

T.C.
ERZİNCAN BİNALI YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SENKRON GENERATÖRLERİN SARGI YALITIM DİRENCİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ VE İYİLEŞTİRME SÜREÇLERİNİN
ETKİLERİ**

Emre DEMİREL

Danışman: Doç. Dr. M. Cihat ÖZGENEL

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Orhan KAPLAN

Prof. Dr. Naim Süleyman TİNÇ

Prof. Dr. Murat ÇETİN

Doç. Dr. Yakup ŞAHİN

DOKTORA TEZİ

ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Emre DEMİREL]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

SENKRON GENERATÖRLERİN SARGI YALITIM DİRENCİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ VE İYİLEŞTİRME SÜREÇLERİNİN ETKİLERİ

Emre DEMİREL

Doktora Tezi

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Cihat ÖZGENEL

2026, 146 sayfa

Elektrik makinelerinde kullanılan yalıtım sistemlerinin dayanıklılığı, sistemin güvenli ve uzun ömürlü çalışması açısından son derece önemlidir. Bu bağlamda, generatör sargılarının izolasyon direnci (IR-Insulation Resistance) değerleri, sistemin sağlık durumunu gösteren kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu değerler; nem, sıcaklık, kirlilik gibi çevresel etkenlerden doğrudan etkilenebilir ve zamanla önemli değişiklikler gösterebilir.

Bu çalışmada, senkron bir generatör sisteminde kullanılan iki farklı stator sargısı incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen sargı numuneleri, gerçek bir işletme ortamında maruz kalabileceği nem ve kirlilik durumlarının uygulanabileceği deneysel düzeneklere yerleştirilmiştir. Yapılan deneysel yaşlandırma etkileri sonucunda yalıtım direnci ve polarizasyon indeksi gibi metrikler sistematik olarak ölçümlenmiştir. Ayrıca stator sargılarının yalıtım performanslarının çevresel koşullara (nem, maruziyet süresi ve kirlilik) bağlı olarak nasıl değiştiğini açıklayabilecek farklı modelleme yaklaşımları değerlendirilmiştir. Yapılan modelleme çalışmaları sonrasında stator sargılarında meydana gelebilecek yalıtım arızalarının önceden tahmin edilebilmesi ve buna bağlı operasyonel bakım çalışmalarının planlanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, Polarizasyon İndeksi (PI) gibi ölçümler üzerinden veri analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak tahmin modelleri geliştirilmiştir. Çalışmada, farklı çevresel ortam koşullarında (nem ve kirlilik) toplanmış deneysel ölçüm verileri üzerinden modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Lineer Regresyon, Polinom Regresyon, Rastgele Orman (Random Forest), Ridge Regresyon ve özellikle Destek vektör regresyon (SVR) algoritmaları kullanılarak yapılan analizler sonucunda, çevresel koşulların yalıtım direncine olan etkisi başarıyla modellenmiştir. Bu çalışma, elektrik enerjisi üretim sektöründe önleyici ve kestirimci bakım çalışmaları kapsamında generatör sargı yalıtım durumunun izlenmesi, analiz edilmesi, bakım çalışmaları ve enerji arz sürekliliği gibi süreçlere katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Senkron, Stator, Rotor, Nem, Kirlilik, Generatörler, Yalıtım Direnci, modelleme, Destek vektör regresyon, Rastgele orman, Regresyon

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS AFFECTING THE WINDING INSULATION RESISTANCE OF SYNCHRONOUS GENERATORS AND THE EFFECTS OF THE IMPROVEMENT PROCESSES

Emre DEMİREL

Doctoral Thesis

Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,
Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Doç. Dr. Mehmet Cihat ÖZGENEL

2026, 146 pages

The durability of insulation systems employed in electrical machines plays a crucial role in ensuring safe and reliable long-term operation. In this respect, the insulation resistance (IR) of generator windings is widely recognized as a key indicator of the overall health condition of the system. Nevertheless, insulation resistance values are highly sensitive to environmental influences such as humidity, temperature, and surface contamination, and may exhibit significant degradation over time.

In this study, two different stator windings used in a synchronous generator were investigated. The winding specimens were subjected to controlled experimental setups designed to simulate humidity and contamination conditions representative of real operating environments. As part of the experimental aging process, insulation resistance and polarization index (PI) measurements were systematically recorded. Furthermore, several modeling approaches were evaluated to characterize the variation in stator winding insulation performance as a function of environmental parameters, including humidity level, exposure duration, and contamination state. Based on the developed models, the study aims to enable early prediction of potential insulation failures in stator windings and to support the planning of condition-based and predictive maintenance activities. To this end, data analysis was conducted using polarization index measurements, and predictive models were developed employing various machine learning algorithms. The results demonstrate that the influence of environmental conditions on insulation behavior can be effectively captured through the proposed modeling framework. This work contributes to insulation condition monitoring practices in the electrical power generation sector and supports improved maintenance planning and continuity of energy supply.

Keywords: Synchronous, Rotor, Stator, Humidity, Pollution, Generators, Insulation Resistance, Modelling, Support vector regression, Random Forest, Regression

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca ve bu tez alıŐmasının tım süreçlerinde ok kıymetli destekleri ve katkılarını esirgemeyen değerli danıŐmanın Doç. Dr. M. Cihat ÖZGENEL'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Tez çalıŐmam boyunca katkılarını ve desteklerini esirgemeyen değerli tez izleme komitesi yelerim Prof. Dr. Naim Süleyman TINĐ ve Prof. Dr. Murat ÇETİN hocalarıma da ayrıca teşekkür ederim. Bütün bu zorlu süreç boyunca manevi desteklerini hiç esirgemeyen tım aileme, başta değerli eŐim Dt. Duygu DEMİREL olmak üzere, teşekkür ederim.

Emre DEMİREL

Ocak, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Önemi	7
1.2. Araştırmanın Amacı.....	7
1.3. Literatür Çalışması	8
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	20
2.1. Senkron Generatörlerde Yalıtım Sistemleri ve Arıza Analizi	20
2.1.1. Yalıtım sistemlerinin genel yapısı ve önemi.....	20
2.2. Çevresel Zorlanma Faktörlerinin Yalıtım Sistemlerine Etkisi.....	23
2.2.1. Nem faktörünün yalıtım sistemlerine etkisi.....	23
2.2.2. Kirlilik faktörünün yalıtım sistemlerine etkisi	24
2.2.3. Sıcaklık ve termal zorlanma etkilerinin yalıtım sistemlerine etkisi	25
2.3. Yalıtım Durumu İzleme ve Tanı Teknikleri	25
2.3.1. Geleneksel yalıtım direnci ölçüm yöntemleri (IR, DAR, PI).....	25
2.3.2. Teşhis ve iyileştirme uygulamaları	30
2.4. Literatürdeki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Katkısı.....	31
3. KURAMSAL TEMELLER.....	34
3.1. Elektrik Makinelerinin Genel Yapısı	34
3.2. Senkron Makineler	35
3.2.1. Senkron motorlar	36
3.2.2. Senkron generatörler	37
3.2.2.1. Stator yapısı	38
3.2.2.2. Rotor yapısı	42
3.2.2.2.1. Kutup ayakları	45
3.2.2.2.2. Amortisör sargıları.....	48

3.2.2.3. Kutup sargısı.....	50
3.2.3. Senkron generatörün hızı ve frekansı	52
3.2.4. Senkron generatörlerde indüklenen gerilim	53
3.2.5. Senkron generatörde endüvi reaksiyonu.....	54
3.2.6. Senkron generatör eşdeğer devresi	56
3.3. Stator Sargı Yalıtım Sistemleri ve Malzeme Bilgisi	58
3.3.1. Yalıtım malzemelerinin özellikleri ve sınıflandırması	58
3.3.2. Epoksi-Mika kompozit sistemlerinin yapısı ve özellikleri	59
3.3.3. Vakum Basınç Emprenye (VPI) prosesi ve yalıtım sistemi.....	61
3.4. Yalıtım Sistemlerinde Yaşlanma Mekanizmaları ve Fiziksel Temelleri	62
3.4.1. Elektriksel yaşlanma ve kısmi deşarj fiziği	62
3.4.2. Termal yaşlanma.....	63
3.4.3. Mekanik yaşlanma	64
3.4.4. Çevresel yaşlanma	65
3.5. Yalıtım Tanı Yöntemleri ve Elektriksel Ölçüm Teorisi	65
3.5.1. Yalıtım Direnci Testi teorisi (IR)	65
3.5.2. Polarizasyon İndeksi (PI) teorisi.....	71
3.6. İstatistiksel Modelleme Teknikleri	72
3.6.1. Regresyon Analizi ve Doğrusal Modelleme temelleri.....	72
3.6.2. Polinom Regresyon ve doğrusal olmayan ilişkiler	73
3.7. Makine Öğrenmesi Tabanlı Modelleme Teknikleri	75
3.7.1. Ridge Regresyon ve Regülerizasyon teknikleri.....	75
3.7.2. Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve Kernel yöntemleri	76
3.7.3. Rastgele Orman (Random Forest) ve Ensemble yöntemler	78
3.7.4. Veri ön işleme ve gürültü azaltma teknikleri	81
4. YÖNTEM	82
4.1. Deney Planı ve Deney Düzenegi	82
4.2. Sargı Kirlendirme	88
4.3. İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamaları	92
4.4. Çalışma Akış Şemaları.....	94
4.5. Kullanılan Veri Seti	96
4.5.1. Veri ön işleme ve kodlama.....	97
4.6. Modelleme Yöntemleri	100

4.7. Hiper Parametre Ayarlamaları	102
4.7.1. Lineer ve polinom regresyon	103
4.7.2. Destek vektör regresyon (SVR).....	103
4.7.3. Rastgele orman (Random forest).....	104
4.7.4. Ridge regresyon	105
4.8. Değerlendirme Kriterleri (MSE, R ²).....	106
4.8.1. Ortalama karesel hata (Mean squared error, MSE)	106
4.8.2. Belirlilik katsayısı (Determination coefficient, R ²)	107
4.8.3. SMA, WMA ve Kalman filtresi yöntemlerinin karşılaştırılması.....	108
5. BULGULAR	110
5.1. Deney Sonuçlarının Genel Eğilimlerinin İncelenmesi	110
5.2. Modelleme Alternatiflerine Dair Bulgular	118
5.2.1. Basit hareketli ortalama (SMA) bulgularının incelenmesi	119
5.2.2. Model bazında performans incelemesi	124
5.2.3. Modelleme bulgularının bütünsel incelemesi.....	135
5.3. PI Eğrisinin Ortalama Eğim Bulguları	137
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	139
6.1. Öneri	145
KAYNAKÇA	147
EKLER	153
Ek-A. Kirlendirilmiş Yağ Akredite Laboratuvar Analiz Sonuçları	154
Ek-B. Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletlerinin Kalibrasyon Belgeleri	156

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Yalıtım sınıflarına göre sıcaklık limitleri.....	21
Tablo 2. Önerilen minimum yalıtım direnci	26
Tablo 3. Önerilen minimum Polarizasyon İndeksi değerlendirme kriterleri	27
Tablo 4. Termal yalıtım sınıflarına göre minimum Polarizasyon İndeksi değerleri	28
Tablo 5. DAR ve PI değerlerinin değerlendirme kriterleri tablosu	28
Tablo 6. Rotor tiplerine göre devir sayısı ve Kutup çifti sayısının değişimi tablosu (P değeri N-S kutup çiftlerinin sayısını belirtmektedir.).....	45
Tablo 7. Frekans, Kutup sayısı ve Devir ilişkilerini gösteren tablo.	52
Tablo 8. Yalıtım sınıflarına göre kullanılan yalıtkan malzemeler (Largiader, 2019).....	60
Tablo 9. Deney seti malzeme listesi	82
Tablo 10. Numune sargılara ait generatör etiket bilgileri	83
Tablo 11. Deney planı.....	87
Tablo 12. ISO 4406 yağ kirlilik ölçeği (International Organization for Standardization, 2021).	88
Tablo 13. Kirlendirme deneyi için kullanılan malzemeler	89
Tablo 14. Ölçüm ve test sayılarının toplamı.....	97
Tablo 15. Veri kümesinde kullanılan değişkenlerin kodlamaları.....	97
Tablo 16. BIN-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	111
Tablo 17. BIN-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	111
Tablo 18. B2N-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	112
Tablo 19. B2N-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	113
Tablo 20. B1NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	114
Tablo 21. B1NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri.....	115
Tablo 22. B2NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	116

Tablo 23. B2NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri	117
Tablo 24. İyileştirme süreci öncesi ve sonrası yalıtım direnci parametreleri	118
Tablo 25. Lineer regresyon sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular .	120
Tablo 26. Ridge regresyon modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular.....	120
Tablo 27. Destek vektör regresyon (SVR) modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular	121
Tablo 28. Polinom regresyon modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular.....	122
Tablo 29. Rastgele orman (Random forest) modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular	123
Tablo 30. Model sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair tüm bulgular.....	124
Tablo 31. Lineer Regresyon performans ölçütleri	126
Tablo 32. Polinom Regresyon Performans ölçütleri.....	128
Tablo 33. Ridge Regresyon Performans ölçütleri.....	130
Tablo 34. Destek vektör regresyon performans ölçütleri	133
Tablo 35. Rastgele orman (random forest) modeli performans ölçütleri	135
Tablo 36. Modellerin performans ölçütlerine dair özet tablo (MSE ve R2 değerleri).....	137
Tablo 37. PI değişim eğrisinin zamana bağlı ortalama eğim analiz değerleri.....	138
Tablo 38. Temiz bir sargıda nemlilik etkisinin analizi tablosu (PI<2,0 değerine düşüş süresi)	140
Tablo 39. Kirli bir sargıda nemlilik etkisinin analizi tablosu (PI<2,0 değerine düşüş süresi)	140
Tablo 40. Aynı nem şartlarında kirlilik etkisinin analizi tablosu (PI<2,0 değerine düşüş süresi)	141
Tablo 41. İstatistiksel modelleme yöntemleri performans ölçütleri	143
Tablo 42. Makine öğrenmesi tabanlı modelleme çalışmaları performans ölçütleri.....	143

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Birincil ve İkincil Enerji kaynakları Enerji dönüşüm süreçleri.....	1
Şekil 2. Enerji üretim ve iletim süreçlerinin genel akış şeması	2
Şekil 3. 2022 Türkiye ve OECD ülkeleri toplam kurulu gücünün kaynaklara dağılımı	3
Şekil 4. Hidrolik santrallerde generatör arıza türlerinin dağılımı	4
Şekil 5. Yalıtım arızalarının detaylı kırılımına dair yapılan istatistiksel çalışma	5
Şekil 6. Literatür çalışmasına dair akademik içerik kırılımlarını gösteren grafik.....	8
Şekil 7. Yalıtım sınıfları	21
Şekil 8. Elektrik makinelerinde elektromekanik enerji dönüşümü.....	34
Şekil 9. Tipik bir senkron makine kesit gösterimi.....	35
Şekil 10. İki kutuplu bir senkron motorda stator ve rotor manyetik alanları	36
Şekil 11. Örnek bir senkron generatör gösterimi	37
Şekil.12 Bağıştaş I HES senkron generatör stator sargıları.....	39
Şekil.13 Stator yapısı ve bölümlerini gösteren çizim	40
Şekil.14 Stator yapısı	41
Şekil.15 120° açıyla yerleştirilmiş üç sargıdan üç faz gerilimlerin üretimi	41
Şekil.16 Çıkık kutuplu ve yuvarlak kutuplu rotor yapısı gösterimleri	42
Şekil.17 Yuvarlak kutuplu rotor görünüşü	43
Şekil.18 Örnek bir çıkık kutuplu rotor yapısı (Bağıştaş I HES Santrali)	44
Şekil.19 Rotor laminasyon sacları ve imalat aşaması.....	45
Şekil. 20 Manyetik kutup montajı ve kutup ayağı görüntüsü.....	46
Şekil.21 Kırılma kuyruğu ve tarak yapısı	47
Şekil.22 Örnek bir kamalı bağlantı ile sabitlenmiş rotor imalatı.....	48
Şekil 23. Örnek bir amortisör sargısı gösterimi.....	49
Şekil 24. Örnek bir dikdörtgen kesitli bakır iletkenine sahip rotor manyetik kutbu görüntüsü (Bağıştaş I HES).....	50
Şekil 25. Çıkık kutuplu senkron generatör kutup ve kutup sargı yapısı	51
Şekil 26. (a) Akımın uyarma akımına bağlı değişimi (b) Mıknatıslanma eğrisi	54
Şekil 27. Endüvi reaksiyonu etkisinin oluşumu	55
Şekil.28 Senkron generatörün basit eşdeğer devresi	57
Şekil 29. Bir senkron generatörün üç faz eşdeğer devre şeması	58
Şekil 30. Aşırı Akım kaynaklı Stator sargılar hasar görmüş bir generatör	63
Şekil 31. Rotor ve Stator sürtmesi kaynaklı sargı hasarları.....	64

Şekil 32. Yağ ve kömür tozu kirliliği kaynaklı hava kanalları tıkanmış bir generatör	65
Şekil 33. Yalıtım Direnci Testi Akım bileşenleri gösterimi devre şeması	66
Şekil 34. Kapasitif akım bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri	68
Şekil 35. Absorpsiyon (emilim) akımı bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri	69
Şekil 36. İletim ve yüzey kaçak akımı bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri	70
Şekil 37. Toplam akım bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri	71
Şekil 38. Lineer regresyon grafik gösterimi	72
Şekil 39. Polinom regresyon grafik gösterimi	74
Şekil 40. Destek vektör regresyon temsili gösterimi	78
Şekil 41. Rastgele Orman (Random Forest) Algoritması temsili gösterimi	80
Şekil 42. Bobin gerilimi hesaplama detayları.....	83
Şekil 43. Bara-1 Stator sargısı proje gösterimi.....	84
Şekil 44. Deney seti ve sargıları	84
Şekil 45. Sıcaklık ve Nem Kontrol Panosu Projelendirme çalışması.....	85
Şekil 46. Deney setleri ve ölçüm aletlerine dair genel bir fotoğraf.....	86
Şekil 47. Deneylede kullanılan ölçü aletlerinin fotoğrafları	87
Şekil 48. Türbin yağı ve kömür tozu karışımının hazırlanma süreci.....	90
Şekil 49. Kirlendirilmiş olan türbin yağı.....	90
Şekil 50. Numune referans no ve yorumlarını içeren ekran alıntısı	91
Şekil 51. Yağ numunesi analizi partikül sayımı sonuçları.....	91
Şekil 52. Kirli yağın sargı yüzeylerine sprey ile uygulanması	92
Şekil 53. Sargıların kurutulma işlemi esnasında alınan ölçümler	93
Şekil 54. Sargıların temizlenmesi işleminde kullanılan yağsız çözücü kimyasal (solvent)	94
Şekil 55. Yapılan deneysel yaşlandırma ve modelleme çalışmalarına dair iş akış şeması	95
Şekil 56. Yapılan deneysel yalıtım iyileştirme çalışmalarına dair iş akış şeması.....	96
Şekil 57. BIN-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	110
Şekil 58. BIN-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	111
Şekil 59. B2N-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	112
Şekil 60. B2N-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	113

Şekil 61. B1NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	114
Şekil 62. B1NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	115
Şekil 63. B2NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	116
Şekil 64. B2NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği	117
Şekil 65. Lineer Regresyon Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması.....	119
Şekil 66. Ridge Regresyon Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması.....	120
Şekil 67. Destek vektör regresyon (SVR) Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması.....	121
Şekil 68. Polinom Regresyon Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması.....	122
Şekil 69. Rastgele orman (random forest) modeli Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması.....	123
Şekil 70. Lineer regresyon modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi	125
Şekil 71. Polinom Regresyon modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi.....	127
Şekil 72. Ridge Regresyon modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi.....	129
Şekil 73. Polinom ve Ridge Regresyon sonuçlarının benzerliğine dair değerlendirme	131
Şekil 74. Destek vektör regresyon (SVR) modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi.....	132
Şekil 75. Rastgele orman (Random forest) modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi	134
Şekil 76. Tüm modellere dair tahmin sonuçlarının grafik gösterimi.....	136

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif Akım
B_{net}	Net Manyetik Akı
B_R	Rotor Manyetik Akı Yoğunluğu
B_S	Stator Manyetik Akı Yoğunluğu
CIGRE	Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi
DAR	Dielektrik Absorpsiyon Oran
DC	Doğru Akım
E_A	İndüklenen Faz Gerilimi
FDS	Frekans Dielektrik Spektroskopisi
HV	Yüksek Gerilim
I_A	Absorpsiyon Akımı
I_C	Kapasitif Akım
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
I_f	Uyarma Akımı
I_L	Kaçak Akım
IR	Yalıtım Direnci
I_T	Toplam Akım
kV	Kilovolt
MSE	Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error)
MW	Megawatt
MWp	Megawatt Peak
PD	Kısmi Deşarj (Partial Discharge)
PI	Polarizasyon İndeksi
PRPD	Faz Çözümlü Kısmi Deşarj
RF	Rastgele Orman Karar Ağacı (Random Forest)
R^2	Belirlilik Katsayısı
SG	Senkron Generatör
SMA	Basit Hareketli Ortalama (Simple Moving Average)
SVR	Destek Vektör Regresyonu
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

WMA	Ağırlıklı Hareketli Ortalama (Weighted Moving Average)
X_s	Senkron Reaktans
ω_{syn}	Senkron Açısız Hız

1. GİRİŞ

Günümüzde, artan nüfus ve gelişen endüstriler nedeniyle enerji talebi sürekli artmaktadır. Enerji üretimi, iletimi ve depolama alanları, her biri farklı araştırma alanlarını temsil etmektedir. (Tufan, 2013). Artan bu enerji talebine karşılık enerji üretimi alanındaki gelişmelerde önem kazanmıştır. Dünya üzerinde üretilen enerjinin büyük bir bölümü fosil enerji kaynaklarından karşılanmakta olup geri kalan kısmını da nükleer enerji ve yenilenebilir kaynaklar almaktadır (Kaşıkçı, 2013).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi, ulusal düzeyde ve küresel ölçekte enerji politikası stratejilerinde yüksek öncelikli bir konu haline gelmiştir. Türkiye'nin birçok enerji kaynağı olmasına rağmen, şu anda sadece kömür ve hidroelektrik enerji önemli bir yer tutmaktadır ve talebin artmasıyla birlikte toplam enerji talebini karşılamak için yakıt ithalatı gerekli hale gelmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde özellikle hidroelektrik santrallerin yenilenebilir enerji santralleri arasında önemli bir yer teşkil ettiği görülmektedir (Benli, 2013).

Bilindiği üzere elektrik enerjisinin elde edilmesi sürecinde alternatif akım generatörleri görev almaktadır. Bu kapsamda kullanılan generatörler genellikle senkron generatör olarak isimlendirilen ve şebeke frekansı ile senkron dönüş hızı olan makinelerden oluşmaktadır. Söz konusu bu generatörler su, buhar, gaz veya rüzgâr enerjisi tarafından hareket ettirilerek birincil enerji kaynaklarını elektrik enerjisine çevirmektedir (Kaşıkçı, 2013).

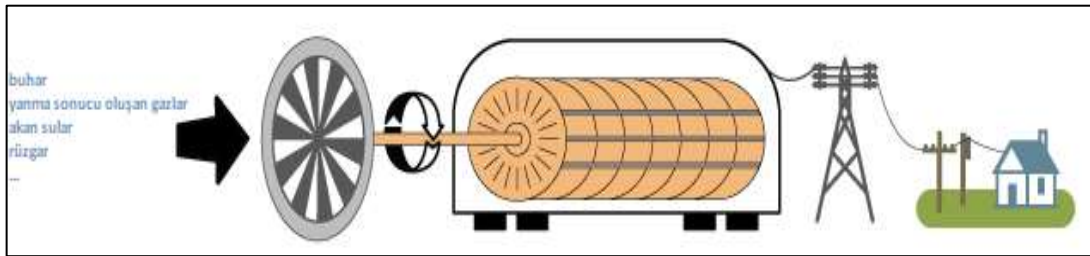


Şekil 1. Birincil ve İkincil Enerji kaynakları Enerji dönüşüm süreçleri

Günümüzün en yaygın ve temiz kullanımına sahip olan, kontrolü en kolay ve hızlı enerji türü olan elektrik enerjisinin tüketicilere iletilmesinde kalite parametreleri önem arz etmektedir. Söz konusu bu kalite parametrelerinin başında kısıntısız ve kesintisiz olarak sabit frekans ve genlikte gerilimi son kullanıcıya kadar ulaştırmak gelmektedir (Onduk, 2002).

Elektrik enerjisi sistemlerinden beklenen ana görev, ihtiyaç duyulan bütün lokasyonlara sabit frekans ve genlikte enerjiyi sağlamaktır. Söz konusu sabit frekans ve gerilim genliğinde kısıntısız ve kesintisiz enerji arzı, yani kaliteli enerji, ancak güç sistemlerinin denetimi, kontrolü ve bakımı ile sağlanabilmektedir. Enerji üretim merkezleri olan elektrik santralleri ise türbin, hız regülatörü (governor), senkron generatör ve diğer donanımlardan meydana gelmektedir (Onduk, 2002).

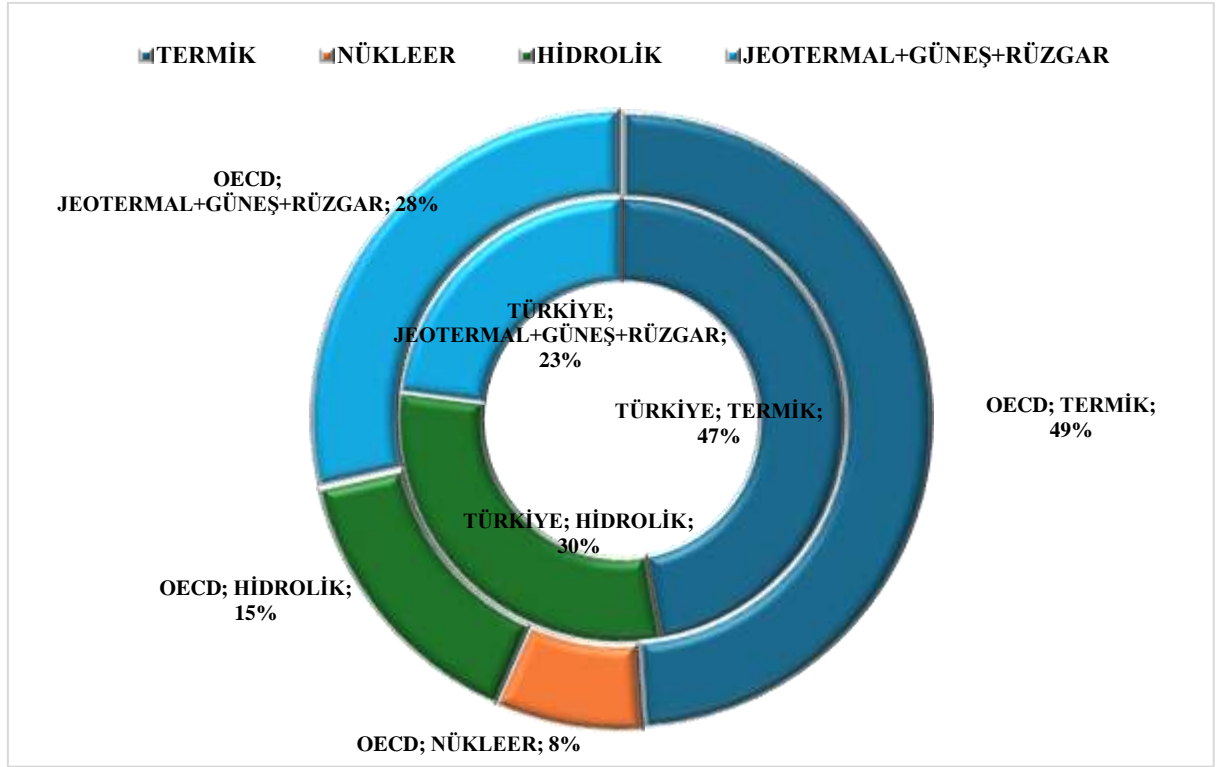
Elektrik makineleri özellikle senkron generatörler (SG'ler), tüm sanayileşmiş ülkelerin enerji üretim sektörünün olmazsa olmazlarındandır. Bu generatörler, genellikle yüksek çıkış gücüne sahip cihazlardır ve genellikle enerji üretim altyapısının ayrılmaz bir parçasıdır (Pyrhönen, Hrabovcova, & Semken, 2016; Afrandideh, Milasi, Haghjoo, & Cruz, 2020). Döner elektrik makineleri çeşitlerinden biri olan Senkron makinede rotor, daima döner manyetik alanla aynı hızda/devirde döndüğü için bu makinelere Senkron generatör adı verilmektedir. Senkron generatörler elektrik üretim santrallerinin ve dolayısıyla enerji arz sisteminin temelini oluşturmaktadır. Prensip olarak bir senkron generatör, birincil bir enerji kaynağından aldığı tahrik ile aldığı mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bahsi geçen tahrik mekanizmasında genellikle buhar, hidrolik ve gaz türbinleri kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan en büyük elektrik makineleri senkron generatörler olup, çok büyük güçte olan örnekleri nükleer enerji üretim elektrik santrallerinde bulunmaktadır (Onduk, 2002).



Şekil 2. Enerji üretim ve iletim süreçlerinin genel akış şeması (U.S. Energy Information Administration, 2025)

Senkron generatörler özellikle sabit frekanslı bir üretim kaynağı olması, reaktif güç sağlama kabiliyetleri ve yüksek verimle uzun süreli çalışabilme yetenekleri açısından büyük güçlü elektrik üretim santrallerinde çokça tercih edilmektedir. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'nin (TEİAŞ) 2022 yılı Türkiye ve OECD ülkeleri toplam kurulu güçlerine dair yayımladığı rapora göre; OECD ülkeleri genelinde elektrik enerjisi üretim sektöründe kaynak bazlı kurulu güç dağılımı aşağıdaki gibidir (TEİAŞ, 2022):

- Hidrolik santraller: %15
- Termik santraller: % 49
- Jeotermal + Güneş + Rüzgar: %28
- Nükleer santraller: % 8



Şekil 3. 2022 Türkiye ve OECD ülkeleri toplam kurulu gücünün kaynaklara dağılımı (TEİAŞ, 2022)

Aynı şekilde Türkiye özelinde 2022 yılı itibariyle kaynak bazında kurulu güç oranları şu şekilde gerçekleşmiştir (TEİAŞ,2023):

- Hidrolik Kaynaklı: %30
- Termik Kaynaklı: %47
- Jeotermal + Güneş + Rüzgar: %23

Bu dağılım özelinde değerlendirildiğinde, hidrolik kaynaklı santraller, termik santraller, nükleer enerji santralleri hatta jeotermal enerji santrallerinde elektrik üretim proseslerinde senkron

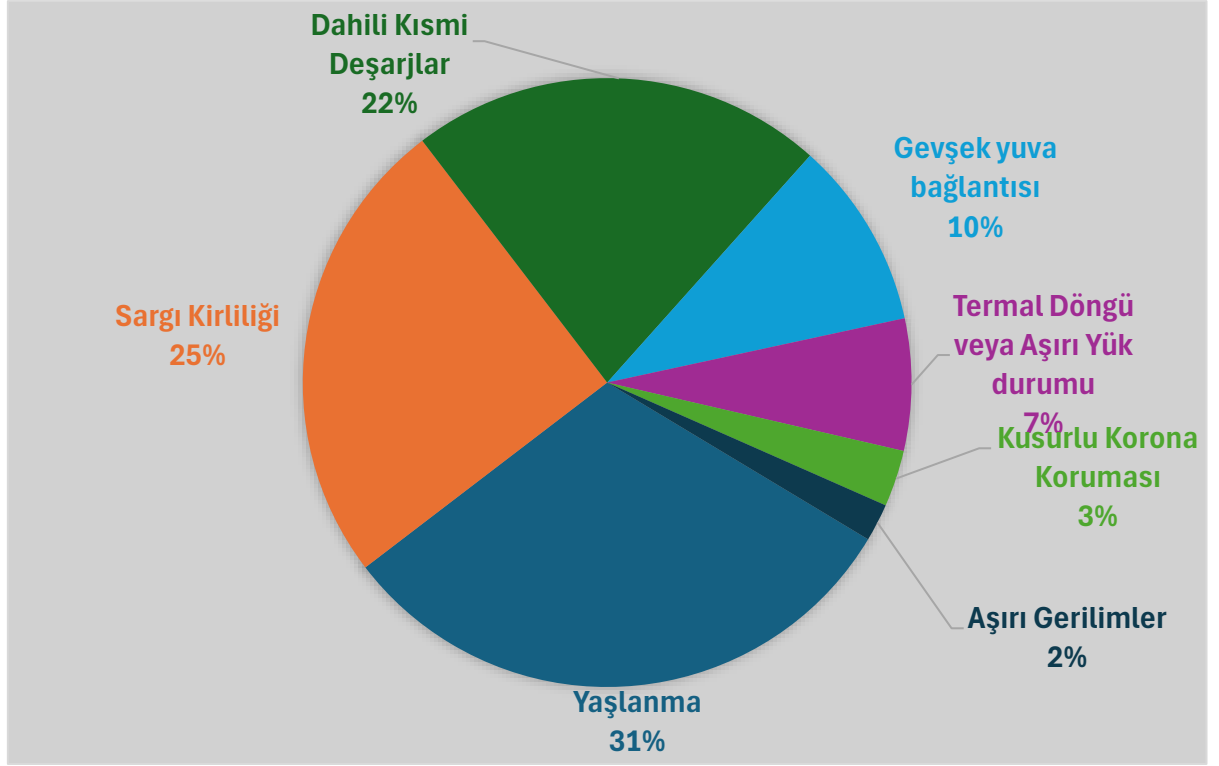
generatörler kullanılmaktadır. Daha özet bir tespit ile rüzgar ve güneş enerjisi hariç tüm enerji üretim kaynaklarında senkron generatörler yer almaktadır. Söz konusu dağılım, senkron generatör kullanımının üretim tesisleri açısından ne kadar yaygın olduğunu göstermekle birlikte yine söz konusu ekipmanın sürdürülebilir ve güvenilir işletme koşullarının sağlanmasının da enerji arz güvenilirliği açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Dünya geneli ve ulusal bazda, enerji üretimi açısından yaygın kullanımda olan senkron generatör gibi bir döner elektrik makinesi için arıza süreçlerine dair kestirimci bir bakım çalışması yapmak, ekipmanların ömrünü ve işletme güvenliğini artırmak hususunda çok önemli bir hale gelmiştir.

Genel olarak literatürde yüksek gerilimli döner elektrik makinelerinin arıza nedenlerini inceleyen çeşitli istatistikler yayımlanmıştır. Bu çalışmalardan bazıları, arıza mekanizması hakkında detaylı bir analiz yapılmaksızın sadece makinenin arızalanan bölümünü belirtmektedir. CIGRE organizasyonu çalışma komitesi SC11, EG11.02 tarafından yürütülen 1199 hidrolik generatör araştırma çalışması, arıza süreçlerini daha derinlemesine kategorize eden bir çalışma olmuştur. Bahsi geçen çalışmada 69 adet arıza olay kaydı ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Arızalı makineler ile ilgili yapılan istatistiksel çalışmaya göre makinelerin %56'sında yalıtım arızası görülmüş olup, diğer başlıca arıza türleri ise mekanik, termal ve yatak hasarları şeklinde oluşmuştur. (Şekil 4) (Brütsch, Tari, Fröhlich, Weiers, & Vogelsang, 2008).



Şekil 4. Hidrolik santrallerde generatör arıza türlerinin dağılımı (Brütsch, Tari, Fröhlich, Weiers, & Vogelsang, 2008)

Aynı şekilde ilgili elektrik yalıtım sistemi arızaları çalışma grubu tarafından daha ayrıntılı olarak incelenerek arızaların kategorizasyonu hakkında çalışmalar yapılmıştır. Yalıtım hasarlarına dair detaylı arıza analizleri ve dağılımları Şekil 5'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5. Yalıtım arızalarının detaylı kırılımına dair yapılan istatistiksel çalışma (Sumereder, 2008).

İlgili çalışmadaki sonuçlar incelendiğinde, en sık karşılaşılan arızaların yaşlanma etkilerinden ve sargının toz ve nemle kirlenmesinden kaynaklandığı görülmektedir. Özetle döner elektrik makinelerinde yalıtım sistemi (stator sargısı), enerji üretim aşamasında makinenin iç yapısında en önemli rolü oynamaktadır. Bununla birlikte söz konusu yalıtım hasarlarının detay kök nedenlerine bakıldığında arıza kaynaklarının başında yaşlanma ve sargı kirliliği etkenleri olduğu görülmektedir (Sumereder, 2008).

Gelinen bu noktada enerji arz güvenliğini sağlamak için enerji üretim tesislerinde, senkron generatörler gibi makinelerin beklenmedik şekilde servis harici olmasını önlemek de çok önemli bir hale gelmiştir. Bu generatörler, güvenilir ve kesintisiz enerji arzının sağlanmasında hayati bir rol oynamaktadır (Salomon, ve diğerleri, 2019).

Şekil.4 ve Şekil 5’de verilen istatistiksel sonuçlardan, generatörler gibi yüksek gerilimli cihazların yalıtım sistemlerinin arızaların yaygın bir nedeni olduğu anlaşılmaktadır. Buradan hareketle enerji arz güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini garanti etmek adına, ilgili sargı yalıtım hasarını engelleyebilecek kestirimci ve önleyici bakım çalışmaları önem arz etmektedir. Bu arızaların meydana gelmeden önce ilk aşamada tespit edilmesini sağlamak üzere yalıtım sisteminin durumunun izlenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, sıklıkla uzun süreli duruşlara ve azalan emre amadelik değerlerine yol açan arızalara karşı, kestirimci bakım gibi daha proaktif bakım metodolojilerine olan acil ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır (Cimino, Jenau, Staubach, Mashkin, & Pohlmann, 2018).

Bu bağlamda, generatör sargılarının kestirimci ve önleyici bakım çalışmaları kapsamında yapılacak test ve izleme sistemleri çok önem kazanmaktadır. Geleneksel izolasyon direnci (IR-Insulation Resistance) testleri, polarizasyon indeksi (PI) testi, dielektrik absorpsiyon oranı (DAR) testi , bozulma faktörü (Dissipation Factor) testi ve kısmi deşarj testleri bu süreçlerin başında gelmektedir. Söz konusu test sonuçlarının analiz edilmesi ve takip edilmesi ile sistemin sağlık durumunu gösteren kritik bir sonuca ulaşılabilir.

Kestirimci bakım disiplini, çeşitli endüstriyel sistemlerde gerçekleştirilen bakım faaliyetlerinin hem zamanlamasını hem de niteliğini optimize etmeye odaklanır. Bu amaç, gözlemlenen sistemlerin kullanılabilirliğini artırırken aynı zamanda bakım görevlerine ayrılan kaynakları azaltmayı hedefler. Endüstri 4.0 çerçevesinde, endüstriyel sistemlerin izlenmesindeki gelişmeler kestirimci bakımı dönüştürmektedir. Buna paralel olarak, yapay zekâ ve veri madenciliğindeki gelişmeler, kapsamlı veri kümelerinin analizini kolaylaştırmakta ve bu da daha hassas ve gelişmiş kestirimci modellerin oluşturulmasını desteklemektedir.

Kestirimci bakımın daha kapsamlı bir tanımında, bu yaklaşımın ekipmanın operasyonel durumunun sürekli izlenmesi ve verilerin toplanıp analiz edilmesi yoluyla gelecekteki performansını tahmin etmeyi amaçlayan bir süreç olduğu belirtilmektedir. Bu stratejinin temel amacı, ekipman arızalarından kaynaklanan öngörülemez duruşları ve üretim kayıplarını önlemektir. Bu nedenlerden dolayı, endüstriyel işletmelerin kestirimci bakım uygulamaları hayati önem taşımaktadır. İşletmeler, kestirimci bakıma odaklı stratejiler benimseyerek ekipmanlarının sürekli işlevselliğini garanti altına alabilir, giderleri düşürebilir, verimliliği artırabilir ve iş güvenliğini destekleyebilir. Bu yaklaşım, zaman içinde rekabet avantajlarını

güçlendirmenin yanı sıra sürdürülebilir başarıya ulaşmalarına da yardımcı olur (Albayrak & Kaynaklı, 2024).

1.1. Araştırmanın Önemi

Bu araştırma, enerji arzının sürekliliğini sağlamada önemli bir rol oynayan senkron generatörlerdeki sargı yalıtımının durumunu etkileyen faktörleri incelemiştir. Deneysel analiz ile kirlilik, nem ve bu koşullara maruz kalma süresi gibi belirli çevresel unsurların yalıtımın yaşlanmasına nasıl etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışma, yerel veya kısa süreli nem ve kirliliğin etkilerini hafifletmek için benimsenebilecek bakım uygulamalarını da incelemiştir. Bununla birlikte söz konusu nem ve kirlilik etkilerine karşı sargının izolasyon direnci ve dolayısıyla yalıtım kalitesinin modellenmesi için farklı modelleme algoritmaları uygulanarak bu modellerin performansları incelenmiştir. Bu çalışma ile hem deneysel ölçümler hem de modelleme çalışmaları ile birlikte hibrit bir çalışma yapılarak, söz konusu sargı yalıtımı konusundaki literatüre özgün bir katkı sunulması hedeflenmiştir.

1.2. Araştırmanın Amacı

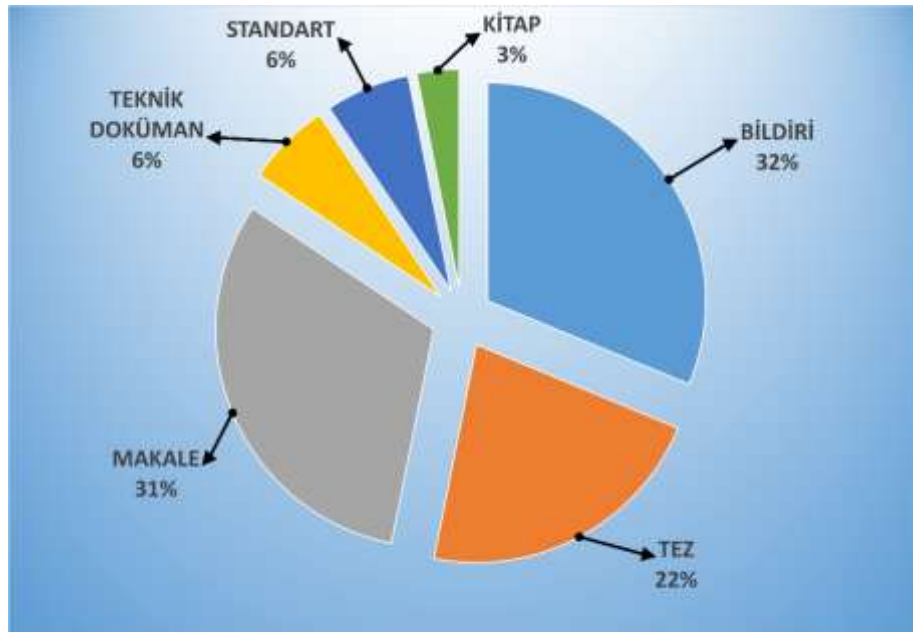
Bu çalışmanın temel amacı, çeşitli nem oranları, kirlilik seviyeleri ve maruziyet sürelerine bağlı olarak izolasyon direncinin kritik eşik değerlerinin altına düşme süresini tahmin edebilecek güvenilir bir model ortaya koymaktır. Bu model, generatör sargılarının ömür tahmini açısından önemli bir araç sağlayarak bakım planlamasına ve sistem güvenliğine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Bu çalışmada, anma gerilimleri sırasıyla 13,8 kV ve 6,3 kV olan ve yaklaşık 47 MW ve 6,3 MW kurulu güçlere sahip olan senkron generatörlere ait stator sargı numuneleri kullanılmıştır. Stator sargı yalıtımının kontrollü çevresel koşullar altında nem ve kirlilik etkilerine maruz bırakılarak yalıtım direnci parametrelerindeki değişimlerin deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, sabit sıcaklık koşullarında %65 ve %85 bağıl nem değerlerinde gerçekleştirilen deneyler ile yalıtım direnci (IR), dielektrik absorpsiyon oranı (DAR) ve polarizasyon indeksi (PI) değerlerinin zamanla değişimi sistematik olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kömür tozu ve türbin yağı karışımı ile kirlendirilmiş sargı numunelerinde aynı ölçümler tekrarlanarak, kirlilik faktörünün yalıtım parametreleri üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

İyileştirme ve bakım çalışmaları kapsamında nem ve kir maruziyeti olan sargılara dair işletme ortamında uygulanabilecek iyileştirme ve bakım uygulamalarının sargı yalıtım direncine olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Elde edilen deneysel verilerin modellenmesi amacıyla hem geleneksel istatistiksel yöntemler hem de bazı modern makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmış ve bu modellerin performansları, belirlilik katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hata (MSE) kriterleri baz alınarak karşılaştırılmıştır. Söz konusu deneysel verilerin modellenmesi akabinde, en uygun ve en kapsayıcı modelin ortaya konulması ile yalıtım sistemlerine dair çevresel ortam koşullarının etkilerinin daha anlaşılabilir ve modellenabilir olması hedeflenmiştir. Bu çalışmadan hareketle söz konusu çevresel etkilerin dikkate alınarak, bu kapsamda yapılacak endüstriyel bakım uygulamalarına da zemin oluşturması amaçlanmaktadır.

1.3. Literatür Çalışması

Çalışma kapsamında yapılan literatür incelemelerine bu bölümde değinilecektir. Yapılan literatür incelemelerinde toplamda 32 adet ilgili içerik kaydedilmiştir. Bu çalışmaların akademik kategorilerine dair kırılımları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Literatür çalışmasına dair akademik içerik kırılımlarını gösteren grafik

Literatür çalışması kapsamında incelenen akademik çalışmalara dair özet bilgileri, yazar ve yayımlanma yıllarını da içeren detaylar aşağıdaki gibidir:

Decner, Baranski, Jarek ve Berhausen tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada elektrik makinelerinin yalıtımına dair teknik durumun teşhis edilmesi ile ilgili bir inceleme yapılmıştır. Bu kapsamda elektrikli makine yalıtım sistemlerinin operasyonel denetiminin, bakımının ve teşhisinin önemi tartışılmıştır. Bununla birlikte akademik çalışma içeriğinde yalıtım sisteminin genel yapısı sunulmuş ve sargı yalıtımı tekniklerine dair bilinen çözümler anlatılmıştır. Ortam koşullarının ve çeşitli maruziyetlerin yalıtım sisteminin teknik durumu üzerindeki olumsuz etkisine de değinilmiştir. Buna karşılık Elektrik makinelerinin yalıtım sistemleri için mevcut teşhis yöntemlerinin incelenmesine özel önem verilmesi gerektiğinin altı çizilmiştir. Ayrıca bahsi geçen teşhis yöntemleri türlerine göre sistematik bir şekilde düzenlenmiştir (Decner, Baranski, Jarek, & Berhausen, 2022).

Bernardes Junior 2021 yılında yaptığı çalışmada bir hidroelektrik santralının güvenilir bir şekilde çalışması için generatörlerin durum izlemesi süreçlerinin önemine değinmiştir. Bakım faaliyetlerinin, makinelerin uzun süreli arızalı duruşlarını önlemek için planlanması gerektiğinden bahsedilmiştir. Yapılan araştırmaların, generatör arızalarının başlıca nedenlerinden birinin stator yalıtımı olduğu belirtilmiştir. Bu anlamda bakım metodolojisinin temelini, hidro generatörlerin stator izolasyon sisteminin gerçek sağlık durumunun izlenmesi olduğu ortaya koyulmuştur. Yalıtım durumuna ulaşmak için stator sargılarında kısmi boşalma testleri uygulanmıştır. Kalan faydalı ömrü tahmin etmeye yönelik bir algoritma bu çalışmanın ana katkısını oluşturmaktadır. Söz konusu tahmin, hem hidro generatörlerin istatistiksel değerlendirmelerine hem de stator yalıtım sisteminin gerçek durumuna dayanmaktadır. Yaşlanma sürecini anlamak için stator numunelerinde geniş değişkenlerin elde edildiği hızlandırılmış yaşlandırma testleri yapılır. Önerilen algoritma, simüle edilmiş durumlarda ve yalıtım arızasını gözlemleyen bir termal döngü testinden elde edilen gerçek verilerde test edilmiştir (Bernardes Junior, 2021).

Verginadis ve arkadaşları (2020), çalışmalarında senkron generatörlerdeki (SG) stator arızaları için teşhis teknikleri incelenmiştir. Elektrik Makinaları enerji üretim sisteminin önemli elemanlarıdır. Bu makineler son derece denetlenmesine rağmen Senkron Generatörlerin en önemli sorunlarından biri yalıtım durumu olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, Senkron Generatörlerdeki yalıtım sisteminin durumunu belirlemek için sahada kullanılan yöntem ve teknikleri incelemektedir. Bu incelemede, pratik ölçümler ve gerçek vakalar ele alınmıştır. Çalışmada ilk olarak, boroskop kameraları aracılığıyla yapılan görsel incelemenin, yalıtım sorunlarını tespit etmek için kullanıldığını, belirgin sorunları tespit edebildiğini, ancak yeni

başlayan arızaları veya dahili sorunları bulma konusunda yetersiz olduğunu göstermektedir. Sahada yaygın olarak kullanılan bu ölçümler, zemin duvarı yalıtımının (IR) durumunun yanı sıra olası nem veya kirliliğin (PI) varlığını belirlemek için de faydalıdır. Ancak bu testler olası bir sorunun kaynağını tam olarak belirleyemediği gibi yalıtımın diğer kısımlarındaki sorunları da tespit edemez. Senkron Generatör alanında gerçekleştirilen PD testlerinde, PD verilerinin yıllar içindeki analizi, erken yalıtım sorunları ve hatanın nereden kaynaklandığının ayırt edilmesi için de kullanılır. Çalışmanın amacı, çevredeki gürültüden etkilenmeyen, sonuç üretebilen, uzman olmayan kullanıcılar tarafından yorumlanabilen veya en azından akıllı algoritmalar tarafından otomatik olarak işlenebilen yöntemler geliştirmektir. Bu bağlamda yakın zamanda geniş bant izolasyon spektroskopisine dayanan bazı umut verici yöntemler önerilmiştir (Verginadis, Antonino-Daviu, Karlis, & Danikas, 2020).

Famakin (2018) tarafından yapılan bu çalışmada, havalandırmalı bir su ağacının dinamik kapasitans modelini ve buna bağlı olarak bozulmuş yeraltı kablo yalıtımının dinamik kapasitans modelini geliştirmek için havalandırmalı bir su ağacının dinamik dielektrik geçirgenliği açısından şekil değiştirme dinamiklerini araştırmaktadır. Kablo yalıtım arızalarının %80'den fazlası, ağaçlandırmanın bozulmasından kaynaklanmaktadır. Polimerik kablolar da su ağaçlaşması sorunu, yalıtım sistemlerini giderek zayıflatan mikroskobik bir bozulma sürecidir. Bir güç dağıtım ağında alınan ve PQWeb'de depolanan ölçümlerden elde edilen Kendi Kendini Temizleyen Arızanın (SCF) mevcut kullanım verilerini kullanan model, tipik bir Orta Gerilim (MV) kablosunun ömrü boyunca SCF'lerin meydana gelme zamanını belirlemek için kullanılmıştır. Ayrıca, izolasyon bozulmasının ilerleyişini takip etmek amacıyla kablo izolasyon durumunun çevrimiçi olarak uygulanması ve gerçek zamanlı izlenmesi için uygun olan Kalıcı Arıza Tahmini ve Önleme Algoritması (PF-APA) geliştirilmiştir. Algoritma, trafo merkezi sensörleri, güç elektroniği cihazları ve denetleyici sistemle birlikte kablo yalıtımının durumuna ilişkin veri toplamayı koordine edebilecek, arızalı bir kablonun erken işaretlerini belirlemek için verileri işleyebilecek ve komut ve kontrol sinyallerini başlatabilecektir. Altyapı arızası, özellikle onarım veya değiştirme maliyeti ve arıza süresi maliyeti açısından rahatsızlık ve bir dizi ekonomik sonuç getirir. Bu çalışmanın, kullanımdaki yer altı güç kablolarının durumunun izlenmesi yoluyla bunu başarmaya yönelik yeni bir pencere açmayı amaçlamaktır (Famakin, 2018).

Eriksson (2017) tarafından yapılan bu çalışmada, bir elektrik makinesindeki izolasyon sistemine yönelik yeni hızlandırılmış test yöntemleri geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir.

Çalışma, doğrudan yağ soğutmasından kaynaklanan termal stresi, termomekanik stresi ve ortam stresini simüle eden dört stres testiyle sonuçlanmıştır. Çalışma, doğrudan yağ soğutmasından kaynaklanan termal stresi, termomekanik stresi ve ortam stresini simüle eden dört stres testi kullanılmıştır. Malzeme analizi, malzemede çatlaklar ve oksidasyon gibi yalıtımda bozulma olduğunu göstermiştir. Yalıtım direnci testinin sonuçları, doğrudan yağ soğutmalı güç çevrimi dışında tüm testler boyunca sabittir. Bu durum zemin duvarı yalıtımının yağa bulandığının bir işaretidir. Soğutma yağı yalıtımı ıslattığında bakır sargı ile çekirdek arasında çok daha iyi bir temas sağlayacak ve bu da daha düşük yalıtım direncine yol açacaktır. Bunun nedeni, havanın 3-8 fS/m civarında bir elektriksel iletkenliğe sahip olması ve çoğu yağın en az birkaç pS/m düzeyinde bir elektriksel iletkenliğe sahip olmasıdır. Proje ile ana hedeflere ulaşılmış ve yeni stres testi yöntemleri geliştirilmiştir. Teşhis testlerinden elde edilen sonuçlar, statorun elektriksel özelliklerinin doğrudan yağ soğutmasına maruz kaldığında değiştiğini gösterse de, güç çevrim testlerinde iki soğutma türü arasında bozulma açısından net bir fark görülmemektedir (Eriksson, 2017).

Lin ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan bu araştırmada, yüksek gerilimli motor stator sargılarında yağ kirliliğiyle ilişkili deşarj davranışını nem ve sıcaklığın nasıl etkilediğini inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Araştırma, hem yağ hem de kömür tozuyla kirlenmiş iki sargı modelinin hazırlanmasını ve ardından farklı sıcaklıklarda (25 °C ve 80 °C) ve bağıl nem seviyelerinde (%30-%90) gerçekleştirilen yaşlanma testlerini içermektedir. Araştırma, faz çözümlü kısmi deşarj (PRPD) modellerine odaklanmış ve sıcaklık arttıkça kısmi deşarj yoğunluğunun da arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, nem seviyeleri %80'i aştığında yüzey sürünme deşarjlarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Kısmi deşarj genlikleri yüksek nem koşullarında azalsa da, yalıtım hızlı bir şekilde bozulmuştur. Bu sonuçlar, 10 kV endüksiyon motorlarının çevrimiçi izlenmesi ve arıza teşhisi için önemli bir temel sunmaktadır (Lin, ve diğerleri, 2016).

Suzuki ve arkadaşları (2016), türbin generatörlerinde kullanılan stator çubuklarının yalıtım direncindeki değişimleri, özellikle sıcaklık bağımlılığına odaklanarak bir araştırma yürütmüştür. Deneyler, 10 °C ile 80 °C arasında değişen sıcaklıklar uygulanırken iletim akımı, yüzey sızıntı akımı ve polarizasyon akımı bileşenlerini ayrı ayrı ölçmeyi içermektedir. Sonuçlar, yalıtım direncinin 40 °C'nin altındaki sıcaklıklarda neredeyse sabit kaldığını göstermiştir. Ancak bu eşğin üzerinde, öncelikle polarizasyon akımındaki artışa atfedilen dirençte bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yalıtım direncinin sıcaklık bağımlılığının ağırlıklı olarak

polarizasyon akımından etkilendiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, 40 °C'nin altında alınan ölçümler için sıcaklık düzeltmesinin gereksiz olduğu ve böylece hem ölçüm doğruluğunun hem de bakım verimliliğinin arttığı öne sürülmektedir (Suzuki, Sako, Maeda, & Mio, 2016).

Petit (2015) tarafından yapılan bu çalışmada, güç generatörünün su soğutmalı stator barası için, bakır tel lehimleme yerindeki su sızıntıları yalıtım direncini önemli ölçüde azaltacağını belirtmiştir. Bu nedenle, yalıtım direnci ölçümü periyodik bakım programında gerçekleştirilecek önemli ve basit bir testtir. Sıcaklığın yalıtım direnci üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sargının yalıtım direncini doğru bir şekilde eğilimlendirmek için bir düzeltme faktörü uygulanmalıdır. Bu makalede, çalışan bir generatörden çıkarılan çubuklardan hem kuru hem de ıslak epoksi-mika yalıtım üzerinde gerçekleştirilen deneysel veriler açıklanmaktadır. Sonuçlar farklı düzeltme modelleri ile karşılaştırılmıştır. Kuru ve ıslak baralar arasındaki sıcaklık katsayısında önemli bir fark olduğunu göstermektedir. Büyük su soğutmalı turbo generatör yalıtımında yaygın bir yaşlanma süreci, teller ve su kutusu arasındaki lehimleme sızıntılarından kaynaklanmaktadır. EDF testi için generatör terminallerden ayrılır. Testten önce su soğutma devresi vakumla kurutulur ve buşingler temizlenir ve kuru sıcak hava püskürtülür. Test faz faz, önce 2,5 kV'da ve ardından doğrusal olmayan bir durum olup olmadığını kontrol etmek için 5 kV'da gerçekleştirilir. Su girişi sorununu ortaya çıkaran ana kriterler, 10 dakikalık yalıtım direnci eşiğine ve polarizasyon indeksine dayanmaktadır. Eşik değer, laboratuvarda yapılan çalışmalar ve deneyimlerle elde edilmiştir. Sıcaklığın yalıtım üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Termoset yalıtım sistemi için sıcaklık bağımlılığı eski termoplastik yalıtımdan daha düşüktür. Generatörden generatöre ölçümlerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak ve yalıtımın yıllar içindeki seyrinde daha az sapma olması için, bir yeniden sarma işleminden çıkarılan bara örnekleri kullanılarak bir çalışma yapılmıştır (Petit, 2015).

Torkaman ve Karimi (2015), transformatörlerdeki kısmi deşarj (PD) olaylarının tespiti için yapay zekâya dayalı bir yöntem sunmuştur. Bunu başarmak için, sonlu elemanlar yöntemiyle elektrik alan dağılımlarını modellemiş ve çeşitli arıza senaryolarını simüle edilmiştir. Elde edilen PD sinyallerinin sınıflandırılması, arıza türleri arasında etkili bir şekilde ayırım yapan yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulgular, geliştirilen metodolojinin erken arıza teşhisi için güvenilirlik sunduğunu ve bakım süreçlerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu gösterilmiştir (Torkaman & Karimi, 2015).

Stone, Culbert, Boulter ve Dhirani (2014) çalışmasında, Elektrik motorları ve generatörlerin icat edilmesinden bu yana çok çeşitli elektrikli makine türleri yaratıldığını belirtmiştir. Çoğu

durumda, farklı şirketler aynı tip makineyi veya aynı bileşeni tamamen farklı isimlerle adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, 1 kW veya daha fazla güce sahip makineler üzerinde yoğunlaşsa da yalıtım sistemi tasarımı, arızası ve test edilmesine ilişkin bilgilerin çoğu daha küçük makinelere, lineer motorlara, servo motorlara vb. uygulanmaktadır. Ancak bu ikinci makine türleri açıkça tartışılmayacaktır (Stone, Culbert, Boulter, & Dhirani, 2014).

Bhumiwat (2011) tarafından yapılan bu çalışma, farklı tip ve koşullarda izolasyon yaşanmasına sahip makinelerin Polarizasyon Depolarizasyon Akımı (PDC) veya şarj ve deşarj akımı ölçüm sonuçları üzerinden dönen makinelerin izolasyon direnci ve polarizasyonunu açıklamaktadır. Polarizasyon İndeksinin (P.I.) yalıtım kuruluşunu değerlendirmek için neden tek başına kullanılamayacağını ve yalıtım direnci ile kapasitansın çarpımının neden yalıtım kalitesinin tek başına yalıtım direncinden daha iyi bir ölçüsü olduğunu göstermektedir. Ancak, makine yalıtımındaki küresel sorunların teşhisinde belirleyici bir anahtar sağlayan PDC, Kapasitans oranı ve Dielektrik Yayılma Faktörü (DDF) kombinasyonudur (Bhumiwat, 2011).

IEEE Standart Kitapçığında, yalıtım direnci ölçümü, elektrik yalıtımının durumunu değerlendirmek için yarım yüzyıldan fazla bir süredir tavsiye edilmektedir. Bireysel yalıtım direnci ölçümleri şüpheli değere sahip olabilirken, aylar ve yıllar boyunca biriken periyodik ölçümlerin dikkatlice tutulan kayıtları, elektrik yalıtımının durumunun bazı yönlerinin bir ölçüsü olarak tartışılmaz bir değere sahiptir. Başlangıçta, 1950 yılında, bu önerilen uygulama, AIEE tarafından, elektrik yalıtım direncinin ölçümü ve anlaşılmasıyla ilgili çeşitli yönleri sunan bir kılavuz olarak yayımlandı. Kılavuz 1961'de ve 1974'te yeniden revize edilmiştir. 1970'lerde elektrikli döner makinelerde kullanılan yalıtım türlerinde çeşitli değişiklikler yapıldı. Bu yeni THERMOSETTING yalıtım sistemlerinin yalıtım direnci özellikleri eski THERMOPLASTIC sistemlerden farklıdır ve bu nedenle yalıtım direncini ölçme standardında bu önemli revizyonu gerektirmiştir. Diğer değişiklikler arasında, test teorisine ilişkin daha fazla açıklamanın eklenmesi ve eski sargılar için bakım kurutma prosedürlerine ilişkin önerilerin kaldırılması yer almaktadır. Bakım prosedürlerine ilişkin tavsiyeler bu belgenin kapsamı dışındadır. Önerilen bir uygulama olarak bu yayınlı IEEE, dönen makinelerdeki elektrik yalıtımının durumunun izlenmesinde önemli bir faktör olarak elektrik yalıtım direnci ölçümünü sunmakta ve tavsiye etmektedir (IEEE, 2013).

Brown (2011) tarafından yapılan bu çalışmada, Makine Yalıtımı için Yalıtım Direnci Ölçümleri incelenmiştir. Bir makine sargı yalıtımının servis gerilimine güvenli bir şekilde

dayanabileceğinden emin olmak ve belirli sayıda yıl hizmet verdikten sonra çalışma koşullarındaki güvenilirliğini değerlendirmek için onlarca yıldır dc testleri kullanılmaktadır. IEEE Std-43 tarafından yaklaşık 1970'ten sonra tasarlanan çoğu ac sargı için önerilen minimum IR değeri 100 MΩ'dur. Bu makalede çeşitli makinelerin sargılarından elde edilen veriler sunulmakta ve yalıtım direncinin sadece yalıtım sisteminin sağlığına değil aynı zamanda makine boyutuna ve yalıtım teknolojisine de bağlı olduğu gösterilmektedir. Farklı makineler arasında veya tek tek baralar veya bobinler arasında değerleri karşılaştırmak için sargı kapasitesini kullanan ve yalıtım teknolojisini dikkate alan bir normleştirme tekniği önerilmektedir (Brown, 2011).

Sathiyasekar, Thyagarajah, Krishnan, Systems ve Applications (2011) çalışmasında büyük bir motorun (veya) generatörün kullanım ömrü öncelikle yalıtım sistemlerinin durumuna göre belirlendiğini belirtmiştir. Bu yalıtım sistemleri termal, mekanik ve elektriksel gerilimlerin etkisi altında yavaş yavaş bozulmaktadır. Sonunda izolasyon arızası ortaya çıkmakta ve büyük onarımlar, geri sarma veya makinenin tamamen değiştirilmesi gerekmektedir. Yalıtım malzemelerinin, tasarım uygulamalarının ve çalışma ortamlarının çeşitliliğinin bir sonucu olarak çok sayıda arıza mekanizması vardır. Bu çalışmada, dönüşümlü makine bakım personelinin makinelerinin yalıtım durumunu değerlendirmesine yardımcı olacak bir uzman sistemin geliştirilmesini açıklamaktadır. BPN algoritmali sinir ağı kullanılarak girişimlerde bulunmuş ve bulanık sistem, uygulanan test voltajı ile izolasyondaki hava dolu boşlukların hacmine bağlı olarak kapasitans ve dağılım faktörünün maksimum değişimi arasında bir korelasyon kurma olasılıklarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Yüksek gerilim ekipmanının güvenilirliği büyük ölçüde yalıtımın kalitesine bağlıdır. Yalıtımın büyük bir kısmının termal stres, elektriksel stres, mekanik stres ve çevresel stres gibi çok zorlu çalışma koşullarına dayanması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmanın amacı, sonuçta arızaya yol açabilecek kusurları, anormallikleri ve arızaları tespit etmek için kullanımdaki ekipmanın durumunu kontrol etmektir. Yüksek gerilimli dönen makinenin stator sargısının yalıtım durumu, kaçak akım, kapasitans, kayıp faktörü ve kısmi deşarj büyüklüğünün ölçülmesiyle belirlenmiştir. BPN algoritması ile karşılaştırıldığında bulanık mantıkta tahmin edilen sonuçların ölçülen değerlere çok yakın olduğu görülmüştür. Simülasyon sonuçlarından, bulanık mantık tabanlı hata teşhisinin, sinir ağı tabanlı hata teşhisine göre daha düşük yüzdesel hata verdiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle bulanık mantık tabanlı arıza teşhisi, arıza tespiti için etkili bir yöntemdir. Bulanık mantık tabanlı hata tespit şeması gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır (Sathiyasekar, Thyagarajah, & Krishnan, 2011).

Jayantha, Fernando ve Ekanayake (2009) tarafından hazırlanan çalışmada, asfalt, polyester ve epoksi mika izolasyonlarında nem girişi nedeniyle generatör stator sargısının durum değerlendirmesini sunmaktadır. Çalışma, laboratuvar ve saha incelemeleri olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Laboratuvar incelemelerinde, doğal olarak ıslatılmış iki asfalt mika ve iki kuru yedek stator sargısı, dc rampa testi, yalıtım direncinin (IR) zaman değişimi ve frekans dielektrik spektroskopisi (FDS) ölçümleri kullanılarak test edilmiştir. İki ıslak numune bir fırın içinde kurutulurken, kuru numuneler bir su banyosu içinde ıslatılmıştır. Bunlar üzerinde dc rampa ve IR testleri tekrarlanmış ve son olarak FDS ölçümleri de alınmıştır. Sonuçlar farklı test yöntemleri arasında karşılaştırılmış ve basitliği ve maliyet etkinliği nedeniyle saha araştırması için dc rampa testi kullanılmıştır. Saha araştırmalarında, Ceylon Electricity Board'a ait seçilmiş yedi hidro ve bir termal generatör test edilmiştir. Generatör yalıtımı üzerindeki nem etkisini araştırmak için dc rampa testinin etkili bir şekilde kullanılabileceği bulunmuştur (Jayantha, Fernando, & Ekanayake, 2009).

Barré ve Napame (2008) çalışmasında, kritik çalışma koşullarıyla bağlantılı son derece uzun kullanım ömrüdür. Kullanılan teknolojilerin ilk nükleer santralden bu yana gelişmektedir, ancak diğer faaliyet sektörlerindeki kadar hızlı değildir. Günümüzde sargı izolasyon sistemleri, özellikle yüksek gerilim sargıları köklü bir yapıya sahiptir. Birçok üreticinin uzun yıllara dayanan deneyimlerden kaynaklanan iyileştirmeleri, müşterilerin ve üreticilerin yalıtım spesifikasyonlarını veya niteliklerini düzenli olarak geliştirmelerine yardımcı olan standartların yazılmasına yol açmıştır. Bu nedenle, bu yayında yazarlar bir yalıtım planının adım adım kapsamlı bir incelemesini yapacak ve yalıtım sistemleriyle bağlantılı standartlar hakkında ayrıntılı bir rapor sunmak için zaman ayıracaktır. Yalıtım sistemi arızası kesintilerin ana sebebidir. Yalıtım sisteminin tasarımı bir hesaplama sonucu değildir. Mika ve cam gibi hammaddeler inert malzemelerdir ve gelecek yüzyılda yalıtımda yer alacaktır. Yaşlanma birçok parametreye bağlıdır ve yaşlanma parametrelerinin kombinasyonu standartların kapsamında değildir. Belirtilen koşullar altında ürünün kullanım ömrüne ulaşacağını sınırlı testlerle göstermeleri gerekir. Bu makalede, sınırlı bir pazara sahip geleneksel elektrikli makine üreticilerinin makine çeşitlerini artırmanın yollarından biridir. Motor izolasyonunu iyileştirerek, makinelere yüksek kalitede sargı izolasyonu sağlayarak rekabet güçlerini arttırmaktadır (Barré & Napame, 2008).

Klamt ve Noel (2008) çalışmasında, Elektrik kesintisi ve korona testleri için yeni, daha zorlu endüstri gereksinimleri, yüksek gerilimli, hidro-generatör sargılarının stres derecelendirme

sistemlerinin iyileştirilmesini sağladığını belirtmiştir. Malzemelerde ve bara üretim süreçlerinde ortaya çıkan değişiklikler, stator baralarının ve bobinlerinin ve tüm generatör sargısının İzolasyon Direnci (IR) üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, gerilim derecelendirme sistemindeki değişiklikler, sargının IR ve Polarizasyon İndeksi (PI) için minimum, belirtilen gereksinimleri de dikkate alınmalıdır. Bu makalede, farklı gerilim derecelendirme sistemleri ile işlenmiş stator çubukları ve bobinleri üzerindeki IR ölçümleri sunulmaktadır. Burada sunulan gerilme dereceleme sistemleri, uygulama süreçlerinde, özellikle de uygulanan dereceleme malzemesinin uzunluğunda farklılık göstermektedir. Sonuçlar, bu varyasyonların IR ve PI üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve tüm yalıtım sistemi gereksinimleri arasında bir dengenin dikkate alınması gerektiğini açıkça göstermektedir. Nominal gerilimleri 16 kV'tan büyük olan sargılar için, gerilim derecelendirmesi işleminin tüm sargı çıkıntısına uygulanması önerilmektedir. Bu durumda, ölçülen IR ve PI geçmiş verilerden beklenenden çok daha düşüktür (Klamt & Noel, 2008).

Lamarre ve David (2008) çalışmasında, iki tip epoksi mika yalıtım sisteminin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağımlılığını sunmaktadır. Polarizasyon ve depolarizasyon akımları, yalıtım direnci, kapasitans ve polarizasyon indeksi, tüm dönen makine stator baralarında 20 ila 100 ° C'lik bir sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Deneysel sonuçlardan, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak direncin düzeltilmesine ilişkin analitik bir ilişki türetilmiştir. Çalışmanın birincil amacı, dönen makinelerin çubukları ve bobinleri için kullanılan epoksi-mika bazlı yüksek gerilim yalıtım malzemelerinin yalıtım direnci için sıcaklık düzeltme faktörlerini belirlemektir. Çalışmanın ikincil amacı ise, bir stator çubuğunun iletkeni ile yarı iletken kalkanı arasında bir adım dc voltaj uygulandıktan sonra, bir polarizasyon/depolarizasyon teşhis testinde şarj ve deşarj akımlarının sıcaklıkla nasıl değiştiğini deneysel olarak belirlemektir. Bu çalışmanın sonuçları IEEE Std-43'e eklenebilir ve 40 °C'de direnç verilerini düzeltmek için kullanılabilir. Bu çalışma ayrıca yalıtım direnci (IR) ve polarizasyon indeksi (PI) gibi genellikle dönen makine tanılmasında kullanılan parametrelerin sıcaklıkla nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu çalışmada kapsanan sıcaklık aralığı 20°C ila 100°C'dir (Lamarre & David, 2008).

Sumereder (2008) çalışmasında, başarısızlık/arıza istatistikleri ve ömür analizi prosedürüne ilişkin bir bakış sunmaktır. Arıza durumunda makinenin teknik ve ekonomik çerçevede tekrar çalışır duruma getirilip getirilemeyeceği veya tamamen veya kısmen değiştirilmesi gerekip gerekmediğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu makalenin amacı, başarısızlık istatistikleri ve ömür analizi prosedürüne ilişkin bir bakış sunmaktır. Güvenilir istatistikler için en önemli faktör

veri kaynağının kalitesi ve verilen verilerin yorumlanmasıdır. Bu çalışmada, hidro-generatörlerin izolasyon sistemleri üç gruba ve iki üretim teknolojisine ayrılmıştır (Sumereder, 2008).

Zhu (2007) tarafından yapılan çalışmanın amacı, modern stator çubuklarının ve bobinlerinin çeşitli sıcaklıklara tepki olarak yalıtım direnci karakteristiğini araştırmaktır. Yalıtım direnci için logaritmik bir ölçek ve sıcaklık için doğrusal bir ölçek kullanıldığında, test noktaları, 40°C'de düzeltilmiş değeri elde etmek için ekstrapole edilebilecek düz bir çizgiye yaklaşmalıdır. Sıcaklığa karşı yalıtım direnci değerlerini elde etmek için bir stator çubuğu ve bir stator bobini test edilmiştir. Hem çubuğun hem de bobinin F sınıfı yalıtım sistemi, yarı iletken bantlar ve derecelendirme boyası içeren epoksi mikadır. Yalıtım direnci ölçümleri alınmadan önce hem çubuk hem de bobin laboratuvarlarda yaşlandırılmıştır. Yalıtım direnci testleri sırasında çevre odasında %50 muhafaza edilmiştir. Yalıtım direnci ve kaçak akım, 10°C'den 60°C'ye 10°C'lik adımlarla ölçülmüştür. Yalıtım sisteminin hedef sıcaklık noktasına ulaştığından emin olmak için yalıtım direnci ölçülmeden önce her test sıcaklığı bir saat boyunca çevre odasında tutulmuştur. Yalıtım direnci testleri sırasında yalıtım üzerindeki sıcaklığı izlemek için termokupllar da kullanılmıştır (Zhu, 2007).

Sumereder ve Muhr (2006) tarafından yapılan bu çalışmada özellikle eski sargı yalıtım sistemlerinin higroskopik olduğu ve nemin, nemli ortam havasından yalıtımın gövdesine emildiği belirtilmiştir. Özellikle asfaltik-mika ve şellak mika-folium yalıtım malzemeleri çok iyi emicidir. Bakım sırasında generatör sargılarının kuruluşunu değerlendirmek için de PI teşhis yönteminin kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. PI, diğerlerinin yanı sıra, sargıların kuruluşunu değerlendirmek için de kullanılabilecek bir parametredir. Düşük PI'li makineler için, artırılmış test gerilim seviyesiyle yüksek gerilim testlerinin yapılmaması önerilmiştir. Generatörlerin kurulum ölçümü sıklıkla PI ölçüm yöntemine göre uygulanması tavsiye edilmiş bu yöntemi geçerliliğinden bahsedilmiştir (Sumereder & Muhr, 2006).

Rux (2004) bu araştırmada, rampalı doğrudan yüksek gerilim testi sırasında gözlemlenen ölçülen akım tepkisinin ayrıntılı bir teorik açıklamasını geliştirmek ve rampalı gerilim tekniğini stator sargı yalıtımını değerlendirmeye yönelik diğer yöntemlerle karşılaştırmıştır. Bu hedeflere öncelikle dielektrik malzemelerin ve yalıtım sistemlerinin elektriksel özelliklerinin altında yatan önemli mikroskobik olayların tanımlanmasıyla ulaşılmıştır. Arızalı yalıtım, gerekli düzeyde elektriksel strese dayanamayabilir. Rampalı voltaj testinin farklı türdeki yalıtım

sorunlarını tespit etme yeteneği değerlendirilmiştir ve belirli yalıtım kusurlarıyla üretilmiş bir dizi epoksi-mika stator sargı bobini kullanılarak diğer birkaç teşhis yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı testler arasında yalıtım direnci, polarizasyon indeksi, geri kazanım voltajı, dağılım faktörü, dielektrik spektroskopisi, kısmi deşarj ve rampalı doğrudan yüksek voltaj testleri yer almıştır. Bu araştırma sırasında elde edilen test sonuçları, fiziksel kusurlarla ilişkili yalıtımdaki değişiklikler nedeniyle bobin numuneleri arasında farklılıklar olduğunu ortaya çıkarmıştır. Deneysel bobinleri arasında, dipol ve uzay yükü polarizasyon etkilerinin değişen elektrik alanına tepki vermek için daha fazla zamana sahip olduğu en düşük frekanslarda gözlenmiştir. Kirlenmiş bobinler, voltaj aşırı iletim eşiğini aştığında dramatik bir yükselme davranışı sergilemiştir. Gevşek bantlara ve düşük yoğunluğa sahip bobinler de daha düşük bir voltajda doğrusal olmayan hale geldi ve uygulanan voltaj aralığı boyunca akımdaki genel artış, normal bobinlerle karşılaştırıldığında daha yüksektir. Tüm stator bobini numuneleri, izolasyon kusurlarının türü ve ciddiyetine bağlı olarak az ya da çok farklılıklar göstermiştir (Rux, 2004).

Cash (1998) çalışmasında dönüş hatasına maruz kalan bir asenkron makinenin modeli analiz edilmiş ve simüle etmiştir. Bir dönüş arızasının birincil belirtisinin, etkilenen faz için terminal akım büyüklüğündeki hafif bir artış olduğu sonucuna varılmıştır. Bu gözlem, dönüş hatalarını tespit etmek için iki alternatif tekniğin geliştirilmesine yol açtı. İlk teknik, makinenin hat-nötr gerilimlerinin toplamına dayanmaktadır. Bu üç voltaj, başlangıç dengesini elde etmek için kalibre edilir ve daha sonra cebirsel olarak toplanmıştır. Kalibrasyon, doğal dengesizliğin tüm kaynaklarını hesaba katar ve arızasız voltaj toplamının sıfırlanmasını sağlamaktadır. RMS ortalaması, voltaj toplamı sinyalinin yumuşatarak algılamayı kolaylaştırmıştır. Bu sinyalin büyüklüğündeki bir artış, makinenin elektrik dengesinin değiştiğini ve izolasyon arızasının ilerlediğini göstermiştir. Üç RMS hat akımı, makinenin doğal dengesizliği ve yük dalgalanmalarına göre kalibre edilmiştir. Ortaya çıkan, kalibre edilmiş üç akım, standart sapma ölçümüyle istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu akımların standart sapması referans makine durumunda sıfır olmalıdır ancak dönüş arızasının yarattığı dengesizlik nedeniyle artmalıdır. Değişikliğin kapsamı, arızanın ciddiyetini ve yalıtım arızasının olasılığını veya derecesini belirlemiştir. Bu yöntemlerin her ikisi de deneysel olarak dikkate değer bir başarıyla doğrulamıştır. Test edilen makinede nominal koşullar sırasında tek turlu bir arıza (144 turda) tespit edilmiştir (Cash, 1998).

Vashishtha (1995) tarafından yapılan bu çalışmada, dönen makinelerin elektrik yalıtım sistemi gibi en kritik parametredeki bozulmanın değerlendirilmesi, ekipmanın sağlığının değerlendirilmesi ve tesis ömrünün uzatılması, kaynak planlaması ve hizmetten çıkarma faaliyetleri açısından daha iyi yaşam döngüsü yönetimi için kalan ömür tahmin edilmesi incelenmiştir. Stator izolasyonu, rotor ve çekirdek için çeşitli teşhis testleri mevcuttur. Ancak PD sinyalinin ölçümü, sınıflandırılması ve anlamlı yorumlanması alanında büyük miktarda uzmanlık gereklidir. Mika ve epoksi/polyester reçinelerin kullanıldığı kompozit malzemeler, yüksek gerilim motor ve generatörlerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik yalıtımı arızanın ana nedenlerinden biridir. Bu çalışmanın kapsamı, matematiksel modelin geliştirilmesi ve parametre tahmini için radyasyon ve termal yaşlanmanın gerçekleştirilmesidir. Yaşlandırma 227 M. Rad'a kadar gerçekleştirilmiştir. Mevcut gama radyasyon odaları esas alınarak, yaşlandırma günlük 4.368 M. Rad ve günlük 0.456 M. Rad olmak üzere iki farklı doz oranında yapılmıştır. Sonuçlar aynı yaşlandırma saatleri için ancak 110 °C sabit sıcaklık ve 88,6 °C ortalama sıcaklıktaki termal döngü için karşılaştırılmıştır. Dört tip malzemenin tamamı için yüksek doz hızı ve düşük doz hızı gama radyasyonu ve sabit ve döngüsel sıcaklık altında performans düşüşü açısından çekme mukavemeti ve uzama ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışma için tekli gerilme deneyleri yapılmış ve radyasyon ve termal için birleşik gerilme etkilerinin hesaplanmasında 'Süperpozisyon' teoremi kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde, Weibull grafiklerinde çizilen verilerden, tüm durumlar için parametreler tahmin edilmiştir. Termal ve radyasyon yaşlanması, uzama ve kırılma noktasına kadar enerji gibi mekanik özellikleri etkilediği kadar elektriksel özellikleri değiştirmez. Burada tahmin edilen Weibull parametrelerinden, referans değerlerden yüzde bozulma bilinebilir. Değişen kritik limitler için birkaç durum için kalan ömür tahmin edilmiştir. Deneysel sonuçlar aynı zamanda güvenilir performans ve gelecekte daha kaliteli yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi için yalıtımın uzun vadeli davranışı hakkında da fikir vermektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deney ve gerçekleştirilen veri analizi, farklı materyalleri değerlendirmek ve karşılaştırmak için temel bir metodoloji oluşturabilir. Parametre değerlerinden 1PGMP'nin radyasyona daha dayanıklı bir malzeme olduğu görülmektedir. Sinerjistik yaşlandırma olanaklarının mevcut olmaması nedeniyle, birleşik stres hesaplamaları için 'Süperpozisyon' teoremi kullanılmış ve belirli varsayımlara, tesise özel verilere, tüketilen ömüre, gerilimlerin oranı ve gerilimlerin oranı vb dayalı olarak dört malzemenin tümü için kalan ömür tahmin etmek için bir metodoloji geliştirilmiştir (Vashishtha, 1995).

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Senkron Generatörlerde Yalıtım Sistemleri ve Arıza Analizi

2.1.1. Yalıtım sistemlerinin genel yapısı ve önemi

Yalıtım, bir elektrik güç sisteminin enerjili ve enerjisiz bileşenleri arasında bariyer görevi görür. Bu yalıtım, katı, sıvı, gaz, vakum veya katı ve sıvıların bir karışımı gibi çeşitli formlarda bulunabilir. İdeal bir yalıtkan, nominal gerilimi altında üzerinden herhangi bir akımı iletememesiyle karakterize edilir ancak tüm doğal yalıtkanlar minimum miktarlarda da olsa, bir miktar iletkenlik gösterir. Sonuç olarak, enerjili sistemlerde sargıyı saran yalıtımdan az miktarlarda ve sızıntı akımının geçmesi muhtemeldir (Ndzeru, 2008).

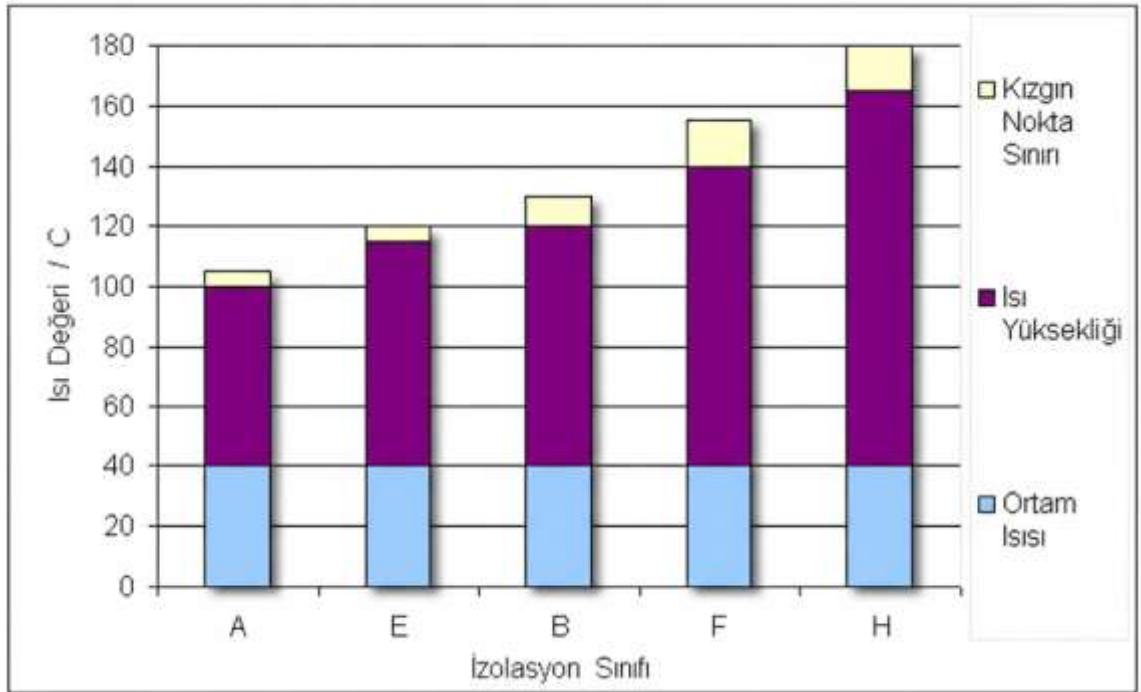
Senkron generatörler gibi yüksek gerilim altında çalışan ve genellikle büyük güçlü ve yüksek akımlı uygulamalarda kullanılan elektrik makinelerinde de yalıtım sistemi tasarımı çok büyük önem arz etmektedir. Akım taşıyan stator sargılarında, sargıların direncine bağlı olarak sıcaklık artar. Bu sıcaklık artışı, generatörün gücü, faz akımları ve ileri/geri güç faktörleri de dahil olmak üzere çalışma koşulları gibi durumlara bağlı olarak çeşitli yalıtım sınıfı tasarımlarını gerekli kılar. Bu hususlar, generatörün soğutma sisteminin tasarımında da benzer şekilde dikkate alınır. Yalıtım sınıfları, sıcaklık artışlarını yönetmek için özel olarak formüle edilir ve generatörün sürekli çalışma ve bekleme sorumluluklarına göre farklılık gösterir (Tufan, 2013).

Söz konusu çalışma koşulları ve işletme parametreleri dikkate alınarak belirlenen sargı yalıtım sınıfı seçimi, generatör için çok kritik bir dizayn aşamasını temsil etmektedir. Bir generatörün yalıtım sınıfı, yalıtım sisteminin özelliklerini kaybetmeden sürekli çalışabileceği en yüksek sıcaklığı belirler. Başka bir gösterge bulunmadığı sürece, generatörün etiketinde veya katalogda belirtilen güç değerleri, deniz seviyesinde, nominal gerilim ve frekansta, maksimum 40°C ortam sıcaklığında geçerlidir (Elk Motor, 2025). Elektrik makinelerinin sargıları ve kullanılan yalıtım malzemeleri dayandıkları sıcaklık seviyelerine göre sınıflandırılmış ve bu ayırım yalıtım sınıflarına harf kodları olarak verilmiştir. Tablo 1’de ilgili yalıtım sınıfları ve azami sargı sıcaklığı değerleri verilmiştir (EMO, 2025).

Tablo 1. Yalıtım sınıflarına göre sıcaklık limitleri

	Yalıtım Sınıfı				
	A	E	B	F	H
Isı yüksekliği	105	120	130	155	180
Maksimum sargı ısı	100	115	120	140	165
Ortam ısı	40	40	40	40	40
Kızgın nokta için sınır	5	5	10	15	15

Generatörün sargı sıcaklığı, standart çalışma koşulları altında kullanılan yalıtım sınıfı tarafından belirlenen maksimum sıcaklık eşliğinin içinde kalmalıdır. Örneğin, Sınıf F yalıtımla donatılmış bir elektrik motoru, sargı sıcaklığını 155°C'nin altında tutmalıdır. Birçok generatör ve motor üreticisi, sıcaklık artışının Sınıf B parametreleri içinde kalmasını sağlamak için Sınıf F yalıtım malzemelerini tercih etmektedir. Bu uygulama, motor için 25°C'lik bir güvenlik marjı sağlar. Sonuç olarak, motor yüksek ortam sıcaklıklarında ve rakımlarda ve ayrıca değişen gerilim seviyelerinde çalışabilir. Ayrıca, bu konfigürasyon normal çalışma koşulları altında yük alma kapasitesinde yaklaşık %12'lik bir artışa izin verir. Elektrik makinesinin sıcaklık artışının, kullanılan yalıtım malzemesinin belirtilen sınırlarının altında tutulması, sargının ömrünün uzamasına da katkıda bulunur (Elk Motor, 2025).



Şekil 7. Yalıtım sınıfları (Akıncı Generatör ve Motor, 2025)

Sargı yalıtımlarında kullanılan katı yalıtım malzemelerinin dielektrik dayanımı, ortam sıcaklığı, nem, test süresi, kirlilik ve yapısal kusurlar gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Sargı yalıtım sistemi kullanım ömrü boyunca çeşitli elektriksel, mekanik ve çevresel zorlanmalar ile karşılaşır. Bahsedilen bu zorlanma etkileri ve diğer koşulların etkisi altında sargı yalıtım sistemi giderek bozulur ve yalıtım özellikleri azalmaya başlar (Ndzeru, 2008).

Yalıtım tasarımı, belirli çevre koşulları, gerilim seviyeleri ve mekanik gerilime maruz kalma olasılığı gibi çeşitli faktörleri dikkate alır. Yalıtım, genellikle çalışma ömrü boyunca nominal gerilimlere dayanacak şekilde tasarlanır. Bununla birlikte hem elektriksel hem de mekanik gerilimler yalıtımın yaşlanma sürecini önemli ölçüde hızlandırma potansiyeline sahiptir. Bu etkileri öngörmek ve gerekli bakım, onarım ve iyileştirme önlemlerinin zamanında uygulanmasını kolaylaştırmak için DA (Doğru Akım) Yalıtım Direnci Ölçümleri, Dielektrik Emilim Oranları (DAR), Polarizasyon İndeksi (PI) ölçümleri ve adım gerilimi testleri (step voltage) dahil olmak üzere düzenli değerlendirmeler yapmak esastır. Bu değerlendirmelerden elde edilen bulgular, yalıtımın durumu hakkında kritik çıkarımlar yapılmasını sağlayarak, onarım ve iyileştirme gibi uygun eylemlerin gerektiği gibi uygulanmasına olanak verir (Ndzeru, 2008).

Sargı yalıtım direncinin elektriksel olarak ölçülmesi sürecinde DA (Doğru Akım) test yöntemleri ve ilgili test ekipmanlarının kullanılması, olası yalıtım bozulması ve yaşlanmasının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini kolaylaştırır. En geniş kapsamda önerilen DA (Doğru Akım) testleri başlıca aşağıdaki gibidir:

- Kısmi Kontrol (Spot Check – IR)
- Dielektrik Emilim / Absorpsiyon Oranı (Dielectric Absorption Ratio)
- Polarizasyon İndeksi Oranı (Polarization Index – PI)

Senkron makinelerin yalıtımlı rotor, stator sargıları ve çekirdek yapısındaki hasarlar elektriksel ve mekanik şoklardan kaynaklanabilir. Örneğin sargı yalıtımından rotora ve/veya stator gövdesine veya şasesine geçen kaçak akımdaki bir artış, sargı sistemi üzerinde ısı artışı olarak kendini gösterecek olan I^2R 'de (bakır kayıpları) bir artışa yol açacaktır. Bir başka durumda ise artan rotor kaçak akımından kaynaklanan dengesiz alan akımı, dengesiz titreşimlere neden olarak yatak bölümlerinin ısınmasını artıracaktır. Yatak sıcaklıkları bu titreşim nedeniyle kritik eşik seviyesine ulaşarak ilgili senkron generatörü çalışamaz hale getirebilecektir. Dolayısıyla söz konusu bu elektriksel test ölçümlerinin yapılması arıza süreçlerinin önceden tahmin

edilebilmesi ve önleyici bakım prosedürlerinin yürütülmesi için fırsat verebilmektedir. (Ndzeru, 2008).

2.2. Çevresel Zorlanma Faktörlerinin Yalıtım Sistemlerine Etkisi

2.2.1. Nem faktörünün yalıtım sistemlerine etkisi

Sargının işletme ortamında veya depolama, nakliye koşullarındaki bağıl nem (relative humidity- RH) elektrik makinelerinde kullanılan sargı yalıtım sistemlerinin performansını ve yaşam ömrünü etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biridir. Genel olarak stator sargılarında tercih edilen katı yalıtım malzemeleri, elektriksel, termal ve mekanik zorlanmalara dayanacak şekilde tasarlanmış olsa da, dielektrik özellikleri nem durumuna karşı oldukça hassastır. Nem, ortam havasından difüzyon yoluyla, duruş ve soğuma süreçlerinde yoğuşma etkisiyle veya yalıtım katmanları arasındaki kılcal boşluklar üzerinden sargı yapısına nüfuz edebilmektedir. Yalıtım malzemesi bünyesine giren nem, iyonik iletkenliği artırarak kaçak akımların yükselmesine ve buna bağlı olarak yalıtım direnci değerlerinin düşmesine neden olur. Nem maruziyetinin devam etmesi durumunda, dielektrik polarizasyon mekanizması olumsuz yönde etkilenmekte ve polarizasyon indeksi gibi tanılama parametrelerinde belirgin azalmalar gözlemlenmektedir. Gerçek işletme koşullarında bu süreç, yalıtım sisteminin yaşlanmasını hızlandırmakta; özellikle yüksek nem ve yüzey kirliliğinin birlikte bulunduğu ortamlarda kısmi deşarj oluşumu ve erken yalıtım arızası riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Özetle sargı yüzeyinin temizliğinden bağımsız olarak nem durumu, sargı yalıtımını üzerinde büyük ölçüde etkilidir.

Özellikle bazı sargı yalıtım sistemleri, higroskopik özellikler sergileyerek nemli ortam havasından yalıtım malzemesine nem emilimine daha fazla olanak tanır. Bu durum, özellikle yaşlı termoplastik asfalt mika, termoset polyester mika ve gomalak mika-folium yalıtım malzemelerinde ve büyük türbin generatör rotorlarında yalıtımsız bakır iletkenler arasında kullanılan özel yalıtım şeritlerinde daha yaygın olarak görülmektedir (IEEE, 2013).

Ayrıca Sargı sıcaklığı çevredeki havanın çiğlenme noktasında veya altında olması da yalıtım yüzeyinde bir nem filmi oluşturabilir. Söz konusu bu durum yalıtım direncini veya polarizasyon indeksini düşürme eğiliminde olmakla birlikte, yüzey kirliliğinin fazla olduğu veya yalıtımda çatlaklar olduğu durumlarda daha da belirgin hale gelir (IEEE, 2013). Çalışan makinelerde sıcaklıklar sıklıkla çiğlenme noktasını aşar. Makine sargılarının sıcaklığı, çiğlenme noktasının altına düşmeden önce testlerin yapılması önem arz etmektedir. Hizmet dışı kalan makineler,

genellikle sargı sıcaklığı çığ noktasının altına düştüğünde değerlendirilir. Bu durum, nem yoğunluğu nedeniyle beklenenden önemli ölçüde daha düşük yalıtım direnci ve polarizasyon indeksi değerlerine yol açabilir. İşlemlere devam etmeden veya yüksek gerilim testleri yapmadan önce kabul edilebilir değerlere ulaşmak için bu makinalarda bir kurutma işlemi gerekebilir. Uygun kurutma yöntemleri konusunda ekipman üreticisine danışmanız önerilir. Makinenin geçmişinin değerlendirilmesi, görsel incelemeler ve ek test sonuçları, nem yoğunluğundan kaynaklanan düşük yalıtım direnci ve/veya polarizasyon indeksi değerleri gösteren bir makinenin yeniden devreye alınmasıyla ilişkili potansiyel riskler hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. Polarizasyon indeksi ve yalıtım direnci değerleri azalmış makinelerin daha fazla yüksek gerilim testine tabi tutulmaması da kuvvetle önerilir (IEEE, 2013).

2.2.2. Kirlilik faktörünün yalıtım sistemlerine etkisi

Sargı yalıtım sistemlerinde kirlilik, elektrik makinelerinde sargı yalıtım sistemlerinin güvenilirliğini ve uzun dönemli yalıtım performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli çevresel etkenlerden biridir. Genel olarak işletme ortamının doğası gereği stator sargılarının yüzeylerinde biriken toz, yağ buharı, endüstriyel partiküller ve kimyasal kalıntılar, sargı yalıtım sisteminin yalıtım özelliklerini değiştirerek elektriksel dayanımını düşürücü etki göstermektedir. Türbin yağı gibi bazı kirletici maddeler ise tek başına yalıtkan özellik gösterebilmekle birlikte, nem ile birleştiğinde yüzey üzerinde iletken bir film tabakası oluşturarak kaçak akımların artmasına neden olabilmektedir. Yüzey kirliliğinin artmasıyla birlikte, sargı yalıtımında yüzeysel elektrik alan dağılımı bozulmakta ve bu durum, özellikle oluk çıkış bölgeleri ve sargı başlarında yüzey deşarjları ve iz oluşumu (tracking) riskini artırmaktadır. Zaman içerisinde bu süreç, yalıtım direnci ve polarizasyon indeksi gibi tanılama parametrelerinde belirgin düşüslere yol açarak sargı yalıtımının yaşlanmasını hızlandırmakta ve erken dönem yalıtım arızalarının ortaya çıkma olasılığını önemli ölçüde artırmaktadır.

Yapılan elektriksel testler sonucunda tespit edilen yalıtım direncindeki azalış eğilimi, kirlilik kaynaklı kötüleşen kusurların veya çatlakların bir göstergesi olabilir. Ayrıca yalıtım direncindeki azalış yalnızca sargının yüzeysel kirlilik durumundan da kaynaklanıyor olabilir. Dirençteki söz konusu bu azalma eğilimi, çalışma geriliminden yüksek gerilimler altında daha belirgin hale gelebilecektir (IEEE, IEEE recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery, 2000). Bu kapsamda kirlilik kaynaklı sargı yalıtımı arızalarının ve

zorlanma etkilerinin tespiti için sargı yalıtım direnci testleri çok önemli bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bir başka kirlilik etkisi, rotor ve statorun havalandırma kanallarında ve son sargıdaki bobinler arasında kir, nem ve yağ karışımlarının birikmesi, soğutma hava akışını engelleyebilir ve termal bozulma olasılığını artırabilir (Stone, Culbert, Boulter, & Dhirani, 2014).

2.2.3. Sıcaklık ve termal zorlanma etkilerinin yalıtım sistemlerine etkisi

Sıcaklık, elektrik makinelerinde kullanılan sargı yalıtım sistemlerinin elektriksel ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkileyen temel işletme parametrelerinden biridir. Yalıtım malzemeleri, artan sıcaklıkla birlikte hem dielektrik özelliklerinde hem de mekanik dayanımlarında bozulma eğilimi göstermektedir. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında, yalıtım yapısı içerisindeki moleküler hareketliliğin artması, yalıtım direncinin azalmasına ve kaçak akımların artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, uzun süreli termal zorlanmalar yalıtım malzemesinde geri dönüşü olmayan yaşlanma süreçlerini tetikleyerek çatlak oluşumu, bağlayıcı malzeme zayıflaması ve kısmi deşarjlara karşı hassasiyetin artması gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle sargı yalıtımının güvenli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışabilmesi, büyük ölçüde işletme sıcaklığının kontrol altında tutulmasına bağlıdır.

Sıcaklığın yalıtım ömrü üzerindeki etkisi, literatürde yaygın olarak **Arrhenius yaklaşımı** ile açıklanmaktadır. Bu yaklaşıma göre, yalıtım malzemelerinde meydana gelen kimyasal yaşlanma süreçlerinin hızı sıcaklıkla üstel olarak artmakta ve belirli bir sıcaklık artışı, yalıtım ömründe önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Pratikte bu ilişki, sıcaklıktaki her 10 °C'lik artışın yalıtım ömrünü yaklaşık yarıya indirebileceği şeklinde ifade edilmektedir. Arrhenius temelli bu yaklaşım, sargı yalıtım sistemlerinin termal tasarımında ve ömür tahmin çalışmalarında temel bir referans noktası olarak kullanılmaktadır.

2.3. Yalıtım Durumu İzleme ve Tanı Teknikleri

2.3.1. Geleneksel yalıtım direnci ölçüm yöntemleri (IR, DAR, PI)

Genel olarak elektrik makinelerinde sargı yalıtımının durumunu değerlendirmek için sektörde yaygın olarak kullanılan yaklaşım, yalıtım sisteminin bütünlüğünü ve performansını belirlemek için çeşitli parametreleri değerlendiren çevrimdışı testlerin uygulanmasına dayanır. Bu test ve

değerlendirme yöntemleri, yalnızca planlı bakım kesintileri sırasında düzenli aralıklarla değil, aynı zamanda motor veya generatörlerin devreye alma aşamasında ya da onarım/iyileştirme süreçlerinin akabinde de gerçekleştirilir. IEEE 43-2000' standart metninde de özetlendiği gibi; Yalıtım Direnci (IR) testi, yalıtım durumunu test etmek ve yalıtımın durumunu izlemek için kullanılan önemli bir çevrimdışı test yöntemidir.

Yalıtım direncinin (IR) ölçümü, yalıtımın durumunu belirlemek için önemli bir değerlendirme ve teşhis aracı görevi görür. Sargı yalıtım direnci için genellikle mega ohm (MΩ) mertebesinde ifade edilen yüksek yalıtım direnci değerleri, etkili ve başarılı bir yalıtım sisteminin göstergesidir. Yalıtım direncini ölçmek için, genellikle 2500 V seviyelerine kadar hatta bazı uygulamalarda daha yüksek doğru gerilimler uygulayan yalıtım test cihazları veya “megger” olarak bilinen özel test cihazları kullanılır.

Yaşlanma, nem, sıcaklık dalgalanmaları, mekanik hasar ve kir gibi çeşitli faktörler sargı yalıtımını kondisyonunu olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple elektriksel yalıtım güvenliğini sağlamak ve olası arıza riskini azaltmak için periyodik yalıtım direnci testleri yapmak çok önemli bir bakım yaklaşımı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu test ve tanı yöntemleri, özellikle kablolar, motor ve generatör sargıları ile ilgili olarak yürütülen rutin bakım ve güvenlik denetimlerinin ayrılmaz bir parçasıdır (IEEE, 2013).

Tablo 2. Önerilen minimum yalıtım direnci

MΩ cinsinden minimum yalıtım direnci	Test Numunesinin Detayları
$IR_{1\ min} = kV + 1$	1970'lerden önce yapılan çoğu sargı için, tüm alan sargıları ve burada açıklanmayan diğer sargı türleri
$IR_{1\ min} = 100$	1970'lerden sonra üretilen çoğu AC sargısı için
$IR_{1\ min} = 5$	1 kV'un altında nominal gerilimi olan, rastgele sarımlı stator bobinleri ve sargılı bobinleri olan çoğu elektrik makineleri için

Polarizasyon indeksi testi olarak bilinen teknik, yalıtım direncinin ölçümüne zamansal bir boyut kazandıran alternatif bir test ve tanı yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntem, sargılara sabit bir doğru gerilim (DA) uygulanırken 1. ve 10. dakikalarda kaydedilen yalıtım direnci değerlerinin oranını dikkate alır. Optimum durumdaki yalıtımlar, azalan yüzey akımı ve artan

dielektrik emilimi sayesinde zamanla artan direnç gösterirken, Polarizasyon indeksi parametresi de yüksek mertebelere ulaşır (IEEE, 2013).

$$PI = R_{10}/R_1 \quad (2.2)$$

Düşük polarizasyon indeksi (PI) değerleri, sargının yağ, kir veya nem gibi kirlenmelerle kirlenmiş olabileceğini işaret eder. Polarizasyon indeksi testi sırasında, sargı iletkeni ile stator veya rotor gövdesi arasına doğru akım (DA) gerilimi uygulanır. Devrede oluşan kaçak akım daha sonra ölçülür. Bu bağlamda, yalıtım direnci Ohm yasası kullanılarak hesaplanabilir.

$$R_t = V/I_t \quad (2.3)$$

Yalıtım direnci değeri, uygulanan test geriliminin (DA) "t" anında devreden geçen akıma bölünmesiyle belirlenir. Tablo 3'te, ilgili standartlara göre polarizasyon indeksi değerlerinin değerlendirme kriterleri bulunmaktadır. 2,0'den düşük bir polarizasyon indeksi (PI), yalıtımın bütünlüğü ve işlevselliği konusunda ciddi endişelere işaret etmektedir (IEEE, 2013).

Tablo 3. Önerilen minimum Polarizasyon İndeksi değerlendirme kriterleri

Polarizasyon İndeksi	Yalıtım Durumu Teşhisi
<1	Zayıf
1-2	Şüpheli
2-4	Orta
>4	İyi

Polarizasyon indeksi (PI) değeri için önerilen minimum değerler, yalıtım malzemelerinin termal sınıfı ile de ilişki olarak değişmektedir. IEC 60085-01: 1984 standart içeriğine göre uygulamadan bağımsız olarak tüm yalıtım malzemeleri için söz konusu minimum polarizasyon indeksi değerleri geçerlidir. Bu kısımda polarizasyon indeksi testinin, yalıtımsız sargılar için geçerli olmadığı bilinmesi gereken önemli bir sınırlamadır. Bununla birlikte asfaltik yalıtım malzemesi esaslı olan stator sargıları için çok yüksek PI değerleri (örn. $PI > 8$), yalıtım durumunun termal olarak yaşlandığı ve yüksek arıza riski durumlarını işaret edebilir. Yalıtımın kuru ve kırılğan bir durumda olup olmadığını tespit etmek için fiziksel muayeneler ve kontroller yapılmalıdır (Megger, A guide to diagnostic insulation testing above 1 kV, 2025).

Tablo 4. Termal yalıtım sınıflarına göre minimum Polarizasyon İndeksi değerleri

Termal Sınıf	Minimum PI Değeri
Sınıf A	1.5
Sınıf B	2.0
Sınıf F	2.0
Sınıf H	2.0

Polarizasyon indeksi (PI) testi esnasında, incelenen yalıtım sisteminin direnci 10 dakikalık bir süre boyunca sürekli olarak ölçülür. Yalıtım direnci test cihazları genellikle bu 10 dakikalık aralıktan sonra kaydedilen direncin 1. dakikadan sonra ölçülen dirence oranını otomatik olarak hesaplar ve sunar. Yani yeni yalıtım sistemi test cihazları, polarizasyon indeksi değerlerin kendisi hesaplayıp kullanıcıya sunabilir şekilde donatılmıştır. Aynı şekilde 2,0 'ın üzerinde bir PI değeri, yalıtımın tatmin edici durumda olduğunu gösterir. Tersine, bu eşiğin altına düşen bir sonuç, diğer olası nedenlerin yanı sıra, yalıtım malzemesinin bozulmasına yol açan yüzey kirliliğinden kaynaklanabilecek bir sorunun varlığını gösterir. Bununla birlikte, 2,0'den düşük herhangi bir PI ölçümü daha fazla araştırma gerektirir (IEEE, 2013).

Tablo 5. DAR ve PI değerlerinin değerlendirme kriterleri tablosu

Yalıtım Durumu	60/30-Saniye Oranı (DAR)	10/1-Dakika Oranı (Polarizasyon İndeksi - PI)
Tehlikeli	—	1'den az
Şüpheli	1.0 - 1.25	1.0 - 2.0
İyi	1.4 - 1.6	2 - 4
Mükemmel	1.6'nın üzeri	4'ün üzeri

Bir başka yalıtım direnci testi yöntemi olan Dielektrik Absorpsiyon Oranı (DAR) testinde ise, daha kısa bir test süresinde alınan iki farklı ölçümün oranı dikkate alınmaktadır. İlgili parametre yalıtım direnci testinde test geriliminin tatbik edilmesinin ardından, 60. saniyedeki yalıtım direnci değerinin, 30. saniyedeki yalıtım direnci değerine bölünmesi ile hesaplanır. Bu orana Dielektrik absorpsiyon oranı ya da dielektrik emilim oranı ismi verilmektedir. Bu oran, yalıtım hakkında hızlı bilgi almak için kullanışlıdır (Megger, 2006).

$$DAR = R_{60sn}/R_{30sn} \quad (2.4)$$

Yalıtımın genel performansı ve kondisyonu hakkında daha güvenilir sonuçlar elde etmek için genellikle 10 dakikalık okumalardan oluşan polarizasyon indeksi testi daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bir dakikalık okumalardan oluşan Dielektrik absorpsiyon oranı testi hem okuma

sapmaları hem de diğer gürültülerden etkilenebilmektedir. Tablo 5’de söz konusu bu oranların (DAR ve PI) değerlendirme ve teşhis kriterlerini içeren görelî durumlarını gösterilmektedir.

Yalıtım sistemlerinin elektriksel davranışı, genel olarak başta sıcaklık olmak üzere çevresel ve işletme koşulları ile doğrudan ilişkilidir. Yalıtım direnci, malzemenin elektriksel yük taşıyıcılarını sınırlama yeteneğini temsil eden temel bir parametre olup, sıcaklık değişimleri karşısında belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Sargı iletkenlerinde sıcaklık artışı, kafes titreşimlerinin yoğunlaşmasına bağlı olarak elektronların ortalama serbest yolunu kısaltmakta ve buna bağlı olarak özdirencin artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık sargı yalıtım malzemelerinde sıcaklık artışı, termal enerjinin etkisiyle bağlı yük taşıyıcılarının serbest kalmasını kolaylaştırmakta ve buna bağlı olarak da yalıtım direncinin azalmasıyla sonuçlanmaktadır. Özetle yalıtım direnci ile sıcaklık arasında ters yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Bunun yanı sıra sargı yalıtım direnci ölçümleri yalnızca sıcaklığa bağlı değil, aynı zamanda ölçüm sırasında uygulanan gerilimin süresine de bağlıdır. Özellikle makinenin durdurulmasını takiben yapılan ölçümlerde, sargı sıcaklığının kısa süre içerisinde önemli ölçüde düşmesi mümkündür. Örneğin çalışma sıcaklığı 90–100 °C aralığında olan bir makinede, duruş sonrası ilk 10 dakika içinde meydana gelen hızlı sıcaklık değişimi, ölçülen yalıtım direnci değerlerini ve buna bağlı olarak Polarizasyon İndeksi (PI) sonuçlarını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle trend analizlerinde sıcaklık etkisinin minimize edilebilmesi için, yalıtım direnci testlerinin mümkün olduğunca benzer sargı sıcaklıklarında gerçekleştirilmesi önerilmektedir (IEEE, 2013).

Pratik işletme koşullarında her ölçümün aynı sargı sıcaklığında yapılması her zaman mümkün olmadığından, farklı sıcaklıklarda elde edilen yalıtım direnci değerlerinin karşılaştırılabilir hâle getirilmesi amacıyla sıcaklık düzeltme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda, ölçülen yalıtım direnci değerlerinin genellikle 40 °C referans sıcaklığına veya oda sıcaklığına (25 °C) indirgenmesi önerilmektedir. Sıcaklık düzeltmesi aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir:

$$R_C = K_T R_T \quad (2.5)$$

Burada;

R_C = 40 °C'ye düzeltilmiş yalıtım direncidir (megohm cinsinden)

K_T = T °C sıcaklığındaki yalıtım direnci sıcaklık katsayısıdır

R_T = T °C sıcaklığında ölçülen yalıtım direncidir (megohm cinsinden)

Ancak sargı veya ortam sıcaklığının çığlenme noktasının altına düştüğü durumlarda, yüzeylerde meydana gelen nem yoğuşması yalıtım direnci ölçümlerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu gibi koşullarda, ölçüm sonuçlarının yalnızca sıcaklık düzeltmesi ile değerlendirilmesi hatalı yorumlara yol açabilir. Böyle durumlarda, makinenin hizmete geri dönüş uygunluğunun değerlendirilmesinde, benzer çevresel koşullar altında elde edilmiş geçmiş ölçüm sonuçlarının ve işletme geçmişinin dikkate alınması daha sağlıklı bir yaklaşım olarak önerilmektedir (IEEE, 2013).

2.3.2. Teşhis ve iyileştirme uygulamaları

Yalıtım direnci testlerindeki bulgular ışığında teşhis ve tedavi yöntemleri kısmen önerilebilir. Bu kısımda yalıtım direncinin ve bağlı parametrelerinin düşük çıkması durumu, yalıtım yüzeyinden geçen sürekli ve görece yüksek bir kaçak doğru akımı ifade eder. Bu olgu; genellikle sargı yüzeylerinde birikebilen toz, kir, uçucu kül, kimyasallarla karışmış yağ veya nem gibi kirleticilerin varlığına atfedilir. İdeal bir senaryoda, bu kaçak akımın büyüklüğü sıfır olmalıdır. Bu nedenle ölçülebilir herhangi bir seviye, kirlenmeden kaynaklanan bir yalıtım sorununa işaret eder. Polarizasyon indeksi parametresinin kirlenme nedeniyle azalması sonucunda uygun temizleme prosedürleri uygulanarak kirlilik etkileri ortadan kaldırılabilir (IEEE, 2000).

Sargı yalıtımı üzerindeki kirlilik etkilerini gidermek için çok sayıda teknik mevcuttur. Özel buharlı temizleme üniteleri daha küçük statorlara uygunken modern polyester veya epoksi mika yalıtım sistemlerine sahip daha büyük statorlar yüksek basınçlı su veya buhar kullanılarak temizlenebilir. Ayrıca kuru buz, kırılmış ceviz kabukları veya mısır koçanları gibi yöntemler de kullanılabilir ve bu yöntemlerde, kabuk bağlamış kirleri etkili bir şekilde çıkarmak için yüksek basınçlı hava kullanılır. Özellikle yüksek hızlı motorlar ve generatörler için avantajlı olan kuru buz temizleme, ceviz kabukları gibi partikül temizleme yöntemlerinden kaynaklanan döküntülerle ilişkili bir sorun olan rotordaki küçük soğutma kanallarının tıkanma riskini azaltır. Kuru buz süblimleştiği için tıkanma sorunu etkili bir şekilde çözülür. Bununla birlikte bazı kullanıcılar bu temizleme yönteminin sargılardaki yağ filmlerini yeterince giderebileceğini belirtmektedir. Toprak tabakasının nispeten ince olduğu yerlerde, çözücü veya deterjan gibi temizlik maddeleri, tiftiksiz bezler ile uygulanarak sargıları silmek için kullanılabilir. Bu yaklaşım, alternatif yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda, daha büyük generatörlerde yoğun kirleticilerin giderilmesi için de önemli olabilir. Trikloroetilen gibi

çözücüler, yağ gidermede oldukça etkilidir ancak bu tip güçlü çözücüler, sağlık riskleri oluşturan buhar yayma potansiyeli göstermektedir. Bundan dolayı yalnızca bir solunum cihazıyla birlikte kullanımı güvenli olarak kabul edilir (Stone, Culbert, Boulter, & Dhirani, 2014).

2.4. Literatürdeki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Katkısı

Bu çalışmanın teorik temellerini oluşturmak ve mevcut bilgi birikimini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla, senkron generatör sargı yalıtım sistemleri, çevresel stres faktörlerinin etkileri, yalıtım durumu izleme teknikleri ve makine öğrenmesi yaklaşımları konularında yapılmış olan çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemede, senkron generatör stator sargılarını etkileyen çevresel faktörlerin araştırılmasında önemli eksiklikler olduğunu vurgulamıştır.

Bu minvalde Fırat Üniversitesi'nde 2000 yılında yürütülen “Yüksek Gerilim İzolatörlerinde Kirlenme Atlamasının Dinamik Ark Modeli” isimli bir çalışma ile, bir başka yüksek gerilim yalıtım malzemesi kategorisi olan izolatörler için aynı nem ve kirlilik etkilerine odaklanılmıştır. Bu araştırmada, kirlilik ve nemden kaynaklanan yüzeysel atlamalar incelenmiş, güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan yüzey kirliliği ve nem kaynaklı yalıtım delinmeleri ve atlamaları ele alınmıştır. Benzeri şekilde yüksek gerilim iletim hatlarında kullanılan bir yalıtım malzemesi kategorisi olan izolatörler içinde kirlilik ve nemin çok önemli olduğu ortaya koyulmuştur. (Aydoğmuş, 2000). Senkron generatör sargı yalıtım sistemine olan etkilerinin incelenmesi açısından bu tez çalışmasının literatüre özgün bir katkı sunması hedeflenmektedir.

Gerçek bir işletme ortamında ve yine gerçek bir büyük güçlü senkron generatör sargı numunesinden elde edilen deneysel veriler ile hem yaşlanma hem de sargı yalıtım iyileştirme etkilerinin sistematik olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu alanda literatürde spesifik bir deneysel çalışma ve yaşlandırma modeli uygulamasının literatürdeki önemli boşluklardan birisi olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın bu alandaki önemli bir boşluğu doldurması hedeflenmiştir.

Modelleme çalışmalarında veri düzgünleştirme yöntemlerinin kullanılması hususunda, zaman serisi verilerinde gürültünün azaltılması ve eğilimlerin daha sağlıklı gözlemlenmesi amacıyla çeşitli düzgünleştirme (smoothing) yöntemlerinin literatürde yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu yöntemler arasında en temel yaklaşımlardan biri olan Basit Hareketli Ortalama

(SMA), belirli bir zaman penceresindeki tüm gözlemlere eşit ağırlık vererek serinin genel trendini ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Basit Hareketli Ortalama yöntemi, özellikle kısa dönemli tahminlerde daha stabil sonuçlar ürettiği ve modelleme öncesinde veri setinin doğruluğunu artırdığı için tercih edilmektedir. Çelik ve Kırılıoğlu (2023), akarsu debisi tahminine yönelik yaptıkları çalışmada, Basit Hareketli Ortalama'nın kısa vadeli dalgalanmaları dengelemede başarılı olduğunu ve genel tahmin doğruluğunu iyileştirdiğini göstermiştir. Diğer yandan kullanılan bir diğer veri düzgünleştirme yöntemi olan Ağırlıklı Hareketli Ortalama (WMA) yöntemi, son ölçümlere daha yüksek ağırlık vererek ani değişimlere daha hızlı yanıt vermekte ve zamanla değişen sistemlerde daha hassas tepkiler üretebilmektedir. Ancak, Güler ve Öztürk (2022), Ağırlıklı Hareketli Ortalama'nın bu hassasiyetinin modelin aşırı duyarlılığına ve genellenebilirlik kaybına yol açabildiğini belirtmişlerdir. Zhao ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan bir başka çalışmada da ise Basit Hareketli Ortalama'nın endüstriyel ölçümler gibi yüksek gürültü içeren verilerde veri kalitesini artırarak tahmin modellerinin performansını olumlu etkilediği ortaya konmuştur. Bu kapsamda veri düzgünleştirme yöntemlerine dair anılan literatür çalışmaları sentezlenerek, ilgili yöntemlerin model performanslarına olan etkilerinin karşılaştırmalı analizi bu tez çalışması ile literatüre sunulmuş olacaktır.

Modelleme yaklaşımları ile deneysel verileri en iyi açıklayan (izah eden) modelleme algoritmaları kıyaslamalı olarak incelenerek model performansları objektif olarak değerlendirilmiş olacaktır. Bu doğrultuda hem deneysel hem de modelleme yaklaşımları olan çok yönlü bir tez çalışması olması itibariyle de çalışma ilgili alan yazına özgün bir katkı sunacaktır.

Özetle bu tez çalışması ile 13,8 kV' ve 6,3 kV anma gerilimli 47 MW ve 6,3 MW gücündeki senkron generatörlerin yedek stator sargıları kullanılarak mevcut işletme ortamında kontrollü deneylere tabi tutulması yönünden literatüre özgün bir katkı sunacaktır. Bu kapsamda deneysel yaşlandırma kriterleri yine hidrolik santrallerin işletme ortamlarında oluşabilecek yüksek ihtimalli maruziyetleri temsil etmektedir. Genellikle su soğutmalı stator sargıları için nem maruziyeti dikkate alınarak %65 ve %85 nem seviyelerinde kontrollü olarak sistematik deneysel incelemeler gerçekleştirilmektedir. Ayrıca yine büyük güçlü senkron generatörlerde yoğun olarak kullanılan fırçalı uyarım sisteminden kaynaklı olarak kömür tozu ve türbin yağı karışımının sargı kirliliğine etkisi dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda kömür tozu ve türbin yağı karışımı ile kirlenmiş sargılar üzerinde aynı testlerin yapılması, gerçek çalışma koşullarına

oldukça yakın bir simülasyona olanak sağlamaktadır. Bu çalışmanın diğer bir ayırt edici yönü ise hem geleneksel istatistiksel yaklaşımlar (Lineer Regresyon, Polinom Regresyon, Ridge Regresyonu) hem de gelişmiş makine öğrenmesi tabanlı (Rastgele Orman, Destek Vektör Regresyon) kullanılarak elde edilen deneysel verilerin modellenmesi ve bu modellerin performansının belirlilik katsayısı (R^2) ve Ortalama karesel hata (MSE) metrikleri kullanılarak değerlendirilmesidir. Ayrıca bu çalışma ile söz konusu yaşlandırma etkileri sonrası uygulanan iyileştirme uygulamalarının (kurutma ve temizleme) sargı yalıtım direnci ve buna bağlı parametrelere olan olumlu etkileri ortaya koyulacaktır.

Bu çalışma ile gerçek generatör sargıları üzerinden deneysel veriler ile toplanan yalıtım direnci ve bağlı parametrelerin sistematik bir şekilde değerlendirilmesi sonrası en uygun modelleme algoritmasının tayin edilmesi sağlanacaktır. Ayrıca yine iyileştirme çalışmalarının ilgili parametrelere olan olumlu etkilerinin ortaya koyulması amaçlanmaktadır. Bu haliyle gerçek bir işletme ortamındaki ölçümler ile modelleme algoritmalarının sistematik olarak karşılaştırılması yönüyle bu alandaki alan yazına değerli bir katkı sunması amaçlanmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma ile ilgili kestirimci bakım stratejilerinin oluşturulmasında önemli bilimsel ve pratik ilerlemeler sağlanmasının yanı sıra senkron generatörler için yalıtım durumu izleme sistemlerinde endüstriyel çalışmaların ve standart çalışmaların gelişimine katkı sağlaması beklenmektedir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Elektrik Makinelerinin Genel Yapısı

Elektrik makineleri, en basit haliyle enerji dönüşümü gerçekleştiren elektromekanik sistemler olarak tanımlanabilir. Giriş uçlarına elektrik enerjisinin uygulanıp çıkıştan mekanik enerji elde edildiği çalışma biçimi **motor çalışması** olarak adlandırılır; bu durumda enerji elektriksel formdan mekanik forma dönüştürülür. Buna karşılık, girişe mekanik enerjinin uygulanıp çıkıştan elektrik enerjisinin alındığı çalışma biçimi **generatör/jeneratör çalışması** olarak isimlendirilir ve enerji akışı motor çalışmasına göre ters yöndedir. Her iki durumda da ortak olan süreç, elektrik ve manyetik alan etkileşimleri üzerinden gerçekleşen elektromekanik enerji dönüşümüdür. Transformatörlerde ise hareketli bir bileşen ve mekanik bir çıkış bulunmadığından elektromekanik dönüşüm söz konusu değildir; transformatörler, belirli bir alternatif akım ve gerilim değerindeki elektrik enerjisini tasarlanan çevrim oranı nispetince farklı bir gerilim ve akım değerine dönüştürür. Elektrik makinelerindeki bu dönüşüm mekanizmaları, başta Faraday indüksiyon yasası olmak üzere akım–manyetik alan ilişkisini açıklayan temel elektromanyetik prensipler (Ampère ve Biot–Savart) çerçevesinde ele alınmaktadır (Mergen & Zorlu, 2010)

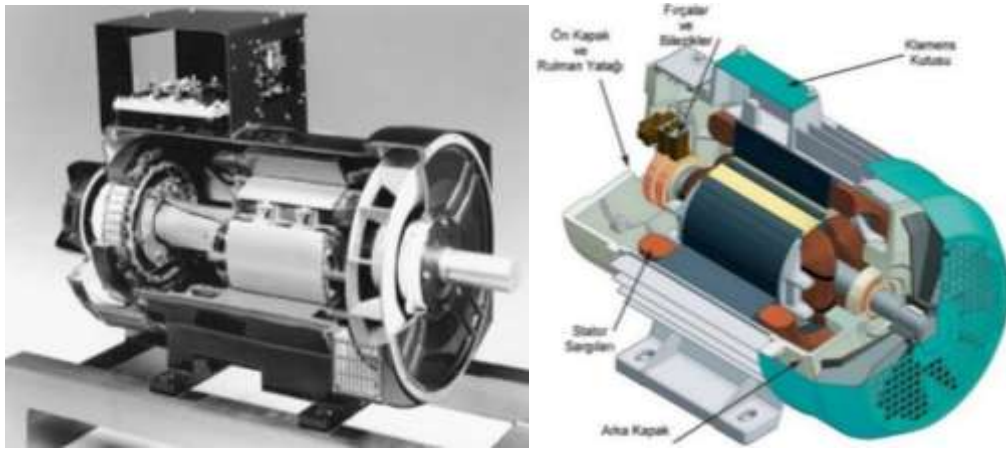
Transformatörler haricindeki elektrik makinelerinin enerji dönüşümü süreçleri Şekil.8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Elektrik makinelerinde elektromekanik enerji dönüşümü

3.2.Senkron Makineler

Senkron makineler, elektromekanik enerji dönüşümünün yönüne bağlı olarak motor veya generatör çalışma modlarında işletilebilen elektrik makineleridir. Girişine elektrik enerjisi uygulanarak mekanik güç elde edilen çalışma biçimi **senkron motor** olarak adlandırılırken, girişine mekanik gücün uygulanıp çıkışından elektrik enerjisi alınan çalışma biçimi **senkron generatör** olarak tanımlanmaktadır (Mergen & Zorlu, 2010). Her iki durumda da enerji dönüşümü, stator ve rotor manyetik alanları arasındaki senkron etkileşim sonucunda gerçekleşmektedir. (Mergen & Zorlu, 2010)

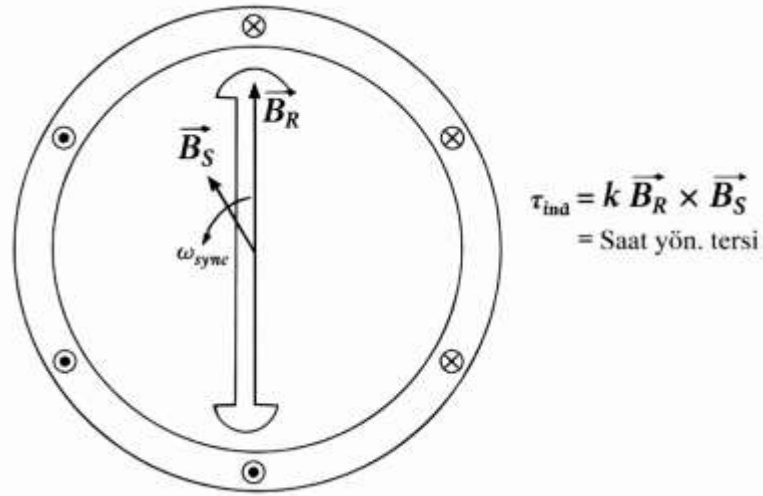


Şekil 9. Tipik bir senkron makine kesit gösterimi (ETMD, 2025)

Senkron motorlar ve senkron generatörler endüstride farklı çalışma amaçlarında görev alırlar fakat yapısal ve elektromanyetik açıdan aynı temel prensiplere dayanmaktadır. Bununla birlikte senkron makineler, bir güç sistemine bağlı olarak çalıştırıldıklarında yalnızca aktif güç üretimi veya tüketimi gerçekleştirmekle kalmayıp, uyartım (ikaz) koşullarına bağlı olarak reaktif güç alışverişi de yapabilmektedirler. Bu yetenekleri sayesinde senkron makineler, güç sistemlerinde enerji üretiminin yanı sıra hat gerilimi seviyelerinin regülasyonu, reaktif güç dengesinin kontrolü ve güç faktörü kontrolü gibi önemli işlemlere sahiptir. Bu çalışmada senkron makinelerin davranışı ve çalışma özellikleri, ağırlıklı olarak senkron generatörler üzerinden ele alınmıştır.

3.2.1. Senkron motorlar

Senkron motorun çalışma prensibini açıklamak amacıyla, Şekil 10'da iki kutuplu bir senkron motorun şematik gösterimi verilmiştir. Senkron motorun rotor sargılarına uygulanan alan akımı I_f , rotor üzerinde sabit bir manyetik alan rotor manyetik alanı B_R 'yi oluşturur. Stator sargılarına tatbik edilen üç fazlı gerilimler sonucunda statordan geçen üç fazlı akımlar ise, sabit genlikli ve senkron hızda dönen bir stator manyetik alanı B_S 'yi meydana getirir. Bu şekilde söz konusu senkron makinede, biri rotorla birlikte dönen, diğeri ise stator tarafından oluşturulan iki ayrı manyetik alan meydana gelmiş olacaktır. Senkron makinenin senkron motor olarak çalışması esnasında rotor manyetik alanı, stator tarafından oluşturulan döner manyetik alan ile senkron hızda kilitlenmiş şekilde hareket eder. Senkron motorda bahsi geçen bu iki manyetik alan arasındaki açısal fark, elektromanyetik momentin oluşmasını sağlayan temel faktördür. Manyetik alanlar arasındaki bu yük açısının belirli sınırlar içerisinde artması, rotor üzerinde oluşan momentin de artmasına neden olacaktır. Senkron motorun temel çalışma ilkesi, rotorun stator manyetik alanını senkron hızda ve sabit bir açısal farkla takip etmesine dayanmaktadır (Chapman, 2012).



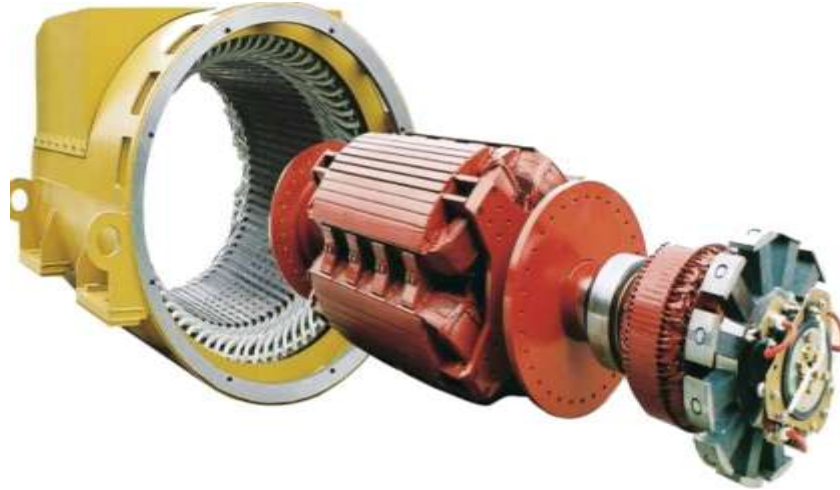
Şekil 10. İki kutuplu bir senkron motorda stator ve rotor manyetik alanları (Chapman, 2012).

Fiziksel yapı açısından senkron motorlar ile senkron generatörler aynı elektromekanik yapısal bileşenlere sahiptir. Bu nedenle her iki çalışma modu için hız, moment ve güç ilişkilerini tanımlayan temel denklemler ortak olarak kullanılabilir.

3.2.2. Senkron generatörler

Senkron generatörler, yüksek güç ve gerilim seviyelerinde kararlı frekans ve gerilim üretimi sağlayabilmeleri nedeniyle hidroelektrik, termik ve nükleer santraller başta olmak üzere endüstriyel enerji üretim tesislerinde ve büyük ölçekli güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Machowski, Bialek, & Bumby, 2012).

Senkron generatörlerde rotorda bulunan uyarım sargısına doğru akım (DA) uygulanarak rotor sargıları üzerinden bir akım akması sağlanır. Söz konusu bu rotor alan akımı hava aralığında genliği sabit ve zamana göre değişmeyen bir rotor manyetik alanı (doğru manyetik alan) meydana getirir. Rotorda meydana gelen bu manyetik alan, rotorun bir hidrolik türbin veya benzeri harici bir tahrik sistemi vasıtasıyla döndürülmesiyle birlikte stator sargılarını sürekli olarak farklı açılarda keser ve stator sargılarında elektromotor kuvvet indüklenmesini (EMK) sağlar. Stator sargılarında indüklenen bu gerilim alternatif gerilim formundadır. Stator sargı düzleminin konumu sabit olmasına karşılık, rotor manyetik eksenini rotorun dönmesiyle birlikte statora göre sürekli hareket eder ve iki manyetik eksen arasındaki açı bir tam devir süresince 0° – 360° aralığında değişir. (Mergen & Zorlu, 2010)



Şekil 11. Örnek bir senkron generatör gösterimi (ETMD, 2025)

Senkron generatörler kullanım alanlarına göre genel olarak iki kategoriye ayrıldığı söylenebilir. Bunlar yüksek hızlı buhar ile gaz türbinleri ve düşük hızlı su türbinleri olarak genellenebilir. Merkezkaç kuvvetini azaltmak için yüksek hızlı turbo generatörler daha küçük çaplarda ve daha büyük aksenal uzunluklarda tasarlanmaktadır. Genellikle bu generatörler iki veya dört elektrik kutbuna sahiptir. 50 hz şebekeyle uyum sağlamak için sırasıyla 3000 veya 1500 rpm'de

çalışmalıdır. Düşük hızlı su türbinleriyle ilişkili generatörler genellikle 500 rpm veya daha düşük hızlarda çalışmaktadır. Bu generatörler daha fazla sayıda elektrik kutbuna, daha büyük çaplara ve daha kısa aksenal uzunluklara sahiptir. Manyetik kutup sayısı, güç sisteminin gerekli hızı ve nominal frekansı tarafından belirlenmektedir (Caner, 2006).

Senkron generatörlerde sargı kısımlarını tanımlamak için genelde alan sargıları ve endüvi sargıları olarak iki ifade kullanılır. Ana manyetik alanın üretildiği sargılar için “alan sargıları” ifadesi kullanılırken, ana gerilimin indüklendiği sargılar içinde “endüvi” sargıları ifadesi kullanılmaktadır. Ayrıca senkron generatörlerde alan sargıları rotor yapısı üzerinde olduğundan bu sargılar “Rotor Sargıları”, endüvi sargıları da stator yapısı üzerinde yer aldığından bu sargılar da “Stator Sargıları” olarak isimlendirilebilmektedir (Chapman, 2012).

Sargı isimlendirmelerinden de anlaşılacağı üzere senkron generatörler temel olarak iki ana manyetik elemandan oluşur: bunlar stator ve rotor yapılarıdır. Her ikisi de manyetik çelikten yapılmıştır generatör bileşenidir (Ong, 1997).

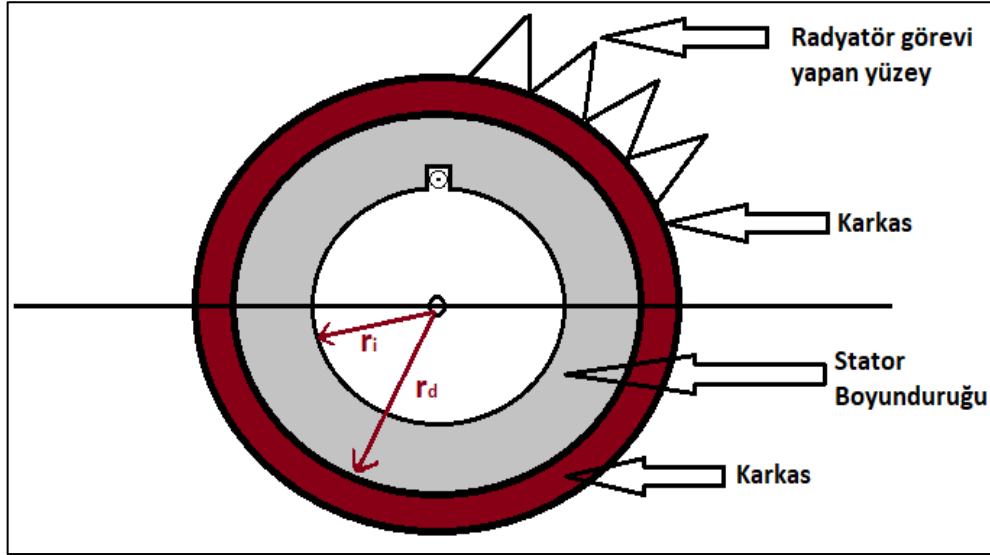
3.2.2.1.Stator yapısı

Senkron generatörde alternatif akımın üretildiği ve üç fazlı endüvi sargılarının bulunduğu sabit kısma “Stator” adı verilmektedir. Stator yapısının imalatında genellikle manyetik direncin düşük olması sebebiyle ferro-manyetik sac malzeme tercih edilmektedir. Endüvi sargılarından akan akımlarının oluşturduğu alternatif manyetik alanlar sebebiyle demir malzemede histerizis ve fuko (Foucault) kayıpları meydana gelir. Bu histerizis ve fuko (Foucault) kayıplarının azaltılabilmesi için stator imalatında, kalınlıkları 0,5 - 2,0 mm aralığında olan ve bir tarafı yalıtılmış sac plakalar tercih edilir. Silisyum katkılı olarak imal edilen sac plakalar manyetik doyuma ulaşmadan yüksek manyetik alan yoğunluklarına ulaşabilmelerine olanak verirler. Dolayısıyla sac plakaların içinden geçen Fuko (Foucault) akımları azaltılarak bu akımların sebep olduğu kayıplar da (fuko kayıpları) azaltılmış olur. Senkron generatörlerde nominal güç ile stator çapı genellikle doğru orantılı olarak değişmektedir, generatörün çapı büyüdükçe artan demir malzeme yoğunluğu aynı oranda Fuko ve Histerizis kayıplarının da artmasına sebep olur. Bu sebeple senkron generatörlerdeki demir kayıpları, diğer makinelerdeki kayıplara oranla çok daha büyük değerlere ulaşabilmektedir (Tufan, 2013) (Çolak, 2003).



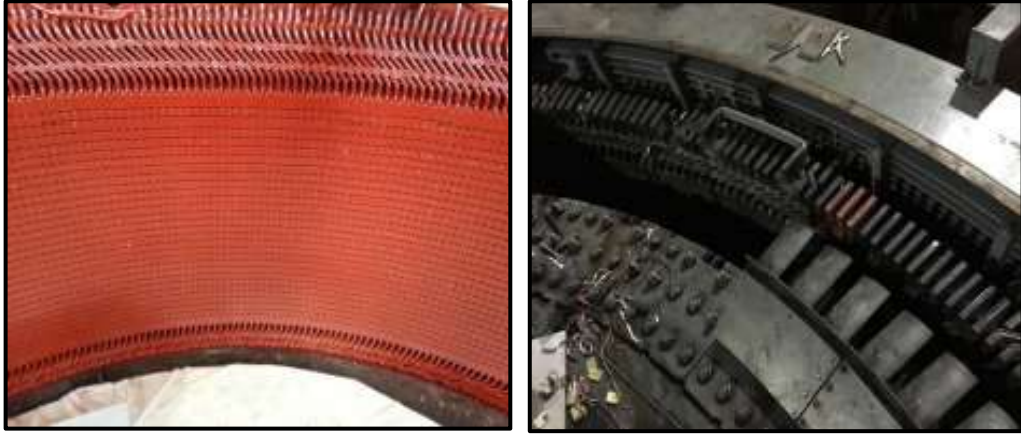
Şekil.12 Bağıştaş I HES senkron generatör stator sargıları

Stator bölümü yapı olarak iki ayrı kısımda incelenir. Birinci kısım, stator oluklarının yer almadığı ve dış yüzeye yakın olan “*stator boyunduruğu*” kısmıdır. Bu kısım manyetik akının makine çevresinde daha rahat akabilmesi için manyetik direnci düşük olan bir yol oluşturur. Rotorda üretilen manyetik akı, dişlerin arasından geçerek stator boyunduruğuna ulaşır. Stator boyunduruğunun yüksekliği, statorun manyetik doyuma ulaşmasına imkân vermeyecek şekilde hesaplanır ve bu doğrultuda açılan oluk derinlikleri ile boyunduruk bölümünün yüksekliğinin toplamı senkron generatörün stator bölümünün kalınlığını oluşturur. Bir başka deyişle bu kalınlık, stator iç çapı ile stator dış çapı arasındaki farka eşit olacaktır. Stator yapısını oluşturan ikinci kısım ise hava aralığına ve rotor yüzeyine yakın olan, stator olukları ve dişlerini içeren kısımdır. Dişler, rotor manyetik akısının stator manyetik çekirdeğine girdiği manyetik direnci çok düşük olan kısımlardır. Olukların manyetik dirençleri ise bakır sargı iletkenleri ve bu iletkenlerin yalıtım malzemelerinden dolayı çok büyük değerlere ulaşabilmektedir. Bu sebeple dişlerin manyetik doyumunu engellemek için dişlerin genişliği nispeten büyük seçilmektedir. Dişlerin genişlik değerinin artması, stator çapının da artırmasına sebep olacağı için bu tasarım yapılırken optimum çap ve diş genişliği durumu dikkate alınır (Mergen & Zorlu, 2010).



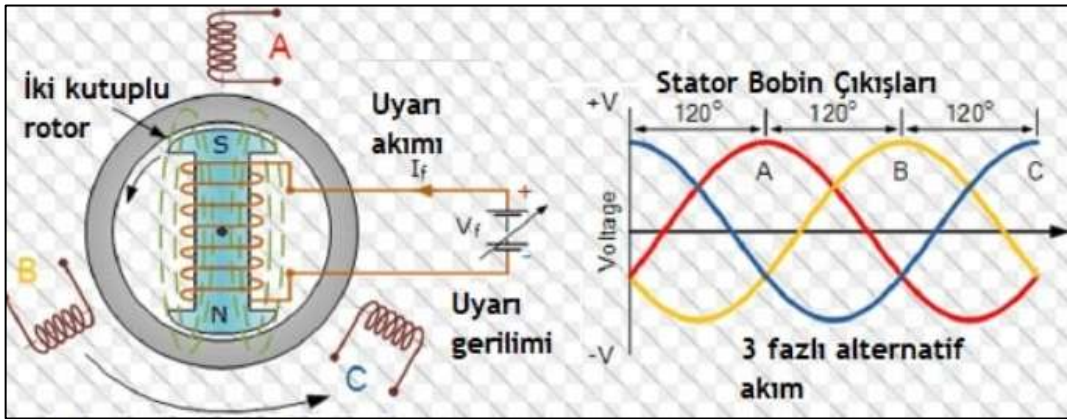
Şekil.13 Stator yapısı ve bölümlerini gösteren çizim (Demirel, 2019)

Yapılan tasarım sonucu karar verilen stator çapına göre kesilen saclar, bir daire yayı olarak kesilir. Kesilen sac plakaların dizilip ardışık olarak düzenlenmesi ile “sac paketi” oluşturulur. Hava soğutmalı makinelerde söz konusu bu sac paketlerinin ön tarafına radyal yönde genişliği yaklaşık 15 mm’leri bulan hava kanalları eklenerek imal edilir. Sac paketinin dış tarafına ise bu paketi mekanik olarak korumak amacıyla sağlam bir karkas yerleştirilir. Söz konusu bu karkas aynı zamanda soğutma yüzeyi olarak da görev almaktadır. Özellikle hidrolik enerji santrallerinde kullanılan büyük güçlü senkron generatörlerin soğutulması maksadıyla karkas yapısının üzerine radyatörler ilave edilerek sargı ve nüve bölümlerinin harici olarak soğutulması sağlanır. Senkron generatörlerde genellikle çapların büyük olmasından dolayı imal edilen karkas, çelik evsafı ve düz kalın sac plakalardan imal edilmektedir. Statorun rijitlik hesaplamalarına göre optimum kalınlıkta seçilmesi gereken karkas yapısının olması gerekenden daha ince seçilmesi, mukavemet açısından önemli bir dezavantaj yaratacağı gibi gereğinden kalın seçilmesi de statorun soğutma performansı hususunda dezavantaj sağlamaktadır (Mergen & Zorlu, 2010).



Şekil.14 Stator yapısı (Özek, 2020)

Üç fazlı bir stator sargısında indüklenen gerilim hesaplaması yapılırken, her biri N_c sarımlı 3 adet bobin (sargı) Şekil.15'de gösterildiği gibi rotor manyetik alanının etkisinde olacak şekilde konumlandırıldığı varsayılır. Her bir sargıda indüklenen gerilimler genlik olarak eşit olacak fakat sargıların fazları arasında 120° faz farkı olacaktır (Chapman, 2012).



Şekil.15 120° açıyla yerleştirilmiş üç sargıdan üç faz gerilimlerin üretimi (Elektrikmen , 2025)

Üç faz sargısının her birinde indüklenen gerilimlere ait matematiksel ifadeler aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$e_{aa'}(t) = N_c \phi \omega \sin \omega t \quad (3.1)$$

$$e_{bb'}(t) = N_c \phi \omega \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.2)$$

$$e_{cc'}(t) = N_c \phi \omega \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (3.3)$$

Üç fazlı bir stator sargısında ki RMS gerilimi hesaplaması yapılırken, statorun herhangi bir fazında oluşan tepe gerilimi; $E_{max} = Nc \varphi \omega$ 'dır. Bu eşitlikte " $\omega = 2\pi f$ " olduğundan üç fazlı statorun herhangi bir fazının RMS gerilimi aşağıdaki şekilde oluşmaktadır.

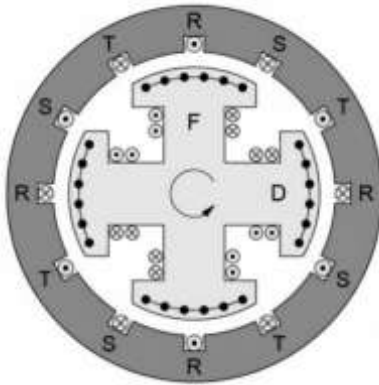
$$E = 2\pi \sqrt{2} Nc \varphi f \quad (3.4)$$

$$E = \sqrt{2}\pi Nc \varphi f \quad (3.5)$$

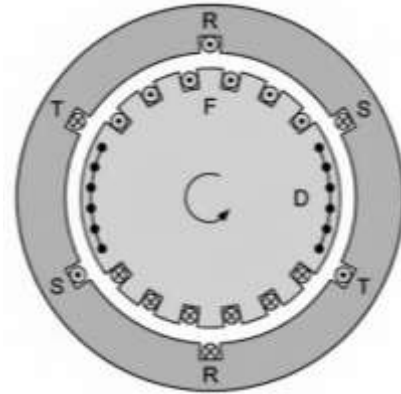
Stator terminallerinde oluşan RMS gerilim değeri, stator bağlantı şekline göre değişiklik göstermektedir. Stator yıldız (Y) bağlı ise terminal gerilimi E_A 'nın $\sqrt{3}$ katına, üçgen (Δ) bağlı ise terminal gerilimi E_A 'ya eşit olacaktır (Chapman, 2012).

3.2.2.2.Rotor yapısı

Senkron generatörün rotoru bir elektro-mıknatısa benzetilebilir. Rotor yapısını oluşturan manyetik kutupların çıkıntılı ya da yuvarlak olması durumuna göre iki farklı şekilde incelenmektedir. Çıkık kutuplu rotorda yapısal olarak rotor yüzeyinden dışarı doğru (stator eksenine doğru) çıkıntı oluşturmuş manyetik kutuplar dizini görülmektedir. Diğer bir rotor çeşidi olan Yuvarlak kutuplu rotor yapısında ise rotor yüzeyi ile aynı dairesel hizada konumlandırılmış olan manyetik kutup dizini bulunmaktadır (Chapman, 2012).



Çıkık Kutuplu Rotor Yapısı



Yuvarlak (Silindirik) kutuplu rotor yapısı

Şekil.16 Çıkık kutuplu ve yuvarlak kutuplu rotor yapısı gösterimleri (Demirel, 2019)

Genel olarak yüksek kutup sayısı ve hatırı sayılır çap ile karakterize edilen çıkık kutuplu rotor konfigürasyonları, genellikle düşük devirli uygulamalarda, özellikle de hidrolik türbinlerin

düşük hızlarını karşılayan senkron generatörlerde kullanılmaktadır. Bunun aksine, yüksek hızlı uygulamalarda silindirik veya yuvarlak rotor tasarımları kullanılmaktadır. Bu da santrifüj kuvvetlerinin (merkezkaç) kabul edilebilir parametreler dahilinde kalmasını sağlamak için daha küçük çaplı bir yapı gerektirmektedir. İki ve dört kutuplu silindirik rotora sahip senkron generatörler genellikle buhar türbinlerinin yüksek hız taleplerini karşılamak üzere tasarlanmıştır (Ryff, 1988).



Şekil.17 Yuvarlak kutuplu rotor görünüşü (Özek, 2020)

Yuvarlak (silindirik) kutuplu rotorlarda, stator ve rotor arasında kalan hava aralığı makinenin tüm döner alanı boyunca aynıdır. Bu tür makinelere *Turbo Rotorlu Senkron Generatör* adı da verilmektedir. Bu makinelerin çapları genellikle dar, boyları nispeten çıkık kutuplu rotora göre daha uzundur. Yuvarlak (silindirik) kutuplu rotorlarda rotorun çıkıntısız olan yüzey yapısından kaynaklı olarak rüzgâr kayıpları (ventilasyon) daha azdır.

Çıkık kutuplu rotorlarda manyetik kutupların rotor ekseninden çıkıntılı yapısından kaynaklı olarak stator ve rotor arasında bulunan hava aralığı, senkron makinenin içinde değişkenlik arz etmektedir. Yani stator iç çevresi yüzey olarak düzgün bir formda olmasına rağmen rotor dış çevresi düzgün bir dairesel yüzey formu oluşturmamaktadır. Çıkık kutuplu rotorların genellikle çapı geniş ve boyu nispeten daha kısadır. Rotor yüzeyinin düzgün bir dairesel formda olmamasından kaynaklı olarak rüzgâr (ventilasyon) kayıpları fazladır. Bu sebepten ötürü daha gürültülü çalışmaktadırlar (Demirel, 2019).



Şekil.18 Örnek bir çıkık kutuplu rotor yapısı (Bağıştaş I HES Santrali)

Çıkık kutuplu rotorlar, genel itibariyle dört veya daha fazla sayıda kutup ihtiva edecek şekilde tasarlanırken, yuvarlak kutuplu rotor uygulamalarında, iki veya dört kutup içeren rotor yapıları görülmektedir. Daha kapsamlı bir açıklama ile çıkık kutuplu rotorlar, kayıp miktarlarının fazla olmasından dolayı genellikle tasarım olarak çevresel hızın daha yavaş olduğu uygulamalarda tercih edilir. Rotor merkezine yerleştirilmiş olan ve kama ile mile sabitlenmiş “rotor göbeği”, aynı zamanda kutupların sabitlenmesini sağlayan dairesel kesitli bir yapı oluşturmaktadır. Büyük güçlü generatörlerde manyetik kutuplar, stator sargılarının ürettiği manyetik alana çok yakın olmasından dolayı Histerisiz ve Fuko kayıplarının oluşumuna engel olamazlar. Dolayısıyla büyük güçlü senkron makinelerde oluşan demir kayıpları çok fazla boyutlara ulaşabilmektedir. Rotorun maruz kaldığı bu değişken manyetik alandan dolayı oluşan girdap akımı kayıplarını azaltmak amacıyla rotor, ince laminasyon saclarından imal edilir (Demirel, 2019).



Şekil.19 Rotor laminasyon sacları ve imalat aşaması

Frekansı 50 Hz olan bir şebeke için kutup çifti sayısına göre senkron hızın değişimini gösteren ve devir sayısına göre rotor tiplerini açıklayan tablo aşağıda Tablo.6’da verilmiştir (P değeri N-S kutup çiftlerinin sayısını belirtmektedir.) (Mergen & Zorlu, 2010).

Tablo 6. Rotor tiplerine göre devir sayısı ve Kutup çifti sayısının değişimi tablosu (P değeri N-S kutup çiftlerinin sayısını belirtmektedir.)

P (Kutup çifti)	n_s (devir/dak)	Rotor Tipi
1	3000	Yuvarlak rotorlu
2	1500	Yuvarlak ve çıkık rotorlu
3	1000	Çıkık kutuplu
4	750	Çıkık kutuplu
5	600	Çıkık kutuplu
6	500	Çıkık kutuplu

3.2.2.2.1. Kutup ayakları

Kutup ayakları, senkron generatörlerde rotor ve stator arasındaki manyetik ilişkiyi şekillendiren en önemli yapısal bileşenlerden biridir. Genel olarak, rotor yapısı üzerinde bulunan manyetik kutupların stator bölümüne en yakın kısmını oluşturan bu bileşenler, manyetik akının hava

aralığı üzerinden stator manyetik devresine iletilmesinde kritik bir görev üstlenmektedir. Kutup ayaklarının geometrik yapısı, özellikle makinenin hava aralığındaki manyetik alan dağılımını belirleyerek stator sargılarında indüklenen gerilimin büyüklüğünü ve sinüzoidal dalga şeklini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kutup ayağının genişliği, kutup yayı ve hava aralığı miktarı gibi parametreler, senkron generatörlerin tasarım sürecinde dikkatle belirlenmesi gereken elektromanyetik tasarım değişkenleri arasında yer almaktadır. Kutup ayaklarının uygun şekilde tasarlanması, manyetik alanın stator çevresinde çok daha homojen dağılmasını temin ederek gerilim harmoniklerinin azaltılmasına olanak sağlar. Bu durum makinenin uzun dönem kararlı işletme yapabilmesine katkı sağlamaktadır.

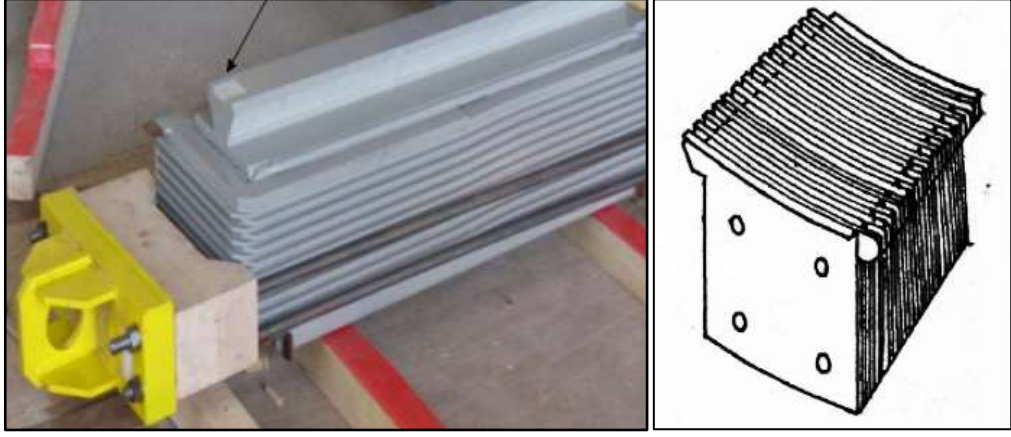


Şekil. 20 Manyetik kutup montajı ve kutup ayağı görüntüsü

Kutup ayakları, stator manyetik devresine en yakın rotor bileşenleri olmaları nedeniyle, yük altında stator sargıları tarafından oluşturulan güçlü manyetik alanlardan doğrudan etkilenmektedir. Bu etkileşim sonucunda kutup ayaklarının yüzeylerinde Fuko (eddy current) ve histerezis kayıpları meydana gelmektedir. Söz konusu kayıpların sınırlandırılması amacıyla kutup ayakları genellikle silikonlu sac levhalardan oluşan lamine bir yapı şeklinde imal edilmektedir. (Tufan, 2013)

Kutup ayağı geometrisinin belirlenmesinde hem elektromanyetik hem de mekanik kriterler birlikte değerlendirilmelidir. Kutup yayı (pole arc) genişliğine karşılık gelen hava aralığı boyunca manyetik alanın etkin bir şekilde dağıtılabilmesi için, kutup yayının bir kutup aralığına

yakın bir uzunlukta seçilmesi tercih edilmektedir. Kutup ayağı yüksekliği ise kullanılan manyetik malzemenin B–H eğrisi dikkate alınarak belirlenir. Bununla birlikte, kutup ayağı yüksekliğinin artması rotor kütlelerinin büyümesine ve dolayısıyla dönme sırasında oluşan merkezkaç kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu kuvvetler, özellikle çıkık kutuplu rotor yapılarında kutup ayaklarının gövdeden ayrılma eğilimini artırmakta ve önemli bir mekanik tasarım zorluğu oluşturmaktadır. Bu nedenle özel mekanik sabitleme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil.21 Kırlangıç kuyruğu ve tarak yapısı (Geyik, 2018; Elektrik Port, 2015)

Çıkık kutuplu senkron generatörlerde kutup ayaklarının rotor gövdesine mekanik olarak güvenli biçimde bağlanması, yüksek devirlerde ortaya çıkan merkezkaç kuvvetleri nedeniyle önemli bir tasarım kriteridir. Bu amaçla uygulanan bağlantı yöntemleri arasında *kırlangıç kuyruğu*, *tarak yapısı* ve *kamalı bağlantı* en çok bilinen uygulamalar arasındadır. Kırlangıç kuyruğu sabitleme yapısında, kutup ayakları rotor gövdesi üzerinde açılan özel geometrili kanallara yerleştirilerek mekanik kilitlenme sağlanmakta ve ayrılma eğilimindeki kuvvetlere karşı yüksek dayanım elde edilmektedir. Tarak şeklindeki sabitleme yapısında ise, çoklu temas yüzeyleri sayesinde yük daha geniş bir alana dağıtılmakta ve yerel gerilme yoğunlaşmaları azaltılmaktadır. Kamalı bağlantı yönteminde, kutup ayağı ile rotor gövdesi arasına yerleştirilen genellikle konik yapıdaki kamalar aracılığıyla mekanik sabitleme sağlanmaktadır. Kamalı bağlantı yöntemi özellikle montaj ve söküm kolaylığı sağlaması açısından avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, kamalı bağlantılarda yük aktarımı belirli temas bölgelerinde yoğunlaştığından, yüksek merkezkaç kuvvetlerinin söz konusu olduğu büyük güçlü senkron makinelerde genellikle ilave sabitleme yöntemleriyle birlikte kullanılmaktadır (Mergen & Zorlu, 2010).

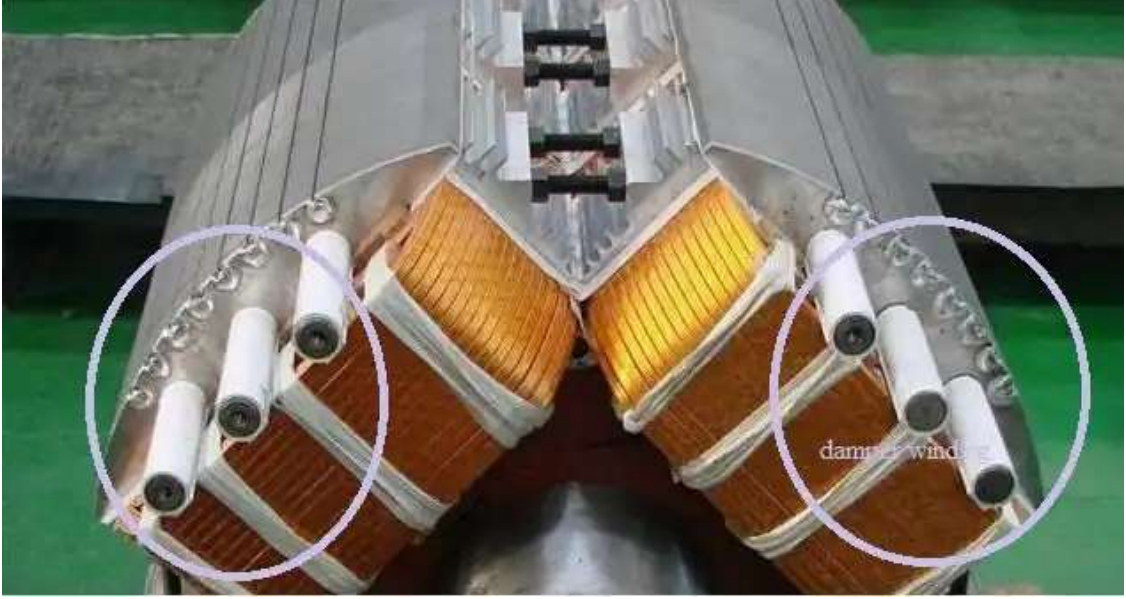


Şekil.22 Örnek bir kamalı bağlantı ile sabitlenmiş rotor imalatı

Şekil.22’de kamalı bağlantı ile sabitlenen rotor manyetik kutuplarına dair örnek bir imalat fotoğrafı gösterilmiştir. Kamalar çakım işlemi sonrasında uzun kalan kısımları kesilerek rotor yüzeyinde çıkıntı oluşturmayacak hale getirilir. Aynı şekilde genellikle ilgili manyetik kutbun sökümü esnasında da ilgili kamalar ters yönlü kuvvet uygulanarak sökülebilir.

3.2.2.2.2. Amortisör sargıları

Amortisör sargıları, senkron makinelerde geçici rejim davranışlarını iyileştirmek ve işletme kararlılığını artırmak amacıyla kullanılan yardımcı rotor elemanlarıdır. Bu sargılar, rotorun kutup ayakları içerisine yerleştirilmiş, uygun sayıda ve kesitte, bakır iletkenlerden oluşmaktadır. Her bir manyetik kutup üzerinde yer alan bu bakır iletkenlerin uçları birbirlerine bağlanarak kapalı bir kısa devre yolu meydana getirilmektedir. Söz konusu bu sargılar vasıtasıyla oluşturulan bu kafes yapısı, yük değişimleri veya hız salınımları sırasında oluşan elektromanyetik salınımların sönümlenmesine katkı sağlamaktadır. Buna ek olarak amortisör sargıları, senkron makinenin motor olarak çalıştırılması sırasında ilk kalkış anında asenkron motor benzeri bir davranış göstermesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede makine, senkron hıza daha kararlı bir şekilde ulaşabilmektedir. Dolayısıyla amortisör sargılarının boyutlandırılmasında, özellikle başlangıç koşulları ve gerekli kalkış torkunun doğru şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Alstom, 2007).



Şekil 23. Örnek bir amortisör sargısı gösterimi

Amortisör sargılarının en temel işlevlerinden biri, generatörün işletme koşullarında ortaya çıkan tork salınımlarını (ani yük değişimleri vb kaynaklı) sönmüleyerek sistem ve generatör kararlılığını desteklemektir. Ani yük değişimleri veya şebeke dalgalanmaları nedeniyle generatörün milinde oluşan küçük genlikli, periyodik tork salınımları, rotor hızında geçici hızlanma ve yavaşlamalara yol açmaktadır. Bu durum, rotor manyetik eksenini ile stator alan eksenini arasındaki açının, diğer bir ifadeyle yük açısının (δ), zamana bağlı olarak salınım göstermesine neden olur. Yük açısının belirli sınırların üzerine çıkması, senkron generatörün kararlı çalışma koşullarını zayıflatmakta ve özellikle paralel işletme durumlarında senkronizasyondan ayrılma riskini ortaya çıkarmaktadır. Bu tür salınımlar, makine içerisinde karakteristik bir salınım frekansı oluşturarak amortisör sargısı iletkenlerinde elektromotor kuvvet ve buna bağlı akımların indüklenmesine neden olur. Oluşan akımların yol açtığı joule kayıpları, salınım enerjisinin ısıya dönüşmesini sağlar ve böylece mekanik–elektromanyetik salınımlar sönmülenir. Bu nedenle söz konusu sargılar “amortisör” olarak adlandırılmaktadır. Bazı kaynaklarda bu sargılara İngilizce ismi olan “damper sargıları” adı verilmiştir. Amortisör sargılarının gerek ilk kalkış gerekse salınımların yoğun olduğu işletme koşullarında ortaya çıkabilecek yüksek akım ve sıcaklıklara dayanacak şekilde tasarlanması, güvenli ve kararlı generatör işletimi açısından büyük önem taşımaktadır (Andritz Hydro, 2010).

3.2.2.3.Kutup sargısı

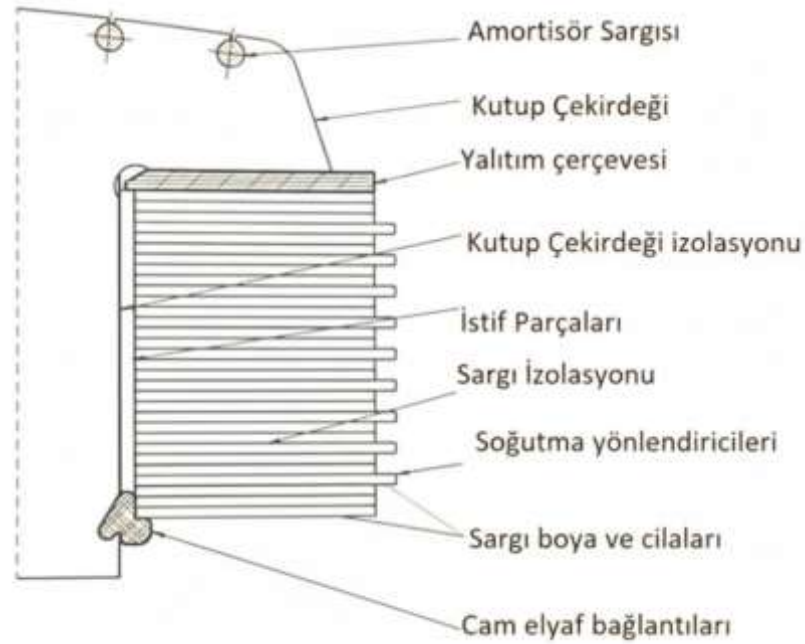
Kutup sargıları, senkron generatörlerde rotor üzerinde yer alan ve ana manyetik alanın oluşturulmasından sorumlu olan alan sargılardır. Bu sargılara aynı zamanda “alan sargıları” yada rotor üzerinde yer almaları sebebiyle “rotor sargıları” isimleri de verilebilmektedir. Kutup sargıları manyetik kutup çiftleri (N–S) boyunca seri bağlanarak, düzlemleri kutup eksenine dik olacak şekilde kutup gövdesine yerleştirilmektedir. Kutup sargılarına uygulanan gerilim, genellikle 0–1200 V aralığında değişen ve stator gerilimine kıyasla çok düşük mertebelerde olan bir doğru gerilimdir. Aynı şekilde kutup sargılarından akan akım, manyetik alanın büyüklüğünü belirleyen temel parametrelerden biri olmakla birlikte, büyüklük olarak stator akımından daha düşük mertebelere sahiptir. Stator sargı gerilimlerinin 10 kV seviyelerine vardığı büyük güçlü senkron makinelerde, gerekli alan akımını sağlamak amacıyla kutup sargılarında genellikle yuvarlak kesitli, küçük çaplı ve birden fazla iletken grupları kullanılabilir. Bununla birlikte, özellikle yüksek alan akımlarının söz konusu olduğu durumlarda, mekanik ve termal dayanımı artırmak amacıyla dikdörtgen kesitli iletkenler de tercih edilebilir (Tufan, 2013).



Şekil 24. Örnek bir dikdörtgen kesitli bakır iletkene sahip rotor manyetik kutbu görüntüsü (Bağıştaş I HES)

Kutup sargılarının elektromanyetik ve mekanik tasarım özelliklerinin yanı sıra, yalıtım ve soğutma düzenlemeleri de güvenli ve uzun süreli işletme açısından çok önemli bir rol

oynamaktadır. Bu kapsamda kutup sargısı iletkenleri hem birbirleri arasında (spirler arası) hem de rotor gövdesine karşı uygun yalıtım malzemeleri kullanılarak yalıtılmaktadır. Gerekli manyetik alanın elde edilmesi için sarım sayısının artırılması gerektiği durumlarda, kutup eksenini boyunca hizalanmış birden fazla iletken katmanı kullanılabilir ve bu katmanlar arasında yalıtım tabakaları yerleştirilmektedir. Dikey yönde düzenlenen iletkenler arasına mika veya benzeri yüksek dielektrik dayanımlı yalıtım malzemelerinin yerleştirilmesi, elektriksel güvenliği artırmaktadır. (Tufan, 2013).



Şekil 25. Çıkık kutuplu senkron generatör kutup ve kutup sargısı yapısı (Alstom, 2007)

Yuvarlak (silindirik) rotorlu senkron makinelerde ise kutup sargıları rotor gövdesi üzerine açılmış yuvalar içerisine yerleştirilmektedir. Dönme esnasında meydana gelen yüksek merkezkaç kuvvetlerinin etkisiyle kutup sargısı iletkenlerinin hava aralığına doğru hareket etmesini önlemek amacıyla, sargılara ait yuva ağızları çelik veya pirinç alaşımli kamalarla kapatılmaktadır. Söz konusu bu kamalar, rotor eksenini boyunca yerleştirilerek sargıların mekanik olarak güvenli bir şekilde sabitlenmesini sağlamaktadır. Yuvaların açılması ve sargı iletkenlerinin yerleştirilmesi işlemi, iletkenlerin seri bağlantı gereksinimi nedeniyle çok zahmetli ve zaman isteyen bir imalat sürecini doğurmaktadır. Bu aşamada sargılar yuvalara ayrı ayrı yerleştirilmektedir. Tüm sargı yuvaları doldurulduktan sonra, sargının boşta kalan uçları birleştirilerek alan sargısı devresi oluşturulmakta ve bu uçlar doğru akım kaynağının pozitif ve negatif terminallerine bağlanmaktadır.

3.2.3. Senkron generatörün hızı ve frekansı

Senkron generatörlerde rotorun mekanik dönme hızı ile stator sargılarında oluşan elektriksel frekans arasında sabit ve doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki, “senkron” teriminin temel çıkış noktasını da açıklamaktadır: senkron makinelerde rotor manyetik alanı, stator tarafından oluşturulan döner manyetik alan ile senkron hızda kilitlenmiş şekilde çalışır ve böylece mekanik hız ile elektriksel frekans arasında sabit bir ilişki kurulur (Kaşıkçı, 2013). Senkron generatörde rotor, doğru akım (DA) ile beslenen kutup sargıları sayesinde bir elektromıknatis gibi davranır; rotor üzerinde oluşturulan bu manyetik alan, stator döner alanı ile etkileşerek elektromanyetik momentin ve kararlı senkron işletmenin oluşmasını sağlar. Bu ilişki eşitlik 3.2’de verilen bağıntı ile ifade edilmektedir (Chapman, 2012).

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de f_e Hertz (Hz) cinsinden elektriksel frekansı, n_m dakikadaki devir (dev/dak veya rpm) cinsinden rotorun mekanik dönme hızını ve P senkron generatörün kutup sayısını ifade etmektedir. Senkron generatörlerde rotor üzerindeki kutup sargılarıyla oluşturulan manyetik alan rotor ile birlikte döndüğünden, rotorun mekanik hızı aynı zamanda hava aralığındaki manyetik alanın senkron hızına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla eşitlik 3.2, belirli bir elektriksel frekansın üretilmesi için gerekli rotor hızının kutup sayısına bağlı olarak nasıl değiştiğini açıkça ifade etmektedir. Genellikle endüstriyel enerji üretim sistemleri ve şebekeleri çoğunlukla 50 Hz veya 60 Hz nominal frekanslarda çalıştırılmakta olup, tasarlanan frekansa uyum sağlamak için rotor hızının kutup sayısı ile uyumlu seçilmesi gerekir. Örneğin 40 kutuplu bir senkron generatörde 50 Hz frekans elde etmek için rotorun yaklaşık 150 dev/dak hızında dönmesi gerekirken, 4 kutuplu bir senkron generatörde aynı frekans için rotor hızının yaklaşık 1500 dev/dak olması gerekmektedir. (Chapman, 2012).

Tablo 7. Frekans, Kutup sayısı ve Devir ilişkilerini gösteren tablo.

f (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
P-Kutup	2	4	6	8	10	12	20	40	60
n_m (dev/dak)	3000	1500	1000	750	600	500	300	150	10

3.2.4. Senkron generatörlerde indüklenen gerilim

Bölüm 3.2.2.1’de Senkron generatörlerde üç fazlı stator sargısının her bir fazında indüklenen gerilime dair bağıntı aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f \quad (3.3)$$

Bu bağıntıdan hareketle, senkron generatörlerde statorda indüklenen gerilim değerinin, ϕ ile gösterilen manyetik akı değerine, f ile gösterilen frekans veya dönme hızına ve makinenin diğer sabit yapısına bağlı olduğu söylenebilir. Senkron makinelerin analizinde, çalışma sırasında değişkenlik gösteren büyüklükleri daha net ifade edebilmek amacıyla bu bağıntı sıklıkla daha sade bir hale dönüştürülmektedir. Bu amaçla makinenin yapısını ve karakteristik özelliklerini ihtiva eden bir sabit olarak K ifadesi tanımlanırsa ilgili eşitlik basitleştirilmiş olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$E_A = K \phi \omega \quad (3.4)$$

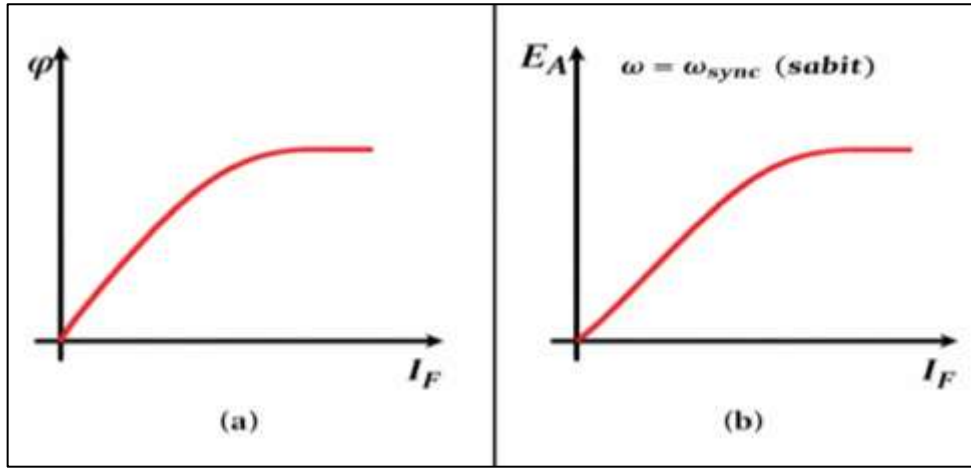
Burada K , makinenin yapısal özelliklerini temsil eden bir sabit olup, ω ise açısal hızı temsil etmektedir. Açısal hızın elektriksel radyan/saniye cinsinden ifade edilmesi durumunda, makine sabiti aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

Eğer açısal hız mekanik radyan/saniye cinsinden ifade edilirse, kutup sayısının da hesaba katılması gerekir ve makine sabiti şu şekilde tanımlanır:

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (3.6)$$

Özetle senkron generatörlerde stator sargısında indüklenen gerilim E_A , manyetik akı ve dönme hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Manyetik akı " ϕ " ise doğrudan rotor alan devresinden geçen doğru akım " I_F " tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle alan sargısından geçen akım arttıkça manyetik akı da artmakta ve buna bağlı olarak statorda indüklenen iç gerilim büyümektedir. Alan akımı ile manyetik akı arasındaki bu ilişki, senkron makinenin **mıknatıslanma eğrisi** olarak adlandırılan eğri ile ifade edilmektedir (Chapman, 2012).



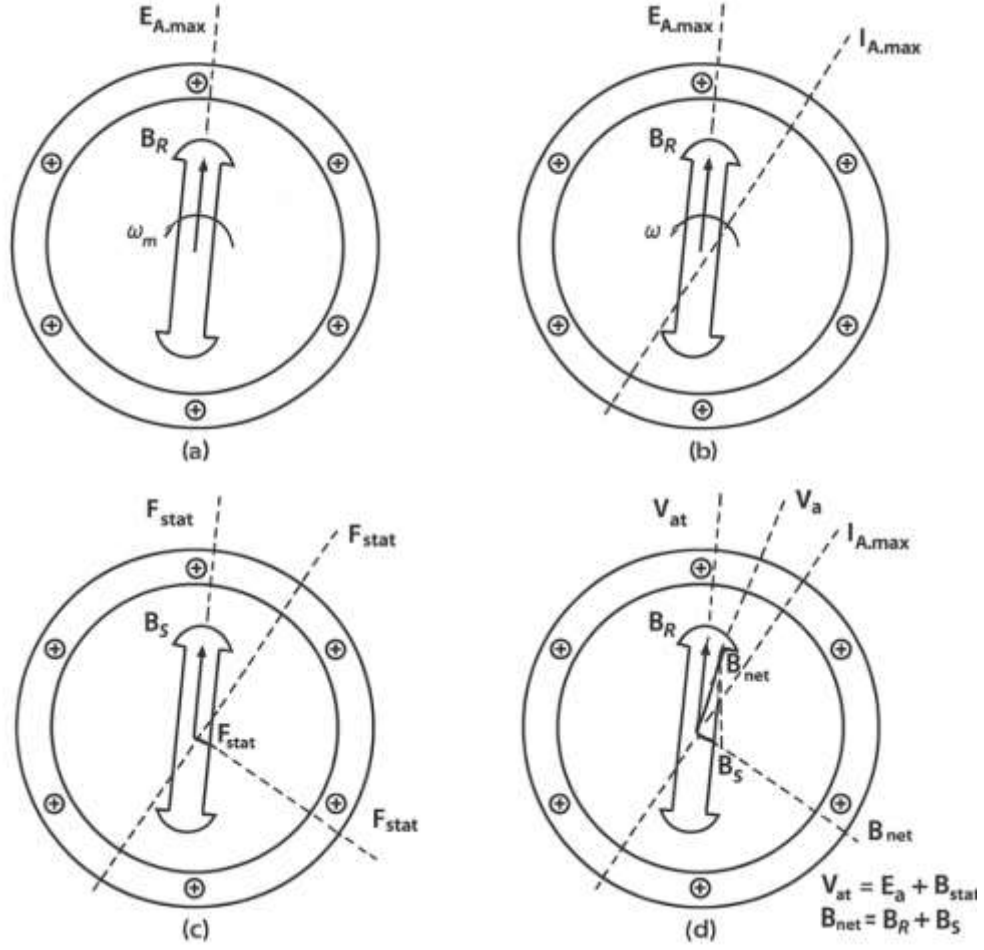
Şekil 26. (a) Akının uyarma akımına bağlı değişimi (b) Mıknatıslanma eğrisi (Demirel,2019)

3.2.5. Senkron generatörde endüvi reaksiyonu

Bir senkron generatörün herhangi bir fazında indüklenen E_A gerilimi genellikle generatörün çıkış terminallerinde ölçülen gerilim değerine eşit değildir. Faz gerilimi E_A , yalnızca ilgili faz üzerinden herhangi bir akım akmadığı durumda çıkış gerilimi olan V_ϕ ile aynı olabilir. Söz konusu bu iki gerilim arasındaki fark bir senkron generatörün modellenmesindeki parametreleri ortaya koymaktadır. E_A ve V_ϕ gerilimleri arasındaki farka neden olan etkenler şunlardır;

- Stator akımı dolayısıyla hava aralığında meydana gelen manyetik bozulmalar (Endüvi Reaksiyonu)
- Endüvi sargılarının öz indüktans değeri
- Endüvi sargılarının direnç değeri
- Rotor yapısı (çıkık kutuplu rotor olmasının etkileri)

Endüvi reaksiyonu söz konusu etkilerin birinci ve genellikle en büyük olanı olarak bilinmektedir. Generatörün uçlarına bağlanan bir yük ile stator sargılarından akım geçmesi sağlanır. Stator üç fazlı sargılarından akan akım generatörün içerisinde bir manyetik alan üretilmesi ile sonuçlanır. Oluşan bu stator manyetik alanı faz gerilim değerlerini değiştirecek ve rotor manyetik alanını bozucu etki doğuracaktır. Endüvi yani stator akımının manyetik alana etki etmesi sonucunda ortaya çıkan bu duruma “endüvi reaksiyonu” adı verilmektedir (Akın & Orhan, 2004).



Şekil 27. Endüvi reaksiyonu etkisinin oluşumu

Şekil.27 (a)'da üç fazlı bir stator sargısı içerisinde dönen iki kutuplu bir rotor yapısı gösterilmektedir. Stator devresine bir yük bağlanmıştır ve rotor manyetik alanı B_R , maksimum değeri B_R ile aynı yönde olan iç gerilim E_A gerilimini üretir. Senkron generatörün stator sargıları üzerinden akım akmıyorken yani yüksüz durumda iken E_A gerilimi faz gerilimi olan V_ϕ değerine eşit olacaktır.

Şekil.27 (b)'de senkron generatörün geri güç faktörüne bağlı bir yük durumunda olduğu durum incelenmiştir. Bu durumda geri güç faktörlü bir yük bağlanmış olmasından dolayı akımın tepe değeri gerilim tepe değerinin gerisinde olacaktır.

Stator sargıları üzerinden akan akımın oluşturduğu manyetik alan B_S olarak isimlendirilmiştir. Bu stator manyetik alanının yönü ise sağ el kuralı ile belirlenmiş ve Şekil.27 (c)'de gösterilmiştir. B_S manyetik alanı stator sargıları üzerinde bir gerilim üretecektir. Söz konusu bu

gerilim şekilde E_{stat} olarak gösterilmiştir. Senkron generatörün herhangi bir fazındaki toplam gerilim, stator sargılarında oluşan bu iki E_A ve E_{stat} gerilimlerinin toplamından oluşmaktadır.

$$V_\phi = E_A + E_{stat} \quad (3.6)$$

Şekil 21 (d)'de görüldüğü gibi E_A ile B_R 'nin ve E_{stat} ile B_S 'nin açıları aynıdır. Oluşan net manyetik alan olan B_{net} de V_ϕ ile aynı fazda olacaktır.

Stator gerilimi E_{stat} , stator sargı akımı I_A 'nın 90° gerisinde ve yine stator akımı I_A ile doğru orantılıdır. Endüvi reaksiyonu etkisini temsil eden sabit bir reaktans katsayısı olarak " X " kabul edildiğinde endüvi reaksiyonu gerilimi şu şekilde ifade edilebilir;

$$E_{stat} = -jXI_A \quad (3.7)$$

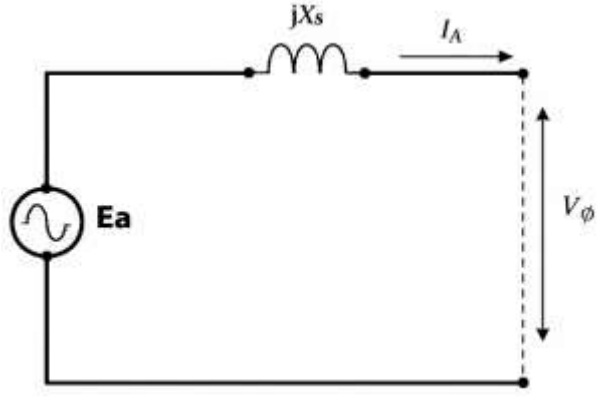
Bu ifade dikkate alındığında, senkron generatörde bir faza ait uç gerilimi V_ϕ , indüklenen gerilim E_A ile endüvi reaksiyonu geriliminin fazör toplamı olarak elde edilmektedir. Dolayısıyla stator sargısının bir fazındaki gerilim bağıntısı aşağıdaki biçimi almaktadır (Chapman, 2012):

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad (3.8)$$

3.2.6. Senkron generatör eşdeğer devresi

Bir senkron generatörün eşdeğer devresinin modellenmesinde, bölüm 3.2.5. de bahsedilen endüvi reaksiyonu gerilimini tanımlayan bağıntıdan yola çıkılabilir. Özetle endüvi reaksiyonu gerilimi, indüklenen stator gerilimi ile seri bağlı bir indüktans olarak modellenebilir ve şekil.28 de gösterildiği haliyle basit bir eşdeğer devre şeması çizilebilir. Endüvi reaksiyonunu izah eden etkilerin yanı sıra, stator sargılarının karakteristik öz indüktans ve direnç değerlerine dair etkilerde mevcuttur. Stator direnci değeri " R_A ", stator öz indüktansı değeri " L_A " ve bu değerlere karşılık gelen senkron reaktans değeri de " X_A " olarak alındığında genel bağıntı şu şekilde ifade edilebilir;

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (3.9)$$



Şekil.28 Senkron generatörün basit eşdeğer devresi

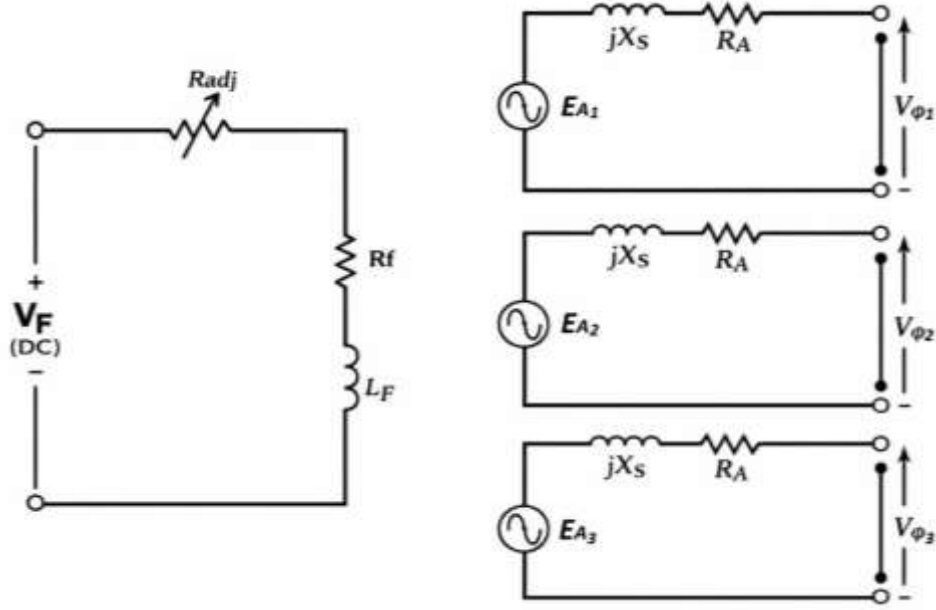
Senkron generatördeki endüvi reaksiyonu ve öz indüktans etkileri genelde tek bir ifade ile simgelenir ve senkron generatörün “*senkron reaktansı*” adı ile ifade edilir. Buradan hareketle senkron reaktans ifadesi şu şekilde gösterilebilir:

$$X_S = X + X_A \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10’ da verilen senkron reaktans ifadesi faz gerilimini veren denklemde yerine yazıldığında genel ifade aşağıdaki hali alacaktır;

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (3.11)$$

Stator sargılarının üç fazlı olduğu düşünüldüğünde aynı ifadeler her bir faz için tekrarlanabilir. Bu şekilde senkron generatörün üç fazlı stator sargısının eşdeğer devresi Şekil.29’da gösterilmiştir.



Şekil 29. Bir senkron generatörün üç faz eşdeğer devre şeması

3.3. Stator Sargı Yalıtım Sistemleri ve Malzeme Bilgisi

3.3.1. Yalıtım malzemelerinin özellikleri ve sınıflandırması

Elektrik makineleri, çalışma sırasında bakır ve demir kayıpları nedeniyle doğal olarak ısı üretir. "Sıcaklık artışı" terimi, elektrik makinası sargılarındaki sıcaklığın ortam sıcaklığına göre artışını ifade eder. Örneğin, bir motorun ortam sıcaklığı 40°C iken sargı sıcaklığı 100°C 'ye ulaşırsa, ortaya çıkan sıcaklık artışı 60°C 'dir. Elektrik motorlarında, transformatörlerde ve çeşitli elektrikli cihazlarda kullanılan yalıtım malzemelerinin sıcaklık direncini sınıflandırmak için elektriksel yalıtım sınıfları adı verilen bir sistem kullanılır. Bu sınıflar, yalıtım malzemelerinin çalışma sırasında güvenle dayanabileceği maksimum sıcaklıkları belirtir. Elektriksel yalıtım sınıfları A, E, B, F, H ve bazen de C olarak adlandırılır ve her sınıf belirli bir maksimum çalışma sıcaklığına karşılık gelir. Bu sınıflandırma, malzemelerin termal bozulma potansiyeline karşı dayanıklılığını gösterir. Yalıtım sınıfı, sargılardaki yalıtım malzemelerinin dayanabileceği üst sıcaklık eşliğini belirler. Bu sıcaklık sınırları, standartlar tarafından belirlenmiştir ve şu şekildedir (Orhun, 2024):

- **A Sınıf Yalıtım:** Bu malzeme 105°C 'ye kadar ısıya dayanıklıdır ve Sınıf Y yalıtımının vernikli veya yağ emdirilmiş bir çeşididir.

- **B Sınıf Yalıtım:** 130°C'ye kadar sıcaklıklara dayanıklı olup, asfalt mika ve epoksi mika başta olmak üzere inorganik maddelerden üretilmektedir.
- **F Sınıf Yalıtım:** Bu malzeme 155°C'ye kadar ısıya dayanıklıdır ve bant, silikon ve reçine içeren, Sınıf B yalıtımının güçlendirilmiş bir çeşididir.
- **H Sınıf Yalıtım:** Bu malzemeler 180°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir ve genellikle silikon reçineleri ve fiberglastan oluşur (Elk Motor, 2025).

Elektriksel yalıtım sınıflarının seçimi, cihazın çalışma sıcaklığı, öngörülen kullanım ömrü ve güvenlik standartları gibi faktörlere bağlıdır. Örneğin, F veya H Sınıfı malzemeler, yüksek sıcaklık performansı gerektiren elektrik makinaları için tercih edilirken, A veya B Sınıfı malzemeler, daha düşük sıcaklık aralıklarında çalışan küçük ev aletleri için yeterli performansı gösterebilir. Cihazların daha uzun süreli, daha güvenli ve daha verimli çalışmasını sağlamak için uygun elektrik yalıtım sınıflarının seçilmesi çok önemlidir. Bu dikkatli seçim hem üreticiler hem de son kullanıcılar için önemli maliyet düşüşleri ve güvenlik avantajları sağlar. Dolayısıyla, elektrikli cihazların tasarım ve üretim aşamalarında yalıtım malzemelerinin seçiminin titizlikle yapılması önem arz etmektedir (Özek, 2020).

3.3.2. Epoksi-Mika kompozit sistemlerinin yapısı ve özellikleri

Epoksi–mika kompozit yalıtım sistemleri, yüksek gerilimli döner elektrik makinelerinde stator sargılarının elektriksel ve mekanik dayanımını artırmak amacıyla uzun yıllardır kullanılan önemli yalıtım teknikleri arasında yer almaktadır. Bu sistemlerde mika, yüksek dielektrik dayanımı, ısı kararlılığı ve kısmi deşarjlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle ana yalıtım bileşeni olarak görev almaktadır. Epoksi reçine ise mika tabakaları ve iletkenler arasında bağlayıcı bir ortam oluşturarak yalıtım yapısının mekanik bütünlüğü ve rijitliğini sağlamaktadır. Epoksi–mika kompozit sistemleri, termal zorlanmalar, nem etkisi ve elektriksel gerilimler altında kararlı bir davranış sergilemeleri nedeniyle modern senkron generatör ve büyük güçlü elektrik makinelerinde yaygın biçimde tercih edilmektedir.

Tablo 8. Yalıtım sınıflarına göre kullanılan yalıtkan malzemeler (Largiader, 2019)

Esas Yalıtım Malzemeleri	Diğer Yalıtım Malzemeleri	Emprenye Verniği
Mika - ipek şerit	Pamuk, keten, ipek,	Tadil edilmiş fenolik
Mika folyo (kâğıtlı)	Mikanit, odun, emprenye	vernük (tinerli)
B Mika - cam elyafı bez	edilmiş odun, Bakalit	Polyester reçine
Cam elyaf	Macun (amyant+yağlı	(tinersiz)
Mikanit	siyah vernik)	
Mika - cam elyafı bez	Cam - elyaf - epoksi plâka	Tadil edilmiş epoksi
Mika - cam elyafı bez şerit	Mika - cam elyafı bez	polyester reçine
Mika- cam elyafı bez	Mikanit	(tinersiz)
F Cam elyafı şerit	Cam elyafı şerit	Saf epoksi (tinersiz)
	Macun	
	Epoksi reçinesi	
Mika - cam elyafı bez şerit	Cam elyafı silikon plâka	Silikon vernük (tinerli)
Mika - cam elyafı bez band	Mika cam elyafı dokuma	
H Mika - cam elyafı şerit	Cam elyafı şerit	
Mika - cam elyaf	Macun	

Epoksi reçineler, özellikle kompozit epoksi kaplamalarda endüstri için uyarlanabilir katkı maddeleri olarak hizmet verir. Kullanım alanları çok çeşitli endüstriyel uygulamaları kapsar. Bu reçineler, alternatif seçeneklere kıyasla daha yüksek mukavemet gösterir ve artırılmış ısı direnci gibi gelişmiş fiziksel ve performans özellikleri sunar. Kompozit uygulamalarda hafif ancak dayanıklı bileşenlerin üretimi için epoksi laminasyon reçineleri mükemmel bir seçimdir. Karbon fiber ve cam elyaf gibi takviyelerle birleştirildiğinde yüksek performanslı elektriksel yalıtım çözümler sunarlar (Kodal, Ertürk, Şanlı, & Özkoc, 2015).

Mika, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren katmanlı bir yapı ile karakterize edilen bir alüminosilikat minerali olarak sınıflandırılır. En yaygın ve ticari olarak kullanılan mika çeşitleri muskovit ve flogopittir. Mika malzemesinde ara katman bağları talk mineralinde bulunanlardan daha güçlüdür. Ek olarak, yapısı alüminyum, potasyum, magnezyum, demir, sodyum, flor ve lityum gibi elementler içerir. Ayrıca suya, asitlere (hidroflorik ve konsantre sülfürik asit hariç), alkalilere, standart çözücülere ve yağlara maruz kaldığında tamamen

kararlıdır ve çevre koşullarından büyük ölçüde etkilenmez. En önemli özelliklerinden birisi de yüksek dielektrik dayanımı ile tutarlı bir dielektrik sabitine sahip olmasıdır. Yüksek elektrik özdirenci, düşük sıcaklık direnç katsayısı ve kapasitans özellikleri ile yalıtım malzemesi arasında çok önemli bir yer tutar. Belirli mika türleri, 600°C ila 900°C arasındaki yüksek sıcaklık uygulamalarında dahi güvenle kullanılabilir (Altay, Sarikanat, Sağlam, Uysalman, & Seki, 2021; Sahai & Pawar, 2017).

Mika, 172 GN/m²lik önemli bir elastisite modülüne sahiptir. Ayrıca, mikanın polimer matrise dahil edilmesi, cam ve karbon fiberlerle üretilenlere kıyasla daha ekonomik kompozitlerin üretilmesini sağlar. Literatürde, mika ile zenginleştirilmiş polimer kompozitlerin mekanik, termal ve tribolojik özellikleri hakkında çok sayıda araştırma belgelenmiştir (Lichao, Hong, Shaoyun, Xiaojie, & Wenbin, 2016).

3.3.3. Vakum Basınç Emprenye (VPI) prosesi ve yalıtım sistemi

Vakum Basınç Emprenye (VPI) yöntemi, elektrik makinelerinde stator ve rotor sargı yalıtım sistemlerinin dayanımını ve bütünlüğünü artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan gelişmiş bir yalıtım teknolojisidir. Bu yöntemde, sargılar önce vakum altında tutularak yalıtım yapısı içerisindeki hava ve nem uzaklaştırılır, ardından basınç altında sıvı reçine ile tamamen emprenye edilir. Böylece sargı iletkenleri, yalıtım malzemesi ve mekanik yapı arasında boşluksuz, homojen ve yüksek dielektrik dayanımlı bir yapı elde edilir. VPI teknolojisi, yalıtım sisteminin nem, titreşim, termal döngüler ve kısmi deşarj gibi olumsuz etkilere karşı direncini artırarak elektrik makinelerinde sargıların yalıtım güvenilirliğini ve hizmet ömrünü önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Bu gelişmiş proseste; stator, hava ve nemin sargı bileşimindeki en küçük çatlaklardan bile titizlikle uzaklaştırıldığı özel bir vakum odası içinde yer alır. Hassas bir şekilde ayarlanmış basınç koşulları altında reçine, bakır iletkenler arasındaki mikroskobik boşluklara derinlemesine nüfuz ederek, tüm sargı tertibatını tek parça, sağlam bir yapıda birleştiren geçirimsiz bir moleküler bağ oluşturur. Bu yöntem ile elektrik makinalarında kullanılan geleneksel yalıtım verniği yerine, sargılara özel bir VPI epoksi yalıtım malzemesi uygulanır. Önceden ısıtılan stator veya rotor, daha sonra vakum oluşturulan VPI basınç odasına yerleştirilir. Bu işlem boyunca, tüm ünite tamamen suya batana kadar odaya çözücüsüz bir epoksi reçinesi çekilir. Ardından, ünitenin reçineyle tamamen emdirilmesini sağlamak için

basınç uygulanır. Bu aşama tamamlandıktan sonra ünite çıkarılır ve kürleme fırınında pişirme işlemine tabi tutulur (IKM Subsea Motor Solutions, 2025).

3.4. Yalıtım Sistemlerinde Yaşlanma Mekanizmaları ve Fiziksel Temelleri

3.4.1. Elektriksel yaşlanma ve kısmi deşarj fiziği

Elektrik yalıtım sistemleri, elektriksel koruma yalıtımı, sargılara mekanik destek ve kişisel iş güvenliği sağlanması gibi birçok amaca hizmet eder. Sıvı ve gaz yalıtım sistemlerinde gözlemlenen geri dönüşümlü bozulmanın aksine, katı yalıtımın bozulması tamamen kalıcı bir bozulma sürecidir. Bu nedenle yaşlanma araştırmalarının önemli bir kısmı katı yalıtım sistemlerine odaklanmıştır. Bu katı yalıtkanlar, kapasitörlerde, transformatörlerde, kablolarda, iletim hatlarında, elektrik makinelerinde ve çeşitli diğer elektrikli cihaz ve ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tipik çalışma koşulları altında, bir yalıtım sistemi elektriksel, mekanik, termal ve çevresel etkiler de dahil olmak üzere çeşitli yaşlanma faktörleriyle karşılaşabilir. Zamanla bu faktörler yalıtım sisteminin yaşlanma sürecine katkıda bulunarak nihayetinde arızalanmasına yol açar (Cygan & Laghari, 1990).

Yalıtım sistemi yaşlanması, bir veya daha fazla faktörün etkisiyle bir yalıtım sisteminin temel özelliklerinde oluşan geri döndürülemez değişiklikleri ifade eder. Yaşlanma stresleri hem iç hem de dış yaşlanmaya neden olabilir. Uygulamada, çoğu yalıtım sistemi çeşitli kusurların varlığı ve kirli ortamlarda çalışmaları nedeniyle dış yaşlanma yaşar. Yaşlanmayla ilişkili faktörler, elektriksel, termal, mekanik ve çevresel yaşlanmanın göstergelerini oluşturur ve bu da nihayetinde yalıtım arızasıyla sonuçlanır (Bolhuis, Gulski, & Smit, 2002).

Yalıtımın yaşlanmasında tek bir faktör birincil etken olduğunda, bu olguya tek faktörlü yaşlanma denir. Tersine, çeşitli yaşlanma faktörleri yalıtım sisteminin ömrünü etkilediğinde ise çok faktörlü yaşlanma meydana gelir. Bir yalıtım sisteminin yaşlanma süreci, doğası gereği karmaşıktır; tek bir baskın yaşlanma faktörü mevcut olsa bile, arıza olayı birden fazla yaşlanma mekanizmasının etkileşimiyle şekillenir. Ayrıca, aşağıdaki süreçler elektriksel yaşlanmada önemli rol oynar (IEC, 1999).

- Kısmi boşalma
- Yalıtkan yüzeyinde oluşan izler
- Elektriksel Ağaçlanma

- Sıcaklık artışı (İlhan & Özdemir, 2004)
-

Endüstriyel ortamlarda kullanılan elektrik yalıtım sistemlerinin çoğunda, nihayetinde arızaya yol açan elektriksel yaşlanma olgusu, oldukça karmaşık bir mekanizma aracılığıyla ortaya çıkmaktadır (İlhan & Özdemir, 2004).



Şekil 30. Aşırı Akım kaynaklı Stator sargılar hasar görmüş bir generatör (Nugroho, Widiastuti, & Ary, 2017)

Çevresel yaşlanma, termal yaşlanma sırasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon süreçlerini kapsar. Nem, sıcaklık, basınç, kir, toz ve kimyasal dumanlar gibi çeşitli çevresel faktörler bu süreçte önemli rol oynar. Bu unsurların her biri elektriksel yaşlanma olgusu için hayati önem taşır (IEC, 1982).

3.4.2. Termal yaşlanma

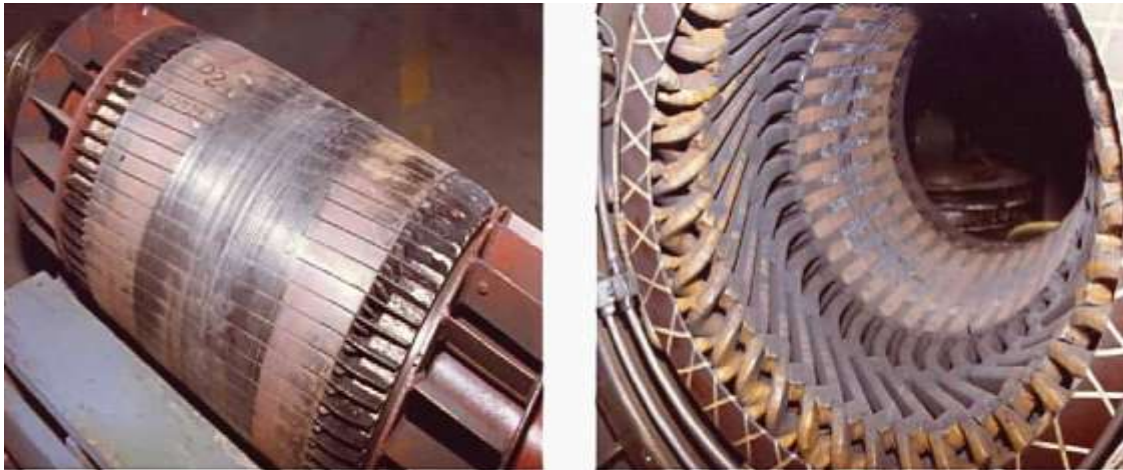
Termal yaşlanma, sargılara veya deney numunelerine ısı uygulanarak yapılan bir ısıl işlem sürecini ifade eder. Bu işlem, malzemenin hem mikro hem de makro yapısında değişikliklere yol açar ve bu da mekanik özelliklerini etkiler. Bu yaşlanma süreci, çevre koşullarının bir sonucu olarak zaman içinde doğal olarak meydana gelebilir veya malzemeye uygulanan özel müdahalelerle yapay olarak hızlandırılabilir. Elektrik yalıtım sistemlerinin termal yaşlanmasından sorumlu olaylar şunlardır (Satı, 2018);

- Kimyasal reaksiyonlar ve difüzyonlar hem kimyasal hem de fiziksel dönüşümlere yol açar,
- Isıl genleşme sonucu oluşan kuvvetlerden kaynaklanan termomekanik olaylar.

Isıl yaşlanma, yalıtım sistemlerinde hem fiziksel hem de kimyasal süreçlerin hızlanmasına katkıda bulunan temel faktör olarak kabul edilmektedir. Literatürde, ısıl stres ve uzun ömür arasındaki ilişkiyi gösteren yaşlanma modelleri mevcuttur ve Dakin tarafından ortaya atılan ısıl model en yaygın kullanılanıdır (İlhan, 2005).

3.4.3. Mekanik yaşlanma

Sargıların oluklar içerisindeki dönme hareketine bağlı vibrasyon veya diğer nedenlerle maruz kaldığı mekanik stresler ve rotor yüzeyinin stator sargı düzlemine sürtecek kadar balanssız ve titreşimli çalışması mekanik yaşlanma etkisine yol açabilir. Başlatma döngüsü sırasında, stator sargı akımı sonucu bobinlere uygulanan kuvvet en yüksek değerine ulaşır ve bobinlerin hem radyal hem de teğetsel yönlerde hat frekansının iki katı hızla titreşmesine neden olur. Bobinlerin bu hareketi yalıtımı tehlikeye atarak üst sargıların gevşemesine ve iletkenlerin hasar görmesine yol açabilir.



Şekil 31. Rotor ve Stator sürtmesi kaynaklı sargı hasarları

Rotor, yatak hasarı, shaft sapması ve rotor-stator hizasızlığı gibi çeşitli nedenlerle stator düzlemine sürtebilir veya çarpabilir. Bu çarpışma yalnızca başlatma sırasında meydana gelirse, rotordan gelen kuvvet stator laminasyonlarının bozulmasına ve topraklama hatasına neden olabilir. Aksine, rotor elektrik makinesi tam hızda çalışırken statora çarparsa, temas noktasında oluşan aşırı ısı, stator yuvası içindeki sargılarda erken topraklama hatasına yol açabilir. Ayrıca, rotor dengeleme ağırlıklarının gevşemesi veya fan kanatlarının statora çarpması, havalandırma sistemi yoluyla motora yabancı cisimlerin girmesi gibi çeşitli faktörlerden dolayı da arızalar meydana gelebilir (Siddique, Yadava, & Singh, 2005).

3.4.4. Çevresel yaşlanma

Elektrik makinelerinde stator arızaları nem, kir, kimyasal madde varlığı, ortam sıcaklığı ve havalandırma sorunları gibi faktörlere bağlanabilir. Bu çevresel koşulların farkında olunması, bu faktörlerle ilişkili arızaların önlenmesini mümkün kılar. Bu etkilerin sonuçları, makine sargı sıcaklıklarının yükselmesine, aşırı akım çekilmesine ve sonunda sargı arızasına yol açabilir. Ayrıca sıvılarla temas, kısa devrelere neden olabilir ve bu da elektrik makinelerinde ciddi hasarlara yol açabilir.



Şekil 32. Yağ ve kömür tozu kirliliği kaynaklı hava kanalları tıkanmış bir generatör (Nugroho, Widiastuti, & Ary, 2017)

Elektrik makinelerin stator sargısı yalıtımında oluşan bir arıza, stator yük akımı miktarında veya titreşim seviyelerinde artışa yol açabilir. Bu artan akım miktarı, elektrik makinesinin iç çalışma sıcaklığını da yükseltir. Söz konusu bu akım miktarının artmasını algılayan aşırı akım koruması ve/veya sıcaklık kontrol sensörleri gibi cihazların olmaması veya işlevsiz olması stator sargılarının tamamen yanmasına neden olabilir (Ukil, Chen, & Andenna, 2011).

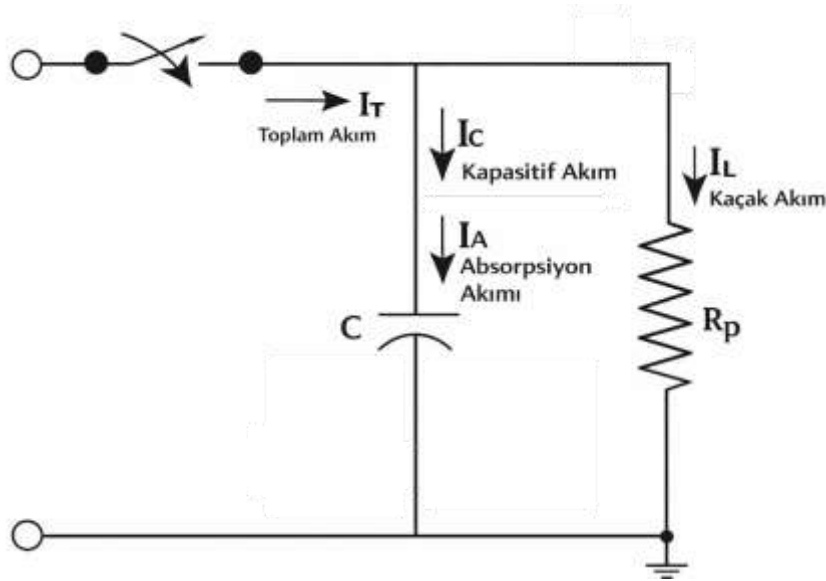
3.5. Yalıtım Tanı Yöntemleri ve Elektriksel Ölçüm Teorisi

3.5.1. Yalıtım Direnci Testi teorisi (IR)

Yalıtım direnci, elektrik devreleri veya sistemleri içindeki malzemelerin gösterdiği dirençle ilgilidir ve elektrik akımının istenmeyen yollardan akmasını engeller. Elektrik yalıtımı, akımın yalnızca belirlenmiş iletim yolları boyunca yönlendirilmesini sağlayarak hem güvenlik hem de

operasyonel güvenliği artırır ve kontrolsüz kaçak akım olasılığını azaltır. Yalıtım direncinin derecesi, yalıtım malzemesinin kalitesi, kalınlığı ve uygulandığı koşullar gibi faktörlerden etkilenir (Endüstriyel Test Cihazları, 2024).

Yalıtım direnci terimi, genellikle uygulanan doğru gerilimin, gerilim uygulamasının başlangıcından itibaren belirli bir anda ölçülen akıma bölünmesiyle elde edilen oranı ifade eder. Uygulanan doğru gerilimin ürettiği akım, iki unsurdan oluşur: bu bileşenler yalıtım yüzeyindeki sızıntı yollarından akan akım ve yalıtım hacmi içinde mevcut akım olmak üzere ayrıştırılmaktadır (IEEE, 1958).



Şekil 33. Yalıtım Direnci Testi Akım bileşenleri gösterimi devre şeması

Yalıtım hacmi içindeki akım bileşenlerine dair ayrıntılı açıklamalar IEEE 1958 standardında verilmiştir. Buna göre; Kapasitif şarj akımı, kısa süreli bir akım bileşeni olarak genellikle ilk veri toplama sırasında etkisini gösterir ve bu nedenle elde edilen ölçümler üzerinde etkisi olmaz. Absorpsiyon (Emilim) akımı, nispeten yüksek bir başlangıç değerinden başlayıp neredeyse sıfıra yaklaşarak giderek daha yavaş bir oranda azalır. Direnç ve zaman arasındaki ilişki, log-log grafik kağıdında düz bir çizgi olarak gösterilebilen bir kuvvet fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Genellikle bir yalıtım direnci testinin ilk dakikalarında ölçülen direnç, ağırlıklı olarak absorpsiyon (emilim) akımından etkilenir. Son olarak Emilim akımı ihmal edilebilir seviyeye düştüğünde, yüzey kaçak akımıyla birlikte neredeyse sabit kalan iletim akımı baskın hale gelir.

Döner bir elektrik makinesindeki bir sargının yalıtım direnci, kullanılan yalıtım malzemesinin özel tipi ve konfigürasyonundan etkilenir. Genellikle, yalıtım kalınlığıyla doğrudan, iletkenin yüzey alanıyla ise ters bir ilişki gösterir. Su soğutmalı makinalarda, yalıtım direncinin doğru ölçümlerini elde etmek için suyu boşaltmak ve iç devreyi iyice kurutmak önemlidir. Yalıtım direnci ölçümleri çeşitli faktörlerden etkilenir (Ndzeru, 2008):

- Yüzey durumu (kirlilik, çatlak, vs.)
- Nem
- Kirlilik
- Sıcaklık
- DA test geriliminin büyüklüğü ve uygulama süresi
- Sargıdaki artık yük

Yalıtım direnci ölçümleri genellikle DA Test geriliminin 10 dk boyunca uygulanması şeklinde gerçekleştirilir. Bu süre içerisinde belirli aralıklarla yalıtım direnci değerleri not edilir. Yalıtım direnci (IR) testi, stator veya rotordaki yalıtımın direncini değerlendirir. İdeal bir senaryoda, yalıtımın temel işlevi iletken bakırı manyetik çekirdekten ayırmak olduğundan, bu direnç sonsuz olmalıdır. Ancak gerçekte IR sonsuz seviyelere ulaşmaz. Genellikle düşük bir yalıtım direnci, yalıtımda bir sorun olduğunu gösterir (Stone, Culbert, Boulter, & Dhirani, 2014).

Polarizasyon İndeksi (PI) testi, IR testinin bir varyasyondur. Polarizasyon indeksi (PI) , birinci dakikanın sonunda (R_1) ölçülen izolasyon direnci (IR) ile 10 dakika boyunca (R_{10}) uygulandıktan sonra ölçülen IR' nin oranıdır.

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (3.12)$$

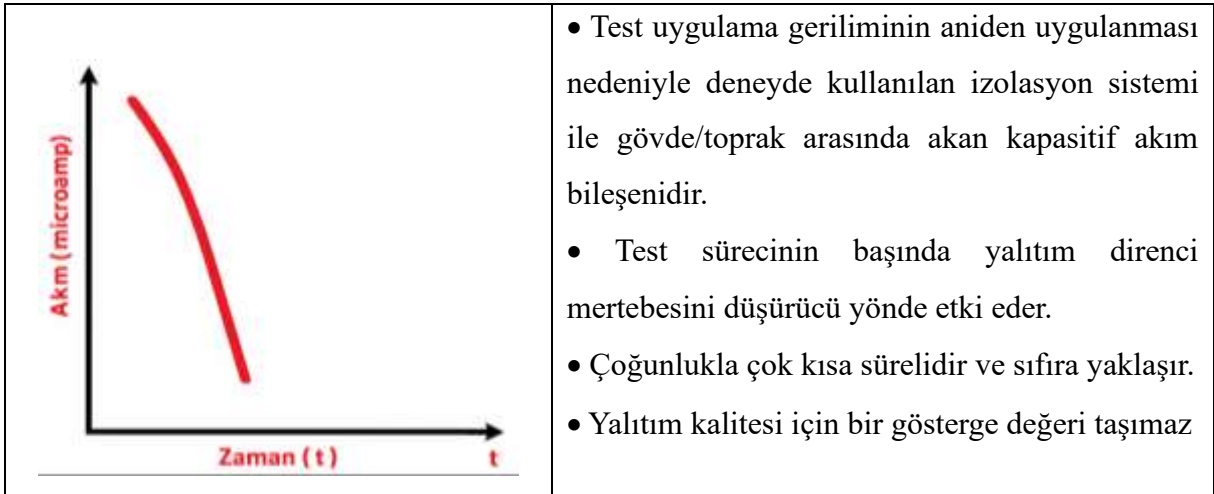
Genellikle, yalıtım direnç oranları IR_{60sn}/IR_{15sn} veya IR_{600sn}/IR_{60sn} yalıtımın esnekliği de dahil olmak üzere çeşitli parametreleri değerlendirmeye yarayan polarizasyon indeksi olarak adlandırılır. Pratik uygulamalarda, IR_{60sn}/IR_{15sn} veya IR_{60sn}/IR_{30sn} testi Dielektrik Absorpsiyon Oranı (DAR) olarak kategorize edilirken, IR_{600sn}/IR_{60sn} oranı ise oranı Polarizasyon İndeksi olarak ayrılmaktadır. IEEE 43-2000 standardı, döner elektrik makinalarında kullanılan yalıtım direnci (IR) ve polarizasyon indeksi (PI) testlerinin altında yatan prensiplere kapsamlı bir genel bakış sunar. Özünde, bu değerlendirmeler, bakır sargı ile stator veya rotorun manyetik çekirdeği

arasına, genellikle gövde üzerinden, nispeten yüksek bir doğru akım (DA) gerilimi uygulayarak ilgili devreden geçen akımı ölçmek için tasarlanmıştır. Herhangi bir "t" anındaki yalıtım direnci aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir (Stone, Culbert, Boulter, & Dhirani, 2014):

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (3.13)$$

Test cihazı tarafından uygulanan DA gerilimi " V " ile gösterilirken, " I_t ", "t" anında ölçülen toplam akımı temsil eder. Akım genellikle değişkenlik gösterdiğinden, akımın doğru ölçümü için bir referans zaman gereklidir. İlgili sargıya DA gerilimi uygulandığında, yalıtım üzerinden akan akımın daha detaylı bir analizinde ise söz konusu akımın dört (4) adet bileşeninden bahsedilmektedir. Söz konusu bu bileşenlerin detaylı açıklamaları aşağıdaki gibidir;

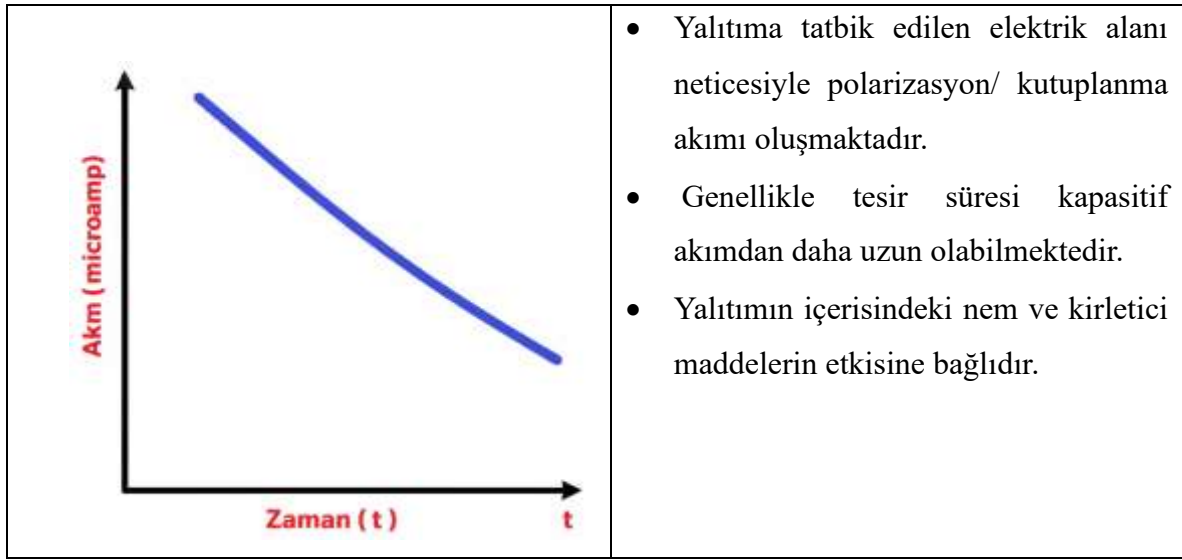
1. **Kapasitif Akım:** Herhangi bir anda bir kapasitöre DC gerilim uygulandığında, başlangıçta yüksek bir şarj akımı dalgalanması meydana gelir ve bu akım daha sonra üstel olarak azalır. Bu zayıflama eğrisinin özellikleri, kapasitörün boyutuna ve gerilim kaynağının iç direncine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Genellikle bu kapasitif akım, 10 saniyeden kısa bir süre içinde "0" a yakın bir değere ulaşma eğilimindedir.



Şekil 34. Kapasitif akım bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri

2. **Absorbsiyon Akımı:** Söz konusu akım, kavramsallaştırma ve tanımlama açısından zorluklar sunmaktadır. Belirli polar moleküllerin elektron konfigürasyonunun, uygulanan bir doğru akım gerilimi tarafından üretilen elektrik alanına maruz kaldığında yeniden yönlendirilmesi veya yeniden düzenlenmesinden kaynaklanmaktadır. Pratik uygulamalarda kullanılan çok sayıda yalıtım malzemesi, molekül içindeki elektron dağılımının bir sonucu

olarak iç elektrik alanına sahip polar moleküller içerir. Örneğin, su molekülleri çok kutupludur; bir elektrik alanıyla karşılaştıklarında, H₂O molekülleri manyetik alanla hizalanır. Bu hizalanma için gereken enerji, uygulanan doğru akım geriliminden kaynaklanır. Moleküller hizalandığında, ortaya çıkan akım da sifıra ulaşacaktır. Bu akıma absorpsiyon (veya polarizasyon) akımı denir. Saha çalışmaları ve akademik araştırmalar, asfalt, mika, polyester ve epoksi gibi polar malzemelere bir doğru akım elektrik alanı uygulandığında, absorpsiyon akımının başlangıçta nispeten yüksek bir değer gösterdiğini ve ardından yaklaşık 10 dakika içinde sifıra düştüğünü göstermektedir. Pratik açıdan, absorpsiyon akımının davranışı, uzun bir zaman sabitiyle karakterize edilen bir RC devresinin davranışına benzemektedir (Stone, Culbert, Boulter, & Dhirani, 2014).

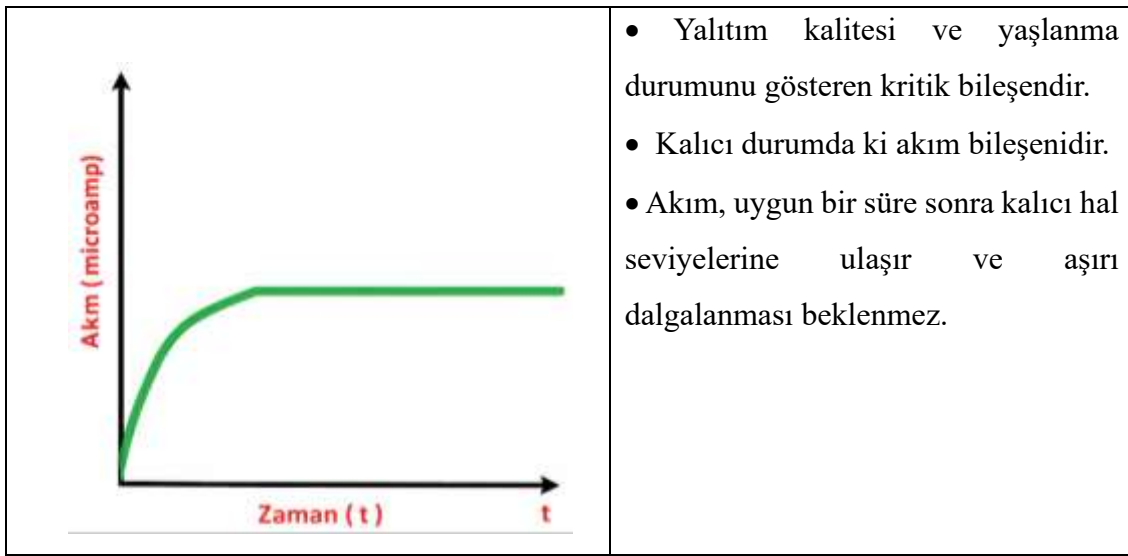


Şekil 35. Absorpsiyon (emilim) akımı bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri

3. İletim Akımı: Bakır ile çekirdek arasında bulunan yalıtım malzemesi boyunca elektron veya iyonların hareketi bu olgudan sorumludur. Bu hareket, yalıtım duvarını geçen galvanik bir akım oluşturur. Yaşlı termoplastik yalıtım sistemlerinde, yalıtım duvarlarının nem emmesi veya modern yalıtım sistemlerinde uzun süre su veya neme maruz kalması, bu tür iletim akımlarının oluşumuna yol açabilir. Ayrıca, bu akım, yalıtım duvarındaki çatlaklar, kesikler veya iğne delikleri gibi belirli faktörlerden de kaynaklanabilir. Yalıtımın yüzeyinde veya yapısında bulunan kirleticiler de bu akım için iletken bir yol oluşturabilir. İdeal olarak, bu akım zaman içinde sabit kalmalı ve sıfır olmalıdır. Epoksi-mika gibi modern yalıtım sistemlerinde, akım genellikle sıfırdır (deformasyon meydana gelmedikçe), çünkü akımı oluşturan elemanlar yüzeye nüfuz edemez. Özellikle modern yalıtım sistemlerinde, bu akım

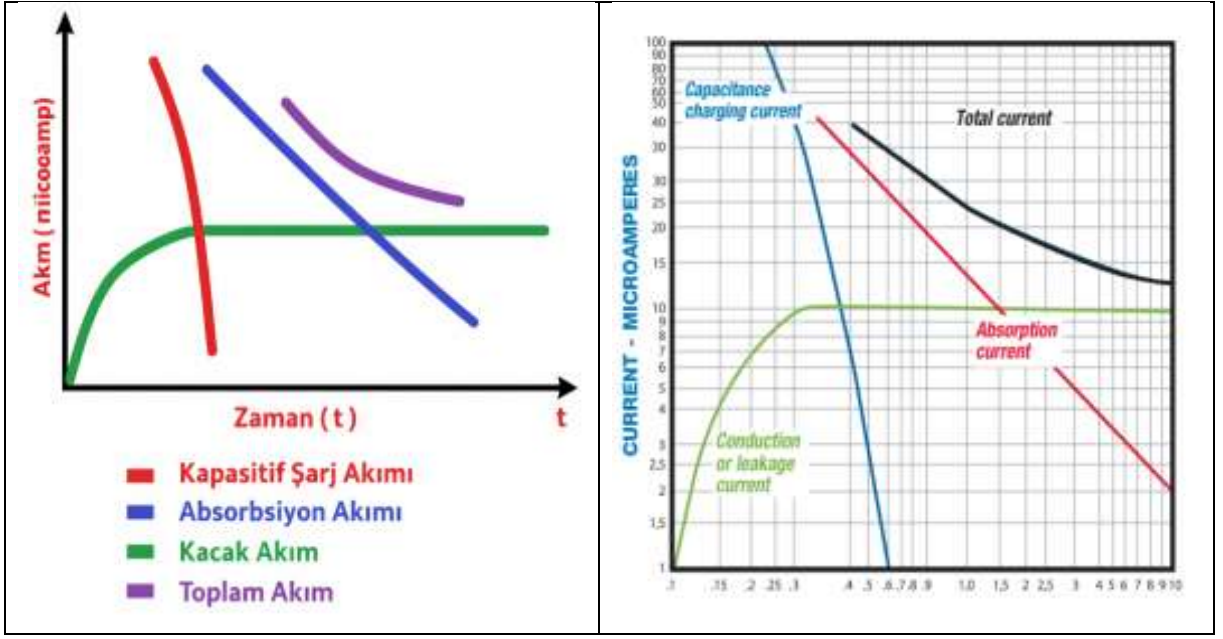
önemli seviyelere ulaşırsa, sargı yalıtımında kritik bir sorun olduğunu gösterir (Demirel, 2019).

4. **Yüzey Kaçak Akımı:** Yalıtım yüzeyinden sürekli bir doğru akım geçer. Bu durum genellikle, sargı yüzeylerinde birikebilen yağ veya nem ile toz, kir, uçucu kül, kimyasallar ve diğer maddelerin bir araya gelmesiyle oluşan kirlenmenin bir sonucudur. İdeal bir senaryoda, bu kaçak akım sıfır olmalıdır; bu nedenle, tespit edilen herhangi bir büyüklük, kirlenmeden kaynaklanan bir yalıtım sorununun göstergesi olarak kabul edilir (Demirel, 2019).



Şekil 36. İletim ve yüzey kaçak akımı bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri

Söz konusu yalıtım direnci testi akım bileşenlerinin tamamının oluşturduğu toplam akım bileşenine dair grafik Şekil 37’de gösterilmiştir.



Şekil 37. Toplam akım bileşeni grafik gösterimi ve özellikleri (Megger Coop., 2025)

3.5.2. Polarizasyon İndeksi (PI) teorisi

Polarizasyon indeksi testi, yalıtım direnci testine benzer. Ancak genellikle okumalar iki farklı zaman aralığında elde edilir: gerilim adımının uygulanmasından bir dakika ve on dakika sonra alınan ölçümler dikkate alınır. Bu iki ölçümün oranı (R_{10}/R_1), yalıtımın kuruluk, kirlenme, kürlenme ve fiziksel bütünlük açısından durumunun bir göstergesi olarak işlev gören polarizasyon indeksi olarak adlandırılır. Bir stator sargısına bir gerilim adımı uygulandığında, yalıtım direnci nispeten sabit bir değerde kademeli olarak sabitlenmeden önce hızlı bir başlangıç artışı yaşar. Optimal durumdaki temiz ve kuru bir sargı için direnç, enerji verildikten sonra birkaç saat boyunca yükselmeye devam edebilirken, aşırı kirli veya ıslak bir sargı maksimum direnç değerine daha hızlı ulaşabilir. Yalıtım direncinin tepkisi, polarizasyon ve iletim akımı bileşenlerinin göreceli büyüklüklerinden etkilenir; bu nedenle, yalıtım direnci eğrisinin eğimi veya polarizasyon indeksi, yalıtımın durumu için bir gösterge görevi görür. Polarizasyon indeksi, aynı koşullar altında alınan iki ölçümden türetildiği için, tek bir yalıtım direnci ölçümüne kıyasla sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha az hassasiyet göstermektedir (Rux, 2004).

Genel olarak, polarizasyon indeksi yalıtım kusurları ve bozulmalarının kesin olmayan bir ölçüsü olarak hizmet eder. İletkenlik ve dielektrik polarizasyon özelliklerindeki farklılıklar, farklı yalıtım malzemelerinin doğasında bulunur ve yalıtım tepkisini etkileyerek, yalnızca polarizasyon indeksi değerlerine dayanıldığında durumunun değerlendirilmesini zorlaştırır.

Yalıtım direnci konusunda daha önce de belirtildiği gibi, polarizasyon indeksi sonuçlarını kullanmanın en etkili yolu, bu değerlerin zaman içindeki eğilimini izlemek veya benzer cihazlardan alınan ölçümlerle karşılaştırmaktır (Rux, 2004).

3.6. İstatistiksel Modelleme Teknikleri

3.6.1. Regresyon Analizi ve Doğrusal Modelleme temelleri

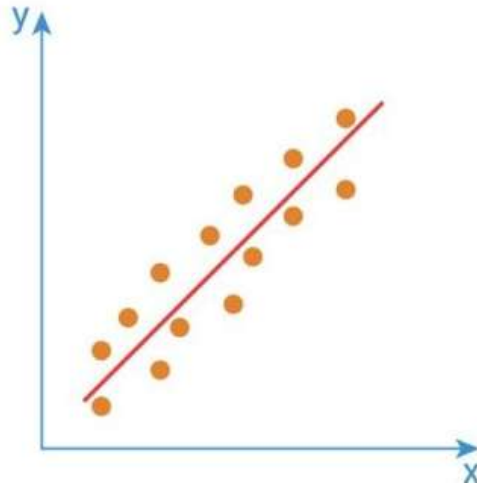
Regresyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasındaki dağılımı incelemek için metodolojik bir yaklaşımdır. Bu analitik teknik, değişkenler arasında bir ilişki olup olmadığını belirlemek ve bu ilişkinin gücünü ölçmek için kullanılabilir. Regresyon analizi teknikleri, bir veya daha fazla bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini değerlendirmek için kullanılır.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (3.9)$$

Doğrunun denklemi ise şöyledir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (3.10)$$

Bu bağlamda, β_0 kesişimi, $\beta_1 X_1$ 'e karşılık gelen uydurulmuş doğrunun eğimini, $\beta_p X_p$ ile ilişkili uydurulmuş doğrunun eğimini ve ε bağımlı değişkenin gözlenen değeri ile uydurulmuş karşılığı arasındaki tutarsızlığı ifade eder.



Şekil 38. Lineer regresyon grafik gösterimi (Bulutistan, 2025)

Basit Doğrusal Regresyon ve Çoklu Doğrusal Regresyon, regresyon analizi içinde farklı bileşenlerden oluşan metodolojilerdir. Her ne kadar farklılıklar gösterebilirler de, hem basit hem

de çoklu modeller, doğrusal denklem formatını kullandıkları için doğrusal modeller olarak sınıflandırılır. Bu özellik doğrusallık olarak adlandırılır (Nursen, 2023).

3.6.2. Polinom Regresyon ve doğrusal olmayan ilişkiler

Polinom regresyon, lineer regresyonun bir uzantısıdır ve değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilme kapasitesine sahiptir. Özellikle zamanla değişen çevresel parametrelerde (örneğin sıcaklık, nem, bozunma oranı gibi) eğrinin şeklini daha iyi yakalayabilir. Literatürde polinom regresyonun, kısa dönemli eğilimleri yansıtmakta başarılı olduğu; ancak model derecesi yükseldikçe aşırı öğrenme (overfitting) riskinin de arttığı vurgulanmaktadır (Liu & Wang, 2020).

Polinom regresyonu, değişkenler arasındaki ilişki doğrusal olmadığında polinom sırasını ayarlayarak verileri optimize edebilen regresyon modellerinden biri olduğu için tercih edilen yöntemdir. Ayrıca, polinom regresyon kullanılarak farklı alanlarda ve farklı amaçlar için gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçların doğrusallığının yüksek olmasıdır (Yıldırım, 2024; Çeltek, 2024).

Polinom regresyonunun yerleşik teorisi, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasında ayırım bulunmayan bir polinom denklemden türetilen segmentleri içerir. Bu regresyon biçimi, bir polinom fonksiyonunun uygulanmasıyla veri noktalarına en uygun şekilde uyan bir eğrinin belirlenmesine kadar uzanır. Veriler için en uygun uyumu elde etmek amacıyla bu fonksiyonun katlarının tahminleri belirlenir. Temel olarak polinomal regresyon denklemi şu şekildedir (Nursen, 2023):

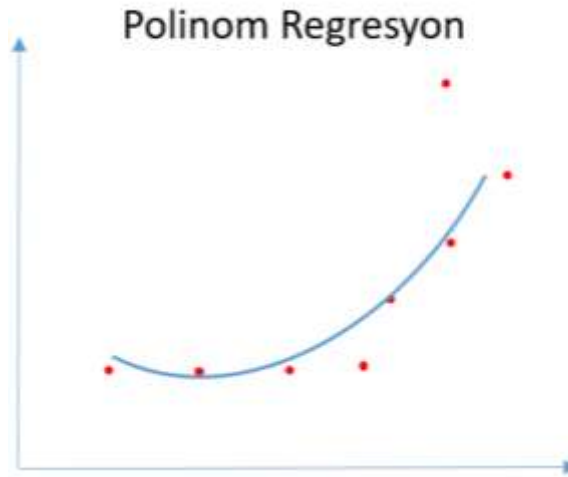
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \dots + \beta_p X^n \quad (3.11)$$

Burada:

- y , bağımsız değişkeni temsil eder.
- x , bağımsız değişkeni temsil eder.
- n , polinom derecesini belirtir. n , 1'den büyük bir tam sayıdır.
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$. Bu katsayılar, polinomun katsayılarıdır ve veriye uygun bir şekilde tahmin edilir.
-

Polinom regresyon analizi yapmak için genellikle en küçük kareler yöntemi kullanılır. Bu yaklaşım, gerçek veri noktaları ile polinom tarafından tahmin edilen değerler arasındaki tutarsızlığı azaltmayı amaçlar. Bu hata azaltmayı sağlamak için regresyon katsayılarının hesaplanması gerekir. Polinomal regresyon analizi aşağıdaki adımların gerçekleştirilmesi:

- **Veriler Toplam:** İlgilenilen bağımlı ve bağımsız değişkenlere ilişkin bilgiler analizin temelini oluşturur.
- **Polinom Derecesi Seçimi:** Kullanılacak polinom derecesinin belirlenmesi genellikle deneme yanılma yoluyla veya tutarlı değerlendirme yoluyla yapılır.
- **Regresyon Katsayılarının Hesaplanması:** Regresyon katsayıları en küçük kareler yaklaşımı veya alternatif bir tahmin tekniği ile belirlenir.
- **Model Değerlendirmesi:** Elde edilen polinom modelinin etkinliğinin artırılması, tutarlılık testlerinin, R-kare değerlerinin veya çeşitli diğer model değerlendirme yöntemlerinin uygulanmasıyla sağlanabilir.
- **Tahmin ve Yorumlama:** Model kurulduktan sonra, bağımsız değişkenlerin değerlerine dayanarak iç değişkenin tahmin edilen değerlerinin hesaplanması mümkün hale gelir. Ayrıca, regresyon katsayıları, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin yorumlanmasına olanak tanır.



Şekil 39. Polinom regresyon grafik gösterimi (Veri Bilim Okulu, 2025)

Polinom regresyonu, karmaşık veri kümeleri içindeki doğrusal olmayan ilişkileri temsil etmek için etkili bir yöntemdir. Ancak, yüksek dereceli polinomların uygulanması aşırı uyumla sonuçlanabileceğinden, bu yaklaşımı kullanırken dikkatli olmak önemlidir (Nursen, 2023).

3.7. Makine Öğrenmesi Tabanlı Modelleme Teknikleri

3.7.1. Ridge Regresyon ve Regülerizasyon teknikleri

Ridge regresyon, klasik lineer regresyona L2 normu bazlı bir ceza terimi ekleyerek parametrelerin büyüklüğünü sınırlayan bir modeldir. Bu yöntem özellikle çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) içeren veri setlerinde model kararlılığını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevresel veri analizlerinde, parametrelerin yüksek korelasyon gösterdiği durumlarda Ridge regresyon, modelin genelleme kabiliyetini artırmaktadır. Literatürde, Ridge regresyonun özellikle regresyon katsayılarının yorumlanmasından çok, tahmin doğruluğuna odaklanan uygulamalarda tercih edildiği vurgulanmaktadır (Zhang, Jiang, & Wang, 2022).

Ridge regresyon yöntemi ilk olarak Hoerl ve Kennard tarafından 1970 yılında *Technometrics* dergisinde yayınlanan iki makalede önerilmiştir. Dergideki ilk makaleleri olan "Ridge Regresyonu: Ortogonal Olmama Problemi için Yanlı Tahmin"de Hoerl ve Kennard, çok değişkenli bir regresyona tam rütbeli genel doğrusal bir model (12) uydururken yansız tahmin sorununu ayrıntılı olarak ele almışlardır. Ridge regresyon probleminin çözümü, basit en küçük kareler yöntemine benzer. Ridge regresyonunda, regresyon katsayı tahminleri hesaplanmadan önce, standart formdaki değişkenlerden oluşan matrisin ($X'X$) köşegen elemanlarına küçük bir pozitif sabit eklenerek uygulanır (Büyükörsal, 2010).

Model, tahmin hatasını minimize etmenin yanı sıra, regresyon katsayılarının büyüklüğünü sınırlamak için L2 normuna dayalı bir ceza terimi ekleyerek öğrenme sürecini düzenler.

Ridge Regresyon'un maliyet fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \alpha \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \right\} \quad (3.12)$$

Burada:

- y_i : Gerçek PI değeri,
- \hat{y}_i : Model tarafından tahmin edilen değer,
- β_j : Regresyon katsayıları,
- α : Ceza parametresi (düzenleme katsayısı),
- p : Bağımsız değişken sayısı.

Regülerizasyon, optimize edilecek fonksiyona bir düzenleme teriminin dahil edilmesini içerir.

$$E_{toplama} = E + \lambda E_{reg} \quad (3.13)$$

Burada E değer fonksiyonu, E_{reg} regülerizasyon terimi, λ ise regülerizasyon miktarını kontrol eden parametredir. “E_{toplama}” minimize edilmesi gereken toplam performans fonksiyonudur. Regülerizasyon teriminin amacı, ağ tarafından üretilen fonksiyonu yumuşatmaktır. Pürüzsüz fonksiyonlar üreten ağlar için bu terim en az, pürüzsüz olmayan fonksiyonlar üreten ağlar için ise önemli olmalıdır (Şener, 2003).

3.7.2. Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve Kernel yöntemleri

Destek Vektör Regresyon (Support Vector Regression - SVR), doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmek için kernel (çekirdek) yöntemlerinden faydalanan, güçlü bir regresyon algoritmasıdır. Çevresel veriler gibi zamanla değişen, çok değişkenli ve gürültülü veri setlerinde SVR, yüksek tahmin doğruluğu ve düşük genelleme hatası ile öne çıkmaktadır.

SVR regresyon algoritması, çekirdek tabanlı sınıflandırma ve regresyon problemleri için bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Verimli tahmin yetenekleri sağlamak için çekirdek yöntemlerinden yararlanır. SVR, veri noktalarını sınıflandırmak ve tahmin etmek için çizgiler ve eğriler bulmak amacıyla düzlemler veya hiper yüzeyler kullanır. SVR ayrıca doğrusal olmayan verileri de işleyebilir. Bu, çekirdek işlemleri adı verilen bir teknikle sağlanır. Çekirdek işlemleri, verileri daha yüksek boyutlu bir özellik alanına dönüştürerek ayrılabilir hale getirir (Alkesaiberi, Harrou, & Sun, 2022).

SVR, klasik destek vektör makinelerinin (SVM) regresyon problemlerine uyarlanmış versiyonudur ve temel olarak, verileri daha yüksek boyutlu bir özellik uzayına dönüştürerek bu

uzayda doğrusal bir regresyon yüzeyi oluşturmayı hedefler. Model, belirli bir hata toleransı (ϵ) içinde kalan tahminleri ceza uygulamadan kabul ederken, toleransı aşan hataları cezalandırmak için CCC parametresiyle kontrol edilen bir optimizasyon mekanizması kullanır. SVR'nin regresyon fonksiyonu genel olarak şu şekilde tanımlanabilir (İnce & İmamoğlu, 2016):

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (3.14)$$

Burada:

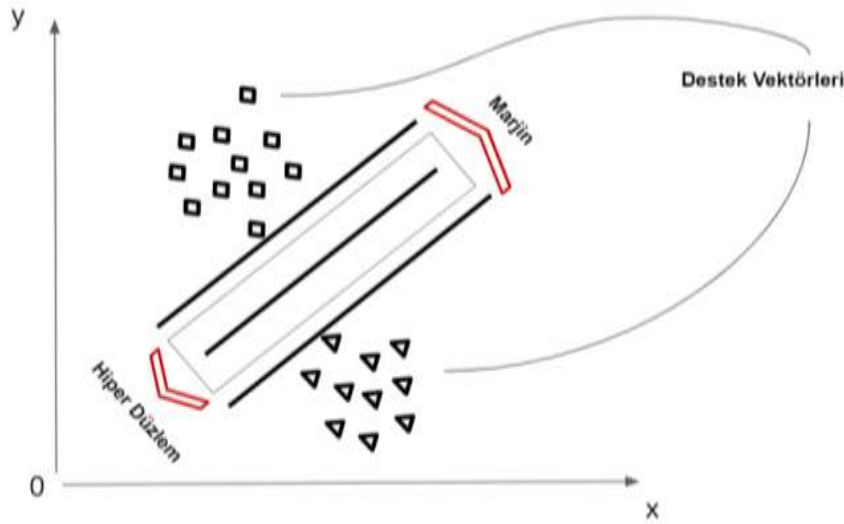
- α_i, α_i^* : Lagrange çarpanları,
- $K(x_i, x)$: Kernel fonksiyonu,
- b : Sabit terim,
- x_i : Eğitim örnekleri.

Literatürde, SVR'nin farklı kernel fonksiyonları kullanarak veri uzayını daha yüksek boyutlara taşıdığı ve bu sayede doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabildiği belirtilmektedir (Wu & Gao, 2021). Ayrıca SVR, küçük veri setleri üzerinde bile yüksek performans sergileyebilen nadir makine öğrenmesi yöntemlerinden biridir. Destek vektör regresyonu çerçevesinde çeşitli kavramlar ele alınmaktadır. Bu kavramlar (GeeksforGeeks, 2025);

- **Destek vektör makinaları (SVM'ler):** SVR, hem sınıflandırma hem de regresyon görevlerine uygulanabilen gözetimli öğrenme algoritmaları olan bir destek vektör makinaları (SVM) kategorisini temsil eder. Bu SVM'ler, yüksek boyutlu bir uzayda çeşitli sınıflar veya çıktı değerleri arasında en etkili ayrımı yapan hiperdüzlemi belirlemeye çalışır.
- **Çekirdekler:** SVR, girdi vektörleri arasındaki benzerlik derecesini belirleyen fonksiyonlar olan çeşitli çekirdek türlerini kullanma yeteneğine sahiptir. Doğrusal bir çekirdek, iki girdi vektörü arasındaki basit bir nokta çarpımını temsil ederken, doğrusal olmayan bir çekirdek, verilerdeki daha karmaşık örüntüleri belirleyebilen daha karmaşık bir fonksiyondur. Uygun bir çekirdeğin seçimi, verilerin belirli özelliklerine ve söz konusu görevin içerdiği karmaşıklığa bağlıdır.
- **Hiper parametreler:** SVR, modelin performansını etkilemek için değiştirilebilen birden fazla hiper parametreyi kapsar. Bu parametrelerden biri, duyarlı kayıp ile duyarlı kayıp

arasındaki dengeyi yöneten 'C'dir. 'C' değerinin artması, modelin duyarsız kaybı daha az ölçüde en aza indirmeye öncelik vereceğini, 'C' değerinin düşmesi ise modelin daha büyük hatalara izin verme konusunda daha fazla esneklik göstereceğini gösterir.

- **Model değerlendirme:** Herhangi bir makina öğrenimi modelinde olduğu gibi, bir SVR modelinin performansının değerlendirilmesi hayati önem taşır. Tipik bir yaklaşım, verileri bir eğitim seti ve bir test seti olarak ikiye bölmeyi, eğitim setini model değerlendirme için kullanmayı, test setini ise daha sonraki değerlendirmeler için ayırmayı içerir. Daha sonra, tahmin edilen çıktı değerleri ile gerçek sonuçlar arasındaki tutarsızlığı ölçmek için ortalama karesel hata veya ortalama mutlak hata gibi ölçütler kullanılabilir (GeeksforGeeks, 2025).



Şekil 40. Destek vektör regresyon temsili gösterimi (Öztürk, 2025)

3.7.3. Rastgele Orman (Random Forest) ve Ensemble yöntemler

Rastgele orman algoritması İngilizce olarak "Random Forest" karar algoritması olarak bilinmektedir. Temelde karar ağaçlarından türetilen bir topluluk modeli olarak işlev görür. Random Forest en önemli avantajlarından biri, diğer makine öğrenimi algoritmalarının temelini oluşturan hem sınıflandırma hem de regresyon problemleri için çözümler sunabilme yeteneğidir. Bir rastgele ormanı oluşturan her karar ağacı paralel olarak oluşturulur ve hem sınıflandırma hem de regresyon ağaçlarından oluşabilir. Her karar ağacı düğümü, tüm özellikler arasında en uygun çözümü veren en iyi özellik kullanılarak bölümlendirilir. Random Forest algoritması, gizli bilgileri ayırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir ve büyük veri kümeleriyle çok faydalıdır. Random Forest, önce önyükleme kullanılarak bir eğitim

kümesi oluşturulur. Ardından, her eğitim kümesi için bir karar ağacı oluşturulur (Kumral, Topal, Ersoy, Çolak, & Yiğit, 2022).

Regresyon ve sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan bu algoritma, her bir karar ağacını eğitim verisinin rastgele seçilmiş bir alt kümesiyle eğitir ve model çıktısını tüm ağaçların çıktılarının ortalaması (regresyon için) veya çoğunluk oyu (sınıflandırma için) yoluyla üretir. Random Forest modelinin temel yapısı, Bagging (Bootstrap Aggregating) yaklaşımına dayanır. Her bir karar ağacı, hem örneklem seçiminde (bootstrap örnekleme) hem de özellik seçiminde (özellik alt kümesi) rastgelelik içerir. Bu sayede modelin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimi azaltılırken, genel tahmin doğruluğu artırılır. Model çıktısı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\hat{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h_t(x) \quad (3.15)$$

Burada:

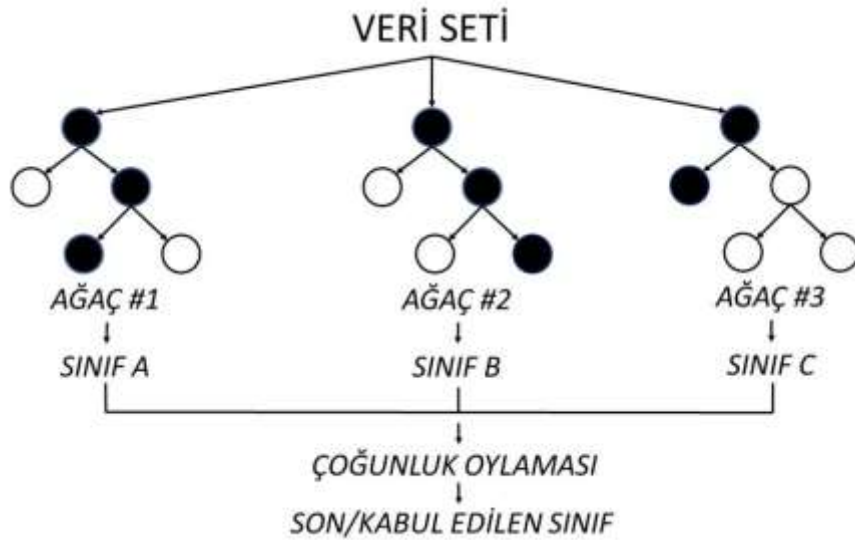
- T : Toplam ağaç sayısı
- $h_t(x)$: t . ağaç tarafından üretilen tahmin değeri
- \hat{y} : Nihai tahmin sonucu

Ensemble topluluk yönteminde kesin bir sonuç üretmek için birkaç modeli birleştirerek, tek tek modellerin performansını aşmayı hedefler. Her rastgele orman kendi tahminini sunar. Sınıflandırma görevlerinde, her ağaç bir sınıf atar ve oyların çoğunu alan sınıf modelin nihai tahminini belirler. Regresyon görevlerinde nihai sonuç, çeşitli ağaçların sağladığı tahminlerin ortalaması alınarak hesaplanır (Özdeniz, 2024);

- **Torbalama (Bagging - Bootstrap Aggregating)**: Bagging, eğitim verilerinin rastgele alt kümelerini kullanarak ve ardından bu modellerin sonuçlarını birleştirerek birkaç modeli eğitme tekniğini ifade eder. Bu yaklaşım, her modelin farklı veri alt kümeleri üzerinde eğitilmesini sağlayarak modelin genelleme kapasitesini artırır. Bu yöntemin önemli bir örneği, karar ağaçlarını bagging kullanarak entegre eden Rastgele Orman algoritmasıdır. Bu tekniği kullanarak model daha fazla kararlılık elde eder ve varyansta azalma yaşar (Özdeniz, 2024).
- **Güçlendirme (Boosting)**: Tek bir modelden yüksek kaliteli tahminlere öncelik veren çok sayıda makina öğrenimi modelinin aksine, güçlendirme algoritmaları, her modelin önceki

modellerin eksikliklerini ele aldığı bir dizi zayıf modeli eğiterek tahmin yeteneğini geliştirmeyi amaçlar. Güçlendirmenin temel bir yönü, onu ayrı bir model yerine genel bir algoritma olarak kabul etmektir. Güçlendirmeden türetilen algoritmaların önemli örnekleri arasında AdaBoost ve Gradient Boosting bulunur. Güçlendirme genellikle olağanüstü bir doğruluk sağlar ve özellikle karmaşık veri kümelerine uygulandığında etkili olduğunu kanıtlar.

- **Yığınlama (Stacking):** Bu süreç, meta model olarak adlandırılan yeni bir model eğitmek için birden fazla modelden elde edilen çıktıların entegre edilmesini içerir. Yığınlamanın amacı, çeşitli modellerin güçlü yönlerinden yararlanarak performansı artırmaktır. Bu teknik genellikle karar ağaçları, lojistik regresyon ve destek vektör makinaları (SVM) dahil olmak üzere çeşitli model türlerinin birleştirilmesini gerektirir. Yığınlama, kullanılan model çeşitliliği sayesinde önemli bir esneklik sunar ve genellikle daha iyi doğruluk sağlar (Özdeniz, 2024).



Şekil 41. Rastgele Orman (Random Forest) Algoritması temsili gösterimi (Öztürk, 2025)

Karar ağaçları sıklıkla aşırı uyum eğilimi gösterir. Bununla birlikte, birkaç karar ağacının entegre edilmesi ve her ağacın belirli bir veri alt kümesi üzerinde eğitilmesiyle bu sorun hafifletilebilir; böylece modelin genelleme kapasitesi artırılabilir.

3.7.4. Veri ön işleme ve gürültü azaltma teknikleri

Veri kalitesi, veri madenciliği alanında önemli bir endişe kaynağıdır. Veri madenciliğinde güvenilirliğin sağlanması, veri ön işlemenin uygulanmasını gerektirir. Bunun yapılmaması, hatalı girdi verilerinden kaynaklanan hatalı çıktıların üretilmesine neden olabilir. Bu ön işleme aşaması genellikle emek yoğun olup, genellikle yarı otomatik bir şekilde gerçekleştirilir. Artan veri hacmi ve bunun sonucunda önemli veri kümelerinin ön işleme gereksinimi göz önüne alındığında, etkili otomatik veri ön işleme tekniklerinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Birçok uygulamada, birden fazla veri ön işleme yönteminin kullanılması zorunludur. Sonuç olarak, uygun veri ön işleme türünün belirlenmesi hayati bir önem taşımaktadır (Famili, Shen, Weber, & Simoudis, 1997).

Çeşitli veri ön işleme yöntemleri mevcuttur. Bunlar arasında, veri kümelerindeki gürültüyü gidermek ve tutarsızlıkları düzeltmek için kullanılan veri temizleme de yer alır. Bir diğer yöntem olan veri entegrasyonu, çeşitli kaynaklardan gelen bilgileri tutarlı bir veri tabanında birleştirir. Normalizasyon gibi teknikler veri dönüşümleri kapsamındadır. Buna karşılık, veri indirgeme, gereksiz değişkenleri ortadan kaldırarak ve birleştirerek veya kümeleme yoluyla veri kümesinin boyutunu en aza indirmeyi amaçlar. Bu ön işleme tekniklerinin veri madenciliğinden önce uygulanması hem elde edilen sonuçların kalitesini hem de veri madenciliğine ayrılan zamanın verimliliğini artırabilir (Han & Kamber, 2001).

Gerçek veri tabanlarında ve veri ambarlarında bulunan ortak özellikler arasında eksik, tutarsız ve gürültülü veriler bulunur. Literatürde bu tür veriler kirli veri olarak tanımlanmaktadır. Kirli verilerin kapsamlı bir sınıflandırması oluşturulmuştur (Kim, Choi, Hong, Kim, & Lee, 2003).

Veri girişi sırasında bazı bilgiler önemsiz kabul edilmiş ve bu nedenle kaydedilmemiş olabilir. Yanlış anlamalar da ilgili verilerin atlanmasına neden olabilir. Bu faktörler eksik bir veri tabanının oluşmasına katkıda bulunur. Zaman içinde kayıt ve düzenleme uygulamalarında meydana gelen değişiklikler bu sorunu daha da kötüleştirebilir. Veri gürültüsünün kaynakları da aynı derecede çeşitlidir. Veri toplama araçlarının yanlış kullanımı olası bir nedenken, veri girişi sırasındaki insan veya bilgisayar hataları bir diğer nedendir. Hatalı veya gürültülü verilerin kaynağı ne olursa olsun, bu hataları doğru bir şekilde belirlemek ve uygun çözümler geliştirmek çok önemlidir (Han & Kamber, 2001).

4. YÖNTEM

4.1. Deney Planı ve Deney Düzeneği

Deney setleri 2 adet olarak tasarlanmış olup iki farklı sargı için özelleştirilmiştir. Ayrıca deney setleri içerisinde kullanılan sargılara göre deney seti içerisinde kullanılan sensör, kontrol panosu ve nem/kirlilik sağlayıcı sistemlerde ayrıştırılmıştır. Deney seti otomatik kumanda sistemi ve kayıt cihazı ile beraber tasarlanmış olup, istenilen sıcaklık ve nem değerlerinde iç ortam iklimlendirme şartlarını sabit tutması için özel olarak tasarlanmıştır.

İki farklı deney setinde iki farklı sargının aynı anda test edilmesi planlanmıştır. Kirlendirme için manuel bir sistem ile hassas tartı ile tartılan bir yağ ve kömür tozu karışımının sargı yüzeyine uygulanması planlanmıştır. Bu kapsamda yukarıda anılan özelliklerde tasarlanan Deney setinde kullanılan malzemelerin listesi Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 9. Deney seti malzeme listesi

No	MALZEME LİSTESİ
1	MDF 16 mm Deney sehpası
2	4 mm Akriik /Pleksi Şeffaf Tabaka
3	1,2 mm Sac zemin tabakası
4	Topraklama Barası ve bağlantı parçaları
5	Nem ve Sıcaklık sensörü standları
6	Nemlendirme boru hattı ve Çıkış nozülleri
7	Ultrasonik Hava Nemlendirici
8	Şerit Rezistans (350W)
9	Radyal Fan ve Motoru 30 cm
10	Nem ve Sıcaklık Kontrol Cihazı (röle çıkışlı)
11	Nem ve Sıcaklık Sensörleri
12	Nem ve Sıcaklık Ölçüm ve Kayıt Cihazı
13	Kontrol ve Kumanda Panosu
14	Lazer Termometre
15	DC Yalıtım Direnci ölçüm cihazı
16	Toprak Klemensi ve YG Topraklama Ucu
17	Hassas Tartı

Ölçüm için kullanılan iki farklı generatöre ait sargılar “Bara-1” ve “Bara-2” olarak kodlanmıştır. İlgili baraların ait olduğu ünitelere ait etiket bilgileri aşağıdaki Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 10. Numune sargılara ait generatör etiket bilgileri

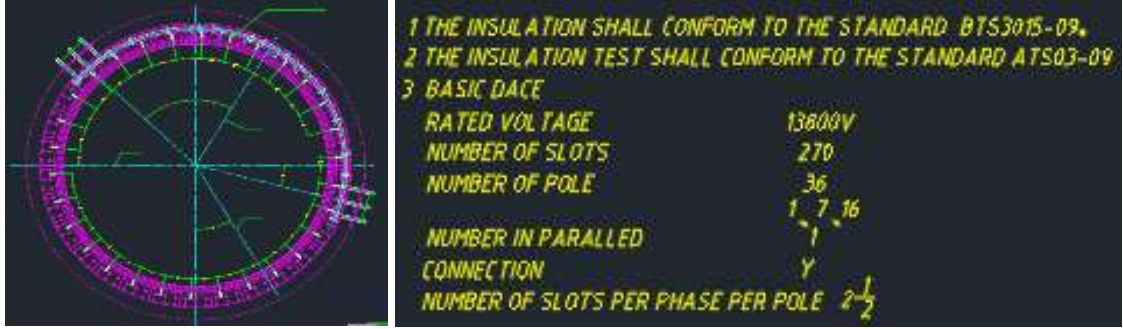
Özellikleri	BARA-1	BARA-2
Anma Gerilimi	13,8 kV	6,3 kV
Anma Gücü	47,193 MW	6,641 MW
İzolasyon Sınıfı	F	F
Anma Akımı	2145 A	652,6 A
Menşei	Çin	Çin
Üretim Yılı	2013	2012
Güç Faktörü	0,9 (Geri)	0,9 (Geri)
Uyartım Gerilimi	240 V DC	110 V DC
Uyartım Akımı	910 A	460 A

Deneysel çalışmalarda kullanılan Bara-1 ve Bara-2 bobin numunelerine dair gerçek işletme koşullarında ve parçası olduğu senkron generatörün bütününe dikkate alındığında üzerine düşen gerilimi hesap edilmiştir. Şekil.42 ‘de ilgili bobinlerin işletme şartlarında üzerlerine düşen gerilimlerin hesaplamalarına dair detaylar verilmiştir.

Bobin Gerilim Hesaplaması	BARA-1		BARA-2	
Faz-Faz Gerilimi	13800	V	6300	V
Faz-Toprak Gerilimi	7967	V	3637	V
Oluk Sayısı	270	Adet	192	Adet
Kutup Sayısı	36	Adet	16	Adet
Bağlantı Tipi	Y	-	Y	-
Her bir kutuba karşılık gelen faz başı oluk sayısı	2,5	Adet/Kutup	4	Adet/Kutup
Faz Başına Bobin Sayısı	45	Bobin/Faz	32	Bobin/Faz
Her oluktaki Faz sayısı	2	adet	2	adet
Bobin Başına düşen gerilim	177,04	V	113,67	V

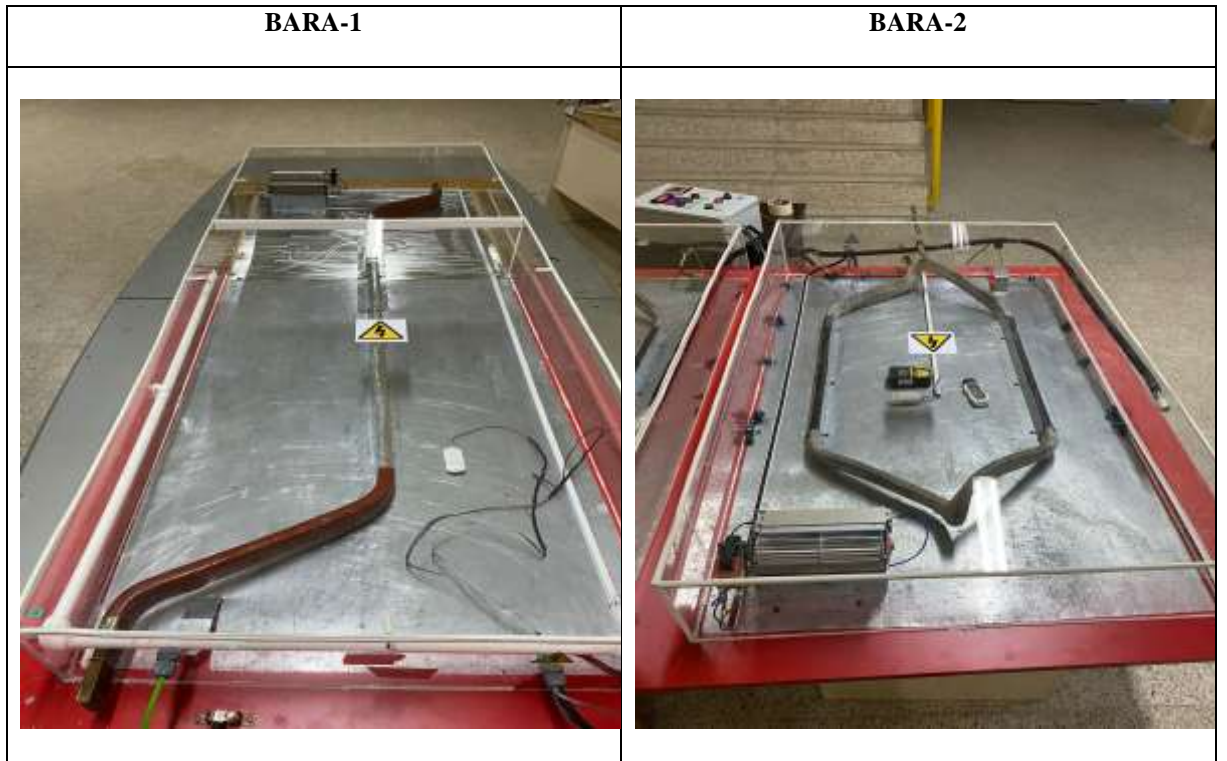
Şekil 42. Bobin gerilimi hesaplama detayları

Şekil.42. den anlaşılacağı üzere Bara-1 bobini nominal işletme koşullarında 177,4 V, Bara-2 bobini ise nominal işletme koşullarında 113,67 V luk bir gerilime maruz kalmaktadır. Ayrıca Bara-1 bobin grubunun sargı bağlantılarını gösteren proje görüntüsü ve detay bilgileri şekil.43 de verilmiştir.



Şekil 43. Bara-1 Stator sargısı proje gösterimi

İlgili stator sargılarına ait deney seti ve sargıları gösteren fotoğraflar aşağıdaki gibidir;



Şekil 44. Deney seti ve sargıları

Deney seti içerisinde numune stator bobinlerinin (sargılarının) yerleştirildiği kısımlarda, gerçek çalışma ortamında yer aldığı stator sargı oluklarını temsil edecek şekilde kanal yapıları oluşturulmuştur. Bu kanal yapıları stator gövdesini temsil eden şase ve toprak bağlantısı ile

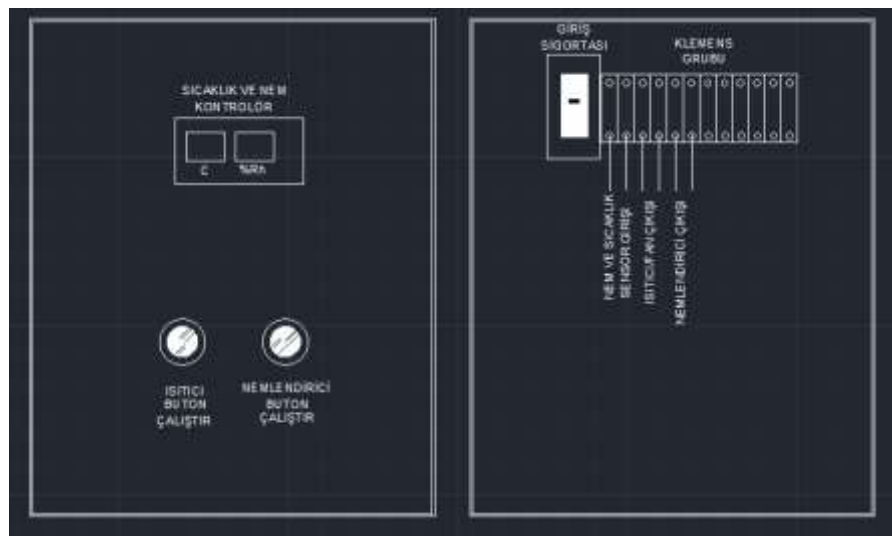
kesintisiz şekilde temas halinde montajlanmıştır. Ayrıca topraklanmış bir stator gövdesini temsil edecek şekilde montajı yapılmış iletken levha farklı noktalardan topraklama barasına temaslandırılmıştır. Özetle stator gövdesini temsil eden toprakla temaslandırılmış bir şase veya gövde yapısı ile stator içerisinde yer aldığı bir oluk şeklinde tasarlanmış kanalın içerisinde yer alan stator bobini deney düzeneğinin ana bileşenlerini oluşturmaktadır.

Nem üretici olarak kullanılan ultrasonik nemlendirme cihazının çıkışları deney düzeneği içerisinde devam eden bir boru ve nem çıkış nozulları bulunmaktadır. Nemli havanın eşit dağıtılması için boru hattı ve nozul lokasyonları özenle seçilmiştir.

Deney düzeneği içerisindeki ortam sıcaklığının istenen değerde sabit kalması için bir şerit rezistans ve buna bağlı bir radyal fan ünitesi montajı yapılmıştır. Sıcak havanın deney düzeneği içerisindeki homojen dağılımının sağlanması için termostat rölesinin rezistansı çalıştırması ile birlikte fan sistemi de devreye girmektedir.

Deney düzeneğinin dış çerçevesini oluşturan şeffaf pleksiglas levhaların birleşim yerlerine ortam yalıtımı için şerit şeklinde yalıtım fitilleri kullanılmıştır.

Deney seti otomatik kumanda sistemi ve kayıt cihazı ile beraber tasarlanmış olup, istenilen sıcaklık ve nem değerlerinde iç ortam iklimlendirme şartlarını sabit tutması için özel olarak tasarlanmıştır.



Şekil 45. Sıcaklık ve Nem Kontrol Panosu Projelendirme çalışması

İki farklı deney setinde iki farklı generatör sargısının test edilmesi planlanmıştır. Kirlendirme için manuel bir sistem ile hassas tartı ile tartılan bir yağ ve kömür tozu karışımının sargı yüzeyine uygulanması planlanmıştır. Deney aşamasında kullanılan ölçü aletlerinin güncel kalibrasyon sertifikaları alınmıştır.



Şekil 46. Deney setleri ve ölçüm aletlerine dair genel bir fotoğraf

Deneyel olarak yapılan yaşlandırma testlerinde toplamda 373 adet deney gerçekleştirilmiş olup deneyler içinde alınan toplam ölçüm sayısı 4849 adet olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan veri seti, senkron bir generatörün bara 1 ve bara 2 olmak üzere iki farklı sargı tipi üzerinde gerçekleştirilen deneyel ölçümler sonucunda elde edilmiştir. Ölçümler, kontrollü bir laboratuvar ortamında farklı bağıl nem oranları ve yüzey kirlilik koşulları altında gerçekleştirilmiş; böylece yalıtım direnci performansına etki eden çevresel değişkenlerin etkisi detaylı biçimde analiz edilebilmiştir.

Deneyel protokol kapsamında, her bir sargı tipi için iki farklı bağıl nem seviyesi (%65 ve %85) ve iki farklı yüzey durumu (temiz ve kirlili) dikkate alınmıştır. Bu dört koşul kombinasyonu altında, 10 farklı süre aralığında (60–600 saniye arasında) ölçümler alınmış ve her kombinasyon için yeterli sayıda tekrar gerçekleştirilerek toplamda 366 adet PI (Polarizasyon İndeksi) değeri elde edilmiştir. Deneyel ölçümler aşamasında her ölçüm seansı öncesinde sistemin termal ve nem değerinin dengeye ulaşması için bir bekleme süresi uygulanmıştır.

Ölçümler endüstriyel standartlara uygun kalibrasyonu yapılmış dijital IR test cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiş; PI hesaplaması, 60. ve 600. saniyede ölçülen izolasyon

dirençlerinin oranı esas alınarak yazılım destekli biçimde yapılmıştır. Cihazlar, her deney gününün başında üretici protokolüne uygun olarak sıfırlanmış ve iç direnç dengelemesi yapılmıştır. Her ölçüm, üç tekrar alınarak ortalama değer hesaplanacak biçimde gerçekleştirilmiş; olası sensör sapmaları ve ani sıçramalar veri ön işleme aşamasında ayıklanmıştır.



Şekil 47. Deneysel ölçü aletlerinin fotoğrafları

Ölçüm süreci boyunca tüm çevresel koşullar sabit tutulmuş, yalnızca incelenen değişkenler (nem ve kirlilik) kontrollü biçimde değiştirilmiştir. Bu sayede, dışsal etkilerden arındırılmış ve değişkenlerin PI üzerindeki etkisi doğrudan izlenebilir hale getirilmiştir. Elde edilen ölçüm verileri, daha sonraki modelleme aşamalarında kullanılmak üzere sistematik olarak etiketlenmiş ve sayısal olarak kodlanmıştır. Ölçüm koşulları, her bir veri kaydında açıkça tanımlanmış olup; veri kümesinin yapay örnekleme dayanmaması, bu çalışmanın deneysel geçerliliğini artıran temel etmenlerden biri olmuştur. Deneysel ölçümler için yapılan deney planı ve ölçüm setlerine dair detay tablo aşağıdaki gibidir;

Tablo 11. Deney planı

Deney Kodu	Bara Nominal Gerilimi	Sıcaklık	Nem	Ölçüm Aralığı
Temiz Sargıları Nemlendirme				
B1N-01	13,8 kV	25 C°	65%	48 Saat
B1N-02	13,8 kV	25 C°	85%	48 Saat
B2N-01	6,3 kV	25 C°	65%	48 Saat
B2N-02	6,3 kV	25 C°	85%	48 Saat
Kirli Sargıları Nemlendirme				
B1NK-01	13,8 kV	25 C°	65%	48 Saat
B1NK-02	13,8 kV	25 C°	85%	48 Saat
B2NK-01	6,3 kV	25 C°	65%	48 Saat
B2NK-02	6,3 kV	25 C°	85%	48 Saat

4.2.Sargı Kirlendirme

Sargıların işletme şartlarında maruz kalabileceği kirli yağ kontaminasyonu Türbin yağı ve kömür tozu (firçalı uyarım sisteminde kullanılan kömürlerden elde edilmiş olan) karışımı ile elde edilmiştir. Elde edilen türbin yağı ve kömür tozu bileşiminin kirlilik tayini ilgili standartlara göre tayin edilmiştir.

Bilindiği üzere kirlilik partikülleri genel olarak ISO ve NAS standartları gibi standartlar kapsamında ifade edilir. Yağlardaki partikül kirliliğini tanımlamak için endüstride birçok standart kullanılmaktadır; ancak, bu standartların en çok kullanılan iki tanesinden biri Amerikan standardı olan NAS ve diğeri ise uluslararası bir standart olan ISO4406'dır. NAS standardı yağlardaki partikül kirlilik seviyesini 1 ila 12 arasında değişecek şekilde kategorize ederken, ISO4406 standardı 1 ila 30 arasında değişen rakamlarla değerlendirmektedir. Bu nedenle, ISO standardının çok daha hassas olduğu söylenebilir (Çağlayan, 2001).

Tablo 12. ISO 4406 yağ kirlilik ölçeği (International Organization for Standardization, 2021).

Ölçek No	1 ml'deki Partikül Sayısı		Ölçek No	1 ml'deki Partikül Sayısı	
	Hariç	Dahil		Hariç	Dahil
>28		>2500000	14	80	160
28	1300000	2500000	13	40	80
27	640000	1300000	12	20	40
26	320000	640000	11	10	20
25	160000	320000	10	5	10
24	80000	160000	9	2,5	5
23	40000	80000	8	1,3	2,5
22	20000	40000	7	0,64	1,3
21	10000	20000	6	0,32	0,64
20	5000	10000	5	0,16	0,32
19	2500	5000	4	0,08	0,16
18	1300	2500	3	0,04	0,08
17	640	1300	2	0,02	0,04
16	320	640	1	0,01	0,02
15	160	320	0	0,00	0,01

ISO 4406 standartına göre yapılan analiz üç boyut grubundaki parçacık sayılarını temsil eder. Bu gösterimler sırasıyla; 1 mL başına 4 mikrondan büyük partikül sayısı, 1 mL başına 6 mikrondan büyük partikül sayısı ve 1 mL başına 14 mikrondan büyük partikül sayısını ifade edecek şekilde tasarlanmıştır. Tablo 11’de ISO standardına göre ölçek numaralarına karşılık gelen partikül sayıları gösterilmiştir (International Organization for Standardization, 2021).

Örneğin; ISO 22/18/13 kodu, belirli bir hidrolik yağ numunesinin 1 ml'sinde 20.000'den fazla ve 40.000'e kadar ve dahil olmak üzere 4 $\mu\text{m(c)}$ 'ye eşit veya daha büyük parçacık, 1.300'den fazla ve 2.500'e kadar ve dahil olmak üzere 6 $\mu\text{m(c)}$ 'ye eşit veya daha büyük parçacık ve 40'tan fazla ve 80'e kadar ve dahil olmak üzere 14 $\mu\text{m(c)}$ 'ye eşit veya daha büyük parçacık bulunduğunu belirtir (International Organization for Standardization, 2021).

Bu kapsamda kömür tozu ile kirlendirilmiş türbin yağı karışımının kullanılan malzemeler aşağıdaki gibidir;

Tablo 13. Kirlendirme deneyi için kullanılan malzemeler

1 Hidrolik Yağ (PO
Yatak Yağı No:46)



2 Fırça kömürü (grafit)



İlk olarak temiz bir türbin yağı ve uyarım sisteminde kullanılan fırça kömürleri tedarik edilmiştir. Fırça kömürlerinin yağ içerisinde homojen karışmasını sağlamak adına çeşitli araçlar (rondo doğrayıcı, filtre/süzgeç vb) kullanılarak toz haline getirilmiştir.



Şekil 48. Türbin yağı ve kömür tozu karışımının hazırlanma süreci

Hazırlanan karışım uzun süre karıştırılarak kirli yağ karışımının oluşması sağlanmıştır. Yağ içerisinde çok yüksek hacimli katı partikül kalmaması adına ince bir süzgeç vesilesiyle yağ içerisinde olabilecek topaklanma vb. bertaraf edilmiştir.



Şekil 49. Kirlendirilmiş olan türbin yağı

Kirlendirilmiş türbin yağının akredite olan yağ analiz laboratuvarlarında analiz edilerek kirlilik tayininin yapılması planlanmıştır. Bu doğrultuda ilgili karışım Petrol Ofisi Teknik Hizmetler Müdürlüğü Yağ Analiz Labaratuvarı'na gönderilmiştir. İlgili numunenin gönderimine dair referans numaraları ve numune kayıt bilgileri ekranı Şekil 50'ta gösterilmiştir.


Petrol Ofisi

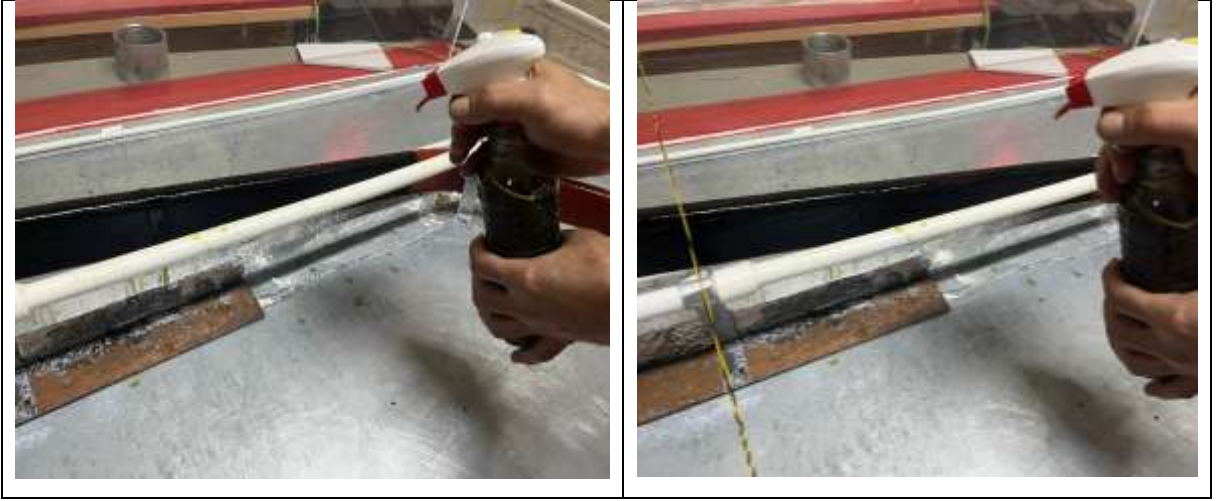

EKİPMAN 02434484/BHY	
Numune Numarası : PO762277	
Kullanımdaki Yağ : PO TÜRBİN YAGI 46	
Numune Referansı :	
Ekipman Referansı : ORTAK HPU SİSTEM YAGI	
Ekipman Adı : UNITE UST VE KLAVUZ VE TASIYICI YATAKLAR	
Ekipman marka - model : -	
Parça Adı : ORTAK HPU SİSTEM YAGI	ERZİNCAN TÜRKİYE
Seri numarası :	
SGS İLETİŞİM	
İsim:POAS	İnternet giriş:
Telefon:	Teknik Web Sitesi : https://pola-turkey.sgs.com/
Yorum Turuncu 06/01/2025	
Partikül sayım sonuçları çok yüksektir. Yağın filtre edilmesini ve mevcut filtre sisteminin verimliliğinin kontrol edilmesini tavsiye ediyoruz. Diğer tüm değerler kabul edilebilir limitler içindedir.	

Şekil 50. Numune referans no ve yorumlarını içeren ekran alıntısı
Yapılan analizler sonucu ilgili yağın kirlilik tayini yapılmış olup; partikül sayımı ISO4406 parametresi sonucu 25/24/23 olarak çıkmıştır. Söz konusu sonuçlara dair detaylar Şekil 51’de de gösterilmiştir. Petrol Ofisi Teknik Hizmetler Müdürlüğünde yaptırılan yağ analiz sonuçlarına dair tam analiz sonuçları Ek-1’de ibraz edilmiştir.

\$Partikül, SAE AS4059*/ISO 4406	
SAE AS4059 > 4µm(c)	12
SAE AS4059 >6µm(c)	12
SAE AS4059 >14µm(c)	12
SAE AS4059 >21µm(c)	12
SAE AS4059 >38µm (c)	12
SAE AS4059 >70µm(c)	12
SAE AS4059	12
Partikül sayımı ISO4406	25/24/23

Şekil 51. Yağ numunesi analizi partikül sayımı sonuçları

Kirlendirme işlemi tamamlanan ve akredite bir analiz laboratuvarı sonucu ile belgelenen kirli yağ karışımı bir spreyci vasıtasıyla sargı yüzeylerine uygulanmıştır. Sargı yüzeylerine homojen dağılması için el yordamıyla hazırlanan karışım sargı yüzeylerine dağıtılmıştır.



Şekil 52. Kirlili yağın sargı yüzeylerine spreyle uygulanması

Yüzeyleri kirlendirilmiş sargılar aynı şekilde yalıtım direnci (izolasyon direnci) testlerine tabi tutulmak üzere deney düzeneği içerisine tekrar yerleştirilerek nemli ortam deney koşulları sağlanmıştır. Söz konusu nemli ortam maruziyeti ve kirlilik etkisi ile yaşlandırılmış numunelere dair yalıtım direnci testleri yapılarak diğer deneyler gibi izolasyon direnci, polarizasyon indeksi, dielektrik absorpsiyon oranı gibi ölçümler kaydedilmiştir.

4.3.İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamaları

Elektrik makinelerinde sargı izolasyon direncinin yüksek olması izolasyon katmanının kuru ve temiz olduğunu gösterir fakat söz konusu yalıtım katmanının mekanik ve fiziksel açıdan kondisyonu hakkında bilgi vermez. Bu sebepten ötürü yapılan ölçümlerde izolasyon direnci ve bağlı parametrelerinin (PI, DAR vb) düşük çıkması veya izolasyon direnci ölçümlerindeki ani sıçrama veya düşüşlerin olması, sargı yalıtımı konusunda detaylı bir analiz yapılması gerektiği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte izolasyon direncinin yüksek çıktığı durumlarda bile periyodik sargı yüzeyi temizliklerinin yapılması gerekmektedir (Elektrik Mühendisler Odası, 2025).

Elektrik makineleri nakliye ve montaj süresince iken veya servis dışında kaldığı zaman dilimlerinde rutubet/nem alabilirler. Bu sebepten ötürü ilgili elektrik makineleri devreye alınırken kurutulmaları gerekmektedir. Servis haricinde kaldıkları durumlarda sargıların tekrardan nem almasının engellemek için sargı sıcaklığının ortam sıcaklığı değerinden 5°C fazla olması sağlanmalıdır. Bu amaçla güncel endüstriyel makinelerde servis haricinde

bekleyen makinenin sargılarının rutubet almasının önüne geçilmesi adına dahili ısıtıcılar eklenmiştir (Elektrik Mühendisler Odası, 2025).

Elektrik makinelerinin harici olarak kurutulmasına dayalı çeşitli yöntemler bulunmaktadır fakat bütün yöntemler için en önemli husus; sargıların çok fazla ısınması veya bölgesel olarak aşırı ısınmalarının önüne geçmektir. Ayrıca yine sargıların hızlı bir şekilde ısıtılmaları durumu da genleşme kaynaklı sargı yalıtım hasarlarına sebebiyet verebileceği için dikkat edilmesi gereken başka bir husus olarak ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda sargının maksimum sıcaklığa kontrollü olarak 24 saatlik bir süreçte gelmesi sağlanmıştır.

Sargı yalıtım direncinin iyileştirilmesi kapsamında, nem ihtiva eden sargıların “kurutulması” ve kirli olan sargıların “temizlenmesi” hususları ön plana çıkmaktadır. Yapılan iyileştirme çalışmalarında da sargıların uygun sıcaklık ve havalandırma koşullarında kurutulması işlemi ve yüzeysel yağ ve kir durumlarının temizlik ve uygun uçucu solventler ile temizlenmesi çalışmaları yürütülmüştür.



Şekil 53. Sargıların kurutulma işlemi esnasında alınan ölçümler

İlgili kirli sargıların yüzey temizlikleri için uygun, güvenli ve yağsız bir solvent kullanılmıştır. Solvent/çözücü uygulaması sonrası yüzeyler tortu bırakmayan mikrofiber bir bez vasıtasıyla kurulanmıştır. Kullanılan kimyasal solventin bilgileri şu şekildedir; Rasyonel Kimya Encir Yağsız Güvenli Elektriksel Solvent.

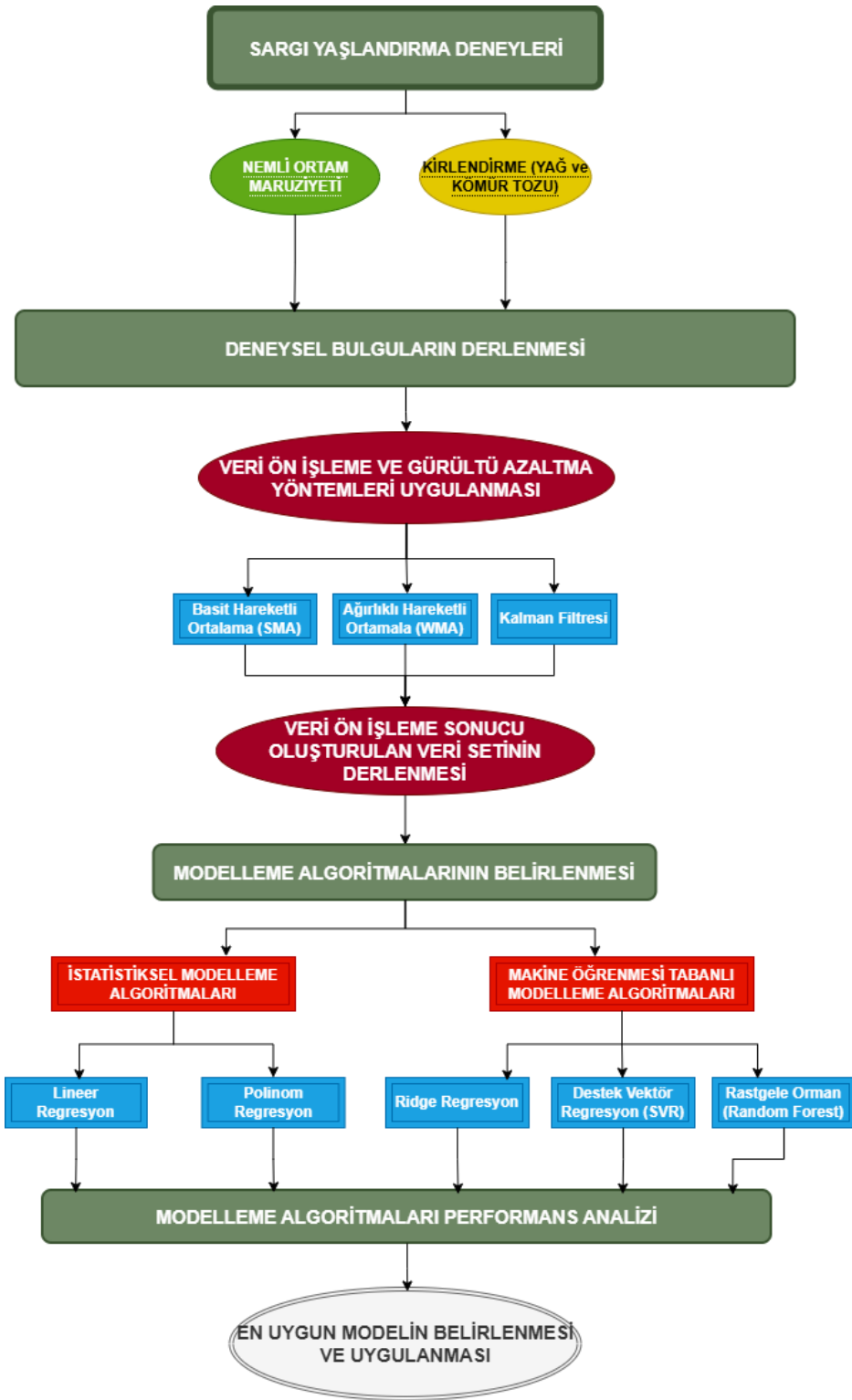


Şekil 54. Sargıların temizlenmesi işleminde kullanılan yağsız çözücü kimyasal (solvent)

Sargı kurutma ve temizlik çalışmaları sonrasında yalıtım direnci ölçümlerinin tekrarlanması için sargı ve ortam sıcaklığının referans sıcaklığa kadar inmesi beklenmiştir. Bu aşamada sargının tekrar nem almaması için ortam kontrollü olarak havalandırılmıştır. Yalıtım direnci ölçümlerinde sıcaklık farkından kaynaklı değişimlerin bertaraf edilmesi için iyileştirme çalışmaları öncesi ve sonrası sıcaklık koşulları eşitlenerek ilgili ölçümler yapılmıştır.

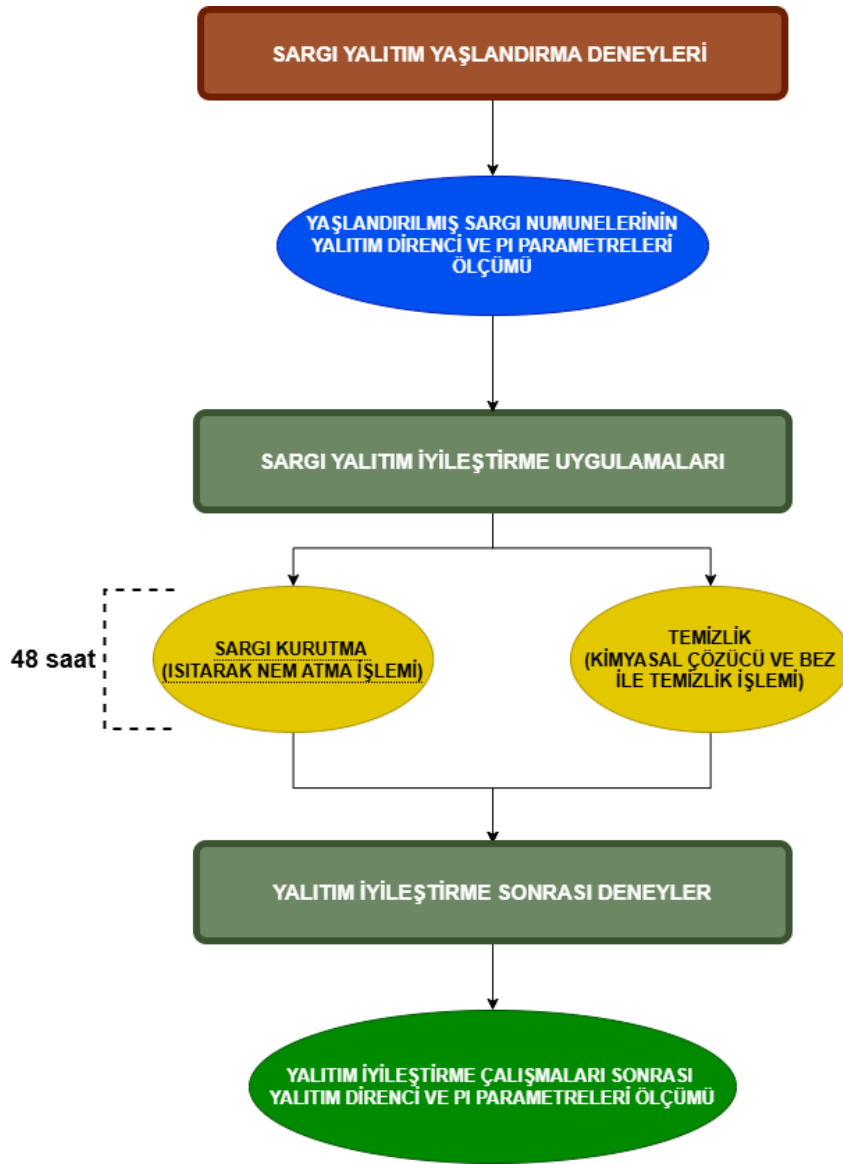
4.4.Çalışma Akış Şemaları

Yapılan deneysel yaşlandırma ve modelleme çalışmalarına dair iş akış diyagramı Şekil 47’te gösterilmiştir. Özetle; söz konusu diyagramdan da anlaşılacağı üzere deneysel çalışmalar, yaşlandırma ve iyileştirme deneylerini kapsamaktadır. Bununla birlikte yapılan deneysel yaşlandırma çalışmalarına dair veriler derlenerek öncelikli olarak bir veri ön işleme ve gürültü azaltma teknikleri ile düzeltilmiştir. Akabinde düzeltilmiş olan veri seti kullanılarak, alternatif modelleme algoritmaları ile modelleme performansları incelenmiştir. Modelleme performanslarının ilgili performans metrikleri olan belirlilik katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hata (MSE) parametreleri dikkate alınarak en uygun ve başarılı model seçimi yapılmıştır.



Şekil 55. Yapılan deneysel yaşlandırma ve modelleme çalışmalarına dair iş akış şeması

Yaşlandırma sonrası yapılan iyileştirme çalışmalarına dair iş akış şeması şekil 48’de ayrıca gösterilmiştir. Bu kısımda yapılan kurutma ve temizlik çalışmalarına dair işlem adımları iş akış şemasında belirtilmiştir.



Şekil 56. Yapılan deneysel yalıtım iyileştirme çalışmalarına dair iş akış şeması

4.5.Kullanılan Veri Seti

Bu çalışmada modelleme sürecinde kullanılan veri seti, bir senkron generatörün bara 1 ve bara 2 olmak üzere iki farklı sargı tipinde, %65 ve %85 bağıl nem koşullarında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerden elde edilmiştir. Deneysel ölçümler, her bir bara ve kirlilik durumu kombinasyonu için farklı sürelerde gerçekleştirilmiş olup, her ölçümde Polarizasyon İndeksi (PI) değeri kaydedilmiştir

Yaşlandırma testleri için aşağıdaki süreçler gerçekleştirilmiştir;

- Nemli ortam maruziyeti (%65 Rh %85 Rh)
- Kirlendirme (karbon-kömür tozu kirlendirilmiş yağ ile yüzey kontaminasyonu)

Yapılan ölçüm ve test sayılarının toplam sayısı aşağıdaki gibidir;

Tablo 14. Ölçüm ve test sayılarının toplamı

Yaşlandırma Deneyleri	
Deney Sayısı	
373	Deney
Ölçüm Sayısı	
4849	Adet

4.5.1. Veri ön işleme ve kodlama

Veri setinde yapılan inceleme ve ön analiz sonrası toplamda 366 adet örnek veri kümesine alınmıştır. Veri kümesinde kullanılan değişkenlerin kodlama biçimleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır;

Tablo 15. Veri kümesinde kullanılan değişkenlerin kodlamaları

Bara	BARA-1	BARA-2
Nem	%65 Rh	%85 Rh
Kirlilik	Temiz = 0	Kirli =1
Maruziyet Süresi	0 -2448 saat	

Modelleme sürecinde kullanılan PI (Polarizasyon indeksi) değerlerinin, çevresel değişkenler ve ölçüm ekipmanlarındaki belirsizlikler nedeniyle önemli ölçüde gürültü içerdiği tespit edilmiştir. Bu durum, doğrudan model doğruluğunu olumsuz etkileyerek, elde edilen tahmin sonuçlarının güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, veri setindeki gürültüyü azaltmak ve daha istikrarlı bir trend yapısı elde etmek amacıyla, hareketli ortalama tabanlı veri düzeltme teknikleri uygulanmıştır.

Bu bağlamda, iki farklı yöntem karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir:

- Basit Hareketli Ortalama (Simple Moving Average, SMA)
- Ağırlıklı Hareketli Ortalama (Weighted Moving Average, WMA)
- Kalman Filtresi

Veri ön işleme sürecinde, ölçümlerdeki ani dalgalanmalar ve sensör kaynaklı hatalar nedeniyle gözlemlenen gürültü etkilerini azaltmak amacıyla, öncelikle Kalman Filtresi uygulanmıştır. Ancak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Kalman filtresinin düşük frekanslı değişimlerde yeterli düzeltme sağlayamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, alternatif bir yöntem

olan Basit Hareketli Ortalama (Simple Moving Average, SMA) algoritması tercih edilmiş ve veri işleme sürecinin devamında kullanılmıştır. SMA algoritması için pencere boyutu beş olarak belirlenmiştir. Veri setinde ayrıca, giriş değişkenleri olan bara ve kirlilik türleri sayısal kodlama yöntemiyle ifade edilmiş; veri standardizasyonu ve normalizasyon işlemleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, Polarizasyon İndeksi (PI) değerlerinin zaman serisi verileri üzerinden modellenmesi ve tahmin edilmesi amacıyla Python programlama dili kullanılmıştır. Analizler, Python'un veri bilimi ve makine öğrenmesi için yaygın olarak kullanılan açık kaynak kütüphaneleri olan pandas, numpy, scikit-learn, matplotlib, seaborn, filterpy ve openpyxl kütüphaneleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm hesaplamalar ve görselleştirme işlemleri Jupyter Notebook ortamında yürütülmüştür.

4.5.2. Veri ön işleme ve dönüşümler

Veri seti Microsoft Excel dosya formatı içerisinde kaydedilmiştir. Python programlama dili içerisinde yer alan “pandas” kütüphanesi aracılığıyla okunmuştur. Çalışmada kullanılan ham veriler; bara numarası (BARA), bağıl nem, süre, kirlilik durumu ve PI gibi bağımlı ve bağımsız değişkenleri içermektedir. Eksik veriler *dropna()* yöntemi ile temizlenmiş, gerekli format dönüşümleri ve kodlamalar (örneğin kategorik verilerin sayısal karşılıkları) gerçekleştirilmiştir. Özellikle 'BARA' ve 'KİRLİLİK' gibi kategorik değişkenler *map()* fonksiyonu ile 0 ve 1 gibi ikili sayısal değerlere çevrilmiştir. Veri çerçevesi üzerinde yapılan bu işlemler, regresyon modelleri için gerekli olan sayısal veri yapısını sağlamıştır.

Veri seti aynı zamanda farklı bağıl nem seviyeleri ve süre aralıklarını kapsayacak şekilde genişletilmiş; interpolasyon, ortalama alma ve fonksiyonel genişletme gibi yöntemlerle PI değerleri simüle edilmiştir. Özellikle 45–85% nem aralığı ve 0–100000 saatlik süre skalası dikkate alınarak detaylı bir zaman serisi matrisi oluşturulmuştur. Bu noktada *np.arange()* fonksiyonu yardımıyla süreler belirli adımlarla artırılmış ve her adım için ilgili PI tahminleri elde edilmiştir. Bu yapı, farklı modelleme senaryoları altında PI değişiminin dinamik biçimde izlenebilmesine olanak tanımıştır. Veri seti üzerinde üç farklı veri düzgünleştirme (smoothing) tekniği uygulanmıştır:

- **Basit Hareketli Ortalama (Simple Moving Average - SMA):** Her bir PI değeri için, önceki ve sonraki iki ölçüm ile birlikte 5 ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. Bu işlem *rolling(window=5, center=True).mean()* fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Serinin

baş ve sonundaki verilerin korunabilmesi amacıyla `iloc[0]` ve `iloc[-1]` komutları kullanılarak uç noktaların orijinal değerleri sabit tutulmuştur. Basit hareketli ortalama (SMA) kısa vadeli dalgalanmaları azaltarak daha stabil bir eğilim elde edilmesini sağlamış, grafiksel doğruluk ve model kararlılığını önemli ölçüde artırmıştır.

- **Ağırlıklı Hareketli Ortalama (Weighted Moving Average -WMA):** Yakın dönemdeki ölçümlere daha yüksek ağırlık verilerek oluşturulan ağırlıklı ortalama uygulanmıştır. Bu işlem, `rolling(window=5).apply(lambda x:np.dot(x,weights)/weights.sum(), raw=True)` fonksiyonu ve ağırlık vektörleri ile yapılmıştır. Buradaki ağırlıklar “`np.arange(1,6)`” fonksiyonu ile oluşturulmuş ve her pencere içinde son dönemdeki değerlere daha fazla ağırlık tanınmıştır. Bu yöntem, kısa dönemli değişimlere daha duyarlı bir yapıya sahiptir; ancak bazı durumlarda aşırı duyarlılık göstererek genellenabilirliği azaltma eğilimi göstermiştir.
- **Kalman Filtresi:** Gürültülü zaman serilerini düzenlemek ve bu çalışmadaki veri seti özelinde gizli PI eğilimlerini daha doğru bir biçimde tahmin etmek amacıyla “`filterpy.kalman.KalmanFilter`” sınıfı kullanılarak tek değişkenli Kalman filtresi uygulanmıştır. Filtrenin temel bileşenleri olan durum geçiş matrisi (F), gözlem matrisi (H), durum geçiş gürültüsü (Q) ve gözlem gürültüsü (R) parametreleri kontrollü şekilde tanımlanmıştır. `predict()` ve `update()` adımları yardımıyla yapılan iteratif güncellemeler sonucunda daha akıcı ve tahmine uygun zaman serileri elde edilmiştir. Modelin belirsizlik toleransı ve düzeltme hassasiyeti bu parametreler aracılığıyla ayarlanmıştır.

Uygulanan bu filtreleme yöntemlerinin her biri grafiksel olarak karşılaştırılmış, özellikle Basit Hareketli Ortalama (SMA)’nın stabilite ve genelleme açısından diğerlerine kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür. SMA yöntemi ile elde edilen tahminler hem eğitim hem de test senaryolarında daha dengeli sonuçlar vermiş; bu durum, Basit hareketli ortalama (SMA)’nın gürültü bastırma ve trend ortaya çıkarma becerisiyle ilişkilendirilmiştir. Uygulanan bu filtreleme yöntemlerinin her biri grafiksel olarak karşılaştırılmış, özellikle Basit hareketli ortalama (SMA) ’nın stabilite ve genelleme açısından diğerlerine kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür.

4.6. Modelleme Yöntemleri

İlgili veri setinin modellenmesi sürecinde hem geleneksel istatistiksel modelleme yöntemleri hem de makine öğrenmesi tabanlı modelleme algoritmaları kullanılmıştır. Lineer ve Polinom regresyon modelleri ile geleneksel yöntemlere dair örnekleme yapılmış olup Ridge regresyon, Destek vektör regresyon ve Rastgele Orman karar ağaçları yöntemleri ile de makine öğrenmesi tabanlı modelleme yöntemi örneklerinin sonuçları incelenmiştir.

4.6.1. İstatistiksel modelleme yöntemleri

Veri setinin modelleme aşamasında tercih edilen geleneksel istatistiksel modelleme algoritmalarına dair Python programlama dilinde kullanılan fonksiyon ve yöntemlere dair detaylar bu bölümde incelenecektir. Lineer Regresyon uygulaması için Python programlama dili içerisinde yer alan *scikit-learn* kütüphanesi kullanılmış olup bu kapsamda *LinearRegression()* sınıfı tercih edilmiştir. Model nesnesi oluşturulduktan sonra “*fit()*” fonksiyonu aracılığıyla eğitim verileri üzerinde parametre tahmini gerçekleştirilmiştir. Ardından “*predict()*” fonksiyonu ile test verileri üzerinde tahmin değerleri elde edilmiştir. Modelin doğruluk değerlendirmesi için ise “*r2_score()*” ve “*mean_squared_error()*” fonksiyonları ile sırasıyla belirlilik katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hata (MSE) hesaplanmıştır.

Polinom Regresyon uygulamasında ise yine *scikit-learn* kütüphanesinden “*PolynomialFeatures()*” fonksiyonu kullanılmış, bu sayede veri setinde doğrusal olmayan ilişkilerin temsil edilmesi mümkün hale getirilmiştir. “*PolynomialFeatures(degree=n)*” fonksiyonu ile oluşturulan polinom genişletmesi, temel giriş değişkenlerini n. dereceden çok terimli yapıya dönüştürerek “*LinearRegression()*” algoritmasına uygun hale getirilmiştir. Bu işlem sonrası oluşturulan polinom terimlerine yine klasik regresyon eğitimi uygulanmış olup sonuçlar klasik model yapısıyla aynı biçimde analiz edilmiştir. Her iki modelde de eğitim ve test veri kümeleri “*train_test_split()*” fonksiyonu aracılığıyla %80–%20 oranında ayrılmıştır. Bu şekilde modellerin genellenebilirlik kapasitesi nesnel biçimde değerlendirilebilmiştir. Gerek doğrusal gerekse doğrusal olmayan bu geleneksel modeller, çalışma kapsamında modern makine öğrenmesi algoritmaları ile karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

4.6.2. Makine öğrenmesi tabanlı modelleme algoritmaları

İlgili deneysel veri setinin modelleme aşamasında tercih edilen makine öğrenmesi tabanlı modelleme algoritmalarına dair Python programlama dilinde kullanılan fonksiyon ve yöntemlere dair detaylar bu bölümde incelenecektir.

Ridge Regresyon uygulaması için Python programlama dili içerisinde, "Ridge()" fonksiyonu kullanılmıştır. Bununla birlikte modelin düzenleme düzeyi "alpha" parametresi ile ayarlanmıştır. Söz konusu ridge regresyon uygulamasında model eğitimi öncesinde girdilere ikinci dereceden polinom dönüşümü (*PolynomialFeatures(degree=2)*) uygulanmıştır. Bu vesileyle doğrusal olmayan veri eğilimleri de modellenebilir hale getirilmiştir. Eğitim sonrası "*predict()*" metodu ile test ve görselleştirme adımlarına geçilmiştir.

Destek Vektör Regresyonu (SVR) için Python programlama dili içerisinde "*SVR()*" fonksiyonu kullanılmış, hiper parametre optimizasyonu ise "*GridSearchCV()*" ile sistematik şekilde gerçekleştirilmiştir. "C", "gamma" ve "kernel" parametreleri çeşitli kombinasyonlarla test edilmiş, en yüksek belirlilik katsayısı (R^2) ve en düşük ortalama karesel hata (MSE) değerini sağlayan konfigürasyon seçilerek "*best_params_*" çıktısı üzerinden en uygun model yeniden eğitilmiştir. Rastgele Orman (Random Forest) modelleme uygulaması için Python programlama dili içerisinde "*RandomForestRegressor()*" fonksiyonu kullanılmıştır. Söz konusu rastgele orman modelinin özellikle çoklu değişken etkileşimlerini başarıyla modelleyebilme yeteneğinden yararlanılmıştır. Model parametreleri olan; "*n_estimators*", "*max_depth*" ve "*random_state*" gibi temel parametreler dikkatle belirlenmiştir. Girdi verilerine ait değişkenleri "*StandardScaler()*" fonksiyonu ile normalize edildikten sonra model eğitimi gerçekleştirilmiş olup ardından grup bazlı tahmin çıktıları görselleştirilmiştir.

Tüm modeller için doğruluk ölçütü olarak belirlilik katsayısı (R^2) skoru ve Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error – MSE) değerleri hesaplanmıştır. Eğitim ve test veri setleri "*train_test_split()*" fonksiyonu kullanılarak %80 eğitim / %20 test oranı şeklinde konfigüre edilmiştir. Girdi verilerine ait değişkenlerinin ölçeklenmesi hususunda "*StandardScaler()*" fonksiyonu kullanılmış olup bu işlem özellikle destek vektör (SVR) ve Ridge gibi hassas ölçek duyarlılığı olan modellerde model kararlılığı açısından kritik bir rol üstlenmiştir.

4.6.3. Görselleştirme yöntemi

Python programlama dili üzerinde yapılan farklı modelleme algoritmalarına dair görsel grafik ve çıktılar, yine ilgili program üzerindeki çıktı fonksiyonları vesilesiyle alınmıştır. Modelleme sürecinde kullanılan tahmin yöntemlerinin doğruluklarını görselleştirmek amacıyla, “*matplotlib.pyplot*” ve “*seaborn*” kütüphaneleri aktif olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda zaman serisi tabanlı PI (polarizasyon indeksi) tahminlerinin görselleştirilmesinde “*plot()*” fonksiyonu, veri noktalarının tahmin ve gözlem uyumunu göstermek amacıyla ise “*scatter()*” fonksiyonu kullanılmıştır.

Her bir grafik, model performansının görsel olarak yorumlanabilmesini kolaylaştırmak amacıyla renk kodları, işaretleyiciler (marker) ve başlıklandırmalar (title, xlabel, ylabel) ile desteklenmiş, ayrıca “*legend()*” ve “*grid(True)*” komutlarıyla grafiklerin okunabilirliği artırılmıştır. Özellikle model tahminlerinin gerçek değerlerle olan yakınsaması, regresyon çizgileri üzerinden takip edilmiştir. PI değişkeni için tanımlanan kritik eşik değeri olan $PI = 2$ hattı, “*axhline()*” fonksiyonu aracılığıyla yatay kırmızı kesikli çizgi biçiminde grafiklerde belirtilmiş ve bu eşik değerinin altına düşen tahmin değerlerinin zaman boyutundaki karşılıklarının net bir şekilde görülmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, model bazlı grafik çıktıları her bir nem oranı ve bara (BARA) kombinasyonu için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Böylece hem modelin genellenebilirlik gücü hem de parametre etkisi zaman serisi üzerinden yorumlanabilir hale getirilmiştir. Bu yöntem sayesinde belirli senaryolarda (örneğin: %65 nem, BARA 1, temiz ortam gibi) kritik PI eşik süresi model çıktıları üzerinden doğrudan okunabilir bir şekilde görsel olarak sunulmuştur.

4.7. Hiper Parametre Ayarlamaları

Makine öğrenmesi tabanlı modelleme çalışmalarında, hiper parametreler modelin yapısını ve öğrenme sürecini doğrudan etkileyen dışsal ayarlardır. Bu çalışmada, kullanılan tüm regresyon algoritmalarının performanslarını en üst düzeye çıkarmak amacıyla hiper parametre ayarlamaları sistematik ve kontrollü bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Her bir modelin kendine özgü yapısına uygun parametre değerleri belirlenmiş; bu süreçte doğruluk ölçütleri belirlilik katsayısı (R^2 skoru) ve hata metrikleri olarak ortalama karesel hata (MSE) değerleri esas alınarak optimizasyon yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Python programlama dili içerisinde yer alan “*scikit-learn*” kütüphanesinin hiper parametre arama fonksiyonları aktif olarak kullanılmıştır.

4.7.1. Lineer ve polinom regresyon

Lineer regresyon modeli doğrudan uygulamaya uygun olup, hiper parametre gerektirmemektedir. Ancak Polinom Regresyon modeli için polinomun derecesi kritik bir hiper parametre olarak belirlenmiştir. Bu aşamada iki farklı polinom regresyon denemesi için iki farklı hiper parametre denemeleri yapılarak optimum konfigürasyon durumu tespit edilmiştir. İkinci Derece Polinom regresyonu uygulamasında sonuçlar dengeli bir anlamlılık seviyesi sunmuş olup, yüksek doğruluk (R^2) ve düşük hata (MSE) değerleri elde edilmiştir. Söz konusu İkinci derece polinom yöntemi modelin hem eğitim hem de test verileri üzerindeki genellenebilirlik kapasitesini korumuştur.

Üçüncü Derece Polinom regresyonu uygulamasında: Sonuçlar daha karmaşık yapısıyla bazı kombinasyonlarda aşırı öğrenme (overfitting) eğilimi göstermiştir. Özellikle düşük veri yoğunluklu bölgelerde modelin tahmin başarısında bozulmalar gözlemlenmiştir. Bu bulgular ışığında, tez çalışmasının devamında ikinci derece polinom modelleme algoritması tercih edilmiştir.

4.7.2. Destek vektör regresyon (SVR)

Destek vektör regresyon (Support Vector Regression, SVR) modelinin performansı çeşitli hiper parametrelerin doğru ve hassas şekilde ayarlanmasına doğrudan bağlıdır. Çalışmada yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda parametre ayarları belirlenerek bu bölümde detaylı olarak incelenmektedir.

C (Ceza Parametresi), modelin toleranslı olabileceği hata miktarını kontrol eder. Sonuç olarak seçilen “C=10” değeri hem hata oranını minimize etmiş hem de aşırı öğrenmenin önüne geçmiştir. Kernel parametresi seçimi kapsamında, radyal tabanlı fonksiyon olan (Radial Basis Function) “RBF Kernel” çekirdeği kullanılarak doğrusal olmayan ilişkilerin etkin biçimde modellenmesi sağlanmıştır. Gamma parametresi seçimi kapsamında, kernel fonksiyonunun etki alanını belirleyen gamma parametresi için “auto” ve sabit değerler test edilmiştir. Alınan sonuçlar ışığında optimum sonuçlar değerlendirilerek “gamma = 1” parametre seçimi yapılmıştır.

Derece (Degree) parametresi hususunda ilgili parametrenin polinom çekirdek testlerinde kullanılan bir parametre olması dolayısıyla (RBF çekirdeği seçildiği için) kullanılmamıştır.

Bu hiper parametre optimizasyon süreci Python ortamında GridSearchCV yapısı ile 5 katlı çapraz doğrulama kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum parametre seti “{'C': 10, 'degree': 2, 'gamma': 1, 'kernel': 'rbf'}” şeklinde olmuştur.

4.7.3. Rastgele orman (Random forest)

Rastgele orman modelinin hiper parametre ayarları için temel olarak ağaç sayısı (n_estimators), azami ağaç derinliği (max_depth) ve rastgelelik sabiti (random_state) parametreleri dikkate alınmıştır. Ağaç sayısının artırılması, ilgili modelin genelleme yeteneğini olumlu yönde etkilese de hesaplama sürecini zorlaştırmaktadır. Bu çalışma özelinde, ağaç sayısı parametresi (n_estimators) optimum performans durumu için optimize edilerek belirlenmiştir. Rastgele orman (Random Forest) algoritması için belirleyici hiper parametreler bu bölümde incelenmiştir.

Toplam karar ağacı sayısını temsil eden “n_estimators” isimli parametre seçimi hususunda, toplam karar ağacı sayısı varsayılan “100” değeri kullanılmıştır. Ağacın azami derinliğini temsil eden “max_depth” isimli parametre seçimi hususunda; ağacın maksimum derinliğinin sınırlanmamıştır. Ancak bu durumun bazı durumlarda aşırı öğrenmeye yol açtığı gözlemlenmiştir. “random_state” parametresi kapsamında, sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla sabit bir değer atanmıştır.

Modelin eğitimi Python ortamında “*RandomForestRegressor*” fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Model giriş değişkenleri olarak; kirlilik, nem, süre ve bara no değişkenleri alınmış olup söz konusu bu değişkenler “*StandardScaler()*” fonksiyonu ile standartlaştırılmıştır. Model, doğrudan ham PI değerleri yerine, daha önce Basit Hareketli Ortalama (SMA) yöntemiyle düzgünleştirilmiş (gürültüsü azaltılmış) PI değerleri üzerinden tahmin eğitimi yapmıştır. Bu durum, tahmin performansını artırmakla birlikte modelin daha stabil sonuçlar üretmesine olanak sağlamıştır.

Model çıktılarının değerlendirilmesi aşamasında; farklı kombinasyonlar için (kirlilik: 0-1, nem: 65–85, bara: 1–2) SMA uygulanmış PI değerleri ile modelin tahmin ettiği PI değerleri görsel olarak karşılaştırılmıştır. Bu görselleştirmeler Python ortamında *matplotlib* kütüphanesi ile oluşturulmuş ve her grafik görseli üzerinde tahmin edilen PI değeri, SMA ile yumuşatılmış gerçek değerler ve kritik eşik (PI=2) çizgisi birlikte gösterilmiştir. Bu sayede modelin belirli koşullarda kritik eşik altındaki tahmin davranışı detaylı şekilde analiz edilmiştir.

4.7.4. Ridge regresyon

Ridge regresyonunda temel ve en önemli hiper parametre “ α ” (alpha) parametresidir. Bu parametre Ridge regresyon model katsayılarına uygulanan L2 ceza teriminin büyüklüğünü belirleyerek modelin düzenleme düzeyini kontrol eder. “ α ” değerinin artması katsayıların küçülmesine ve varyansın azaltılmasına katkı sağlarken, aşırı büyük değerler modelin aşırı düzleşmesine ve yetersiz temsil gücüne yol açabilir. Bu nedenle Ridge regresyonunda hiper parametre optimizasyonu, genellikle çapraz doğrulama (cross-validation) yöntemleriyle yapılır. Bu yöntemler ile α (alpha)’nın en uygun değeri seçilerek modelin genelleme performansı optimize edilmiş olur. Bu çalışmada yapılan testlerde aşağıdaki gibi farklı α “alpha” değerleri değerlendirilerek en uygun α değeri belirlenmiştir.

- $\alpha = 0.1, 1, 10$ gibi farklı değerler denenmiş,
- $\alpha = 1$ değeri ile en düşük ortalama karesel hata (MSE) ve en yüksek belirlilik katsayısı (R^2) skorlarına ulaşılmıştır.

Bu çalışma özelinde optimum α değeri tespit edilmiş olup $\alpha = 1$ parametre ayarlaması ile çalışmalara devam edilmiştir.

Ridge regresyon modelleme uygulaması Python programlama dili üzerinde Ridge() fonksiyonu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bağımsız değişkenler olarak kirlilik durumu, bağıl nem, süre ve bara no kullanılmıştır. Bununla birlikte tüm değişkenler “*StandardScaler()*” fonksiyonu vasıtasıyla standartlaştırılmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan etkileşimleri modellemek adına “*PolynomialFeatures(degree=2)*” fonksiyonu ile polinom genişletme işlemi uygulanmıştır. Bu sayede Ridge regresyon modeli, ikinci derece polinom terimlerini de içerecek şekilde daha karmaşık ilişkileri yakalayabilir hale getirilmiştir.

Model eğitimi, veri setinin %75'i eğitim ve %25'i test olarak ayrılmasıyla gerçekleştirilmiş; modelin test verisi üzerindeki tahmin performansı “mean_squared_error” ve “r2_score” metrikleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca modelin çıktıları, farklı kombinasyonlardaki koşulları temsil eden gruplar için (kirlilik: 0-1, nem: 65–85, bara: 1–2) *matplotlib* kütüphanesi ile görselleştirilmiştir. Her bir görselde, SMA uygulanmış PI değeri ile Ridge modelinin tahmin ettiği PI değerleri birlikte gösterilmiş; kritik eşik olarak kabul edilen PI=2 çizgisi de grafiklere eklenmiştir.

4.8. Değerlendirme Kriterleri (MSE, R²)

Makine öğrenmesi ve istatistiksel regresyon tabanlı modellemelerin performans değerlendirilmesi, modellerin nesnel şekilde karşılaştırılabilmesi açısından kritik bir adımdır. Bu çalışmada, Polarizasyon İndeksi (PI) değerinin tahmini için geliştirilen tüm modellerin başarısı hem hata düzeyini hem de açıklayıcılık kapasitesini değerlendiren iki temel ölçüt üzerinden analiz edilmiştir. Bu ölçütler ortalama karesel hata (MSE) ve belirlilik katsayısı (R²) metrikleri olarak belirlenmiştir. Bu iki performans metriği, modelin hem tahmin doğruluğunu hem de veri içerisindeki değişkenliğini ne ölçüde açıklayabildiğini ortaya koyması açısından önem arz etmektedir. Bütün modelleme algoritmalarının performans analizi yapılırken söz konusu bu iki metriktен faydalanılmıştır.

4.8.1. Ortalama karesel hata (Mean squared error, MSE)

Ortalama karesel hata (MSE), tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karesinin ortalamasını alarak hesaplanan bir hata ölçüsüdür. Ortalama karesel hata değeri (MSE), özellikle büyük sapmalara karşı hassas bir metrik olup, modelin tahminlerinde meydana gelen hataların büyüklüğünü nicel olarak ifade etmektedir. İlgili metriğin hesaplanmasına dair denklem aşağıdaki verilmiştir:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.1)$$

Burada,

y_i : Gerçek değer

\hat{y}_i : Tahmin edilen değer

n : Örnek sayısı

Ortalama karesel hata (Mean Squared Error, MSE) ölçütünün hesaplanmasında, Python programlama dili içerisinde “*sklearn.metrics*” modülünde yer alan “*mean_squared_error()*” fonksiyonu kullanılmıştır. Her bir modelin eğitim ve test aşamasındaki tahmin çıktıları (y_{pred})

ile gerçek değerleri (y_{test}) karşılaştırılarak MSE değeri elde edilmiştir. Bu fonksiyon, tahmin edilen değerlerin ortalama hata miktarını sayısal olarak ifade eder ve özellikle modelin düşük hata ile genelleme yapip yapmadığını ortaya koymak açısından kullanılmıştır. Her bir model çalıştırıldığında çıktılar otomatik olarak bu metrikle değerlendirilmiş ve karşılaştırmalı analizlerde referans alınmıştır.

Burada, ortalama karesel hata (MSE) değeri sifira yaklaştıkça modelin tahmin hatalarının küçüldüğü anlaşılır. Ancak, ortalama karesel hatanın (MSE) ölçü birimi hedef değişkenin karesi cinsindedir. Bu nedenle farklı veri setleri arasında doğrudan karşılaştırma yapılırken bu faktör göz önünde bulundurulmuştur.

4.8.2. Belirlilik katsayısı (Determination coefficient, R^2)

Belirlilik katsayısı (R^2) skoru bir regresyon modelinin bağımlı değişkendeki (PI) toplam değişkenlerin ne kadarını açıklayabildiğini gösteren temel bir istatistiksel ölçüttür. Modelin açıklayıcılık gücünü değerlendirirken kullanılır ve genellikle $0 \leq R^2 \leq 1$ aralığında bir değer alır. Ancak bazı durumlarda, model kötü tahmin yaparsa bu skor negatif de olabilir. Belirlilik katsayısının hesaplanmasına dair denklem aşağıdaki verilmiştir.:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.2)$$

Burada,

y_i : Gerçek (gözlenen) PI değeri

\hat{y}_i : Model tarafından tahmin edilen PI değeri

\bar{y} : Gerçek PI değerlerinin ortalaması

SS_{res} : Artık (residual) toplam kareler toplamı

SS_{tot} : Toplam kareler toplamı (varyans)

Belirlilik katsayısı (Determination Coefficient, R^2) ölçütünün hesaplanmasında, aynı şekilde “*sklearn.metrics*” kütüphanesi altında bulunan “*r2_score()*” fonksiyonundan faydalanılmıştır. Her bir model için ilgili modelin ne derece veri varyansını açıklayabildiğini ölçen bu değerlendirme ölçütü özellikle test verisi üzerindeki performans değerlendirmelerinde kritik rol oynamıştır. Python programlama dili üzerinde “*train_test_split()*” ile ayrılan eğitim ve test

kümeleri, model eğitimi tamamlandıktan sonra “ $r2_score(y_test, y_pred)$ ” komutu kullanılarak “ R^2 ” sonuçları hesaplatılmıştır.

Burada, R^2 değerinin (belirlilik katsayısı) “1” değerine eşit olması ($R^2=1$), ilgili modelin tüm varyansı açıkladığı ve mükemmel uyum sağladığı anlamına gelmektedir. Buna karşılık R^2 değerinin (belirlilik katsayısı) “0” değerine eşit olması ($R^2=0$), modelin performansının sabit ortalama tahmin etmekten daha iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Son olarak R^2 değerinin (belirlilik katsayısı) negatif olması ($R^2 < 0$), kurulan modelin sabit ortalama tahminine göre daha kötü bir performans gösterdiğini belirtmektedir. Bu durum genellikle modelin veriye hiç uymadığı anlamına gelir.

4.8.3. SMA, WMA ve Kalman filtresi yöntemlerinin karşılaştırılması

SMA (Simple Moving Average – Basit Hareketli Ortalama) yöntemi, belirli bir pencere boyutu içerisinde yer alan tüm veri noktalarına eşit ağırlık vererek bir ortalama değeri hesaplamayı amaçlar. Bu çalışmada pencere boyutu beş olarak belirlenmiş ve her bir PI değeri, kendisiyle birlikte önceki dört değer aritmetik ortalaması alınarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu yaklaşım, veri serisindeki kısa süreli oynaklıkları yumuşatarak daha stabil bir tahmin doğruluğu sağlamayı hedeflemiştir (Korbi, 2021).

Alternatif olarak uygulanan WMA (Weighted Moving Average – Ağırlıklı Hareketli Ortalama) yöntemi ise daha güncel ölçümlere daha yüksek ağırlık vererek geçmişe kıyasla yakın zamanda meydana gelen değişimlere öncelik tanır. Bu yapı sayesinde ani değişimlere karşı daha duyarlı sonuçlar elde edilir. Ancak yapılan analizler, bu avantajın aynı zamanda modelin aşırı duyarlılığına ve genel performans düşüklüğüne yol açabileceğini göstermiştir. Özellikle, WMA yönteminin kısa vadeli değişimleri abartma eğilimi, modelin genellenebilirliğini sınırlandırmıştır (Demirtaş & Gürsoy, 2023).

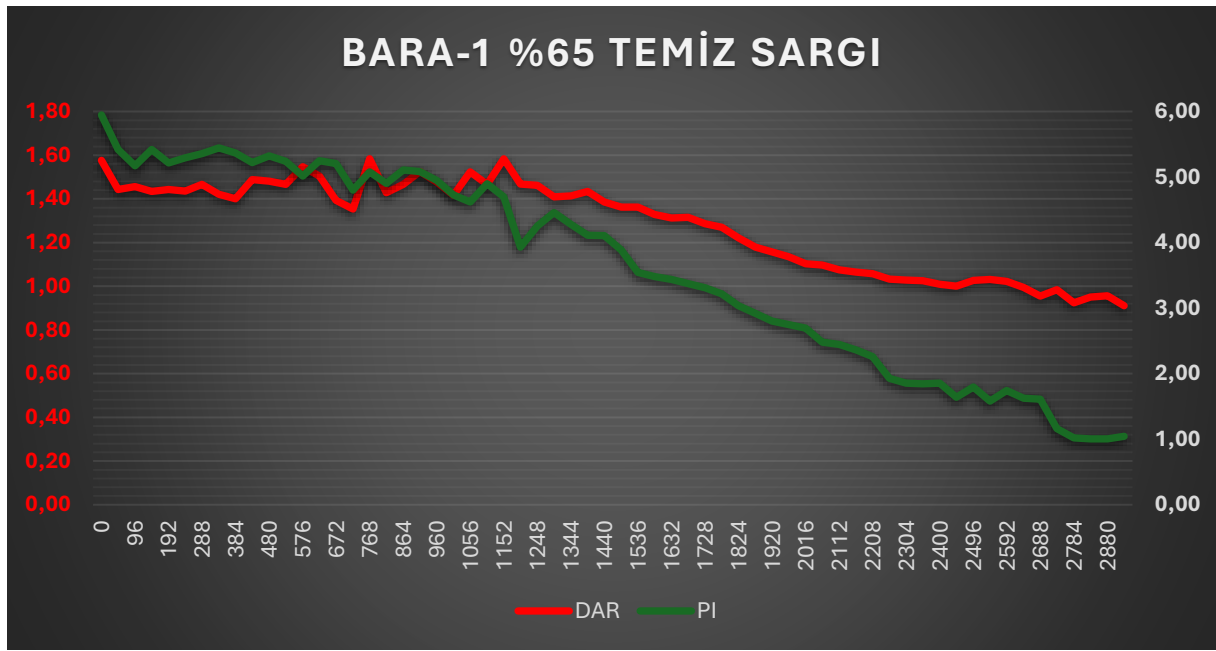
Grafiksel ve nicel karşılaştırmalar sonucunda, SMA uygulamasının özellikle zaman serisi doğasına sahip PI verileri için daha uygun bir yaklaşım sunduğu görülmüştür. SMA sayesinde model tahminlerinin daha stabil, eğilimlerin daha belirgin ve eğitim/test performanslarının daha dengeli olduğu tespit edilmiştir. Benzer bulgular, zaman serisi analizlerinde SMA'nın regresyon ve tahmin modelleme süreçlerine olumlu katkı sunduğunu vurgulayan çalışmalarla da örtüşmektedir (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Bu nedenle, çalışmanın kalan tüm

aşamalarında verinin düzgünleştirilmesi için SMA yöntemi tercih edilmiş ve bu seçim, model performansını hem doğruluk hem de genelleme açısından güçlendirmiştir.

5. BULGULAR

5.1. Deney Sonuçlarının Genel Eğilimlerinin İncelenmesi

Kurulan deney setleri ve yapılan deneysel çalışmalar sonucunda iki farklı bara için nemli ortam maruziyeti ve kirlilik maruziyeti faktörlerine göre alınan ölçümler kaydedilmiştir. Söz konusu ölçüm sonuçlarından hareketle hesaplanan Polarizasyon İndeksi ve Dielektrik Absorpsiyon oranı değerleri hesaplanarak kayıt altına alınmıştır. Bu değerlere göre her bir deney seti ve koşulu altında ilgili yalıtım direnci parametrelerinin azalma eğilimleri ortaya çıkarılmıştır.



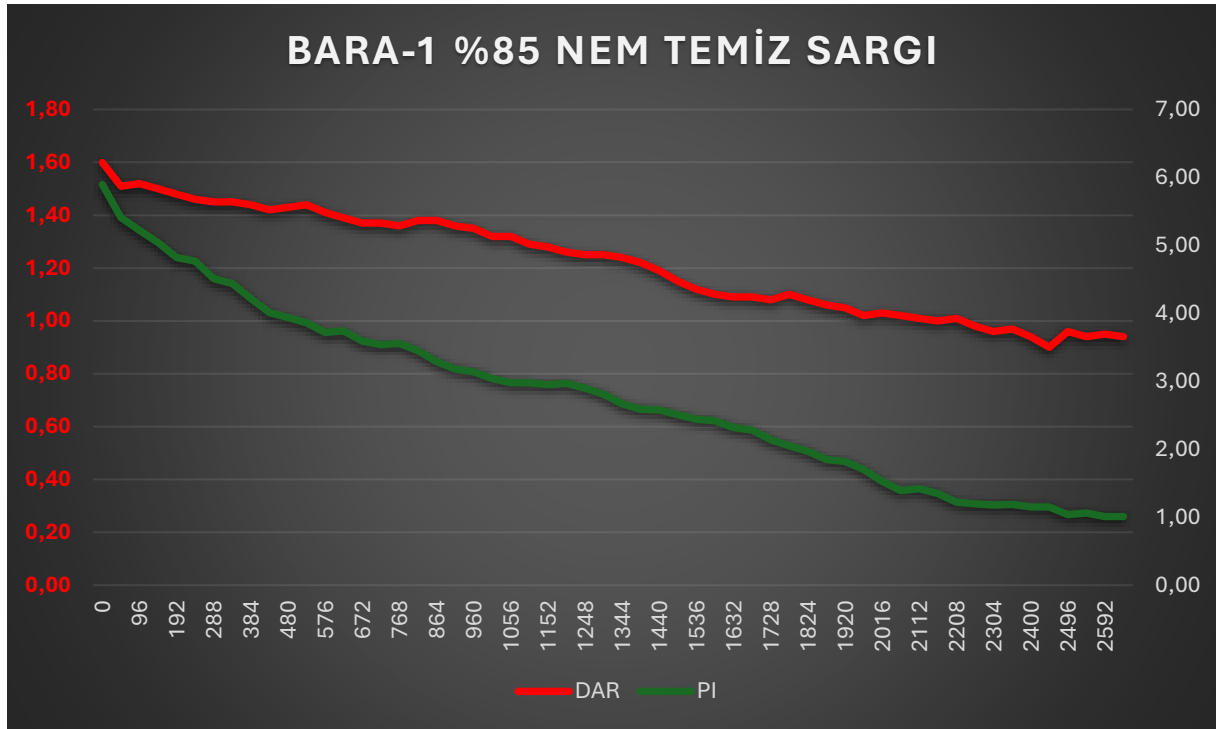
Şekil 57. BIN-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B1N-01 kodlu deney planı kapsamında Bara-1 isimli temiz bir sargı numunesi 25 C° sabit ortam sıcaklığı altında, % 65 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 57’da gösterilmiştir.

Tablo 16. BIN-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK DURUMU	DAR<1,25 SAAT	PI<2,0 SAAT
B1N-01	%Rh			
BARA 1 (13,8 kV)	65%	TEMİZ	1824	2256

Tablo 16'ten anlaşılacağı üzere B1N-01 deney koşullarında PI değeri 2.256 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 1.824 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



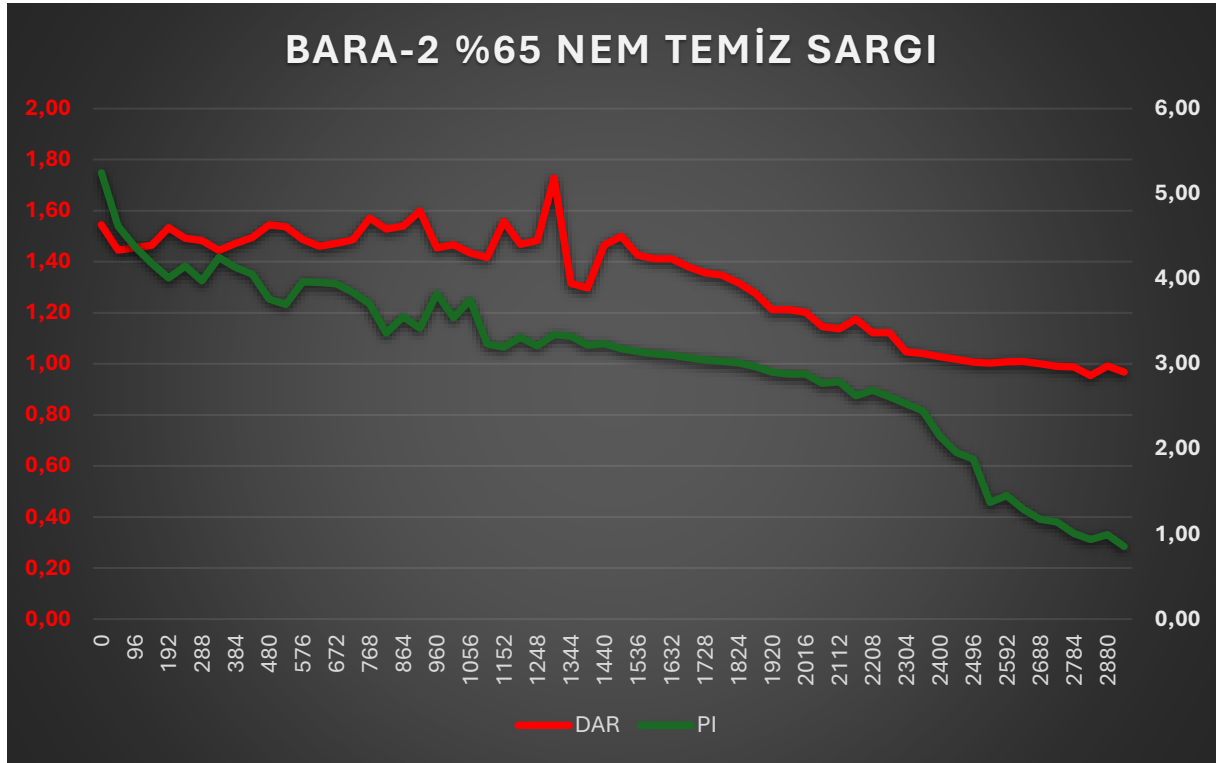
Şekil 58. BIN-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B1N-02 kodlu deney planı kapsamında Bara-1 isimli temiz bir sargı numunesi 25 C° sabit ortam sıcaklığı altında, % 85 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 58'de gösterilmiştir.

Tablo 17. BIN-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK DURUMU	DAR<1,25 SAAT	PI<2,0 SAAT
B1N-02	%Rh			
BARA 1 (13,8 kV)	85%	TEMİZ	1344	1824

Tablo 17’den anlaşılacağı üzere B1N-02 deney koşullarında PI değeri 1824 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 1344 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



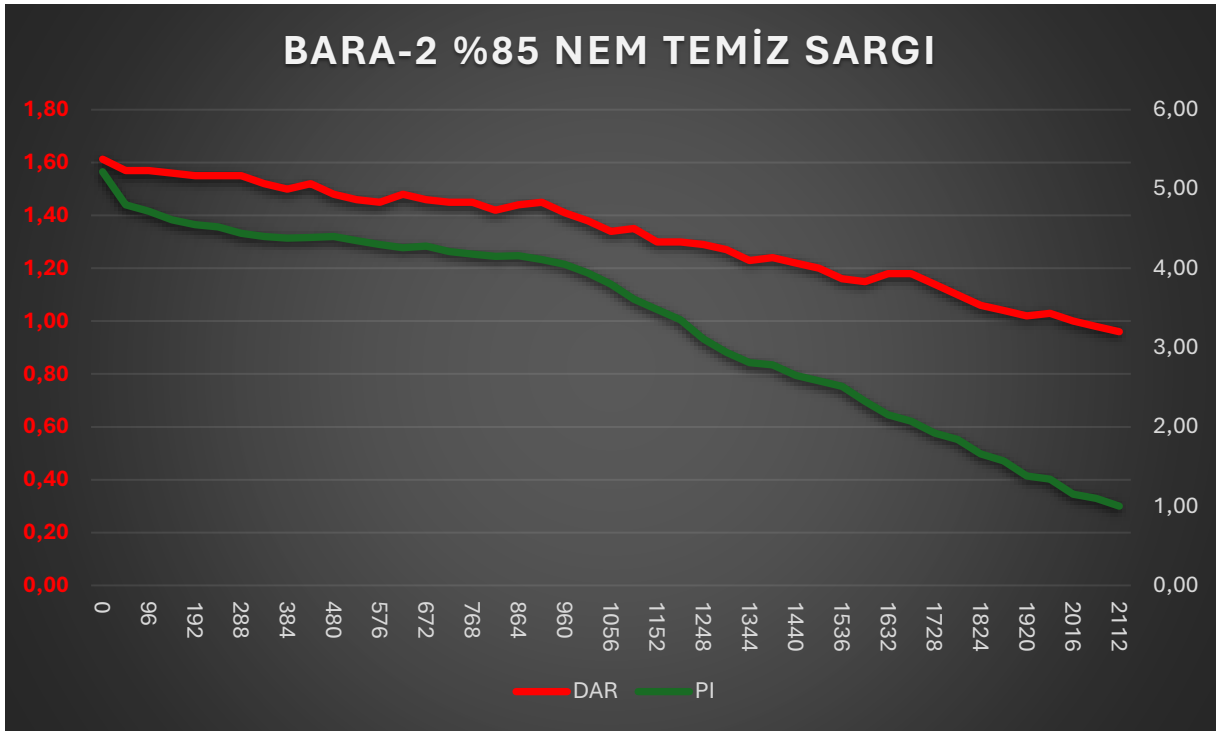
Şekil 59. B2N-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B2N-01 kodlu deney planı kapsamında Bara-2 isimli temiz bir sargı numunesi 25 C° sabit ortam sıcaklığı altında, %65 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 59’de gösterilmiştir.

Tablo 18. B2N-01 (%65 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK	DAR<1,25	PI<2,0
B2N-01	%Rh	DURUMU	SAAT	SAAT
BARA 2 (6,3 kV)	65%	TEMİZ	1920	2448

Tablo 18’den anlaşılacağı üzere B2N-01 deney koşullarında PI değeri 2448 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 1920 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



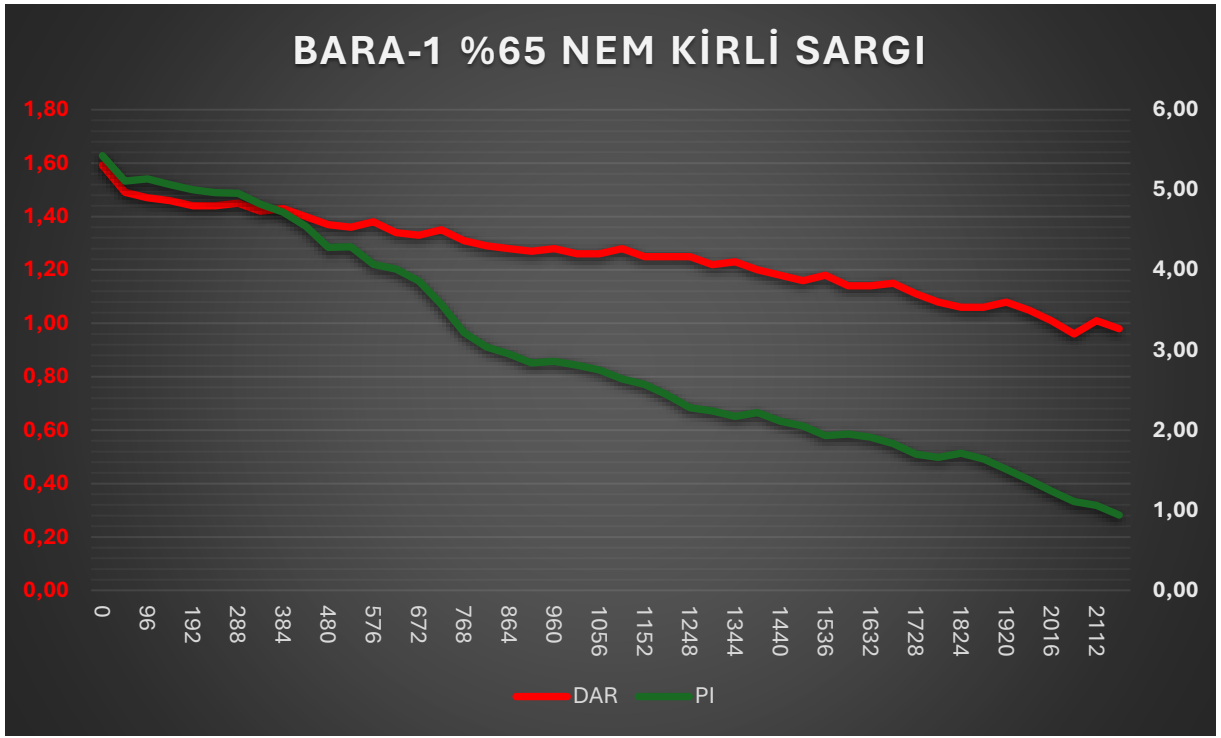
Şekil 60. B2N-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B2N-02 kodlu deney planı kapsamında Bara-2 isimli temiz bir sargı numunesi 25 C° sabit ortam sıcaklığı altında, %85 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 60'da gösterilmiştir.

Tablo 19. B2N-02 (%85 Nem ve Temiz Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK	DAR<1,25	PI<2,0
B2N-02	%Rh	DURUMU	SAAT	SAAT
BARA 2 (6,3 kV)	85%	TEMİZ	1344	1728

Tablo 19'den anlaşılacağı üzere B2N-02 deney koşullarında PI değeri 1728 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 1344 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



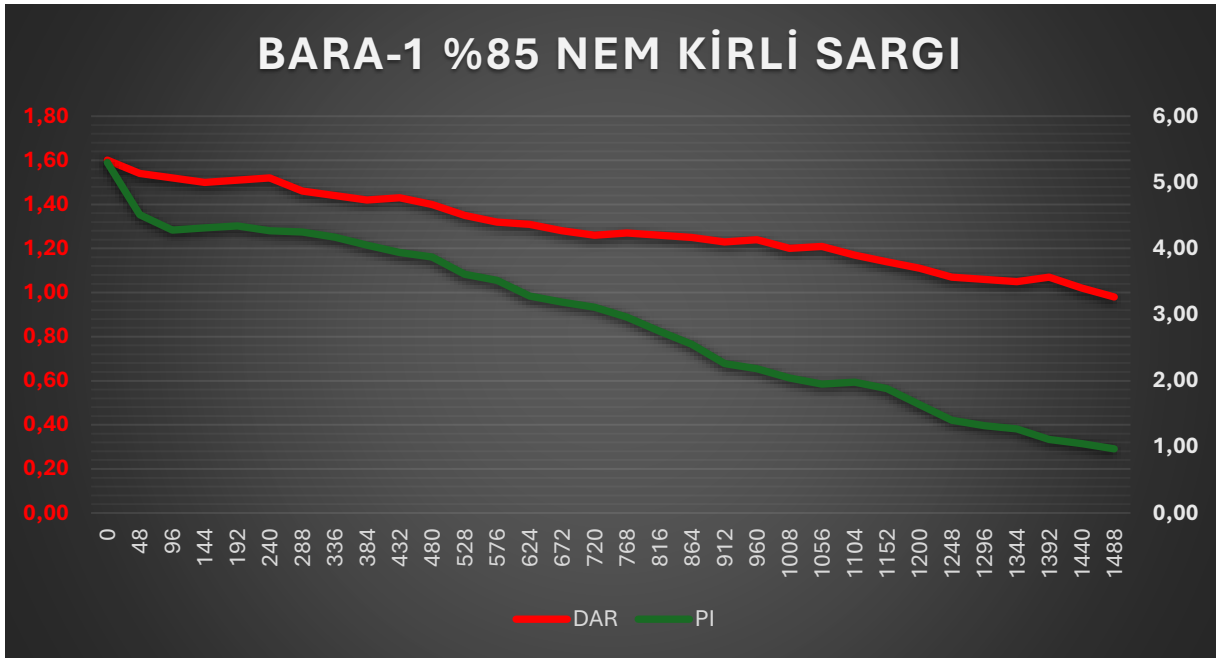
Şekil 61. B1NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B1NK-01 kodlu deney planı kapsamında Bara-1 isimli kirli bir sargı numunesi 25 °C sabit ortam sıcaklığı altında, %65 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 61’de gösterilmiştir.

Tablo 20. B1NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK	DAR<1,25	PI<2,0
B1NK-01	%Rh	DURUMU	SAAT	SAAT
BARA 1 (13,8 kV)	65%	KİRLİ	1296	1536

Tablo 20’den anlaşılacağı üzere B1NK-01 deney koşullarında PI değeri 1536 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 1296 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



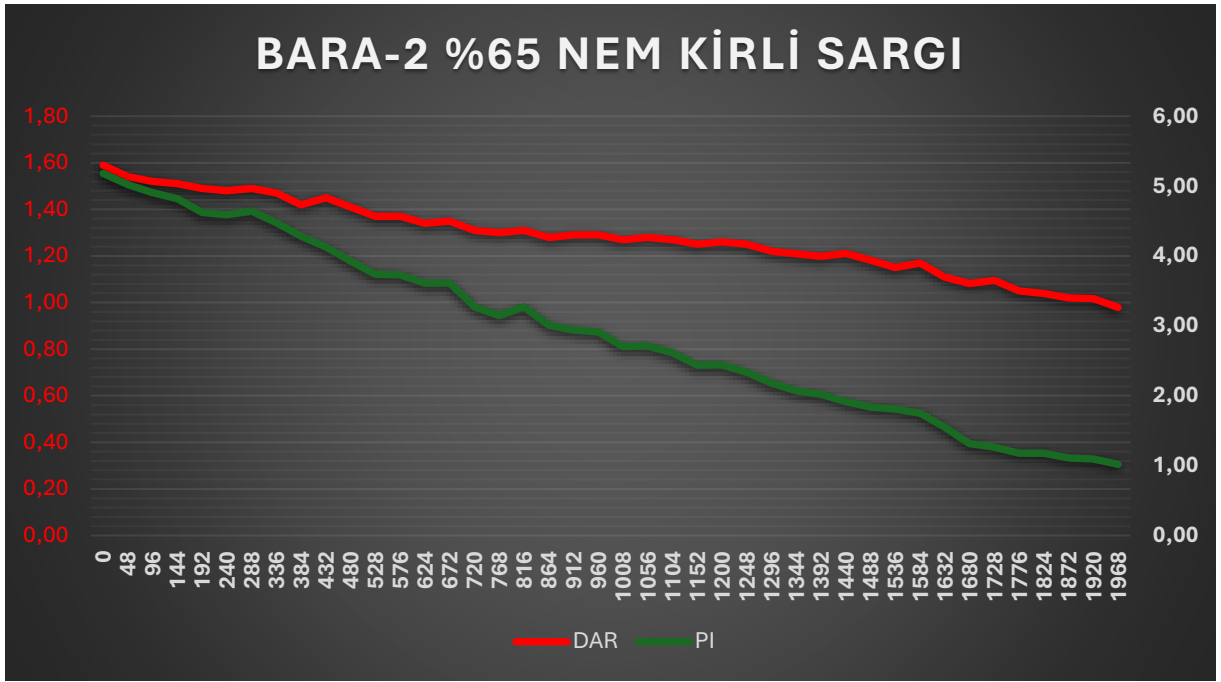
Şekil 62. B1NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B1NK-02 kodlu deney planı kapsamında Bara-1 isimli kirli bir sargı numunesi 25 C° sabit ortam sıcaklığı altında, % 85 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 62’de gösterilmiştir.

Tablo 21. B1NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK	DAR<1,25	PI<2,0
	%Rh	DURUMU	SAAT	SAAT
B1NK-02				
BARA 1 (13,8 kV)	85%	KİRLİ	912	1056

Tablo 21’den anlaşılacağı üzere B1NK-02 deney koşullarında PI değeri 1056 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 912 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



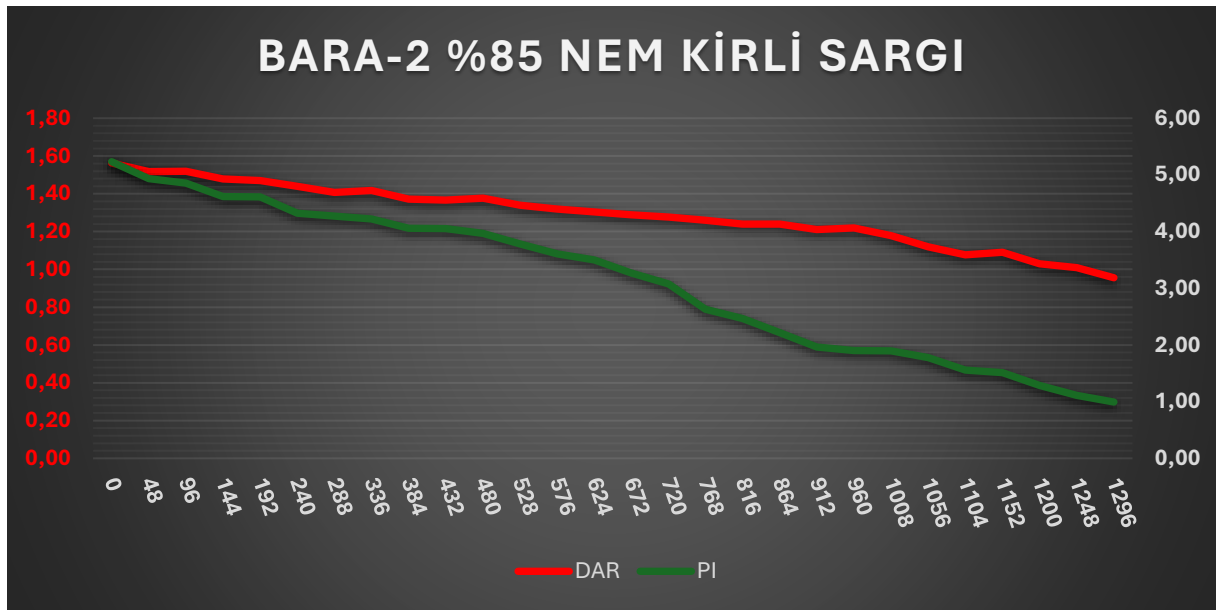
Şekil 63. B2NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B2NK-01 kodlu deney planı kapsamında Bara-2 isimli kirli bir sargı numunesi 25 C° sabit ortam sıcaklığı altında, % 65 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 63’de gösterilmiştir.

Tablo 22. B2NK-01 (%65 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK	DAR<1,25	PI<2,0
B2NK-01	%Rh	DURUMU	SAAT	SAAT
BARA 2 (6,3 kV)	65%	KİRLİ	1296	1440

Tablo 22’den anlaşılacağı üzere B2NK-01 deney koşullarında PI değeri 1440 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 1296 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.



Şekil 64. B2NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin eğilim grafiği

B2NK-02 kodlu deney planı kapsamında Bara-2 isimli kirli bir sargı numunesi 25 °C sabit ortam sıcaklığı altında, % 85 Rh Nemli ortama maruz bırakılmıştır. Bu şartlar altında sargının yalıtım direnci parametrelerindeki değişim trendi Şekil 64'te gösterilmiştir.

Tablo 23. B2NK-02 (%85 Nem ve Kirli Sargı) Yalıtım direnci parametrelerinin kritik değerlerin altında düşüş süreleri

	NEM	KİRLİLİK	DAR<1,25	PI<2,0
B2NK-02	%Rh	DURUMU	SAAT	SAAT
BARA 2 (6,3 kV)	85%	KİRLİ	816	912

Tablo 23'den anlaşılacağı üzere B2NK-02 deney koşullarında PI değeri 912 saat sonra kritik eşik değeri olan 2,0 değerinin altında düşmüştür. Bununla birlikte DAR değeri 816 saat sonra kritik eşik değeri olan 1,25 değerinin altında düşmüştür.

İyileştirme süreçlerine dair bulgular incelendiğinde, nemlendirme ve kirlilik uygulama çalışmalarına müteakip olarak yapılan iyileştirme çalışmalarının sonuçları da ayrı deney setleri ve kayıtları olarak kaydedilmiştir. Yapılan kurutma, temizlik (kimyasal solvent ve mekanik temizlik) çalışmaları ile irtibatlandırılmış olan deneysel çalışmalar sonrası ölçülen yalıtım direnci parametreleri (PI, DAR) değerleri kayıt altına alınmıştır. Bu süreçte aşırı ısınma ve bölgesel aşırı ısınma konusunda tedbirler alınarak, sargı nominal sargı sıcaklığı değerlerinin üzerindeki bir sıcaklık değeri (90 °C) ile kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte

kimyasal solvent ile temizlik sürecinin sargı üzerinde bırakabileceği geçici nem etkisinin önüne geçilmesi adına test öncesi yaklaşık 10 dk doğal havalandırma yapılmıştır. Tablo 23’te yapılan kurutma ve temizlik çalışmaları öncesi ve sonrası kaydedilen yalıtım direnci parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 24. İyileştirme süreci öncesi ve sonrası yalıtım direnci parametreleri

İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALAR	YAŞLANDIRMA SÜRECİ PARAMETRELERİ			İYİLEŞTİRME ÖNCESİ YALITIM DİRENCİ DEĞERLERİ		İYİLEŞTİRME SÜREÇLERİ			İYİLEŞTİRME SONRASI YALITIM DİRENCİ PARAMETRELERİ	
	Deney Kodu	Ortam Nem Değeri (%Rh)	Kirlilik Durumu	Maruziyet Süresi (saat)	PI	DAR	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Kurutma Süresi (saat)	Temizlik & Kimyasal	PI
B1NK-01- TK	65%	KİRLİ	2160	0,94	0,98	90	48	Kimyasal Solvent uygulaması ve Kuru Bezle Yüzey Temizliği	5,28	1,41
B1NK-02- TK	85%	KİRLİ	1488	0,97	0,98	90	48		4,89	1,34
B2NK-01- TK	65%	KİRLİ	1968	1,02	0,98	90	48		5,11	1,47
B2NK-02- TK	85%	KİRLİ	1296	0,99	0,96	90	48		5,05	1,50

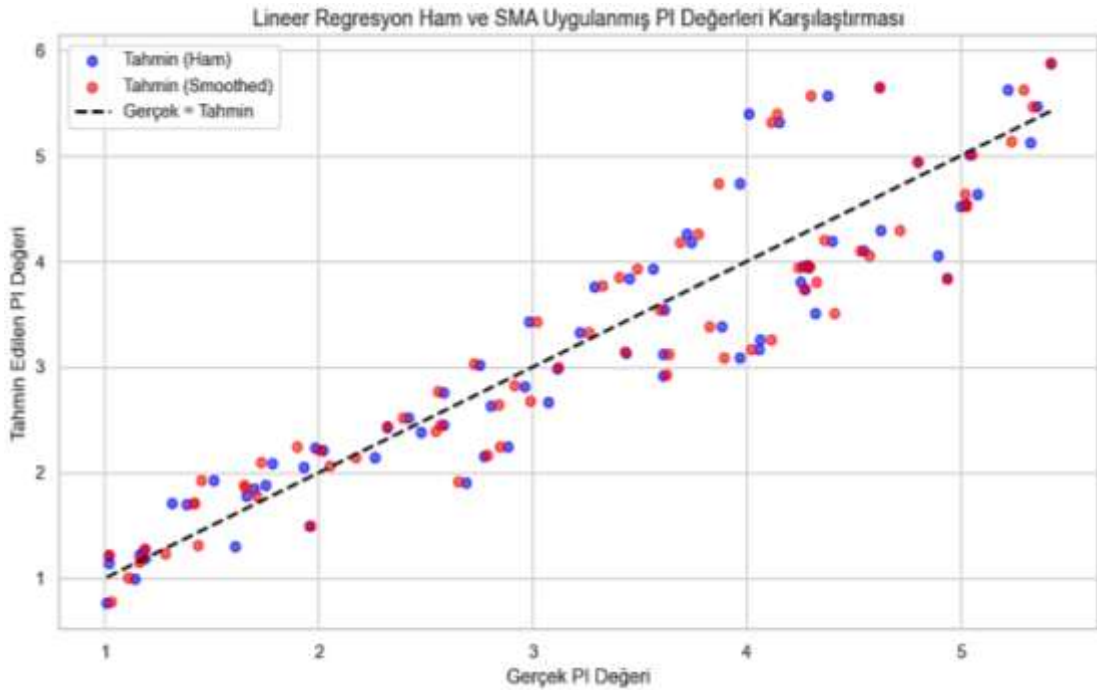
Tablo 24’te yaşlandırma süreçlerine maruz kalmış olan her iki baranın iyileştirme süreçleri öncesinde ve sonrasında kaydedilen yalıtım direnci parametreleri gösterilmiştir. Genel olarak tüm iyileştirme süreçleri sonrasında yaşlandırma etkilerinin yalıtım direnci parametrelerine etki eden düşürücü etkilerinin bertaraf edilebildiği sonucuna varılmıştır. Uygulanan 48 saatlik iyileştirme kürleri sonucunda bütün deney setlerinde PI değeri ve DAR değeri standardın kabul kriterlerinin üzerine çıkmıştır.

5.2. Modelleme Alternatiflerine Dair Bulgular

Bu çalışmada geliştirilen Lineer Regresyon, Polinom Regresyon, SVR (Destek Vektör Regresyon), Random Forest ve Ridge Regresyon modellerinin performansları, hem hareketli ortalama uygulanmış PI verileri hem de normal PI verileri üzerinden analiz edilmiştir. Görsellerde, her model için tahmin edilen PI değerleri ile gerçek PI değerlerinin karşılaştırıldığı grafikler sunulmuştur.

5.2.1. Basit hareketli ortalama (SMA) bulgularının incelenmesi

Veri işleme ve gürültü azaltma yöntemlerinden olan ve bu çalışma için seçilen basit hareketli ortalama yönteminin, PI değerleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu etkinin tahmin modellerinin başarımına yansımaları değerlendirilmiştir. Aşağıda örnek olarak Lineer Regresyon modeli için, hem orijinal (ham) PI verileriyle hem de basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış verilerle yapılan tahminler karşılaştırılmıştır. Hareketli ortalama, zaman serisi verilerindeki kısa süreli dalgalanmaları ve ölçüm gürültüsünü azaltarak daha düzgün ve eğilimsel bir yapı elde etmeyi amaçlar. Bu yapı, tahmin modelleri açısından daha anlamlı bir öğrenme yüzeyi sunmakta ve modelin doğrusal olmayan yapıları daha net şekilde yakalamasına olanak tanımaktadır.

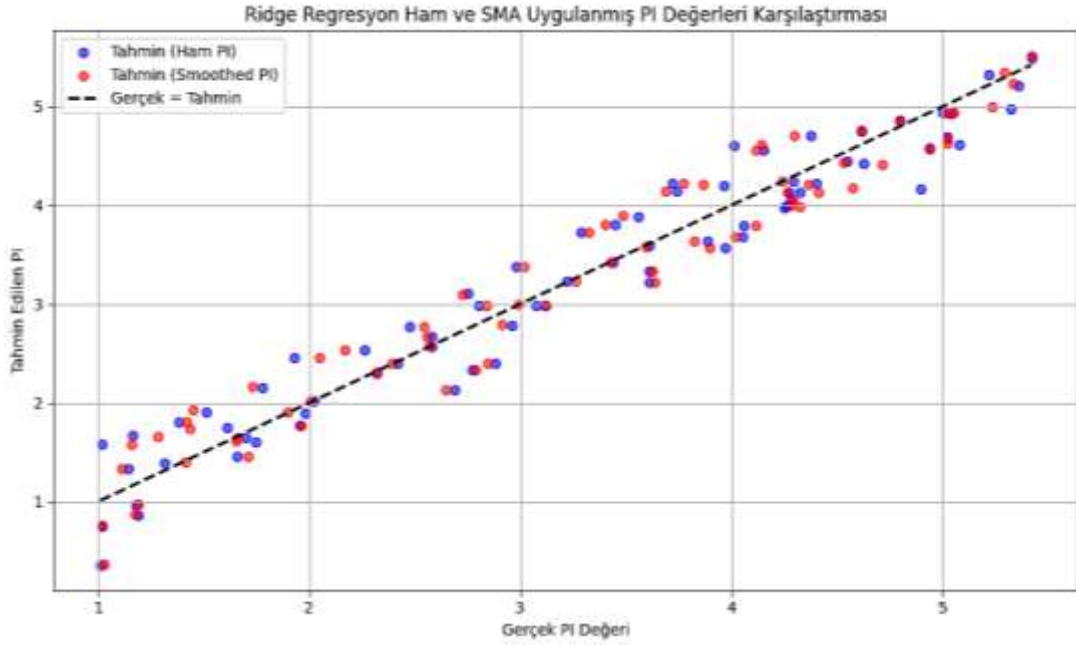


Şekil 65. Lineer Regresyon Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması

Lineer regresyon modelinde, veri işleme ve gürültü azaltma teknikleri öncesindeki ham veri seti ile basit hareketli ortalama tekniği ile düzeltilmiş olan veri setinin kullanılması durumlarındaki tahmin dağılımlarını gösteren grafik Şekil 65'te gösterilmiştir. Ham verilere göre kurulmuş lineer regresyon modeli performans sonuçları ve basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış verilere göre kurulmuş lineer regresyon modeli performans sonuçlarını içeren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 25. Lineer regresyon sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular

Model ve Veri Seti	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R ²)
Lineer Regresyon (Ham PI)	0,255	0,849
Lineer Regresyon (SMA Uygulanmış)	0,249	0,851

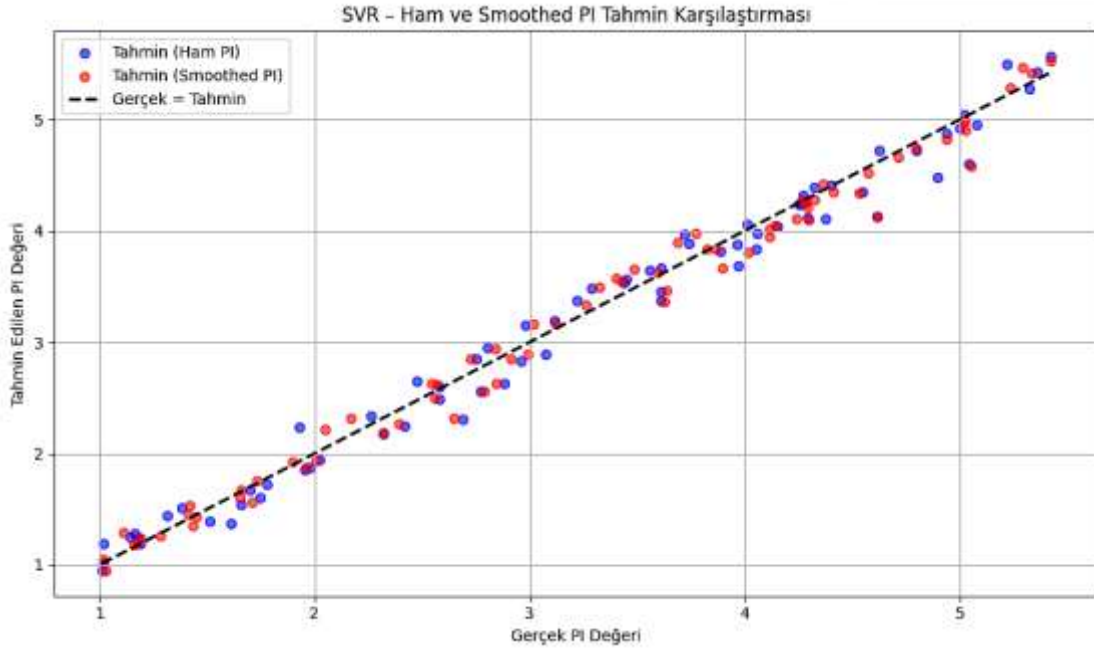


Şekil 66. Ridge Regresyon Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması

Ridge Regresyon modeli uygulamasında, veri işleme ve gürültü azaltma teknikleri öncesindeki ham veri seti ile basit hareketli ortalama tekniği ile düzeltilmiş olan veri setinin kullanılması durumlarındaki tahmin dağılımlarını gösteren grafik Şekil 66’te gösterilmiştir. Ayrıca ham verilere göre kurulmuş ridge regresyon modeli performans sonuçları ve basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış verilere göre kurulmuş ridge regresyon modeli performans sonuçlarını içeren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 26. Ridge regresyon modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular

Model ve Veri Seti	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R ²)
Ridge Regresyon (Ham PI)	0,097	0,942
Ridge Regresyon (SMA Uygulanmış)	0,093	0,945

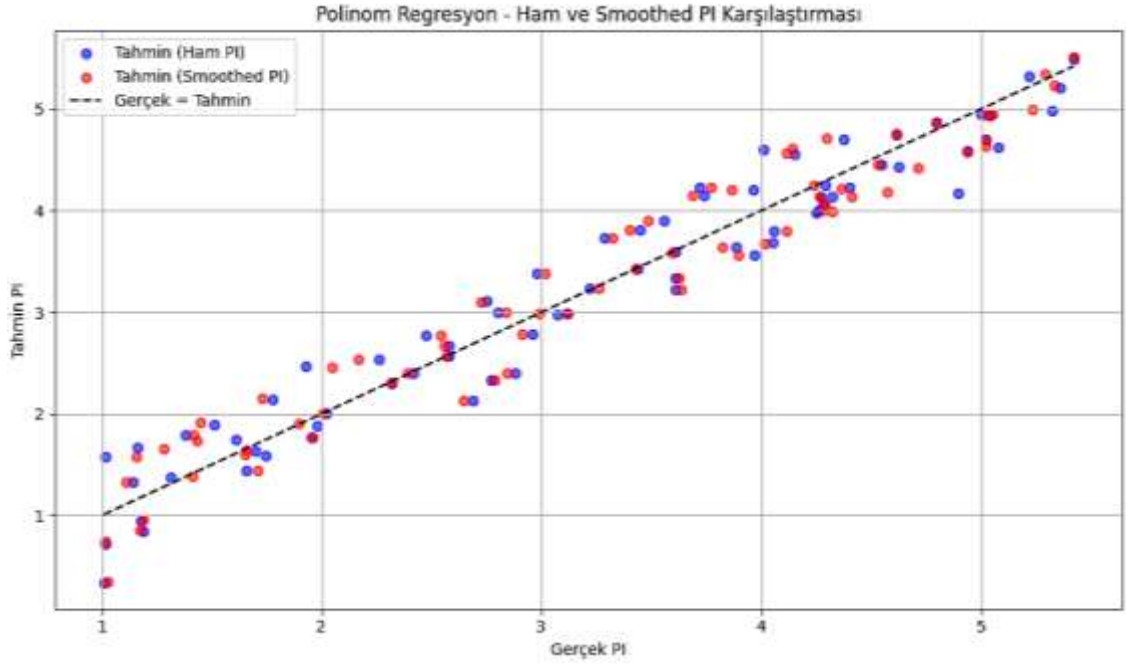


Şekil 67. Destek vektör regresyon (SVR) Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması

Destek vektör regresyon (SVR) modeli uygulamasında, veri işleme ve gürültü azaltma teknikleri öncesindeki ham veri seti ile basit hareketli ortalama tekniği ile düzeltilmiş olan veri setinin kullanılması durumlarındaki tahmin dağılımlarını gösteren grafik Şekil 67’de gösterilmiştir. Ayrıca ham verilere göre kurulmuş destek vektör regresyon (SVR) modeli performans sonuçları ve basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış verilere göre kurulmuş destek vektör regresyon (SVR) modeli performans sonuçlarını içeren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 27. Destek vektör regresyon (SVR) modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular

Model ve Veri Seti	Ortalama Karesel Hata	Belirlilik
	(MSE)	Katsayısı (R ²)
SVR (Ham PI)	0,028	0,983
SVR (SMA Uygulanmış)	0,007	0,995

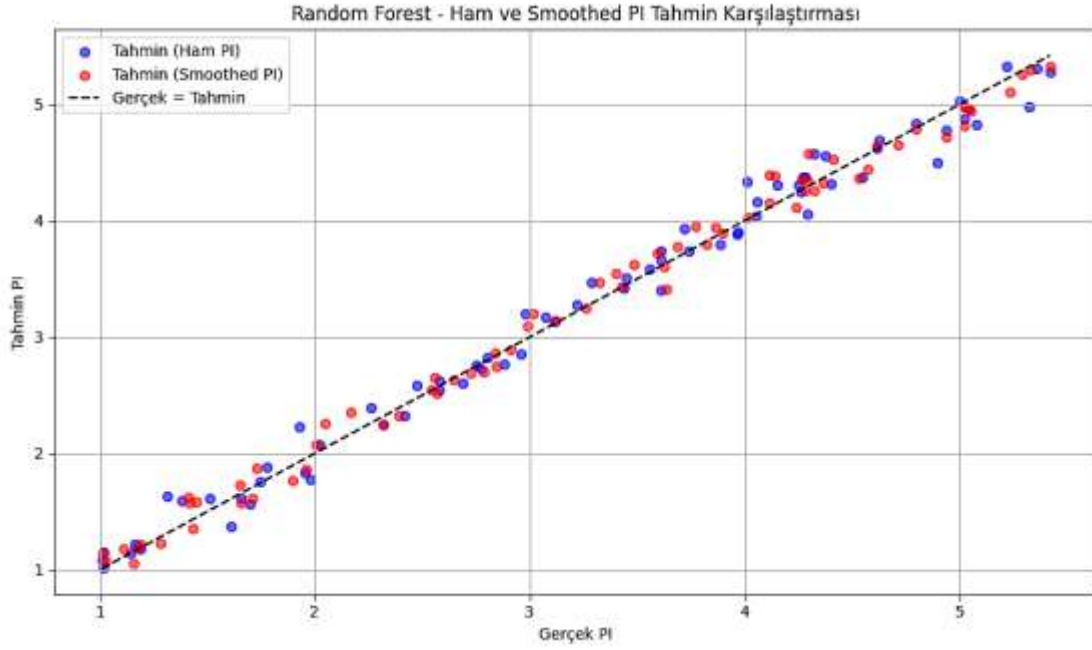


Şekil 68. Polinom Regresyon Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması

Polinom regresyon modeli uygulamasında, veri işleme ve gürültü azaltma teknikleri öncesindeki ham veri seti ile basit hareketli ortalama tekniği ile düzeltilmiş olan veri setinin kullanılması durumlarındaki tahmin dağılımlarını gösteren grafik Şekil 68’de gösterilmiştir. Ayrıca ham verilere göre kurulmuş polinom regresyon modeli performans sonuçları ve basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış verilere göre kurulmuş polinom regresyon modeli performans sonuçlarını içeren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 28. Polinom regresyon modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular

Model ve Veri Seti	Ortalama Karesel Hata	Belirlilik
	(MSE)	Katsayısı (R^2)
Polinom Regresyon (Ham PI)	0,097	0,943
Polinom Regresyon (SMA Uygulanmış)	0,094	0,945



Şekil 69. Rastgele orman (random forest) modeli Ham ve SMA uygulanmış PI değerleri karşılaştırması

Rastgele orman (Random forest) modeli uygulamasında, veri işleme ve gürültü azaltma teknikleri öncesindeki ham veri seti ile basit hareketli ortalama tekniği ile düzeltilmiş olan veri setinin kullanılması durumlarındaki tahmin dağılımlarını gösteren grafik Şekil 69’de gösterilmiştir. Ayrıca ham verilere göre kurulmuş Rastgele orman (Random forest) modeli performans sonuçları ve basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış verilere göre kurulmuş rastgele orman (Random forest) modeli performans sonuçlarını içeren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 29. Rastgele orman (Random forest) modeli sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair bulgular

Model ve Veri Seti	Ortalama Karesel Hata	Belirlilik
	(MSE)	Katsayısı (R^2)
Random Forest (Ham PI)	0,020	0,987
Random Forest (SMA Uygulanmış)	0,013	0,993

Model çıktılarında, ham verilerle çalışıldığında tahmin eğrisinin gerçek PI değerlerinden daha fazla saptığı ve yüksek varyanslı tahminler ürettiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, yumuşatılmış verilerle (gürültü azaltma teknikleri uygulanmış) yapılan tahminlerde model, gerçek PI eğilimini daha başarılı şekilde izleyebilmiş; hata miktarı düşmüş ve genel doğruluk (R^2 skoru) artmıştır. Bu sonuç, hareketli ortalama uygulamasının özellikle destek vektör

regresyonu gibi kernel tabanlı modellerde tahmin performansını artırıcı bir ön işleme adımı olarak etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 30. Model sonuçlarına gürültü azaltma yönteminin etkisine dair tüm bulgular

Model ve Veri Seti	Ortalama Karesel	Belirlilik
	Hata (MSE)	Katsayısı (R^2)
Lineer Regresyon (Ham PI)	0,255	0,849
Lineer Regresyon (SMA Uygulanmış)	0,249	0,851
Ridge Regresyon (Ham PI)	0,097	0,942
Ridge Regresyon (SMA Uygulanmış)	0,093	0,945
Polinom Regresyon (Ham PI)	0,097	0,943
Polinom Regresyon (SMA Uygulanmış)	0,094	0,945
SVR (Ham PI)	0,028	0,983
SVR (SMA Uygulanmış)	0,007	0,995
Random Forest (Ham PI)	0,020	0,987
Random Forest (SMA Uygulanmış)	0,013	0,993

Tablo 30'dan da anlaşıldığı üzere bütün modeller için SMA uygulanmış veri seti, modelin belirlilik katsayısı olan R^2 skorunu artırmıştır. Ayrıca destek vektör regresyon modelinde belirlilik katsayısının artmasının yanı sıra ortalama karesel hata (MSE) değerinin de bariz şekilde düştüğü (0,028 değerinden 0,007 değerine düşmüş) gözlemlenmiş bulgular arasındadır.

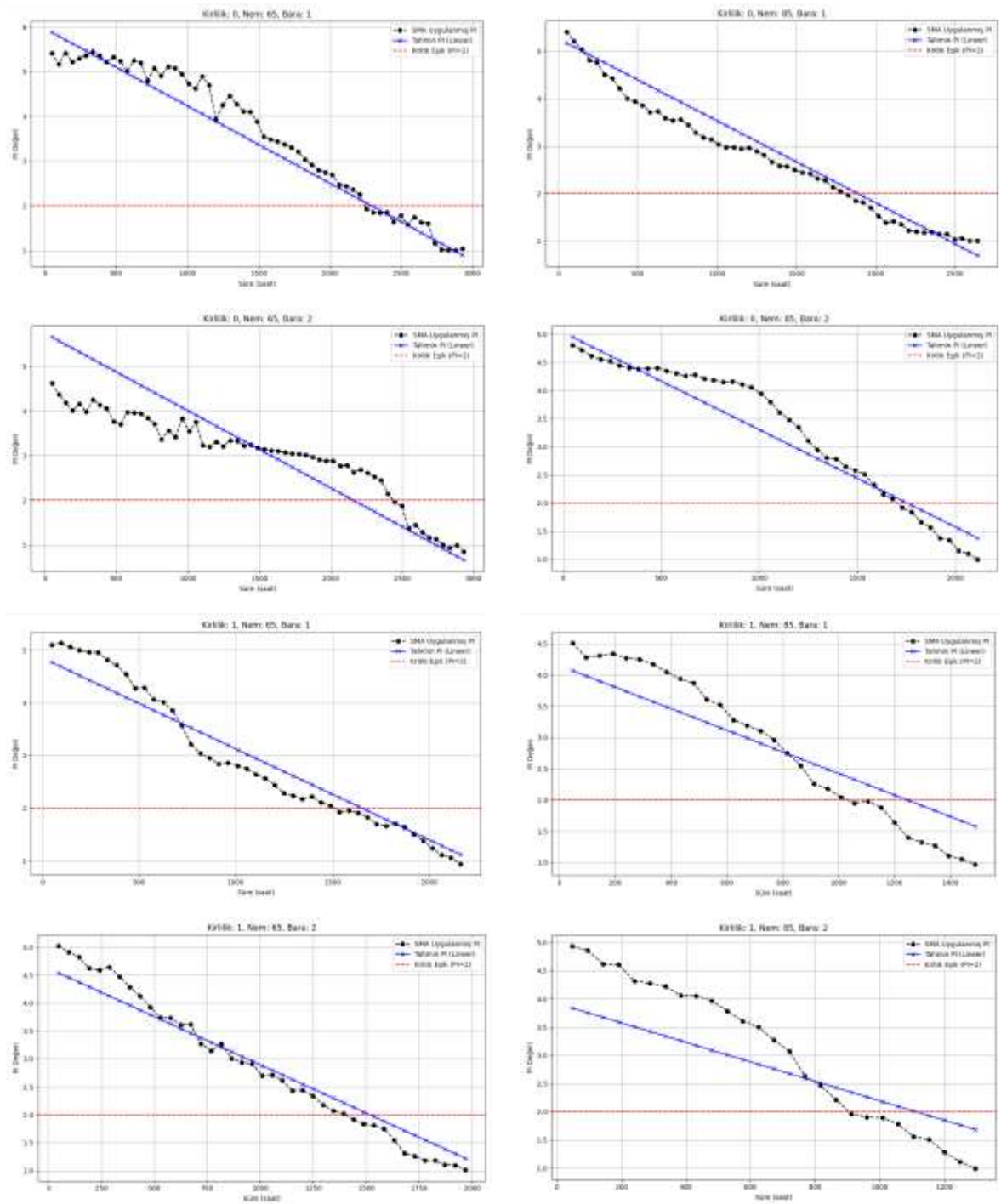
5.2.2. Model bazında performans incelemesi

Lineer regresyon, polinom regresyon, ridge regresyon, rastgele orman (random forest) ve destek vektör regresyon modellerinin her biri ayrı olarak görselleştirilmiş ve model performanslarına dair metrikler ayrı ayrı belirtilmiştir. Her bir model için grafikler kullanılarak, model tahminlerinin deney ölçüm verileri ile ne kadar iyi uyum sağladığı gösterilmiştir.

5.2.2.1. Lineer regresyon modeli bulguları

Basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış veri seti ile lineer regresyon modeline göre tahmin edilen PI değerlerini gösteren grafikler alınmıştır. Yapılan 8 adet deneysel yaşlandırma

testlerinin her biri için ayrı ayrı ilgili modelin çıktıları alınmış olup Şekil 70’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 70. Lineer regresyon modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi

Lineer regresyon modeline göre tahmin edilen PI değerleri ve gerçek değerler arasında bariz farkların olduğu görsellerdeki grafiklerden bariz şekilde görülmektedir. Öyle ki kirlilik uygulamaları olan deney verileri ile model tahminleri arasında nispeten tahmin hatalarının daha

büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca basit hareketli ortalama (SMA) uygulanması, lineer regresyon modelinin tahmin kabiliyetini artırmış ve modeli gereksiz dalgalanmalardan arındırarak genel eğilimi daha başarılı yansıtmayı sağlamıştır. Bu etki, hem grafiksel olarak daha istikrarlı bir tahmin eğrisi ile hem de istatistiksel sonuçlar ile (daha yüksek R^2 , daha düşük MSE) desteklenmektedir. Özellikle düşük nem koşullarında ve temiz ortamlarda bu iyileştirici etkisi daha net gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük karmaşıklıkta modellerde veri ön işleme adımlarının model başarımına olan etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Lineer regresyon modelinin performans metriklerinin sonuçları Tablo 30’da detaylı olarak verilmiştir.

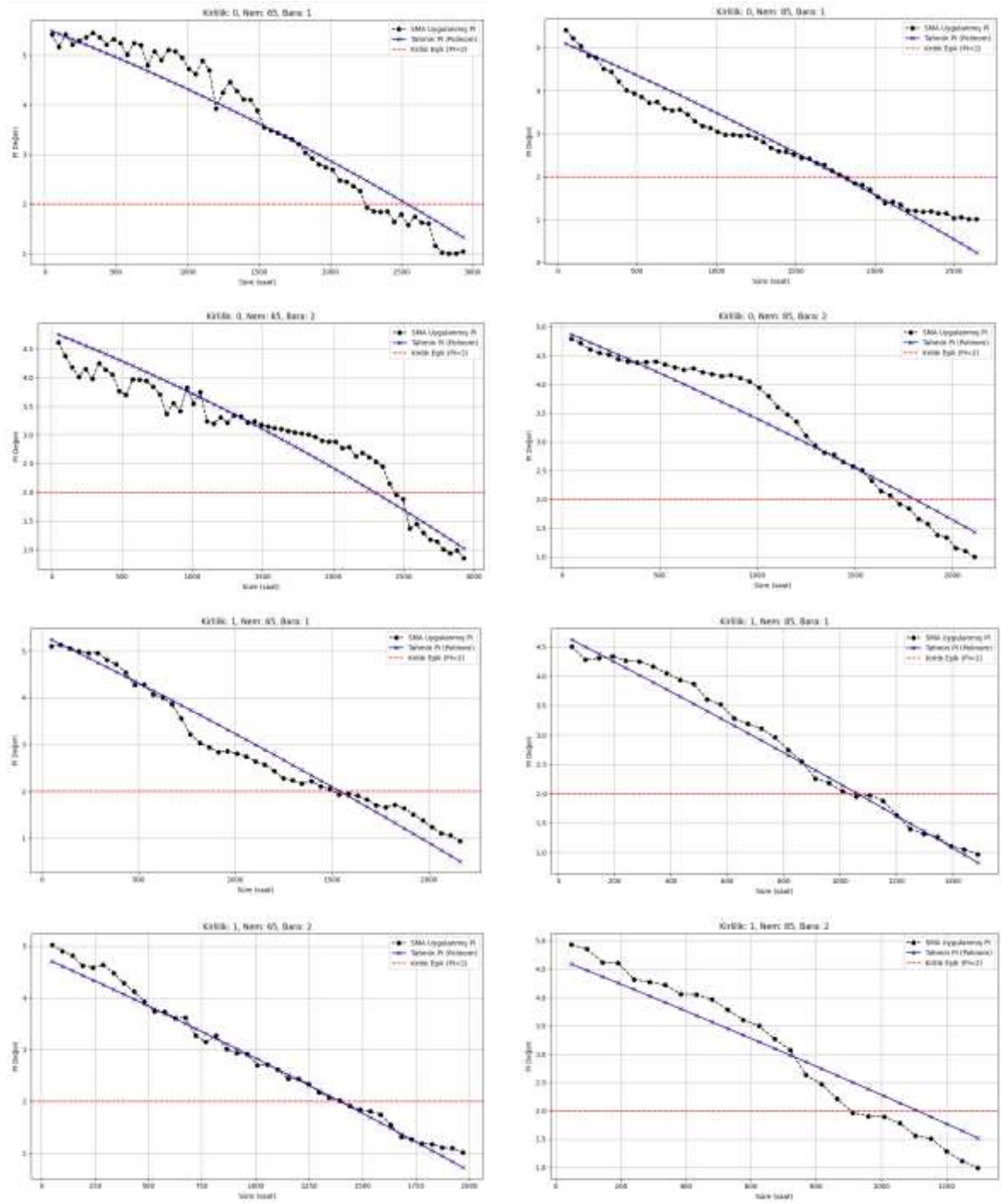
Tablo 31. Lineer Regresyon performans ölçütleri

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R^2)
Lineer Regresyon	0,249	0,851

Bu çalışmada uygulanan Lineer Regresyon modeli, veri setinin sınırlı boyutu ve gürültülü yapısına rağmen belirlilik katsayısı olan $R^2= 0,851$ skoru elde etmiştir. Bu oran, modelin veri içerisindeki varyansın yaklaşık %85’ini açıklayabildiğini göstermektedir. Ancak, özellikle PI değerlerinin süreye bağlı doğrusal olmayan değişim gösterdiği senaryolarda model yetersiz kalmış ve daha karmaşık modellerin uygulanma gerekliliğini ortaya koymuştur.

5.2.2.2. Polinom regresyon modeli bulguları

Bir başka regresyon modeli olan polinom regresyon modeli için “2. Dereceden” polinom regresyon modeli kurgulanmıştır. Basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış veri seti ile polinom regresyon modeline göre tahmin edilen PI değerlerini gösteren grafikler ayrı ayrı alınmıştır. Yapılan 8 adet farklı deneysel yaşlandırma testlerinin her biri için ayrı ayrı ilgili modelin çıktıları alınmış olup Şekil 71’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 71. Polinom Regresyon modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi

Basit hareketli ortalama (SMA) ile yumuşatılmış/düzeltilmiş PI değerleri üzerinde uygulanan ikinci derece polinom regresyon modeli, özellikle PI değişiminin doğrusal olmayan eğilim gösterdiği senaryolarda lineer regresyona kıyasla daha başarılı bir tahmin performansı sergilemiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere, polinom regresyon eğrileri, gerçek PI (polarizasyon indeksi) değerlerinin zaman içerisindeki kademeli düşüşünü daha gerçekçi biçimde izleyebilmekte ve model tahminleri ölçüm eğrisiyle daha uyumlu hale gelmektedir.

Bu durum özellikle, nem seviyesinin %85 olduğu ve kirlilik faktörünün etkili olduğu koşullarda belirginleşmektedir. Örneğin, yüksek nem içeren senaryolarda lineer model PI'daki düşüş hızını sabit varsayarak erken veya geç tahminler üretirken, polinom regresyon modeli bu eğimi esnek şekilde yakalayabilmiş ve kritik eşik olan PI=2 seviyesine daha gerçekçi bir sürede ulaşılacağını göstermiştir. Böylelikle, aşırıya kaçmadan esneklik sağlayan ikinci derece polinom yaklaşımı, hem model başarı kriterlerinden birisi olan belirlilik katsayısı (R^2) hem de fiziksel anlamlılık açısından daha güvenilir bir çözüm sunmuştur. Polinom regresyon modelinin performans metriklerinin sonuçları Tablo 32'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 32. Polinom Regresyon performans ölçütleri

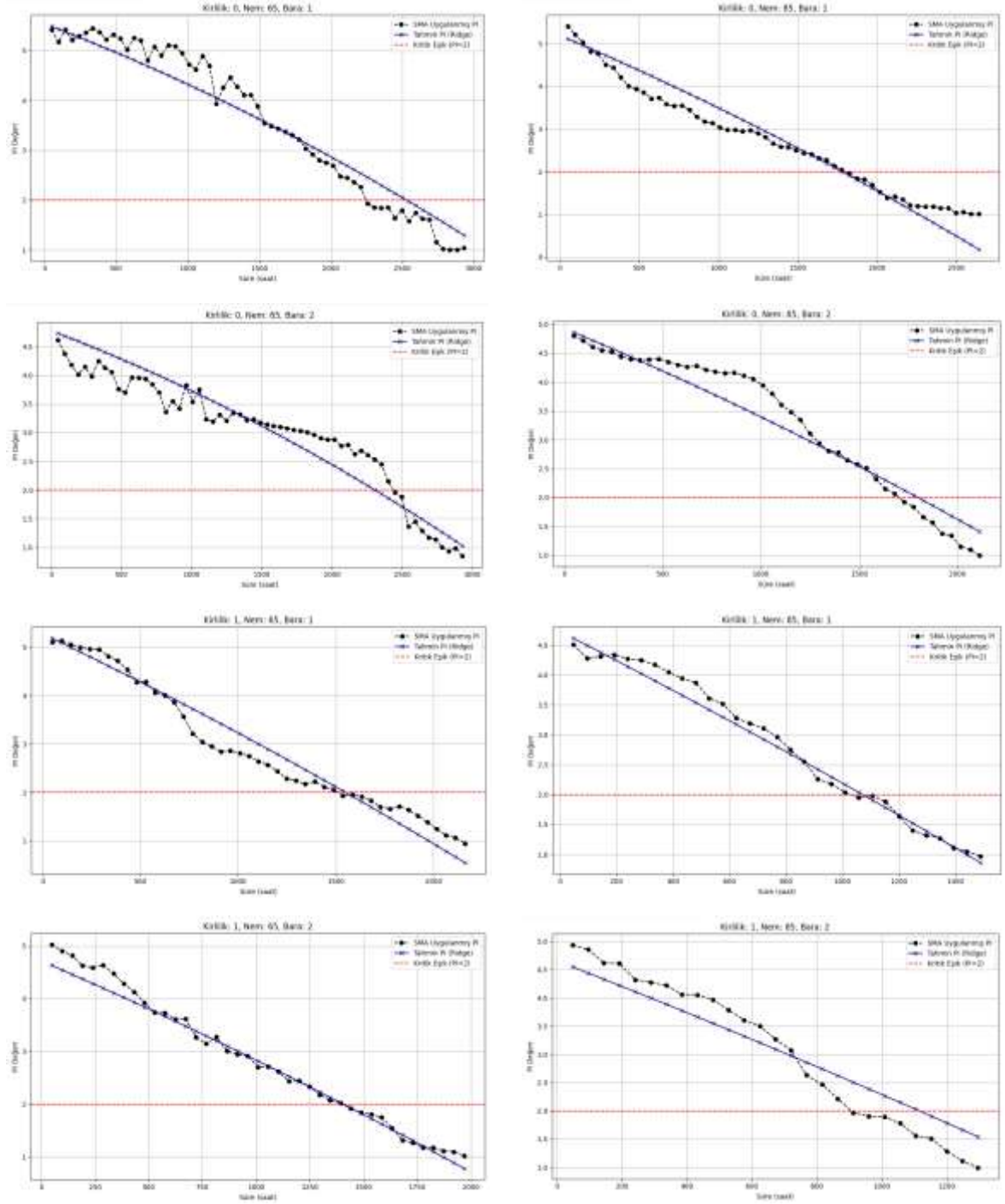
Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R^2)
Polinom Regresyon	0,094	0,945

Bu çalışmada, ikinci ve üçüncü dereceden polinom regresyon modelleri test edilmiştir. İkinci derece model, PI değerleri ile giriş değişkenleri arasındaki eğrisel ilişkiyi temsil etmede başarılı olmuş, belirlilik katsayısı değerinin $R^2 = 0,945$ gibi yüksek bir açıklama gücü sunmuştur. Modelin hem eğitim hem de test veri setlerinde dengeli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buna karşın, üçüncü derece polinom modeli bazı kombinasyonlarda veriye aşırı uyum sağlamış; özellikle veri noktalarının seyrekleştiği bölgelerde öngörülme osilasyonlar üretmiştir. Bu durum, modelin genellenebilirlik kapasitesini zayıflatmış ve fiziksel gerçeklikle örtüşmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu nedenle, nihai modelleme sürecinde ikinci derece polinom tercih edilmiştir.

Sonuç olarak, veride gözlenen eğrisel değişimleri yansıtabilme kapasitesi nedeniyle polinom regresyon modelinin, özellikle sürece bağlı PI tahminlerinde lineer modele göre daha isabetli ve genellenebilir sonuçlar sunduğu görülmüştür.

5.2.2.3. Ridge regresyon modeli bulguları

Ridge Regresyon, klasik lineer regresyona eklenen L2 normu temelli bir ceza terimi ile model katsayılarını küçülten bir L2 regülarizasyon yöntemi olarak da bilinmektedir. Basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış veri seti ile ridge regresyon modeline göre tahmin edilen PI değerlerini gösteren grafikler ayrı ayrı alınmıştır. Yapılan 8 adet farklı deneysel yaşlandırma testlerinin her biri için ayrı ayrı ilgili modelin çıktıları alınmış olup Şekil 61'de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 72. Ridge Regresyon modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi

Gerçek PI verileri ile Ridge regresyon modelinin tahmin ettiği PI değerleri karşılaştırıldığında, modelin özellikle basit hareketli ortalama (SMA -Simple Moving Average) uygulanmış veriler üzerinde oldukça tutarlı tahminler ürettiği gözlemlenmiştir. Ridge regresyonun polinom terimleri ve L2 regülarizasyonu ile doğrusal olmayan yapıları daha dengeli temsil etmesi sayesinde hem düşük nem koşullarında hem de yüksek kirlilik senaryolarında tahmin

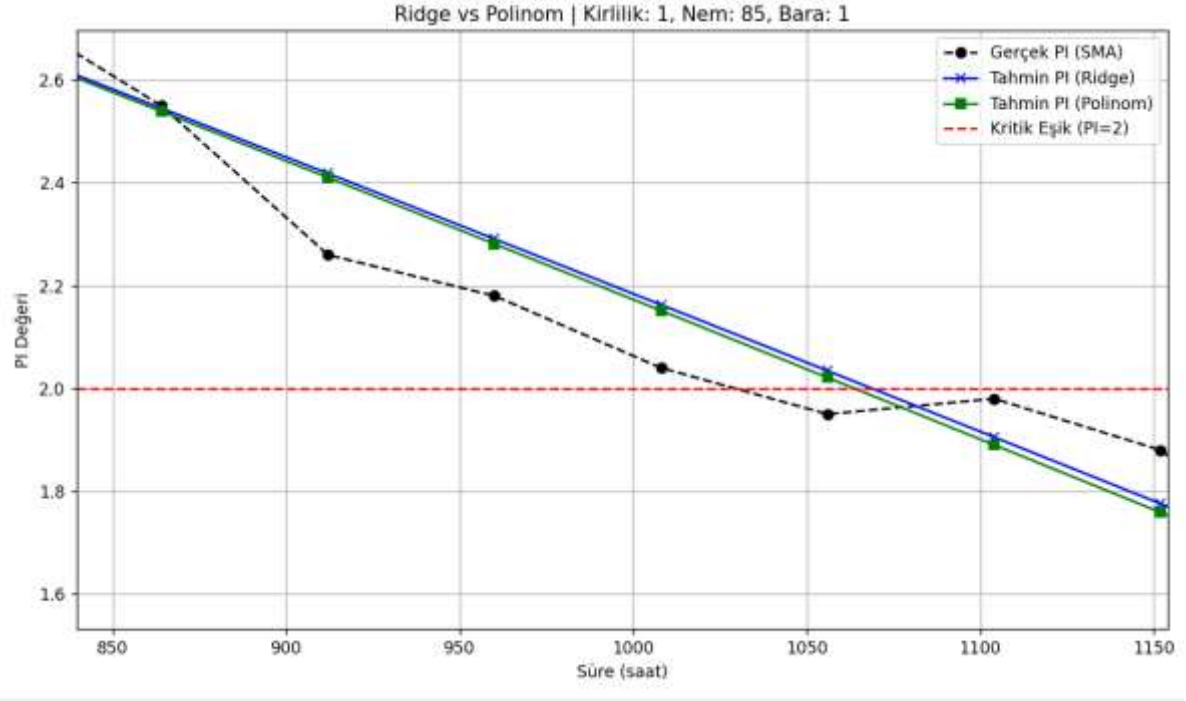
performansı artmıştır. Ayrıca grafikler incelendiğinde PI değerlerinin zamanla değişim eğiliminin Ridge modelini büyük ölçüde yakalayabildiği görülmektedir. Model, özellikle PI değerinin düzenli bir şekilde düştüğü senaryolarda (örneğin %85 nem ve düşük kirlilik durumları) referans eğriden çok az sapma ile ilerlemektedir. Diğer yandan, ani dalgalanmaların yaşandığı senaryolarda dahi tahmin eğrisi genel eğilimle paralel kalmış, bu da modelin genelleme yeteneğini koruyabildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada Ridge Regresyon modeli hem ikinci hem de üçüncü derece polinom terimlerle yapılandırılarak test edilmiştir. İkinci derece modelde, Ridge Regresyon oldukça başarılı sonuçlar üretmiş ve belirlilik katsayısı $R^2 \approx 0.945$ değerine ulaşarak hem açıklayıcılığı hem de model kararlılığını yüksek düzeyde korumuştur. Buna karşın üçüncü derece polinomla birlikte modelin karmaşıklığı artmış ve aşırı öğrenme belirtileri gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle veri yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde tahminlerde dalgalanmalara ve genellenebilirlik kaybına yol açmıştır. Bu nedenle, nihai modelleme sürecinde ikinci derece Ridge Regresyon modeli tercih edilmiştir. Polinom regresyon modelinin performans metriklerinin sonuçları Tablo 33’de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 33. Ridge Regresyon performans ölçütleri

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R^2)
Ridge Regresyon	0.093	0.945

Lineer regresyon ile karşılaştırıldığında Ridge regresyonun önemli bir avantajı, aşırı öğrenmeden kaçınarak daha stabil sonuçlar üretmesi olmuştur. Lineer modelin bazı senaryolarda yetersiz kaldığı bölgelerde, Ridge regresyon sapsmaları absorbe ederek gerçek PI eğrisine daha yakın bir tahmin eğrisi sunmuştur. Bu durum, modelin gürültüye karşı daha dayanıklı olduğunu ve özellikle değişken yapılı üretim süreçlerinde daha güvenilir tahminler sağlayabileceğini göstermektedir. Ek olarak, Ridge modelinin yüksek nem seviyelerinde (85%) ve kirli ortamlarda bile kritik PI eşik süresini anlamlı şekilde öngörebilmesi, bu modelin çevresel değişkenlere karşı duyarlılığının güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, Ridge regresyonun sadece model başarımı açısından değil, aynı zamanda endüstriyel karar destek sistemlerinde kullanılabilirlik açısından da güçlü bir aday olduğunu göstermektedir.

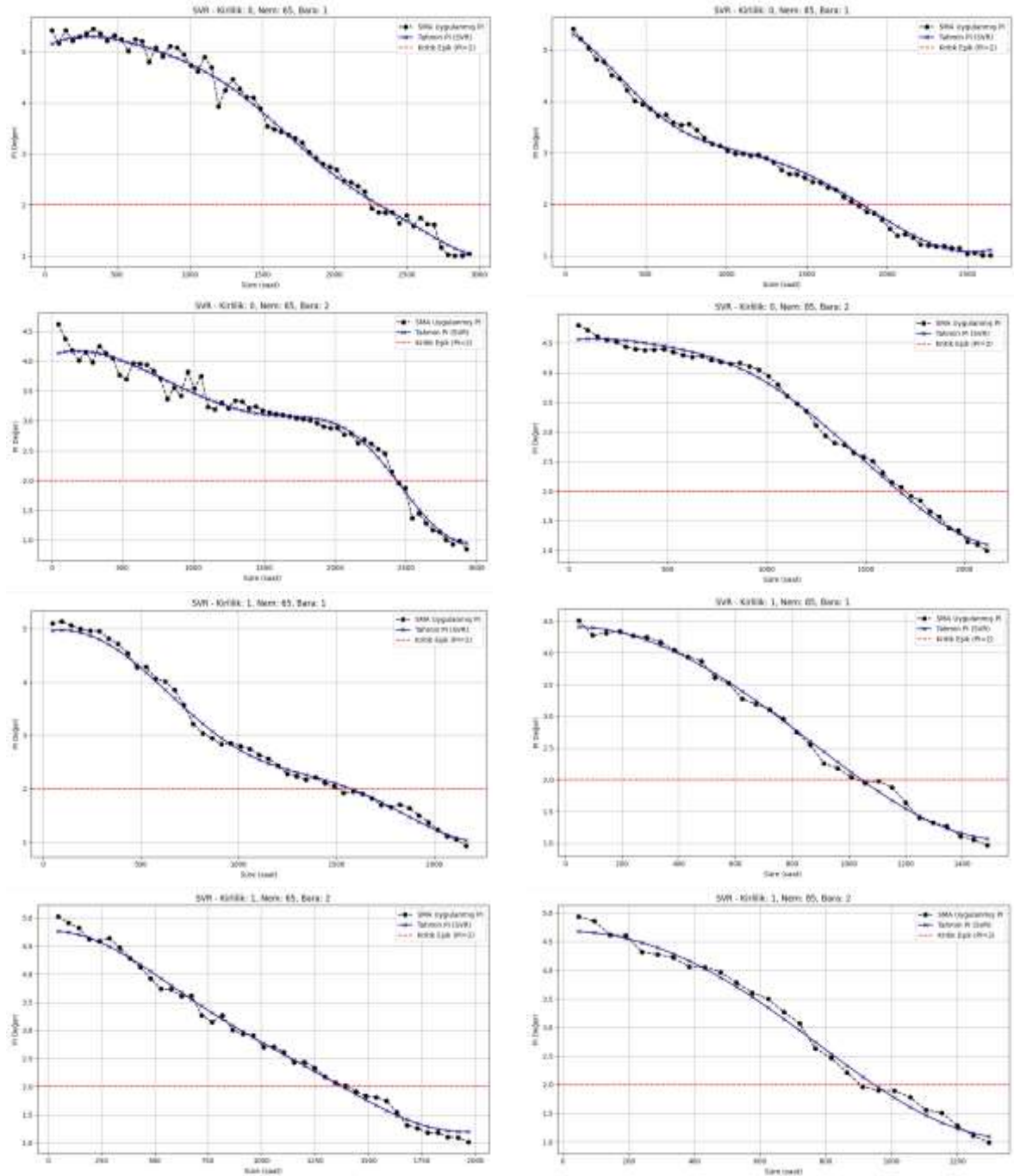


Şekil 73. Polinom ve Ridge Regresyon sonuçlarının benzerliğine dair değerlendirme

Şekil 73’de bu çalışmada kullanılan Ridge regresyon ve ikinci derece polinom regresyon modellerinin elde ettiği sonuçlara dair kıyaslamalı bir grafik gösterilmektedir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere her iki model de birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Bu yakınlığın temel nedenlerinin başında her iki modelin de benzer bir hipotez uzayında çalışması olduğu değerlendirilmektedir. Söz konusu iki model çıktılarının yakınlık göstermesinin bir diğer nedeninin de, her iki modelinde giriş değişkenleri üzerinde ikinci dereceden polinom dönüşümü uygulaması olduğu değerlendirilmiştir. Yani her iki modelde sadece doğrusal değil aynı zamanda etkileşimli ve karesel terimleri de değerlendirmeye almaktadır. Bu vesileyle tahmin fonksiyonlarının yapısal olarak birbirine çok benzemesi tahmin sonuçlarını da beraberinde birbirlerine yakınlıktır. Ancak temel fark, Ridge regresyonun bu polinom temsili L2 normu cezası ile düzenlemesidir. Bu düzenleme özellikle değişkenler arası yüksek doğrusal ilişki içeren durumlarda modelin genellenebilirliğini artırma eğilimindedir. Fakat bu çalışma kapsamında kullanılan veri setinde kullanılan özellik sayısının düşük olması (4 değişken) ve veri boyutunun yüksek olmaması durumunda Ridge regresyonun cezalandırma etkisi sınırlı kalmıştır. Böylece Ridge ile klasik polinom regresyon neredeyse aynı model parametrelerine ulaşmaktadır.

5.2.2.4. Destek vektör regresyon (SVR) modeli bulguları

Makine öğrenmesi tabanlı regresyon modellerinden biri olan destek vektör regresyon modeli uygulanarak model bulguları incelenmiştir. Basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış veri seti ile destek vektör regresyon modeline göre tahmin edilen PI değerlerini gösteren grafikler ayrı ayrı alınmıştır. Yapılan 8 adet farklı deneysel yaşlandırma testlerinin her biri için ayrı ayrı ilgili modelin çıktıkları alınmış olup Şekil 63'te de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 74. Destek vektör regresyon (SVR) modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi

Destek vektör regresyon (SVR) modellerinin PI tahminindeki başarısı tüm grafiksel karşılaştırmalarda açıkça üstün bir performans sergilemiştir. Özellikle eğrisel yapıları etkili biçimde modelleyebilme yetisi sayesinde destek vektör regresyon (SVR) hem düşük hem yüksek nem koşullarında ve farklı kalıp tiplerinde PI değerlerinin zamana bağlı değişimini yüksek doğrulukla yakalayabilmiştir. Grafiklerde destek vektör regresyon (SVR) tarafından üretilen tahmin eğrilerinin, SMA ile yumuşatılmış gerçek PI verisine olan yakınlığı, bu modelin gürültüden etkilenmeyen ve stabil bir tahmin gücü sunduğunu göstermektedir.

Lineer ve Ridge regresyon gibi modellerin daha çok ortalama eğilimi temsil edebildiği ancak gerçek eğrinin detaylarına yeterince uyum sağlayamadığı durumlarda, destek vektör regresyon (SVR) 'nin RBF kernel fonksiyonunun (radyal tabanlı çekirdek fonksiyonu) sağladığı esneklik kritik rol oynamıştır. Bu sayede hem PI'nin ani düşüş gösterdiği bölgelerde hem de eğimin yavaşladığı alanlarda destek vektör regresyon (SVR), tahmin doğruluğunu koruyarak fiziksel gerçeklikle uyumlu sonuçlar üretmiştir. Destek vektör regresyon (SVR) modelinin performans metriklerinin sonuçları Tablo 34'te detaylı olarak verilmiştir.

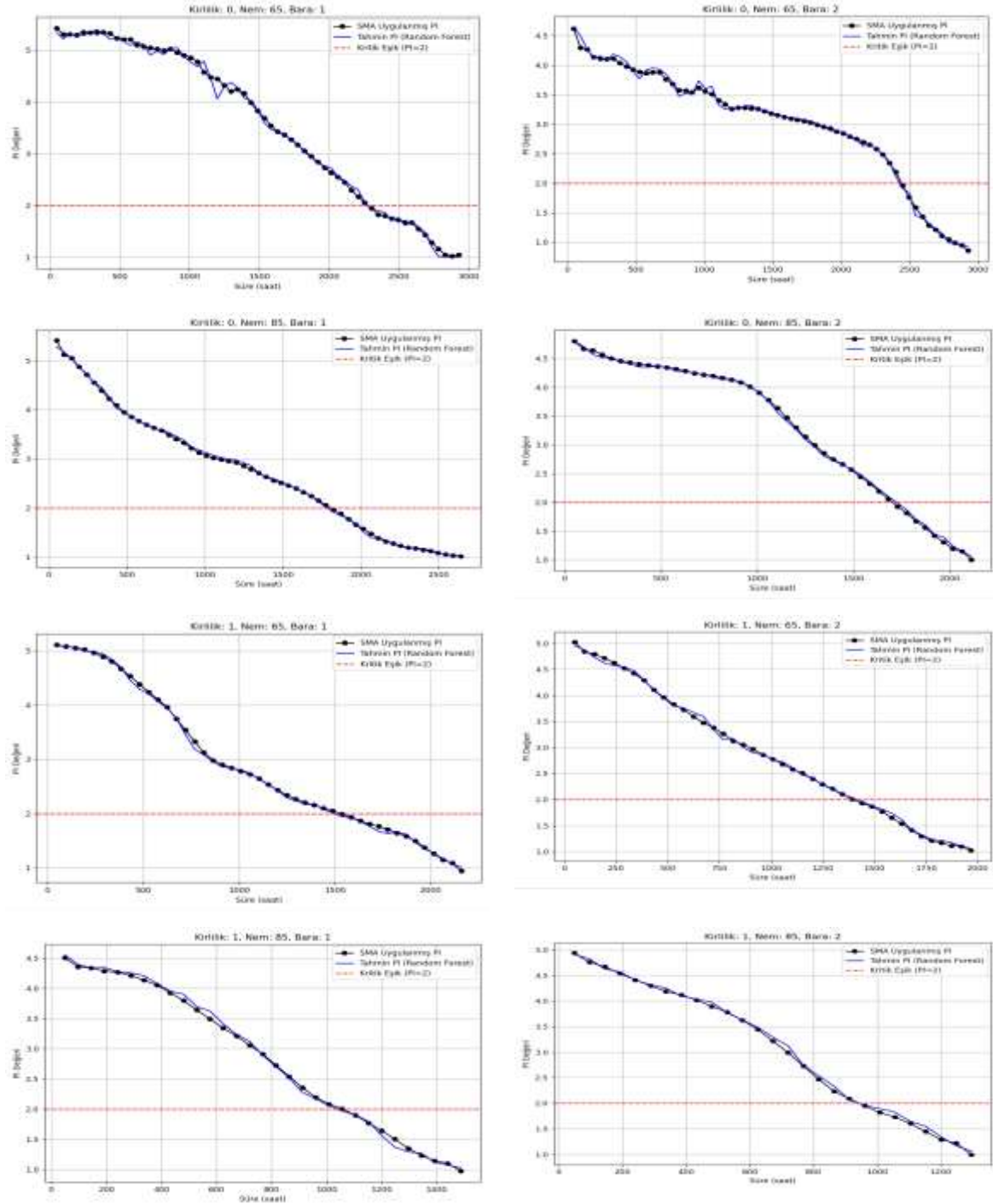
Tablo 34. Destek vektör regresyon performans ölçütleri

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R²)
Destek vektör regresyon (SVR)	0,007	0,995

Uygulamada destek vektör regresyon (SVR) modeli, tüm regresyon yöntemleri arasında en başarılı sonuçları vermiştir. RBF çekirdeği ile yapılandırılan model, özellikle PI değerlerinin zamana bağlı olarak değiştiği senaryolarda yüksek tahmin doğruluğu sağlamıştır. Grafiksel analizler destek vektör regresyon (SVR)'un tahmin eğrisinin, ölçüm verisinin fiziksel doğasıyla yüksek düzeyde uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca modelin performans kriterlerinden belirlilik katsayısının yüksek olması ve ortalama karesel hata değerinin de sifıra yakın olması modelin genellenebilirliğinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Belirlilik katsayısı R² skorlarının 0,99 üzerinde gerçekleştiği senaryolar, Destek vektör regresyon (SVR)'un sadece eğitim verisine değil test verisine de güçlü biçimde uyum sağladığını kanıtlamaktadır. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan diğer regresyon yöntemleri ile karşılaştırıldığında destek vektör regresyon (SVR), özellikle eğrisel karakter gösteren Süre/PI ilişkilerinin modellendiği durumlarda en tutarlı ve kestirimci yaklaşım olarak öne çıkmıştır.

5.2.2.5. Rastgele orman (random forest) modeli bulguları

Bir başka makine öğrenmesi tabanlı regresyon modellerinden biri olan rastgele orman modeli uygulanarak model bulguları bu bölümde incelenmiştir. Basit hareketli ortalama (SMA) uygulanmış veri seti ile destek vektör regresyon modeline göre tahmin edilen PI değerlerini gösteren grafikler ayrı ayrı alınarak Şekil 75'te toplu olarak verilmiştir.



Şekil 75. Rastgele orman (Random forest) modeli tahmin sonuçlarının grafik gösterimi

Rastgele orman (random forest) modelinin performans metriklerinin sonuçları Tablo 35’de detaylı olarak verilmiştir.

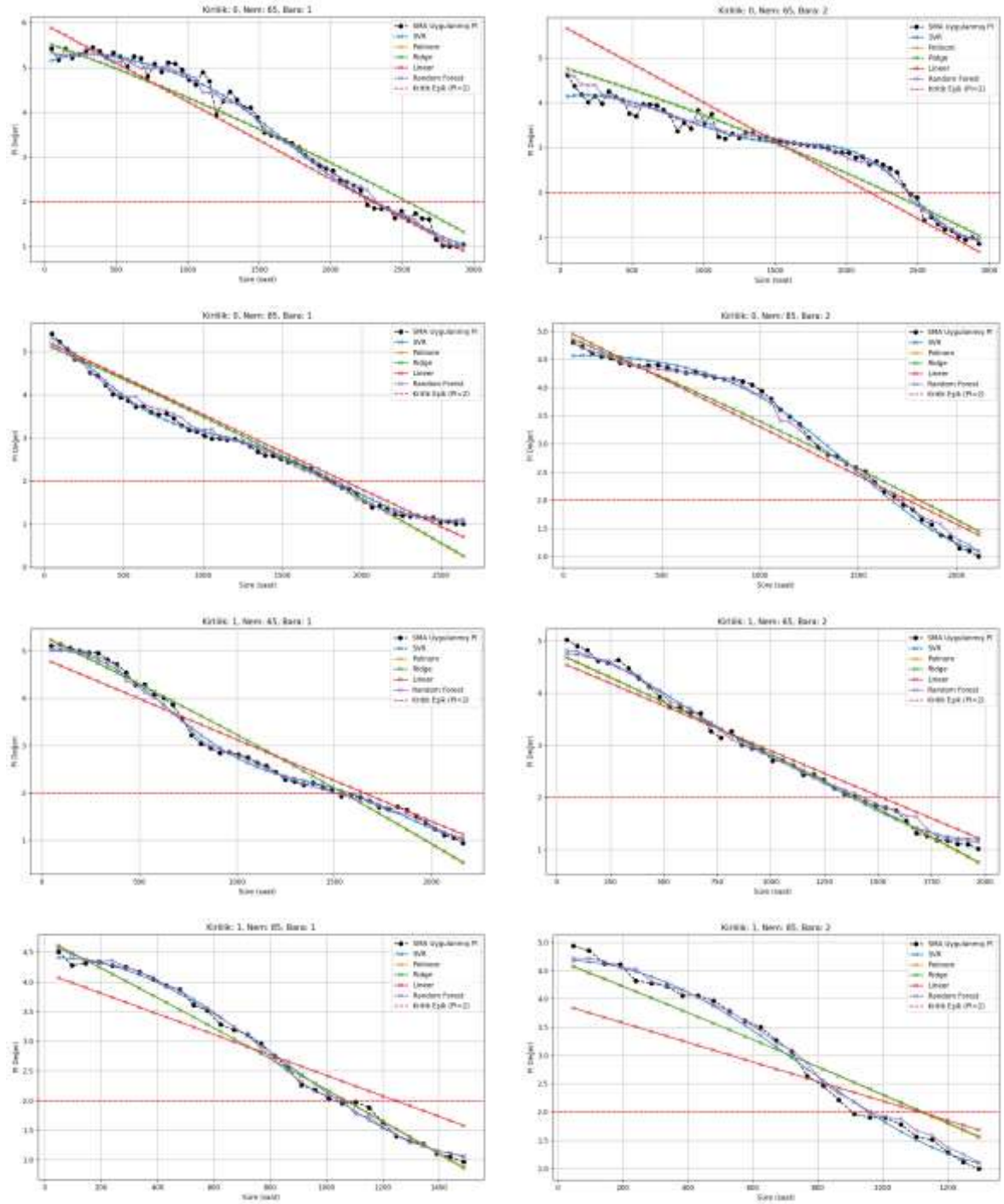
Tablo 35. Rastgele orman (random forest) modeli performans ölçütleri

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R²)
Rastgele orman (random forest)	0,013	0,993

Bu çalışmada rastgele orman (random forest) modeli, yalnızca %65 ve %85 nem koşullarında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerden oluşan veri seti üzerinde eğitilmiştir. Eğitim verileri üzerinde tatmin edici seviyede başarı elde edilmiş; model, farklı baralar ve kirlilik kombinasyonlarında istikrarlı tahminler üretmiştir. Ancak veri setinin sınırlı boyutu ve kombinasyon çeşitliliği nedeniyle, bazı senaryolarda modelin varyansla başa çıkmakta zorlandığı ve çıktılar arasında küçük sapmalar oluştuğu gözlemlenmiştir. Buna rağmen rastgele orman (random forest) modeli, yapısal esnekliği sayesinde özellikle düşük gürültülü alt kümelerde başarılı sonuçlar üretmiştir.

5.2.3. Modelleme bulgularının bütünsel incelemesi

Uygulanan farklı modelleme yaklaşımlarının yine farklı deney şartlarındaki grafiksel gösterimlerini içeren görseller Şekil 76’da verilmiştir. Söz konusu grafiklerde her bir deney sonucunda ki gerçek PI değerleri ile ilgili modelin tahmini PI değerleri arasındaki fark ve yakınlık görselleştirilmiştir.



Şekil 76. Tüm modellere dair tahmin sonuçlarının grafik gösterimi

Basit hareketli ortalama uygulanmış PI Veri setinin, 5 farklı modelleme yöntemine karşı tahmin yeteneğini gösteren model performans ölçütlerinin tümü Tablo 36’te verilmiştir.

Tablo 36. Modellerin performans ölçütlerine dair özet tablo (MSE ve R2 değerleri)

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R ²)
Lineer Regresyon	0,249	0,851
Polinom Regresyon (d=2)	0,094	0,945
Destek Vektör Regresyon (SVR)	0,007	0,995
Rastgele Orman (Random Forest)	0,013	0,993
Ridge Regresyon (d=2)	0,093	0,945

Tablo 36'dan anlaşılacağı üzere en yüksek belirlilik katsayısı (R²) değeri veren modelin Destek vektör regresyon (SVR) modeli olduğu en önemli bulgular arasında yer almaktadır. Ayrıca yine tabloda en düşük ortalama karesel hata değeri veren modelleme yönteminin de Destek Vektör Regresyon (SVR) modeli olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan hareketle her iki performans metriği için de en iyi sonucu veren modelin ortak olarak Destek Vektör Regresyon (SVR) modeli olduğu bulgusuna varılmaktadır.

5.3. PI Eğrisinin Ortalama Eğim Bulguları

Polarizasyon indeksi (PI) eğrisinin ortalama düşüş hızı, belirli bir deney verisi için (örneğin bara no, kirlilik durumu, nem seviyesi) için polarizasyon indeksi (PI) değerinin ne kadar hızlı azaldığını gösteren ortalama bir ölçüttür. Matematiksel olarak şu şekilde tanımlanır:

$$\text{Ortalama Düşüş Hızı} = \frac{\text{Başlangıç PI} - \text{Bitiş PI}}{\text{Toplam Süre}} \quad (5.1)$$

Bir başka ifadeyle her bir koşul durumunda (bara no, kirlilik ve nem kombinasyonları için), veriler artan zaman sırasına göre sıralanmış, ardından başlangıç ve bitiş arasındaki PI farkı (ΔPI) ve süre farkı (Δt) hesaplanmıştır. Elde edilen farklar yardımıyla düşüş hızı aşağıdaki formül ile belirlenmiştir:

$$PI \text{ Düşüş Hızı} = -\frac{\Delta PI}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Bu ifade, belirli bir deney senaryosunda alınan gerçek polarizasyon indeksi (PI) değerlerindeki toplam değişimin, bu değişimin gerçekleştiği süreye oranı olarak tanımlanmıştır. Söz konusu

tanım ve matematiksel ifadeye göre ortaya çıkan PI Düşüş Hızı (eğim) değerleri Tablo 37’da gösterilmiştir.

Tablo 37. PI değişim eğrisinin zamana bağlı ortalama eğim analiz değerleri

Bara No	Kirlilik Durumu	Nem (% Rh)	Ortalama PI Düşüş Hızı (PI/saat)
1	0	65	0,001520
1	0	85	0,001698
1	1	65	0,001973
1	1	85	0,002458
2	0	65	0,001307
2	0	85	0,001841
2	1	65	0,002085
2	1	85	0,003159

Tablo 37’den anlaşılacağı üzere ortalama PI düşüş hızı ölçütünün en yüksek olduğu deney senaryosunun, 2 nolu baraya %85 nem maruziyet durumu ve kirlilik uygulaması şartlarında olduğu en önemli bulgular arasındadır. Aynı şekilde düşük nem ve temiz sargı durumlarında PI Düşüş Hızı ölçütünün de kademeli olarak azaldığı bariz şekilde görülmektedir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Senkron generatörler gibi elektrik enerjisi arz güvenilirliği ve sürdürülebilirliği konularında çok büyük önem arz eden elektrik makinelerine dair sargı yalıtım arızalarına etki eden işletme koşullarındaki etkenler, yalıtım arızalanma süreçlerine dair modelleme yaklaşımları ve iyileştirme süreçleri gibi önemli konular bu çalışma içeriğinde incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçek bir işletme ortamında ve gerçek bir generatöre ait sargıların yine işletme ortamında maruz kalabileceği kirlilik ve nem koşulları gibi etkenlerin uzun dönemli deneysel verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu deneysel veriler söz konusu sargı yalıtımının ilgili yaşlandırma etkileri altındaki davranışı ile ilgili çok önemli sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin, farklı modelleme algoritmaları kullanılarak modellenmesi ve modellerin performanslarının ortaya konulması da ilgili alan yazında gelecek çalışmalar için önemli bir tespit niteliğinde olacaktır. İlave olarak bu tez çalışması ile endüstriyel uygulamalarda ve ilgili mühendislik çalışmalarında, kestirimci bakım yaklaşımı ile yalıtım durumunun analiz edilmesi, tahminlenebilmesi ve sargı yalıtımı iyileştirme çalışmalarının planlanabilmesi hususlarına dair katkılar sağlanmıştır.

Sargı yalıtımına dair işletme ortamında yapılan deneysel çalışmalar, nem ve kirlilik gibi çevresel yaşlandırma etkilerinin sargıların yalıtım direncini ve polarizasyon indeksi değerlerini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Söz konusu bu etki test gerilimi altında hem yalıtım direnci mertebesinin düşmesi hem de polarizasyon indeksi gibi oransal parametrelerin düşmesi şeklinde vuku bulmuştur.

Deney numunelerinin her ikisi içinde (Bara-1 ve Bara-2) nemli ortam maruziyeti hem sargıların yalıtım direncini ve polarizasyon indeksi değerlerini düşürücü yönde etki etmiştir. Bu kapsamdaki bulgular incelendiğinde genel olarak nem oranı arttıkça polarizasyon indeksi (PI) değerlerinde düşüş gözlemlendiği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca %85 nem oranında, %65 nem oranına göre sargıların yalıtım direncinde ve polarizasyon indeksi (PI) değerlerinde daha hızlı bir azalma eğilimi oluşmuştur. Özellikle %85 nem değerine sahip ölçümlerde PI kritik eşik seviyelerine ($PI < 2,0$) daha kısa sürede ulaşmıştır. Tablo 37’de temiz bir sargıda PI değerlerinin kritik eşik değerlerin altına düşüş sürelerine dair sonuçlar ve nem durumunun etkisine dair verilerin olduğu bilgiler analiz edilerek sunulmuştur.

Tablo 38. Temiz bir sargıda nemlilik etkisinin analizi tablosu (PI<2,0 değerine düşüş süresi)

	NEM	KİRLİLİK	PI<2	PI<2 SÜRE DÜŞÜŞ ORANI
BARA 1 (13,8 kV)	65%	TEMİZ	2256	19,15%
BARA 1 (13,8 kV)	85%	TEMİZ	1824	
BARA 2 (6,3 kV)	65%	TEMİZ	2448	29,41%
BARA 2 (6,3 kV)	85%	TEMİZ	1728	

Tablo 38'den de anlaşılacağı üzere temiz durumdaki sargılara uygulanan ortam bağıl nem değerinin %65 değerinden %85 değerine getirilmesi, Bara-1 nolu sargı için %19,15, Bara-2 nolu sargı için %29,41 oranında daha hızlı olarak kritik eşik değere ulaşması şeklinde sonuçlanmıştır.

Kirli bir sargıdaki PI değerlerinin kritik eşik değerlerin altına düşüş sürelerine dair sonuçlar ve nem durumunun etkisine dair verilerin olduğu bilgiler analiz edilerek Tablo.39 'da detaylı olarak verilmiştir. Buradan hareketle kirli bir sargıdaki ortam nemi ve neme maruz kalma süresine dair kıyaslamalar yapılabilmektedir.

Tablo 39. Kirli bir sargıda nemlilik etkisinin analizi tablosu (PI<2,0 değerine düşüş süresi)

	NEM	KİRLİLİK	PI<2	PI<2 SÜRE DÜŞÜŞ ORANI
BARA 1 (13,8 kV)	65%	KİRLİ	1536	31,25%
BARA 1 (13,8 kV)	85%	KİRLİ	1056	
BARA 2 (6,3 kV)	65%	KİRLİ	1440	36,67%
BARA 2 (6,3 kV)	85%	KİRLİ	912	

Tablo 39'dan de anlaşılacağı üzere kirli durumdaki sargılara uygulanan ortam bağıl nem değerinin %65 değerinden %85 değerine getirilmesi, Bara-1 nolu sargı için %31,25, Bara-2 nolu sargı için %36,67 oranında daha hızlı olarak kritik eşik değere ulaşması şeklinde sonuçlanmıştır.

Yapılan analiz sonuçlarından hareketle hem temiz sargılarda hem de kirli sargılarda ortam bağıl nem miktarının artması yalıtım direnci ve polarizasyon indeksini düşürme yönünde etki gösterdiği bariz şekilde görülmektedir. Bunun yanı sıra kirli sargılarda nem değerinin %65 den %85'e çıkması ortalama %33,96 daha hızlı bir PI düşme oranı ile sonuçlanırken bu durum temiz sargılar dikkate alındığında %24,28 daha hızlı bir PI düşme oranı ile sonuçlanmaktadır. Bu

sonuçlar, kirli sargıların nem hassasiyetinin temiz sargılardan bariz şekilde fazla olduğu sonucun net şekilde ortaya koymaktadır.

Kirlilik durumu da özellikle dış ortama açık halde çalışan elektrikli sistemlerde yalıtım performansını etkileyen kritik bir faktördür. Kirlilik durumunun ilgili yalıtım performansı ölçütü olan Polarizasyon indeksine etkisinin incelenmesi için temiz sargı yüzeyi ve kirli sargı yüzeyi durumları dikkate alınarak çıkarımlar yapılmış olup Tablo.40.'da verilmiştir.

Tablo 40. Aynı nem Şartlarında kirlilik etkisinin analizi tablosu (PI<2,0 değerine düşüş süresi)

	NEM	KİRLİLİK	PI<2	PI<2 SÜRE DÜŞÜŞ ORANI
BARA 1 (13,8 kV)	65%	TEMİZ	2256	31,91%
BARA 1 (13,8 kV)	65%	KİRLİ	1536	
BARA 1 (13,8 kV)	85%	TEMİZ	1824	42,11%
BARA 1 (13,8 kV)	85%	KİRLİ	1056	
BARA 2 (6,3 kV)	65%	TEMİZ	2448	41,18%
BARA 2 (6,3 kV)	65%	KİRLİ	1440	
BARA 2 (6,3 kV)	85%	TEMİZ	1728	47,22%
BARA 2 (6,3 kV)	85%	KİRLİ	912	

Tablo 40'dan da anlaşılacağı üzere aynı nem değerlerine maruz kalan sargılarda kirlilik uygulanması, Bara-1 nolu sargı ve %65 nem durumu için %31,91, Bara-2 nolu sargı ve %65 nem durumu için %41,18, Bara-1 nolu sargı ve %85 nem durumu için %42,11 ve Bara-2 nolu sargı ve %85 oranında nem durumu için %47,22 oranında daha hızlı olarak kritik eşik değere ulaşması Şeklinde sonuçlanmıştır. Bu bulgulardan hareketle temiz sargıların PI değerlerinde zamanla azalma daha yavaş gerçekleştiği sonucuna varılmaktadır.

Nem ve kirlilik etkisinin ortak Şekilde azami düzeyde olması durumunda ise PI değerinin kritik eşik değer olan 2,0 değerinin altına düşme süresi (912 saat) en kısa sürede gerçekleşmiştir. Yani nem ve kirlilik durumunun ortak etkisi bariz Şekilde yalıtım direnci ve polarizasyon indeksine en olumsuz etki eden kombinasyon olmuştur.

Özetle bağımlı değişken olarak seçilen Polarizasyon İndeksi (PI) değerlerinin çevresel koşullardaki (nem ve kirlilik) değişimlerden doğrudan etkilendiği grlmştir. Hem nem oranı hem de kirlilik durumu gibi değişkenler yalıtım direncinde zamanla meydana gelen bozulmayı hızlandırarak PI değerlerinde ve PI düşme eğilimlerinde önemli etkiler doğurmuştur.

İyileştirme çalışmaları kapsamında yapılan kirlili ve nemli sargılardaki kurutma ve temizlik işlemlerine dair bulgular incelendiğinde, bütün yaşlandırılmış deney numunelerinde uygulanan iyileştirme adımlarının sargıların polarizasyon indeksi değerleri başarılı şekilde yükselttiği ve işletmeye alınabilir seviyelere çıkarttığı sonucuna varılmıştır. Bu kısımda özellikle sargının harici olarak ısıtılması yöntemiyle kurutulması şeklindeki uygulamadan sonra sargının soğurken tekrar nem almaması için uygun ortam koşullarının sağlanması önem arz etmektedir. Ayrıca kimyasal çözücülerin sargı yüzeyinde kalıntı bırakmaması ve uzun sürelerde sargıyı aşındırıcı etki oluşturmaması adına detaylı temizlik ve uygun havalandırma koşullarının sağlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada ayrıca yüksek gerilimli elektrik makinelerinde stator sargı yalıtım sağlığını izlemek ve değerlendirmek amacıyla ölçülen yalıtım direnci değerine bağlı Polarizasyon İndeksi (PI) parametresinin zaman içindeki değişimini modelleyebilmek adına farklı regresyon algoritmaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ancak modelleme sürecinin doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerden birinin verinin yapısal gürültü içermesi ve ölçüm kaynaklı dalgalanmaları olabileceği önemli bir tespit olmuştur. Özellikle PI değerlerinin zamanla alınan deneysel ortam koşullarına (nem, kirlilik gibi) bağlı olarak değişmesi nedeniyle yüksek varyansa sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple doğrudan ham PI değerleri baz alınarak modelleme çalışmalarının yapılmasının modellerin öğrenme kapasitesini olumsuz etkileyebileceği sonucuna varılmıştır. Söz konusu problemin aşılması hususunda, hareketli ortalama gibi gürültü azaltma yöntemlerinin modelleme performanslarını olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu kısımda yapılan gürültü azaltma yöntemlerinden Basit Hareketli Ortalama uygulamasının her bir modelleme yöntemi için hem belirlilik katsayısı (R^2) hem de ortalama karesel hata (MSE) ölçütlerinde olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla ölçüm hataları, ortam koşullarındaki kısmi ve anlık değişimler gibi etkilerin bertaraf edilmesi konusunda gürültü azaltma yöntemlerinin uygulanması gerekliliği bariz şekilde ortaya çıkmıştır.

Yapılan modelleme çalışmalarında 5 (beş) farklı modelleme yöntemi uygulanmış olup bu yöntemler hem geleneksel istatistiksel modelleme hem de modern makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımları temsil etmesi açısından çeşitlendirilmiştir. Bu çeşitli modelleme algoritmalarında kullanılan performans metrikleri de standart hale getirilmiş olup, 2 (iki) farklı performans ölçütü kullanılmıştır. Bu ölçütlerden ilki, modelin ilgili veri setini tahmin kabiliyeti veya

açıklama gücünü belirten belirlilik katsayısı (R^2) ölçütüdür. Diğer bir performans metriği ise modelin tahmin hatalarının karesi olarak açıklanan ortalama karesel hata (MSE) ölçütüdür.

İstatistiksel modelleme yaklaşımları olan Lineer Regresyon ve Polinom Regresyon yöntemleri kıyaslandığında polinom regresyon modelinin Tablo.41 'da verildiği gibi çok daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 41. İstatistiksel modelleme yöntemleri performans ölçütleri

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R^2)
Lineer Regresyon	0,249	0,851
Polinom Regresyon (d=2)	0,094	0,945

Lineer Regresyon, polarizasyon indeksinin (PI) bağımlı değişken olarak doğrusal bir fonksiyonla modellenmesini esas alır. Ancak bu model, polarizasyon indeksinin (PI) zamana bağlı olarak monoton ancak doğrusal olmayan düşüş eğilimini yakalamada yetersiz kalmıştır. Veri setindeki lineer olmayan eğilimler ve ortam koşullarının bütünsel etkileri dikkate alındığında, veri setindeki eğilimin 2. Dereceden bir eğri ile daha başarılı şekilde modellenebildiği sonucuna varılmıştır.

Makine öğrenmesi tabanlı olan ve regülarizasyon teknikleri ile donatılmış diğer modern modelleme yaklaşımları ile yapılan çalışmalar sonucunda ki performans durumları Tablo.42. de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 42. Makine öğrenmesi tabanlı modelleme çalışmaları performans ölçütleri

Modelleme Yöntemi	Ortalama Karesel Hata (MSE)	Belirlilik Katsayısı (R^2)
Destek Vektör Regresyon (SVR)	0,007	0,995
Rastgele Orman (Random Forest)	0,013	0,993
Ridge Regresyon (d=2)	0,093	0,945

Ridge Regresyon modelinin performans sonuçları detaylı olarak incelendiğinde polarizasyon indeksinin (PI) zamana bağlı eksponansiyel benzeri azalış davranışlarına uyum sağlamada diğer modellere göre daha başarısız kaldığı görülmüştür. Yine de bu modelin Polinom regresyon ile

çok yakın, hatta ortalama karesel hata (MSE) yönünden çok az da olsa daha iyi bir performans gösterdiği sonuçlardan açıkça görülmektedir.

Rastgele Orman (Random Forest) modelleme yaklaşımı, karar ağacı temelli bir topluluk modeli olması sebebiyle değişkenler arası etkileşimleri başarıyla modelleyebilme yeteneğine sahiptir. Bu model genel olarak gayet başarılı sonuçlar vermiş olsa da özellikle yüksek varyansa sahip zaman serilerinde, ortalama eğilimi öne çıkarma eğiliminde olduğundan, bazı durumlarda polarizasyon indeksi (PI) değerlerindeki ani kırılmaları veya lokal değişimleri en iyi yansıtan model olamamıştır.

Destek vektör regresyon (SVR) modelleme algoritması sonuçlarına bakıldığında, veri setindeki kırılmaları ve anlık değişimleri en iyi yakalayan modelleme yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu model verideki doğrusal olmayan yapıları modelleyebilen kernel tabanlı bir regresyon modelidir ve RBF (Radial tabanlı fonksiyon) kernel fonksiyonu ile çalışmaktadır. Destek vektör regresyon modeli (SVR) hem kısa hem uzun vadeli PI davranışlarını başarılı biçimde tahmin edebilmiş, özellikle PI'nin kritik eşik olan 2.0 seviyesine ulaşma süresini doğru öngörebilmiştir. Modelin doğruluğu hem belirlilik katsayısı (R^2) skoru ($R^2 = 0.995$) hem de ortalama karesel hata değerinin ($MSE = 0,007$) çok üst düzey seviyelere ulaşması ile somut olarak gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen modelleme analizleri sonucunda, özellikle destek vektör regresyon (SVR) algoritması, elde ettiği yüksek R^2 skorları ve düşük ortalama karesel hata (MSE) değerleri ile diğer tüm modellerin üzerinde bir başarı göstermiştir. Destek Vektör Regresyonu (SVR), verideki doğrusal olmayan ilişkileri yakalama kabiliyeti ve Radyal tabanlı bir fonksiyon kullanımı sayesinde, PI gibi zamanla değişen, ölçüm gürültüsüne maruz kalan ve yapısal olarak doğrusal olmayan eğilimler içerebilen bir parametreyi en iyi şekilde modelleyebildiği görülmüştür. Ayrıca, Basit Hareketli Ortalama (SMA) veri ön işleme ve gürültü azalması yöntemi uygulanarak, zaman serisi doğasındaki ham verilerdeki dalgalanma ve ölçüm hatalarının etkisi azaltılması sağlanmıştır. Sonuç olarak uygulanan gürültü azaltma yönteminin de modellerin genelleme performanslarına olumlu etki sağladığı tespit edilmiştir.

6.1. Öneri

Senkron generatörler, yüksek ekonomik değerlere sahip olması ve ulusal enerji arz güvenliği açısından da kritik rol oynaması gibi sebeplerle büyük önem taşımaktadır. Özellikle büyük güçlü hidrolik santraller vasıtasıyla yapılan enerji arzı sürecinde rol alan senkron generatörlerin kestirimci bakım uygulamaları ile işletme ve bakım süreçlerinin desteklenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu doğrultuda sargı yalıtım durumlarının özellikle işletme ortamında yapılabilecek yalıtım direnci gibi testler ile sürekli izlenmesi ve uzun dönem verilerinin kayıt altına alınmasının öncelikli operasyonel yaklaşım olması gerektiği kanaatine varılmaktadır. Doğru Akım (DC) Sargı Yalıtım Direnci testleri gibi hem sargıya zarar vermeyen hem de uygulama yönünden güvenlik risklerinin asgari düzeyde olduğu bir yaklaşım ile bakım çalışmalarının standart hale getirilmesi önem arz etmektedir. Bununla birlikte veri analiz ve tahmin algoritmaları ile uzun dönem veri envanterlerinin modellenmesi, sargı ömrü ve arıza tahmini gibi süreçleri de daha öngörülebilir hale getirebilecektir.

İşletme ortamının doğası gereği maruz kalınabilecek nem ve kirlilik (türbin yağı ve kömür tozu gibi) etkenlerinin, sargının yalıtım kondisyonunu düşürücü etkisi dikkate alınarak periyodik yalıtım direnci testleri ile operasyonel durum izleme metodolojilerinin oluşturulması kuvvetle önerilmektedir. Bununla birlikte sargı yalıtımına dair işletme ortamında yapılabilecek önleyici ve düzeltici bakım uygulamalarına, temizlik ve kurutma gibi ilave iyileştirme süreçlerinin eklenmesi sargı operasyonel ömrünün uzatılmasına olanak sağlayacaktır.

Sargı yalıtımı ve ortam kirliliği ölçümleri için çevrim içi kirlilik tespiti yapabilecek ve bu ölçümü santral izleme (SCADA) sistemlerine adapte edebilecek bir endüstriyel ürün geliştirilmesi ile birlikte durum izleme metodolojisi çok daha verimli hale getirilebilir.

Özellikle büyük güçlü senkron generatörlerin büyük bir kısmının Çin ve Hindistan gibi deniz aşırı ülkelerden deniz yolu ile nakliye süreçlerinin gerçekleştiği bilinmektedir. Bu sebeple generatör sargılarının aylar süren deniz yolu taşımacılığı süreçlerinde maruz kalabileceği nemli ortam ve maruziyet süresi gibi koşullar dikkate alınarak ilk devreye alma testleri mutlaka gerçekleştirilmelidir. Senkron generatörlerin ilk devreye alma süreçlerinde de uygulanabilecek sargı yalıtım direnci testleri ve polarizasyon indeksi kriterleri sargının nemlilik durumu ve işletmeye alınıp alınamayacağına dair mutlak bilgiler verebilecektir. Bu testlerin sonucunda gerek görülmesi halinde kurutma işlemine karar verilip süreç kontrollü olarak takip edilmelidir.

Santral bakım ve izleme yazılımlarına ilave edilebilecek durum izleme algoritmaları ile periyodik olarak yapılan yalıtım direnci, Polarizasyon indeksi gibi ölçümler kaydedilebilir. Bu veri tabanında ki veri kümesine göre bir tahmin / çıkarım algoritması eklenerek kestirimci ve önleyici bakım çalışmalarına yön verecek bir altyapı oluşturulması önerilmektedir.

Modern makine öğrenmesi yöntemlerinin sargı yalıtımı bozulması veya yaşlanmasına dair çalışmalarda daha geniş veri setleri kullanılarak uygulanması daha başarılı tahmin sonuçlarını doğurabilecektir. Bu alandaki hibrit yaklaşımlarla birden çok modelin bir araya getirilerek kullanımına dair çalışmaların da artması hem sektörel hem de akademik alanda önemli gelişmelere sebebiyet verebilecektir.

KAYNAKÇA

- Afrandideh, S., Milasi, M. E., Haghjoo, F., & Cruz, S. A. (2020). Turn to turn fault detection, discrimination and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(1), 292–301.
- Akın, E., & Orhan, A. (2004). *Elektrik makinalarının temelleri*. Birsen Yayınevi.
- Akıncı Generatör ve Motor. (2017, 17 Kasım). *Motor ısı sınıfları*. <https://akincigeneratörvemotor.com.tr/wp-content/uploads/2023/10/MOTOR-ISI-SINIFLARI.pdf>
- Albayrak, A., & Kaynaklı, M. (2024). *Kestirimci bakım teknolojileri*. Duvar Yayınları.
- Alkesaiberi, A., Harrou, F., & Sun, Y. (2022). Efficient wind power prediction using machine learning methods: A comparative study. *Energies*, 15, 2327.
- Alstom, H. (2007). *Operation, maintenance manual of senkron generator*. Seyrantepe HEPP.
- Altay, L., Sarikanat, M., Sağlam, M., Uysalman, T., & Seki, Y. (2021). The effect of various mineral fillers on thermal, mechanical, and rheological properties of polypropylene. *Journal of Research on Engineering Structures and Materials*, 7(3), 361–373.
- Andritz Hydro. (2010). *Installation, operation & maintenance manual – Excitation system of Alkumru* (Project No. H110.080084, Document No. ALK08-GEN9318). Teknik doküman.
- Aydoğmuş, Z. (2000). *Yüksek gerilim izolatörlerinde kirlenme atlama dinamik ark modeli* (Doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barré, O., & Napame, B. (2008). The insulation for machines having a high lifespan expectancy, design, tests and acceptance criteria issues (Review). *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(1), 7.
- Benli, H. (2013). Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies. *Renewable Energy*, 50, 33–46.
- Bernardes Junior, J. V. (2021). *Estimation of the remaining useful life of hydro generators*. Universidade Federal de Itajuba.
- Bhumawat, S. A. (2011). Insulation resistance and polarization of rotating machines. *Electrical Insulation Conference*.
- Boduroğlu, T. (1988). *Elektrik makinaları dersleri* (3. baskı). Beta Basım Yayın Dağıtım.
- Bolhuis, J. P., Gulski, E., & Smit, J. J. (2002). Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(2), 528–536.
- Brown, A. (2011). Insulation resistance measurements for machine insulation. *Electrical Insulation Conference*.
- Brown, A., David, E., & Essalihi, M. (2011). Insulation resistance measurements for machine insulation. *Electrical Insulation Conference* (pp. 261–264). Annapolis, MD, United States.
- Brütsch, R., Tari, M., Fröhlich, K., Weiers, T., & Vogelsang, R. (2008). Insulation failure mechanisms of power generators [Feature article]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(4), 17–25. doi:10.1109/MEI.2008.4581636
- Bulutistan. (2025, 21 Kasım). *Doğrusal linear regresyon nedir?* <https://bulutistan.com/blog/dogrusal-linear-regresyon-nedir/>
- Büyükuysal, M. Ç. (2010). *Ridge regresyon analizi ve bir uygulama* (Yüksek lisans tezi). Uludağ Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Caner, M. (2006). *Hiyerarşik fuzzy yöntemiyle senkron generatörlerde uyarım kontrolü* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Cash, M. A. (1998). *Detection of turn faults arising from insulation failure in the stator windings of AC machines* (Doktora tezi). Georgia Institute of Technology.
- Chapman, S. J. (2012). *Synchronous generator*. New York: Electric Machinery Fundamentals, McGrawhill.
- Cimino, A., Jenau, F., Staubach, C., Mashkin, A., & Pohlmann, F. (2018). Analysis of fault detection in the electrical insulation system of rotating machines. *International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics)*, 1–4.
- Cygan, P., & Laghari, J. R. (1990). Models for insulation aging under electrical and thermal multistress. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 25(5), 923–934.
- Çağlayan, İ. H. (2001). Hidrolik yağlarının iki büyük düşmanı: Kirlilik ve su. *II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi* (p. 149).
- Çelteç, S. A. (2024). Türkiye'nin enerji talebi tahmin probleminin çözümünde regresyon yöntemlerine dayalı yaklaşımlar. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(2), 705–715.
- Çolak, İ. (2003). *Senkron makinalar* (1. baskı). Seçkin Yayıncılık.
- Decner, A., Baranski, M., Jarek, T., & Berhausen, S. (2022). Methods of diagnosing the insulation of electric machines windings (Review). *Energies*, 15, 8465. doi:10.3390/en15228465
- Demirel, E. (2019). *Değişken ortam koşullarının senkron generatörlerin izolasyon parametrelerine etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demirtaş, D., & Gürsoy, C. (2023). Zaman serisi analizinde hareketli ortalama yöntemlerinin performans karşılaştırması: Maden üretim verileri üzerine bir uygulama. *Yerbilimleri*, 44(1), 17–32.
- Elektrik Mühendisler Odası. (2025, 21 Kasım). *Döner elektrik makinaların kurutulması ve izolasyon direncinin ölçülmesi*. https://www.emo.org.tr/ekler/3f3cf8c531952d7_ek.pdf?dergi=65
- Elektrik Port. (2015, 11 Haziran). *Doğru akım elektrik makinelerinde komütasyon ve endüvi reaksiyonu nedir?* <https://www.elektrikport.com/universite/dogru-akim-elektrik-makinelerinde-komutasyon-ve-enduvi-reaksiyonu-nedir/9024#ad-image-0>
- Elektrikmen. (2025, 12 Aralık). *Elektrikmen web sitesi*. <https://elektrikmen.com/senkron-generator/>
- Elk Motor. (2025). *Yalıtım (sıcaklık) sınıfları*. <https://cms.elkmotor.com.tr/files/teknik-bilgiler/tr/yalitim-sicaklik-siniflari.pdf>
- EMO. (2025, 17 Kasım). *Motor standartları hakkında genel bilgiler*. https://www.emo.org.tr/ekler/14c0e1bbdd76b2f_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=7
- Endüstriyel Test Cihazları. (2024, 6 Mart). *İzolasyon test cihazı ile kabloda yalıtım direnci nasıl ölçülür?* <https://www.endustriyeltestcihazlari.com/izolasyon-test-cihazı-ile-kabloda-yalitim-direnci-nasil-olculur/>
- Eriksson, M. R. (2017). *Environmental stress of electrical machine winding insulation* (Master's thesis). Uppsala University.
- ETMD. (2025, 7 Ekim). *Senkron elektrik makineleri*. <https://www.etmd.org.tr/senkron-elektrik-makineleri-senkron-motor-jenerator-alternator/>
- Famakin, S. R. (2018). *Modeling of insulation degradation dynamics in underground power cables* (Doktora tezi). Howard University.
- Famili, A., Shen, W., Weber, R., & Simoudis, E. (1997). Data preprocessing and intelligent data analysis. *Intelligent Data Analysis*, 1, 3–23.
- GeeksforGeeks. (2025). *Support vector regression (SVR) using linear and non-linear kernels in Scikit-Learn*. <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/support-vector-regression-svr-using-linear-and-non-linear-kernels-in-scikit-learn/>

- Geyik, A. K. (2018). *Çıkık kutuplu senkron generatörün sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Han, J., & Kamber, M. (2001). *Data mining: Concepts and techniques* (1st ed.). Morgan Kaufmann.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (2nd ed.). OTexts.
- IEC. (1982). *Evaluation of electrical endurance of electrical insulation systems, Part 1: General considerations and evaluation procedures based on normal distributions* (IEC Standard 727-1).
- IEC. (1999). *Evaluation and qualification of electrical insulation systems* (IEC Standard 60505).
- IEEE. (1958). *Guide for making dielectric measurements in the field* (IEEE Std 62-1958).
- IEEE. (2000). *IEEE recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery* (IEEE Std 43-2000).
- IEEE. (2013). *IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery* (IEEE Std 43-2000).
- IKM Subsea Motor Solutions. (2025). *Enhancing reliability with vacuum pressure impregnation*. <https://www.ikm.com/ikm-subsea-motor-solutions/focus/enhancing-reliability-with-vacuum-pressure-impregnation>
- International Organization for Standardization. (2021). *Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding the level of contamination by solid particles* (ISO 4406:2021, 4th ed.). iTeh Standards Preview.
- İlhan, S. (2005). *Katı yalıtkanlardaki elektriksel zorlanmalar ve ömür saptaması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- İlhan, S., & Özdemir, A. (2004). Elektriksel yalıtım sistemlerinde yaşlanma, yaşlanma modelleri ve istatistiksel veri analizi. *Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*. Bursa.
- İnce, H., & İmamoğlu, S. Z. (2016). Destek vektör regresyon ve ikiz destek vektör regresyon yöntemi ile tedarikçi seçimi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 17(2), 241–253.
- Jayantha, G. A., Fernando, M. R., & Ekanayake, C. B. (2009). Monitoring of moisture on stator winding insulation during drying process. *Fourth International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)* (pp. 1–4).
- Kaşıkcı, İ. (2013). *Elektrik mühendisliği: Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı* (pp. 69–138). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Kim, W., Choi, B., Hong, E., Kim, S., & Lee, D. (2003). A taxonomy of dirty data. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 7, 81–99.
- Klamt, T., & Noel, N. (2008). Influence of stress-grading systems on insulation resistance and polarization index. *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (pp. 1–4).
- Kodal, M., Ertürk, S., Şanlı, S., & Özkoc, G. (2015). Properties of talc/wollastonite/Polyamide 6 hybrid composites. *Polymer Composites*, 36(4), 739–746.
- Korbi, M. (2021). Comparison of the effectiveness of time series analysis smoothing methods in the context of machine learning. *Procedia Computer Science*, 180, 234–242.
- Kumral, C. D., Topal, A., Ersoy, M., Çolak, R., & Yiğit, T. (2022). Random forest algoritmasının FPGA üzerinde gerçekleştirilerek performans analizinin yapılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(4), 1315–1327.
- Lamarre, L., & David, E. (2008). Temperature dependence of the resistance of modern epoxy mica insulation of HV rotating machines. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(5), 1305–1312.

- Largiader, H. (2019). *Ger motorları için modern izolasyon sistemleri*. http://www.emo.org.tr/ekler/8c2ac6f92a1c369_ek.pdf
- Lichao, X., Hong, W., Shaoyun, G., Xiaojie, S., & Wenbin, L. (2016). Enhanced sound insulation and mechanical properties of LDPE/mica composites through multilayered distribution and orientation of the mica. *Composites Part A*, 81, 225–233.
- Lin, L., Kang, A., Song, J., Lei, Z., Zhao, Y., & Feng, C. (2016). Influences of humidity and temperature on oil contamination discharge of HV motor stator windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(5), 2695–2703.
- Liu, Y., & Wang, Y. (2020). Polynomial regression approaches for environmental modeling: A case study on soil moisture. *Environmental Modelling & Software*, 124, 104579.
- Machowski, J., Bialek, J. W., & Bumby, J. R. (2012). *Power system dynamics: Stability and control* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- MEB. (2011). *Elektrik-elektronik teknolojisi: Enerji üretimi* (Modül kodu: 522EE0124). Ankara.
- Megger Corp. (2025, 30 Aralık). Megger. <https://www.megger.com/en/blog/Oct-2024/IRTBlog2>
- Megger. (2006). *A stitch in time: The complete guide to electrical insulation testing*.
- Megger. (2025, 18 Kasım). *A guide to diagnostic insulation testing above 1 kV*. <https://www.instrumart.com/assets/Megger-Insulation-Testing-Above-1kV-Brochure.pdf>
- Mergen, A. F., & Zorlu, S. (2010). *Elektrik makineleri III: Senkron makineler*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Ndzeru, M. (2008). *Insulation evaluation synchronous machines* (Master's thesis). Vaal University of Technology, Vanderbijlpark.
- Nugroho, A. A., Widihastuti, I., & Ary, A. (2017). Root cause failure analysis of stator winding insulation failure on 6.2 MW hydropower generator. *AES International Conference on Electrical Engineering*.
- Nursen, R. (2023). *Polinom regresyon nedir? Python'da nasıl kodlanır?* <https://medium.com/@nursenruveyda/polinomal-regresyon-nedir-pythonda-nasil-kodlanir-1255c4c500b9>
- Onduk, A. (2002). *Güç jeneratörlerinin yapay sinir ağlarıyla denetimi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ong, C. (1997). *Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink*. Prentice Hall PTR.
- Orhun, A. (2024). *Motor ve trafo sarımlarında sıkça duyulan izolasyon sınıfı nedir? Özellikleri nedir?* LinkedIn.
- Özdeniz, M. (2024). *Random forest*. <https://metehanozdeniz.com/machine-learning/2024-09-01-random-forest/>
- Özek, S. (2020). *Hidrojeneratör*. Elektrik Üretim A.Ş., Bakım Yönetimi Daire Başkanlığı.
- Öztürk, M. (2025, 21 Kasım). *Python ile sınıflandırma analizleri: Rastgele orman (random forest) algoritması*. <https://miracozturk.com/python-ile-siniflandirma-analizleri-rastgele-orman-random-forest-algoritmasi/>
- Petit, A. (2015). Temperature effect on insulation resistance of generator stator bar affected by water ingress. *Electrical Insulation Conference (EIC)* (pp. 515–518). Seattle, WA, USA.
- Pyrhönen, J., Hrabovcova, V., & Semken, S. R. (2016). *Electrical machines, drives and control: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Rux, L. M. (2004). *The physical phenomena associated with stator winding insulation condition as detected by the ramped direct high-voltage method* (Doctoral dissertation, pp. 50–64). Mississippi State University.

- Ryff, P. (1988). *Electric machinery* (2nd ed.). Prentice Hall College Division.
- Sahai, R. N., & Pawar, N. (2017). Studies on mechanical properties of mica filled polyphenylene oxide composite with coupling agent. *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, 1(7), 153–157.
- Salomon, C. P., Ferreira, C., Sant'Ana, W. C., Lambert-Torres, G., Borges da Silva, L. E., Bonaldi, E. L., ... Torres, B. S. (2019). A study of fault diagnosis based on electrical signature analysis for synchronous generators predictive maintenance in bulk electric systems. *Energies*, 12, 1506.
- Sathiyasekar, K., Thyagarajah, K., & Krishnan, A. (2011). Neuro fuzzy based predict the insulation quality of high voltage rotating machines (Review). *Expert Systems with Applications*, 38(1), 1066–1072.
- Satı, N. (2018). *Tek tesirli yapı mal bağlantılarının hasar davranışları üzerine termal yaşlanma etkilerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Siddique, A., Yadava, G. S., & Singh, B. (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1), 106–114.
- Stone, G. C., Culbert, I., Boulter, E. A., & Dhirani, H. (2014). *Electrical insulation for rotating machines: Design, evaluation, aging, testing and repair* (2nd ed., pp. 12–62). IEEE Press; John Wiley & Sons.
- Sumereder, C. (2008). Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(3), 678–685. doi:10.1109/TDEI.2008.4543104
- Suzuki, K., Sako, H., Maeda, S., & Mio, K. (2016). Temperature dependence of insulation resistance and current components for generator stator bars. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* (pp. 452–455).
- Sümereder, C., & Muhr, B. (2006). Humidity absorption of generator bars. *Proceedings of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*.
- Şener, T. (2003). *Yapay sinir ağları yaklaşımı ile uç kontrol sisteminde arıza tespiti ve yalıtımı* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şerifoğlu, N. (2007). *Elektrik makinaları* (Cilt II: Senkron makinalar ve doğru akım makinaları). Nobel Yayın Dağıtım.
- TEİAŞ. (2022). *Türkiye ve OECD ülkeleri toplam kurulu gücünün kaynaklara dağılımı*. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- Torkaman, H., & Karimi, F. (2015). Influence of ambient and test conditions on insulation resistance/polarization index in HV electrical machines: A survey. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(1), 241–250.
- Tufan, F. (2013). *Senkron generatör statik ikaz sisteminin modellenmesi ve şebeke kararlılığına etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Tunceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- U.S. Energy Information Administration. (2025, 20 Aralık). *EIA*. <https://www.eia.gov/>
- Ukil, A., Chen, S., & Andenna, A. (2011). Detection of stator short circuit faults in three-phase induction motors using motor current zero crossing instants. *Electric Power Systems Research*, 81(4), 1036–1044.
- Vashishtha, Y. D. (1995). *Long term behaviour of electrical insulation for residual life estimation* (Doctoral dissertation). Indian Institute of Technology.
- Verginadis, D., Antonino-Daviu, J., Karlis, A., & Danikas, M. G. (2020). Diagnosis of stator faults in synchronous generators: Short review and practical case. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1328–1334). Gothenburg.
- Verginadis, D., Antonino-Daviu, J., Karlis, A., & Danikas, M. G. (2020). Diagnosis of stator

- Veri Bilim Okulu. (2025, November 21). *Polinom regresyon python uygulama*. Retrieved from <https://www.veribilimiokulu.com/polinom-regresyon-python-uygulama-1>
- Weedy, B. M., & Cory, B. J. (1998). *Electric power systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Wu, Y., & Gao, J. (2021). Kernel-based support vector regression in predicting environmental degradation patterns. *Applied Soft Computing*, *101*, 107025.
- Yıldırım, B. (2024). Yatay kurplarda taşıt stabilitesinin makine öğrenmesi ile modellenmesi. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, *8*(1), 74–86.
- Zhang, Y., Jiang, B., & Wang, Y. (2022). Application of ridge regression to geophysical data: Reducing multicollinearity for better interpretation. *Geophysics*, *87*(5), 45–58.
- Zhu, H. (2007). Insulation resistance measurements versus temperature made on aged stator bars and coils. In *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*.

EKLER

Ek-A. Kirlendirilmiş Yağ Akredite Laboratuvar Analiz Sonuçları



EKİPMAN 02434484/BHY	
Numune Numarası : PO762277	
Kullanımdaki Yağ : PO TÜRBİN YAGI 46	
Numune Referansı :	
Ekipman Referansı : ORTAK HPU SİSTEM YAGI	
Ekipman Adı : UNITE UST VE KLAVUZ VE TAŞIYICI YATAKLAR	
Ekipman marka - model : -	
Parça Adı : ORTAK HPU SİSTEM YAGI	
Seri numarası :	ERZİNCAN TÜRKİYE
SGS İLETİŞİM	
İsim: POAS	İnternet giriş:
Telefon:	Teknik Web Sitesi : https://pola-turkey.sgs.com/
Yorum Turuncu 06/01/2025	
Partikül sayım sonuçları çok yüksektir. Yağın filtre edilmesini ve mevcut filtre sisteminin verimliliğinin kontrol edilmesini tavsiye ediyoruz. Diğer tüm değerler kabul edilebilir limitler içerisinde.	
Yorumu Yapan : Petrol Ofisi Teknik Hizmetler Müdürlüğü Ünalan, Libadiye Cad. No: 82-F 34700 Üsküdar /İstanbul Telefon 0 850 339 19 19 madeniyag@petrolofisi.com.tr www.petrolofisi.com.tr	Murat KOC Laboratuvar Müdürü
GRAPHS	
Yağ Özellikleri	Aşınma
Kirliilik	

EK-B. Deneylerde Kullanılan Ölçü Aletlerinin Kalibrasyon Belgeleri



ANADOLU KALİBRASYON MÜH. ve PETROL ÜRÜN. PAZ. SAN. TİC. LTD. ŞTİ

Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B
Seyhan / ADANA

Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate



Kalibrasyon
TS EN ISO/IEC 17025
AB-0004-K

AB-0004-K
391304
11-23

Cihazın Sahibi / Adres Customer / Address	: İÇTAŞ YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİM VE TİC. A.Ş. / BAĞIŞTAŞ-1 BARAJI VE HES. İLİÇ DIVRIGİ YOLU 8. KM İLİÇ / ERZİNCAN
İstek Numarası Order Number	: 3913
Makine / Cihaz Instrument / Device	: DİJİTAL SICAKLIK VE NEM ÖLÇER (DATALOGGER)
İmalatçı Manufacturer	: UNI-T
Tip Type	: UT330TH
Seri Numarası Serial Number	: C230951700
Kalibrasyon Tarihi Date of Calibration	: 29.11.2023
Sertifikanın Sayfa Sayısı Number of pages of the Certificate	: 3



Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon Laboratuvarı olarak faaliyet gösteren ANADOLU KALİBRASYON, TÜRKAK'tan AB-0004-K ile TS EN ISO/IEC 17025:2017 Standardına göre akredite edilmiştir.

ANADOLU KALİBRASYON accredited by TÜRKAK under registration number AB-0004-K for TS EN ISO/IEC 17025:2017 as Calibration Laboratory.

Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınırlığı konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ile Çok Taraflı Anlaşma ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile karşılıklı tanıma anlaşması imzalamıştır.

Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is a signatory to the European co-operation for Accreditation (EA) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (MRA) for the recognition of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.

The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.



Mühür
Seal
29.11.2023

Kalibrasyonu Yapan
Calibrated by
Selim UĞURLUAY
İmzaNo: 121799851674
Tarih: 29.11.2023 11:50:48
Elektronik olarak imzalanmıştır

Onaylayan
Approval
Muhammet YÜCEER
İmzaNo: 2882572294642
Tarih: 29.11.2023 11:53:40
Elektronik olarak imzalanmıştır

Bu sertifika laboratuvarın izni olmadan kısmen kopyalanıp, çoğaltılamaz.
This certificate shall not be reproduced other than full except with the permission of the laboratory.
İmzasız sertifikalar geçersizdir.
Calibration certificates without signature are not valid.

Merkez Adana: Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B (Yeni Vilayet Karşısı) Seyhan / ADANA
Antalya İrtibat: 0533 697 93 20
E-Posta: info@anadolukalibrasyon.com.tr

Tel: 0322 454 70 77
Tel: 0242 322 84 54

Faks: 0322 454 70 63
Faks: -

Web: www.anadolukalibrasyon.com.tr



ANADOLU KALİBRASYON

MÜH. ve PETROL ÜRÜN. PAZ. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.

Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B
Seyhan / ADANA

Kalibrasyon Sertifikası

Calibration Certificate



Kalibrasyon
TS EN ISO/IEC 17025
AB-0004-K

AB-0004-K

391308

11-23

Cihazın Sahibi / Adres : İÇTAŞ YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİM VE TİC. A.Ş. / BAĞIŞTAŞ-1 BARAJI VE
Customer / Address HES.
İLİÇ DİVRİĞİ YOLU 8 . KM İLİÇ / ERZİNCAN

İstek Numarası : 3913
Order Number

Makine / Cihaz : DİJİTAL SICAKLIK VE NEM ÖLÇER (DATALOGGER)
Instrument / Device

İmalatçı : TROTEC
Manufacturer

Tip : BL30
Type

Seri Numarası : 140522313
Serial Number

Tanıtm Kodu : BĞŞ-1 TERM-1
Identification Code

Kalibrasyon Tarihi : 29.11.2023
Date of Calibration

Sertifikanın Sayfa Sayısı : 3
Number of pages of the Certificate



Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon Laboratuvarı olarak faaliyet gösteren ANADOLU KALİBRASYON, TÜRKAK'tan AB-0004-K ile TS EN ISO/IEC 17025:2017 Standardına göre akredite edilmiştir.

ANADOLU KALİBRASYON accredited by TÜRKAK under registration number AB-0004-K for TS EN ISO/IEC 17025:2017 as Calibration Laboratory.

Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınırlığı konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ile Çok Taraflı Anlaşma ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile karşılıklı tamama anlaşması imzalamıştır.

Türk Akreditasyon Ajansı (TÜRKAK) is a signatory to the European co-operation for Accreditation (EA) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (MRA) for the recognition of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.
The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.

Mühür

Seal



Yayımlandığı Tarih

Date

29.11.2023

Kalibrasyonu Yapan

Calibrated by

Selim UĞURLUAY
İmzaNo: 1340676193221
Tarih: 29.11.2023 11:42:00
Elektronik olarak imzalanmıştır

Onaylayan

Approval

Muhammet YÜCEER
İmzaNo: 3045748872941
Tarih: 29.11.2023 11:53:32
Elektronik olarak imzalanmıştır

Bu sertifika laboratuvarın izni olmadan kısmen kopyalanıp, çoğaltılamaz.

This certificate shall not be reproduced other than full except with the permission of the laboratory.

İmzasız sertifikalar geçersizdir.

Calibration certificates without signature are not valid.

Merkez Adana: Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B (Yeni Vilayet Karşısı) Seyhan / ADANA

Tel: 0322 454 70 77

Faks: 0322 454 70 63

Antalya İrtibat: 0533 697 93 20

Tel: 0242 322 84 54

Faks: -

E-Posta: info@anadolukalibrasyon.com.tr

Web: www.anadolukalibrasyon.com.tr



ANADOLU KALİBRASYON

MÜH. v9 PETROL ÜRÜN. PAZ. SAN. TİC. LTD. ŞTİ

Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B
Seyhan / ADANA

Kalibrasyon Sertifikası

Calibration Certificate



AB-0004-K

AB-0004-K

391322

11-23

Cihazın Sahibi / Adres : İÇTAŞ YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİM VE TİC. A.Ş. / BAĞIŞTAŞ-1 BARAJI VE
Customer / Address HES,
İLİÇ DÖVRÜĞİ YOLU 8. KM İLİÇ / ERZİNCAN

İstek Numarası : 3913
Order Number

Makine / Cihaz : RADYASYON (LAZER) TERMOMETRE
Instrument / Device

İmalatçı : FLUKE
Manufacturer

Tip : 566
Type

Seri Numarası : 26640090 **Tanımlama Kodu** : BĞŞ-LT
Serial Number *Identification Code*

Kalibrasyon Tarihi : 29.11.2023
Date of Calibration

Sertifikanın Sayfa Sayısı : 3
Number of pages of the Certificate



Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına ulaşılabilirliği gösterir.
This calibration certificate documents the measurability in national/international, which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyonu Laboratuvarımız olarak faaliyet gösteren ANADOLU KALİBRASYON, TÜRKAK/Tab AB-0004-K ile TS EN ISO/IEC 17025:2017 Standardına göre akredite edilmiştir.

ANADOLU KALİBRASYON accredited by TÜRKAK under registration number AB-0004-K for TLER 380000 17025:2017 as Calibration Laboratory.

Türk Akreditasyon Kurumu(TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınabilirliğinde Avrupa Akreditasyon Birliği(EU) ile Çok Taraflı Anlaşma ve Ulaştırılması Laboratuvar Akreditasyonu Birliği(ILAC) ile karşılıklı tanıma anlaşmaları imzalanmıştır.

Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is a signatory to the European co-operation for Accreditation (EA) Multilateral agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (MRA) for the recognition of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, güvenilirliği yüksek farklı standartlar ve kalibrasyon metotları bu sertifikamızın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda yer almıştır.

The measurement, the uncertainty with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.

Mühür Seal	Yayımlandığı Tarih Date	Kalibrasyonu Yapan Calibrated by	Onaylayan Approval
	29.11.2023	Selim UĞURLUAY İmzaNo: 702841015735 Tarih: 29.11.2023 11:37:13 Elektronik olarak imzalanmıştır	Muhammet YÜCEER İmzaNo: 2593000709678 Tarih: 29.11.2023 11:51:50 Elektronik olarak imzalanmıştır

Bu sertifika laboratuvarımız izni olmadan kopyalanıp, çoğaltılamaz.

This certificate shall not be reproduced other than full except with the permission of the laboratory.

Imzaları sertifikadan geçersizdir.

Calibration certificates without signature are not valid.

Müşteri Adresimiz: Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B (Yeni Valiyei Kampüsü) Seyhan/ ADANA

Telefon: 0322 454 30 33

Faks: 0322 454 30 63

Sanctarya Telefonu: 0531 697 91 20

Telefon: 0322 322 84 54

Faks: -

E-Posta: info@anadolukalibrasyon.com.tr

Web: www.anadolukalibrasyon.com.tr



ANADOLU KALİBRASYON

MÜH. ve PETROL ÜRÜN. PAZ. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.

Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B
Seyhan / ADANA

Kalibrasyon Sertifikası

Calibration Certificate



Kalibrasyon
VE ENERJİ İZLENİMLİ
AB-0004-K

AB-0004-K

397803

12-23

Cihazın Sahibi / Adres : İÇTAŞ YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİM VE TİC .A.Ş. / BAĞIŞTAŞ-1 BARAJI VE
Customer / Address HES.
İLİÇ DIVRIGİ YOLU 8 . KM İLİÇ / ERZİNCAN

İstek Numarası : 3978
Order Number

Makine / Cihaz : İZOLASYON TEST CİHAZI
Instrument / Device

İmalatçı : FLUKE
Manufacturer

Tip : 1550C
Type

Seri Numarası : 2254018
Serial Number

Tanıtım Kodu : BĞŞ-İTC
Identification Code

Kalibrasyon Tarihi : 05.12.2023
Date of Calibration

Sertifikanın Sayfa Sayısı : 3
Number of pages of the Certificate



Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

Kalibrasyon Laboratuvarı olarak faaliyet gösteren ANADOLU KALİBRASYON,TÜRKAK'tan AB-0004-K ile TS EN ISO/IEC 17025:2017 Standardına göre akredite edilmiştir.

ANADOLU KALİBRASYON accredited by TÜRKAK under registration number AB-0004-K for TS EN ISO/IEC 17025:2017 as Calibration Laboratory.

Türk Akreditasyon Kurumu(TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınırlığı konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği(EA) ile Çok Taraflı Anlaşma ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği(ILAC) ile karşılıklı tanıma anlaşmasını imzalamıştır.

Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) is a signatory to the European co-operation for Accreditation (EA) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (MRA) for the recognition of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir.
The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.

Mühür

Seal



Yayımlandığı Tarih

Date

05.12.2023

Kalibrasyonu Yapan

Calibrated by

Nihat GÜL

İmzaNo: 1686318309121

Tarih: 05.12.2023 09:48:03

Elektronik olarak imzalanmıştır

Onaylayan

Approval

Muhammet YÜCEER

İmzaNo: 2320577244454

Tarih: 05.12.2023 15:17:27

Elektronik olarak imzalanmıştır

Bu sertifika laboratuvarın izni olmadan kısmen kopyalanıp, çoğaltılamaz.

This certificate shall not be reproduced other than full except with the permission of the laboratory.

İmzasız sertifikalar geçersizdir.

Calibration certificates without signature are not valid.

Merkez Adres: Kurtuluş Mah. 64015 Sk. No:4/B (Yeni Vahyret Katmanı) Seyhan / ADANA

Tel: 0322 454 70 77

Faks: 0322 454 70 63

Antalya İrtibat: 0533 697 93 20

Tel: 0342 322 84 54

Faks: -

E-Posta: info@anadolukalibrasyon.com.tr

Web: www.anadolukalibrasyon.com.tr