmişlerdir. Önerilen yöntemde, hangi mıknatısın arızalardan etkilendiğini tespit etmek için ve ortaya çıkan arızaları, yük dengesizliği ve giriş voltaj dengesizliği gibi diğer asimetrik problemlerden ayırmak için arama bobinlerini kullanmışlardır. Önerilen yöntemin, arızanın şiddeti çok az olduğunda bile ayırt etme özelliğine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Arama bobinlerinin kullanılmasına ek olarak, önerilen yöntemde çeşitli arıza koşullarına sahip tork profillerini incelemişlerdir ve HHD yöntemini kullanarak makine akımını analiz etmişlerdir. Simüle edilen sonuçların, önerilen yöntemin güvenilir arıza teşhisi sağladığı sonucuna varmışlardır.

Zheng ve ark., (2017), yaptıkları bu çalışmada stator sargı arızalarının teşhisi için sıfır dizi gerilim bileşeni ile analiz gerçekleştirmişlerdir. Arızalı ve sağlam SMSM modeli MATLAB/Simulink platformu kullanılarak modellenmiş ve simüle etmişlerdir. Stator akımının, voltajının, çıkış torkunun ve hızının özellikleri analiz edilerek arıza tespitini gerçekleştirmişlerdir.

Zafarani ve ark., (2018), bu araştırma çalışmasında, SMSM’lerde stator sargı kısa devre arızasının modellenmesi ve teşhis edilmesi için kullanılan tekniklerin incelemesini sunmuşlardır. Kısa devre tespit yöntemlerini altı kategori altında incelemişlerdir. Motor akımı ve voltaj analizlerinin daha az hesaplama gerektirmesi ve diğer yöntemlere kıyaslama uygulamasının kolay olmasından dolayı popüler olduğunu ifade etmişlerdir. Arıza tespitini güvenilirliğini artırılması için çeşitli arıza göstergelerinin birleştirilerek kullanıldığını belirtmişlerdir.

Sui ve ark., (2018), çalışmalarında SMSM’lerde stator sargı arızasının tespiti için kalıcı mıknatısların ürettiği akıyı kullanarak, arama bobinine dayalı çevrim içi bir arıza tespit yöntemi önermişlerdir. Arama bobininin optimal konfigürasyonunu, farklı yük koşulları ve arıza meydana gelen pozisyonlar dikkate alınarak incelemişlerdir. Önerilen arıza teşhis yönteminin performansını değerlendirmişlerdir.

Senanayaka ve ark., (2018), bu çalışmada, SMSM’lerin değişken hız ve yük koşullarında arıza teşhisi için bir sınıflandırıcı tanıtmışlardır. Arıza sınıflandırılması için özellikleri, yeniden örneklenen titreşime, akım sinyallerine ve tahmini tork ve hıza göre

üretmişlerdir. Arıza tespitini ve sınıflandırmayı, DVM algoritmasını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Önerilen yöntem ile değişken hızlarda deneysel veriler kullanılarak doğrulandığı ve mükemmel performanslar elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Li ve ark., (2018), bu çalışmada değişken kip ayrıştırmasına dayalı SMSM'ler için bir sargı-sargı kısa devre arızası tanı yöntemi sunmuşlardır. Sıfır dizi voltaj bileşeni değişken kip ayrıştırması ile İMF bileşenlerine ayrıştırılmıştır ve sargı-sargı kısa devre arızasını, arızayı içeren İMF'lerin varyasyonlarını gözlemleyerek teşhis etmişlerdir. Önerilen yaklaşımı doğrulamak için simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarıyla, önerilen yöntemin etkili bir şekilde uygulanabilen bir teşhis tekniği olduğunu göstermişlerdir.

Lee ve ark., (2018), çalışmalarında SMSM'lerde sargı-sargı kısa devre arızasını teşhis etmek için model tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Arıza teşhisini, ölçülen stator voltajları ile tahmini stator voltajları arasındaki farkı temsil eden artık voltaj bileşenleri ile gerçekleştirmişlerdir. Artık voltaj bileşenlerine dayanan arıza göstergeleri, arıza şiddetini ayırt etmiştir ve ayrıca arızanın meydana geldiği fazı da tespit etmiştir.

Liang ve ark., (2018), çalışmalarında SMSM'nin stator sargılarında meydana gelen sargı-sargı kısa devre arızasının tespiti için hem stator akım sinyalini hem de titreşim sinyalini kullanmışlardır. SMSM'den alınan deneysel veri setlerini bir zaman frekans yöntemi olan dalgacık paket dönüşümü ile analiz edilerek arıza özelliklerini çıkartmışlardır. Daha sonra frekans dağılımını gözlemlemek için FFT uygulamışlardır ve sağlam motor sinyallerinin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Akım sinyallerinden aldıkları frekans spektrumunu sağlam motorun frekans spektrumu ile karşılaştırdıklarında, 50 Hz ve 150 Hz'de olan frekanslardaki arızalı motor sinyalinin genliğinin açık bir şekilde arttığını ve 150 Hz'de sağlam motor sinyal genliğinin çok küçük olduğunu ancak arızalı motor sinyal genliğinin sağlam motor sinyalinin yaklaşık altı katına ulaştığını göstermişlerdir. Titreşim sinyalinde ise 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz ve 400 Hz'de olan frekanslardaki arızalı motor sinyalinin genliğinin açık bir şekilde arttığı sonucuna varmışlardır.

Fonseca ve ark., (2018), bu çalışmada şebeke kalkışlı SMSM'lerde dönüşler arası sarım-sarım kısa devre arızası için MATLAB/Simulink'de bir model sunmuşlardır ve bu tip arızaların teşhisi için genişletilmiş park vektör yaklaşımının uygulamasını

araştırmışlardır. Sunulan yaklaşımı doğrulamak için simülasyon sonuçlarını motorun deneysel performansı ile karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar stator akımının Park vektörünün  $2f_1$  harmonik bileşeninin birim değeri başına tanımlanan arıza şiddeti faktörünün, arıza şiddetinin iyi bir göstergesi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Luo ve ark., (2018), bu makale, motor arızalarının tespiti için derin öğrenme algoritması olan uzun kısa süreli bellek modeli sunmuşlardır. Önerdikleri modeli, tespit edilen üç fazlı akım ve rotor pozisyonunun verilerini analiz etmek için kullanmışlardır ve arızaları tespit etmek için bu zamanla değişen sinyallerdeki faydalı bilgileri çıkarmışlardır. Geleneksel arıza algılama yöntemiyle karşılaştırıldığında, derin öğrenme tabanlı arıza algılama yönteminin daha az örneklenmiş veri gerektirdiğini, hesaplama sürecinin modüler olduğunu, entegrasyonun kolay olduğunu ve güçlü parazit önleme özelliğine sahip olduğunu dolayısıyla SMSM’lerde arıza tespiti için iyi bir uygulama olduğunu ifade etmişlerdir.

Alvarez-Gonzalez ve ark., (2018), bu makalede, SMSM’nin akım sinyallerini kullanarak model tabanlı arıza teşhis modeli sunmuşlardır. Ölçülen akım sinyalleri ile makinenin gerçek zamanlı modeli tarafından elde edilen akım sinyallerinin arasındaki farkı inceleyerek arıza tespiti gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada FFT analizi uygulayarak üçüncü harmoniğin arıza bilgisi içerdiğini göstermişlerdir. Önerdikleri yöntemin düşük hızlarda bile iyi performans gösterdiği, arıza ile ilgili olmayan geçici koşullar nedeniyle yanlış alarm düşmeden etkili bir şekilde çalıştığı sonucuna ulaşmışlardır.

Hadeef ve ark., (2018), bu çalışmada yapay sinir ağı ile SMSM’nin stator sargı kısa devre arızasının arıza tespiti ve teşhisine odaklanmışlardır. Girdi olarak, sağlam ve arızalı koşullarda, normalleştirilmiş üç faz akımını kullanmışlardır. Sinir ağının çıktısı, arızanın meydana gelip gelmediğini göstermiştir. Ulaşılan sonuçlar iyi bir performans göstermiştir.

Wang ve ark., (2018), bu makalede dinamik koşullar altında SMSM stator sargılarının arıza teşhisi incelemişlerdir. Taşıtlarda motorun kararsız çalışma durumunu göz önüne alarak, arıza karakteristiği olarak stator akımı temel dalgasının tek harmoniğini kullanmışlardır. FFT’ye dayalı olarak, akım harmoniğinin konumunu ve genliğini uyarlamalı olarak bulmuşlardır ve vektör normalleştirme yapmışlardır. Kendi kendini

organize eden harita ağının sezgisel eğitimi için geliştirilmiş bir parçacık sürü optimizasyon algoritması önermişlerdir. Motor arıza teşhis stratejisinin doğruluğunu doğrulamak için 60 grup deneysel veri kullanmışlardır ve sonucun doğruluğunu %91 olarak bulmuşlardır.

Olofsson ve Groth (2019), yaptıkları tez çalışmasında SMSM'lerde stator sargısındaki sarım-sarım kısa devre arızasının erken teşhisini yapmayı amaçlamışlardır. SMSM'nin sağlam ve arızalı modelini MATLAB/Simulink'de tasarlamışlardır. Sağlam modeli arızalı modelin doğruluğunu göstermek ve bir kıyaslama noktası olarak kullanmak için tasarlamışlardır. Arızalı modelde kısa devre direnci için ayarlı direnç kullanmışlardır. Böylece farklı seviyelerde arıza oluşumunu sağlamışlardır. Arıza tespitini gerçekleştirmek için motor akım imza analizini ve sıfır dizi gerilim bileşeni yöntemlerini kullanmışlardır. Farklı yüklerde ve farklı arıza şiddetlerinde gerçekleştirdikleri deneyler doğrultusunda sıfır dizi voltaj bileşeni yönteminin daha hassas olduğunu ancak motor akım imza yönteminin daha basit olduğunu göstermişlerdir.

Liang ve ark., (2019), SMSM'lerde DVM'ye dayalı bir arıza teşhis yöntemi önermişlerdir. Hem akım hem de titreşim sinyallerinin birinci ve ikinci en büyük seyrek katsayılarını çıkartmışlardır ve daha sonra eğitim ve test için DVM'ye dört öznitelik girmişlerdir. DVM sonucunda %100 sınıflandırma başarısı almışlardır ve önerilen yöntemin uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir.

Liu ve ark., (2019), bu makale, kaçak manyetik alanı algılama yoluyla SMSM'ler için çevrim içi kısa devre arıza tespiti önermişlerdir. Kaçak manyetik alan, faz akımları ve stator sargılarının durumu hakkında bilgi verdiğini ve buna göre sarım-sarım kısa devre arızasının yeri tespitinin gerçekleştirildiğini göstermişlerdir. Deneysel sonuçlar, SMSM'lerdeki sarım-sarım kısa devre arızasının hem yerinin hem de ciddiyetinin önerilen yaklaşım kullanılarak etkin bir şekilde tespit edildiğini göstermektedir.

Maanani ve Menacer (2019), bu çalışmada SMSM'lerde kısa devre arızası üzerine bir yöntem önermişlerdir. Genişletilmiş Kalman Filtresi gözlemcisine dayalı sensörsüz algılama sağlamışlardır. Genişletilmiş Kalman Filtresi gözlemcisi, makinenin hem sağlam hem de arızalı durumlarda stator direncinin tahminini yapmıştır. Stator direncinin tahmini, SMSM'nin geçici ve sabit durumlardaki arıza tespiti için yapmışlardır. Arıza

tespiti için iki sinyal yaklaşımı kullanmışlardır; sabit durumlar için FFT ve sabit olmayan durumlar için ayırık dalgacık dönüşümü uygulamışlardır. Sensörsüz kontrolün etkinliği ve arıza tespit teknikleri MATLAB/Simulink ortamında bir simülasyonda sunmuşlardır.

Mohammed ve ark., (2019), SMSM sargılarına Fiber Bragg Grating (FBG) olarak adlandırılan sıcaklık sensörlerinin gömülmesiyle açık devre arızasının teşhis edilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. SEY ile termal ve elektriksel modellemeler gerçekleştirilmiştir. FBG sensörlerinden elde edilen sinyaller FFT ile analiz edilerek performans karşılaştırılması rapor etmişlerdir. FBG sensörlerinin SMSM arıza tespiti ve ciddiyetinin tanımlanmasını sağlayabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Bao ve ark., (2019), bu makalede, SMSM’lerde sarım-sarım kısa devre arızasının teşhis yöntemini incelemişlerdir ve çekişmeli üretici ağ ve seyrek otomatik kodlayıcı derin öğrenme ağlarına dayalı teşhis yöntemleri önermişlerdir. Bu yöntemde SMSM’nin negatif dizi akımı ve tork karakteristik sinyallerini toplamışlardır. Çekişmeli üretici ağ metodunun, SMSM’den alınan sinyallerin örnek verilerini genişletmek ve derin ağın yetersiz eğitim sorununu gidermek için kullanmışlardır. Seyrek otomatik kodlayıcı metodunu ise derin öğrenme ağını oluşturmak ve optimize etmek, ağ seyrekliği kısıtlamasını artırmak ve örnek özelliklerini verimli bir şekilde çıkarmak için kullanmışlardır. Elde edilen teşhis doğruluğunu %99 olarak bulmuşlardır.

Liu ve ark., (2019), bu çalışma ile SMSM’lerde stator sargısının yalıtım arızalarının simülasyonunu, teşhisini ve tahminini sunmuşlardır. Simülasyon modeli ile farklı derecelerde stator sargısı yalıtım arızaları oluşturmuşlardır. Simülasyon modelinden elde ettikleri akım verilerine Hilbert dönüşümü uygulamışlardır ve böylece teşhis özellikleri çıkartmışlardır. Daha sonra elde edilen özellikleri, tanı ve tahmin rutini için Bayes tahmin teorisine dayanan Genişletilmiş Kalman Filtresine iletmışlerdir. Son olarak gerçek zamanlı teşhis ve tahmin işlemini gerçekleştirmek için MATLAB/Simulink kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları önerilen yöntemin etkinliğini göstermiştir.

Shen ve ark., (2019), bu çalışmada, SMSM’nin stator sargı arızalarına odaklanmışlardır. Analitik modellere dayanarak, bu arızalar içindeki elektrik makinesinin fiziksel davranışlarını analiz etmişlerdir. Daha sonra, bu arızaları tespit etmek ve sınıflandırmak için veriye dayalı bir tanı yöntemi olan yapay sinir ağını kullanmışlardır. Elektrik

makinesinin sağlam ve arızalı koşullarda ve farklı çalışma koşullarında simülasyon verilerini, yapay sinir ağı modelini eğitmek için kullanmışlardır. SMSM'nin üç fazlı akımları ve motor sürücü giriş akımı, modelin giriş sinyalleri olarak seçmişlerdir. Zaman alanındaki çeşitli özellikleri (örneğin, ortalama, maksimum vb.) ve frekans alanını (örneğin, 2., 3. harmonikler) kullanmışlardır. Sonuç, arıza teşhis modelinin, küçük bir arıza durumunda bile, arızaları %98'den fazla doğrulukla sınıflandırabileceğini göstermiştir.

Çıra (2020), SMSM'lerde stator yalıtım arızasının erken tespiti için öznitelik çıkarım yöntemi olan bir boyutlu yerel ikili örüntü yöntemini önermiştir. Sağlam ve farklı seviyelerde kısa devre arızalarına sahip SMSM'lerden moment sinyallerini almıştır. SMSM'lerden alınan sinyallere bir boyutlu yerel ikili örüntü yöntemi uygulanmış ve işlem sonucu elde edilen histogramlardan öznitelikler oluşturularak Aşırı öğrenme makinesi yöntemi ile sınıflandırmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin başarısını göstermiştir.

Minaz (2020), bu çalışmada, sağlam ve farklı seviyelerde kısa devre arızası olan SMSM'lerden elde edilen akım ve gerilim sinyallerini ayırtmak için öznitelik çıkarma yöntemi olan bir boyutlu yerel ikili örüntü yöntemini kullanmıştır. Akım ve gerilim sinyallerine bir boyutlu yerel ikili örüntü uygulanmasıyla elde edilen özellik vektörleri kullanılarak k-en yakın komşu algoritmasıyla sınıflandırma işlemi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen testleri SMSM'lerden elde edilen üç fazlı akım, tek fazlı akım, üç fazlı voltaj ve tek fazlı voltaj sinyalleri için yapmıştır. Yapılan testlerde, yüksek hızlara ulaşıldığında yüke bağlı olarak arıza tespit başarısının önemli ölçüde arttığı ve arıza oranının artması durumunda başarı oranının yükseldiğini göstermiştir. Önerilen bir boyutlu yerel ikili örüntü yöntemi ile elde edilen özelliklerin başarısını, zaman ve frekans alanlarının özellikleri ile karşılaştırmıştır. Bir boyutlu yerel ikili örüntü özelliklerinin, zaman ve frekans alanlarından elde edilen istatistiksel özelliklerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Ahouee ve Mola (2020), bu makalede, SMSM'lerde ki sarım-sarım kısa devre arızasının oluşumunu tespit etmek için uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi kullanmışlardır. Önerilen yöntemi iki adımda gerçekleştirmişlerdir. İlk adımda bir arıza durumunda SMSM matematiksel modeli simüle edilmiş, motor akım ve tork verilerini

modelden almışlardır. Daha sonra ikinci aşamada, Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım ağını ve ilk aşamada elde edilen verileri kullanarak gerekli bulanık çıkarım sistemini oluşturmuşlardır. Ayırma tekniklerinden birisi olan bulanık c-ortalama kümeleme yöntemi kullanılarak üyelik fonksiyonu yapısı oluşturmuşlardır. Simülasyon sonuçlarının, önerilen algoritmanın arızanın nerede ve hangi hızda gerçekleştiğini, saniyenin onda birinden daha kısa sürede tespit edebildiği sonucuna varmışlardır.

Shi ve Lu (2020), makineyi durdurmadan SMSM'lerdeki sarım-sarım kısa devre arızalarının teşhis edilmesini amaçlayan bu çalışmalarında, derin öğrenmeye dayanan bir yöntem sunmuşlardır. İlk olarak kendi kendini kodlayan derin öğrenme ağ modeli kurmuşlardır. Farklı alanlardaki ortak özellikleri çıkartmak için negatif dizi akımını ve elektromanyetik torku kullanmışlardır. Daha sonra çevrimiçi algılama modeli oluşturmuşlardır. Son olarak motorun normal durumunun PE değeri, çevrimiçi verideki anormal dizilerin eşleştirme hızını artırmak amacıyla bir alarm eşiği oluşturmak için kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarda makaledeki yöntemin iyi tespit pratiğine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Vasilios (2020), bu çalışmada SMSM'lerde sarım-sarım kısa devre arızasının teşhisi üzerine odaklanmıştır. Arızalı SMSM'nin davranışını göz önünde bulundurarak, arıza tespiti için d-q eksen çerçevesinde bir matematiksel model geliştirmiş. Stator akısını kullanarak kayan mod gözlemcisine dayalı stator sargı arızasını tespit edebilen bir yöntem önermiştir. Arızasının tespit algoritmasının performansının değerlendirilmesinde, arızalı koşullarının varlığında manyetik doygunluğu dikkate almıştır. Simülasyon sonuçlarıyla, SMSM üzerindeki arıza etkisinin, makine çalışma koşulları hakkında çok önemli bilgiler sağlayarak yüksek doğrulukla tespit edildiğini doğrulamıştır.

Grasso ve ark., (2020), bu çalışmalarında SMSM'lerde sarım-sarım kısa devre arızasının tespiti için sensörsüz kontrol tekniklerinden birisi olan doğrudan akı kontrolü tekniğini kullanmışlardır. Doğrudan akı kontrol tekniğini, makinenin yıldız noktası voltajının ölçülmesi ile gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen ölçümler üzerindeki etkileri analitik ve sayısal yaklaşımlar ile incelemişlerdir. Analizleri hem makinenin indüktanslarının ortalama değerinin hem dalgalanmalardaki varyasyonları hem de makinenin karşılıklı indüktans gösterip göstermemesini dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen

sonuçlar doğrultusunda, önerilen yöntemin çevrim içi olarak arıza tanımlaması yapabildiğini göstermişlerdir.

Laamari ve ark., (2021), bu çalışmalarında SMSM'lerde sargı arızasını teşhis etmek ve izlemek için iki yöntem kullanmışlardır. Birinci yöntemde stator akımının ve elektromanyetik torkun frekans analizini kullanmışlardır. FFT kullanılarak yapılan analizde arızaların tespiti, temel frekans bileşeni etrafında ortaya çıkan yan bant bileşenlerini inceleyerek gerçekleştirmişlerdir. Durağan sinyal işlemede yaygın olarak kullanılan bu yöntem ile arızanın oluşma zamanını tahmin etmek imkânsız olduğunu belirtmişlerdir. Ayırık dalgacık dönüşümü analizine dayanan ikinci yöntem ile bu dezavantajın üstesinden gelmişlerdir. Simülasyon sonuçlarının FFT'ye kıyasla ayırık dalgacık dönüşümü yöntemiyle özellikle durağan olmayan durumlarda daha iyi doğruluk sağladığı ve daha verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Zhang ve Liu (2021), bu çalışmalarında SMSM'lerde sarım-sarım kısa devre arızasının teşhisi için sıfır dizi bileşenlerinde faz açısını kullanarak bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde arıza göstergesinin hesaplanabilir bir ifadesini hem hafif hem de şiddetli arıza durumları için yıldız bağlantılı SMSM'lerden türetmişlerdir. Türetilmiş ifade ile sarım-sarım kısa devre arızasının şiddeti ve konumunun tespitini sağlamışlardır.

Pietrzak ve Wolkiewicz (2021), bu makalelerinde SMSM'lerde stator sargı arızalarının tespiti ve sınıflandırılması için makine öğrenimi yaklaşımı olan DVM kullanımının etkinliğini ve doğruluğunu önermişlerdir. Önerilen tanı metodolojisi, stator faz akımının FFT dönüşümü ile arıza özelliklerinin çıkartılması ve arıza derecesinin sınıflandırılması için makine öğrenmesi yöntemi olan Doğrusal Kernel DVM'yi kullanmışlardır. Modeli, MATLAB ortamında İstatistik ve Makine Öğrenimi Araç Kutusu kullanılarak eğitmişlerdir. Test verileri 3.337s eğitim süresi ve %97 verimlilik ile %99.4 doğrulukta elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, önerilen çözümün etkinliğini doğrulamıştır.

Gurusamy ve ark., (2021), bu çalışmalarında stator sargı arızalarının teşhisi için kaçak manyetik akıyı kullandıkları bir yöntem önermişlerdir. Temel kaçak akı bileşeninin belirli çalışma koşullarında potansiyel olarak düşük performans gösterebileceğini göstermişlerdir. Bu eksikliği gidermek için kaçak manyetik akının üçüncü harmonik

bileşenini kapsamlı bir şekilde analiz etmişlerdir. Yöntemin sağlamlığını, farklı arıza şiddeti senaryolarıyla da doğrulamışlardır.

Dai ve ark., (2021), bu çalışmalarında SMSM’lerde sargı arızasının sınıflandırılması için bir yöntem önermişlerdir. Stator akım sinyalinin değişken modal ayrıştırma yöntemini kullanarak İMF’lerine ayırmışlardır. Daha sonra her bir İMF’nin enerji değerini hesaplayarak özellik vektörü oluşturmuşlardır. Olasılık sinir ağı kullanarak sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir. Olasılık sinir ağında model katmanlarının karmaşıklığının çok yüksek olmasından dolayı olasılık sinir ağının yapısını optimize etmek için bulanık c-ortalama kümeleme algoritması kullanmışlardır. Deneysel doğrulama için SEY ile simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin arıza teşhis doğruluğunu %95 olarak bulmuşlardır.

Khamari ve ark., (2021), bu çalışmalarında, Doğrusal parametreleri değişen gözlemci tabanlı SMSM’ler sargı arızası teşhisi yöntemi sunmuşlardır. Stator direnci politopik modellemeye hesaba katılmıştır. Önerilen doğrusal parametreleri değişen gözlemcisinin kararlılık koşullarını, Lyapunov ikinci dereceden kararlılık teorisini kullanarak türetmişlerdir ve Lyapunov ikinci dereceden dışbükey optimizasyon problemi olarak ifade etmişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliği hem pertürbasyonlara hem de parametre varyasyonlarına karşı sağlam kalıntı üretimi ile kısa devre arızasının tespiti gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarıyla, SMSM’lerdeki kısa devre arızasını tespit etmek için önerilen yaklaşımın performansını, sağlamlığını ve etkinliğini göstermişlerdir.

Li ve ark., (2021), bu çalışmalarında SMSM’ler için sarım-sarım kısa devre arızasını tespit etmek için çekişmeli üretici ağ ve optimize edilmiş seyrek otomatik kodlayıcıya dayalı verimli ve doğru bir yöntem önermişlerdir. Arızanın teşhisi için arıza bilgisini taşıyan elektromanyetik torkun özelliklerini kullanmışlardır. Geleneksel yöntemler kullanarak da arıza tespiti gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilen yöntemle geleneksel yöntemlerden daha yüksek başarı elde edildiğini göstermişlerdir.

Lennartsson (2021), bu tez çalışmasında SMSM’ler için stator sargılarında meydana gelen kısa devre arızalarının erken teşhisi üzerine çalışmıştır. SMSM modelini simüle etmiş ve akım verisini toplamıştır. Akım verisini kullanarak çeşitli makine öğrenmesi

yöntemleri ile arıza teşhisi gerçekleştirmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarını kıyasladığında en yüksek performansı karar ağacı metodu ile elde ettiğini göstermiştir.

Hang ve ark., (2022), bu çalışmalarında SMSM’lerde stator sargı kısa devre arızasının varlığını ve konumunu tespit etmek için voltaj bozulmasına dayalı bir yöntem önermişlerdir. SMSM’nin sağlam ve arızalı koşulları için matematiksel model sunmuşlardır. Matematiksel modele göre, kısa devreden kaynaklanan gerilim bozulmalarını Luenberger gözlemcisi aracılığıyla tahmin etmişlerdir. Kısa devre arızasının tespiti için bir arıza karakteristik sinyali oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu arıza karakteristik sinyalinin ikinci harmonik bileşenini seçerek etkili bir arıza teşhisi sağlamışlardır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar doğrultusunda önerilen yöntemin dönüş hızı değişimlerinde dahi iyi bir sonuç verdiğini ve ek bir donanım gerektirmediğini belirtmişlerdir.

Huangfu ve ark., (2022), yaptıkları bu bildiride bir elektromekanik aktüatörlerdeki SMSM’nin sarım-sarım kısa devre arızası analiz etmişler ve VGG16 evrimsel sinir ağı ile transfer öğrenmeye dayalı bir arıza teşhis yöntemi sunmuşlardır. Öncelikle ANSOFT Maxwell’de SMSM’nin kısa devre arızasının iki boyutlu SEY modelini kurmuşlardır ve ardından simülasyon deney analizini gerçekleştirmişlerdir. Arıza karakteristik sinyali olarak üç fazlı akım sinyalini tercih etmişlerdir. Daha sonra VGG16 derin evrimsel sinir ağı ile transfer öğrenmeyi temel alan bir arıza teşhis yöntemi tasarlamışlardır. Deneysel sonuçlarla, transfer öğrenmeye dayalı önerilen evrimsel ağ modelinin arızaları etkili ve doğru bir şekilde tanımlayabildiğini göstermişlerdir.

Huang ve ark., (2022), bu çalışmalarında SMSM’ler için abc çatı çerçevesinde tanımlanan faz anlık reaktif güçlerindeki ikinci harmoniklerin yüzdesine dayalı olarak stator sargılarındaki sarım-sarım kısa devre arızasını algılama yöntemi sunmuşlardır. Stator kısa devre arızasının faz anlık reaktif gücündeki etkisini öncelikle teorik olarak analiz etmişlerdir. MATLAB/Simulink’de simülasyon çalışmaları yapmışlardır ve faz anlık reaktif güç özelliğinin kısa devre arıza teşhisinde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliğini, farklı çalışma koşulları altında hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar sonucunda göstermişlerdir.

Wei ve ark., (2022), bu çalışmalarında SMSM’lerde stator kısa devre arızasının gerçek zamanlı izlenmesi için hız/tork değişimine dayanıklı ve makine parametrelerinden ve ekstra sensörlerden bağımsız bir yöntem önermişlerdir. Arıza şiddetini, d-q çerçevesindeki akımların ikinci harmonik bileşeni ile tanımlamışlardır. İkinci harmonik bileşenini arıza göstergesi olarak kullanılması için Adaline tabanlı harmonik çıkarma yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemin performansını deneysel olarak değerlendirmişlerdir ve sonuçlar doğrultusunda arıza tespitinde başarılı bir yöntem olduğunu göstermişlerdir.

Pietrzak ve Wolkiewicz (2022), bu makalelerinde SMSM stator sargı arızası teşhisi için iki sinyal işleme yöntemi kullanmışlardır. Sinyal işleme yöntemi olarak yaygın olarak kullanılan FFT yöntemi ve SMSM arızalarının tespiti için daha önce kullanılmamış olan bispektrum analizini kullanmışlardır. Analizi stator faz akım sinyali, stator faz akım zarfı ve stator faz akım uzay vektör modülü kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Sunulan deneysel araştırma sonuçları doğrultusunda, stator faz akımı, stator faz akım zarfı ve stator faz akımı uzay vektör modülünün bispektrum analizinin SMSM’lerde stator sargı arıza göstergesi çıkarımında kullanılmasının etkinliğini doğrulamışlardır. Bispektrum analizi, FFT analizinden farklı olarak, analiz edilen sinyallerin her biri için birden fazla karakteristik arıza bileşeni çıkarmıştır.

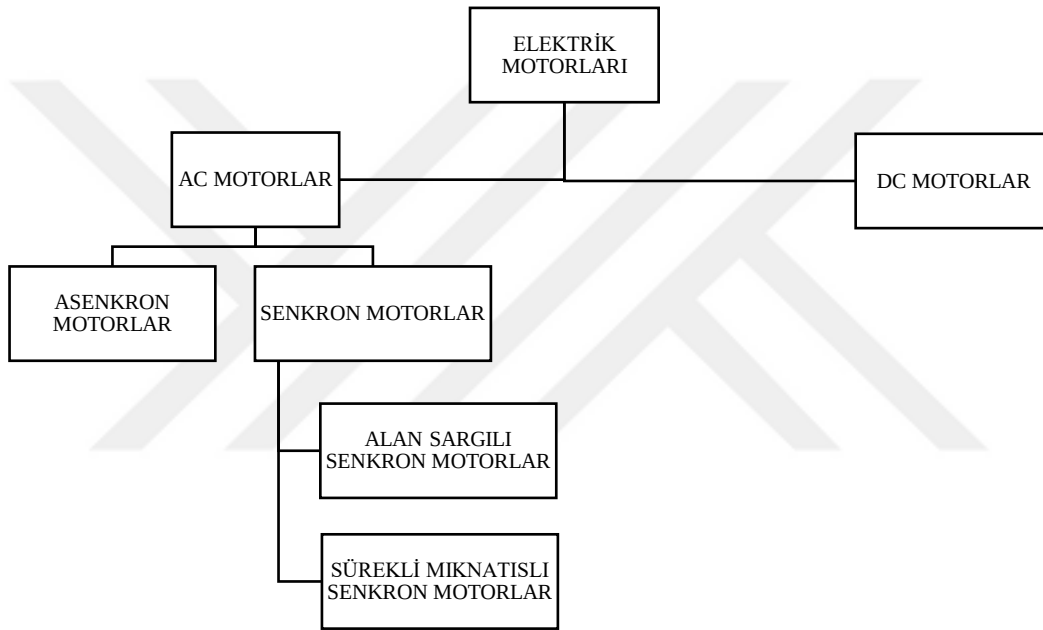
Shih ve ark., (2022), bu çalışmalarında stator kısa devre arızasının tespiti için SMSM’den toplanan deneysel verilerle tanı modelini eğitmek amacıyla DVM ve evrişimli sinir ağını kullanmışlardır. DVM’nin eğitim modeli için motorun akım ve gerilim sinyalleri d-q çerçevesinde alınarak özellik olarak kullanmışlardır. Her iki yöntem ile de %99 başarı elde etmişlerdir. Evrişimli sinir ağı yöntemini ön özellik çıkarma işlemine gerek olmadığını ve yüksek başarıyla teşhis gerçekleştirdiğini göstermişlerdir. Ancak DVM yöntemi ile daha az veri kullanılarak aynı başarıların elde edildiğini göstermişlerdir. Yetersiz veri olması durumunda Evrişimli sinir ağına DVM’den daha düşük başarılar elde ettiği dolayısıyla veri toplamanın kolay olmadığı çalışmalarda DVM’nin tercih edilmesini tavsiye etmişlerdir.

Yapılan literatür araştırması incelendiğinde SMSM’lerde akı verisi kullanılarak CEEMDAN tabanlı bir araştırma yapılmadığı görülmektedir.

### 3. MATERYAL YÖNTEM

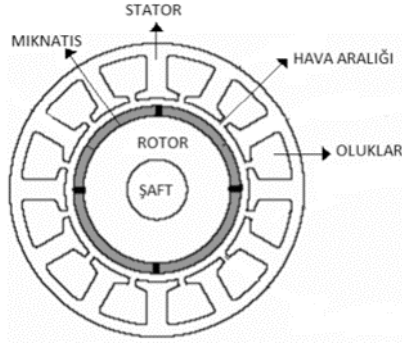
#### 3.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM)

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren cihazlardır. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, elektrik motorları temel olarak, alternatif akımla (AC) çalışan elektrik motorları ve doğru akımla (DC) çalışan elektrik motorları olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.



Şekil 3.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

AC motorlar ise asenkron motorlar ve senkron motorlar olarak gruplandırılmaktadır. Asenkron motorlarda rotor, döner manyetik alan devrinden bir miktar yavaş döner. Senkron motorlar ise, kaynak frekansına ve motorun kutup sayısına bağlı olarak her zaman senkron hızda çalışan motorlardır. Senkron motorların statorlarındaki sargılar alternatif akım ile rotorlarındaki uyarma sargıları ise doğru akım ile beslenmektedir (Teker, 2008). Mıknatıs teknolojisinin ilerlemesiyle senkron motorlarda rotor manyetik alanı, rotora yerleştirilen kalıcı mıknatıslarla sağlanarak ikinci kaynağa olan ihtiyaç giderilmiş ve böylece SMSM’ler elde edilmiştir (Özçira, 2007). Şekil 3.2’de SMSM’nin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2. Sürekli mıknatıslı senkron motorun yapısı (Fidan, 2019)

Her elektrik motorunda olduğu gibi SMSM’lerde stator ve rotor adı verilen iki ana parçadan oluşmaktadır.

### 3.1.1. Stator

Elektrik motorlarının dış gövdesini oluşturan, sabit yani dönmeyen kısmı stator olarak adlandırılır. Stator, nüve ve izoleli bakır tellerden meydana gelen sargılardan oluşmaktadır.

Stator nüvesi, üzerine oluklar açılmış ve silisyum ile kaplanmış 0.4-0.5 mm kalınlığındaki saçların preslenmesiyle meydana gelir ve motor gövdesinin iç kısmına monte edilir (Doğan, 2012). Stator sargıları ise aralarında 120°’lik faz farkı bulunan üç bobin grubu oluşturacak biçimde sarılır. Şebeke gerilimi uygulandığında bu bobin gruplarının her biri bir faza ait olur (Coşkun & Korkmaz, 2007). Bu sayede elektrik motorunun çalışması için gerekli olan manyeto motor kuvveti sağlanır.

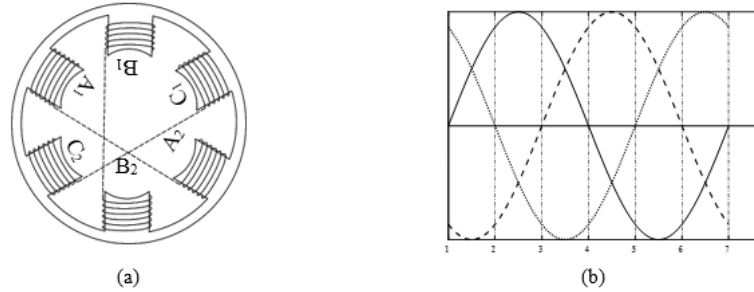
### 3.1.2. Rotor

Rotor, motorun dönen bölümünü tanımlamaktadır ve mil üzerine konumlandırılır. Statorda oluşan manyeto motor kuvvetinden elde ettiği manyetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirir. Mıknatıslar rotorun yüzeyine veya içine yerleştirilir. Rotor, üzerine yerleştirilen sabit mıknatıslar sayesinde N-S kutuplu bir çubuk görevi görür.

### 3.1.3. Sürekli mıknatıslı senkron motorların çalışma prensibi

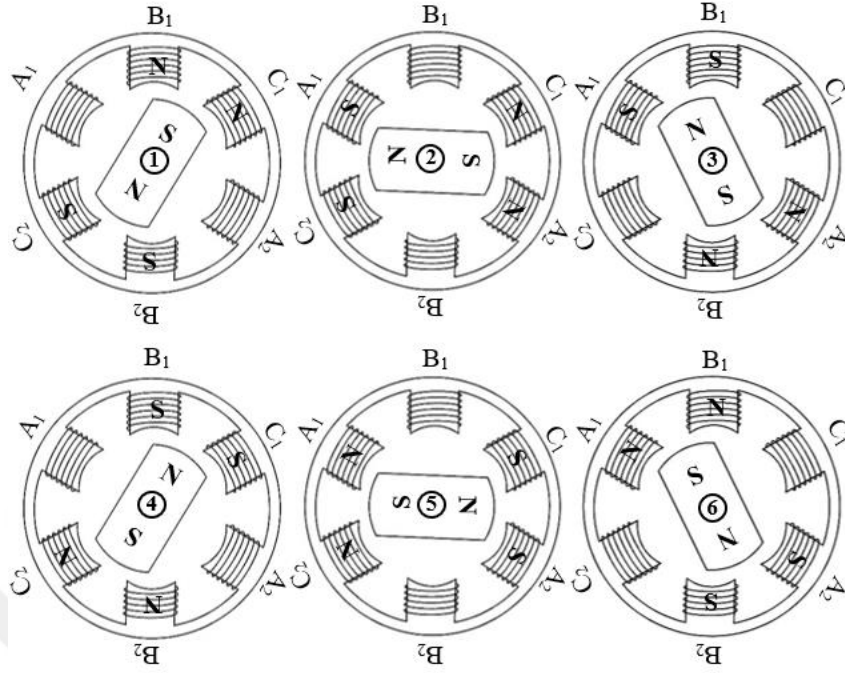
SMSM'lerin stator sargıları uygun voltaj ve frekans ile beslenir. Aynı genişlikteki sinüs akımları her bir sargı fazından geçmektedir. Fazlar arasındaki açı  $120^0$ 'dir. Bu sayede statorun hava boşlukları arasında dönen bir manyetik alan oluşur. Rotor üzerine yerleştirilen mıknatıslardan dolayı, rotor kutupları sabittir, ancak statorda meydana gelen manyetik alan sayesinde tork meydana gelir ve rotor hızı döner manyetik alan yönünde ivmelenir.

Şekil 3.3.a'da altı kutuplu bir statorun bağlantısı verilmiştir ve Şekil 3.3.b'de uygulanan gerilim gösterilmiştir. Üç fazlı güç kaynağının her bir fazı zıt kutuplara bağlanır ve ilgili bobinler aynı yönde sarılır. Bir elektromıknatısın kutuplarının polaritesi, bobinden geçen akımın yönü ile belirlenir. Bu nedenle, iki zıt stator elektromıknatısı aynı yönde sarılırsa, birbirine bakan kutupların polaritesi zıt olmalıdır. Yani  $A_1$  kutbu  $N$  olduğunda,  $A_2$  kutbu  $S$ ,  $B_1$  kutbu  $N$  olduğunda,  $B_2$  kutbu  $S$  ve  $C_1$  kutbu  $N$  olduğunda,  $C_2$  kutbu  $S$  kutbu olmaktadır.



Şekil 3.3. (a) Stator bağlantısı (b) Uygulanan gerilim grafiği

Şekil 3.4'de SMSM'nin stator ve rotorunda oluşan manyetik alanın adımları gösterilmiştir. Statorun altı manyetik kutbu ve rotorun iki manyetik kutbu vardır.



Şekil 3.4. Motor manyetik alanının dönme adımları

Şekil 3.3.b’de gösterilen 1 zamanında uygulanmış olan gerilim sebebiyle  $B$  fazından geçen akım pozitifdir. Dolayısıyla  $B_1$  kutbu  $N$  ve  $B_2$  kutbu  $S$  polaritededir.  $C$  fazından geçen akım ise negatiftir.  $C_1$  kutbu  $N$  ve  $C_2$  kutbu ise  $S$  polaritededir.  $A$  fazından akım sıfır olduğu için kutuplar manyetize olmaz. Şekil 3.4’de verilmiş olan 1 numaralı şekil 1 zamanındaki manyetik kutuplanmayı göstermektedir.

2. zamanda, fazlar 60 derece kaymıştır, bu da  $C_1$  ve  $A_2$  kutuplarını  $N$  kutbu,  $C_2$  ve  $A_1$  kutuplarını ise  $S$  kutbu yapar. Böylece, fazlardaki akım değiştikçe ortaya çıkan  $N$  ve  $S$  kutupları hareket eder ve stator etrafında saat yönünde dönen bir manyetik alan oluşturur. Rotor, dönen manyetik alan tarafından çekilen bir çubuk mıknatıs gibi davranır.

3. zamanda, statorun  $A_2$  ve  $B_2$  kutupları  $N$  kutbu ve  $A_1$  ve  $B_1$  kutupları  $S$  kutbu olur. Rotorun  $S$  kutbu statorun iki  $N$  kutbu tarafından çekilir ve statorun iki  $S$  kutbu rotorun  $N$  kutbunu çeker.

4. zamanda, statorun kutuplarının polaritesi değişir, böylece  $C_2$  ve  $B_2$  kutupları  $N$  kutbunu,  $C_1$  ve  $B_1$  kutupları ise  $S$  kutbunu oluşturur. Daha sonra rotor, gösterildiği gibi stator kutuplarıyla aynı hizaya gelmek için  $60^\circ$  dönmeye zorlanır.

5. zamanda  $A_1$  ve  $C_2$  kutupları  $N$  kutbunu oluştururken  $A_2$  ve  $C_1$  kutupları  $S$  kutbunu oluşturur.

6. zamanda ise  $A_1$  ve  $B_1$  kutupları  $N$  kutbunu,  $A_1$  ve  $C_2$  kutupları ise  $S$  kutbunu meydana getirir. Her değişiklik yapıldığında stator üzerindeki zıt kutuplar rotorun kutuplarını çeker. Böylece statorun manyetik alanı döndükçe rotorda statorla birlikte dönmeye zorlanır (Anonim, 2021).

#### **3.1.4. Sürekli mıknatıslı senkron motorların avantajları ve dezavantajları**

SMSM'lerin yapısı basittir. Rotordaki manyetik alan mıknatıs ile üretildiği için diğer motorlardaki gibi rotorda sargı kullanılmamaktadır ve buda harici uyartım devresi gereksinimi ortadan kaldırır. Bunun yanı sıra rotorda sargı olmaması bakır kayıplarını ve ısınmayı azaltmaktadır. Dolayısıyla diğer motorlara göre yüksek verimlidir. Fırça ve kolektör bulunmadığı için motorda kıvılcım sorunu olmaz ve patlayıcı alanlarda kullanılması güvenlidir. Fırça ve kolektör olmaması bakım, işletme ve maliyet kayıplarını azaltır. Asenkron motorlara göre daha yüksek moment yoğunluğu sağlamaktadır. Yani SMSM'ler aynı gücü sağlayacak bir asenkron motora göre daha küçük boyutlara ve ağırlığa sahiptir. Geniş sınırlar içinde hız kontrolü sağlanabilir. Asenkron motorlara göre güç faktörü yüksektir (Fidanboy, 2011; Zheng ve ark., 2020; Shanthi, 2021).

SMSM'lerin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Rotor pozisyonunun algılanabilmesi için konum sensörleri gereklidir. Harici bir konum sensörü gerektirmesi hem maliyeti artırır hem de motorun kontrolünü karmaşıktırır (Fidanboy, 2011). Rotorda kullanılan mıknatısın, uygun seçilmemesi durumunda zamanla mıknatıslığını kaybedebilir (Teker, 2008).

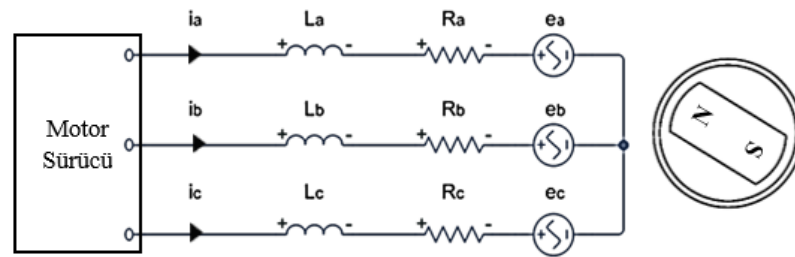
#### **3.1.5. Sürekli mıknatıslı senkron motorların kullanım alanları**

SMSM'lerin özellikle güç yoğunluğu, verimlilik, kompakt yapıya sahip olması gibi özelliklerinden dolayı kullanım yelpazesi oldukça geniştir. Endüstriyel uygulamalarda SMSM'lerin kullanım alanları, endüstriyel tahrikler (pompalar, fanlar, kompresörler vb.), otomasyon sistemleri, endüstriyel robotlar ve dâhili taşıma sistemleridir. Otomobillerde, yol verme motorlarında, silecek motorlarında, cam açma motorlarında, klima

motorlarında, bagaj kapısı motorlarında, kapı kilitleme sistemlerinde, fan motorlarında SMSM kullanılmaktadır. Asansörler ve yürüyen merdivenlerde, yürüyen bantlarda, hafif metrolar ve tramvaylarda, uçuş kontrol ve kumandasında, elektrikli gemi ve botlarda da SMSM'ler sıklıkla tercih edilmektedir. Savunma sanayisinde, tanklarda, füze sistemlerinde, radar sistemlerinde, denizaltılarında, roketlerde, uzay araçlarında ve uydularda SMSM'lerin kullanım alanlarıdır. SMSM'lerin biyomedikal alanda kullanımı ise, dişilik araçlarında, elektrikli tekerli sandalyelerde, yapay kalp motorlarıdır. İklimlendirme sistemleri, bozuk para ile çalışan otomatlar, ATM'ler, havalandırma sistemleri, barkod okuyucular, elektrikli süpürgeler, buzdolapları, mikrodalga fırınlar, mikserler, bulaşık, çamaşır ve kurutma makineleri gibi günlük hayatta kullandığımız birçok cihazda da SMSM kullanılmaktadır (Ayçiçek, 2012).

### 3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Matematiksel Modeli

SMSM'nin elektrik devre modeli Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. SMSM elektriksel eşdeğer devresi

SMSM matematiksel modeli Eşitlik 3.1'de matris formunda verilmiştir (Doğan, 2009).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada üç faz voltajları,  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  ile, her bir fazın omik dirençleri,  $R_a$ ,  $R_b$  ve  $R_c$  ile, üç faz akımları  $i_a$ ,  $i_b$  ve  $i_c$  ile, her bir fazın öz indüktansı,  $L_a$ ,  $L_b$  ve  $L_c$  ile, faz sargıları arasındaki ortak indüktanslar,  $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$ ,  $L_{ba}$ ,  $L_{bc}$ ,  $L_{ca}$  ve  $L_{cb}$  ile, her bir sargıda meydana gelen zıt EMK'lar,  $e_a$ ,  $e_b$  ve  $e_c$  ile verilmiştir.

Zıt EMK denklemleri Eşitlik 3.2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{SM,a} \\ \lambda_{SM,b} \\ \lambda_{SM,c} \end{bmatrix} = \omega_e \cdot \lambda_{SM} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Burada,  $\lambda_{SM,a}$ ,  $\lambda_{SM,b}$  ve  $\lambda_{SM,c}$  her bir fazda meydana gelen sürekli mıknatısların meydana getirdiği akı ifadeleridir.  $\omega_e$ , rotorun elektriksel hızını ve  $\theta_e$ , rotorun elektriksel pozisyonunu ifade etmektedir.

Sağlam bir motorda her bir fazdaki spir sayıları eşittir. Dolayısıyla sargılar dengeli bir şekilde yüklenir ve stator sargı dirençleri, öz indüktansları, ortak indüktansları birbirlerine eşittir. Bu değişkenler,  $R_a = R_b = R_c = R$ ,  $L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M$  ve  $L_a = L_b = L_c = L$  şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikler kullanılarak ve Eşitlik 3.2'den faydalanılarak Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.3'de verildiği gibi ifade edilebilir.

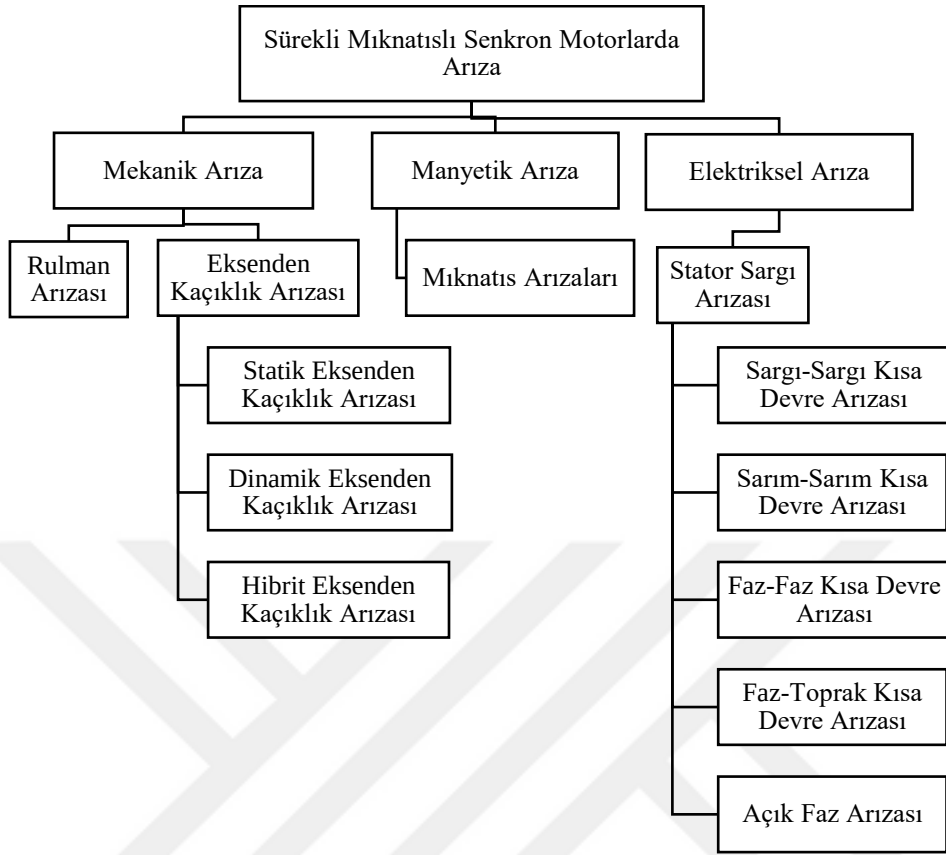
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_e \cdot \lambda_{SM} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Sadece temel sinyaller dikkate alınarak makine hava boşluğunda üretilen tork  $T_e$  ile ifade edilmektedir ve matematiksel formülü Eşitlik 3.4'de verilmiştir (Gördük, 2019).

$$T_e = \frac{i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c}{\omega_e} \quad (3.4)$$

### 3.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Arızaların Sınıflandırılması

SMSM'lerde arızalar, manyetik arıza, mekanik arıza ve elektriksel arıza olmak üzere üç sınıfta incelenir. Arıza sınıflandırılmasının şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.

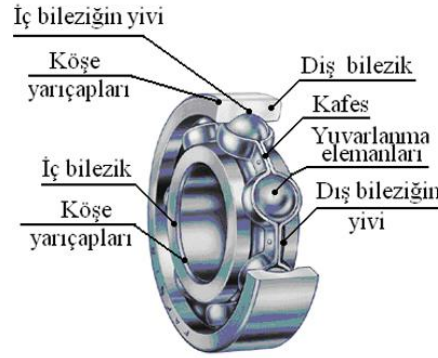


Şekil 3.6. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda arızaların sınıflandırılması

### 3.3.1. Mekanik arızalar

Motorun rulman, mil gibi mekanik aksanlarında meydana gelen arızalar mekanik arızalardır. Şekil 3.6’da gösterildiği gibi, mekanik arızalar rulman arızası ve eksenden kaçıklık arızası olmak üzere iki başlıkta sınıflandırılmaktadır.

Rulman Arızaları: Rulman, elektrik motorlarında dönme hareketini sağlayan makine elemanlarından biridir. Şekil 3.7’de bir rulmanın temel parçaları gösterilmektedir. Dış bilezik, iç bilezik, bilezikler arasında konumlandırılmış yuvarlanan elemanlar ve yuvarlanan elemanları tutan kafesin birleşmesi ile meydana gelen rulman, dönen parçaların dönme hareketini minimum sürtünme ile yapmasını sağlar. Rulman arızaları üretim hatası, yanlış montajlama, az veya çok yağlama, kötü çalışma ortamı, aşırı yük ve yüksek hızda uzun süre çalışma gibi faktörlerden dolayı meydana gelebilir. Bunların yanı sıra motorda meydana gelmiş eksenden kaçıklık arızasının ilerlemesi durumunda da rulmanlarda arıza oluşabilmektedir (Sönmez, 2013; Yücel, 2018; Orhan, 2002).



Şekil 3.7. Rulman kesiti (Bakşiyev ve Selçuk, 2017)

**Eksenden Kaçıklık Arızası:** Stator ve rotor arasındaki hava boşluğunun eşit olmaması durumunda meydana gelen arıza, eksenden kaçıklık arızası olarak adlandırılmaktadır. Sağlam bir motorda hava boşluğunun eşit olması gerekmektedir. Motor tasarımı yapılırken, motorun verimi artırmak için hava boşluğu az bırakılmaktadır. Dolayısıyla hava boşluğunda oluşabilecek küçük kaymalar bile büyük etkiler oluşturmaktadır (Özelgin, 2006). Üretici firmalar tarafından verilen tolerans oranı %5'dir (İnengenç ve ark., 2014). Eksenden kaçıklık arızası statik eksenden kaçıklık, dinamik eksenden kaçıklık ve hibrit eksenden kaçıklık olmak üzere üç grupta incelenmektedir. Statik eksenden kaçıklık arızası, dönme ekseninin rotor ekseni ile çakıştığı ancak stator ekseninde yer değiştirdiği arıza tipidir. Arızanın oluşmasındaki ana sebepler, statorun çekirdeğinin ovalliği, rotor veya statorun üretim aşamasında yanlış konumlandırılması ve yatakların aşınması olabilir. Dinamik eksenden kaçıklık arızası, dönme ekseninin stator ekseni ile çakıştığı ancak rotor ekseni ile çakışmadığı arıza tipidir. Rotor milinde meydana gelen eğilme, rulmanların aşınması gibi sebeplerden dolayı dinamik eksenden kaçıklık arızası oluşmaktadır. Hibrit eksenden kaçıklık arızasında ise, dönme ekseni hem stator ekseniyle hem de rotor ekseniyle çakışmamaktadır (Ünsal & Güçlü, 2019; Faiz & Moosavi, 2016).

### 3.3.2. Manyetik arızalar

**Mıknatıs Arızaları:** Yüksek performanslı uygulamalarda, rotor mıknatısları genellikle Samaryum-Kobalt (SmCo) ve Neodimiyum – Bor Demiri (NdFeB) gibi sinterlenmiş malzemelerden yapılmaktadır. Bu tür malzemelerin çatlaması, kırılması ve yüksek nemden kaynaklı aşınması kolaydır. Montaj esnasında meydana gelebilecek küçük

çatlaklar, motor yüksek hızlarda çalıştığında parçalanmaya neden olabilir. Motora uygulanan doğrudan bir darbe de mıknatlara zarar vererek demanyetizasyon arızasına sebep olabilir. Mıknatıs arızasına sebep olan bir diğer faktör ise çevre kirliliğidir. Toz, tuz, soğutma yağları vb. farklı türde kirleticilere maruz kalan mıknatlarda parçalanma meydana gelebilir (Moosavi ve ark., 2015a). Kalıcı mıknatlarda meydana gelen çatlaklar veya parçalanmalar nedeni ile manyetik dengesizlik oluşur. Bunların yanı sıra endüvi reaksiyonu, stator sargılarından akan akımların oluşturduğu manyetik alanlar, stator sargı arızası nedeniyle motorun ısınması gibi sebeplerden dolayı mıknatlarda kısmi demanyetizasyon meydana gelebilir (Eker, 2013). Mıknatlarda meydana gelen manyetik dengesizlik veya kısmi demanyetizasyon sonucunda gürültü ve titreşim meydana gelir, hava aralığı manyetik akı dağılımı, güç faktörü ve elektromanyetik tork olumsuz yönde etkilenir, motor verimliliği azalır (Rosero ve ark., 2006; Farooq ve ark., 2008; Liu ve ark., 2020; Eker, 2013).

### **3.3.3. Elektriksel arızalar**

Stator Sargı Arızası: Elektrik motorlarında stator sargı arızaları, stator sargıları üzerindeki yalıtımın zamanla azalmasından, zorlu çalışma koşullarından, rotorda oluşan arıza sebebiyle rotorun statora sürtünmesinden veya çeşitli farklı sorunlar sebebiyle meydana gelmektedir. Bu arızaların başlangıcı motora hemen zarar vermese de teşhis edilmediği takdirde motorda ciddi hasarların meydana gelmesine sebep olur (Başaran, 2016; Tetik, 2019). Stator sargı arızalarının oluşma nedenleri termal, elektriksel, mekaniksel ve çevresel zorlanmalar olmak üzere 4 sınıfa ayrılmaktadır.

*Termal Zorlanmalar:* Sargılarda sıcaklık artışından kaynaklanan termal zorlanmalar, sargıların ömrünü azaltır ve yalıtımına zarar verir. Yalıtım sıcaklığının izin verilen maksimum değerinden her 10 °C'lik artış gerçekleştiğinde yalıtımın ömrü yarıya düşmektedir. Termal zorlanmaların başlamasına veya artmasına neden olan faktörler, aşırı voltaj, üç fazlı voltajlarda dengesizlik meydana gelmesi, motoru sık başlatma ve durdurma, aşırı yük ve ortam sıcaklığı (Ojaghi ve ark., 2014).

Aşırı Voltaj: Voltaj genliği arttırıldığında, makinenin meydana getirdiği akı genliği artmaktadır. Bu yüzden daha yüksek çekirdek kayıpları ve ısınma oluşur (Ojaghi ve ark., 2014).

Üç Fazlı Voltajlarda Dengesizlik: Şebeke voltajında meydana gelen dengesizlik, motorun o esnada en yüksek akım geçen fazında yüksek bir sıcaklığa neden olur ve termal zorlanma oluşur (Doğan, 2012).

Sık Başlatma ve Durdurma: Motor ilk kalkışta normal akımının beş ile sekiz kat fazlasını çeker. Motor kısa süre içerisinde sürekli başlatılıp kapatılmaya maruz bırakıldığında sargı sıcaklı hızlı bir şekilde artar (Siddique ve ark., 2005).

Aşırı Yük: Motor sargılarındaki sıcaklık artışı yaklaşık olarak motor sargı yükünün karesiyle orantılıdır. Dolayısıyla motor sargısındaki yük arttığında termal zorlanma oluşur (Eser, 2018).

Ortam Sıcaklığı: Motorlar çalışabilecekleri maksimum ortam sıcaklığına göre tasarlanır. Bu değerin üzerindeki sıcaklık motorunda ısınmasına neden olur ve termal zorlanmaya yol açar (Ojaghi ve ark., 2014).

Elektriksel Zorlanmalar: Elektriksel zorlanma, sargılar üzerindeki yalıtımın bölgesel olarak zarar görmesine veya yalıtım ömrünün azalmasına dolayısıyla sargıların arızalanmasına yol açar. Elektriksel zorlanma, yalıtım tahribatı veya anlık aşırı gerilimden kaynaklanmaktadır (Ojaghi ve ark., 2014).

Yalıtım Tahribatı: Gerilimi 600V'un üzerinde olan motorlarda, yalıtım sistemi çevreye karşı tam olarak korunmadığı durumlarda meydana gelir (Doğan, 2012). Bu işlemde sargı ile serbest ortam arasında kaçak akımların olduğu küçük boşluklar meydana gelir. Nem ve/veya diğer malzemelerden dolayı sargı ve toprak arasındaki empedans azalır. Empedans azalmasından dolayı kısmi elektrik deşarjları olur ve elektrik yalıtımında yanık noktalar oluşarak yalıtım zarar görür (Ojaghi ve ark., 2014).

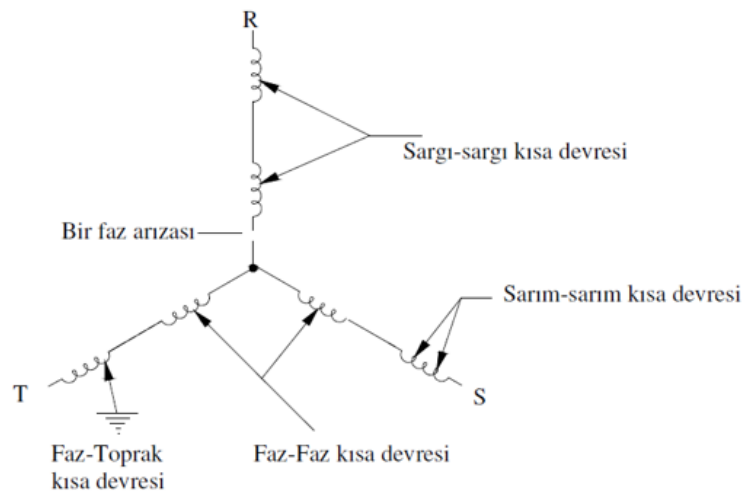
Anlık Aşırı Gerilim: Elektrik şebekesinin fazlarında, bazen çok kısa bir yükselme süresi ile anma geriliminin 3.5 katına kadar aşırı gerilimler olabilir. Bu tür aşırı gerilim motor sargılarına ulaşırsa yalıtıma zarar verir. Bu durum devre kesicilerinin açılıp kapanmasından, akım sınırlayıcı sigortalardan, kısa sürede sık başlatma ve durdurmadan ve değişken frekanslı sürücülerden dolayı oluşmaktadır (Siddique ve ark., 2005).

**Mekaniksel Zorlanmalar:** Bu zorlanmalar, bobin hareketi ve rotorun statora çarpmasından kaynaklanabilir. Rotor, yatak arızaları, mil sapması, rotor-stator hizasızlığı vb. nedenlerden dolayı statora çarpabilir. Çarpma motorun kalkış esnasında meydana gelirse, rotorun kuvveti stator yalıtımının delinmesine neden olur ve stator sargısı ve toprak arasındaki elektriksel deşarj meydana gelebilir. Motor tam hızda çalışırken rotor statora çarparsa, stator ve rotorun temas ettiği noktada aşırı ısınma meydana gelerek stator sargısı ve toprak arasında elektriksel deşarj meydana gelir. Rotor balansının gevşeyip statora çarpması, rotor fan kanatlarının gevşeyip statora çarpması, havalandırma sisteminden motora giren yabancı partiküllerin statora çarpması gibi mekaniksel sorunlar sargı arızasına yol açabilir (Kumar ve ark., 2010).

**Çevresel Zorlanmalar:** Çevresel zorlanmalar, yabancı maddelerin varlığından kaynaklanmaktadır. Toz, nem veya kimyasallar motorun stator yalıtımının bozulmasına ve/veya erken rulman arızalarına neden olur. Motorun çalıştığı ortamda çevre koşullarına dikkat edilmeli ve motor toz, nem ve kimyasal maddelerden korunmalıdır (Eser, 2018; Kumar ve ark., 2010).

### 3.3.4. Sabit mıknatıslı senkron motorlarda stator sargı arızaları ve etkileri

Stator sargı arızaları Şekil 3.6’de belirtildiği ve Şekil 3.8’de gösterildiği gibi beş sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar, sargı-sargı arızası, sarım-sarım arızası, faz-faz arızası, faz-toprak arızası ve bir faz arızasıdır.



Şekil 3.8. Sargı arızalarının sınıflandırılması (Doğan, 2012)

Bir faz sargısının, aynı fazdaki diğer sargılardan biriyle kısa devre olması sonucunda meydana gelen arızalar sargı-sargı arızası olarak adlandırılır. Sarım-sarım arızası, bir faz sargısındaki iki veya daha fazla turun kısa devre olması sonucunda oluşan arızadır. Bir fazdaki sargının, başka bir fazdaki sargıyla kısa devre olmasıyla meydana gelen arızalar faz-faz arızası olarak isimlendirilmektedir. Açık faz arızası, bir fazın açık devre olması sonucu oluşan arızadır. Faz-faz kısa devresi ise, iki farklı faz arasındaki sarımlarda meydana gelen arızadır (Doğan, 2012). Stator da meydana gelen kısa devrelerin şema üzerinde gösterimi Şekil 3.8’de verilmektedir.

Stator fazlarında kısa devre arızasının oluşması, makine akısı üzerinde üç ana etkiye yol açar. Birinci etki, arızalı faz sargısı daha az Manyeto Motor Kuvveti (MMK) üretmesidir. Ayrıca kısa devreler sızıntı akısının artmasına neden olur. Dolayısıyla kısa devrenin meydana geldiği noktanın yakınında akı yoğunluğunda değişim gözlemlenir. İkinci etkisi, kısa devre olan spirleri bulundukları sargının zıt bir fazında kendi MMK’larını oluşturmasıdır. Dolayısıyla kısa devreli sargıda indüklenen akım, ana hava aralığı akısının oluşmasına zorlayıcı bir etki oluşturur ve arızalı bobinin sarım eksenini boyunca karşılık gelen ana akıyı azaltır. Üçüncüsü, kısa devrelerden geçen akım ısıyı artırır ve yalıtımı daha da bozabilir. Dönüşler arası kısa devrelerin ciddi sonuçları arasında, stator simetrisinin kaybı, stator akımlarında üçüncü harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına ve ayrıca tamsayı harmoniklerinde genlik değişikliğine yol açar (Betancourt., 2012).

#### 4. ARIZA TEŞHİSİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Motorların durum izlemesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Motorun akım (Moosavi ve ark., 2015b; Refaat ve ark., 2013), akı (Da & Krishnamurthy, 2010; Grasso ve ark., 2020,), gerilim (Obeid ve ark., 2017; Li ve ark., 2018), tork (Fitouri ve ark., 2016), titreşim (Liang ve ark., 2018) vb. sinyallerinden faydalanılarak motor durumum izlenmesi sağlanmaktadır. Motor durumunun değerlendirilebilmesi için motordan alınan sinyallere mühendislik yaklaşımı olan sinyal işleme tekniği uygulanmaktadır. Elektrik makinelerinde arıza tespiti için kullanılan sinyal işleme yöntemleri zaman boyutunda analiz, frekans boyutunda analiz, zaman-frekans boyutunda analiz, model tabanlı yaklaşımlar ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar vb. yöntemlerdir.

Zaman boyutu analizi, elektrik makinelerinden alınan sinyallerin, zaman eksenindeki grafiklerine görsel olarak bakarak veya sinyallerin bazı istatistiksel parametreleri kullanılarak gerçekleştirilir. Dolayısıyla bu yöntem en basit ve en ucuz tespit ve teşhis yaklaşımıdır. En sık kullanılan istatistiksel yöntemler, tepe değerleri, etkin değer, ortalama, çarpıklık, basıklık, varyans, standart sapma ve entropidir. Arızalı sinyallerde bu değerler, normal sinyallere göre daha büyük olma eğilimindedir. Zaman boyutu analizi ile arızanın varlığı ve şiddeti tespit edilebilir (Doğan, 2012; Ocak, 2004).

Frekans boyutunda analiz, periyodik özelliğe sahip ve sinüzoidal sinyallerin toplamından oluşan bir sinyalin, farklı sinüs sinyallerine ayrıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu yaklaşım Fourier dönüşümü veya FFT kullanılarak gerçekleştirilir. Ana frekans bileşenleri ve bunların genlikleri arıza belirleme amacıyla kullanılır. Bu yöntem arıza frekansının bilinmesini veya önceden tahmin edilmesini gerektirir. Bir arıza durumunda arıza frekansında ilgili harmoniklerde pik değeri artar. Arıza şiddeti arttıkça spektrumdaki piklere karşılık gelen genlik değeri artar. Sinyal-gürültü oranı düşük olduğunda ve sistemin karmaşıklığı nedeniyle, sinyal spektrumu çok sayıda frekans bileşenine sahip olacağı için arızaya neden olan pikleri istenmeyen bileşenlerden ayırt etmek neredeyse imkânsız hale gelir. Bu, FFT tabanlı arıza tespit yaklaşımıyla ilişkili en zor problemidir (Doğan, 2012; Ocak, 2004).

Frekans boyutundaki analizler, sinyalin zaman alanındaki bütün bilgilerini atarak tespit ve teşhis için yalnızca frekans alanındaki bilgilerini kullanır. Bu durum frekans

boyutunda analizin dezavantajıdır. Zaman-frekans boyutunda analizlerde ise hem zaman hem frekans bilgileri kullanılır. STFT, Ayrık dalgacık dönüşümü, Dalgacık dönüşümü ve EMD gibi bir dizi zaman frekans alanı teknikleri mevcuttur. Sinyal-gürültü oranının düşük olduğu ve çok sayıda frekans bileşeninin mevcut olduğu karmaşık sistemlere sahip elektrik makinelerinde bile, bu tekniklerin arızayı tespit etme ve teşhis etme potansiyeli vardır (Doğan, 2012; Ocak, 2004).

Model tabanlı analiz, motor durumunun izlenmesi için sistemin matematiksel veya bilgi tabanlı modelleri kullanılır. Bu teknik ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkı analiz etmeye dayanır (Lee ve ark., 2018).

Makine öğrenmesi, tahmine dayalı bir analiz türüdür. İnsan öğrenme modelinden esinlenilerek geliştirilmiş olan makine öğrenmesi, insanın karar verme sürecini simüle eder ve karmaşık bilgiler sunulduğunda bile bir sonuç çıkarır. Dolayısıyla, elektrik motorlarının izlenmesi ve arıza tespitinde, arıza tespitini insan tecrübesine daha az bağımlı hale getirebilir, çünkü insan bilgisini ve deneyimini teşhis sistemine entegre etmeye izin verir (Hadeef ve ark., 2018).

Bu tez çalışmasında kullanılan motor akı verisine sinyal işleme uygulanmıştır. Daha sonra özellik çıkartma işlemi yapılmıştır. Son olarak arıza teşhisi ve sınıflandırılması yapılmıştır. Sinyal işleme tekniği olarak motorun alçak frekanslarını dikkate alan CEEMDAN, Hausdorff Uzaklığı (HU) ve Permütasyon Entropisi (PE) kullanılmıştır. Arıza teşhisi ve sınıflandırması için DVM kullanılmıştır. Arıza özelliklerinin çıkartılmasında zaman, frekans ve zaman-frekans boyutundaki özellikler kullanılmıştır.

#### **4.1. Sinyal İşleme**

Bu tez çalışmasında SMSM akı sinyalleri durağan ve durağan olmayan durumlarda motordan toplanmıştır. Toplanan sinyallerin alçak frekans bölgesi, stator sargı arızasının analizi için en uygun bölge olduğu yapılan deneysel çalışmalarda değerlendirilmiştir. Bu durum dikkate alınarak, toplanan sinyaller öncelikle CEEMDAN yöntemi kullanılarak ayrıştırılmıştır ve daha sonra sinyallerin yüksek frekanslı bölgeleri filtrelenmiştir.

#### 4.1.1. Komple uyarlamalı gürültülü toplu ampirik kip ayrışımı (CEEMDAN)

Sinyal analizlerinde durağan olmayan koşullarda gerçekleştirilen analizlerde en güvenli yaklaşım sinyalin kararlı formlarının özelliklerinin elde edilmesidir (Doğan & Tetik, 2021). Durağan olmayan sinyalleri ayrıştırmak için etkin bir yöntem olan EMD yöntemi, Huang ve ark., (1998), tarafından önerilen bir sinyal işleme yöntemidir. Temel bir fonksiyon kurma gereksinimi olmaksızın durağan olmayan ve kararsız sinyallerin özellik bilgilerini koruyarak, yüksek frekanstan alçak frekansa kadar değişen İMF olarak bilinen alt sinyallerden oluşan bir dizi fonksiyona ayrıştırır. EMD, sinyallerin ayrışımını yaparken yüksek bir sinyal-gürültü oranına sahiptir (Tian ve ark., 2019; Yao & Pan, 2020). EMD yönteminin sinyale uygulanabilmesi için sinyalin iki koşulu sağlaması gerekir. Bu koşullardan birincisi, sinyalin uç noktalarının sayısının ve sıfır geçişlerinin sayısını ya eşit olması gerekmektedir ya da en fazla bir farklı olmalıdır. İkinci koşul ise, herhangi bir noktada yerel maksimum zarfı ve yerel minimum zarfının ortalama değeri sıfır olmamalıdır (Doğan & Selçuk, 2020). EMD yönteminin sinyal işleme için verimli bir yöntem olduğu kanıtlanmış olmasına rağmen, mod karıştırma ve örnekleme hızı sorunu gibi bazı dezavantajları vardır. Ayrıştırma işleminde mod karıştırma meydana gelirse, bir İMF bileşeni artık kendi başına fiziksel bir öneme sahip olmaz (Tian ve ark., 2019).

Sinyallerden İMF'lerin çıkarılmasında mod karıştırmasının etkisini azaltmak için EMD algoritmasında birçok değişiklik önerilmiş ve en iyi sonuçların sinyale sonlu genlikli beyaz gürültü eklenmesiyle elde edildiği, Sharma ve ark., (2017)'nin yaptığı derleme makalede ifade edilmiştir. Wu ve Huang (2009), tarafından öne sürülen EMD uygulamadan önce sinyale beyaz gürültü eklemek, artık sinyalde bulunan ekstrem sayısını arttırır ve eleme yinelemesinde interpolasyon noktaları olarak kullanıldığından sinyalin maksimum ve minimum zarflarının daha iyi tahmin edilmesini sağlar (Sharma ve ark., 2017). Geliştirilmiş ampirik kip ayrışımı yöntemi, EMD yönteminin mod karıştırma probleminin çözümünde büyük bir öneme sahip olsa da hem büyük bir hesaplama gerektirmesi hem de uygulama esnasında seçilen parametrelerin makul olmaması durumunda birçok yanlış bileşen ayrıştırması gibi bazı dezavantajları vardır (Xiao ve ark., 2018). Bu dezavantajların önüne geçmek için Torres ve ark., (2011), CEEMDAN yöntemini öne sürmüşlerdir. Bu yöntem, her ayrıştırma aşamasında

uyarlanabilir beyaz gürültü ekler ve her model bileşenini elde etmek için tek kalan artık sinyali hesaplar (Torres ve ark., 2011). Durağan olmayan  $X(n)$  sinyali CEEMDAN yöntemi ile aşağıdaki adımları izleyerek ayrıştırılır.

- (1) Eşitlik 4.1’de gösterildiği gibi  $X(n)$  sinyali ve beyaz gürültü sinyali toplanarak karıştırmış sinyal ( $X_i(n)$ ) elde edilir.

$$X_i(n) = X(n) + \beta \omega^i(n) \quad (4.1)$$

Burada  $\beta$ , eklenen beyaz gürültünün varyansıdır ve  $\omega^i(n)$  ( $i=1, 2, \dots$ ), sıfır ortalamalı birim varyans beyaz gürültüdür.

- (2) Birinci İMF EMD metodu kullanılarak Eşitlik 4.2’de verilen ifade ile hesaplanır.

$$\dot{IMF}_1(n) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \dot{IMF}_1^i(n) = \overline{\dot{IMF}_1(n)} \quad (4.2)$$

Burada  $\overline{\dot{IMF}_1(n)}$ , EMD tarafından elde edilen birinci İMF’nin ortalamasını temsil etmektedir.

- (3) Daha sonra birinci artık sinyal Eşitlik 4.3’te gösterildiği gibi sinyalden birinci İMF’nin çıkartılması ile hesaplanır.

$$r_1(n) = X(n) - \dot{IMF}_1(n) \quad (4.3)$$

Burada  $r_1(n)$ , birinci artık sinyali temsil etmektedir.

- (4) İkinci İMF’yi hesaplamak için Eşitlik 4.4 kullanılır.

$$\dot{IMF}_2(n) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(r_1(n) + \varepsilon_1 E_1(\omega^i(n))) \quad (4.4)$$

Burada  $E_1(.)$ , EMD algoritması ile verilen sinyalden birinci İMF’yi çıkartan bir operatördür.  $\varepsilon_1$ , gürültü standart sapmasıdır.

- (5) Daha sonra Adım 3’de gösterildiği gibi artık sinyal hesaplanır ve Adım 4’de gösterildiği gibi sıradaki İMF hesaplanır. Eşitlik 4.5’de artık sinyal formülünün, Eşitlik 4.6’da ise İMF formülünün genel gösterimi verilmiştir.

$$r_k(n) = r_{k-1}(n) - \dot{IMF}_k(n) \quad (4.5)$$

$$\dot{IMF}_{k+1}(n) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(r_k(n)) + \varepsilon_k E_k(\omega^i(n)) \quad (4.6)$$

Burada  $E_k(\cdot)$ , EMD algoritması ile verilen sinyalden  $k$ . İMF'yi çıkartan bir operatördür.  $\varepsilon_k$ ,  $k$ . İMF için eklenen gürültünün varyansını temsil etmektedir.

- (6) Artık sinyal ayrıştırılamadığında, yani artık sinyalin maksimum uç nokta sayısı ikiden fazla olmadığında, algoritma sonlandırılır. Artık sinyalin nihai sonucu Eşitlik 4.7'de verilmiştir.

$$R(n) = X(n) - \sum_{k=1}^K \dot{IMF}_k \quad (4.7)$$

Orijinal sinyal ifadesi Eşitlik 4.8'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$X(n) = \sum_{k=1}^K \dot{IMF}_k + R(n) \quad (4.8)$$

#### 4.1.2. Filtreleme İşlemi

Filtreleme işlemi, sinyalin istenmeyen bileşenlerinin, tamamen veya kısmen bastırılmasıdır. Stator sargı arızasının incelenmesinde akı verisinin alçak frekanslarda daha baskın olması nedeni ile arıza incelenmesi için sinyalin yüksek frekans bileşenleri filtreleme işlemi ile bastırılmıştır. Filtreleme işlemi gerçekleştirilmek için PE ve HU yöntemleri kullanılmıştır.

Hausdorff uzaklığı (HU): Bu çalışmada, uygun olan ve uygun olmayan İMF'leri ayırt etmek için geometrik bir mesafe ölçüsü olan HU adı verilen bir benzerlik ölçümü kullanılmıştır. HU, iki geometrik şekil veya iki küme arasındaki benzerliği hesaplayan doğrusal olmayan bir operatördür (Kesharwani ve ark., 2021). İki nokta kümesi A ve B arasındaki HU, Eşitlik 4.9'da gösterildiği gibi ifade edilir. Eşitlik 4.10 ve Eşitlik 4.11'de HU'nun hesaplanabilmesi için gerekli eşitlikler verilmiştir.

$$HU(A, B) = \max(U(A, B), U(B, A)) \quad (4.9)$$

$$U(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (4.10)$$

$$U(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (4.11)$$

Permütasyon Entropisi (PE): PE, zaman serilerinin karmaşıklığını karakterize eden doğrusal olmayan bir ölçüdür. PE, frekans dağılımındaki düzenlilik, karmaşıklık veya düzleşmenin uygun bir ölçüsüdür ve bir zaman serisinde yer alan zamansal bilgileri açıklar. PE, bir zaman serisinin elemanlarının permütasyon modellerinin meydana gelme sıklığını değerlendirerek, eldeki sistemin dinamikleri hakkında bilgi verir. PE, Eşitlik 4.12’de verilen denklem ile hesaplanır.

$$PE = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log p(x_i) \quad (4.12)$$

$p(x_i)$ , her bir  $x_i$  değerinin  $x$  olayı içindeki olasılığını vermektedir.

#### 4.2. Arıza Özelliklerinin Çıkartılması

Motor akı verilerinden zaman ve frekans boyutunda analizi için kullanılan istatistiksel yöntemler, Ortalama Eğri Uzunluğu (OEU), Standart Sapma (SS), Hjort Aktivite Parametresi (HAP), Birinci Fark (BF), İkinci Fark (İF), Ortalama Teager Enerjisi (OTE), Sıralı Varyasyonların Logaritmik Kök Toplamı (SVLKT), Varyans, Maksimum Değer (MD), Otoregresif (OR) ve Bant Gücü (BG)’dür.

Ortalama Eğri Uzunluğu (OEU): OEU, Esteller ve ark., (2001) tarafından Katz fraktal boyutu için bir tahmin sağlamak amacıyla önerilmiştir (Şen ve ark., 2014). OEU, Eşitlik 4.13’te gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$OEU = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k |x[m] - x[m-1]| \quad (4.13)$$

Burada  $x[m]$ , sinyal zaman serisidir.  $N$ , pencere uzunluğudur ve  $k$ , son örnektir.

Standart Sapma (SS): SS, verilerin varyasyon veya dağılım miktarını ölçen bir zaman alanı özelliği olarak kullanılabilir (Doğan & Selçuk, 2020). Genellikle  $x(n)$  sinyali için Eşitlik 4.14’de verilen ifade ile tahmin edilir. Eşitlik 4.15’de aritmetik ortalama denklemi verilmiştir.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2} \quad (4.14)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (4.15)$$

Hjort Aktivite Parametresi (HAP): Sinyalin aktivitesini belirlemek için kullanılan parametredir (Memar & Faradji, 2017). HAP, Eşitlik 4.16’da gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$HAP = \sigma_x^2 \quad (4.16)$$

Burada  $\sigma_x$ , sinyalin standart sapmasını ifade etmektedir.

Birinci Fark (BF): BF, sinyalin birinci farklarının mutlak değerlerinin ortalaması olarak tanımlanır (Peng ve ark., 2017). Eşitlik 4.17’deki gibi hesaplanabilir.

$$\delta_x = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |x(t+1) - x(t)| \quad (4.17)$$

İkinci Fark (İF): İF, sinyalin ikinci farklarının mutlak değerlerinin ortalaması olarak tanımlanır. Bir x sinyali için İF formülü Eşitlik 4.18’de verilmiştir.

$$\gamma_x = \frac{1}{T-2} \sum_{t=1}^{T-2} |x(t+2) - x(t)| \quad (4.18)$$

Ortalama Teager Enerjisi (OTE): OTE, durağan olmayan bir sinyalin genlik-frekans modülasyonlu temsillerinin enerji tahmini için kullanılabilen doğrusal olmayan bir yöntemdir. OTE’nin önemli bir özelliği sinyal enerjisindeki hızlı değişimleri bir zaman çözünürlüğü ile karakterize edebilmesidir (Kaleem ve ark., 2010; Kamath, 2011). OTE, Eşitlik 4.19’da verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$OTE_k = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+3}^k x[m-1]^2 - x[m]x[m-2] \quad (4.19)$$

Burada  $x[m]$ , sinyal zaman serisidir.  $N$ , pencere uzunluğudur ve  $k$  son örnektir.

Sıralı Varyasyonların Logaritmik Kök Toplamı (SVLKT): Sinyal örnekleri arasındaki sıralı varyasyonları ölçmek için SVLKT kullanılmaktadır (Memar & Faradji, 2017). SVLKT’nin hesaplanması için Eşitlik 4.20’deki ifade verilmiştir.

$$\log_{10} \sqrt{\sum_{n=1}^{N-1} (x(n) - x(n-1))^2} \quad (4.20)$$

Burada  $N$ ,  $x(n)$  sinyalinin uzunluğunu ifade etmektedir.

Varyans: Bir sinyalin varyansı gücünün ölçüsüdür (Çerci & Temeltaş, 2018). Varyans denklemi, Eşitlik 4.21’de verilen ifade kullanılarak hesaplanır.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \quad (4.21)$$

$\bar{x}$ , aritmetik ortalama ifadesi Eşitlik 4.15’de verilmiştir.

Maksimum Değer (MD): MD, sinyalin en büyük değerinin ifadesidir ve Eşitlik 4.22’de verilmektedir.

$$MD = \max(x(n)) \quad (4.22)$$

Otoregresif (OR): OR, güç spektrumunu tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan bir modeldir (Subasi, 2012). OR denklemi Eşitlik 4.23’de verilmiştir.

$$y[n] = -\sum_{i=1}^p a(i)y[n-i] + x[n] \quad (4.23)$$

$x(n)$ , giriş sinyali  $y[n]$ , çıkış modelini,  $a(i)$ , model parametreleri ve  $n$  örnekleme zamanını ifade etmektedir.

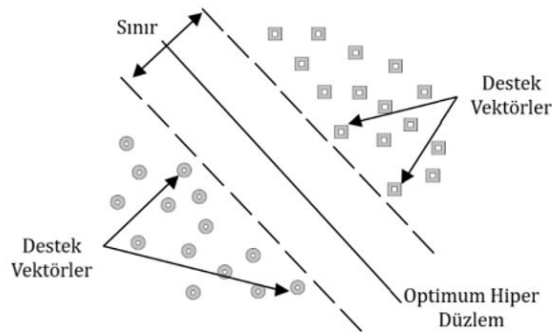
Bant Gücü (BG): BG, farklı frekans bantlarından gelen güç özelliğidir. Bu yöntem belirli bir süre boyunca sinyalin durağanlığını varsayar (Jenke ve ark., 2014). Bu metot ile iki elemanlı bir vektör olarak belirtilen frekans aralığındaki ortalama gücü hesaplar. BG, frekans aralığında ortalama gücü belirlemek için değiştirilmiş bir periodogram kullanır (Anonim, 2013). Bu çalışmada motorun kaynak frekansı 100 Hz’dir. Kaynak frekans bölgesi alfa bant gücü ile takip edilmiştir ve [90 110] Hz olarak seçilmiştir. Arıza bilgisinin en baskın olduğu üçüncü harmonik 300 Hz’de olduğu için gama bant gücü olarak [290 310] Hz takip edilmiştir.

### 4.3. Arıza Teşhisi ve Sınıflandırma

Arıza teşhisi ve sınıflandırması, motorların sürdüğü sistemin güvenli çalışması, işletme devamlılığının sağlanabilmesi, ekonomik sebeplerden dolayı önemlidir. Bir elektrik motorunda meydana gelen arıza doğru zamanda tespit edilemezse, arıza ilerleyebilir,

motorda farklı arızaların oluşmasına sebep olabilir, çalıştığı sistemin durmasına neden olabilir. Arıza tespit edilemez ve motor çalıştırılmaya devam edilirse, motor kullanılamaz hale gelebilir. Arıza tespit edildiğinde motor düşük maliyetler ile tamir edilebilirken, arızanın tespit edilemeyip motorda ciddi zararlar oluşturduğunda bakım maliyeti artacaktır. Bunların yanı sıra bir üretim bandında kullanılan elektrik motorunda meydana gelecek arıza, üretim süresinin artmasına ve ham madde kaybına neden olabilir. Dolayısıyla arızanın tespit edilmesi ve sınıflandırılması arızası oranının azaltılması ve olası problemlerin önüne geçilebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada arıza teşhisi ve sınıflandırması için güvenilir ve hızlı olmasından dolayı DVM kullanılmıştır (Song ve ark., 2012).

DVM, Vapkin, (1999), tarafından istatistiksel öğrenme teorisine dayanan sınıflandırma yapan makine öğrenme algoritmasıdır. DVM algoritması, bir sınıfın veri noktalarını diğer sınıfın noktalarından en iyi şekilde ayıran hiper düzlemi bulmaktadır. İki sınıf arasında birçok hiper düzlem çizilebilir ancak iki sınıf arasında maksimum marj sağlayan tek bir hiper düzlem vardır ve bu düzlem optimum hiper düzlem olarak adlandırılmaktadır. Hiper düzleme en yakın olan veri noktası veya noktaları destek vektörü olarak adlandırılır (Pietrzak & Wolkiewicz, 2021; Kavzoglu & Colkesen, 2009). Şekil 4.1’de destek vektörleri ve optimum hiper düzlem gösterilmiştir.



Şekil 4.1. DVM sınıflandırma (Reis ve Yılcı, 2020)

DVM, eğitim verilerini kullanarak optimal hiper düzlemi geliştirir ve test verileri kullanılarak genelleme yeteneği doğrulanır (Song ve ark., 2012).

$(z_i, y_i), (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 'nın bir dizi eğitim verisi olduğunu varsayalım.  $z_i \in R^N$ , gözlemdir ve  $y_i \in \{-1, 1\}$ , gözlem yanıtıdır. Burada  $N$ , gözlem sayısıdır. Hiper düzlem denklemi Eşitlik 4.24'de verilmiştir.

$$w \cdot z_i + b = 0 \quad (4.24)$$

Burada  $w$ , hiper düzlemin uzaydaki oryantasyonunu,  $z_i$ , hiper düzlem üzerindeki bir noktayı ve  $b$ , hiper düzlemin orijinden uzaklığını temsil etmektedir. İkili sınıf için hiper düzlem denklemleri Eşitlik 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.

$$y_i = +1 \text{ için } w \cdot z_i + b \geq +1 \quad (4.25)$$

$$y_i = -1 \text{ için } w \cdot z_i + b \leq -1 \quad (4.26)$$

Eşitlik 4.25 ve 4.26'da verilmiş olan iki eşitlik, Eşitlik 4.27'de verildiği gibi tek bir eşitlik olarak ifade edilebilir.

$$y_i \cdot (w \cdot z_i + b) - 1 \geq 0 \quad (4.27)$$

Bu düzlemler arasındaki marj Eşitlik 4.28 kullanılarak bulunur.

$$\frac{2}{\|w\|} \quad (4.28)$$

Doğrusal olan sınıflandırmada maksimum marj sağlayan optimal hiper düzlemi Eşitlik 4.29 kullanılarak bulunur.

$$\min\left(\frac{1}{2} \cdot w^2\right) \quad (4.29)$$

Karar fonksiyonu Eşitlik 4.30'de verilmiştir.

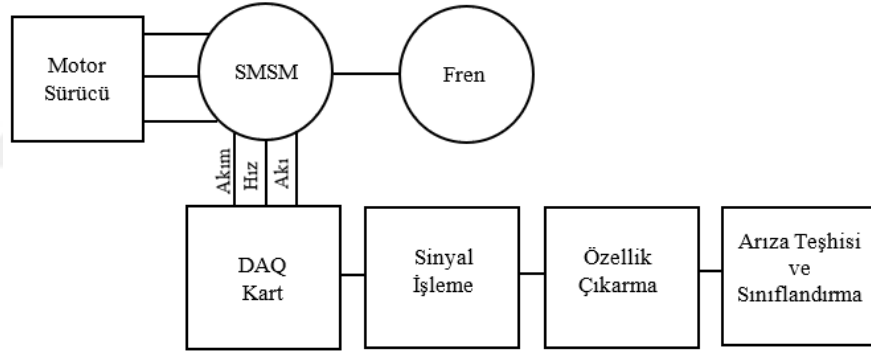
$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^n \eta_i \cdot y_i(z \cdot z_i) + b\right) \quad (4.30)$$

Burada  $n$ , destek vektör sayısıdır.  $\eta_i$ , pozitif Lagrange çarpanıdır.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Giriş

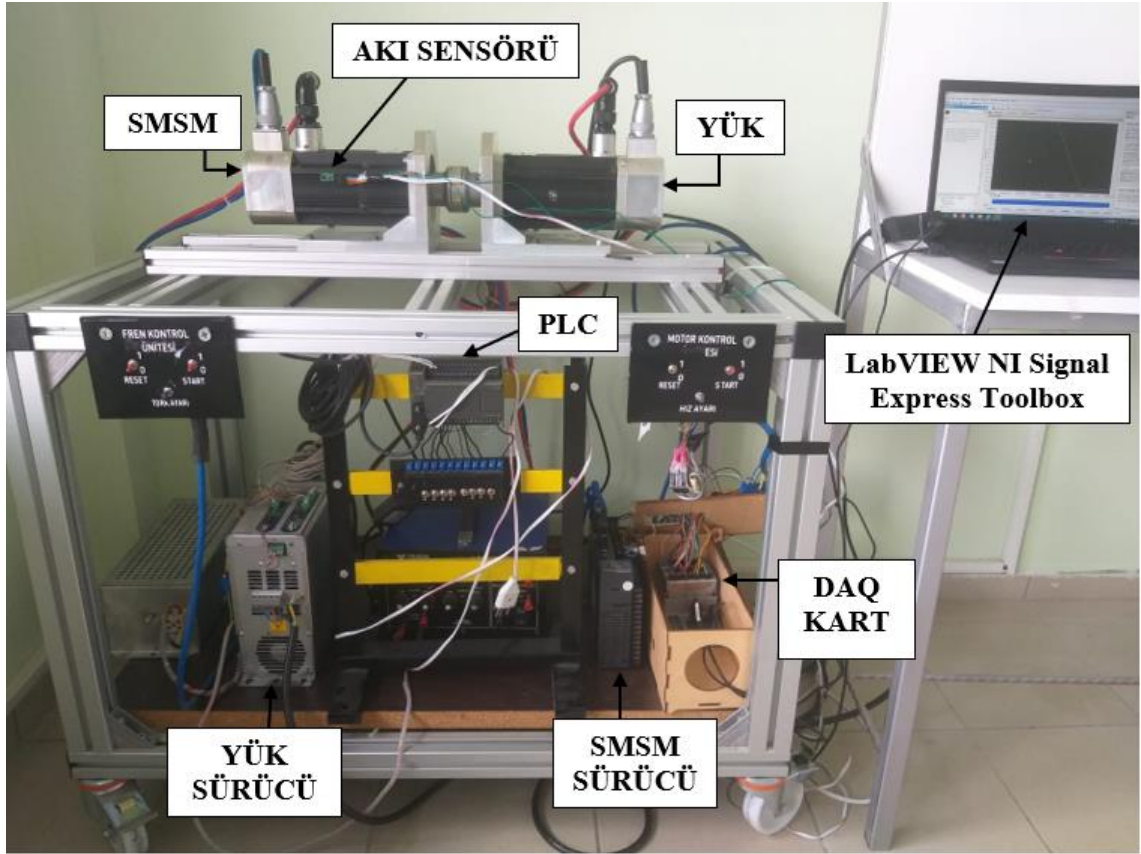
Bu tez çalışmasında SMSM'ler için ayrıştırma ve makine öğrenmesi tabanlı arıza teşhis ve tespit yöntemi önerilmiştir. SMSM'nin sağlam ve sargı arızalı SMSM'lerden akı verileri toplanarak, CEEMDAN yöntemi ile sinyaller ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan sinyallerden arıza özelliklerini temsil eden İMF'ler HU ve PE yöntemleri kullanılarak filtrelenmiş ve arıza özelliği taşımayan İMF'ler çıkarılmıştır. Elde edilen filtrelenmiş sinyale pencereleme yapılmış ve sonrasında zaman ve frekans boyutunda istatistiksel özellikler çıkarılarak bir özellik matrisi oluşturulmuştur. Elde edilen özellik matrisi DVM'ye beslenerek arızanın tespiti ve teşhisi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Önerilen arıza tespit yönteminin blok diyagramı

### 5.2. Deney Düzenegi ve Veri Toplama

Gerçekleştirilen analizlerin sağlam ve güvenilir olması için deney düzeneğinden toplanan verilerin doğru bir şekilde elde edilmesi önemlidir. Bu amaç doğrultusunda Şekil 5.2'de verilmiş olan deney düzeneği laboratuvar ortamında kurulmuştur. Deney düzeneği; SMSM, SMSM sürücü, akı sensörü, yük, yük sürücü, programlanabilir mantıksal denetleyici (Programmable Logic Controller (PLC))'den meydana gelmiştir. Deney düzeneğinde yer alan SMSM'den akı, akım ve hız verileri toplanmıştır.



Şekil 5.2. Deney düzeneği

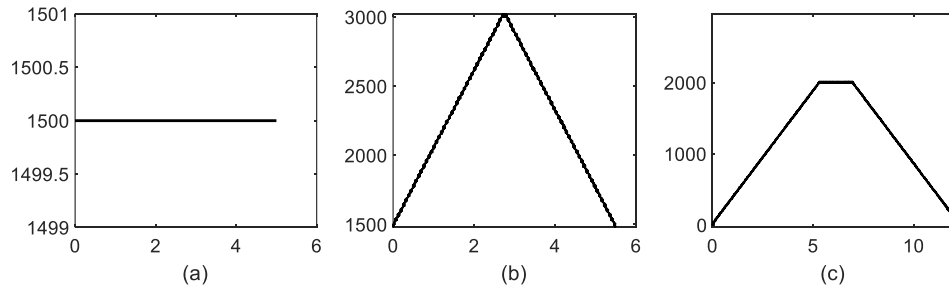
Gerçekleştirilen deneysel çalışmada 2 adet özdeş motor kullanılmıştır. Kullanılan motorun özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu motorların bir tanesi kapalı çevrim hız kontrol modunda motor olarak kullanılmıştır ve Şekil 5.2’de SMSM olarak adlandırılmıştır. Diğer motor ise, kapalı çevrim tork kontrol modunda fren olarak kullanılmıştır. Bu sayede motora yükleme işlemi yapılmıştır ve Şekil 5.2’de yük olarak adlandırılmıştır. Motor ve fren kontrolü için TDE Macno tarafından üretilmiş OPD12 motor sürücüsü kullanılmıştır. 3x380 V besleme ile çalışan sürücü, 2.2 kW’a kadar olan motorları 0-1500 Hz çıkış frekansında sürebilmektedir ve üzerinde bulunan analog çıkışlardan hız ve tork değerleri 0-10 V DC olarak izlenebilmektedir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan motorun özellikleri

| Motor Özellikleri |              |
|-------------------|--------------|
| Mil Gücü          | 1.2 kW       |
| Kutup Sayısı      | 8            |
| Voltaj            | 220 V        |
| Nominal Tork      | 4 Nm         |
| Nominal Hız       | 3000 dev/dak |

Deney düzeneğinden veri toplamak için NI9174 kompakt DAQ Veri Toplama Modülü kullanılmıştır. DAQ kart 24 bit çözünürlüğe ve 50 ks/sn örnekleme hızına sahiptir. DAQ kart içerisinde Noch filtresi bulunmaktadır ve bu ölçülen işaret üzerindeki bazı harmonikleri ortadan kaldırır (National Instruments, 2005). Motorda meydana gelen kaçak akının izlenmesi için Texas Instruments DRV425EVM akı sensörü kullanılmaktadır. Sensör, dörtlü düz uçsuz QFN paketine sahiptir. DRV425'in 47 kHz'e kadar ölçüm bant genişliği  $\pm 2$  mT'dir. Sensörün düşük ofset, ofset kayması ve gürültüsü, dahili kompanzasyon bobini tarafından sağlanan hassas kazanç, düşük kazanç kayması ve çok düşük doğrusal olmama oranı ile birleştiğinde, manyetik alan ölçümü oldukça hassas bir şekilde gerçekleştirilir (Texas Instruments, 2020). Ölçümlerden elde edilen verilerin toplanması için DAQ kart ile uyumlu olan LabView NI Signal Express programı kullanılmıştır. Bu program, donanım kapasitesine de bağlı olmak şartıyla yüksek örnekleme hızı ile veri toplamayı sağlar (National Instruments, 2015). Verilerin aynı koşullarda toplanması için PLC kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında SMSM'nin stator sargı arızasının tespiti için veri toplama işleminde stator sargıları etrafında meydana gelen kaçak manyetik akı ölçümü yapılmıştır. Kaçak akı verisine ilaveten akım ve hız verileri de deney setinden toplanmıştır DAQ kart ile toplanmıştır. Motor verileri kararlı ve dinamik çalışma koşulları için boş yükte ve tam yükte alınmıştır. Şekil 5.3'de bu çalışmada kullanılan kararlı ve dinamik çalışma koşulları ile ilgili grafikler görülmektedir.



Şekil 5.3. SMSM'nin hız grafikleri: (a) Kararlı çalışma profili, (b) Dinamik 1 (Üçgen hız profili), (c) Dinamik 2 (Yamuk hız profili)

Şekil 5.3.a'da görüldüğü üzere kararlı çalışma durumunda motor 1500 rpm sabit hızda çalıştırılmıştır. Deney setinden kararlı durumda her bir veri türü için 5 sn boyunca 25600 Hz örnekleme frekansı ile toplam 128000 adet veri toplanmıştır. Motorda dinamik

sargı arızası statorun aynı fazındaki iki spir arasındaki yalıtım arızasının meydana gelen stator sargı arızasının eşdeğer modeli Şekil 5.4’de verilmektedir.

Stator sargı arızası statorun aynı fazındaki iki spir arasındaki yalıtım arızasını belirtir.  $a$  fazında meydana gelen stator sargı arızasının eşdeğer modeli Şekil 5.4’de verilmiştir.



Bu tez çalışmasında, motorun belirli spirlerinden uçlar motorun dışına çıkarılmıştır. Bu uçların kısa devre edilmesi ile stator sargı arızası oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında iki farklı seviyede stator sargı arızası meydana getirilmiştir.  $A_1$ , olarak adlandırılan birinci arıza seviyesinin sargı direnci 1.0453 ohm'dur.  $A_2$ , olarak adlandırılan ikinci arıza

seviyesinin sargı direnci 1.0447 ohm'dur. Sargı dirençlerinin ölçümü LCR metre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Arıza durumunda,  $abc$  referans çatı modeli, dengesiz faz koşulunda geçerli olması sebebiyle uygun bir modeldir (Doğan ve Tetik, 2021).  $a$  fazında oluşturulmuş sargı arızası sonucunda, matematiksel denklemler Eşitlik 5.1'de verildiği gibi ifade edilir (Li ve ark., 2018).

$$[V_{sf,abc}] = [R_{sf}] \cdot [i_{sf,abc}] + [L_{sf}] \frac{d}{dt} [i_{sf,abc}] + [e_{sf,abc}] \quad (5.1)$$

Voltaaj, akım, öz indüktans, zıt EMK ve faz stator direncinin ifadelerinin matris formları sırasıyla Eşitlik 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilmiştir.

$$[V_{sf,abc}] = [V_a \ V_b \ V_c \ 0]^T \quad (5.2)$$

$$[i_{sf,abc}] = [i_a \ i_b \ i_c \ i_f]^T \quad (5.3)$$

$$[L_{sf}] = \begin{bmatrix} L & M & M & -uL \\ M & L & M & -uM \\ M & M & L & -uM \\ uL & uM & uM & -u^2L \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$e_{sf,abc} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_f \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{SM,a} \\ \lambda_{SM,b} \\ \lambda_{SM,c} \\ \lambda_{SM,f} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$R_{sf} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & -uR_s \\ 0 & R_s & 0 & -uM \\ 0 & 0 & R_s & -uM \\ uR_s & 0 & 0 & -uR_s - R_f \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Eşitliklerde,  $R_s$  faz stator direncini,  $L$  faz statorunun öz indüktansını,  $M$  stator fazları arasındaki karşılıklı indüktansı gösterir,  $\lambda_{SM,a}$ ,  $\lambda_{SM,b}$  ve  $\lambda_{SM,c}$  sırasıyla  $a$ ,  $b$  ve  $c$  fazlarında kalıcı mıknatıslar nedeniyle meydana gelen akıdır. Herhangi bir fazda kısa devre sargılarının oranı Eşitlik 5.7'de verilmiştir.

$$\mu = \frac{n_f}{N} \quad (5.7)$$

Toplam spir sayısı,  $N$  ve kısa devre sayısı  $n_f$  ile ifade edilmektedir. Eşitlik 5.8,  $a$  fazında meydana gelen akıyı, Eşitlik 5.9,  $b$  fazında meydana gelen akıyı, Eşitlik 5.10,  $c$  fazında meydana gelen akıyı ve Eşitlik 5.11 ise kısa devreden dolayı meydana gelen akıyı ifade etmektedir.

$$\lambda_{SM,a} = \lambda_{SM,1} \cos(\theta) + \sum_{v=2k+1} \lambda_{SM,v} \cos(v\theta - \theta_v) \quad (5.8)$$

$$\lambda_{SM,b} = \lambda_{SM,1} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sum_{v=2k+1} \lambda_{SM,v} \cos(v\theta - \theta_v - 2v\frac{\pi}{3}) \quad (5.9)$$

$$\lambda_{SM,c} = \lambda_{SM,1} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) + \sum_{v=2k+1} \lambda_{SM,v} \cos(v\theta - \theta_v + 2v\frac{\pi}{3}) \quad (5.10)$$

$$\lambda_{SM,f} = \mu \cdot \lambda_{SM,a} \quad (5.11)$$

Burada  $k$  bir tamsayıdır,  $\lambda_{SM,1}$  temel mıknatıs akısının genliğidir,  $\lambda_{SM,v}$   $v$ . harmonik mıknatıs akısının genliğidir,  $\theta$  rotor elektriksel konumudur ve  $\theta_v$   $v$ . harmonik mıknatıs akısı ile temel harmonik mıknatıs akısı arasındaki elektriksel açıdır. Stator sargı arızalı SMSM'nin elektromanyetik torku Eşitlik 5.12'de verilen ifade ile hesaplanır.

$$T_e = \frac{i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c - i_f \cdot e_f}{\omega_e} \quad (5.12)$$

Arızalı faz akımı ( $i_f$ ) Eşitlik 5.13 ile ifade edilir.

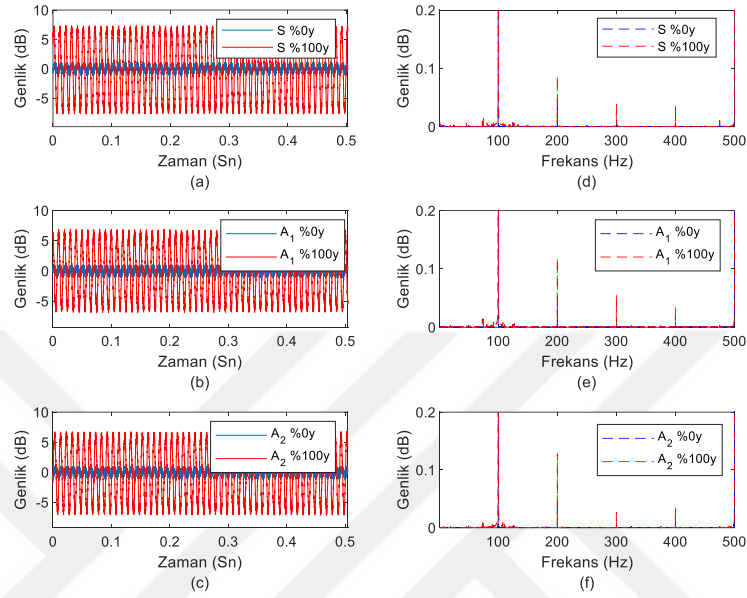
$$i_f = I_f \cos(\omega t - a_f) \quad (5.13)$$

Stator sargı arızası, SMSM stator akımı dengesizliğine ve genlik değişikliğine neden olmaktadır. Sargı kısa devre yapıldığında, temel frekansın genliğine ek olarak, akımın yüksek frekans harmoniklerinin genliği de artar (Chen, 2019). Eşitlik 5.14'de motor akımındaki sargı arızası harmonik bileşen frekansı verilmiştir.

$$f_{sa} = f(1 \pm k \frac{z}{p}) \quad (5.14)$$

Burada  $f$  güç kaynağının frekansı ve  $k$  pozitif bir tam sayıdır.  $z$  ve  $p$  sırasıyla stator yuvalarının ve kutup çiftlerinin sayısını ifade eder. Üçüncü harmonik, stator akımının en baskın stator sargı arızası frekans bileşenidir (Doğan ve Tetik, 2021).

Şekil 5.5’de farklı yük koşullarında SMSM’den alınan Sağlam (S), Birinci Arıza Seviyesi ( $A_1$ ) ve İkinci Arıza Seviyesi ( $A_2$ ) için akım verilerinin zaman ve frekans grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.5. SMSM’nin zaman ve frekans boyutunda akım grafikleri: (a) Zaman boyutunda S motorun %0y ve %100y grafikleri, (b) Zaman boyutunda  $A_1$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (c) Zaman boyutunda  $A_2$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (d) Frekans boyutunda S motorun %0y ve %100y grafikleri, (e) Frekans boyutunda  $A_1$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (f) Frekans boyutunda  $A_2$  motorun %0y ve %100y grafikleri

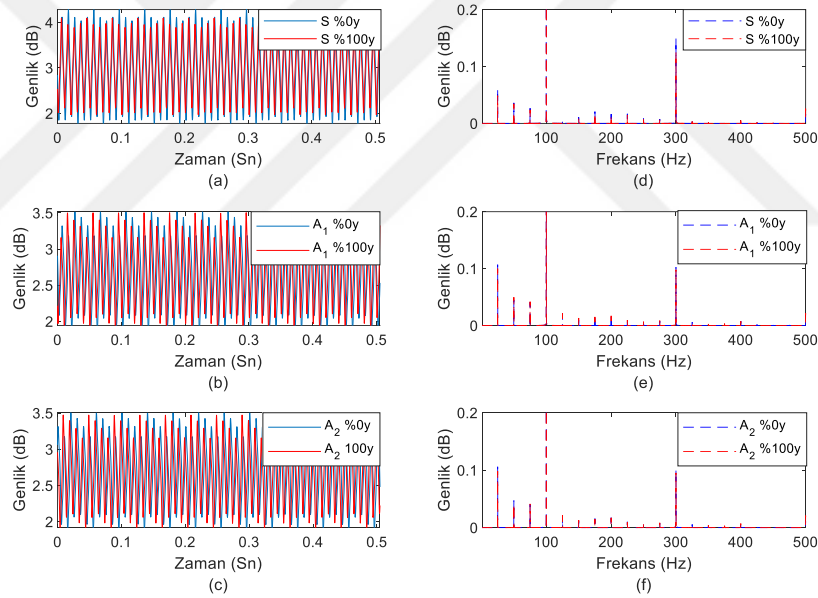
Şekil 5.5.a, 5.5.b ve 5.5.c’de verilmiş olan zaman grafiklerinde motorun yüklenme durumuna göre motordaki akım değişimleri görülmektedir. Zaman boyutundaki bu akım sinyallerinin frekans boyutundaki grafikleri sırasıyla Şekil 5.5.d, 5.5.e ve 5.5.f’de verilmiştir. Burada 100 Hz, motorun kaynak frekansı (f)’dır. Analiz sonuçları incelendiğinde, stator akımının üçüncü harmoniği olan  $3f$  (300 Hz)’de sargı arızasının izlenebildiği görülmektedir.

Motorda stator sargı arızası meydana geldiğinde, motor akımlarında oluşan harmonikler benzer şekilde motor akısında da görülür. Stator sargı arızanın meydana geldiği kısa devreli kısım ve devrede kalan bobinler olmak üzere iki kısma ayrılır. Sargının terminalleri boyunca karşılık gelen gerilime tekabül eden tüm çekirdek akısı, yine, sargının iki parçası arasında, ancak esas olarak radyal bir yönde kaçak akı olarak geçer.

Kısa devre meydana geldiğinde makinenin ürettiği kaçak akı  $\lambda_f$  ile gösterilmektedir ve Eşitlik 5.16’da denklemi verilmiştir (Da & Krishnamurthy, 2010).

$$\lambda_f = \frac{2N}{3n_f} \lambda \quad (5.15)$$

Burada  $\lambda$  sağlam bir makinede aynı bobinden geçen akı bağlantısıdır. Artık manyetik alan, enerji dönüşümünün motorun hava boşluğunda gerçekleşmesi nedeniyle motorun sağlık durumu hakkında hayati bilgilere sahiptir. Akım verisinde olduğu gibi akı verisinde de en baskın frekans bileşeni akı sinyalinin üçüncü harmoniğidir (Gurusamy ve ark., 2021; Refaat ve ark., 2013). Şekil 5.6’da tam yük koşulunda motordan alınan  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$  için akı verilerinin zamana bağlı grafikleri ve onların frekans boyutundaki analizleri verilmiştir.



Şekil 5.6. SMSM’nin zaman ve frekans boyutunda akı grafikleri: (a) Zaman boyutunda  $S$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (b) Zaman boyutunda  $A_1$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (c) Zaman boyutunda  $A_2$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (d) Frekans boyutunda  $S$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (e) Frekans boyutunda  $A_1$  motorun %0y ve %100y grafikleri, (f) Frekans boyutunda  $A_2$  motorun %0y ve %100y grafikleri

Şekil 5.6.a, 5.6.b ve 5.6.c’de verilmiş olan zaman grafiklerinde motorun yüklenme durumuna göre motordaki akı değişimleri görülmektedir. Zaman boyutundaki bu akı sinyallerinin frekans boyutundaki grafikleri sırasıyla Şekil 5.6.d, 5.6.e ve 5.6.f’de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, stator akı verilerinin  $3f$  frekansında sargı

arızası görülmektedir. Bunun yanı sıra temel frekans ( $f$ ) bileşeninin alt bantlarında ve üst bantlarında da arıza durumunda değişimler meydana geldiği görülmektedir.

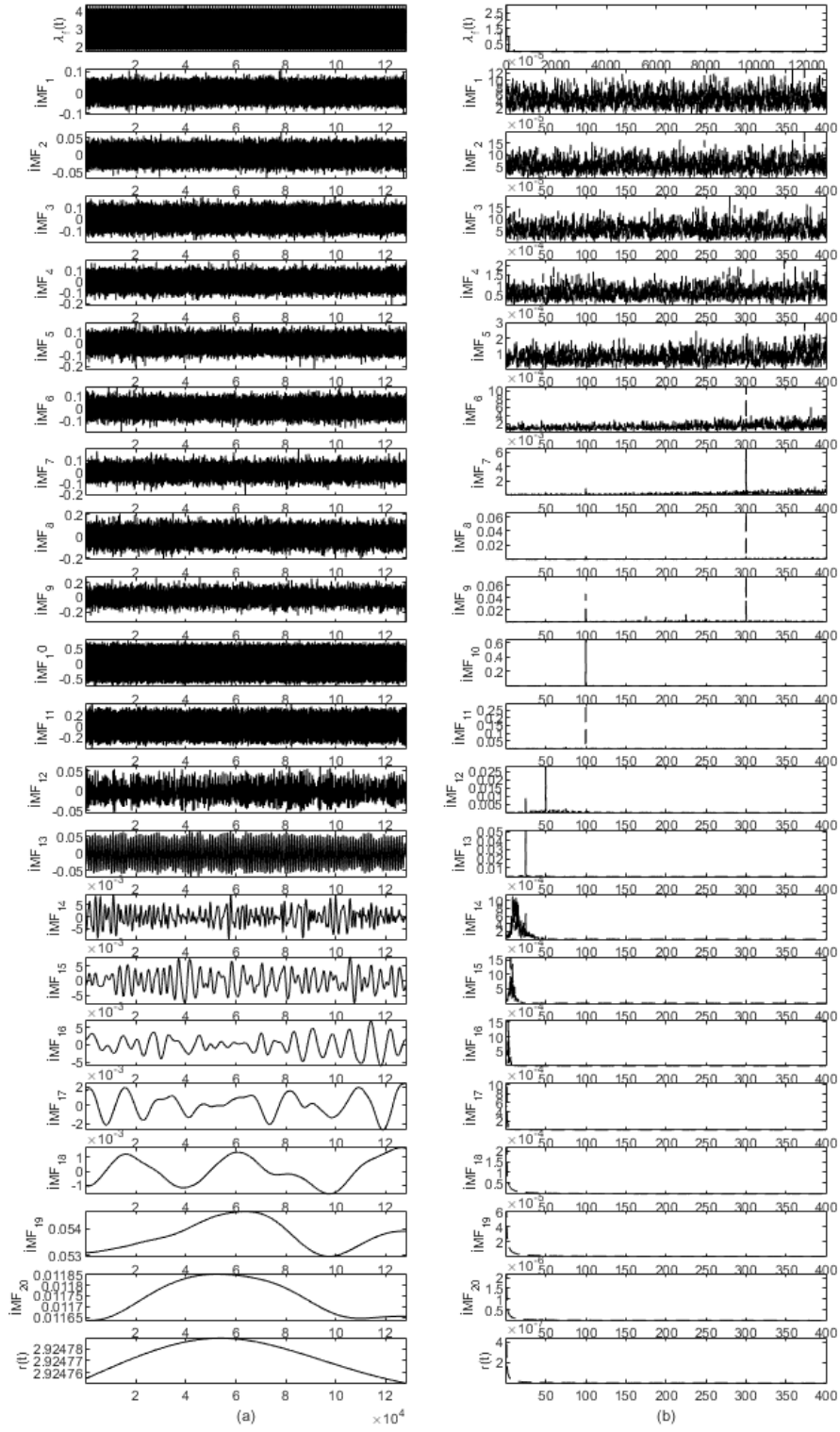
Şekil 5.6'deki grafiklerden anlaşılacağı üzere SMSM'nin akı verisi üzerinde  $3f$  arıza bileşeninin dışında temel frekansın alt ve üst bantlarının frekans bileşenlerinde de değişimler olduğu için bu arızanın teşhisi için alçak frekans bölgesindeki bileşenlerin tamamının analiz edilmesi faydalı olacaktır. Yapılan çalışmalarda sargı arızası frekans bileşeni  $3f$ 'in aynı zamanda sürücü arızalarını da temsil etmesinden dolayı (Le Roux ve ark., 2008; Urresty ve ark., 2012) sargı arızasının teşhisinde yalnız başına bu  $3f$  frekans bileşeninin kullanılması hatalı arıza teşhisine neden olabileceği belirtilmiştir (Urresty ve ark., 2012).

#### **5.4. Deneysel Çalışma Sonuçları**

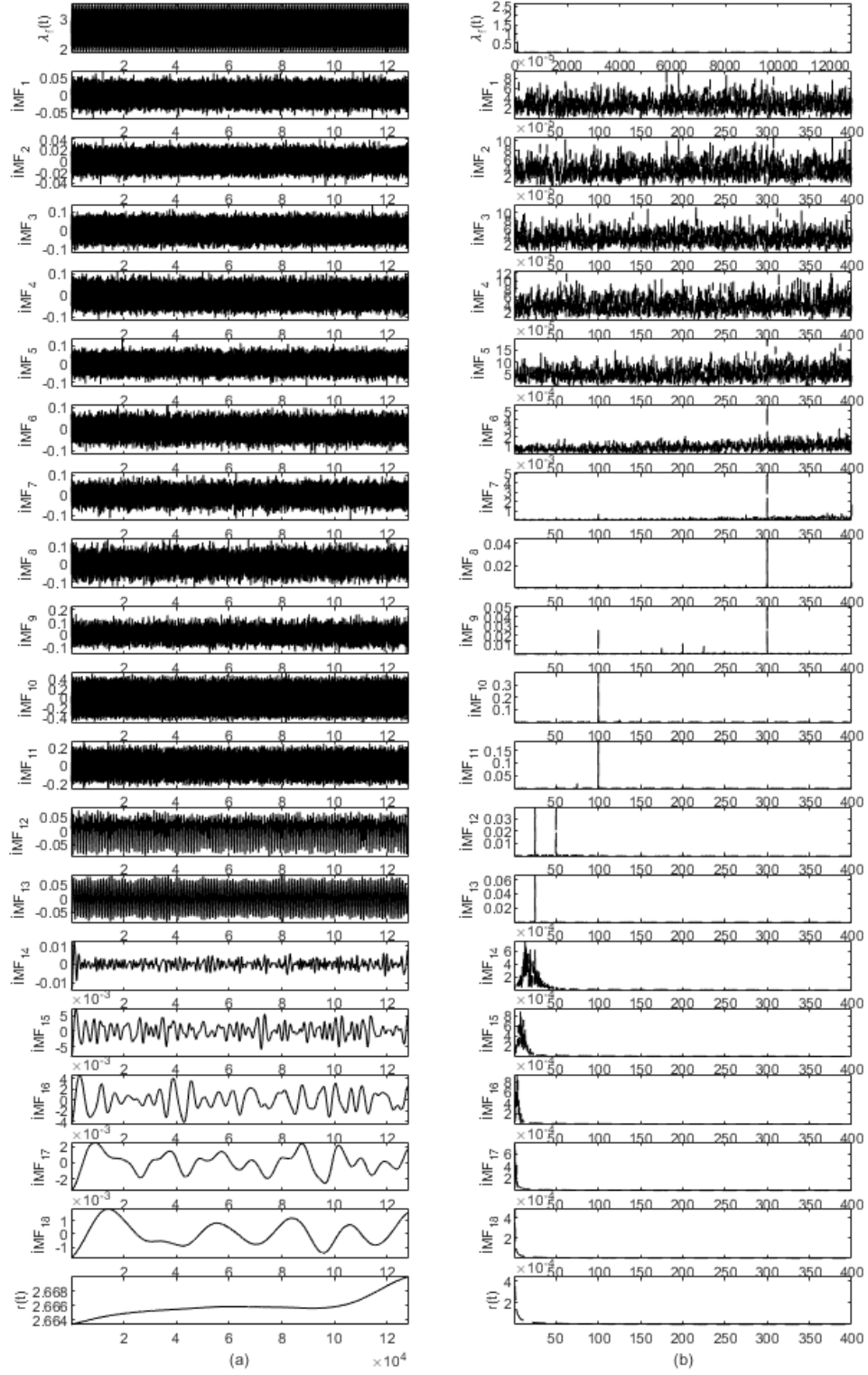
Bölüm 5.3'de belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında SMSM'nin stator sargı arızası teşhisi için motorun kararlı ve dinamik hız koşullarında, stator sargısında farklı arıza seviyeleri meydana getirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda toplanan motor akı verileri kararlı çalışma ve dinamik çalışma senaryoları için analiz edilmiştir.

##### **5.4.1. Kararlı çalışma**

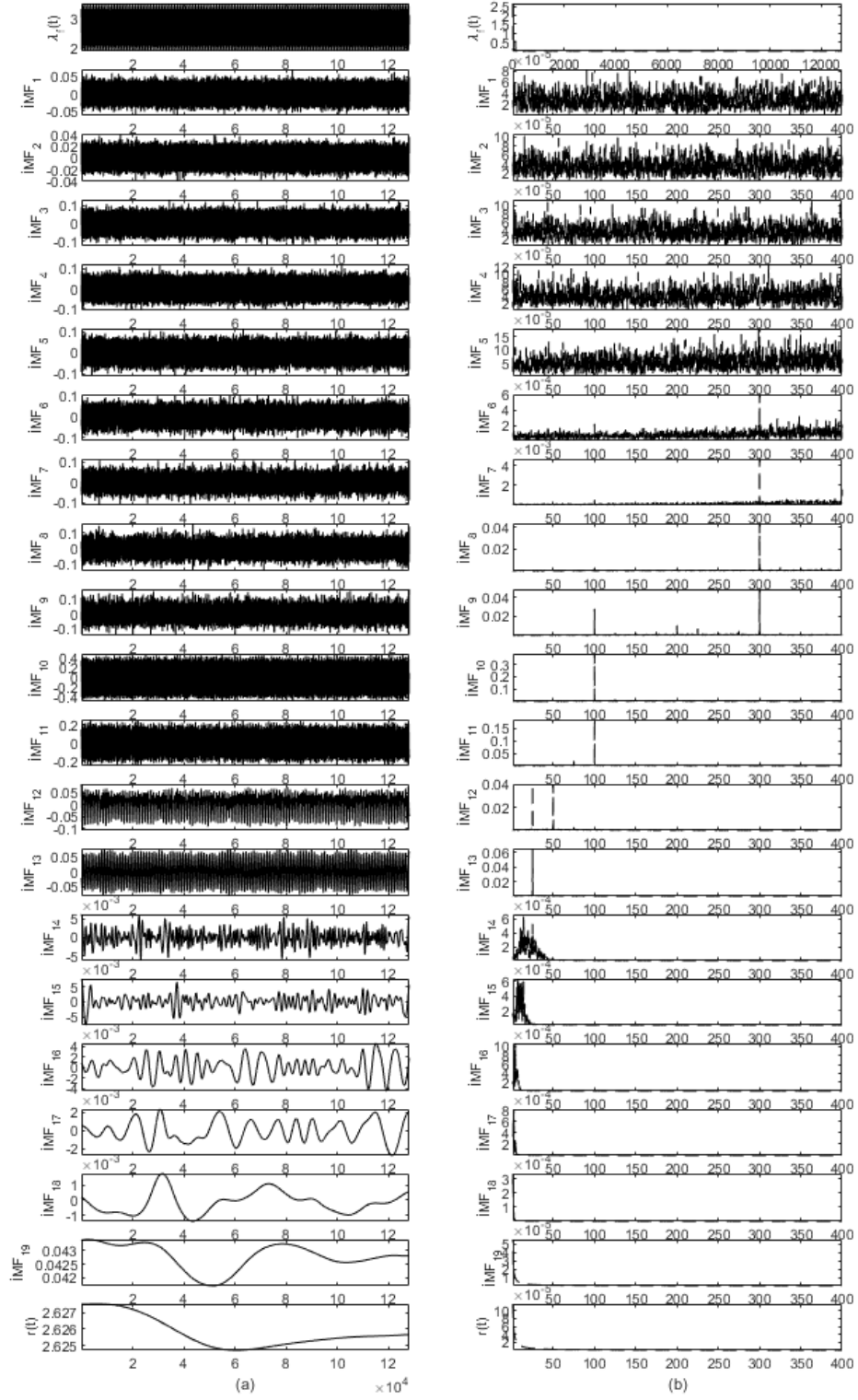
Boşta (0y) Çalışma: Motordan toplanan akı verilerine CEEMDAN algoritması uygulanması sonucunda elde edilen İMF'lerin her biri farklı bir frekans seviyesindedir (Doğan ve Tetik, 2021). Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da da görüldüğü gibi motor akı sinyalleri CEEMDAN ile farklı frekans seviyelerinde ayrıştırılarak İMF'ler elde edilmiştir. Boş çalışma koşulunda toplanan motor akı sinyalinin zaman ve frekans boyutunda CEEMDAN sonuçları S durumu için sırasıyla Şekil 5.7.a ve 5.7.b'de,  $A_1$  durumu için Şekil 5.8.a ve 5.8.b'de ve  $A_2$  durumu için Şekil 5.9.a ve 5.9.b'de görülmektedir.



Şekil 5.7. %0y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri



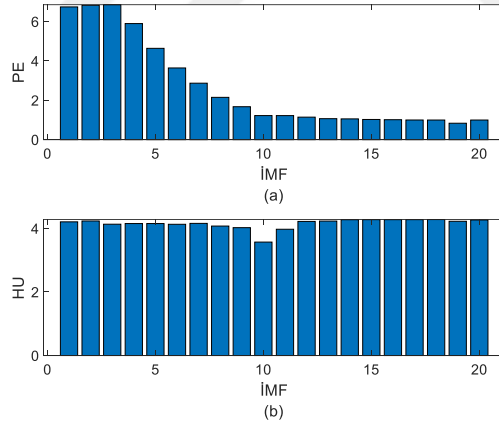
Şekil 5.8. %0y'te  $A_1$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri



Şekil 5.9.%0y'te  $A_2$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri

Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9’da görüldüğü gibi boş çalışma koşulunda motorun akı sinyali sırasıyla S durumu için 20,  $A_1$  durumu için 18 ve  $A_2$  için 19 İMF’ye ayrıştırılmıştır. Şekil 5.7.b’de gösterilen frekans boyutundaki CEEMDAN grafiklerinde sinyalin yüksek frekanstan alçak frekans seviyelerine doğru ayrıştırıldığı görülmektedir. Diğer bir deyişle İMF 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 yüksek frekanslı harmonikleri temsil ederken diğer İMF’ler (300 Hz ve altındaki İMF’ler) alçak frekansların bileşenlerini temsil etmektedir.

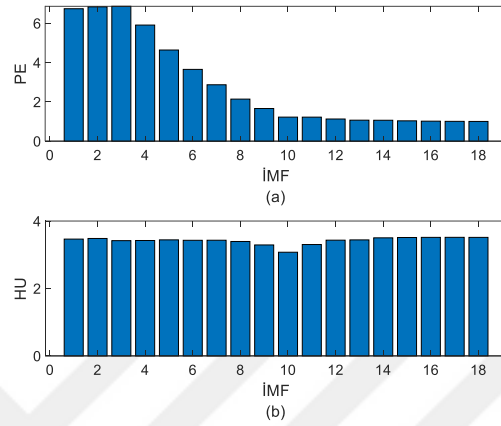
Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9’da verilmiş olan SMSM’nin akı sinyalleriyle elde edilen CEEMDAN grafiklerinden sinyalin birçok frekans bileşeni olduğu görülmektedir. Buna karşın doğru bir arıza teşhisi gerçekleştirebilmek için arıza bileşenlerinin değişimlerinin en yoğun olduğu bölgenin, yani Bölüm 4.1.2’de anlatıldığı gibi  $3f$  arıza bileşeni altındaki harmonik bileşenlerin analiz edilmesi gereklidir. Bu amaçla tez çalışmasında sinyalin yüksek frekanslı harmonik bileşenleri PE ve HU yöntemleri kullanılarak filtrelenmiştir. Şekil 5.10’da S durumunda boş çalışma koşulu için motorun akı sinyallerinin CEEMDAN yöntemi ile elde edilmiş olan İMF’lere uygulanan PE ve HU analiz sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5.10.%0y’te S motor için İMF’lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

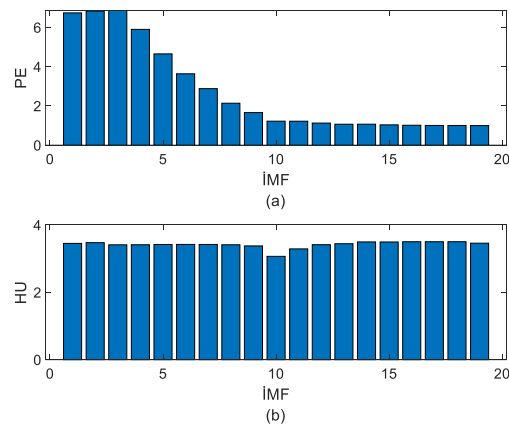
Şekil 5.10.a.’da 3. İMF’den sonra entropi değerlerinin azaldığı görülmektedir. En uygun entropi değerini temsil eden İMF aynı zamanda arıza bölgesinin üst frekans bileşenidir. Bu frekans bileşeninin tespit edilmesi için, literatürde de kullanılan istatistiksel yöntemlerden biri olan HU yöntemi bu tez çalışmasında kullanılmıştır. Şekil 5.10.b.’de 10. İMF’nin ana sinyale uzaklığı en az olan sinyal olduğu görülmektedir. Belirlenen bu

İMF ve sonrasında gelen İMF'lerin tamamı ve artık sinyal toplanarak filtreleme işlemi yapılır. Motorun boş çalışma koşulunda ve  $A_1$  seviyesinde toplanmış olan akı sinyallerine CEEMDAN analizi uygulanmıştır. Elde edilmiş olan İMF'ler PE ve HU yöntemleriyle analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. %0y'te  $A_1$  seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

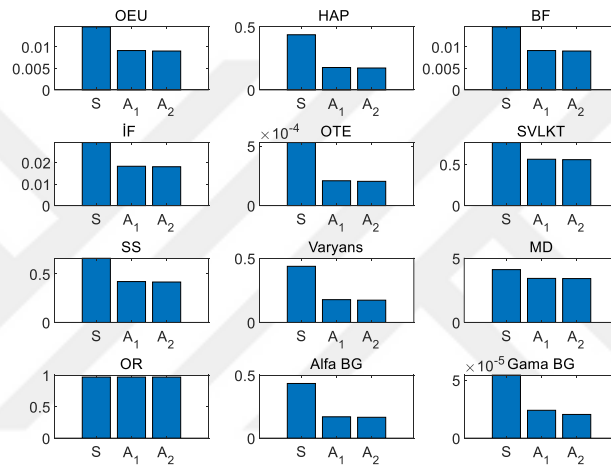
Şekil 5.11.b de verilen HU grafiğine göre ana sinyale en yakın olan İMF, 10. İMF'dir. Bulunan bu İMF ve bu İMF'den sonra gelen İMF'lerin tamamı ve artık sinyal toplanarak filtreleme işlemi yapılır. Şekil 5.12'de motorun boş çalışma koşulunda ve  $A_2$  seviyesinde toplanmış olan akı sinyallerine CEEMDAN analizi uygulanması ile elde edilmiş olan İMF'lere PE ve HU yöntemlerinin uygulanması ile elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.12. %0y'te  $A_2$  seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

Şekil 5.12.b de verilen HU grafiğine göre ana sinyale en yakın olan İMF, 10. İMF’dir. Bulunan bu İMF ve bu İMF’den sonra gelen İMF’lerin tamamı ve artık sinyal toplanarak filtreleme işlemi yapılır.

Filtrelenmiş olan bu sinyale pencereleme işlemi uygulanmıştır. Pencereleme işlemi yapıldıktan sonra her bir pencere için özellik çıkarımı aşamasına geçilmiştir. Filtrelenmiş ve pencerelenmiş sinyalin 12 farklı sinyal özelliği hesaplanmıştır. Hesaplanan özelliklerin bar grafikleri Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13. %0y için filtrelenmiş ve pencerelenmiş sinyalden elde edilen özellik bar grafikleri

Motorun boş çalışma koşulu için filtrelenmiş akı sinyallerini temsil eden Şekil 5.13’de hesaplanan özelliklerin motor durumlarına göre değerleri aşağıda verilmiştir: OEU sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.0146, 0.0091 ve 0.0090’dır. HAP sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.4373, 0.1775 ve 0.1735’dir. BF sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.0146, 0.0091 ve 0.0090’dır. İF sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.0292, 0.0182 ve 0.0180’dır. OTE sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.00052, 0.000203 ve 0.000208’dir. SVLKT sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.7647, 0.5624 ve 0.5573’tür. SS sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.6613, 0.4213 ve 0.4165’tir. Varyans sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.4373, 0.1775 ve 0.1735’tir. MD sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 4.1159, 3.4317 ve 3.4183’tür. OR sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> için sırasıyla 0.969221, 0.969299 ve 0.968938’dir. Alfa BG sinyal özelliği; S, A<sub>1</sub> ve

$A_2$  için sırasıyla 0.4338, 0.1693 ve 0.1654'tür. Gama BG sinyal özelliği;  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$  için sırasıyla  $5.42 \times 10^{-5}$ ,  $2.39 \times 10^{-5}$  ve  $2.03 \times 10^{-5}$ 'tir.

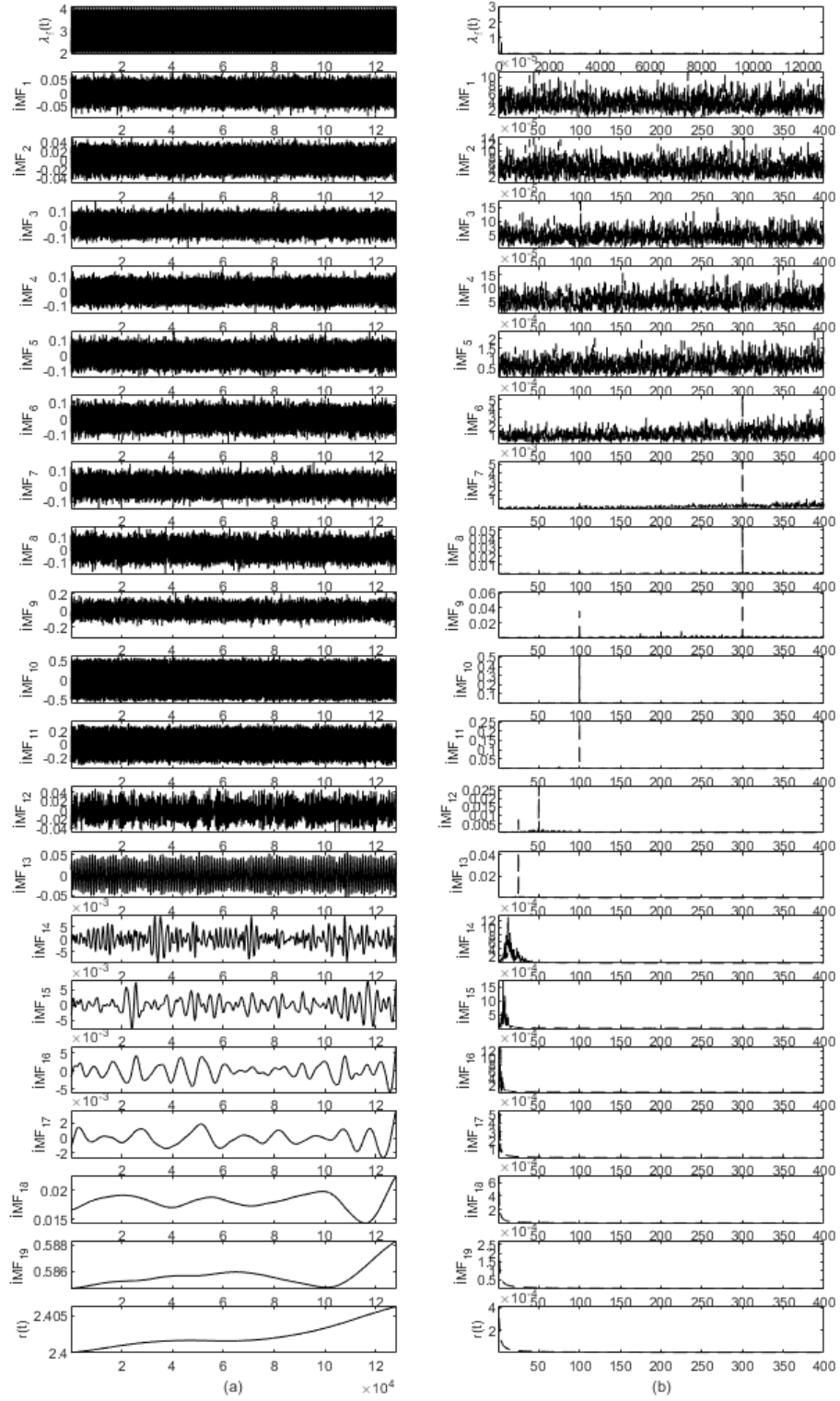
Her bir pencere için özellik çıkarma işlemi yapıldıktan sonra özellik matrisi oluşturulmuştur. Özellik matrisi DVM ağına beslendiğinde elde edilen sınıflandırma sonucu Şekil 5.14'de gösterilmiştir.

|   |                     |    |    |
|---|---------------------|----|----|
| 0 | 80                  |    |    |
| 1 |                     | 80 |    |
| 2 |                     | 1  | 79 |
|   | 0                   | 1  | 2  |
|   | Tahmin Edilen Sınıf |    |    |

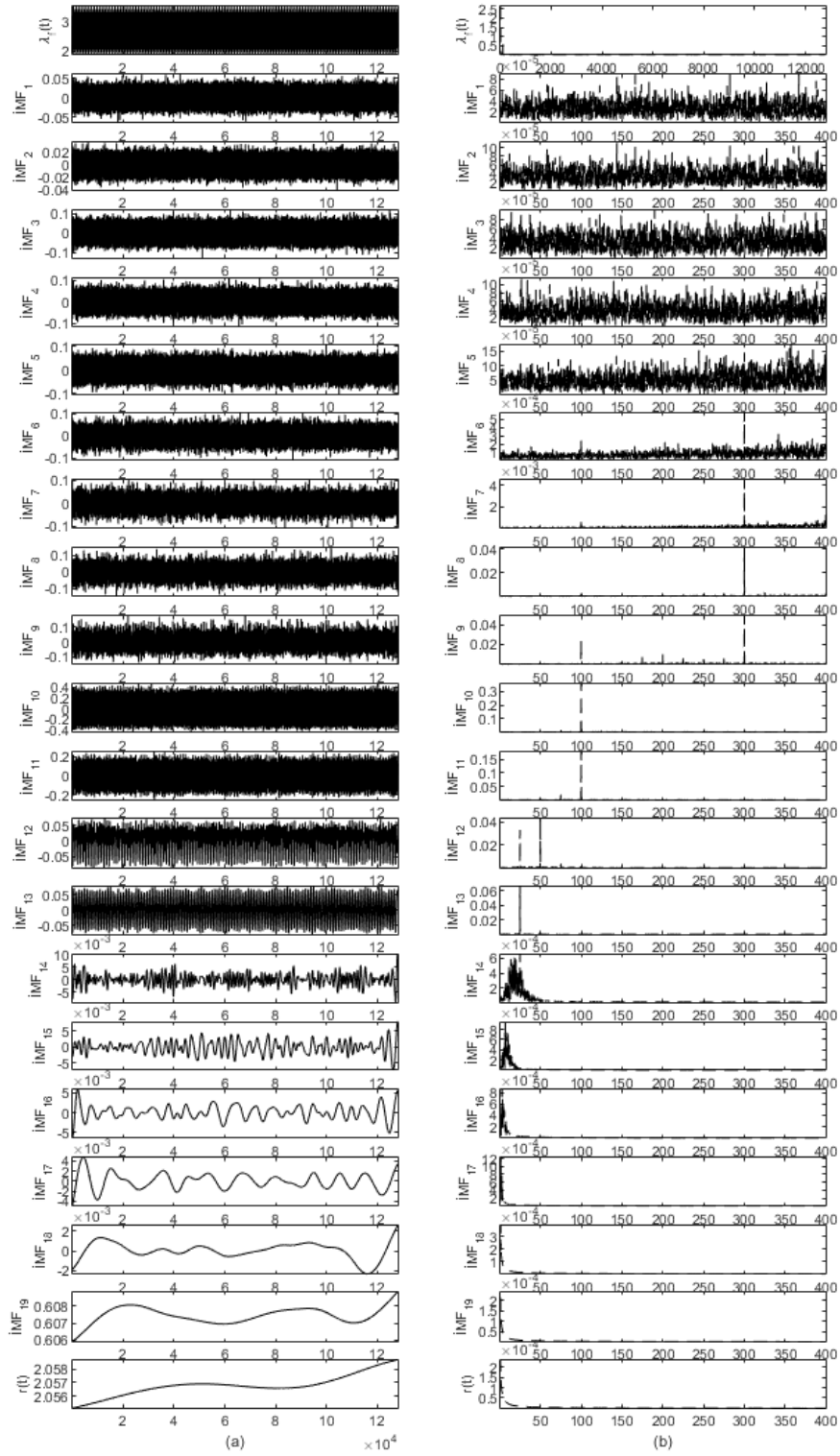
Şekil 5.14. %0y için hata matrisi

Şekil 5.14'de verilmiş olan hata matrisinde 0 etiketi  $S$  durumunu, 1 etiketi  $A_1$  durumunu ve 2 etiketi  $A_2$  durumunu temsil etmektedir. Elde edilmiş olan hata matrisi incelendiğinde  $S$  ve  $A_1$  durumları için %100 başarı elde edilmişken,  $A_2$  durumunda 80 gözlemde 79'u doğru sınıflandırılırken 1 gözlem  $A_1$  olarak sınıfına dahil edilmiş olup yanlış sınıflandırma yapılmıştır. Kararlı durum boş çalışma koşulunda toplam başarı sonucu %99.6 olarak bulunmuştur.

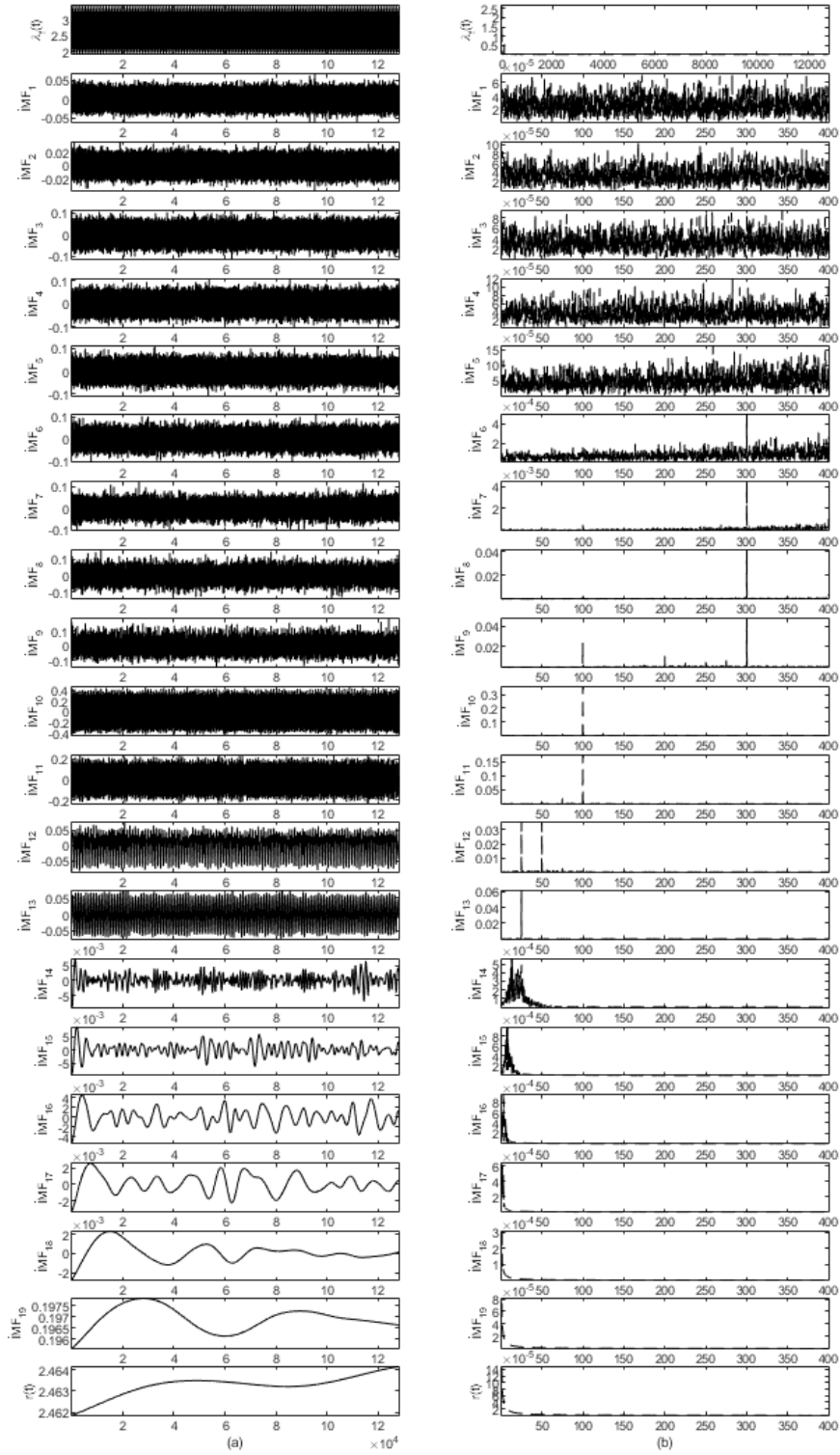
Tam Yükte Çalışma: Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17'de sırası ile tam yük çalışma koşulunda  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$ 'ye ait motor akı sinyallerinin CEEMDAN yoluyla elde edilen İMF'lerin zaman ve frekans boyutundaki grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.15. %100’te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri



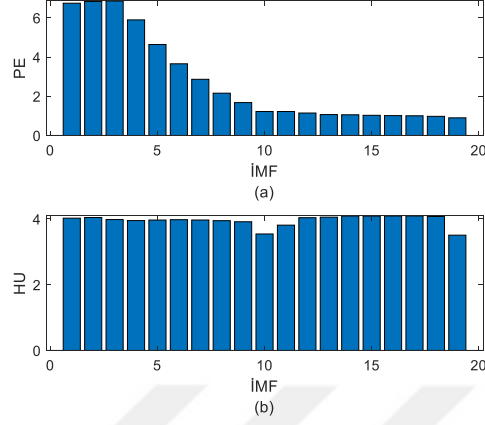
Şekil 5.16. %100y'te  $A_1$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri



Şekil 5.17. %100’te  $A_2$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri

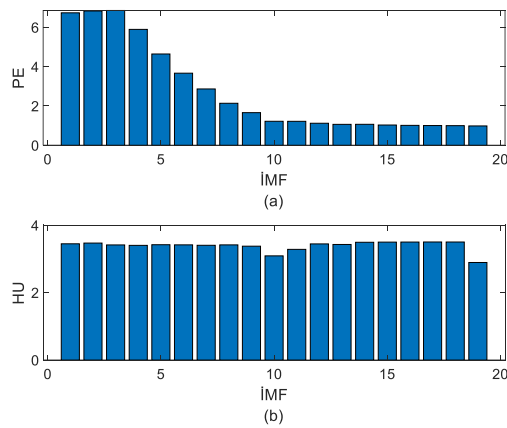
Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17’de görüldüğü gibi tam yük çalışma koşulunda sağlam motorun akı sinyali sırasıyla  $S$  durum için 19 adet İMF’ye,  $A_1$  için 19 adet İMF’ye ve  $A_2$  için 19

adet İMF'ye ayrıştırılmıştır. Şekil 5.18'de CEEMDAN yöntemi ile elde edilmiş İMF'lere uygulanan PE ve HU yöntemleri sonucu elde edilen grafikler verilmiştir.



Şekil 5.18. %100y'te S seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

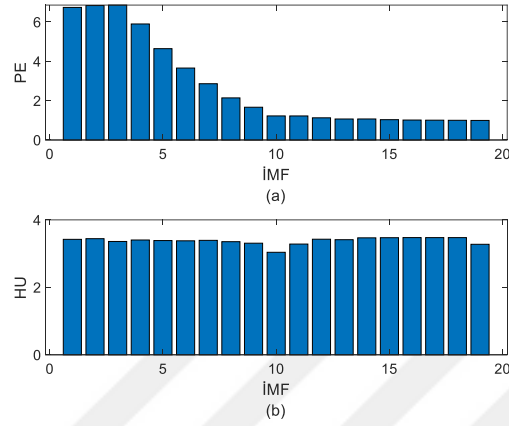
Şekil 5.18.a ve 5.19.b'de tam yük çalışma koşulunda ve S durumunda elde edilmiş olan grafikler göz önünde bulundurulduğunda ana sinyalden en uzak olan 10. İMF ve sonrasındaki İMF'ler toplanarak filtreleme işlemi yapılmıştır. Şekil 5.19'da motordan tam yük çalışma koşulunda ve  $A_1$  seviyesinde toplanan akı sinyallerden CEEMDAN yöntemi ile elde edilmiş olan İMF'lere PE ve HU uygulanması sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir.



Şekil 5.19. %100y'te  $A_1$  seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

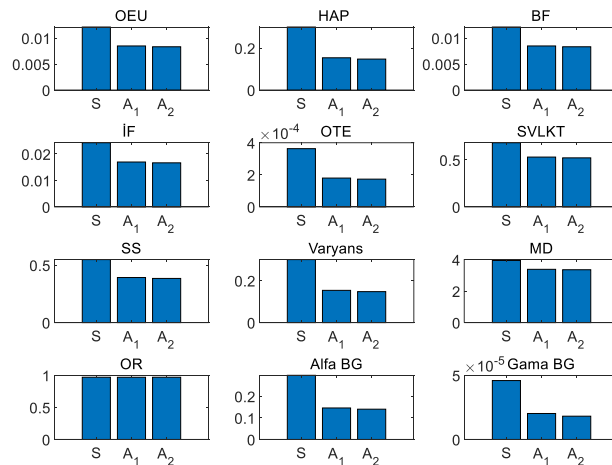
Şekil 5.19.a ve 5.19.b'de verilmiş olan PE ve HU grafikleri göz önünde bulundurulduğunda tam yük çalışma koşulunda ve  $A_1$  seviyesi için 10. İMF ve

devamındaki İMF'ler toplanarak filtreleme işlemi yapılmıştır. Şekil 5.20'de tam yük çalışma koşulunda ve  $A_2$  seviyesinde motordan toplanan akı sinyallerine CEEMDAN uygulanmasıyla elde edilen İMF'lerin PE ve HD analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.20. %100y'te  $A_2$  seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

Şekil 5.20.a ve 5.20.b'de verilen tam yük çalışma koşulu için  $A_2$  seviyesindeki motor akı sinyallerinin İMF'lerinden elde edilmiş PE ve HU grafikleri incelendiğinde ana sinyale en uzak olan İMF 10. İMF'dir. 10. İMF, sonrasındaki İMF'ler ve artık sinyal toplanarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtrelenmiş sinyalin sinyal özellikleri Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21. %100y için filtrelenmiş ve pencerelemiş sinyalden elde edilen özellik bar grafikleri

Şekil 5.22’de tam yük koşulu için oluşturulmuş özellik vektörünün DVM’ye beslenmesi ile oluşturulmuş hata matrisi gösterilmiştir.

|   |                     |    |    |
|---|---------------------|----|----|
| 0 | 80                  |    |    |
| 1 |                     | 80 |    |
| 2 |                     |    | 80 |
|   | 0                   | 1  | 2  |
|   | Tahmin Edilen Sınıf |    |    |

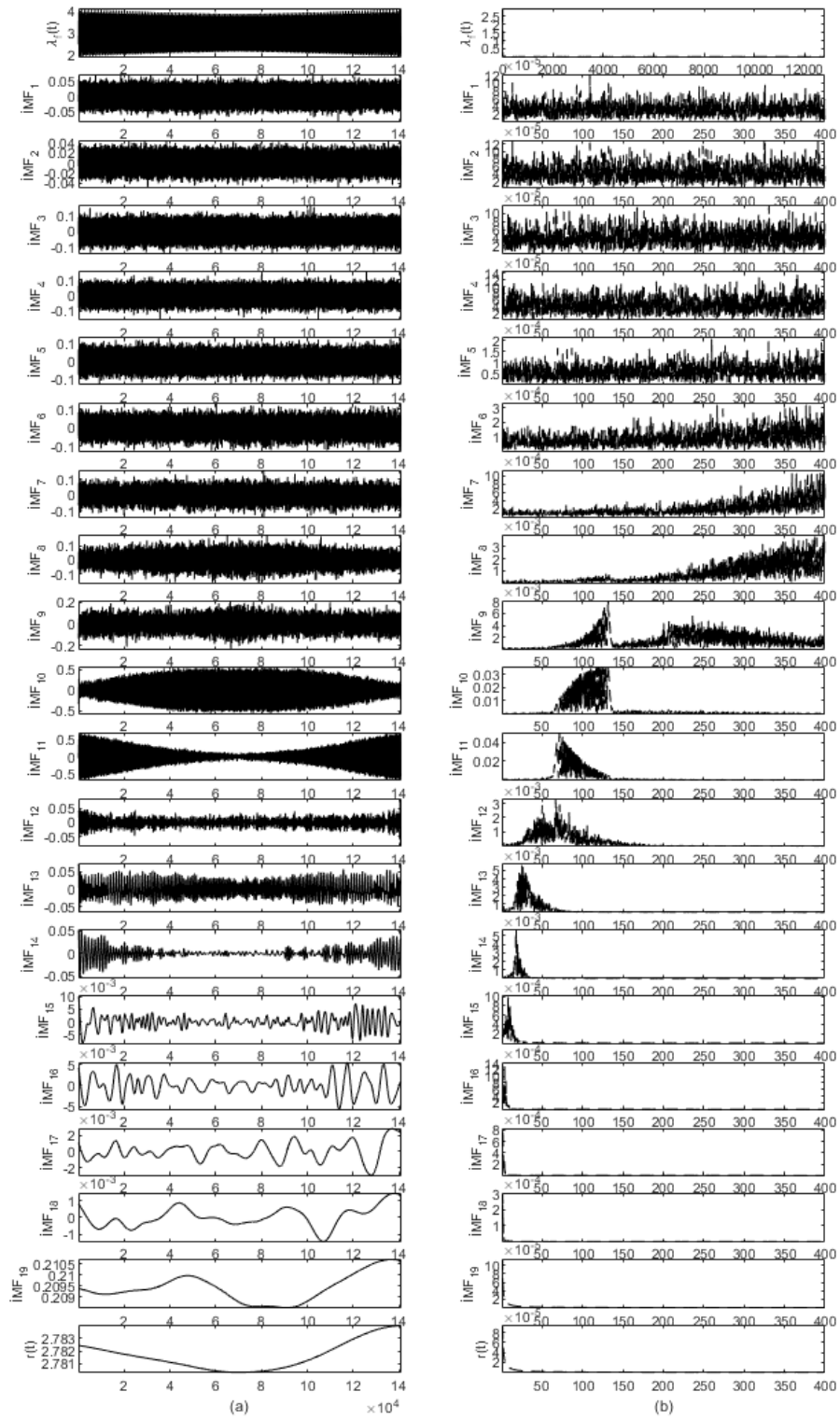
Şekil 5.22. %100y için hata matrisi

Şekil 5.22’de verilmiş olan hata matrisinde görüldüğü gibi  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$  için sınıflandırma işlemi %100 başarı ile gerçekleştirilmiştir.

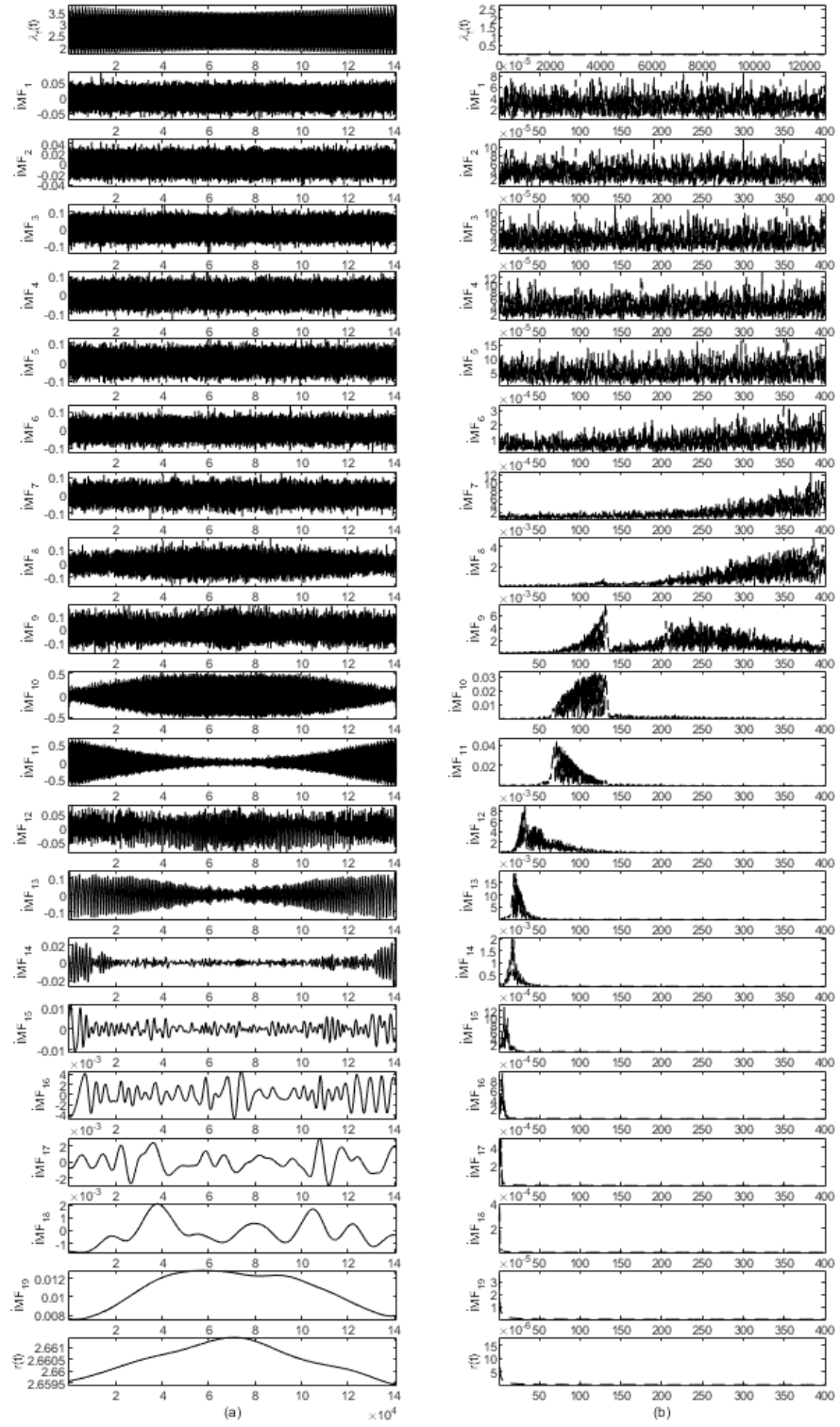
#### 5.4.2. Dinamik çalışma

Dinamik çalışmada Dinamik 1 ve Dinamik 2 olmak üzere iki farklı çalışma profili uygulanmıştır.

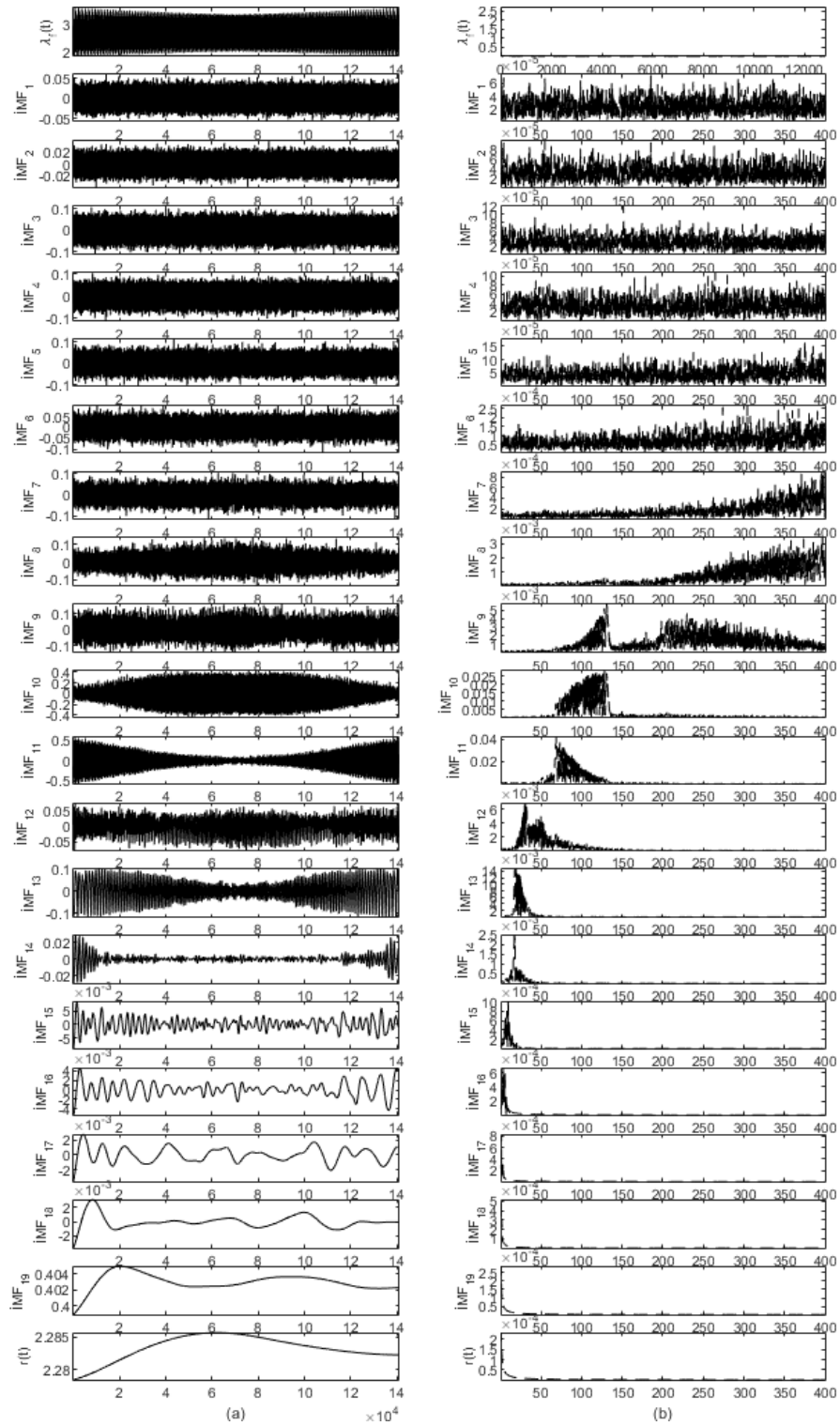
Dinamik 1 – Tam yükte çalışma: Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’de sırası ile tam yük çalışma koşulunda  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$ ’ye ait motor akı sinyallerinin CEEMDAN yoluyla elde edilen İMF’lerinin zaman ve frekans boyutundaki grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.23. %100y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri



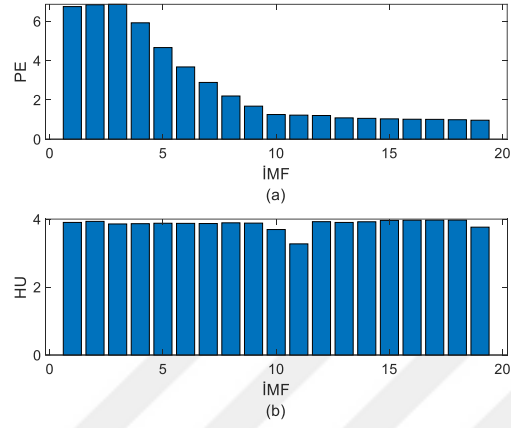
Şekil 5.24. %100’te  $A_1$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri



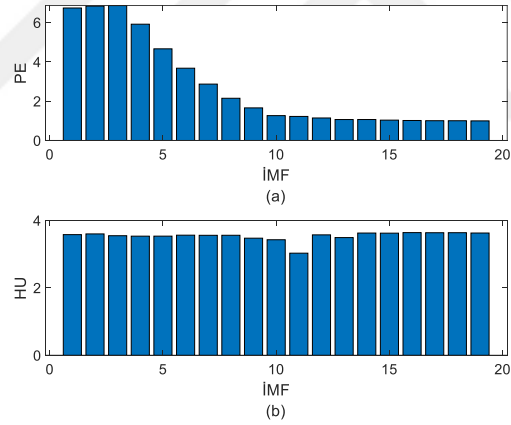
Şekil 5.25. %100’te  $A_2$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri

Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’de görüldüğü gibi tam yük çalışma koşulunda sağlam motorun akı sinyali sırasıyla S durum için 19 adet İMF’ye,  $A_1$  için 19 adet İMF’ye ve  $A_2$  için 19

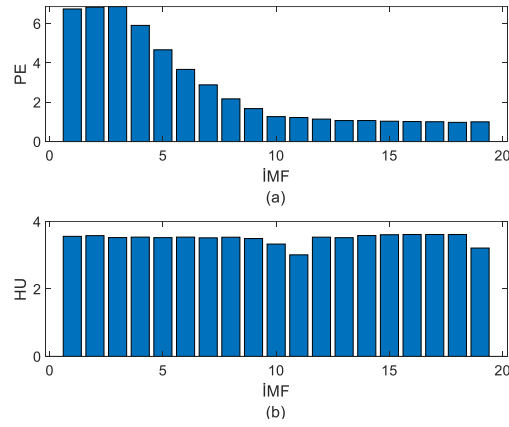
adet İMF'ye ayrıştırılmıştır. CEEMDAN yöntemi ile elde edilmiş İMF'lere uygulanan PE ve HU yöntemleri ile elde edilen grafik sonuçları  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$  için sırasıyla Şekil 5.26, 5.27 ve 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.26. %100y'te  $S$  seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

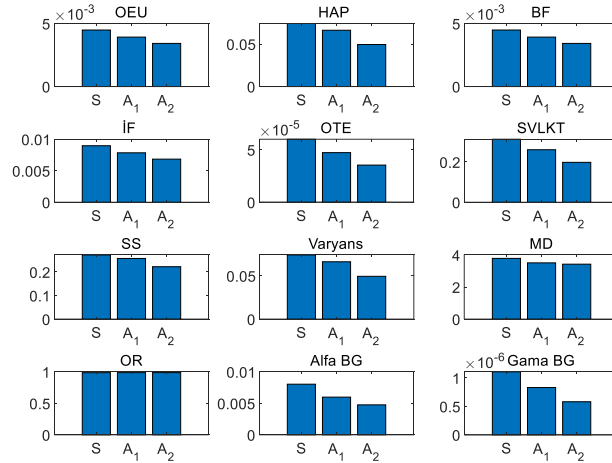


Şekil 5.27. %100y'te  $A_1$  seviyesinde İMF'lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği



Şekil 5.28. %100y’te  $A_2$  seviyesinde İMF’lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

Şekil 5.26, 5.27 ve 5.28 incelendiğinde ana sinyale en yakın olan İMF, S,  $A_1$  ve  $A_2$  durumu içinde 11. İMF olarak bulunmuştur. Her bir durum için seçilen İMF, sonrasındaki İMF’ler ve artık sinyal toplanarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtreleme işleminden sonra elde edilen toplam İMF sinyali pencerelenmiş ve özellik matrisi oluşturmak için zaman ve frekans boyutunda sinyal özellikleri çıkartılmıştır. Elde edilen sinyal özelliklerinin bar grafiği Şekil 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.29. %100y için filtrelenmiş sinyalden elde edilen özellik bar grafikleri

Şekil 5.30’da pencerleme ve özellik çıkarma işlemi yapıldıktan sonra oluşturulan özellik matrisinin DVM’ye beslenmesi ile elde edilen sınıflandırma sonucu gösterilmektedir.

|   |                     |    |    |
|---|---------------------|----|----|
| 0 | 80                  |    |    |
| 1 |                     | 75 | 5  |
| 2 |                     | 3  | 77 |
|   | 0                   | 1  | 2  |
|   | Tahmin Edilen Sınıf |    |    |

Şekil 5.30. %100y için hata matrisi

Dinamik 1 çalışma profilinde tam yükte çalıştırılan motordan alınan verilerin sınıflandırılması sonucunda, Şekil 5.30’da da görüldüğü gibi S için %100 başarı elde edilmiştir,  $A_1$  için 80 gözlemden, 75 gözlem doğru sınıflandırılırken 5 gözlem  $A_2$  olarak sınıflandırılmış ve  $A_2$  için 80 gözlemden, 77 gözlem doğru sınıflandırılırken 3 gözlem  $A_1$  olarak sınıflandırılmıştır. Toplam başarı sonucu %96.7 olarak bulunmuştur.

Dinamik 1 – Boşta çalışma: Şekil 5.31’de Dinamik 1 çalışma profilinde boşta çalışan motor için elde edilmiş olan filtrelenmiş ve pencerelenmiş sinyale uygulanan özellik çıkartma yöntemleri ile elde edilmiş olan özellik vektörünün DVM’ye uygulanması ile elde edilen hata matrisi verilmiştir.

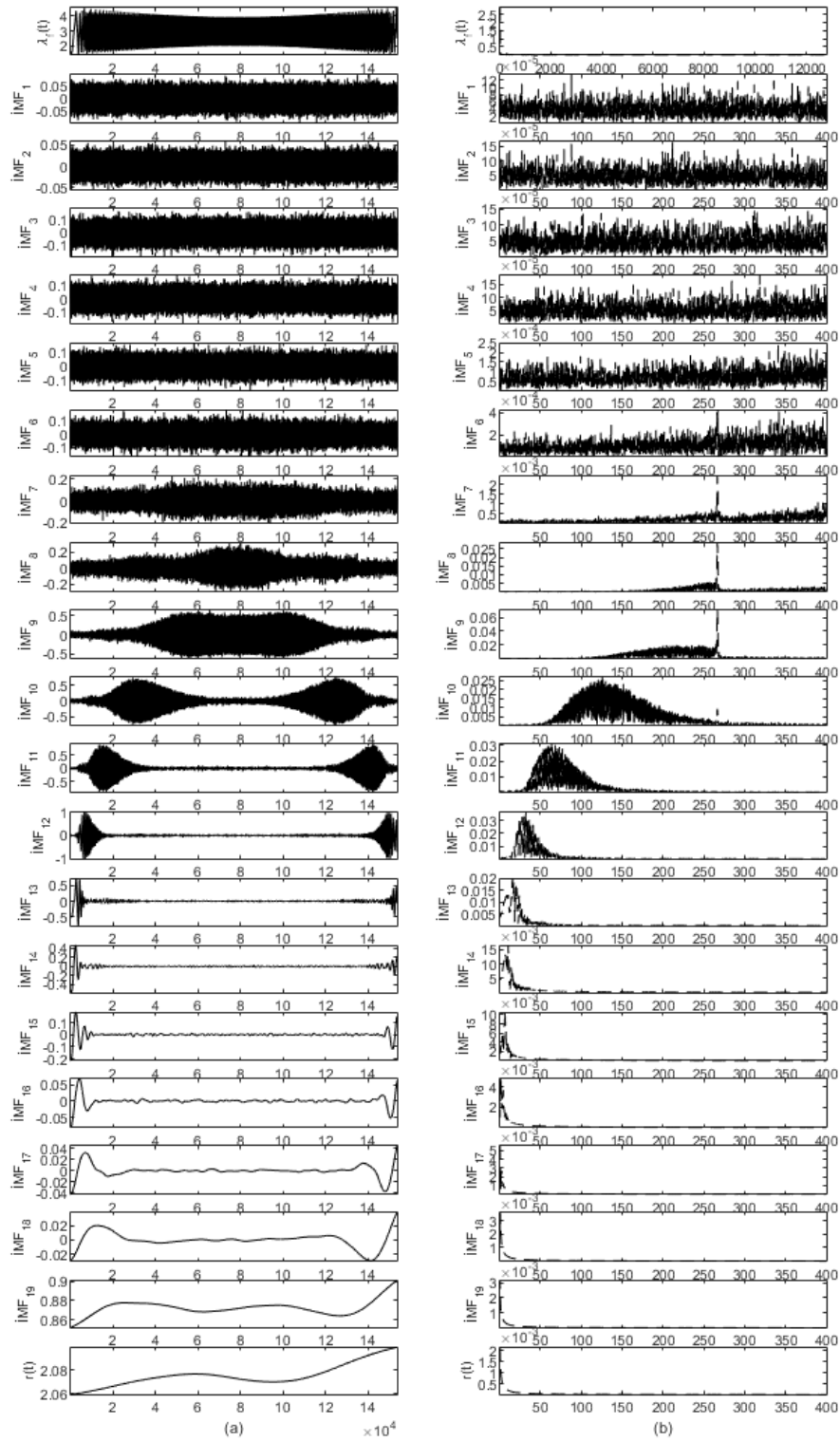
|   |                     |    |    |
|---|---------------------|----|----|
| 0 | 80                  |    |    |
| 1 |                     | 77 | 3  |
| 2 |                     | 7  | 73 |
|   | 0                   | 1  | 2  |
|   | Tahmin Edilen Sınıf |    |    |

Şekil 5.31. %0y’te hata matrisi

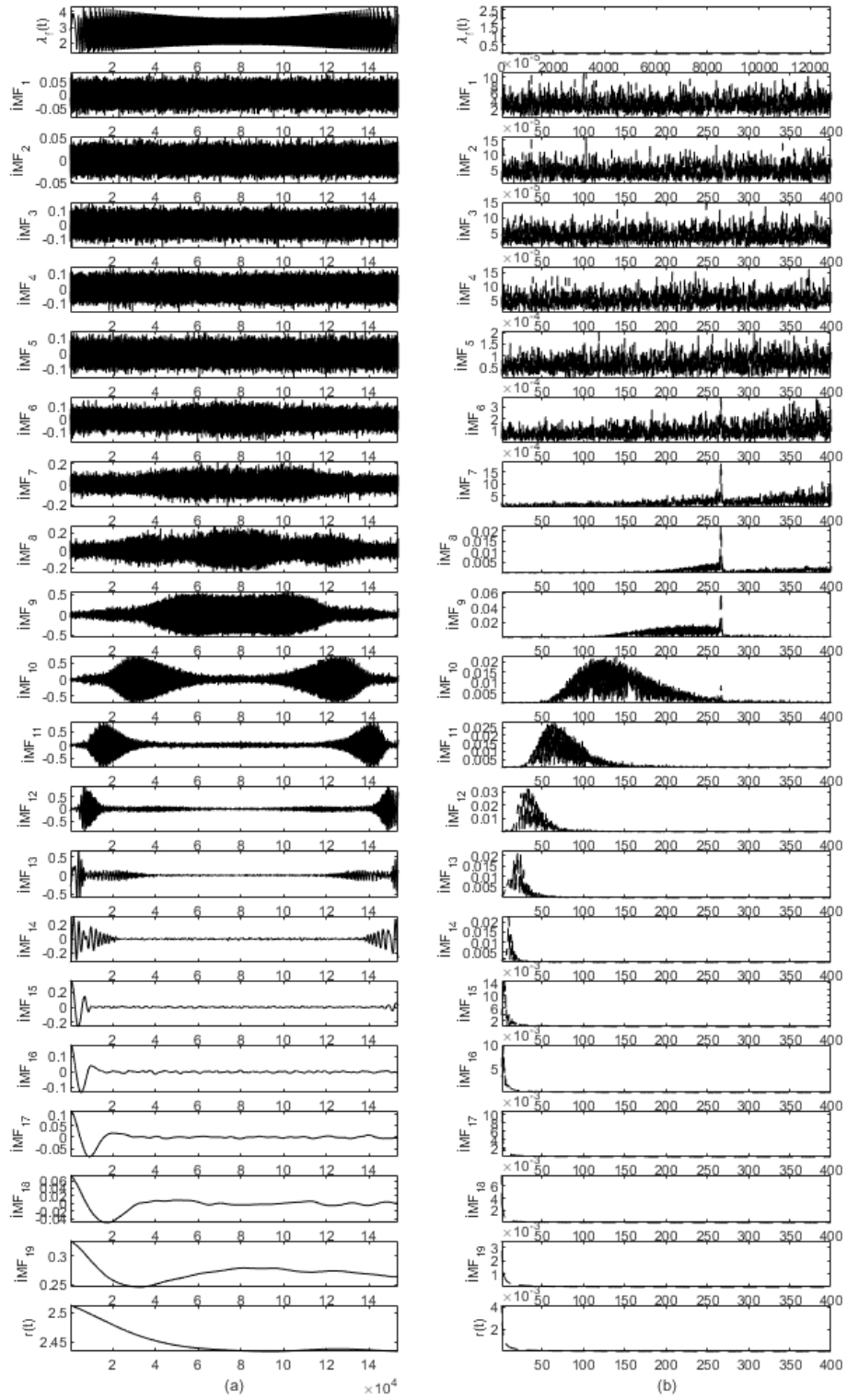
Şekil 5.31’de görüldüğü gibi S durum için %100 başarı ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.  $A_1$  için 80 tane gözlemden, 77 gözlem doğru sınıflandırılmışken 3 gözlem  $A_2$  olarak sınıflandırılmıştır ve  $A_2$  için 80 tane gözlemden, 73 gözlem doğru sınıflandırılırken 7 gözlem  $A_1$  olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işleminin toplam doğruluğu %95.8 olarak bulunmuştur.

Dinamik 2 – Tam yükte çalışma: şekil 5.32, 5.33 ve 5.34’de sırası ile tam yük çalışma koşulunda  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$ ’ye ait motor akı sinyallerinin CEEMDAN yoluyla elde edilen İMF’lerin zaman ve frekans boyutundaki grafikleri verilmiştir.

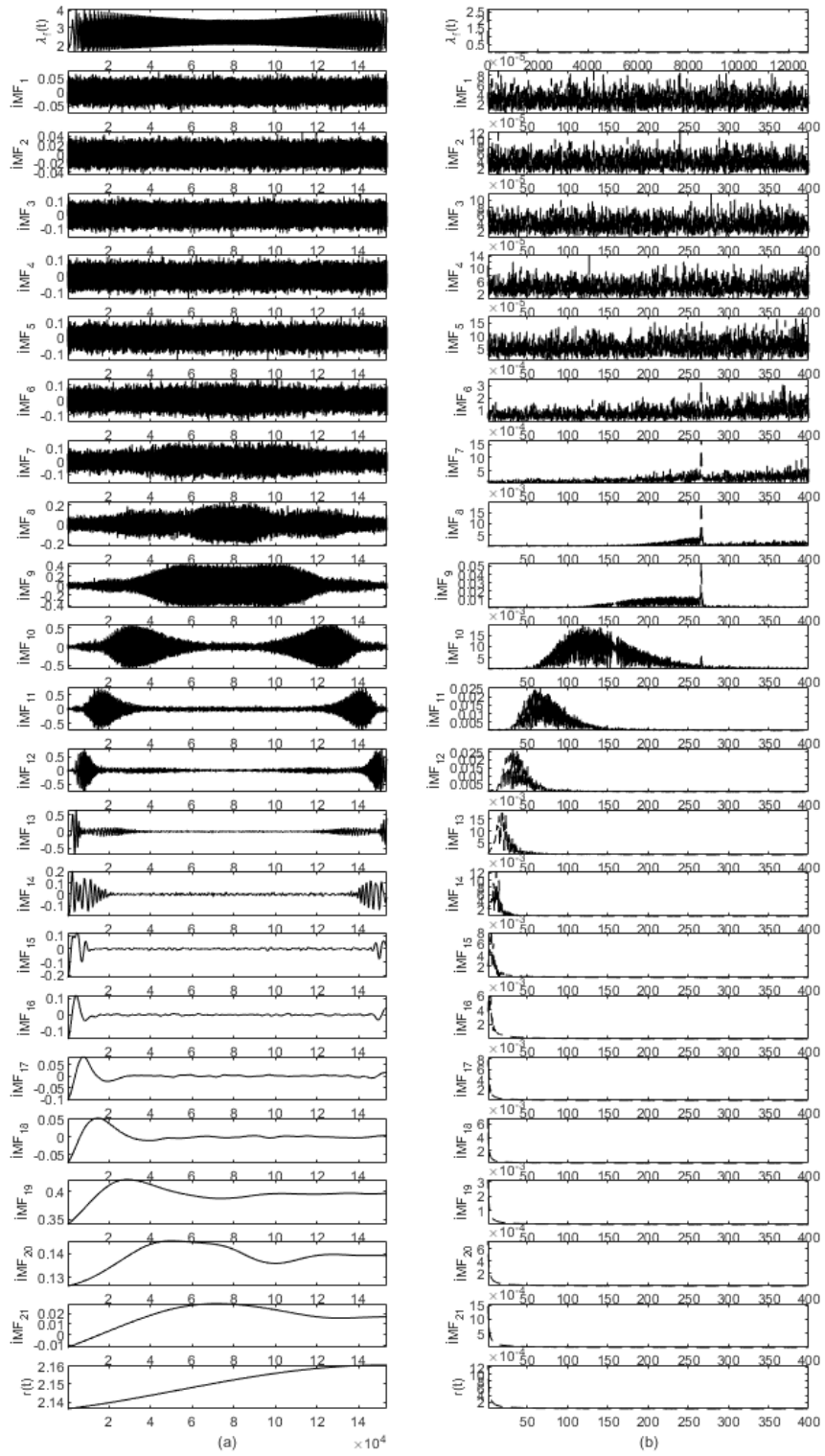




Şekil 5.32. %100y'te S motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri

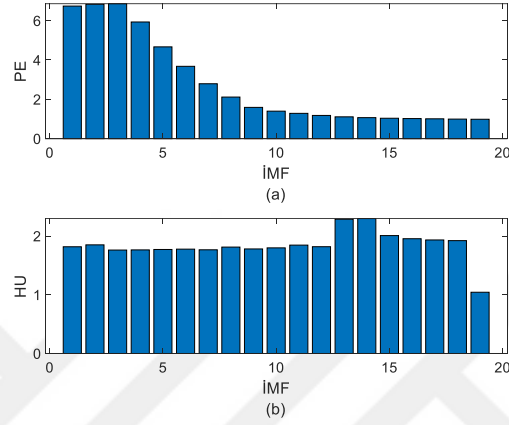


Şekil 5.33. %100’te  $A_1$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri

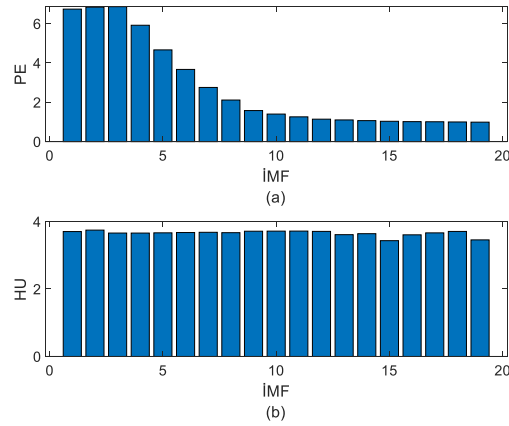


Şekil 5.34. %100y'te  $A_2$  motor için zaman ve frekans boyutunda analiz grafikleri: (a) zaman boyutunda analiz grafikleri, (b) frekans boyutunda analiz grafikleri

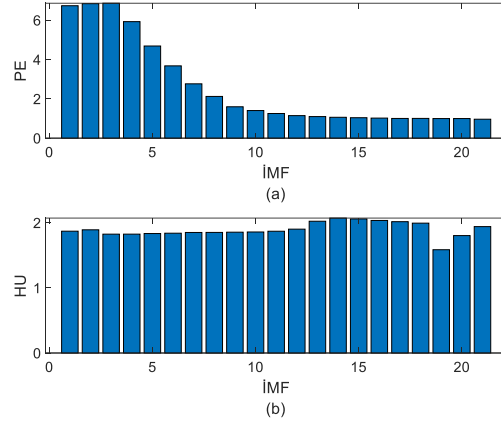
Şekil 5.32, 5.33 ve 5.34’de görüldüğü gibi tam yük çalışma koşulunda sağlam motorun akı sinyali sırasıyla S durum için 19 adet İMF’ye,  $A_1$  için 19 adet İMF’ye ve  $A_2$  için 21 adet İMF’ye ayrıştırılmıştır. CEEMDAN yöntemi ile elde edilmiş İMF’lere uygulanan PE ve HU yöntemleri ile elde edilen grafik sonuçları S,  $A_1$  ve  $A_2$  için sırasıyla Şekil 5.35, 5.36 ve 5.37’de verilmiştir.



Şekil 5.35. %100y’te S seviyesinde İMF’lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

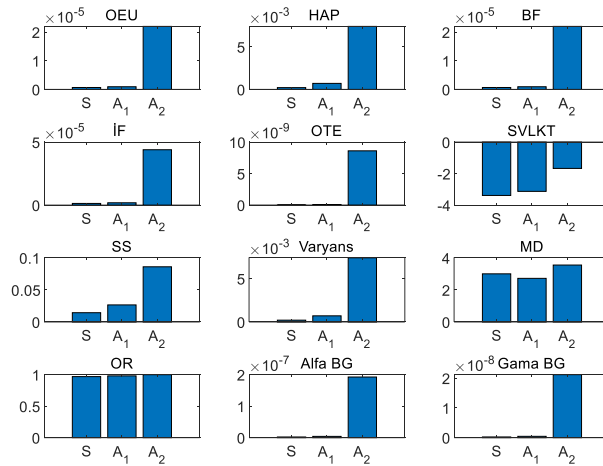


Şekil 5.36. %100y’te  $A_1$  seviyesinde İMF’lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği



Şekil 5.37. %100y’te  $A_2$  seviyesinde İMF’lerin PE ve HU analiz grafikleri: (a) PE analiz grafiği (b) HU analiz grafiği

Şekil 5.35, 5.36 ve 5.37 incelendiğinde ana sinyale en yakın olan İMF  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$  durumu için sırasıyla 19. İMF, 15. İMF ve 19. İMF olarak bulunmuştur. Her bir durum için seçilen İMF, sonrasındaki İMF’ler ve artık sinyal toplanarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtreleme işleminden sonra elde edilen toplam İMF sinyali pencerelenmiş ve özellik matrisi oluşturmak için zaman ve frekans boyutunda sinyal özellikleri çıkartılmıştır. Elde edilen sinyal özelliklerinin bar grafiği Şekil 5.38’de verilmiştir.



Şekil 5.38. %100y için filtrelenmiş sinyalden elde edilen özellik bar grafikleri

Pencereleme ve özellik çıkarım işlemi yapıldıktan sonra oluşturulan özellik matrisinin DVM’ye beslenmesi ile elde edilen sınıflandırma sonucu Şekil 5.39’da gösterilmektedir.

|   |                     |    |    |
|---|---------------------|----|----|
| 0 | 80                  |    |    |
| 1 |                     | 80 |    |
| 2 | 2                   |    | 78 |
|   | 0                   | 1  | 2  |
|   | Tahmin Edilen Sınıf |    |    |

Şekil 5.39. %100y için hata matrisi

Şekil 5.39’da görüldüğü gibi  $S$  ve  $A_1$  durumları için %100 başarı ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir ve  $A_2$  için 78 gözlem doğru sınıflandırılırken 2 gözlem  $S$  olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işleminin toplam doğruluğu %99.2 olarak hesaplanmıştır.

Dinamik 2 – Boşta çalışma: Şekil 5.40’da Dinamik 2 çalışma profilinde boşta çalışan motor için elde edilmiş olan filtrelenmiş ve pencerelenmiş sinyale uygulanan özellik çıkartma yöntemleri ile elde edilmiş olan özellik vektörünün DVM’ye uygulanması ile elde edilen hata matrisi verilmiştir.

|   |                     |    |    |
|---|---------------------|----|----|
| 0 | 76                  | 3  | 1  |
| 1 | 1                   | 76 | 3  |
| 2 |                     | 1  | 79 |
|   | 0                   | 1  | 2  |
|   | Tahmin Edilen Sınıf |    |    |

Şekil 5.40. %0y’te hata matrisi

Şekil 5.40’da görüldüğü gibi  $S$  seviyesi için 80 gözlemden 76 tanesi doğru sınıflandırılırken 3 tanesi  $A_1$  ve 1 tanesi  $A_2$  olarak sınıflandırılarak toplam 4 tane gözlem yanlış sınıflandırılmıştır.  $A_1$  seviyesi için 80 gözlemden 76 tanesi doğru sınıflandırılırken 3 tanesi  $A_2$  ve 1 tanesi  $S$  olarak sınıflandırılmış ve toplam 4 tane gözlem yanlış sınıflandırılmıştır.  $A_2$  için 80 gözlemden 79 tanesi doğru sınıflandırılırken 1 tanesi  $A_1$  olarak yanlış sınıflandırılmıştır. Toplam başarı sonucu %96.3 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.2’de bu tez çalışmasında elde edilmiş başarı sonuçlarının tablosu bulunmaktadır. Çizelge 5.3’de ise literatürde stator sargı arızası tespiti üzerine yapılmış olan çalışmalarda DVM yöntemini kullanarak sınıflandırma gerçekleştirilmiş çalışmaların sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.2. Tez çalışmasında elde edilen DVM sonuçları

|                          | Kararlı Çalışma Koşulu | Dinamik 1 Çalışma Koşulu | Dinamik 2 Çalışma Koşulu |
|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Boşta Çalışma</b>     | %99.6                  | %95.8                    | %96.3                    |
| <b>Tam Yükte Çalışma</b> | %100                   | %96.7                    | %99.2                    |

Çizelge 5.3. Literatürde stator sargı arızası tespiti üzerine yapılmış çalışma sonuçları

| Yazar(lar)                       | Sınıflandırıcı Modeli | Doğruluk Değeri |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Senanayaka ve Robbersmyr, (2018) | DVM                   | %94             |
| Liang ve ark., (2019)            | DVM                   | %100            |
| Pietrzak ve Wolkiewicz, (2021).  | DVM                   | %99.4           |
| Shih ve ark., (2022)             | DVM                   | %99.63 - %99.74 |
| Li ve ark., (2021)               | DVM                   | %82.3           |
| Lennartsson, (2021)              | DVM                   | %90 - %98.2     |

Çizelge 5.2 incelendiğinde boşta ve tam yükte çalışmada tüm çalışma koşulları için %95’in üzerinde başarı elde edildiği görülmektedir. Çizelge 5.3’de verilmiş olan literatürdeki çalışma sonuçları incelendiğinde bu tez çalışmasında elde edilmiş olan sonuçların yüksek başarıya sahip olduğu görülmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik makinelerinde arıza teşhisinin erken yapılması arızanın ilerlemesini engellemek, farklı arızalara neden olmasının önüne geçmek, makinenin bakım maliyetlerini azaltmak hem işletme maliyetlerini azaltmak hem de üretim maliyetlerini azaltmak gibi sebeplerden dolayı önem arz etmektedir. SMSM'ler verimlilikleri, kolay kontrol edilebilmeleri, basit yapıları, küçük boyuta sahip olmaları gibi nedenlerden dolayı birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu motorlarda meydana gelecek arızaların izlenmesi önemlidir.

Bu tez çalışmasında SMSM'lerin stator sargılarında meydana gelen kısa devre arızasının teşhisi ve tespiti için ayırıştırma ve makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem önerilmiştir.  $S$ ,  $A_1$  ve  $A_2$  seviyelerinde kararlı hız profili ve dinamik hız profilleri kullanılarak hem boşta hem de tam yükte deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dinamik hız profilleri Dinamik 1 ve Dinamik 2 olmak üzere iki hız profilinden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada motordan akım, hız ve akı verileri toplanmıştır ve akı verisinin analizi MATLAB ortamında yapılarak teşhis işlemi gerçekleştirilmiştir.

CEEMDAN yöntemi kullanılarak, ana sinyal farklı frekans seviyelerindeki İMF'lerine ayırıştırılmıştır. Elde edilen İMF'lerin yüksek frekans seviyesinden alçak frekans seviyesine doğru ayırıştırıldığı gözlemlenmiştir. Stator sargı arıza bilgisinin baskın olduğu frekans  $3f$  (300 Hz) bileşenidir.  $3f$  frekans bileşeninde sürücü arızalarının işareti de bulunabileceği için hatalı arıza tespitinin önüne geçmek amacıyla bu çalışmada  $3f$  frekans bileşeni ve bu frekansın altındaki frekans bileşenleri incelenmiştir. Alçak frekans olarak adlandırılan bu frekans bölgesinin elde edilmesi için filtreleme uygulanmıştır. Filtreleme işlemi için literatürde de tercih edilen PE ve HU yöntemleri kullanılmış, yüksek frekanslı İMF'ler çıkarılarak alçak frekanslı İMF'ler toplanmıştır. Elde edilen toplam İMF'nin pencereleme işlemi yapılmıştır. Her pencere için zaman ve frekans boyutlarında istatistiksel yöntemler kullanılarak özellik çıkartma işlemi gerçekleştirilmiştir. 12 farklı özellik kullanılarak oluşturulan özellik matrisi sınıflandırma yapılması için DVM'ye beslenmiştir.

Kararlı çalışma profilinde boşta çalışma ve tam yükte çalışma için doğruluk sonuçları sırasıyla %99.6 ve %100 başarı elde edilmiştir. Dinamik 1 çalışma koşulunda tam yükte

Çalışma ve boşta çalışma için sırasıyla %96.7 ve %95.8 doğruluk değerlerine ulaşılmıştır. Dinamik 2 alışma koşulu için tam yükte çalışma ve boşta çalışma için sırasıyla %100 ve %96.3 olarak bulunmuştur. Literatürdeki deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslandığında önerilen yöntemin yüksek başarıma sahip olduğu görülmektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda sıcaklık, ses vb. parametreleri modele ekleyerek arıza teşhisi gerçekleştirilebilir. Mekanik arızalar veya manyetik arızaların analizi de eklenerek çoklu arıza tespiti gerçekleştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- Ahouee, R. A., ve Mola, M., 2020. Inter-turn fault detection in PM synchronous motor by neuro-fuzzy technique. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 11 (5), 923–934.
- Ahsanullah, K., Jeyasankar, E., Panda, S. K., Shanmukha, R., ve Nadarajan, S., 2017. Detection and analysis of winding and demagnetization faults in PMSM based marine propulsion motors. In *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami.
- Alvarez-Gonzalez, F., Griffo, A., ve Wang, B., 2018. Permanent magnet synchronous machines inter-turn short circuit fault detection by means of model-based residual analysis. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington.
- Alvarez-Salas, J. A., Peralta-Sanchez, E., Hernandez-Robles, I. A., ve Alvarez-Salas, R., 2015. Steady-state analysis of inter-turn winding faults in a permanent magnet synchronous motor. In *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa.
- Anonim, 2013. Band Power.
- Anonim, 2021. AC Motor Diagrams - Basic Stator and Rotor Operation. <https://www.galco.com/comp/prod/moto-ac.htm> - (17.09.2021).
- Ayçiçek E., 2012. Vuruntu momenti azaltılmış eksenel akıllı sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı. (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı, İstanbul.
- Bakşiyev, İ., ve Selçuk, B., 2017. Makine elemanları problemleri. Nobel Yayınları, 536 s, Ankara.
- Bao, J., Wang, S., Li, S., ve Tang, D., 2019. Application of deep learning in interturn short circuit fault diagnosis of PMSM. In *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Tianjin.
- Başaran M., 2016. Detection of induction motor faults using vibration, current and acoustic data. (Doktora Tezi), Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Betancourt, J. C. U., 2013. Electrical and magnetic faults diagnosis in permanent magnet synchronous motors. (Doktora Tezi), Politècnica de Catalunya Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Terrassa Barcelona.
- Biernat, A., 2017. Coil-turn short-circuit of PMSM influence on the transformed phase voltage frequency pattern. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2, 5-9.
- Chen, Y., Liang, S., Li, W., Liang, H., ve Wang, C., 2019. Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors: A review. *Applied Sciences*, 9(10), 2116.

- Chuang, C., Wei, Z., Zhifu, W., ve Zhi, L., 2017. The diagnosis method of stator winding faults in PMSMs based on SOM neural networks. *Energy Procedia*, 105, 2295–2301.
- Coşkun, İ. ve Korkmaz, Y., 2013. Şebekeden beslenen üç fazlı asenkron motor sargı yapısının motor performansına etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (4), 927 – 932.
- Çerçi, Ç., ve Temeltaş, H., 2018. Feature extraction of EMG signals, classification with ANN and kNN algorithms. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir.
- Çıra, F., 2020. Aşırı öğrenme makinası yöntemi ile sürekli mıknatıslı senkron motorun moment verileri kullanılarak sargı izolasyonu arızasının tespiti. *EMO Bilim Dergisi*, 9(2), 7–15.
- Çıra, F., Arkan, M., Gümüş, B., ve Goktas, T., 2016. 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*, Florence.
- Da, Y., ve Krishnamurthy, M., 2010. Novel fault diagnostic technique for permanent Magnet Synchronous Machines using electromagnetic signature analysis. In 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille.
- Dai, X., Zhang, Y., Qiao, L., ve Sun, D., 2021. Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Probabilistic Neural Network. In 2021 40th Chinese Control Conference (CCC) (pp. 2767-2772), Shanghai.
- Dakheel, H. S., Abdulla, Z. B., ve Jawad, H. J. (2019). Faults detection and diagnoses of permanent magnet synchronous motor based on neuro-fuzzy network. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 8(2), 173-185.
- Dogan, Z., ve Tetik, K., 2021. Diagnosis of inter-turn faults based on fault harmonic component tracking in LSPMSMs working under nonstationary conditions. *IEEE Access*, 9, 92101-92112.
- Doğan, Z. ve Selçuk, R., 2020. A diagnosis of stator winding fault based on empirical mode decomposition in PMSMs. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8 (1), 73-80.
- Doğan, Z., 2009. Alternatif akım servo motorun farklı kontrol yöntemleri ile hız kontrolü. (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Doğan, Z., 2012. Ayırıklaştırma yöntemleri ve yapay sinir ağı kullanarak asenkron motorlarda arıza tespiti. (Doktora Tezi), Marmara Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Eker, M., 2013. Sabit mıknatıslı senkron motorda demagnetizasyon ve eksenden kaçıklık arızalarının tespiti. (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Tokat.

- Eser, E., 2018. Asenkron motorlarda istatistiksel proses kontrol yöntemi ile arıza tespiti. (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Tokat.
- Esteller, R., Echauz, J., Tcheng, T., Litt, B., ve Pless, B., 2001. Line length: an efficient feature for seizure onset detection. In 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society ,2, 1707-1710.
- Faiz, J., Nejadi-Koti, H., ve Keravand, M., 2017. Finite element analysis of healthy and faulty permanent magnet synchronous motors used in hybrid vehicles. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), Brasov.
- Faiz, J., ve Moosavi, S. M. M., 2016. Eccentricity fault detection—From induction machines to DFIG—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 169-179.
- Farooq, J. A., Djerdir, A., ve Miraoui, A. (2008). Analytical modeling approach to detect magnet defects in permanent-magnet brushless motors. IEEE Transactions on Magnetics, 44(12), 4599-4604.
- Fidan O., 2019. Dengesiz yüklü sabit mıknatıslı senkron motorlarda hız dalgalanmaları ve titreşimlerin azaltılması. (Yüksek Lisans Tezi), Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü/Malzeme Bilimi ve Mühendisliği A.B.D., Kastamonu.
- Fidanboy, H., 2011. Farklı darbe genişlik modülasyon teknikleri ile sürekli mıknatıslı senkron motorun performans analizi. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.
- Fitouri, M., Bensalem, Y., ve Abdelkrim, M. N., 2016. Modeling and detection of the short-circuit fault in PMSM using Finite Element Analysis. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 1418-1423.
- Fonseca, D. S. B., Santos, C. M., ve Cardoso, A. J. M., 2018. On-line stator fault diagnosis in line-start permanent magnet synchronous motors. In 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli.
- Foster, S. N., Cintron-Rivera, J. G., ve Strangas, E. G., 2016. Detection of incipient stator winding faults in PMSMs with single-layer fractional slot concentrated windings. Electric Power Systems Research, 131, 231-243.
- Gao, C., Nie, Y., Si, J., Fu, Z., ve Feng, H., 2019. Mode recognition and fault positioning of permanent magnet demagnetization for PMSM. Energies, 12(9), 1644.
- Gördük, B., 2019. Design and implementation of sensorless vector controlled drive for PMSMs. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Grasso, E., Palmieri, M., Corti, F., Nienhaus, M., Cupertino, F., ve Grasso, F., 2020. Detection of stator turns short-circuit during sensorless operation by means of the

- Direct Flux Control technique. In 2020 AEIT International Annual Conference (AEIT), Catania.
- Gu, B. G., Choi, J. H., ve Jung, I. S., 2013. Development and analysis of interturn short fault model of PMSMs with series and parallel winding connections. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(4), 2016-2026.
- Gurusamy, V., Bostanci, E., Li, C., Qi, Y., ve Akin, B., 2021. A stray magnetic flux-based robust diagnosis method for detection and location of interturn short circuit fault in PMSM. *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-11.
- Hadef, M., Zaroure, D., ve Boucherit, A., 2018. PMSM Stator Winding Short Circuit Fault Diagnosis via Neural Network. In *J. Automation & Systems Engineering*, 12(4), 25-34.
- Hang, J., Hu, Q., Sun, W., Ren, X., Ding, S., Huang, Y., ve Hua, W., 2022. A Voltage Distortion-Based Method for Robust Detection and Location of Inter-turn Fault in Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Hang, J., Zhang, J., Cheng, M., ve Huang, J., 2015. Online interturn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine using zero-sequence components. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 6731-6741.
- [https://www.mathworks.com/help/signal/ref/bandpower.html?s\\_tid=srchtitle\\_bandpower\\_1#d123e3383](https://www.mathworks.com/help/signal/ref/bandpower.html?s_tid=srchtitle_bandpower_1#d123e3383) – (12.04.2022).
- Hu, R., Wang, J., Mills, A. R., Chong, E., ve Sun, Z., 2021. Current-Residual-Based stator interturn fault detection in permanent magnet machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 68(1), 59.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen N., Tung C.C., ve Liu, H. H., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971), 903-995.
- Huang, S., Bi, Z., Sun, Z., Aggarwal, A., Huang, X., Wu, L., ve Niu, F., 2022. Detection of Stator Winding Faults in PMSMs Based on Second Harmonics of Phase Instantaneous Reactive Powers. *Energies*, 15(9), 3248.
- Huangfu, H., Zhou, Y., Zhang, J., Ma, S., Fang, Q., ve Wang, Y., 2022. Research on Inter-Turn Short Circuit Fault Diagnosis of Electromechanical Actuator Based on Transfer Learning and VGG16. *Electronics*, 11(8), 1232.
- İnengeç E., Hatık G., ve Akar M., 2014. Asenkron Motorda Statik Eksenden Kaçıklık Arızasının İncelenmesi. *ISITES 2014, Karabük*.
- Jenke, R., Peer, A., ve Buss, M., 2014. Feature extraction and selection for emotion recognition from EEG. *IEEE Transactions on Affective computing*, 5(3), 327-339.
- Jeong, H., Moon, S., Lee, J., ve Kim, S. W., 2016. Inter-turn short fault diagnosis of permanent magnet synchronous machines using negative sequence components;

- Inter-turn short fault diagnosis of permanent magnet synchronous machines using negative sequence components. In 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Taipei.
- Kaleem, M. F., Sugavaneswaran, L., Guergachi, A., ve Krishnan, S., 2010. Application of empirical mode decomposition and Teager energy operator to EEG signals for mental task classification. In 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, Buenos Aires.
- Kamath, C., 2011. ECG beat classification using features extracted from Teager energy functions in time and frequency domains. IET signal processing, 5(6), 575-581.
- Kara B., 2017. Şebeke kalkışlı daimi mıknatıslı senkron motorda eksenden kaçıklık arızası teşhisi. (Yüksek Lisans Tezi), Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tokat.
- Kavzoglu, T., ve Colkesen, I., 2009. A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11(5), 352-359.
- Kesharwani, A., Aggarwal, V., Singh, S., B R, R., ve Kumar, A., 2021. Marine seismic signal denoising using VMD with Hausdorff distance and wavelet transform. The Journal of Defense Modeling and Simulation.
- Khamari, D., Bouchareb, C., Benlaloui, I., Benmessaoud, F., Boutabba, T., ve Chrifi-Alaoui, L. 2021. A New Approach for Online Stator Fault Diagnosis in PMSM based on Robust Gain Scheduled  $H_\infty$  LPV Current Observer. In 2021 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD) (pp. 1-6), Grenoble.
- Kumar, K. V., Kumar, S. S., Praveena, B., John, J. P., ve Paul, J. E., 2010. Soft computing based fault diagnosis. In 2010 Second International conference on Computing, Communication and Networking Technologies, Karur.
- Kumar, P., ve Hati, A. S., 2021. Review on machine learning algorithm based fault detection in induction motors. Archives of Computational Methods in Engineering, 28(3), 1929-1940.
- Laamari, Y., Allaoui, S., Bendaikha, A., ve Saad, S., 2021. Fault detection between stator windings turns of permanent magnet synchronous motor based on torque and stator-current analysis using FFT and discrete wavelet transform. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 8(2), 315–322.
- Lale T., Gümüş B. ve Çıra F., 2018. Sürekli mıknatıslı senkron motorun stator sargısı sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerindeki etkilerin araştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 637-647.
- Le Roux, W., Harley, R. G., ve Habetler, T. G., 2008. Detecting faults in rotors of PM drives. IEEE Industry Applications Magazine, 14(2), 23-31.

- Lee, H., Jeong, H., ve Kim, S. W., 2018. Diagnosis of interturn short-circuit fault in PMSM by residual voltage analysis. In 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi.
- Lee, J. S., Yoon, T. M., ve Lee, K. B., 2016. Bearing fault detection of IPMSMs using zoom FFT. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 11(5), 1235–1241.
- Lee, S. T., ve Hur, J., 2016. Detection technique for stator inter-turn faults in BLDC motors based on third-harmonic components of line currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(1), 143-150.
- Lennartsson, A., 2021. Fault Detection in Permanent Magnet Synchronous Motors using Machine Learning. (Yüksek Lisans), Luleå Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri, Elektrik ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Luleå.
- Li, F., Wang, Y., Xu, S., ve Li, Y., 2021. Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motor Inter Turn Short Circuit Based on Deep Reinforcement Learning. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2137, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- Li, H., Hang, J., Fang, J., Zhang, P., Ding, S., ve Wang, Q., 2018. Inter-turn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine based on variational mode decomposition. In 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan.
- Liang, H., Chen, Y., Liang, S., ve Wang, C., 2018. Fault detection of stator inter-turn short-circuit in PMSM on stator current and vibration signal. *Applied Sciences*, 8(9), 1677.
- Liang, S., Chen, Y., Liang, H., ve Li, X., 2019. Sparse representation and SVM diagnosis method for inter-turn short-circuit fault in PMSM. *Applied Sciences*, 9(2), 224.
- Liu, E., Niu, G., Tang, S., Zhang, B., Williams, J., Martin, R., ve Moore, C., 2019. Permanent magnet synchronous motor winding fault simulation and diagnosis. In *Annual Conference of the PHM Society*, Scottsdale.
- Liu, W., Liu, L., Chung, I. Y., Cartes, D. A., ve Zhang, W., 2012. Modeling and detecting the stator winding fault of permanent magnet synchronous motors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 27, 1-16.
- Liu, X., Miao, W., Xu, Q., Cao, L., Liu, C., ve Pong, P. W., 2019. Inter-turn short-circuit fault detection approach for permanent magnet synchronous machines through stray magnetic field sensing. *IEEE Sensors Journal*, 19(18), 7884-7895.
- Liu, Z., Xia, Q., Chen, L., Zhang, H., Wang, C., ve Li, X., 2020. Demagnetization Fault Diagnosis of PMSM Based on Fuzzy Extreme Learning Machine. In 2020 Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai.
- Luo, Y., Qiu, J., ve Shi, C., 2018. Fault detection of permanent magnet synchronous motor based on deep learning method. In 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju.
- Maanani, Y., ve Menacer, A., 2019. Modeling and Diagnosis of the Inter-Turn Short Circuit Fault for the Sensorless Input-Output Linearization Control of the PMSM.

- Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, 63(3), 159–168.
- Mazzoletti, M. A., Bossio, G. R., De Angelo, C. H., ve Espinoza-Trejo, D. R., 2017. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM. *IEEE transactions on industrial electronics*, 64(9), 7218-7228.
- Memar, P., ve Faradji, F., 2017. A novel multi-class EEG-based sleep stage classification system. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(1), 84-95.
- Minaz, M. R., 2020. An effective method for detection of stator fault in PMSM with 1D-LBP. *ISA Transactions*, 106, 283–292.
- Ming, L., Ying, Y., Liang, L., Yao, L., ve Zhou, W., 2017. Energy Management Strategy of a Plug-in Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Control. *Energy Procedia*, 105, 2660–2665.
- Mohammed, A., Melecio, J. I., ve Djurović, S., 2019. Open-circuit fault detection in stranded PMSM windings using embedded FBG thermal sensors. *IEEE Sensors Journal*, 19(9), 3358-3367.
- Moon, S., Jeong, H., ve Kim, S. W., 2016. Interturn short fault diagnosis of a PMSM using voltage residual components. In *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence.
- Moosavi, S. S., Djerdir, A., Ait-Amirat, Y., ve Khaburi, D. A., 2015b. ANN based fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn. *Electric Power Systems Research*, 125, 67–82.
- Moosavi, S. S., Djerdir, A., Amirat, Y. A., ve Khaburi, D. A., 2015a. Demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors: A review of the state-of-the-art. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 391, 203–212.
- National Instruments, 2005. LabVIEW Order Analysis Toolkit User Manual. Part number 372879C-01.
- National Instruments, 2015. Sound and Vibration Measurement Suite Help Manual. part number 372416C-01.
- Nyanteh, Y. D., Srivastava, S. K., Edrington, C. S., ve Cartes, D. A., 2013. Application of artificial intelligence to stator winding fault diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Machines. *Electric Power Systems Research*, 103, 201-213.
- Obeid, N. H., Battiston, A., Boileau, T., ve Nahid-Mobarakeh, B., 2017. Early intermittent interturn fault detection and localization for a permanent magnet synchronous motor of electrical vehicles using wavelet transform. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(3), 694-702.
- Obeid, N. H., Boileau, T., ve Nahid-Mobarakeh, B., 2016. Modeling and diagnostic of incipient interturn faults for a three-phase permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5), 4426-4434.

- Ocak, H., Fault Detection , Diagnosis and Prognosis of Rolling Element Bearings: Frequency Domain Methods and Hidden Markov Modelling, Doctor of Philosophy Dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University, 2-13, U.S.A., 2004.
- Ojaghi, M., Sabouri, M., ve Faiz, J., 2014. Diagnosis methods for stator winding faults in three-phase squirrel-cage induction motors. International transactions on electrical energy systems, 24(6), 891-912.
- Olofsson, S., ve Groth, A., 2019. Detection of stator winding faults in permanent magnet synchronous machines. (Yüksek Lisans), Chalmers Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, Elektrik Enerjisi Mühendisliği Anabilim Dalı, Göteborg.
- Orhan S., 2002. Rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titreşim analizi ile kestirimci bakımı. (Doktora Tezi), Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Kırıkkale.
- Otava, L., 2016. Implementation of PMSM inter-turn short fault detection using frequency analysis of stator currents. IFAC-PapersOnLine, 49(25), 86-91.
- Özçira, S., 2007. Sabit mıknatıslı senkron motorun kontrol yöntemleri ve endüstriyel uygulamaları. (Yüksek Lisans Tezi), FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı, İstanbul.
- Özelgin, İ., 2006. Asenkron motor arızalarının dinamik parametrelere etkisi ve frekans analizi ile tanısı. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Programı, İstanbul.
- Peng, H., Wang, Y., Chao, J., Huo, X., ve Majoe, D., 2017. Stability study of the optimal channel selection for emotion classification from EEG. In 2017 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), Kansas City.
- Pietrzak, P. ve Wolkiewicz, M., 2021. Application of Support Vector Machine to stator winding fault detection and classification of permanent magnet synchronous motor. 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Gliwice.
- Pietrzak, P. ve Wolkiewicz, M., 2022. Stator winding fault detection of permanent magnet synchronous motor based on the bispectrum analysis. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, e140556-e140556.
- Quiroz, J. C., Mariun, N., Mehrjou, M. R., Izadi, M., Misron, N., ve Mohd Radzi, M. A., 2018. Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests. Measurement, 116, 273–280.
- Refaat, S. S., Abu-Rub, H., Saad, M. S., Aboul-Zahab, E. M., ve Iqbal, A., 2013. Discrimination of Stator Winding Turn Fault and Unbalanced Supply Voltage in Permanent Magnet Synchronous Motor Using ANN. In 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, İstanbul.

- Reis, H. Ç., ve Yılandı, G., 2020. Destek vektör makineleri ve NDVI kullanarak pamuk ekili alanların tespiti: Harran ovası örneği. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 2(1), 29-41.
- Rosero, J. A., Cusido, J., Garcia, A., Ortega, J. A., ve Romeral, L., 2006. Study on the permanent magnet demagnetization fault in permanent magnet synchronous machines. In *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris.
- Rosero, J. A., Romeral, L., Ortega, J. A., ve Rosero, E., 2009. Short-circuit detection by means of empirical mode decomposition and Wigner–Ville distribution for PMSM running under dynamic condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11), 4534-4547.
- Saavedra, H., Urresty, J. C., Riba, J. R., ve Romeral, L., 2014. Detection of interturn faults in PMSMs with different winding configurations. *Energy conversion and management*, 79, 534-542.
- Sarikhani, A., ve Mohammed, O. A., 2012. Inter-turn fault detection in PM synchronous machines by physics-based back electromotive force estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8), 3472-3484.
- Senanayaka, J. S. L., ve Robbersmyr, K. G., 2018. Fault detection and classification of permanent magnet synchronous motor in variable load and speed conditions using order tracking and machine learning. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(3).
- Shanthi, R., Kalyani, S., ve Devie, P. M., 2021. Design and performance analysis of adaptive neuro-fuzzy controller for speed control of permanent magnet synchronous motor drive. *Soft Computing*, 25(2), 1519-1533.
- Sharma, R., Vignolo, L., Schlotthauer, G., Colominas, M. A., Rufiner, H. L., ve Prasanna, S. R. M., 2017. Empirical mode decomposition for adaptive AM-FM analysis of speech: A review. *Speech Communication*, 88, 39-64.
- Sheela, A., Suresh, M., Shankar, V. G., Panchal, H., Priya, V., Atshaya, M., Sadasivuni K. K., ve Dharaskar, S., 2020. FEA based analysis and design of PMSM for electric vehicle applications using magnet software. *International Journal of Ambient Energy*, 1-6.
- Shen, T., Kilic, A., Thulfaut, C., ve Reuss, H. C., 2019. An Intelligent Diagnostic Method for Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) in the Electric Drive of Autonomous Vehicles. In *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe)*, Genova.
- Shi, C., ve Lu, X., 2020. Online detection method for inter-turn short-circuit fault of permanent magnet synchronous motor based on deep learning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 546(5).
- Shih, K. J., Hsieh, M. F., Chen, B. J., ve Huang, S. F., 2022. Machine Learning for Inter-turn Short-circuit Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*.

- Siddique, A., Yadava, G. S., ve Singh, B., 2005. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE transactions on energy conversion*, 20(1), 106-114.
- Song, X., Duan, Z., ve Jiang, X., 2012. Comparison of artificial neural networks and support vector machine classifiers for land cover classification in Northern China using a SPOT-5 HRG image. *International Journal of Remote Sensing*, 33(10), 3301-3320.
- Sönmez, D., 2013. Asenkron motor rulman arızasının titreşim işaretleri üzerinden entropi tabanlı analizi. (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Subasi, A., 2012. Classification of EMG signals using combined features and soft computing techniques. *Applied soft computing*, 12(8), 2188-2198.
- Sui, Y., Liu, J., Yin, Z., Zheng, P., Cheng, L., ve Tang, D., 2018. Short-circuit fault detection for a five-phase 30-slot/32-pole permanent-magnet synchronous machine. In 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju.
- Sun, X., Shi, Z., Lei, G., Guo, Y., ve Zhu, J., 2019. Analysis and Design Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor for a Campus Patrol Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(11), 10535–10544.
- Şen, B., Peker, M., Çavuşoğlu, A., ve Çelebi, F. V., 2014. A comparative study on classification of sleep stage based on EEG signals using feature selection and classification algorithms. *Journal of medical systems*, 38(3), 1-21.
- Teker, A., 2008. Sürekli mıknatıslı senkron motorun bulanık mantık ile hız kontrolü. (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü/Elektrik Mühendisliği A.B.D., Kocaeli.
- Tetik K., 2019. Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Stator Sargı Arızası Teşhisi. (Yüksek Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Tokat.
- Texas Instruments, 2020. DRV425-Q1 Automotive, Integrated Fluxgate Magnetic-Field Sensor. Part Number - DRV425-Q1.
- Tian, S., Bian, X., Tang, Z., Yang, K., ve Li, L., 2019. Fault diagnosis of gas pressure regulators based on CEEMDAN and feature clustering. *IEEE Access*, 7, 132492-132502.
- Torres, M. E., Colominas, M. A., Schlotthauer, G., ve Flandrin, P., 2011. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. In 2011 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), Prague.
- Urresty, J. C., Riba, J. R., Saavedra, H., ve Romeral, L., 2011. Detection of inter-turns short circuits in permanent magnet synchronous motors operating under transient conditions by means of the zero sequence voltage. In Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham.

- Urresty, J. C., Riba, J. R., ve Romeral, L., 2012. Diagnosis of interturn faults in PMSMs operating under nonstationary conditions by applying order tracking filtering. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1), 507-515.
- Usman, A., Doiphode, N. T., ve Rajpurohit, B. S., 2019. Stator Winding Faults investigation in Permanent Magnet Synchronous Motor using Motor Signatures: Part I. In 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras.
- Ünsal, A., ve Güçlü, S., 2019. Asenkron motor eksenel kaçıklık arızalarının shannon entropisi ile analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(3), 199-210.
- Vasilios, I. C., 2020. Detection of PMSM Inter-Turn Short-Circuit Based on a Fault-Related Disturbance Observer. *International Journal of Simulation--Systems, Science & Technology*, 21(2).
- Vatansever, F., 2019. Clarke ve Park Dönüşümlerinin Görselleştirilmesi. *Academic Perspective Procedia*, 2(3), 502-507.
- Vinson, G., Combacau, M., Prado, T., ve Ribot, P., 2012. Permanent magnets synchronous machines faults detection and identification. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal.
- Wang, Z., Song, Y., Sun, F., ve Cao, C., 2018. Research on Fault Detection and Diagnosis of Stator Windings in Permanent Magnet Synchronous Motor. 2018 Joint International Conference on Energy, Ecology and Environment (ICEEE 2018) and International Conference on Electric and Intelligent Vehicles (ICEIV 2018).
- Wei, D., Liu, K., Hu, W., Peng, X., Yongdan, C., ve Ding, R., 2022. Short-Time Adaline based Fault Feature Extraction for Inter-turn Short Circuit Diagnosis of PMSM via Residual Insulation Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Wu, Z., ve Huang, N. E., 2009. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01), 1-41.
- Xiao, M., Zhang, C., Wen, K., Xiong, L., Geng, G., ve Wu, D., 2018. Bearing fault feature extraction method based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. *Journal of Vibroengineering*, 20(7), 2622-2631.
- Yao, L., ve Pan, Z., 2020. A new method based CEEMDAN for removal of baseline wander and powerline interference in ECG signals. *Optik*, 223, 165566.
- Yassa, N., Rachek, M., Djerdir, A., ve Becherif, M., 2016. Detecting of Multi Phase Inter Turn Short Circuit in the Five Permanent Magnet Synchronous Motor. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 17(5), 583–595.
- Yoo, J. H., ve Jung, T. U., 2016. Fault Diagnosis Method of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electrical Vehicle. *Journal of Magnetics*, 21(3), 413-420.
- Yousri, D., Allam, D., ve Eteiba, M. B., 2019. Chaotic whale optimizer variants for parameters estimation of the chaotic behavior in Permanent Magnet Synchronous Motor. *Applied Soft Computing*, 74, 479–503.

- Yücel, E., 2018. Asenkron motorlarda rulman arızasının ve eksen kaçıklığının tanısı ve analizi. (Yüksek Lisans Tezi), Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Zafarani, M., Bostanci, E., Qi, Y., Goktas, T., ve Akin, B., 2018. Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended review and comprehensive analysis. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(4), 2173-2191.
- Zhang, C., Wang, F., Wang, Z., ve Yang, J., 2014. Analysis of stator winding inter-turn short circuit fault of PMSM for electric vehicle based on finite element simulation. In 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific, Beijing.
- Zhang, J., Xu, Z., Wang, J., Zhao, J., Din, Z., ve Cheng, M., 2020. Detection and discrimination of incipient stator faults for inverter-fed permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(8), 7505-7515.
- Zhang, Y., ve Liu, G., 2021. Online PMSM Stator Interturn Fault Detection Aided by Phase Angle Diagnosis of Zero-sequence Components. *The Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering*, Singapore.
- Zheng, J., Wang, Z., Wang, D., Wang, B., ve Li, M., 2017. Diagnostic strategy and modeling of PMSM stator winding fault in electric vehicles. In 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan.
- Zheng, J., Zhao, W., Ji, J., Zhu, J., ve Lee, C. H., 2020. Sleeve design of permanent-magnet machine for low rotor losses. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 6(4), 86-96.

## ÖZGEÇMİŞ



**Projelerde Yaptığı Görevler:**

Sosyal Ağlarda Fikir Dinamiklerinin Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Analizi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Yürütücü: ERKAN ÖZLEM FEYZA, Araştırmacı: SELÇUK RUMEYSA, 01/06/2020 (Devam Ediyor) (ULUSAL)

**Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:**

SELÇUK RUMEYSA, DOĞAN ZAFER (2019). Diagnosis Of Stator Winding Fault Based On Empirical Mode Decomposition and Statistical Analysis in PMSMs. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019), 33-33. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum) (Yayın No:7182576)

**Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:**

SELÇUK RUMEYSA, DOĞAN ZAFER (2020). A Diagnosis of Stator Winding Fault Based on Empirical Mode Decomposition in PMSMs. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 8(1), 73- 80., Doi: 10.17694/bajece.650484 (Kontrol No: 6260206)