



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ASENKRON MOTORLARDA SEZGİSEL
TABANLI YERİNDE VERİM TAHMİNİ

Murat GÖZTAŞ

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Murat GÖZTAŞ tarafından hazırlanan “Asenkron Motorlarda Sezgisel Tabanlı Yerinde Verim Tahmini” adlı tez çalışması 10/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

.....

Danışman

Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

.....

Üye

Doç. Dr. Hulusi KARACA

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Emre Hasan DURSUN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇEVİK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan AYDOĞAN
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Murat GÖZTAŞ

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ASENKRON MOTORLARDA SEZGİSEL TABANLI YERİNDE VERİM TAHMİNİ

Murat GÖZTAŞ

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

2025, 178 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Doç. Dr. Hulusi KARACA

Dr. Öğr. Üyesi E. Hasan DURSUN

Dr. Öğr. Üyesi Hasan H. ÇEVİK

Bu tezde, üç fazlı asenkron motorların veriminin yerinde (in-situ), müdahalesiz ve yüksek doğrulukla tahmin edilmesine yönelik sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, eşdeğer devre parametrelerinin tahmini yoluyla motor veriminin hesaplanmasına dayanmakta olup, IEEE 112-A test standardı referans alınarak uygulanmıştır. Çalışma, farklı güç seviyelerindeki motorlarla gerçekleştirilen algoritma tabanlı verim tahminleri ile gerilim dengesizliği altındaki deneysel testlerden oluşan iki aşamalı bir uygulama sürecini kapsamaktadır.

Birinci aşamada farklı güç seviyelerine sahip altı adet üç fazlı asenkron motor kullanılarak motorların eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi yapılmış ve buna bağlı olarak verim tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda IEEE 112-A test standardı referans alınarak ölçüm verileri elde edilmiş; aynı motorlara ait verim değerleri sekiz farklı sezgisel optimizasyon algoritması (PSO, GA, GWO, HHO, TSA, DSA, WOA, RFA) ile tahmin edilmiştir. Her bir algoritmanın tahmin doğruluğu dört farklı yükleme oranında (%25, %50, %75, %100) karşılaştırmalı hata analizi ile değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada gerilim dengesizliğinin motor verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla 1.1 kW gücünde bir adet üç fazlı asenkron motor üzerinde deneysel bir düzenek kurularak motor farklı gerilim dengesizliği seviyelerinde (%0, %1, %2, %3, %4, %5) ve dört farklı yükleme oranında (%25, %50, %75, %100) test edilmiştir. Bu bölümde yalnızca PSO optimizasyon algoritması kullanılarak eşdeğer devre parametrelerine dayalı verim tahmini yapılmış ve elde edilen sonuçlar IEEE 112-A standardına göre ölçülen verim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu aşamada modelin gerilim dengesizliği altındaki tahmin performansı grafiksel olarak analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin özellikle tam yükte ve düşük gerilim dengesizliği koşullarında yüksek doğrulukla çalıştığını ancak düşük yükleme oranlarında ve artan gerilim dengesizliği seviyelerinde tahmin doğruluğunun nispeten azaldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte yöntem sahada uygulanabilirliği, müdahalesiz hesaplama imkânı ve düşük maliyet avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Çalışmada geliştirilen yaklaşımın hem enerji verimliliği optimizasyonu hem de endüstriyel motor izleme sistemlerinde kullanılması açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Eşdeğer Devre Parametreleri Tahmini, Gerilim Dengesizliği Faktörü, Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları, Verim Tahmini

ABSTRACT

Ph.D THESIS

HEURISTIC BASED IN SITU EFFICIENCY ESTIMATION FOR INDUCTION MOTORS

Murat GÖZTAŞ

**Selcuk University Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

2025, 178 Pages

Jury

Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Assoc. Prof. Dr. Hulusi KARACA

Asst. Prof. Dr. E. Hasan DURSUN

Asst. Prof. Dr. Hasan H. ÇEVİK

This thesis presents a method based on heuristic optimization algorithms to estimate the efficiency of three-phase induction motors in-situ, non-invasively, and with high accuracy. The method relies on calculating motor efficiency through the estimation of equivalent circuit parameters and is implemented with reference to the IEEE 112-A test standard. The study comprises a two-stage application process involving algorithm-based efficiency estimations conducted on motors with different power ratings and experimental tests performed under voltage unbalance conditions.

In the first stage equivalent circuit parameters of six three-phase induction motors with different power ratings were estimated and efficiency predictions were made accordingly. Within this scope measurement data were obtained based on the IEEE 112-A test standard and the efficiency values of the same motors were estimated using eight different heuristic optimization algorithms (PSO, GA, GWO, HHO, TSA, DSA, WOA, RFA). The accuracy of each algorithm's prediction was evaluated through comparative error analysis at four different loading levels (25%, 50%, 75% and 100%).

In the second stage the effects of voltage unbalance on motor efficiency were examined. For this purpose, an experimental setup was established on a 1.1 kW three-phase induction motor, which was tested under six voltage unbalance levels (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%) and four different loading conditions (25%, 50%, 75%, and 100%). In this part only one heuristic optimization algorithm was used to estimate efficiency based on equivalent circuit parameters and the results were compared with efficiency values measured in accordance with the IEEE 112-A standard. Additionally, the model's prediction performance under voltage unbalance conditions was analyzed graphically.

The results indicate that the proposed method performs with high accuracy especially under full-load and low voltage unbalance conditions while its prediction accuracy decreases relatively under low load levels and higher voltage unbalance. Nonetheless, the method stands out with its advantages such as field applicability, non-intrusive computation capability and cost-effectiveness. Overall, the developed approach is considered to have significant potential in both energy efficiency optimization and industrial motor monitoring systems.

Keywords: Efficiency Estimation, Equivalent Circuit Parameter Estimation, Heuristic Optimization Algorithms, Induction Motor, Voltage Unbalance Factor (VUF)

ÖNSÖZ

Küresel ısınma, çevresel kirlilik, enerji kaynaklarının tükenme tehlikesi ve buna bağlı olarak sürdürülebilir kalkınma ihtiyacı, günümüzde bireylerden kurumlara kadar her kesimin sorumluluk üstlenmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle sanayide yaygın biçimde kullanılan elektrik motorlarının enerji verimliliği açısından optimize edilmesi, yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda ekolojik bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda hazırlanan bu doktora tezinde, asenkron motorların yerinde, müdahalesiz ve yüksek doğrulukla verim tahminine imkân tanıyan sezgisel algoritmalara dayalı yöntemler geliştirilmiş ve çevre dostu mühendislik uygulamalarına katkı sunması amaçlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca bilimsel rehberliği ve kıymetli yönlendirmeleriyle bana her zaman yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Tez İzleme Komitesi üyeleri Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Emre Hasan DURSUN'a, katkı ve yapıcı değerlendirmeleri dolayısıyla minnettarım.

Çalışma sürecimde bilgi paylaşımı, iş birliği ve samimi destekleriyle yanımda olan değerli meslektaşlarım Öğr. Gör. Deniz UĞUR ve Öğr. Gör. Dr. Hamza YAPICI'ya da teşekkürü bir borç bilirim. Onların katkıları bu süreci daha verimli ve anlamlı kılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada kullanmış olduğumuz motorlara ait deneysel veri paylaşımı ile araştırmamı zenginleştiren ve katkı sağlayan AEMOT Aksaray Elektrik Motorları Ar-Ge Birimi'ne teşekkür ederim. Verdikleri teknik destek ve paylaşımlar çalışmanın uygulama yönünü güçlendirmiştir.

Bu süreçte bana her daim destek olan, değerlerimi şekillendiren ve hayata karşı duruşumu kazandıran kıymetli annem Döndü GÖZTAŞ ile rahmet ve özlemle andığım babam Ömer GÖZTAŞ'a hayır dualarımla teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik çalışmanın gerektirdiği yoğunluk nedeniyle zaman zaman ihmal ettiğim fakat her daim en yakın destekçilerim olan canım eşim Öğr. Gör. Dr. Emine GÖZTAŞ ile sevgili çocuklarım Burak Erdem GÖZTAŞ ve Alp Eymen GÖZTAŞ'a sabırları, sevgileri ve fedakârlıkları için gönülden teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, enerji verimliliği ve sürdürülebilir mühendislik uygulamaları bağlamında hem bilimsel hem de toplumsal katkı sağlamasını temenni ederim.

Murat GÖZTAŞ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER.....	iv
ÇİZELGELER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 Uluslararası Standartlar.....	5
2.2 IEC 60034-2-1.....	6
2.3 Diğer Yöntemler	7
2.3.1 Akım Yöntemi	7
2.3.2 Kayma Yöntemi.....	9
2.3.3 Eşdeğer Devre Yöntemi.....	11
2.3.4 Hava Aralığı Torku Yöntemi.....	12
2.3.5 Optimizasyon Tabanlı Yöntemler	12
2.4 Elektrik Motorlarının Yeniden Sarma Sorunları.....	16
2.5 Dengesiz Güç Kaynağının Etkisi	18
2.6 Aşırı veya Düşük Gerilimin Etkisi.....	20
2.7 Dengesiz ve Dalgalı Gerilimler.....	21
2.8 Hedefler.....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM	28
3.1 Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları ile Verim Tahmini	29
3.2 Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametreleri	30
3.3 Parametre Aralıklarının Belirlenmesi	35

3.4 Optimizasyon Algoritmaları	42
3.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu	44
3.4.2 Genetik Algoritmalar	46
3.4.3 Harris Şahinleri Optimizasyonu	49
3.4.4 Gri Kurt Optimizasyonu	52
3.4.5 Kızıl Tilki Optimizasyonu	55
3.4.6 Balina Optimizasyon Algoritması	60
3.4.7 Diferansiyel Arama Algoritması	64
3.4.8 Ağaç-Tohum Algoritması.....	66
4. SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ İLE EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN VE VERİMİN TAHMİNİ	69
4.2 Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametreleri için Aralık Belirleme	70
4.3 Algoritma Tabanlı Eşdeğer Devre Parametreleri ve Verim Tahmini	72
4.4 Deneysel Sonuçlar ve Tartışma.....	78
4.4.1 Verimlerin IEEE 112-A Yöntemi ile Karşılaştırılması	80
4.4.2 Parametrelerin IEEE 112-F Yöntemi ile Karşılaştırılması	96
5. DENGESİZ GERİLİMLERDE YERİNDE VERİM TAHMİNİ.....	114
5.2 Tam Yük İçin Kaçak Yük Kaybı Belirlenmesi.....	116
5.3 Sürtünme ve Rüzgâr Kayıplarının Belirlenmesi	118
5.4 Pozitif ve Negatif Sekans Bileşenlerinin Belirlenmesi	118
5.5 Dengesiz Gerilimlerde Asenkron Motor Eşdeğer Devresi ve Amaç Fonksiyonu	121
5.6 IEEE 112-F1 Metodu Hesaplamaları	124
5.7 Deneysel Sonuçlar.....	127
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	133
6.2 Sonuçlar	133
6.3 Öneriler	135
KAYNAKLAR	136
EKLER	144

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Asenkron motor varsayılan ve gerçek akım-yük eğrisi (Hsu ve ark., 1996)....	8
Şekil 2.2. Modifiye edilmiş akım yöntemi ile asenkron motor varsayılan ve gerçek akım-yük eğrisi	8
Şekil 2.3. ASM'ların kayma-tork grafiği (Thakur, 2020).	10
Şekil 2.4. Pozitif sekans eşdeğer devresi	19
Şekil 2.5. Negatif sekans eşdeğer devresi.....	19
Şekil 2.6. ASM pozitif ve negatif sekans tork grafiği (Pillay ve Hofmann, 2001)	20
Şekil 2.7. Gerilim dengesizliğinden dolayı motor kayıplarında ve ısınmada artış.....	22
Şekil 2.8. Orta güçteki motorlarda gerilim dengesizliği ve nominal güç düşüşü (Association, 2011).....	23
Şekil 2.9. Aşırı gerilimlerin ve düşük gerilimlerin derecelendirme eğrisine dahil edilmesi (Pillay ve ark., 2002)	24
Şekil 3.1. Tipik bir optimizasyon algoritması akış şeması	28
Şekil 3.2. ASM bir faz eşdeğer devresi (Siraki ve ark., 2013)	31
Şekil 3.3. Optimizasyon algoritmalarının genel sınıflandırılması (SOFUOĞLU, 2023).....	43
Şekil 3.4. PSO genel akış şeması.....	46
Şekil 3.5. GA çaprazlama operatörü (Pillay ve ark., 1998).....	48
Şekil 3.6. GA mutasyon operatörü (Pillay ve ark., 1998)	48
Şekil 3.7. Gri kurt hiyerarşisi (hakimiyet yukarıdan aşağıya doğru azalır) (Mirjalili ve ark., 2014).....	52
Şekil 3.8. 2D ve 3D konum vektörleri ve kurtların bir sonraki muhtemel konumları (Mirjalili ve ark., 2014)	53
Şekil 3.9. GWO pozisyon güncelleme şeması.....	54
Şekil 3.10. Kızıl tilkinin doğal avlanma davranışının optimizasyon stratejisine modellenen örnek sunumu (Połap ve Woźniak, 2021).....	56
Şekil 3.11. Kızıl tilkinin avın etrafını çevrelemek ve avlanmaya başlamak için olası konumları (Połap ve Woźniak, 2021).....	59
Şekil 3.12. Kambur balinaların “Kabarcık-ağ” yöntemi ile avlanması	61
Şekil 3.13. Arama ajanlarının 2 ve 3 boyutlu pozisyon vektörleri ve bir sonraki iterasyonda olası konumları (Mirjalili ve Lewis, 2016)	62
Şekil 3.14. Spiral Hareket (Mirjalili ve Lewis, 2016)	63
Şekil 3.15. WOA'nın global arama davranışı (Mirjalili ve Lewis, 2016)	64
Şekil 3.16. TSA çalışma diyagramı (Çınar, 2016)	66
Şekil 4.1. Optimizasyon tabanlı verim tahmini akış şeması.....	78
Şekil 4.2. AEMOT ASM test düzeneği	79
Şekil 4.3. GMK_ 1-1KW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları (%).....	83
Şekil 4.4. GMK_ 2-2KW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları.....	86

Şekil 4.5. AE_ 200L6B_ 22kW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları....	88
Şekil 4.6. AE_ 225M6A_ 30kW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları ..	90
Şekil 4.7. AE_ 280M4A_ 90kW asenkron motorun ölçülen verim değerleri ile Yöntem I ve Yöntem II kullanılarak tahmin edilen verimler arasındaki hata oranlarının karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.8. AE_ 315M4A_ 132kW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları	94
Şekil 4.9. Yöntem I ve Yöntem II için algoritmaların 6 adet motorun tam yük verim tahmininde ortalama hata oranları	95
Şekil 4.10. PSO algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri.....	98
Şekil 4.11. DS algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri	101
Şekil 4.12. HHO algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri	103
Şekil 4.13. WOA algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri.....	106
Şekil 4.14. RFA algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri	108
Şekil 4.15. TSA algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri.....	111
Şekil 5.1. Dengesiz gerilim altında çalışan ASM verim belirleme algoritma akış şeması	116
Şekil 5.2. Pozitif ve negatif sekans eşdeğer devre (Zocholl ve ark., 2007).....	121
Şekil 5.3. Asenkron motor dengesiz gerilim deney düzeneği	127
Şekil 5.4. 1.1kW ASM farklı gerilim dengesizliği değerlerinde algoritma ve IEEE 112-A yöntemi ile belirlenen verimler grafiği	130
Şekil 5.5. Optimizasyon algoritması farklı gerilim dengesizliklerinde yük faktörü verim grafiği.....	131

ÇİZELGELER

Çizelge 3.1. Verim hesabı için motor sınıflarının anma sıcaklık değerleri	32
Çizelge 3.2. NEMA tasarım sınıfına göre stator ve rotor kaçak reaktansı oranı (Association, 2003).....	32
Çizelge 3.3. <i>PSLL</i> 'nin motor gücüne bağlı olarak belirlenen değeri (Trandafilov, 2004)	33
Çizelge 3.4. Farklı güçlerdeki Asenkron motorlar için boş çalışma akımlarının tam yük akımına oranı	37
Çizelge 3.5. NEMA A ve B tasarımına sahip ASM en düşük devrilme torku(τ_{max})'nun tam yük torkuna yüzde oranı (Association, 2003).....	40
Çizelge 3.6. NEMA C tasarımına sahip ASM en düşük devrilme torku(τ_{max})'nun tam yük torkuna yüzde oranı (Association, 2003).....	41
Çizelge 4.1. Asenkron Motorların Teknik Özellikleri.....	71
Çizelge 4.2. Parametre aralıkları	72
Çizelge 4.3. IEEE Std-112 A ve F1 yöntemlerine göre belirlenen verimler	80
Çizelge 4.4. GMK_ 1-1KW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler....	81
Çizelge 4.5. GMK_ 2-2KW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler....	85
Çizelge 4.6. AE_ 200L6B_ 22kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler	87
Çizelge 4.7. AE_ 225M6A_ 30kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler	89
Çizelge 4.8. AE_ 280M4A_ 90kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler	91
Çizelge 4.9. AE_ 315M4A_ 132kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler.....	93
Çizelge 4.10. GMK_ 1-1KW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler	97
Çizelge 4.11. GMK_ 2-2KW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler	100
Çizelge 4.12. AE_ 200L6B_ 22kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler	102
Çizelge 4.13. AE_ 225M6A_ 30kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler	105
Çizelge 4.14. AE_ 280M4A_ 90kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler	107
Çizelge 4.15. AE_ 315M4A_ 132kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler	110
Çizelge 5.1. Deneyde kullanılan 1,1kW ASM etiket bilgileri.....	128
Çizelge 5.2. Motora uygulanan %0-%5 aralığı dengesiz gerilimler ve ölçülen giriş verileri	129

Çizelge 5.3. 1.1kW ASM farklı gerilim dengesizliği değerlerinde algoritma ve IEEE 112-A yöntemi ile belirlenen verimler	130
--	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

p	Kutup sayısı
R_1	Stator direnci (Ω)
X_1	Stator kaçak reaktansı (Ω)
R_2	Rotor direnci (Ω)
X_2	Rotor kaçak reaktansı (Ω)
X_m	Mıknatıslanma reaktansı (Ω)
R_{fe}	Nüve kaybı direnci (Ω)
Z_1	Stator empedansı (Ω)
Z_2	Rotor empedansı (Ω)
Z_m	Manyetik devre empedansı (Ω)
n_r	Rotor hızı (d/d)
n_s	Senkron hız (d/d)
s	Kayma
η	Verim
P_1	Giriş gücü (W)
P_2	Çıkış gücü (W)
P_{scl}	Stator bakır kaybı (W)
P_{rcl}	Rotor bakır kaybı (W)
P_{fe}	Nüve kaybı (W)
P_{SLL}	Kaçak kayıplar (W)
P_{FW}	Rüzgâr ve sürtünme kaybı (W)
ΔP	Toplam kayıp (W)
P_{gap}	Hava aralığı gücü (W)
I_1	Giriş akımı (A)
I_0	Boş çalışma akımı (A)
I_2	Rotor akımı (A)
V_1	Giriş gerilimi (V)
P_a	a fazına ait ölçülen giriş gücü (W)
V_a	a fazına ait hesaplanan gerilim değeri (V)
I_a	a fazına ait ölçülen giriş akımı (A)
P_b	b fazına ait ölçülen giriş gücü (W)
V_b	b fazına ait hesaplanan gerilim değeri (V)
I_b	b fazına ait ölçülen giriş akımı (A)
P_c	c fazına ait ölçülen giriş gücü (W)
V_c	c fazına ait hesaplanan gerilim değeri (V)
I_c	c fazına ait ölçülen giriş akımı (A)
Y_m	Faz mıknatıslanma admitansı ($\mathcal{U}$)
Y_r	Faz rotor admitansı ($\mathcal{U}$)
s_1	Pozitif sekans kayma
Z_r	Faz rotor ve mıknatıslanma devresi toplam empedansı (Ω)
I_{s1}	Pozitif sekans tahmin edilen stator akımı (A)
I_{r1}	Pozitif sekans tahmin edilen rotor akımı (A)
I_{m1}	Pozitif sekans tahmin edilen toplam mıknatıslanma devresi akımı (A)
m_1	Pozitif sekans tahmin edilen mıknatıslanma devresi gerilimi (V)

I_{s1m}	Pozitif sekans ölçülen akım (A)
G_2	Rotor kondüktansı (Ü)
G	Rotor ve manyetik devre toplam kondüktansı (Ü)
B_m	Mıknatıslanma suseptansı (Ü)
B	Rotor ve manyetik devre suseptansı (Ü)
Y_2	Rotor ve mıknatıslama devresi admitansı (Ü)
R_g	Rotor ve mıknatıslama devresi direnci (Ω)
R	Eşdeğer devrenin toplam direnci (Ω)
X_g	Rotor ve mıknatıslama devresi reaktansı (Ω)
X	Eşdeğer devrenin toplam reaktansı (Ω)
Z	Eşdeğer devrenin toplam empedansı (Ω)
$P_{mek,1}$	Pozitif sekans dönüştürülen güç (W)
$P_{mek,2}$	Negatif sekans dönüştürülen güç (W)
s_1	Pozitif sekans kayma
s_2	Negatif sekans kayma

Kısaltmalar

ASM	Asenkron Motor
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
GWO	Grey Wolf Optimizer (Gri Kurt Optimizasyonu)
HHO	Harris Hawks Optimization (Harris Şahin Optimizasyonu)
TSA	Tree Seed Algorithm (Ağaç-Tohum Algoritması)
DS	Differential Search Algorithm (Diferansiyel Arama Algoritması)
WOA	Whale Optimization Algorithm (Balina Optimizasyon Algoritması)
RFA	Red Fox Optimization Algorithm (Kızıl Tilki Optimizasyonu)
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
SPPS	Synchronous Parameter Prediction System (Senkron Parametre Tahmin Sistemi)
RMEW	Rockwell Motor Efficiency Wizard
IE1-IE5	International Efficiency Classes (Uluslararası Verimlilik Sınıfları)
AEMOT	Aksaray Elektrik Motorları
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
RMEW	Rockwell Motor Efficiency Wizard
VUF	Voltage Unbalance Factor (Gerilim Dengesizliği Faktörü)

1. GİRİŞ

Enerji tüketimi ve verimliliği, 1970'lerdeki enerji krizi ve sanayileşmenin artan enerji ihtiyacı nedeniyle küresel ölçekte kritik bir sorun haline gelmiştir (Pillay ve ark., 1998). Özellikle elektrik motorları, sanayide üretilen elektriğin yaklaşık üçte ikisini tüketerek hem enerji maliyetlerini artırmakta hem de sera gazı emisyonları yoluyla çevresel sorunlara sebep olmaktadır (Vaez-Zadeh ve Hendi, 2005; Farhani ve ark., 2017). Bu durum, gelişmiş ülkelerde olduğu kadar Güney Afrika gibi gelişmekte olan ülkelerde de benzerdir; örneğin, Güney Afrika'da motorlu sistemler toplam elektrik tüketiminin %60'ını oluşturmaktadır (Mzungu ve ark., 2009). Artan enerji maliyetleri ve sürdürülebilirlik kaygıları, enerji verimliliğini endüstriyel politikalarda merkezi bir konumda yerelmesini sağlamaktadır. ABD ve Kanada gibi ülkeler, enerji talebini azaltmak ve sera gazı etkilerini hafifletmek için talep yönetimi programlarını devreye almıştır (Mzungu ve ark., 2009).

Türkiye'de enerji tüketiminin azaltılması için enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak binalarda, sanayide ve ulaşımda enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerin yaygınlaştırılması ve enerji kullanım alışkanlıklarının değiştirilmesine yönelik bilinçlendirme çalışmaları yürütülmektedir. Enerji yönetim planları, enerji verimliliği standartlarının geliştirilmesi ve zorunlu enerji denetimleri gibi mekanizmalarla enerji talebinin kontrol altına alınması hedeflenmektedir (Ghannadi, 2024).

Türkiye, sera gazı emisyonlarının kontrolü için uluslararası anlaşmalara uyum sağlamakta ve karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik yasal düzenlemeler geliştirmektedir. Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması çerçevesinde taahhütlerde bulunmuş, karbon ayak izinin azaltılması amacıyla karbon muhasebesi ve emisyon ticareti mekanizmaları gibi uygulamaların Türkiye'de benimsenmesi teşvik edilmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması bu çabaların temel taşlarını oluşturmaktadır (Ghannadi, 2024; Durak, 2025)

Türkiye'nin toplam enerji tüketiminde sanayi sektörü önemli bir paya sahiptir ve elektrik enerjisi tüketiminin büyük bölümü elektrik motorları tarafından gerçekleştirilmektedir. Elektrik motorları verim sınıflarına göre farklı enerji tüketimleri göstermekte ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan motorların büyük bir kısmı düşük verimlilik sınıfındadır. Sanayide enerji verimliliğini artırmak amacıyla: ülkemizde 4703 sayılı kanunun 14'üncü maddesine dayanılarak "Enerji ile İlgili Ürünlerin Çevreye

Duyarlı Tasarımına İlişkin Yönetmelik” 2010 yılında hazırlanarak yürürlüğe girmiştir. Ayrıca Avrupa Birliği’nin Elektrik Motorları ile İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair EC/640/2009 sayılı tüzüğü referans alınarak SGM-2012-2 “Elektrik Motorları ile İlgili Çevreye Duyarlı Tasarım Gereklerine Dair Tebliğ” 2012 yılında yayınlanmıştır. Bu tebliğ ile;

Yüksek verimli elektrik motorlarına geçiş zorunlu hale getirilmiş,

IE3 ve üzeri verimlilik sınıfına sahip motorların kullanımı teşvik edilmekte,

Değişken hızlı sürücüler ve uygun motor bakım uygulamaları ile enerji tüketimi azaltılmaktadır.

Bu önlemler hem elektrik tüketimini hem de bu tüketime bağlı sera gazı emisyonlarını doğrudan azaltmaktadır. Verimli motorların kullanılmasıyla yapılan enerji tasarrufu potansiyeli dünya genelinde %10 civarında olup, Türkiye özelinde de bu oranın yükseltilmesi hedeflenmektedir. Asenkron motorlar (ASM), dayanıklılık, düşük bakım maliyeti ve basit tasarımları nedeniyle sanayinin temel taşı olarak kabul edilir (Hubbi ve Goldberg, 1993). Ancak, 500 beygir gücün altındaki motorların endüstrideki motorların %99,7’sini oluşturması ve genellikle nominal yüklerinin %60’ında çalışmaları, enerji kaybına ve verimsizliğe yol açmaktadır (Lu ve ark., 2008). Bu kayıplar, yük faktörüne bağlı olarak uzun vadede önemli maliyetlere neden olabilmektedir. Öte yandan, enerji maliyetlerinin hammadde ve üretim maliyetlerinden daha hızlı artması (Montgomery, 1984), şirketleri enerji yöneticileri istihdam etmeye ve motor sistemlerinde verimlilik iyileştirmelerine yöneltmiştir (Hirzel, 1994). Enerji verimli motorlara geçiş, hem çevresel hem de ekonomik açıdan kritik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Pillay, 1997).

Ancak, verimlilik hesaplamalarında yalnızca üretici verilerine veya etiket değerlerine dayanmak, hatalı sonuçlara yol açabilmektedir (Pillay ve ark., 1998). Yatırım maliyetini karşılama süresi ve enerji tasarrufu analizi için motorların çalışma koşullarındaki verimliliğinin hassas bir şekilde ölçülmesi veya tahmin edilmesi gereklidir. Mevcut uluslararası standartlar (IEC 60034-2-1 ve IEEE 112), motorların yükten ayrılarak laboratuvar ortamında test edilmesini şart koşar. Fakat bu yöntem, motorun çalıştığı uygulamalarda sistem kesintisine neden olduğundan pratik değildir (Siraki ve ark., 2013). Bu durum, endüstrinin ihtiyaçları doğrultusunda yerinde verimlilik tahmin yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Campbell, 1996).

Asenkron motorları simüle etmek veya kontrol etmek için motorun eşdeğer devre parametrelerinin doğru bir şekilde bilinmesi gerekir. Bazı durumlarda eşdeğer devre parametreleri motor üreticilerden temin edilebilir, ancak bu bilgi genellikle hazır değildir. Eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için alternatif olarak, belirli değişkenleri ölçerken bir dizi test (örneğin yüksüz testler ve kilitli rotor testleri) yapılmalıdır ancak bu, motorun uygun enstrümantasyonun mevcut olduğu bir test düzeneğine kurulmasını gerektirir. Eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için son seçenek olarak, parametre tahmini yoluyla parametreleri belirlemek için kurulu ve yerinde çalışan motordan ölçülen verileri kullanmaktır (Jover ve ark., 2005). Parametre tahmini çevrimiçi olarak yapılabiliyorsa, sistem parametrelerini elde etmek için en az çaba ve maliyet gerektiren yöntem budur.

Ne yazık ki asenkron motor parametrelerini tahmin etmek oldukça karmaşık ve zorlu bir durumdur ve ancak çok az ölçülen değişkenler sistem girdileri olarak mevcuttur, örnek olarak motorun giriş akımı, gerilimi, gücü, rotor hızı vb. elde edilen bu verilerdeki hatalar parametre tahminlerinin daha düşük doğrulukta olmasına neden olmaktadır. Bu, ASM ile ilgili ilk parametre tahmin sorunudur.

ASM eşdeğer devre parametre tahmini ile ilgili ikinci sorun, tahmini yönlendirmek için çok sayıda ölçülen değişken mevcut olsa bile, tahmin edilen parametre dizisinin yine de tek bir çözüm olmayacağı, ancak sonsuz sayıda matematiksel çözümden birini oluşturacağıdır. Bunun nedeni, asenkron motor eşdeğer devre modelleri tarafından kullanılan sekiz tane elektriksel parametrenin, başka herhangi bir kısıtlama olmaksızın harici ölçümler (akım, hız, tork ölçümü gibi) kullanılarak tek bir ölçüm ile belirlenememesidir (Corcoles ve ark., 2002). Bu, eşdeğer devre parametrelerin stokastik bir tahmin yöntemi kullanılarak iki kez tahmin edilmesi durumunda iki farklı çözüm bulunabileceği veya farklı algoritma başlangıç vektörleriyle deterministik bir tahmin edici kullanılması durumunda yine iki farklı çözüm bulunacağı anlamına gelir. Bu durum, parametre belirleme problemini imkânsız hale getiriyor gibi görünmektedir. Ancak daha pragmatik bir bakış açısıyla, eşdeğer devre parametre tahmin problemi için benzersiz bir global çözüm aslında çok gerekli değildir. Ayrıca, eğer motor denetimi düşünülüyorsa, kabul edilebilir performans sağlayacak sonsuz sayıda “iyi” çözüm bulunmaktadır (Bradley, 2013).

Sanayide yaygın olarak kullanılan üç fazlı asenkron motorlar sahip oldukları dayanıklılık, düşük maliyet ve bakım kolaylığı gibi avantajlara rağmen, enerji verimliliği

açısından değerlendirilmesi gereken önemli elektrikli makinelerdir. Bu motorların işletme sürecindeki enerji verimlerinin hassas ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi hem enerji tasarrufu hem de sürdürülebilir üretim politikalarının uygulanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak klasik yöntemlerle yapılan verim ölçümleri genellikle laboratuvar ortamlarında zaman alıcı ve müdahaleli test prosedürleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu durum sahada çalışan motorlar için verim ölçümünü pratik olmaktan uzaklaştırmakta ve aynı zamanda işletme sürekliliğini de riske atmaktadır.

Bu tez çalışmasında, üç fazlı asenkron motorların yerinde (in-situ), müdahalesiz ve yüksek doğrulukla verim tahmini amacıyla sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı güç seviyelerine sahip altı adet ASM üzerinde yapılan analizler yoluyla motorlara ait eşdeğer devre parametreleri sekiz farklı optimizasyon algoritması (PSO, GA, GWO, HHO, TSA, DSA, WOA, RFA) kullanılarak tahmin edilmiş ve buna bağlı olarak verim değerleri hesaplanmıştır. Tahmin sonuçları, IEEE 112-A standardı referans alınarak ölçülen verim değerleri ile karşılaştırılmış ve algoritmaların doğruluk performansları dört farklı yükleme seviyesinde analiz edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, gerilim dengesizliğinin motor verimi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla kurulan özel test düzeneği ile 1.1 kW gücündeki bir asenkron motor, %0 ile %5 arasında değişen gerilim dengesizliği (VUF) seviyelerinde ve farklı yükleme oranlarında test edilmiştir. Bu aşamada elde edilen veriler, önerilen yöntem aracılığıyla analiz edilerek dengesiz gerilim koşullarında PSO algoritmasının tahmin yeteneği değerlendirilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen yöntem, özellikle tam yük ve düşük VUF koşullarında yüksek doğrulukla çalışmakta; ayrıca müdahalesiz uygulanabilirliği ve düşük maliyeti sayesinde endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyeli taşımaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Uluslararası Standartlar

IEEE 112 standardı, IEEE Toplulukları ve IEEE Standartları Koordinasyon Komiteleri tarafından, IEEE Standartları Derneği (IEEE-SA) Standartlar Kurulu içinde geliştirilmiştir (Trandafilov, 2004). Bu standart IEEE Std-43, IEEE Std-118, IEEE Std-119 ve IEEE Std-120 standartlarıyla birlikte, asenkron motorlarının (ASM) verimini ölçmek ya da tahmin etmek için beş yöntem sunmaktadır (A, B, C, E ve F) (Trandafilov, 2004).

Metot A: ASM'un verimliği genellikle çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak kabul edilir. Metot A, verimi doğrudan tespit eden bir yöntemdir ve giriş ile çıkış güçlerini ölçmeyi gerektirir. IEEE Std-120 kılavuzlarında belirtildiği gibi giriş gücü, giriş gerilimlerini, stator akımlarını ve onların faz açılarını kullanarak ya da bir wattmetre kullanılarak kolayca ölçülebilir. Çıkış gücü, tork sensörü ve tako-metre benzeri bir hız sensörü kullanarak ölçülebilir. Metot A, ASM'un verimini ölçmek için en doğru yöntemdir ve diğer yöntemlerin doğruluğunun belirlenmesi için bir referans olarak kabul edilebilir. Bu metot, tork sensörünün motorun miline takılabilmesi için motorun yükten ayrılmasını gerektirir. Sonuç olarak, bu yöntem müdahalesiz (yerinde) uygulamalarda kullanılamaz. Tork sensörüne ihtiyaç duyulması ve pahalı olması nedeniyle, Metot A'nın bir diğer dezavantajını oluşturur.

Metot B: Bu metot ASM'un kayıplarının ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemde, çekirdek kaybı (P_{fe}) ve sürtünme ve rüzgâr kayıpları (P_{FW}) yüksüz bir test gerçekleştirilerek ölçülür. Stator bakır kaybı (P_{scl}), ölçülen soğuk stator direnci ve buna karşılık gelen sıcaklığın yanı sıra çalışma noktasındaki akım ve sıcaklık kullanılarak hesaplanır. Rotor bakır kaybı (P_{rcl}), çalışma noktasındaki hem kayma (s) hem de hava aralığı gücü (P_{gap}) ölçümüne dayanır.

$$P_{rcl} = sP_{gap} \quad (2.1)$$

Kaçak yük kaybı (P_{SLL}), çıkış ve giriş güçleri arasındaki fark olan toplam kayıplardan stator ve rotor direnç kaybı, nüve kaybı, sürtünme ve rüzgâr kaybı toplamının çıkarılmasıyla ölçülür. ASM bileşenlerinin sökülmesi ve birkaç farklı işlemin gerçekleştirilmesi gerekliliği nedeniyle değişken voltaj ve frekans kaynağı gerektiren testlerde, Metot B'nin çok müdahaleci ve pahalı olduğu ve müdahalesiz (in-situ) ASM'lara uygulanamayacağı düşünülmektedir.

Metot C: Bu metot, iki özdeş makine mevcut olduğunda ve iki bağımsız güç kaynağı kullanılarak birbirine bağlandığında ve her makine alternatif olarak bir jeneratör ve motor olarak çalıştığında kullanılır. Bu nedenle, Metot C de çalışan bir ASM için uygun bir çözüm olarak değerlendirilemez.

Metot E ve E1: Metot E, Metot B'ye benzer, ancak çıkış gücü ölçümü gerekli değildir ve kaçak yük kaybı, çıkarılmış rotor testi ve ters dönüş testi gerçekleştirilerek ölçülür. Bu metot da çok müdahaleci bir yöntemdir. Öte yandan, E1 metodu kaçak yük kaybı için deneysel sonuçlar kullanır ve bu da Metot E'nin müdahaleciliğini azaltır, ancak yine de müdahalecidir.

Metot F ve F1: Bu metot ASM eşdeğer devre hesaplamalarına dayanır. Eşdeğer devre parametreleri yüksüz ve empedans testleri gerçekleştirilerek tahmin edilir. P_{FW} , yüksüz test kullanılarak ölçülür ve P_{SLL} , çıkarılmış rotor ve ters dönüş testleri kullanılarak ölçülür. Metot F1, yöntemin karmaşıklığını azaltmak için deneysel sonuçlar kullanır. Ancak, müdahalesiz (in-situ) test için uygulanabilir değildir.

2.2 IEC 60034-2-1

IEC 60034'ün bir parçası olan IEC 60034-2-1, açıklanan testlerden elde edilen verim ve kayıpları belirleme yöntemlerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu standart, IEC 60034-2-1 kapsamındaki her boyuttaki DC makineler, AC senkron ve indüksiyon (asenkron) makineleri için geçerlidir (Commission, 2007).

IEC 60034-2'nin 1972 yılında yayınlanan eski versiyonu, basitliği ve sargı sıcaklığı ile kaçak yük kaybının belirlenmesinde daha az bilgi gerektirmesi nedeniyle 2007 yılına kadar Avrupa'da kullanıldı. Bu standardın yeni versiyonu, özellikle kaçak yük kaybı tespitindeki yüksek ölçüm belirsizliklerinin ve düşük doğruluğunun üstesinden gelmek için Kasım 2007'de yayınlanmıştır. Her iki standartta da rotor bakır kaybı, sürtünme ve sargı kaybının belirlenmesi benzer olsa da stator bakır, nüve kaybı ve yük kaybının belirlenmesinde bazı farklılıklar vardır. IEC 60034-2-1, yük değişiminin ve stator direnci gerilim düşüşünün etkilerini dikkate alarak nüve kaybı değerlerinin daha doğru tahmin edilmesini sağlar. Birçok çalışma kaçak yük kaybının doğru belirlenmesi açısından, IEC 60034-2-1'in IEEE Std-112'kayla doğruluğunu tartışmaktadır (Agamloh, 2010; Pillay ve ark., 2016).

Bu standartlarda açıklanan yöntemlerle ölçülen kayıplar neredeyse benzer olduğundan, IEEE ve IEC standartları kullanılarak ölçülen verimlilik değerleri yaklaşık

olarak aynıdır. Sıcaklık ölçümü açısından, IEEE Std-112 sargı sıcaklığını elde etmek için müdahaleci olan bazı sensörlere ihtiyaç duyarken, IEC 60034-2-1 sensörlerin gerekliliğini ortadan kaldıran bir yöntem kullanır, ancak doğru bir sargı sıcaklığı garanti edilmemektedir (Cao, 2009).

2.3 Diğer Yöntemler

Standartları uygulamanın zorluğu ve bazı müdahaleci testler yapma gereklilikleri nedeniyle, araştırmacılar tarafından aşağıda tartışılan başka yöntemler önerilmiştir.

2.3.1 Akım Yöntemi

Akım yöntemleri ölçülen akımın tam yük akımına oranıyla (yüzde olarak) orantılı olduğunu varsayar. Kayma yöntemlerinde olduğu gibi, akım yöntemlerinin de temel özelliği basit olmalarıdır, ancak yaşanan yanlışlıklar nedeniyle önemli dezavantajlara sahiptirler. Mevcut akım yöntemleri arasında standart akım yöntemi, modifiye akım yöntemi ve gerilim kompanzasyonlu akım yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler aşağıda verilmektedir:

Standart Akım Yöntemi

Bu yöntem giriş akımı ve giriş gücü ölçümüne, nominal akıma ve etikette belirtilen güç değerine dayanır. Bu yöntemin en basit versiyonunda, çıkış gücü ile giriş akımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılır. Aşağıdaki gibi çıkış gücünü (P_2) hesaplamak için nominal gücü ($P_{2,nominal}$), nominal akımı ($I_{1,nominal}$) ve ölçülen akımı ($I_{1,ölçülen}$) kullanır:

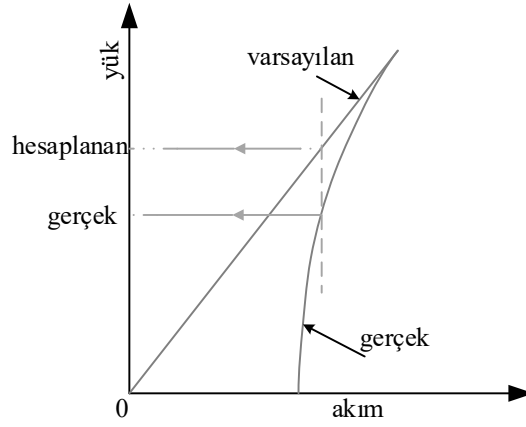
$$P_2 = \frac{I_{1,ölçülen}}{I_{1,nominal}} P_{2,nominal} \quad (2.2)$$

ve tahmini verim aşağıdaki gibi verilir:

$$\eta = \frac{P_2}{P_{giriş,ölçülen}} \quad (2.3)$$

Yöntem basittir ancak doğruluğu düşük ve bazı dezavantajları vardır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yüksüz akım sıfır olmamasına rağmen bu yöntemde başlangıç akımı sıfır olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle yöntem bazı yanlış verimlilik değerleri gösterecektir. Sonuç olarak bu yöntem özellikle düşük yüklerde hatalı sonuçlar vermektedir. Hatalı sonuca sebep olan bir diğer unsurda çıkış gücü ile giriş akımı arasında

doğrusal bir ilişki olduğu varsayımı, yükü ve dolayısıyla verimi her zaman olduğundan fazla tahmin eder (Hsu ve ark., 1996; Kueck, 1998).



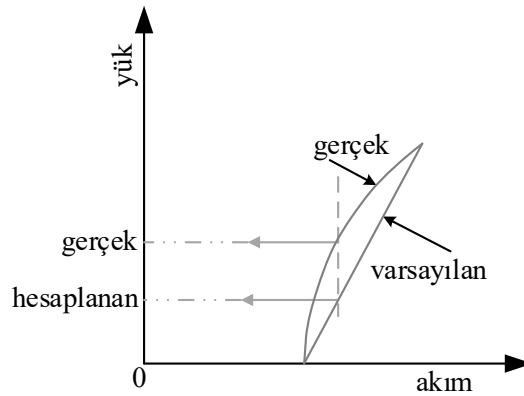
Şekil 2.1. Asenkron motor varsayılan ve gerçek akım-yük eğrisi (Hsu ve ark., 1996).

Akım yönteminin iki değiştirilmiş versiyonunda yüksüz akım eşitlik (2.3)'e (I_0) değeri aşağıdaki gibi eklenerek doğruluk artırılır (Hsu ve ark., 1996; Lu ve ark., 2006a):

$$\eta = \frac{P_{2,nominal}}{P_{giriş,ölçülen}} \left(\frac{I_{1,ölçülen} - I_0}{I_{1,nominal} - I_0} \right) \quad (2.4)$$

$$\eta = \frac{P_{2,nominal}}{P_{giriş,ölçülen}} \left(\frac{2I_{1,ölçülen} - I_0}{2I_{1,nominal} - I_0} \right) \quad (2.5)$$

Bu doğrusal ilişki varsayımının etkisini azaltır ancak yüksüz akım ölçümü gerekliliği karmaşıklığa neden olur. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi çıkış gücü ile giriş akımı arasında varsayılan ilişki gerçek değerden uzak kalması ve ayrıca etiket verilerinde %20'ye kadar sapma olabilmesi nedeniyle yöntemin doğruluğu hala düşüktür (Hsu ve ark., 1996; Lu ve ark., 2006a).



Şekil 2.2. Modifiye edilmiş akım yöntemi ile asenkron motor varsayılan ve gerçek akım-yük eğrisi

2.3.2 Kayma Yöntemi

Kayma yöntemleri, motor verimini tahmin etmek için hız ölçümlerine dayanır. Yükün yüzdesinin, ölçülen kaymanın tam yük (nominal) kaymaya orantılı olduğu kabul edilmektedir. Ancak bu yöntemin verimi doğru tahmin etmek için önemli dezavantajlara sahiptir. Kayma yönteminin doğruluğunu artırmak için birkaç varyasyonu geliştirilmiştir. Bu varyasyonlar standart kayma yöntemi, modifiye kayma yöntemi ve üst sınır kayma yöntemidir

Teorik olarak, standart kayma yöntemiyle bir ASM'un verimi hesaplanabilir (J Chapman, 2004).

$$\eta = \frac{(1 - s)}{(1 + s)} \quad (2.6)$$

Burada s kaymadır. Bu eşitlik, motorda rotor direnci dışında hiçbir kayıp olmadığı varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle bu yöntem, verimi her zaman olduğundan fazla tahmin eder ve çok büyük hatalara sahiptir.

Şekil 2.3 farklı tasarım sınıflarındaki ASM'ların tork-kayma eğrilerini göstermektedir. Hızın yüksüz noktadan tam yük noktasına kadar neredeyse doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Bu nedenle, motorun çıkış gücü yük ile doğrusal olarak değişir ve sonuç olarak verim aşağıdaki gibi tahmin edilebilir:

$$\eta = \frac{P_{2,nominal}}{P_{giriş,ölçülen}} \left(\frac{S_{ölçülen}}{S_{nominal}} \right) \quad (2.7)$$

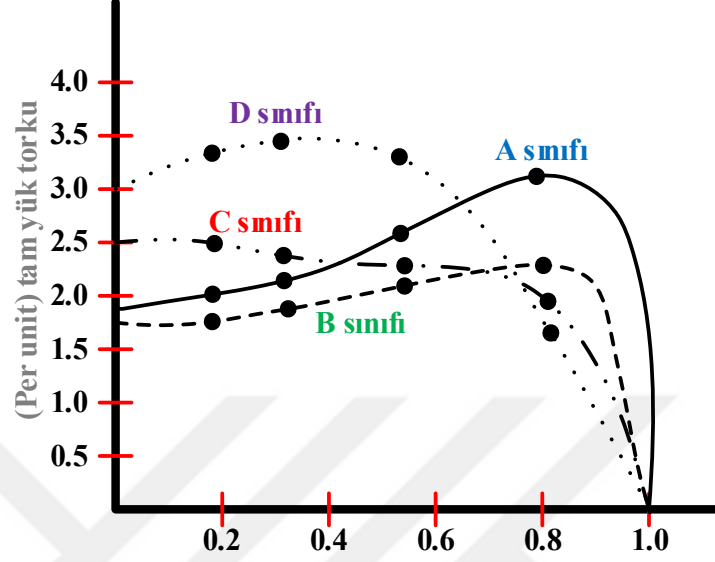
Bu yöntem müdahaleci olmamasına rağmen, aşağıdaki nedenlerden dolayı düşük doğrulukta olması dezavantajıdır. Birincisi, gerçekte kayma yük ile doğrusal olarak değişmez. İkincisi, NEMA standardına göre %20'ye kadar sapma gösterebilen etiket verilerinin kullanılması hatalı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Hsu ve ark., 1996; Lu ve ark., 2006a). Üçüncü olarak, ortam sıcaklığı kaymayı etkiler (Ferreira ve de Almeida, 2008).

Yukarıdaki eşitliğe gerilim terimlerinin eklenerek kullanılması doğruluğu bir dereceye kadar iyileştirmek için bir seçenektir (Holmquist ve ark., 2004; Ferreira ve de Almeida, 2008). Ancak, doğruluğun hala düşük olduğu kabul edilmektedir.

$$\eta = \frac{P_{2,nominal}}{P_{giriş,ölçülen}} \left(\frac{S_{ölçülen}}{S_{nominal}} \right) \left(\frac{V_{1,ölçülen}}{V_{1,nominal}} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$\eta = \frac{P_{2,nominal}}{P_{giriş,ölçülen}} \left(\frac{s_{ölçülen} - s_{ölçülen}^2}{s_{nominal} - s_{nominal}^2} \right) \left(\frac{V_{1,ölçülen}}{V_{1,nominal}} \right)^2 \quad (2.9)$$

Burada $V_{1,ölçülen}$ ve $V_{1,nominal}$ statorun ölçülen ve nominal gerilimidir.



Şekil 2.3. ASM'ların kayma-tork grafiği (Thakur, 2020).

En basit ve özgün üst sınır kayma yöntemi (Guru ve Hiziroglu, 2001), stator kaybının sıfır olduğunu varsayar. Verim eşitlik (2.10)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\eta \leq (1 - s_{ölçülen}) \quad (2.10)$$

Bununla birlikte, stator kaybı standart bir motordaki toplam kayıpların yaklaşık %40'ını oluşturduğu iyi bilinmektedir. Bu yöntem, eşitlik (2.11)'de olduğu gibi stator kaybı da dahil edilerek geliştirilebilir (Wallace ve ark., 2001).

$$\eta = (1 - s_{ölçülen}) \left(1 - \frac{3I_1^2 R_1}{P_{1,ölçülen}} \right) \quad (2.11)$$

Bu kayma yönteminden elde edilen verim, rotor kayıplarını, nüve kayıplarını, sürtünme ve rüzgâr kayıplarını ve kaçak yük kayıplarını ihmal ettiği için her zaman gerçek verimden daha yüksektir. Stator direnci de sıcaklıkla birlikte değişir. Bunun soğuk stator direnci mi yoksa çalışma sıcaklığı direnci mi olduğuna dair bir gösterge yoktur.

Yukarıda ele alınan kayma yöntemleri hakkındaki tartışmayı özetlemek gerekirse, düşük müdahale seviyesine sahip oldukları ancak nispeten düşük doğruluğa sahip oldukları söylenebilir.

2.3.3 Eşdeğer Devre Yöntemi

Eşdeğer devre yönteminin temel avantajı, yalnızca ölçüm yapılan çalışma koşullarında değil, motorun farklı çalışma durumlarında da veriminin hesaplanabilmesine imkân sağlamasıdır. Ayrıca, eşdeğer devrenin empedansı doğru bir şekilde belirlendiğinde, yöntem farklı yüklerde yapılan testler olmadan ilgili yükleme kademlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Eşdeğer devre yöntemine bir örnek IEEE Std. 112, Yöntem F1'dir. Bu yöntem, eşdeğer devre parametrelerini ve yüksüz kayıpları hesaplamak için empedans testi ve yüksüz test içerir. Bu yöntemin oldukça doğru olmasına rağmen, saha kullanımı için çok müdahaleci olduğu düşünülmektedir (Hsu ve ark., 1996). Temel Yöntem F1'de dört farklı empedans hesaplama yöntemi sunulmaktadır. Dört yöntemden üçü kilitli rotor testi gerektirirken, bir yöntem (yöntem 3) yüksüz düşük voltaj testi gerektirmektedir. Bu yöntem çok doğru olmasına rağmen, çok müdahalecidir ve çalışma esnasındaki makinelere uygulanamaz.

Ontario Hydro modifiye metod F (OHMF) değişken voltaj testi ihtiyacını ortadan kaldırır, ancak nominal voltajda yüksüz ve tam yük testleri gereklidir (Hydro, 1990). Bu nedenle, ASM'u yükten ayırmak gereklidir. Stator gerilimi ve akımı, giriş gücü ve stator direncinin yanı sıra rotor hızı da ölçülmesi gereken verilerdir.

Kilitli rotor yöntemi ve durağan frekans tepkisi yöntemi, iki rotor döngüsüne sahip bir eşdeğer devreye dayanmaktadır. İlk yöntem iki kilitli rotor empedans testi veya bir kilitli rotor ile bir yüksüz test gerektirir ki bu oldukça müdahaleci bir yöntemdir (Dell'Aquila ve ark., 1984). İkinci yöntem rotor sabitken motorun empedansını ölçmek için 0,01 ila 500 Hz aralığına sahip değişken bir frekans kaynağı gerekmektedir (Willis ve ark., 1989).

ORMEL96 yöntemi, motora fiziksel müdahale gerektirmeden, yalnızca etiket verilerini kullanarak eşdeğer devre parametrelerini tahmin eden bir yaklaşımdır (Kueck ve ark., 1996; Kueck, 1998). Bu yöntem müdahaleci olmamasına rağmen, doğruluğu düşüktür çünkü tamamen etiket verilerine dayanır ve bu veriler NEMA MG 1'e göre %20'ye varan hatalara sahip olabilir (Association, 2003). Tipik etiket verileriyle dahi kullanıldığında, yöntemin ortalama doğruluğu düşüktür ve yaklaşık %4 hata payı içerisindedir.

Rockwell motor-verimlilik sihirbazı (RMEW) yöntemi, ASM eşdeğer devre parametrelerini bulmak için iki farklı yük çalışma noktasından alınan verileri kullanır (El-

Ibiary, 2003). Bu yöntemde motorun stator direnci, hızı ve sıcaklığı da kaydedilmelidir. Ancak, yazarlar giriş empedansının hesaplanmasında kullanılan doğrusal olmayan eşitliklerin nasıl çözüldüğüne dair herhangi bir açıklama sunmamıştır.

2.3.4 Hava Aralığı Torku Yöntemi

Hava aralığı torku hem stator hem de rotorda akı bağlantılarının ve akımların etkileşiminin bir sonucudur. Aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir (Hsu ve Scoggins, 1995; Hsu ve Sorenson, 1996):

$$T_{AG} = \frac{p}{2\sqrt{3}} \{ (2i_A + i_C) \int [V_{CA} - R_1(i_C - i_A)] dt - (i_C - i_A) \int [-V_{BA} - R_1(2i_A + i_C)] dt \} \quad (2.12)$$

Burada p kutup sayısı ve R_1 stator direncidir. Eşitlik (2.12)'ye göre, hava aralığı torkunu hesaplamak için stator direncinin yanı sıra sadece iki hat arası gerilim (V_{CA} ve V_{BA}) ve iki hat akımı (i_A ve i_C) ölçülmelidir. Bu yöntem, RMS değerleri yerine gerilimlerin ve akımların anlık değerlerini en az beş döngü boyunca kaydetmek için veri kayıt cihazları gerektirir (Hsu ve Sorenson, 1996). Dengesiz gerilimlerin hava aralığı torku üzerindeki etkisi dikkate alınır. Motorun verimi aşağıdaki gibi tahmin edilebilir:

$$\eta = \frac{1}{P_{giriş,ölçülen}} \left[T_{AG} \cdot n_{r,ölçülen} \frac{2\pi}{60} - P_{FW} - P_{SLL} \right] \quad (2.13)$$

Burada $n_{r,ölçülen}$ ve $P_{giriş,ölçülen}$ ölçülen rotor hızı ve giriş gücüdür. Yüksek doğruluğu korumak için P_{FW} ve P_{SLL} değerleri gereklidir. Bu yöntem, motorun yükten ayrılmasını ve yüksüz test, ters döndürme testi ile rotor çıkarılarak yapılan testler gibi çeşitli deneylerin gerçekleştirilmesini gerektirir. Bu da yöntemi oldukça müdahaleci hale getirmektedir. Hava aralığı yönteminin modifiye edilmiş versiyonunda, müdahalecilik seviyesini azaltan ancak aynı zamanda doğruluğu azaltan deneysel değerler kullanılır (Lu ve ark., 2008). Hava aralığı yönteminin ana dezavantajı, motorun diğer çalışma noktaları hakkında bilgi sağlayamamasıdır. Bu, her bir yükteki verimliliği değerlendirmek için ölçümler alınmadan önce motorun yük altında çalıştırılması gerektiği anlamına gelir ki bu da yerinde uygulamalarda istenmeyen bir durumdur.

2.3.5 Optimizasyon Tabanlı Yöntemler

Optimizasyon tabanlı yöntemler çoğunlukla giriş ve etiket verilerini kullanarak ASM'un eşdeğer devre parametrelerinin çıkarılmasına dayanır. Bu yöntemler sonuç olarak eşdeğer devreyi çözerek farklı koşullarda verimi tahmin etmeye yardımcı olabilir.

ASM'un verim tahmininde genetik algoritma uygulaması Pillay ve ark. (1998)'de incelenmiş ve bazı koşullar araştırılmıştır. İki yükleme noktasının verilerinin kullanılmasının sonuçların doğruluğunu artırabileceğini göstermiştir. Ayrıca, amaç fonksiyonunda daha fazla kısıtlama kullanmak daha iyi çözümlerle sonuçlanmaktadır. Giriş gücü, akım ve güç faktörü amaç fonksiyonunda kullanılan genel parametrelerdir. Amaç fonksiyonunda etiket gücünün kullanılmasının, çıkış gücünün etiket gücünden çok fazla değişmemesi durumunda hataları azaltmak için yararlı olabileceği gösterilmiştir.

Charette ve ark. (2000), çalışmalarında asenkron motorların yerinde verim tahmini için genetik algoritma tabanlı müdahalesiz bir yöntem önermiştir. Bu yöntemin, birden fazla yük noktası ile sıcaklığın dirençler üzerindeki etkilerini dikkate alarak tahmin doğruluğunu artırdığı ve verim tahmininde %1'den az hata ile sonuç verdiği belirtilmiştir.

Sakthivel ve ark. (2010b), asenkron motorlarının yerinde verim tahmini için bağışıklık algoritması tabanlı (immune algorithm-based), müdahalesiz bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, değiştirilmiş bir eşdeğer devre kullanılmıştır. Rotor kaçak yük kaybı dahil edilmiş ve tork sensörü ile geleneksel parametre tahmin yöntemlerine karşı doğruluğu kanıtlanmıştır.

Lu ve ark. (2006b); (Lu ve ark., 2006c)'de makine parametrelerini tahmin etmek için üç yöntem kullanılmışlardır: Newton-Raphson yöntemi, benzetilmiş tavlama yöntemi ve parçacık sürüsü optimizasyonu PSO yöntemi. Amaç fonksiyonunu tanımlamak için giriş empedansının gerçek ve sanal kısımları kullanılmıştır. Algoritmanın girişleri, iki çalışma noktasındaki giriş gerilimi ve akımının fazör verileridir. İki nokta dikkatlice seçilmelidir çünkü çok yakın koşullar kötü sonuçlara neden olurken, çok yayılmış koşullar sıcaklık değişimi, akı doygunluğu vb. nedeniyle parametre değişimlerinden kaynaklanan ek hatalara neden olur. P_{SLL} 'nin rotor devresine seri olarak eşdeğer bir direnç eklenerek dikkate alınması, modelin doğruluğunu azaltan dezavantajlarından biridir. Sonuçlardaki hata, düşük doğruluğu gösteren farklı yükler için %2-3'tür. Yük değişiminin rotor direnci üzerindeki etkisinin göz ardı edilmesi de bu yaklaşımın bir diğer dezavantajıdır.

Sakthivel ve ark. (2010a); (Sakthivel ve ark., 2011)'de verim tahmini için bakteri arama tabanlı algoritma kullanmışlardır. Stator gerilimi, akımı ve giriş gücünün yanı sıra, stator direnci ve rotorun çalışma hızı da algoritmanın girdileridir. IEEE Std. 112'ye göre rotor devresinde seri direnç kullanarak P_{SLL} 'yi dahil etmek için değiştirilmiş eşdeğer

devre kullanılır. Bu algoritma iki duruma uygulanmıştır; ilk durumda girdi olarak sadece tam yük durumu verileri kullanılırken, ikinci durumda %25, %50, %75 ve %100 yük verileri kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu giriş gücü ve akımını içermektedir. İkinci durumun sonuçları ilk duruma göre daha iyidir. Bununla birlikte, bazı yüklerde, özellikle düşük yüklerde sonuçların hatası %3'ten fazladır. Aynı algoritma (Santos ve ark., 2013)'te dengesiz gerilimlerle verim tahmin etmek için kullanılmıştır. Pozitif ve negatif sekans eşdeğer devreler kullanılmış mıknatıslanma reaktansı X_m ve nüve kaybı direnci R_{fe} 'nin seri bağlı olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, pozitif ve negatif sekans eşdeğer devrelerde R_1 , X_1 , X_m ve R_{fe} 'nin aynı değerlerde olduğu, R_2 ve X_2 'nin ise farklı değerlere sahip olduğu varsayılmıştır.

Thangaraj ve ark. (2011), asenkron motorların yerinde verim tayinini, PSO ve Veri Zarflama Analizi (Data Envelopment Analysis DEA) gibi optimizasyon teknikleri kullanarak gerçekleştirmiştir. Bu yaklaşım, yüksüz testlere ihtiyaç duymadan verim ölçümünü mümkün kılmakta; çalışmada 5 Hp gücündeki bir motor üzerinde elde edilen sonuçlar, genetik algoritma ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Siraki ve Pillay (2011b), asenkron makinelerin yerinde verim tayini için, müdahaleci boş çalışma testlerine ihtiyaç duymadan, yalnızca giriş akımı ve aktif güç verilerini kullanan bir yöntem önermiştir. Geliştirilen evrim temelli algoritma hem dengeli hem de dengesiz besleme koşullarını etkili bir şekilde ele almakta ve gerçek dünya uygulamalarında tahmin doğruluğunu artırmaktadır.

Siraki ve Pillay (2011a); (Siraki ve ark., 2013) dengesiz besleme koşulu altında verimi tahmin etmek için GA kullanmışlardır. Giriş gücü ve stator akımının yanı sıra makinenin tam yük sıcaklığı amaç fonksiyonu terimlerini oluşturmaktadır. Doğruluğu artırmak için, birkaç yükleme noktasının (üç veya beş nokta) verileri girdi olarak kullanılır. Gerekli yükleme noktası verilerinin sayısı ve makinenin yalıtım sınıfına bağlı olarak tam yük sıcaklığının belirlenmesi, önerilen algoritmanın doğruluğunu azaltan ana dezavantajlarıdır.

Chandrankanth ve ark. (2012) asenkron motorlarının yerinde verim tayinini, PSO kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntem sürekli çalışma ortamlarında pratik olmayan yüksüz testler olmadan parametre tahminine olanak tanımaktadır. Sonuçlar, fiziksel verimlilik ölçümleriyle karşılaştırılarak doğrulanıyor ve çeşitli hedef fonksiyonlarda minimum hata göstermektedir.

Gharakhani Siraki (2012) asenkron makineleri için yalnızca iki hat gerilimi ve akımı kullanarak müdahalesiz bir yerinde verim tahmin tekniği geliştirmiştir. Dengesiz besleme ve gerilim koşullarının oluşturduğu zorlukları ele almış ve mekanik ölçümler veya pahalı dinamometre testleri olmadan verim tahmini yapılmasını gerçekleştirmiştir.

Viego Felipe ve ark. (2014), asenkron makinelerin yerinde verim tayinine yönelik çalışmalarında, kısmi yüklerde verimi tahmin edebilen düşük müdahaleli prosedürler kullanmıştır. Önerilen çeşitli yöntemler, karmaşık ekipman veya ileri düzey veri işleme gerektirmeksizin mühendislik uygulamaları için yeterli düzeyde hassasiyet sağlamaktadır.

Gajjar ve ark. (2014), asenkron makinelerin yerinde verim tayini için termal olarak kararlı tek bir yük noktasından hareketle, farklı yük koşullarındaki verimi tahmin eden bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem, IEEE Std 112-B standardına kıyasla %0,01–5,01 ve IEC 34-2-1 standardına kıyasla %0,07–3,48 arasında doğruluk sağlamaktadır.

Al-Badri (2015), asenkron motorlar için üç farklı yerinde verim tahmin algoritması önermiştir: bunlardan ilki dengeli gerilim koşulları, ikincisi dengesiz gerilim koşulları ve üçüncüsü bozulmuş dengesiz gerilim koşulları için geliştirilmiştir. Söz konusu algoritmalar, çeşitli motor çalışma koşulları altında test edilmiş ve kabul edilebilir düzeyde doğruluk sağladıkları gösterilmiştir.

Al-Badri ve ark. (2015)'te çalışmalarında, verim tahmini doğruluğunu artırmak amacıyla genetik algoritma GA'nın üç katmanlı bir yapısı uygulanmıştır. Tam yük çalışma verileri girdi olarak kullanılmış; sürtünme ve rüzgâr kayıpları, kaçak yük kaybı ve tam yük sıcaklığı gibi parametrelerin belirlenmesinde geniş kapsamlı bir veri tabanından yararlanılmıştır. Amaç fonksiyonu kapsamında giriş gücüne ek olarak stator akımı, stator akımı ile gerilim arasındaki faz açısı ve çıkış gücü kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar yüksek doğruluk göstermesine rağmen, amaç fonksiyonunda çıkış gücünün yer alması önemli bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir; zira çoğu yerinde uygulamada çıkış gücü bilgisi mevcut değildir. Ayrıca, Pillay ve ark. (1998) çıkış gücündeki ölçüm hatalarının verim tahmininde ciddi sapmalara yol açabileceğini vurgulamıştır.

Bijan ve ark. (2018), asenkron motorların verim tahmininde kullanılan parametre aralıklarının uygun şekilde belirlenmesine odaklanmıştır. Çalışmada, kararlı ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edebilmek için bu aralıkların doğru tanımlanmasının kritik

olduğu vurgulanmaktadır. Önerilen yöntem üç farklı motor üzerinde uygulanmış ve elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu ortaya konmuştur.

Sakthivel (2018), asenkron motorların yerinde verim tayini için Glowworm Swarm Optimization (GSO) yöntemini önermiş ve geleneksel yaklaşımların sınırlamalarını ele almıştır. Önerilen GSO tabanlı yaklaşım, 5 Hp gücündeki bir motor üzerinde test edilmiş ve GA ile PSO yöntemlerine kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

Ghasemi Bijan (2019), asenkron makinelerin yerinde verim tayini için müdahalesiz yöntemleri incelemiş ve minimum veri gereksinimiyle çalışan bir optimizasyon algoritması önermiştir. Çalışmada, kayıpların tahmini için sonlu eleman analizi (FEA) kullanılmış; ayrıca, ayarlanabilir hızlı sürücülerin verimlilik ve kayıplar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Diarra ve ark. (2022), asenkron makinelerin yerinde verim tayininde, motor çalışmasını kesintiye uğratmadan tork ve hız ölçümlerine dayalı bir tahmin yöntemi önermiştir. Geliştirilen Quantum Particle Swarm Optimization–Trust Region Algorithm (QPSO-TRA) yöntemi, parametre belirleme sürecini iyileştirmekte, hesaplama yükünü azaltmakta ve endüstriyel ortamlarda gerçek zamanlı verimlilik izlemesini mümkün kılmaktadır.

Yukarıda belirtilen algoritmalara ek olarak, Bakteriyel arama algoritması (Bacterial foraging algorithm, BFA) (Bacher ve Waldhart, 2008) ile benzetilmiş tavlama yöntemi (simulated annealing method SAM) de verim tahmini alanında kullanılan optimizasyon tekniklerine örnek olarak verilebilir. Her ne kadar optimizasyon tabanlı yöntemlerin en az müdahaleci teknikler olduğu kanıtlanmış olsa da doğruluk ve tekrarlanabilirlik açısından hâlen geliştirmeye açık yönleri bulunmaktadır.

2.4 Elektrik Motorlarının Yeniden Sarma Sorunları

Elektrik motorlarının işletme maliyeti, elektrik enerjisi maliyetindeki hızlı artış nedeniyle daha pahalı hale gelmiştir. Bu durum, ASM yeniden sarmanın motorun verimini nasıl etkilediği sorusunu daha önemli hale getirmektedir (Hirzel, 1994). Enerji maliyeti sorunu nedeniyle, birçok müşteri bir motorun ömrü boyunca iki veya daha fazla kez yeniden sarıldığında verimi nasıl etkilediğini sorduğunda en olası cevap “yeniden sarılmış bir motor asla orijinali kadar verimli değildir” olacaktır, ancak yine de bir müşteri "yüksek kaliteli yeniden sarılmış bir motorun orijinalinden daha yüksek verimliliğe sahip

olabileceğini" duyabilir. Aynı soruya verilen bu iki zıt cevap, bunun karmaşık bir konu olduğunun açık bir göstergesidir (Montgomery, 1984). Yeniden sarmanın motor verimi üzerindeki etkisini ölçmek için birçok çalışma yapılmıştır (None, 2002). General Electric tarafından yürütülen bir çalışmada, ortalama bir yeniden sarmanın motor kayıplarını %40 oranında artırdığı gösterilmiştir (Sterling, 1996). Yeniden sarılmış motorların verimlilik üzerindeki etkisini göstermek için Hydro-Québec, Ontario Hydro ve BC Hydro tarafından yürütülen önemli çalışmalar aracılığıyla ilginç bulgular yayınlanmıştır. Sonuçlar (Penrose, 1997)'da ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Bir motorun uygunsuz şekilde sarılması, motorun verimi ile ilişkili olan ve NEMA standardı MG 1-2011'de tanımlanan beş motor kaybının miktarını kesinlikle değiştirecektir (Association, 2011). Bu kayıplar şunlardır: stator bakır kaybı, rotor bakır kaybı, nüve kaybı, kaçak yük kaybı ve sürtünme ve rüzgar kaybı (Maru ve Wennerstrom, 1983). Toplam kayıpların neredeyse %50'sini oluşturan stator ve rotor bakır kaybı, farklı tel boyutu veya farklı sarım sayısı kullanılarak önemli ölçüde değiştirilebilir. İzolasyon hasarı durumunda çekirdek kaybı artırılabilir. Sürtünme ve rüzgâr kayıpları, rulmanlardaki bir değişiklikten veya farklı gres derecesinden de etkilenebilir. Gövde, stator veya rotor çekirdeklerindeki veya uç kalkanlarındaki herhangi bir hasar, kaçak yük kayıplarını artırılabilir (Montgomery, 1984). Bir motor uygunsuz şekilde onarırsa verimi önemli ölçüde azalabilir (Schueler ve Douglass, 1995).

Bazı durumlarda verimlilikte %1'lik bir azalmanın elle tutulur sonuçları olmayabilir, ancak motor çalışma saatleri hesaba katıldığında, potansiyel olarak boşa harcanan enerji önemli olabilir. Herhangi bir motorun çalışma verimi, orijinal tasarımı, yapının veya yeniden sarmanın kalitesi, ne kadar ağır yüklendiği ve güç kaynağının kalitesi tarafından belirlenir (Montgomery, 1984). Ancak verimlilik düşüşleri, onarım veya yeniden sarmanın kaçınılmaz veya açıklanamayan sonuçları değildir (Schueler ve Douglass, 1995). Mevcut araştırmalar, bakım ve onarım sonrasında asenkron motorların verimlilik ve performansını artırmaya odaklanmaktadır. Literatürde, onarım sürecinde stator sargı tasarımının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesinin, stator bakır kayıplarını azaltabileceği ve bu azalmanın, çekirdek ile sürtünme ve rüzgâr kayıplarındaki artışı telafi edebileceği gösterilmiştir (Cao ve Bradley, 2005).

IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü), NEMA (Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği) ve EASA (Elektrik Aparat Servis Birliği) gibi çeşitli kuruluşlar, motor tamir uygulamalarını geliştirmek için büyük çaba sarf etmektedir. Motor tamir endüstrisi

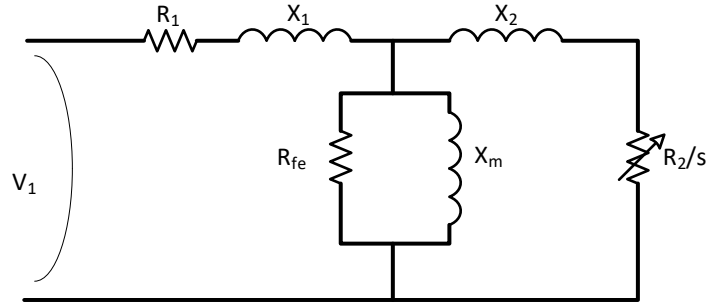
ile iş birliği yaparak, bu kuruluşlar endüstriyel ve ticari müşterilerin enerji kullarımlarını yönetmelerine ve verimliliklerini artırmalarına yardımcı olacak kritik bilgi ve hizmetler sunabilmektedirler (Schueler ve Douglass, 1995). Bu tür hizmetlerin ve eğitimin sağlanması hem enerji tasarrufu hem de sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından hayati öneme sahiptir.

2.5 Dengesiz Güç Kaynağının Etkisi

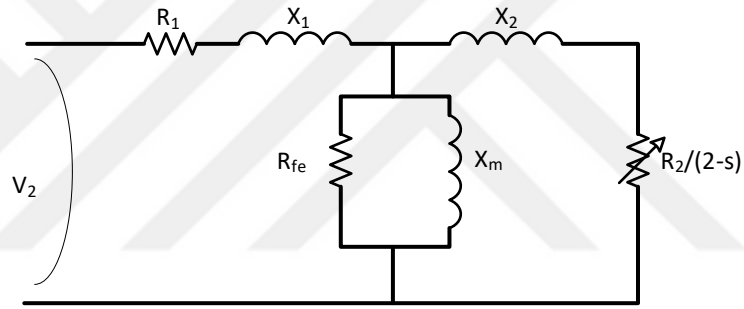
Bir güç kaynağındaki dengesizlik, güç sistemi kalitesini değerlendirmede önemli bir göstergedir. Dengeli bir üç fazlı gerilim kaynağı, gerilimlerin büyüklük açısından aynı olduğu ve birbirleri arasında 120° faz kayması bulunduğu durumdur (Huang ve Wang, 2004). Ancak hiçbir güç kaynağı tam anlamıyla dengeli değildir. Bazen, küçük bir gerilim dengesizliği bile rotor kayıplarını dramatik bir şekilde artırabilir; bu da stator ve rotor sıcaklıklarının yükselmesine neden olur. Öte yandan, dengesizlik seviyesi, üç fazlı asenkron motorlarında ciddi olumsuz etkilere yol açabilecek belirli bir düzeye ulaştığında dikkate alınmalıdır (Pillay ve Hofmann, 2001); bu etkiler arasında çıkış torkunda azalma (Woll, 1975), titreşim ve aşırı ısınma yer alır ki bu da makinenin yalıtım ömrünün azalmasına yol açar (Corres ve ark., 2006). Dengesizlik seviyesi, büyük tek fazlı yükleri besleyen güç sistemlerinde oldukça yüksektir (Faiz ve Ebrahimpour, 2005). ANSI/NEMA MG 1-2011 standardına göre, asenkron motorlarının %5'in üzerindeki gerilim dengesizliği ile çalıştırılması önerilmez (Association, 2011). Asenkron motorların rotorunun bazı bölümlerindeki aşırı sıcaklıklar, aşırı dengesiz (negatif sekans) akımların sebep olduğu belirtilmektedir (Gardel, 2000). Gerilim dengesizliği nedeniyle motor arızalarına dair yalnızca ara sıra raporların bulunmasının nedeni, endüstride çalışan birçok motorun tam yükte çalışmamasıdır; bu durum, motorların gerilim dengesizliği koşullarında arıza yapmadan çalışmasını sağlayacak gerekli termal marjı sağlayabilir (Cummings ve ark., 1984).

Gerilim dengesizliği; asimetrik trafo sargılarından veya iletim empedanslarından, dengesiz yüklerden, büyük tek fazlı yüklerden, iletim hatlarının tam transpozisyonunun yapılmamasından, açık üçgen trafo bağlantılarından, üç fazlı kapasitör bankasındaki patlamış sigortalardan, tek fazlı yüklerin farklı zamanlarda çalıştırılmasından veya güç sistemlerindeki arızalı trafolardan kaynaklanabilir (Mirabbasi ve ark., 2009), (Lee ve ark., 1998), (Siraki ve Pillay, 2011a).

Dengesiz gerilimler altında çalışan motorun performansını analiz etmek için kullanılan asenkron motorun pozitif ve negatif sekans eşdeğer devreleri, sırasıyla Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Pozitif sekans eşdeğer devresi



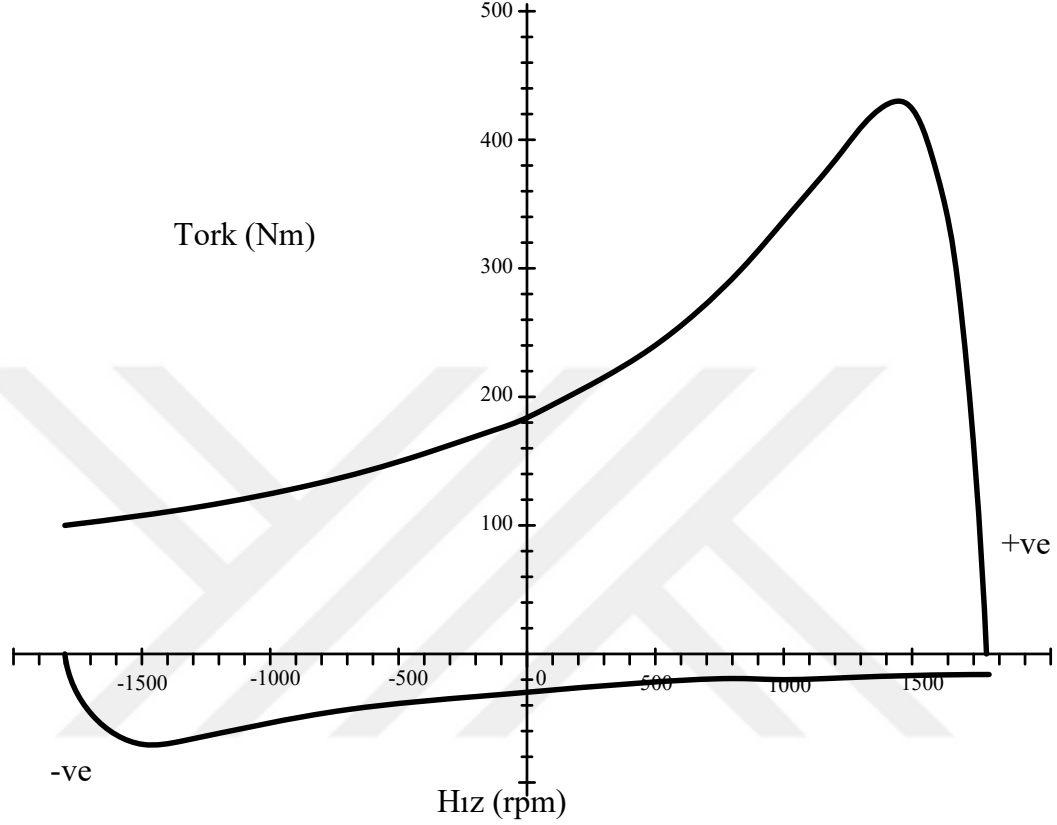
Şekil 2.5. Negatif sekans eşdeğer devresi

Burada, V_1 faz başına pozitif sekans gerilimini; V_2 faz başına negatif sekans gerilimini, R_1 faz başına stator sargı direncini, R_2 faz başına rotor direncini, X_1 faz başına stator kaçak reaktansını, X_2 faz başına rotor kaçak reaktansını, X_m faz başına manyetizasyon reaktansını, R_{fe} ise faz başına nüve kayıp direncini temsil eder.

Makinenin pozitif sekans gerilimine karşı davranışı, dengeli gerilimler altındaki davranışıyla aynıdır; ancak negatif sekans gerilimine karşı Şekil 2.6'da gösterildiği gibi farklı bir şekilde tepki verir. Pozitif sekans alanına göre (s) değerinde bir kayma için, negatif sekans alanında bu $(2-s)$ olacaktır. Negatif sekans torku, makinenin net şaft torkunu azaltarak, bu torkun dengeli gerilim koşulları altında üretilen değerden daha düşük olmasına neden olur (Pillay ve Hofmann, 2001).

Şekil 2.6'dan, negatif torkun şu etkilere yol açacağı görülmektedir: (1) başlangıç torku normalden daha az olacaktır; (2) maksimum tork (devrilme torku) da azalacaktır ve

(3) tam yük torku, eğer makineye aynı tam yük uygulanmaya devam ederse, motorun daha düşük hızda (daha yüksek kayma ile) çalışmaya zorlanacağı bir seviyeye düşecektir; bu durum kesinlikle makinenin bakır kayıplarını artıracak ve aşırı ısınma sorunlarına yol açacaktır.



Şekil 2.6. ASM pozitif ve negatif sekans tork grafiği (Pillay ve Hofmann, 2001)

2.6 Aşırı veya Düşük Gerilimin Etkisi

Ülkemizdeki endüstriyel motorların çoğunluğu 400V çalışma gerilimi için tasarlanmıştır. Bu motorlar, 380V ile çalıştırılır çünkü bu gerilim seviyesi, kamu dağıtım sisteminin nominal değeridir. Buradaki amaç, sistemin zayıf ticari veya endüstriyel sistemlerde ağır yüklendiği durumlarda motorların düşük gerilimle çalışmasını önlemektir.

ANSI/NEMA MG 1-2011 (Association, 2011) standardına göre, nominal gerilimlerinin %10 veya daha azıyla çalışan asenkron motorları, yaklaşık %20-30 oranında azaltılmış kalkınma ve devrilme torku ile çalışır. Bu tür motorların nominal yüklerle yüklenmesi, kesinlikle ciddi aşırı ısınma sorunlarına yol açar ve bu da ciddi kalıcı hasarlara neden olur.

Gnacinski (2009)'da, düşük gerilimin endüstride en sık rastlanan durum olduğu iddia edilmiş, öte yandan aşırı gerilimin çok daha nadir bir olay olarak kabul edildiği belirtilmiştir. Ancak (Lee, 1999)'da, aşırı gerilim vakalarının birçok ülkede yoğun olmayan dönemlerde sıkça meydana geldiği gösterilmiştir. Örneğin, Tayvan'da ulusal elektrik şirketi, düşük talep dönemlerinde veya ulusal tatillerde güç sistemindeki yükü azaltmak amacıyla reaktörler eklemek ve bazı yüksek gerilim hatlarını devre dışı bırakmak zorunda kalmaktadır.

Kullanım geriliminin 635V'u aştığı durumlarda, 575V için motorların yalıtım güvenlik faktörünün, iyi mühendislik prosedürleriyle uyumsuz bir seviyeye düştüğü tespit edilmiştir (Association, 2011).

2.7 Dengesiz ve Dalgali Gerilimler

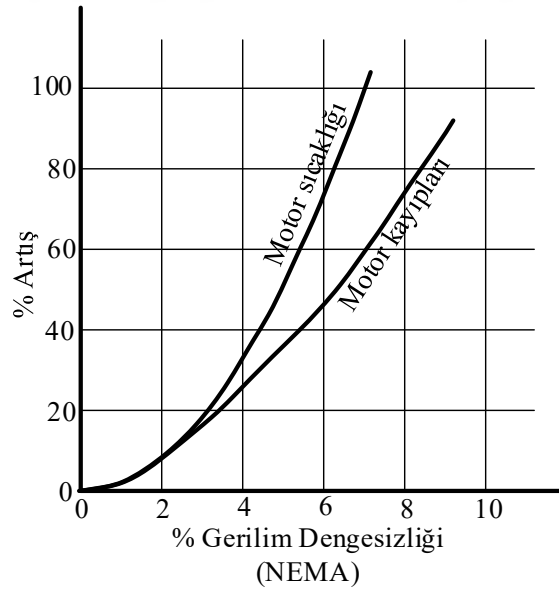
Mükemmel dengeli gerilimler hiçbir zaman sürdürülemez, çünkü yükler sürekli olarak değişir ve bu da faz-gerilim dengesizliğinin sürekli olarak değişmesine neden olur (IEEE-Std.141, 1993; Al-Badri, 2015). Dengesiz gerilimler, herhangi bir asenkron motorda erken arızalara yol açabilecek ciddi sorunlara neden olabilir. Gerilim dengesizliğinin asenkron motorların performansı üzerindeki olumsuz etkileri, 1930'lardan bu yana birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Al-Badri, 2015). Bu kapsamda, dengesiz gerilim altında çalışan üç fazlı asenkron motorların performansı, eşdeğer devre modeli ve simetrik bileşenler yöntemi kullanılarak analiz edilmeye çalışılmıştır (Reed ve Koopman, 1936). 1950'lerde, birkaç araştırmacı aynı konuya yönelik diğer faydalı yaklaşımlar sunmuştur (Williams, 1954; Mosher, 1955; Moser, 1956; Berndt, 1957).

Gafford ve ark. (1959), dengeli çalışma sıcaklığının üzerindeki sıcaklık artışının, artan bakır kayıplarından kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Çalışmada, negatif sekans akımının, pozitif sekans akımına eşit bir değere kıyasla motorun ısınması üzerinde daha belirgin bir etki oluşturduğu gösterilmiş; bu durumun, negatif sekans rotor direncinin yüksek olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, çekirdek kayıpları ile sürtünme ve rüzgâr kayıplarının, %15'in altındaki negatif sekans gerilim dengesizliğinden büyük ölçüde etkilenmediği ortaya konulmuştur. Negatif sekans bileşenlerinin, yataklar, yalıtım sistemi ve makinenin birbirine bağlı mekanik bileşenlerinde zararlı titreşimlere neden olabileceği de gözlemlenmiştir.

Berndt ve Schmitz (1962), farklı üreticilere ait üç adet 5 HP, 220 V, 1800 rpm, NEMA B tipi asenkron motoru sıcaklık artışı açısından incelemişlerdir. Motorlar, sabit gerilim dengesizliği ve farklı yük koşulları altında çalıştırılarak derecelerinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Sargı sıcaklığını belirlemek üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır: (a) sargı direncindeki değişim ve (b) termokupl ölçümleri. Kapatma anındaki sıcaklık değerine ulaşmak için farklı sürelerde çok sayıda direnç ölçümü alınmış; ayrıca sıcak noktaları belirlemek amacıyla 14 adet termokupl kullanılmıştır. Negatif sekans gerilimi, testlerde motor derecesini düşürmek için kullanılan temel parametre olmuştur. Bu çalışma, dengesiz hat gerilimleri altında çalışan asenkron motorların derecelendirilmesinde önemli düzeyde bir azaltma gerekliliği olduğunu ortaya koymuştur.

Woll (1975), gerilim dengesizliği yüzdesi ile motor kayıpları ve motor ısınmasındaki artış yüzdesi arasındaki ilişkiyi gösteren önemli bir eğri sunmuştur; bu eğri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen motor ısınma eğrisi, eşitlik **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** esas alınarak çizilmiştir.

Burada $\% \Delta T$ sıcaklığın yüzdelik artışını, $\% V_u$ ise gerilim dengesizliğindeki yüzdelik artışı ifade eder.



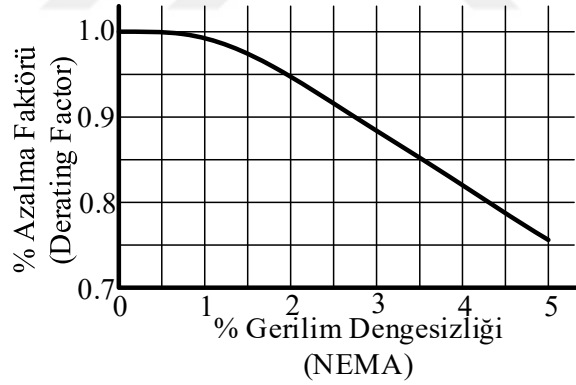
Şekil 2.7. Gerilim dengesizliğinden dolayı motor kayıplarında ve ısınmada artış

$$\% \Delta T \sim (\% V_u)^2 \quad (2.14)$$

Kersting ve Phillips (1997), yalnızca gerilim dengesizliğinin yüzdesinin bilinmesinin yeterli olmadığını; bu dengesizliğin nasıl meydana geldiğinin de en az onun

kadar önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, dengesiz gerilim altında çalışan bir asenkron motorun performansını analiz etmek için detaylı bir matematiksel yöntem sunulmuştur. Önerilen teknik, geleneksel analiz yöntemlerine kıyasla daha sadeleştirilmiş eşitliklerle benzer doğrulukta sonuçlar elde etmeyi mümkün kılmıştır. Araştırma, gerilim dengesizliğinin karakterinin bilinmesinin yalnızca kayıplardaki artış açısından değil, aynı zamanda rotor kayıplarının stator kayıplarına göre daha hızlı arttığı koşulların anlaşılması açısından da kritik olduğunu ortaya koymuştur. Analiz yalnızca pozitif ve negatif sekans gerilimlerin genlik bileşenlerini dikkate almış, bu gerilimler arasındaki faz açılarının motor performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmemiştir.

Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA), ANSI/NEMA MG 1-2011 standardında orta büyüklükteki çok fazlı asenkron motorlar için %5'e kadar gerilim dengesizliği altında çalışma koşullarına yönelik bir derecelendirme eğrisi tanımlamıştır. Bu derecelendirme eğrisi Şekil 2.8'de sunulmaktadır. Dengesizlik miktarına bağlı olarak, motorun nominal çıkış gücü, derecelendirme eğrisinden elde edilen bir faktörle çarpılarak düzeltilir. Bu sayede, motorun dengesiz gerilim altında çalışmaya devam etmesi durumunda, aşırı ısınma riski olmadan güvenli şekilde çalışabileceği yeni ve azaltılmış bir tam yük çıkış gücü değeri belirlenmiş olur.



Şekil 2.8. Orta güçteki motorlarda gerilim dengesizliği ve nominal güç düşüşü (Association, 2011)

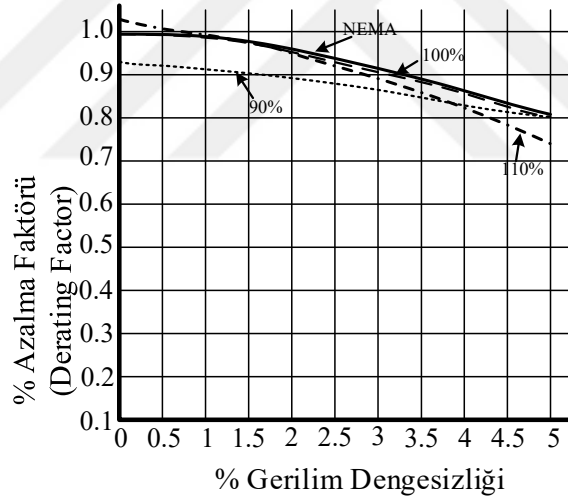
Lee (1999), NEMA tarafından tanımlanan derecelendirme faktörünün yalnızca gerilim dengesizlik faktörüne (Voltage Unbalance Factor, VUF) dayandığını ve aynı VUF değerine sahip birçok farklı gerilim dengesizlik durumunun göz ardı edildiğini ileri sürmüştür. Söz konusu çalışmada, aşağıda sıralanan sekiz farklı gerilim dengesizlik durumu incelenmiştir;

- a) Tek faz düşük gerilim dengesizliği.
- b) İki faz düşük gerilim dengesizliği.

- c) Üç faz düşük gerilim dengesizliği.
- d) Tek faz aşırı gerilim dengesizliği.
- e) İki faz aşırı gerilim dengesizliği.
- f) Üç faz aşırı gerilim dengesizliği.
- g) Eşit olmayan tek faz açısıl kayma.
- h) Eşit olmayan iki faz açısıl kayma.

Çalışma 2 HP ve 3 HP gücündeki iki farklı sınıftaki asenkron motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. %4 ve %6 gerilim dengesizlik faktörü (VUF) altında yapılan analizler, sıcaklık artışının en olumsuz durumunun üç fazlı düşük gerilim dengesizliği koşullarında ortaya çıktığını göstermiştir.

Pillay ve ark. (2002), dengesiz gerilimlerle birlikte aşırı ya da düşük gerilim koşulları altında çalışan asenkron motorların derecelendirilmesine ilişkin önemli bir çalışma gerçekleştirmiştir. Aşırı gerilimlerin ve düşük gerilimlerin derecelendirme eğrisine dahil edilmesi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Aşırı gerilimlerin ve düşük gerilimlerin derecelendirme eğrisine dahil edilmesi (Pillay ve ark., 2002)

Bu çalışmada, NEMA tanımına göre belirli bir gerilim dengesizlik yüzdesine karşılık, gerçek dengesizlik tanımına —yani negatif sekans geriliminin pozitif sekans gerilimine oranına— dayalı olarak bir dengesizlik yüzdesi aralığı bulunduğu tespit edilmiştir. Motorun nominal değerinden sapma (düşüş) faktörü ise eşitlik (2.15) esas alınarak hesaplanmıştır.

$$\text{Düşüş Faktörü} = \frac{P_{\text{çıkış, hesaplanan}}}{P_{\text{ominal}}} \quad (2.15)$$

Çalışmanın nihai çıktısı, Şekil 2.9’da gösterilen pratik bir şekilde genişletilmiş NEMA derecelendirme eğrisidir. Bu eğride yer alan üç farklı eğri, aşağıda belirtilen üç ayrı çalışma durumundan elde edilmiştir:

- a) Durum 1: Bir motor, nominal ortalama gerilimde dengesiz gerilimlerle beslenmiştir.
- b) Durum 2: Bir motor, %10 aşırı gerilimle birlikte %5’e kadar dengesiz gerilimlerle beslenmiştir.
- c) Durum 3: Bir motor, %10 düşük gerilimle birlikte %5’e kadar dengesiz gerilimlerle beslenmiştir.

Huang ve Wang (2004), dengesiz gerilim altında çalışan asenkron motorların performansını analiz etmek amacıyla grafiksel ve matematiksel yöntemler arasında bir karşılaştırma sunmuştur.

Wang (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, karmaşık gerilim dengesizlik faktörü (Complex Voltage Unbalance Factor, CVUF) kullanılmıştır. Çalışma CVUF’nin faz açısının, gerilim dengesizliğinin asenkron motor performansı üzerindeki etkilerini analiz etmede kritik bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca motorun aşırı ısınmasına neden olabilecek en olumsuz senaryolar için bu açının değerini belirlemeye yönelik bir yöntem önerilmiştir.

Faiz ve ark. (2004), mevcut gerilim dengesizliği tanımlarının yetersiz olduğunu savunmuş ve özellikle NEMA ile IEEE standartlarının yalnızca gerilim genliklerini dikkate alarak faz açılarını ihmal ettiğini belirtmiştir. Çalışmada aynı gerilim dengesizlik faktörü (%VUF) ile çok sayıda farklı hat gerilimi kombinasyonunun mümkün olduğu ve her birinin motor performansını farklı şekilde etkilediği gösterilmiştir. Ayrıca literatürde çoğu çalışmanın sayısal detaylardan yoksun genel sonuçlara dayandığı ve bu nedenle dengesizliğin motor üzerindeki etkilerinin yeterince araştırılmadığı vurgulanmıştır. Bu kapsamda belirli bir VUF değeri için giriş gerilim değişim aralığını daraltmak amacıyla iki yöntem önerilmiştir: Birinci yöntem pozitif sekans gerilim bileşeninin (V_1) doğrudan belirlenmesine dayanmakta; ikinci yöntem ise VUF’ye benzer yapıya sahip karmaşık gerilim dengesizlik faktörünün (CVUF) kullanılması ve bu değerın eşitlik (2.16) ile hesaplanması esasına dayanmaktadır.

$$\%CVUF = 100 \frac{V_2}{V_1} \quad (2.16)$$

Burada V_1 ve V_2 , sırasıyla gerilimin pozitif ve negatif vektör bileşenleridir.

Gnacinski (2008); Gnacinski (2009), gerilim dengesizliği ile birlikte aşırı veya düşük gerilim koşullarının asenkron motorların sargı sıcaklığı ve termal ömür kaybı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmalarda CVUF'un faz açısına etkisi de dikkate alınmıştır. Bulgular motorların doymuş devre karakteristiğinin, bu tür gerilim koşulları altında derecelendirme faktörü üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Asenkron motorların derecelendirilmesine ilişkin önemli çalışmalardan biri 2010 yılında yayımlanmıştır. Bu çalışmada dengesiz gerilim koşulları altında çalışan bir asenkron motorun verimini ve buna bağlı faz açılarını tahmin etmeye yönelik ayrıntılı bir simetrik bileşen tabanlı matematiksel prosedür sunulmuştur. Ancak hesaplama sürecinde test edilen motorun çıkış gücünün tahmininde çekirdek ve mekanik kayıpların dikkate alınmaması yöntemin önemli bir sınırlılığı olarak değerlendirilmiştir (Anwari ve Hiendro, 2010). Yazar *VUF* yerine karmaşık gerilim dengesizlik faktörünü (*CVUF*) kullanmıştır. *CVUF* eşitlik (2.17)'de sunulmuştur.

$$k_v = \frac{V_{s2}}{V_{s1}} = k_v \angle \Theta_v \quad (2.17)$$

Burada k_v , *CVUF*'nin büyüklüğü ve Θ_v ise açıdır.

Yine belirli bir k_v değeri için terminal voltajlarının sonsuz kombinasyonları olduğu gösterilmektedir. Faz açısını ve yazar tarafından “dengesizlik katsayısı” olarak adlandırılan ve “f” harfi verilen ve eşitlik (2.16)'da gösterilen yeni faktörü dikkate alarak terminal voltaj değişimlerinin geniş aralığını azaltmak önerilmektedir.

$$V_{s1} = f \left(\frac{V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}}{3} \right) \angle \Theta_{s1} \quad (2.18)$$

Burada $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ve $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 'dir.

Bu çalışmada, dengeli gerilimlerde ($f=1$), alçak voltaj dengesizlik ($f<1$) ve yüksek voltaj dengesizlik ($f>1$) çalışma koşullarındaki maksimum kayıplar arasında önemli bir karşılaştırma sunulmuştur. Örnek olarak, $f=0,8$ ve $f=1,2$ durumlarında sırasıyla stator kayıplarında %254 ve %217, rotor kayıplarında ise %293 ve %210 artış gözlemlendiği

belirtilmektedir. Bu sonuçlar, düşük gerilim dengesizliği koşullarında çalışan bir motorun aşırı ısınma riskiyle karşı karşıya kalabileceğini net şekilde ortaya koymaktadır.

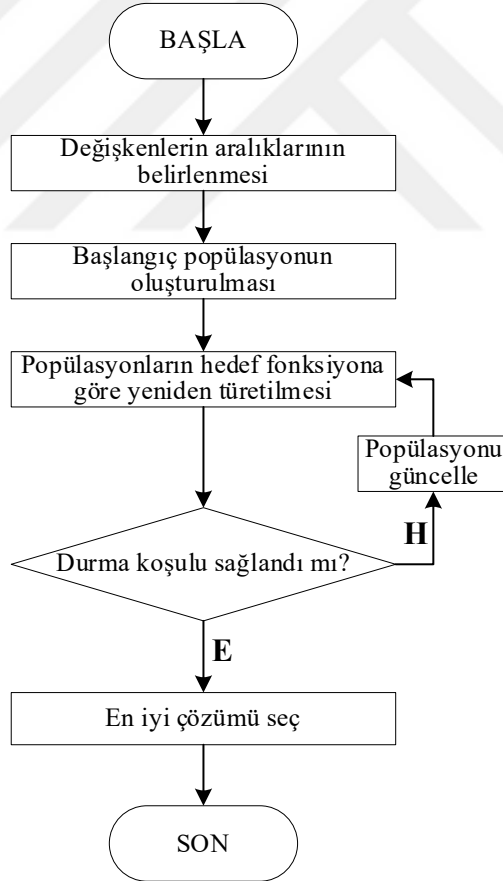
2.8 Hedefler

Bu tez çalışmasının temel amacı, farklı çalışma koşulları, kutup sayıları, nominal güç ve gerilim değerleri ile NEMA tasarım tiplerine sahip çeşitli asenkron motorlar (ASM) için eşdeğer devre parametreleri ve verim tahmin tekniklerini geliştirmektir. Önerilen yöntem, çalışma esnasındaki makinelere minimum müdahale ile ve yüksek doğrulukla uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Çalışmada, motor tasarım verilerinin mevcut olmadığı; yalnızca etiket bilgileri ile stator gerilimi, akımı ve giriş gücü gibi tek bir çalışma noktasına ait verilerin sağlandığı varsayılmaktadır. Bu doğrultuda optimizasyon tabanlı bir yaklaşım benimsenmiş olup, yöntem ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, asenkron motorlarda verim tahmini için kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmaları ve bu algoritmaların uygulama prensipleri detaylı şekilde ele alınmıştır. Öncelikle, asenkron motorların eşdeğer devre parametreleri tanıtılmış ve parametre aralıklarının belirlenmesi açıklanmıştır. Ardından, çeşitli sezgisel optimizasyon yöntemleri (Parçacık Sürü Optimizasyonu, Genetik Algoritmalar, Harris Şahinleri Optimizasyonu, Gri Kurt Optimizasyonu, Kızıl Tilki Optimizasyonu, Balina Optimizasyon Algoritması, Diferansiyel Arama Algoritması ve Ağaç-Tohum Algoritması) teorik temelleri ve algoritma akış şemaları ile birlikte detaylandırılmıştır. Her algoritmanın doğası, matematiksel modelleri ve motor verim tahminindeki uygulama yaklaşımları bu bölümde kapsamlı biçimde sunulmuştur.

Birçok farklı alanda optimizasyon araçları ve arama algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmaların genel prosedürü Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Tipik bir optimizasyon algoritması akış şeması

Bir problem tanımlandığında ve değişkenler belirlendiğinde, her değişken için bir aralık seçilmelidir. Daha sonra bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Başlangıç

popülasyonu probleme dayalı olarak tanımlanan bir amaç fonksiyonu ile değerlendirilir. Uygulanan algoritmanın kurallarına ve değerlendirme sonuçlarına göre, başlangıç popülasyonu en iyi cevaba doğru güncellenir ve yeni nesil tekrar değerlendirilir. Bu süreç, sonuçlar istenen değerlere yakınsayana kadar yinelenir. Bazen, sonuçları iyileştirmek için iki veya üç algoritma katmanı kullanılır. Verim tahmini durumunda, eşdeğer devre parametrelerini tahmin etmek için sezgisel algoritmalar kullanılabilir ve daha sonra IEEE Std-112'nin Form F2 Yöntemi F1 uygulanarak verim belirlenir (Trandafilov, 2004). Bu yöntemler literatürde optimizasyon tabanlı verim tahmin yöntemi olarak bilinmektedir.

Verim tahmini sürecinde optimizasyon algoritmalarının kullanılmasındaki temel zorluklardan biri, değişkenlere (parametrelere) ait kısıtlama aralıklarının doğru şekilde belirlenmesidir. Bu bölümde, asenkron motor parametrelerine ilişkin aralıkların belirlenmesi amacıyla etiket verileri ve Aksaray Elektrik Motor (AEMOT) fabrikasına ait üretici verilerine dayanan bir teknik önerilmektedir. Geliştirilen yöntem, farklı optimizasyon algoritmaları ile entegre edilerek verim tahmin sürecine dâhil edilmiş ve yöntem iki farklı senaryo üzerinde uygulanmıştır.

İlk senaryoda amaç fonksiyonunda stator akımı, giriş gücü ve stator gerilimi ile akımı arasındaki faz açısı kullanılmış; motorun nominal gücü ise amaç fonksiyonundan çıkarılmış ve yalnızca önerilen aralık belirleme yöntemi uygulanmıştır. İkinci senaryoda ise hem aralık belirleme yöntemi hem de nominal güç değeri algoritmaya dâhil edilmiştir. Her iki durumun sonuçları hem birbirleriyle hem de deneysel olarak ölçülen verilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

3.1 Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları ile Verim Tahmini

Sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayalı yöntemler, eşdeğer devre parametrelerinin tahmini yoluyla yerinde verim belirlemede önemli yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Herhangi bir yük noktası için bir ASM'un veriminin tahmin edilebilmesi, eşdeğer devre modeline bağlı yedi bilinmeyen parametrenin yanı sıra, ayrıca hesaplanması veya tahmin edilmesi gereken iki ek bilinmeyen belirlenmesini gerektirir.

Optimizasyon yönteminin uygulanmasından önce, problemdeki bilinmeyen parametre sayısının mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir. Bu işlemin ardından, başlangıç popülasyonundaki her bir değişkene rastgele başlangıç değerleri atanır. Her bir değişken kümesi, potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilir. Hesaplanan ve ölçülen büyüklükler arasındaki farkı değerlendirmek üzere hata fonksiyonları tanımlanır; bu

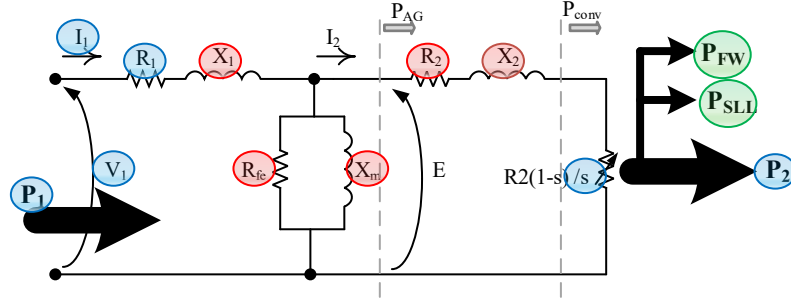
fonksiyonlar, optimizasyon sürecinin temelini oluşturan amaç fonksiyonunu belirler. Amaç fonksiyonu genellikle giriş akımı, giriş gücü ve güç faktörü ya da bu faktöre karşılık gelen faz açısına dayalı olarak tanımlanır. Optimizasyon algoritması, bu çözümleri kendi güncelleme kurallarına göre iteratif olarak geliştirir ve her iterasyonda amaç fonksiyonu değerlerine göre çözümleri değerlendirir. Belirlenen durdurma kriterinin sağlanmasının ardından, en iyi çözüm nihai sonuç olarak kabul edilir ve bu sonuç, ASM eşdeğer devre modeline ait parametrelerin bir kümesini temsil eder.

Şimdiye kadar yapılan literatür çalışmaları optimizasyon algoritmalarında ağırlıklı olarak amaç fonksiyonu ve giriş parametrelerine odaklanmıştır. Bu bağlamda yalnızca (Bijan ve ark., 2018) çalışmada parametre aralıklarının (kısıtlamaların) etkisi ele alınmıştır. Ancak bu çalışmada incelenen motorların güçleri düşük ve birbirine yakın değerlerde sınırlı kalmıştır. Oysa çok daha geniş bir güç skalasında parametre aralıklarının belirlenmesinin optimizasyon performansı üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir. Parametre aralıklarının uygun şekilde belirlenmesi algoritmanın yakınsama davranışı üzerinde doğrudan etkili bir faktördür. Asenkron motor parametreleri motorun nominal gücü, kutup sayısı, yalıtım sınıfı gibi çeşitli tasarım özelliklerine bağlı olduğundan, tüm motorlar için sabit bir parametre aralığı belirlemek doğru değildir. Öte yandan parametreler için aşırı geniş aralıklar seçilmesi durumunda optimizasyon algoritması her çalıştırmada farklı sonuçlara yakınsama eğilimi gösterebilir ve bu da tutarlılığı olumsuz etkileyebilir.

İlerleyen bölümlerde deneysel verilerden yararlanarak eşdeğer devrede bilinmeyen sayısını dört temel parametreye X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 düşürmeye yönelik yöntemler sunulmaktadır. Geri kalan parametrelerin doğrudan ölçümle ya da kabul gören mühendislik yaklaşımlarıyla belirlenebileceği varsayımı altında yalnızca bu dört parametrenin tahmini için optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu yaklaşım hem hesaplama yükünü azaltmakta hem de müdahalesiz uygulamalarda pratikliği artırmaktadır.

3.2 Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametreleri

Şekil 3.2 bir ASM'un geleneksel faz başına eşdeğer devresini göstermektedir. R_1 ve X_1 stator direnci ve kaçak reaktansı, R_2 ve X_2 rotor direnci ve kaçak reaktansı, X_m mıknatıslama reaktansı, R_{fe} çekirdek kaybı direnci; s kayma, P_1 ve P_2 giriş ve çıkış gücü, P_{SLL} kaçak yük kaybı ve P_{FW} sürtünme ve rüzgâr kayıplarıdır.



Şekil 3.2. ASM bir faz eşdeğer devresi (Siraki ve ark., 2013)

Şekil 3.2'ye göre, herhangi bir yükleme noktasında motor verimini tahmin etmek için yedi bilinmeyen vardır (R_1 , X_1 , X_m , R_{fe} , R_2 , X_2 ve s). Bunlara ilave olarak P_{SLL} ve P_{FW} gibi bilinmeyenler de vardır. Bu bölümde, bilinmeyen sayısı deneysel verilerden yararlanılarak dörde (yani X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2) düşürmek için yöntemler açıklanmaktadır.

Stator Direnci (R_1)

Stator bakır kaybı, stator sargılarından geçen akım miktarı ile orantılıdır. Kayıplar, sargıdan geçen akımdan kaynaklanan ısı kaybının yanı sıra akımın frekansından kaynaklanan deri etkisini de içerir (Corino ve ark., 2008; Sen, 2021). Stator bakır kaybı, motordaki toplam kayıpların %25-40'ını oluşturur ve motor yüküne bağlı olarak kabul edilir (Corino ve ark., 2008). Bu nedenle, R_1 'in doğru bir şekilde belirlenmesi, motorun veriminin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır.

R_1 , tork-hız eğrisinin şeklini ve devrilme torkunun oluştuğu hızı etkiler (Cochran, 1989). R_1 'i ölçmenin yaygın yolu DA testi yapmaktır. Motorun yüklenmesi ASM'u ısınmasına ve R_1 direncinin artmasına neden olur. Bu nedenle, motor sıcaklığının belirlenmesi ya da bilinmesi farklı yükleme koşullarında R_1 'i belirler. IEEE Std-112'ye göre, R_1 farklı yüklerde aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Trandafilov, 2004).

$$R_1 = \frac{R_{1,soğuk}(T_{sıcak} + K)}{T_{soğuk} + K} \quad (3.1)$$

Burada $T_{sıcak}$ motorun çalışma noktası ve $T_{soğuk}$ motor dururken ölçülen soğuk sıcaklıktır ve ortam sıcaklığı olarak da düşünülebilir. $R_{1,soğuk}$, $T_{soğuk}$ 'daki stator direncidir. K, %100 bakır iletkenli sargılar için 234,5 ve alüminyum iletkenli sargılar için 225'tir. $T_{soğuk}$ 'daki stator direncinin referans alınmasıyla, R_1 'i doğrudan ölçmek yerine $T_{sıcak}$ değeri tahmin edilebilir. Ayrıca $T_{sıcak}$ ayrıca rotor direncini düzeltmek için de

kullanılabilir. Motorların sıcaklığı ile yükü arasında bir ilişki kurmak mümkündür ve bu ilişki farklı yükleme koşullarında sıcaklığı tahmin etmek için kullanılabilir.

Motor yalıtım sınıfına göre tam yük sıcaklığının belirlenmesi de optimizasyon algoritmasındaki bilinmeyen değişkenlerin sayısını azaltmak için bir çözümdür (Siraki ve Pillay, 2011a). Motorların parametre aralıklarının belirlenmesinde anma sıcaklıkları için Çizelge 3.1’deki değerler kullanılabilir.

Çizelge 3.1. Verim hesabı için motor sınıflarının anma sıcaklık değerleri

Yalıtım sınıfı	$T_{\text{tamyük}}(^{\circ}\text{C})$ 25 $^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığına göre
A	75
B	95
F	115
H	130

Stator ve Rotor Kaçak Reaktansı (X_1 ve X_2)

X_1 ve X_2 sıcaklığa bağlı değildir ve tüm yüklerde sabit kabul edilir. NEMA tasarımına dayanarak, X_1/X_2 oranını Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi belirlemek mümkündür (Association, 2003). Bu aynı zamanda bilinmeyen sayısını da azaltır.

Çizelge 3.2. NEMA tasarım sınıfına göre stator ve rotor kaçak reaktansı oranı (Association, 2003)

NEMA Tasarım Sınıfı	X_1/X_2
A, D ve sargılı rotor	1.00
B	0.67
C	0.43

Rotor Hızı ve Kayma (n_r ve s)

Kayma ya da rotor hızı tahmin edilebilir ya da müdahalesiz olarak ölçülebilir. Rotor hızını ölçmek için temassız bir hız sensörü kullanılabilir. Hız sensörü maliyeti uygun ve ayrıca motora herhangi bir müdahale söz konusu değildir.

Kaçak Yük Kaybı (P_{SLL})

IEEE Std-112’ye göre, “kaçak yük kaybı, elektrik makinesindeki toplam kaybın P_{FW} , stator bakır kaybı, rotor bakır kaybı ve nüve kaybının toplamı tarafından hesaba

katılmayan kısımdır” (Trandafilov, 2004). P_{SLL} , yüke bağlı bir kayıp olarak kabul edilir ve aşağıdakilerden oluşur:

- İletkenler dışındaki aktif demir ve diğer metal parçalarda yük tarafından meydana getirilen kayıplar.
- Akıma bağlı akı titreşimlerinin neden olduğu birincil veya ikincil sargı iletkenlerindeki eddy akımı kayıpları (De Almeida ve ark., 2002).

P_{SLL} doğrudan ya da dolaylı olarak ölçülebilir. Dolaylı yöntemde, P_{SLL} aşağıda verilen eşitlik kullanılarak bulunabilir:

$$P_{SLL} = \Delta P - (P_{scl} + P_{fe} + P_{rcl} + P_{FW}) \quad (3.2)$$

Burada ΔP , P_2 'in P_1 'den çıkarılmasıyla hesaplanabilen toplam kayıptır. Eşitlik (3.2)'deki tüm bileşenlerin bölüm 5'te sunulan yöntemler kullanılarak doğrudan ölçülebileceği unutulmamalıdır (Trandafilov, 2004). Doğrudan ölçümde P_{SLL} 'nin temel ve yüksek frekans bileşenleri çıkarılmış rotor ve ters dönüş testleri ile belirlenir ve toplam P_{SLL} bu iki bileşenin toplamından elde edilir (Trandafilov, 2004).

Düşük uzay harmonik katkılarına sahip çift katmanlı bir sargı kullanmak, motor dışlarındaki yüksek frekanslı akı değişimlerini azaltır ve çubuklar arası kaçak akımları sınırlamak için rotor çubuklarını yalıtırmak, P_{SLL} 'yi azaltmak için yararlı olabilecek bazı olası çözümlerdir (Boglietti ve ark., 2003). P_{SLL} 'deki bu küçük azalmalar verimlilik iyileştirmeleri için önemli olabilir.

Doğrudan veya dolaylı olarak P_{SLL} ölçümünün zorluğu nedeniyle, IEEE Std-112 (Trandafilov, 2004) ve IEC 60034-2 (Commission, 2007) standartları P_{SLL} 'yi deneysel sonuçlara dayanarak belirlemektedir. IEEE Std-112 standardı P_{SLL} 'yi Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi ASM'un etiket gücüne göre belirler.

Çizelge 3.3. P_{SLL} 'nin motor gücüne bağlı olarak belirlenen değeri (Trandafilov, 2004)

Motor Gücü (kW)	P_{SLL} Anma Gücü Yüzdesi
1-90	1.8%
91-375	1.5%
376-1850	1.2%
1851 ve sonrası	0.9%

IEC 60034-2, tam yük giriş gücüne dayalı olarak P_{SLL} 'yi tahmin edebilen bir formül sunmaktadır. Bu standardın eski versiyonunda (Standard, 1972), P_{SLL} 'nin tam yük giriş gücünün %0,5'i olarak kabul edilmesi önerilmektedir .

P_{SLL} , belirleme açısından iki standardın doğruluğunu karşılaştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. 50 ve 60 Hz için derecelendirilmiş 1-500 HP aralığında 817 ASM incelenmiştir (De Almeida ve ark., 2002). Sonuçlara göre, IEC 60034-2'nin (eski sürüm (Standard, 1972) doğruluğu IEEE Std-112'den daha azdır. Ayrıca, nominal gücün artırılmasıyla IEC 60034-2'nin doğruluğunun arttığı gösterilmiştir. Başka bir çalışmada, IEEE Std-112 (Gardel, 2000) , IEC 60034-2 (Standard, 1972) ve JEC 37 (Japon Standardı) tarafından tahmin edilen verimlilik karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, IEEE Std-112'nin doğruluğunun diğer iki standarttan daha iyi olduğunu ve bunun çoğunlukla P_{SLL} 'nin daha iyi tahmin edilmesinden kaynaklandığını göstermektedir.

IEC 60034-2'nin (Commission, 2007) yeni sürümünde, P_{SLL} aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenir.

$$P_{SLL} = P_{giriş,tam\ yük} \left[0.025 - 0.5 \log_{10} \left(\frac{P_{çıkış}}{1kW} \right) \right] \quad (3.3)$$

Agamloh (2010)'de, yaklaşık olarak 1000 ASM incelenmiş ve P_{SLL} 'yi ölçmek için test laboratuvarı olmadığı durumlarda, P_{SLL} için $P_{giriş}$ gücünün %1,2'si olarak alınmasının 1-200 HP arasındaki ASM'lar için daha iyi bir yaklaşım olduğu önerilmektedir. Bu, verim tahmin hatasını $\pm\%1$ aralığında tutabildiği belirtilmektedir.

Al-Badri ve ark. (2014), 40 HP'nin altındaki motorlar için IEEE Std-112 (Trandafilov, 2004) ve 40 HP'nin üzerindeki motorlar için IEC 60034-2 (Commission, 2007) kullanılmasının verim tahmin algoritmalarında daha yüksek doğruluk sağlayacağı belirtmişlerdir. P_{SLL} yüke bağlı bir kayıp olarak kabul edildiğinden, kısmi yükler için aşağıdaki formüller önerilmiştir (Al-Badri ve ark., 2014).

$$P_{SLL,75} = P_{SLL}/1,8 \quad (3.4)$$

$$P_{SLL,50} = P_{SLL}/4 \quad (3.5)$$

$$P_{SLL,25} = P_{SLL}/16 \quad (3.6)$$

Burada $P_{SLL,75}$, $P_{SLL,50}$ ve $P_{SLL,25}$ sırasıyla %75, %50 ve %25 yükteki kaçak yük kayıplarıdır.

Sürtünme ve Rüzgâr Kayıpları (P_{FW})

P_{FW} , iki farklı kayıp türünden oluşmaktadır. Bu kayıplar; sürtünme kaybı, motorun yatak ve rulmanlarındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır, Rüzgâr kaybı motorun soğutma fanında oluşan hava akışından kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar motorun toplam kayıplarının %5-15'ini aralığında olabilir ve yükten bağımsız olarak kabul edilir (Corino ve ark., 2008). P_{FW} , makinenin hızının karesi ile değişir (Al-Badri ve ark., 2014).

P_{FW} , boş çalışma deneyi yapılarak belirlenebilir. Ancak, bu teknik yerinde uygulamalar için çok müdahaleci ve kabul edilemez. P_{FW} , genellikle sabit ve nominal çıkış gücünün veya tam yük giriş gücünün bir yüzdesi olarak kabul edilir. Al-Badri ve ark. (2014)'te 182 motora ait veri tabanı kullanarak P_{FW} 'yi belirlemişlerdir Test edilen motorun veri tabanında benzerliği yoksa, P_{FW} kutup sayısına bağlı olarak aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$P_{FW} = 2.5P_{giriş,tamyük} \rightarrow 2 \text{ kutup için} \quad (3.7)$$

$$P_{FW} = 1.2P_{giriş,tamyük} \rightarrow 4 \text{ kutup için} \quad (3.8)$$

$$P_{FW} = 1.0P_{giriş,tamyük} \rightarrow 6 \text{ kutup için} \quad (3.9)$$

3.3 Parametre Aralıklarının Belirlenmesi

Optimizasyon algoritmaları bir arama aracı olarak kullanıldığından, değişken uzayının makul sınırlı bir bölgeyi keşfetmek için tasarlanmalıdır (Haupt ve Haupt, 2004). Bazı problemlerde, arama bölgesi problem tarafından belirlenmez. Bu durumda iki seçenek vardır.

İlk olarak, başlangıç arama bölgesi olarak geniş bir değişken aralığı seçerek istenen cevabın bu bölgede bulmak ve ardından bölgenin en umut verici kısımlarına odaklanmak olabilir. Bu çözüm, amaç fonksiyonunu doğrulayabilecek birkaç sonuç olduğunda geçersizdir. ASM'lar için sadece bir yükleme noktası kullanarak verim tahmini yapmak zordur çünkü amaç fonksiyonunu doğrulayabilecek farklı sonuçlar vardır. Bunun sebebi bilinmeyenlerin (değişkenlerin) sayısına oranla bilinen girdi sayısının daha az olmasıdır.

İkinci seçenek, problemle ilgili bazı kurallar, eşitlikler ve hatta standartlar kullanarak arama bölgesini sınırlamaktır. Arama alanı daha küçük olduğunda, doğru

cevaba ulaşma olasılığı daha yüksektir. Aşağıdaki alt bölümlerde, bazı eşitlikler, varsayımlar ve NEMA MG 1 standardı kullanılarak değişkenlerin aralığını belirlemek için basit ve anlaşılır bir çözüm sunulmaktadır.

Rotor Direnci (R_2):

Asenkron motorun çalışmasında rotor direnci önemli role sahiptir. Asenkron motorların karakteristikleri rotor direncinde etkilenir (Sen, 2021). Asenkron motorun elektromanyetik veya hava aralığı gücü (P_{gap}) rotor direnci R_2 ile ilişkisi aşağıda verilmiştir (Trandafilov, 2004).

$$P_{gap} = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (3.10)$$

Burada I_2 rotor akımı ve s kaymadır ve I_2 aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanabilir.

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2} \quad (3.11)$$

Burada I_1 ve I_0 sırasıyla motorun giriş akımı ve boş çalışma akımıdır. Belirli bir koşul için, örneğin motor etiketinde belirtilen nominal değerler, s ve I_1 bilinmektedir. Nominal durumunda, P_{gap} şu şekilde tahmin edilebilir.

$$P_{gap} = P_{çıkış} + P_{FW} + P_{SLL} + P_{rcl} \quad (3.12)$$

P_{FW} ve P_{SLL} , motorun nominal gücüne ve kutup sayısına göre belirlenir (Al-Badri ve ark., 2014). $P_{çıkış}$ motorun nominal gücüdür. Rotor bakır kaybı (P_{rcl}) ile hava aralığı gücü P_{gap} arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı vardır:

$$P_{rcl} = sP_{gap} \quad (3.13)$$

Tam yük durumunda, I_1 motor etiketinde belirtilen nominal akımdır. Boş çalışma akımı (I_0) akı yoğunluğu, kutup sayısı ve nominal güçten etkilenir ve Çizelge 3.4'te motor gücü ile boş çalışma akımı arasındaki ilişki verilmiştir.

Çizelge 3.4. Farklı güçlerdeki Asenkron motorlar için boş çalışma akımlarının tam yük akımına oranı

Nominal güç (HP)	Boş çalışma akımının tam yük akımına oranı (%)
1 - 7.5	35 - 80
10 - 50	20 - 45
60 - 500	15 - 45

Çizelge 3.4'ten yararlanılarak R_2 parametresinin aralığı aşağıda belirtilen formüllerden yararlanılarak hesaplanır.

$$\begin{cases} I_{0,min} = 0.35xI_1 \\ I_{0,max} = 0.8xI_1 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\begin{cases} R_{2,min} = \frac{sP_{gap}}{3(I_1^2 - I_{0,min}^2)} \\ R_{2,max} = \frac{sP_{gap}}{3(I_1^2 - I_{0,max}^2)} \end{cases} \quad (3.15)$$

Bu aralığın kullanılması hem R_2 aralığını daraltmakta hem de R_2 'nin bu aralıkta olmasını da garanti etmektedir. Bu aralık, optimizasyon algoritmasının dar bir R_2 aralığında arama yapmasını ve doğru sonuca yakınsamasını sağlar.

R_2 'nin minimum ve maksimum değerleri, kısıtlama olarak kullanılmadan önce motor sıcaklığına göre kalibre edilmelidir. Tam yük sıcaklığı biliniyorsa, R_2 kalibrasyonunda kullanılabilir, aksi takdirde tam yük sıcaklığı motor yalıtım sınıfına göre belirlenebilir (Trandafilov, 2004). Nominal sıcaklık belirlendiğinde, R_2 'nin nihai aralığını bulmak için eşitlik (3.15) kullanılabilir. Burada amaç rotor direncinin değerini belirlemek değil bir aralık tanımlamak olduğundan, gerçek tam yük sıcaklığı yerine yalıtım sınıfına dayalı nominal sıcaklığın kullanılması kabul edilir (Ghasemi Bijan, 2019).

Nominal durum verilerinin kullanılmasının tek nedeni, bunların biliniyor olması ve bunları elde etmek için herhangi bir ek test ya da deney yapılmasına gerek olmamasıdır. Ayrıca, tam yük dışında bir yükleme noktası kullanmak da kabul edilebilir. Ancak, bu durumda bu yükte P_{FW} , P_{SLL} , hız ve sıcaklık değerleri bilinmelidir.

Nüve Direnci (R_{fe})

Asenkron motor nüve kayıpları (P_{fe}), nüveyi mıknatıslamak için gereken enerjinin histerezis ve eddy akımı kayıplarından oluşur (Corino ve ark., 2008; Sen, 2021).

Nüve kayıpları, bir ASM'un toplam kayıplarının %15'ini oluşturur ve yükten bağımsız olarak kabul edilir (Corino ve ark., 2008). Nüve kaybı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{fe} = \Delta P - (P_{FW} + P_{SLL} + P_{rcl} + P_{scl}) \quad (3.16)$$

Burada ΔP , nominal çalışma durumunda toplam kaybı ifade etmektedir.

$$\Delta P = P_{giriş} - P_{çıkış} = (1 - \eta)P_{giriş} = \left(\frac{1 - \eta}{\eta}\right)P_{çıkış} \quad (3.17)$$

P_{FW} ve P_{SLL} kayıp güç değerleri nominal güç değeri ve kutup sayısına göre belirlenmektedir (Al-Badri ve ark., 2015). Eşitlik (3.17) kullanılarak rotor bakır kaybı P_{rcl} hesaplanır. Stator bakır kaybı aşağıda verilen eşitlikten yararlanılarak hesaplanır.

$$P_{scl} = 3I_1^2 R_1 \quad (3.18)$$

Nüve kaybı direnci aşağıda verilen eşitlikten yararlanılarak belirlenir.

$$R_{fe} = \frac{3V_2^2}{P_{fe}} \quad (3.19)$$

Burada V_2 asenkron motor eşdeğer devresinin nüve ve rotor devrelerinin gerilimidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$V_2 = |V_1 - (R_1 + jX_1)(I_1 \angle \phi)| \quad (3.20)$$

Bu eşitlikte $(R_1 + jX_1)(I_1 \angle \phi)$ ifadesi ihmal edilerek $V_2 = V_1$ olarak kabul edilebilir ve eşitlik (3.19) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$R_{fe} = \frac{3V_1^2}{P_{fe}} \quad (3.21)$$

Nüve direnci için uygun bir aralık yaklaşık olarak alt ve üst sınır değerleri aşağıdaki gibi yazılabilir (Ghasemi Bijan, 2019).

$$\begin{aligned} R_{fe,min} &= 0.6xR_{fe} \\ R_{fe,max} &= 1.1xR_{fe} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Farklı güç değerlerine, devir sayılarına, yalıtım sınıflarına ve NEMA tasarımlarına sahip 182 adet asenkron motor üzerinde yapılan kapsamlı bir çalışma, bir ASM'un maksimum nüve kaybının, nominal çalışma koşullarında giriş gücünün yaklaşık %6'sı düzeyinde olduğunu ortaya koymuştur (Pillay ve ark., 2016). Bu kriter, R_{fe} aralığını daraltmak ve minimum R_{fe} değerini belirlemek için yararlı olabilir. Bu amaçla, nominal

durumdaki giriş gücü hesaplanarak, maksimum P_{fe} , nominal giriş gücünün %6'sı olarak düşünülerek hesaplanır. Daha sonra $R_{fe,min}$ değeri eşitlik (3.22) kullanılarak elde edilebilir (Ghasemi Bijan, 2019).

Stator Kaçak Reaktansı (X_1)

Stator kaçak reaktansı (X_1), asenkron motorların tasarımı ve performans analizinde kritik bir parametredir. Bu reaktans, stator sargılarında oluşan ve rotorla manyetik bağlantı kurmayan kaçak akıdan kaynaklanır. Kaçak akı; stator yuvalarından geçen, rotor üzerinden atlayarak diğten diğse dolanan ve uç sargıları çevreleyen bileşenler olarak sınıflandırılabilir (Yannopoulos-Lascaratos ve Tegopoulos, 1994). Eşdeğer devrede X_1 olarak modellenen bu reaktif bileşen, motorun tork üretimini, güç faktörünü ve dolayısıyla verimini doğrudan etkiler. Stator kaçak reaktansı, motor performansında iki temel rol oynar:

Tork Üretimi: Maksimum tork, X_1 ve rotor kaçak reaktansı (X_2) toplamına bağlıdır. Yüksek reaktans değerleri, tork üretimini azaltabilir.

Verimlilik ve Güç Faktörü: Kaçak reaktansı, motorun reaktif güç tüketimini artırarak güç faktörünü düşürebilir, bu da verimi olumsuz etkiler.

NEMA MG 1 standartları, farklı motor tasarımları (örneğin, Tasarım A, B, C) ve kutup sayıları için minimum maksimum tork gereksinimlerini belirtir. Bu standartlar, X_1 'in tasarım sürecinde dikkate alınmasını zorunlu kılar (Ghasemi Bijan, 2019).

Bir ASM'un maksimum torku için eşitlik şöyledir:

$$\tau_{max} = \frac{3V_{th}^2}{2w_s \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right]} \quad (3.23)$$

Bu eşitlikte;

$$V_{th} = \frac{V_1 X_m}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_m)^2}} \quad (3.24)$$

$$R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (3.25)$$

$$(X_1 + X_m)^2 \gg R_1^2 \rightarrow R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{(X_1 + X_m)} \right)^2 R_1 \quad (3.26)$$

$$X_m \gg X_1 \rightarrow X_{th} \approx X_1 \quad (3.27)$$

Eşdeğer devreden X_m ve R_{fe} ihmal edilerek maksimum tork eşitliği tekrar aşağıdaki gibi yazılır.

$$\tau_{max} = \frac{3V_1^2}{2\omega_s [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}]} \quad (3.28)$$

Bu eşitlikte w_s , V_1 ve R_1 bilinmekte ancak τ_{max} ve $(X_1 + X_2)$ parametreleri bilinmemektedir. NEMA MG 1 standardına göre, her motor için τ_{max} , tam yük torkunun yüzdesi olarak belirtilmiştir ve bu değerden az olmamalıdır (Association, 2003).

Çizelge 3.5. NEMA A ve B tasarımına sahip ASM en düşük devrilme torku (τ_{max})'nun tam yük torkuna yüzde oranı (Association, 2003)

HP	Kutup Sayısı						
	2	4	6	8	10	12	14
½	...	...	...	200	200	200	200
¾	...	...	275	200	200	200	200
1	...	300	265	200	200	200	200
1-½	250	280	250	200	200	200	200
2	240	270	240	200	200	200	200
3	230	250	230	200	200	200	200
5	215	225	215	200	200	200	200
7-½	200	215	205	200	200	200	200
10-125	200	200	200	200	200	200	200
150	200	200	200	200	200	200	...
200	200	200	200	200	200	...	...
250	175	175	175	175	...	...	...
300-350	175	175	175	...	...	...	...
400-500	175	175	...	...	...	...	...

Çizelge 3.6. NEMA C tasarımına sahip ASM en düşük devrilme torku(τ_{max})’nun tam yük torkuna yüzde oranı (Association, 2003)

HP	Kutup Sayısı		
	4	6	8
1	200	225	200
1-½	200	225	200
2	200	225	200
3	200	225	200
5	200	200	200
7-½ - 10	200	190	190
25-200 dahil	190	190	190

Eşitlik (3.28)’deki varsayımı daha ayrıntılı inceleyecek olursak eşitliği yeniden aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$(X_{th} + X_2)^2 = (AV_{th}^2 - R_{th})^2 - R_{th}^2 \quad (3.29)$$

Bu eşitlikte A değeri aşağıda verilmiştir.

$$A = \frac{3}{2\omega_s \tau_{max}} \quad (3.30)$$

$$(X_{th} + X_2)^2 = \left(A \left(\frac{X_m}{X_m + X_1} \right)^2 V_1^2 - \left(\frac{X_m}{X_m + X_1} \right)^2 R_1 \right)^2 - \left(\frac{X_m}{X_m + X_1} \right)^4 R_1^2 \quad (3.31)$$

$$(X_{th} + X_2)^2 = \left(\frac{X_m}{X_m + X_1} \right)^4 ((AV_1^2 - R_1)^2 - R_1^2) \quad (3.32)$$

Yukarıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi $\frac{X_m}{X_m + X_1} < 1$ ’dir.

Sonuç olarak;

$$X_m(X_m \rightarrow \infty), \lim_{X_m \rightarrow \infty} \frac{X_m}{X_m + X_1} = 1 \text{ ihmal edilerek paralel kol için } V_{th} = V_1 \text{ ve}$$

$R_{th} = R_1$ kullanılmasının X_1 parametresinin daha yüksek bir değer olarak tahmin edilmesine neden olmaktadır. Ancak istenen X_1 değerinin aralık içinde olmasını sağlamaktadır.

Mıknatıslanma Reaktansı (X_m)

Mıknatıslanma reaktansı (X_m), asenkron motorların eşdeğer devresinde, stator ve rotor arasındaki hava boşluğunda manyetik akının oluşumunu temsil eden bir

parametredir. Bu reaktans, motorun manyetik devresinin özelliklerine bağlıdır ve genellikle motorun boşa (no-load) çalışma testlerinden elde edilen verilerle hesaplanır. X_m , motorun manyetik akısını oluşturan akımı (mıknatıslanma akımı) belirler ve eşdeğer devrede paralel bir kol olarak modellenir. X_m 'nin doğru bir şekilde belirlenmesi, motorun verimini ve performansını tahmin etmek için kritik öneme sahiptir (J Chapman, 2004; Sen, 2021).

Mıknatıslanma reaktansı, motorun boş çalışma akımı (I_0) ve nominal gerilimi ($V_{1,nominal}$) temel alınarak hesaplanır. Mıknatıslanma reaktansı boş çalışma akımı ve güç faktörü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Cochran, 1989). Yüksüz durumda rotor hızı senkron hıza çok yakındır ve kayma neredeyse sıfırdır. Sonuç olarak, yüksüz akımın eşdeğer devrenin paralel kolundan geçtiği ve dolayısıyla eşdeğer devrenin rotor kısmının ihmal edilebileceği varsayılabilir (Ghasemi Bijan, 2019).

$$\tan \varphi_0 = \frac{R_{fe}}{X_m} \quad (3.33)$$

Burada φ_0 boş çalışma güç faktörünün açısıdır ve $\cos \varphi_0 = 0,5$ mümkün olan maksimum boş çalışma güç faktörü olarak kabul edecek olursak R_{fe} 'nin maksimum tahmin değeri kullanılarak $X_{m,max}$ elde edilebilir (Ghasemi Bijan, 2019).

$$X_{m,max} = \frac{R_{fe,max}}{\sqrt{3}} \quad (3.34)$$

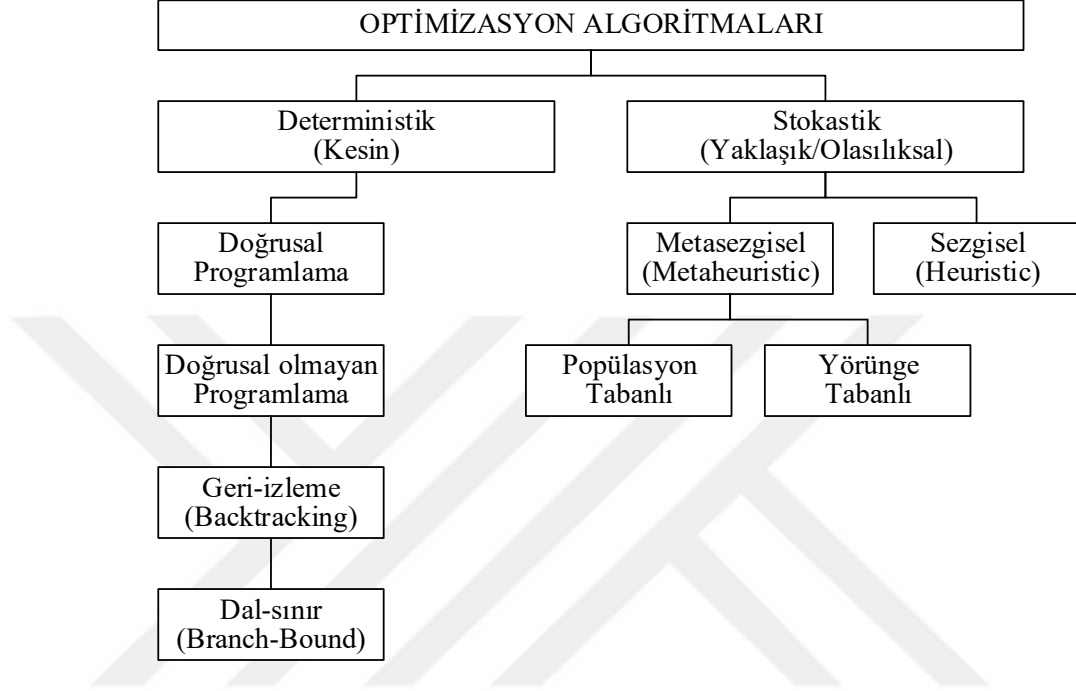
Minimum $X_{m,min}$ değeri için boş çalışma akımı Çizelge 3.4'ten yararlanılarak tam yük akımına bağlı olarak belirlenebilir. Örnek olarak 1- 7,5Hp motorlar için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$X_{m,min} = \frac{V_1}{0.8I_1} \quad (3.35)$$

3.4 Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon algoritmaları ile çözümlenmeye çalışılan problemler kısıtlar, amaç ve karar olmak üzere üç ana unsurdan oluşmaktadır. Bu algoritmalar, kesin metotlar ve yaklaşık metotlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kesin metotlar; dal-sınır (branch-bound), geri-izleme (backtracking), doğrusal ve dinamik programlama gibi algoritma yapılarından oluşur ve problemin çözümüne ilişkin en iyi çözümü kesin olarak veren algoritmalarlardır. Yaklaşık metotlar ise, optimizasyon problemlerinin çözümlenmesinde yeterli veri olmadığında, sistemin modelinin tam olarak bilinmemesi gibi sebeplerden

dolayısı kesin metotların yetersiz kaldığı durumlarda çözümü uzun zaman gerektiren veya kapsamlı olan problemlerde daha kısa çözüm zamanı ile en iyi olmasa da en iyiye yakın optimum çözümü bulmayı amaç edinen algoritmalar (SOFUOĞLU, 2023). Bu algoritmalar da sezgisel ve metasezgisel olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması Şekil 3.3’de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Optimizasyon algoritmalarının genel sınıflandırılması (SOFUOĞLU, 2023)

Geleneksel türev tabanlı analitik yöntemlerin aksine, sezgisel algoritmalar önceden tanımlanmış matematiksel gradyan bilgisine ihtiyaç duymadan çözüm arayışında bulunur. Bu algoritmalar, doğadan, insan davranışlarından veya fiziksel süreçlerden esinlenen mekanizmalarla, çözüm uzayında yönlendirilmiş bir arama gerçekleştirir. Sezgisel algoritmalar, özellikle karmaşık, doğrusal olmayan ve çok sayıda yerel minimum içeren problemlerde etkili bir çözüm yaklaşımı sunar. Bu algoritmalarda genellikle, problem parametrelerine karşılık gelen bir dizi rastgele çözüm adayı tanımlanır. Her bir aday çözüm, bir amaç fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilir ve algoritma, bu değerlere göre çözüm kümesini iteratif olarak iyileştirir. Böylece, zamanla optimum ya da optimuma yakın bir çözüm elde edilmeye çalışılır. Bu süreçte parametre güncellemeleri algoritmanın kendi yönlendirme stratejilerine bağlı olarak gerçekleştirilir.

Sezgisel algoritmalar en iyi sonucu vermek yerine büyük ölçekli optimizasyon problemlerinde en kısa sürede yaklaşık en uygun çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Sezgisel yöntemler kullanım alanlarına göre sosyal, fizik, müzik, sürü, biyoloji,

matematik gibi farklı gruplara ayrılarak incelenmektedir. Çözüm aralığı olan veya çözümlenmesi zor olan problemlerde en optimum çözümü bulmak için farklı sezgisel algoritmaların bir arada kullanılarak melez algoritma yapılarının geliştirildiği çalışmalar oldukça fazladır. Sezgisel algoritmaların bazı optimizasyon problemlerinde yetersiz kalması nedeniyle, bu algoritmaların daha gelişmiş versiyonları olan meta sezgisel algoritmalar yaygın olarak kullanılmakta ve literatüre her geçen gün yeni meta sezgisel yöntemler eklenmektedir.

Bu tez çalışmasında, asenkron motorların sınırlı verilerle doğrudan elde edilmesi güç ve karmaşık olan eşdeğer devre parametrelerinin tahmini ile motor veriminin doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla meta sezgisel algoritmalarından yararlanılmıştır. Bu bölümde, söz konusu parametre tahmin sürecinde kullanılan ve aşağıda verilen sezgisel optimizasyon algoritmaları detaylı olarak ele alınmaktadır.

3.4.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu

Kuşların veya balıkların koordine edilmiş kolektif davranış modelini esas alan algoritma yapısı, ilk defa Reynolds tarafından önerilmiştir. Kennedy ve Eberhart, bu algoritma yapısını basitleştirerek, parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) yöntemini geliştirmişlerdir. Bu algoritma yapısında, her parçacık, arama uzayı içindeki uçuş yönünü, kuş sürülerinde olduğu gibi kendisinin ve tüm sürünün uçuş yönüne göre belirler. Parçacıklar, sonuca ulaşmak için kendilerinin ve tüm sürünün geçmiş deneyimlerinden yararlanır. PSO, çok boyutlu optimizasyon problemlerin çözümünde, güçlü bir sezgisel algoritmadır (Kennedy ve Eberhardt, 1995; Eberhart ve ark., 2001).

PSO algoritmasında, her parçacık d boyutlu potansiyel çözümü ifade etmektedir. Parçacıklara, başlangıçta rastgele değerler almaktadır ve genel optimum çözüme ulaşmak için konumları iteratif yöntemle güncellenir. Parçacıkların konumları her bir nesilde kendi yerel en iyi konumlarına ve sürünün genel en iyi konumuna göre belirlenir. Her parçacık, belirlenen amaç fonksiyonuna göre istenen en küçük veya en büyük sayısal değere yakınlığı değerlendirilir. Algoritmada; P_{best} i . parçacığın o ana kadar ulaştığı en iyi konum, o parçacığın yerel en iyi konumu olarak tanımlanır ve aslında parçacığın geçmiş hafızasını ifade eder, G_{best} ise, tüm parçacıkların o ana kadar elde ettikleri en iyi konum ise genel en iyi konum olarak tanımlanır ve sürünün geçmiş hafızasını ifade eder. Her k iterasyonda, PSO her d boyuttaki parçacıkların hızları v , parçacıkların yerel ve tüm parçacıkların genel en iyi çözümlerine göre belirlenir.

Algoritmanın gelişim sürecinde her bir parçacığın (i) hızı (v) ve konumu (x) aşağıdaki eşitlikler ile güncellenir.

$$v_i(k+1) = w * v_i(k) + c_1 * rand_1 * (p_i - x_i) + c_2 * rand_2 * (p_g - x_i) \quad (3.36)$$

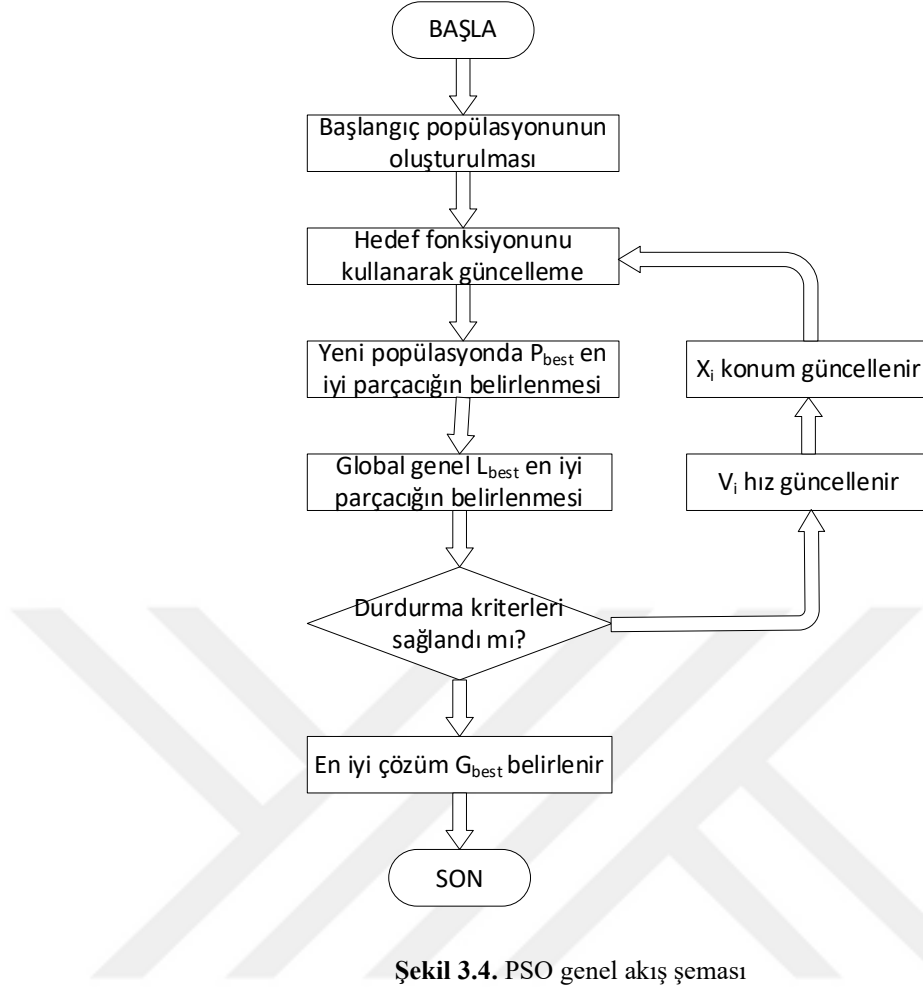
$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (3.37)$$

Burada w eylemsizlik katsayısıdır ve $[0,1]$ 'dir. c_1 ve c_2 hızlandırma katsayılarıdır ve $[0, 2]$ 'dir. $rand_1$ ve $rand_2$ 0 ile 1 arasında rastgele sayılardır. Algoritmanın sapmasını önlemek için parçacıkların hızı $-v_{max}$ ve $+v_{max}$ ile sınırlandırılmıştır. v_{max} , $x_{i,max}$ - $x_{i,min}$ 'in %10'u olarak kabul edilir.

w için büyük bir değer seçmek, algoritmanın cevabı bulmak için mevcut konumdan uzakta yeni alanlar aramasına neden olur. Bu, tüm alanı aramaya yardımcı olan programın başlangıcında (ilk iterasyonunda) iyidir. w için küçük bir değer seçmek, algoritmayı mevcut konuma yakın doğru cevabı aramaya zorlar. Bu, çözümün büyük olasılıkla doğru cevap olan bir konuma yakınsadığı programın son iterasyonları için iyidir. Her iki durumdan da faydalanmak için w genellikle aşağıdaki gibi iterasyon sayısı cinsinden bir değişken olarak tanımlanır (Fukuyama, 2008):

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} iter \quad (3.38)$$

Burada w_{max} ve w_{min} w 'nin başlangıç ve son değeri, $iter$ mevcut iterasyon sayısıdır ve $iter_{max}$, PSO için seçilen maksimum iterasyon sayısıdır. Parametre seçimi üzerine yapılan çalışmanın sonucu, aşağıdaki parametrelerin PSO için uygun olduğunu ve problemlerden etkilenmediğini göstermektedir (Shi ve Eberhart, 1998a; Shi ve Eberhart, 1998b). $w_{max} = 0,9$, $w_{min} = 0,4$; $c_1, c_2 = 2,0$. Bu değerler bazı problemlere uygulanmış ve uygunlukları kanıtlanmıştır (Yoshida ve ark., 2000; Naka ve ark., 2003). PSO'nun genel akış şeması Şekil 3.4'deki gibi tanımlanabilir:



Adım 1: Parçacıklar için izin verilen aralıkta rastgele başlangıç konumları ve hızları oluşturulur. Bir parçacığın mevcut konumu P_{best} olarak kabul edilir. G_{best} , parçacıkların bir amaç fonksiyonu ile değerlendirilmesinden sonra belirlenir.

Adım 2: Eşitlik (3.36) ve (3.37)’i kullanarak konum ve hız güncellenir.

Adım 3: Parçacıklar amaç fonksiyonuna göre değerlendirilir. Eğer değerlendirilen değer parçacığın mevcut P_{best} değerinden iyiye, mevcut P_{best} değeri değerlendirilen değer ile değiştirilir. Komşu üç parçacığın P_{best} ’leri arasındaki en iyi değer L_{best} ile karşılaştırılır ve L_{best} ’ten daha iyi ise, L_{best} en iyi P_{best} ’in konumu ile değiştirilir.

Adım 4: Durdurma kriterlerini kontrol edilir. Mevcut iterasyon sayısı $iter_{max}$, iterasyon tamamlanır ve G_{best} (tüm parçacıklar arasında en iyi deneyimlenen) probleme bir cevap olarak kabul edilir. Aksi takdirde 2. adıma geçilir

3.4.2 Genetik Algoritmalar

Genetik algoritma, doğrusal olmayan eşitlik sistemlerini çözmek için evrimsel algoritma yöntemlerinden biridir (Goldberg, 1989; Nolan ve ark., 1994), ve aynı zamanda

sistem tanımlama ve diğer bazı problemler için popüler bir yöntemdir. Bu yöntem rastgele sayı üretimi ve doğal seçim prensiplerine dayanır. Geleneksel sayısal yöntemlerden farklı olarak, genetik algoritma yerel minimumlar yerine küresel minimumu bulabilir, başlangıç tahminlerine ihtiyaç duymaz ve fonksiyonun türevini kullanmaz (Goldberg, 1989).

Genetik algoritmayı uygulamak için her bilinmeyen parametre rastgele bir ikilik (binary) yöntemle atanır ve bu parametreler farklı diziler (string) olarak adlandırılan bir popülasyonu oluşturur. Klasik bir genetik algoritma Üreme (Reproduction), Çaprazlama (Crossover) ve Mutasyon (Mutation) olmak üzere üç temel operatörden oluşur (Pillay ve ark., 1998).

Üreme (Reproduction)

Üreme, bireysel dizilerin uygunluklarına (fitness) göre seçildiği bir süreçtir. Uygunluk her dizinin bir amaç fonksiyona ne kadar iyi uyduğunun hesaplanmasıyla belirlenir. Yani parametrelerin varsayılan değerlerinin sistem eşitliklerini veya daha genel olarak gözlemlenen ya da istenen sistem performansını ne kadar iyi karşıladığı değerlendirilir. Dizilerin uygunluk değerlerine göre kopyalanması amaç fonksiyona iyi uyan dizilerin bir sonraki nesilde bir veya daha fazla yavru katkısı sağlama olasılığının daha yüksek olduğu anlamına gelir (Pillay ve ark., 1998).

Rasgele örnekleme ile değiştirme en basit üreme şemasıdır ve dizi olasılıklarının ağırlıklı bir rulet çarkına yerleştirilmesi ve çarkın çevrilmesiyle bir dizinin seçilmesi esasına dayanır. Rulet çarkındaki olasılıklar dizilerin uygunluğunun toplam popülasyon uygunluğuna oranı olarak belirlenir. Üreme operatörü tarafından bir dizi seçildiğinde bu dizi bir eşleşme havuzuna (mating pool) kopyalanır ve daha fazla genetik operatör işlemi için seçilmeyi bekler (Pillay ve ark., 1998).

Deterministik örnekleme daha verimli bir üreme şemasıdır ve seçim olasılıklarını rasgele örnekleme ile aynı şekilde hesaplar. Ardından her diziye seçim olasılığına dayalı olarak beklenen bir sayı atanır. Bir dizinin eşleşme havuzuna kopyalanma sayısı bu beklenen sayının tam kısmı (integer part) ile belirlenir. Eğer yeni popülasyonu doldurmak için ek dizilere ihtiyaç varsa beklenen sayının kesirli kısımları sıralanır ve diziler bu sıralı listenin başından seçilir. Bu seçim şeması uygun dizilerin eşleşme havuzuna kopyalanmasını garanti eder (Pillay ve ark., 1998).

Üreme, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç temel genetik operatör, etkili bir arama mekanizması oluşturarak algoritmanın amaç fonksiyonu doğrultusunda en uygun çözüme ulaşmasını sağlar.

3.4.3 Harris Şahinleri Optimizasyonu

Harris Şahinleri Optimizasyonu (Harris Hawks Optimizasyon, HHO), 2019 yılında Heidari vd. tarafından geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Algoritmada Harris şahinlerinin avlanma stratejilerinden (örneğin "sürpriz atak" ve "kuşatma") esinlenilmiştir (Heidari ve ark., 2019). Temel mantık şahinlerin avı (örneğin tavşan) keşfetme, takip etme ve çeşitli stratejilerle sömürme davranışlarının matematiksel modellenmesine dayanır (Hussien ve ark., 2022). HHO, keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) aşamalarını dinamik bir enerji parametresi (E) ile dengeler. Bu parametre avın kaçma enerjisini simüle eder ve algoritmanın davranışını yönlendirir (Jia ve ark., 2019; Chen ve ark., 2023). Aşağıda algoritmanın aşamaları izah edilmiştir.

HHO algoritmasında keşif aşaması, Harris şahininin rastgele tüneme stratejisini modellemek için bir rastgele seçim faktörü $q_r \in [0,1]$ kullanır. Her iterasyonda konum seçim stratejisini belirlemek için 0.5 olasılık eşiği kullanılır:

Eğer $q_r \geq 0.5$, şahin keşif için rastgele bir konum seçer.

Eğer $q_r < 0.5$, şahin diğer aile üyelerinin konumunu seçer.

Şahinler avın konumunu rastgele arama veya popülasyonun ortalama konumuna göre günceller. Keşif aşamasının matematiksel ifadesi (Heidari ve ark., 2019) HHO algoritmasında şu şekilde tanımlanır:

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_{d1}|X_{rand}(t) - 2r_{d2}X(t)|, & q_r \geq 0.5 \\ (X_p(t) - X_m(t)) - r_{d3}(lb + r_{d4}(ub - lb)), & q_r < 0.5 \end{cases} \quad (3.39)$$

Burada:

$X(t)$: t iterasyonunda şahinin mevcut konumu.

$X(t+1)$: t+1 iterasyonunda güncellenmiş konum.

$X_{rand}(t)$: Mevcut popülasyondan rastgele seçilen konum.

$X_p(t)$: Mevcut iterasyonda en iyi şahinin konumu (optimum çözüm).

$X_m(t)$: Mevcut şahin popülasyonunun ortalama konumu.

$r_{d1}, r_{d2}, r_{d3}, r_{d4}$: $[0,1]$ aralığında rastgele sayılar.

lb, ub : Arama uzayının alt ve üst sınırları.

Ortalama konum vektörü $X_m(t)$ t-inci iterasyondaki tüm şahinlerin konumlarının toplanması ve ardından ortalamasının alınmasıyla hesaplanır. Eşitlik şu şekildedir:

$$X_m(t) = \frac{1}{N_{sum}} \sum_{i=1}^{N_{sum}} X_i(t) \quad (3.40)$$

Burada N_{sum} , şahinlerin toplam sayısını ifade eder.

Geçiş aşaması avın kaçış enerjisi tarafından yönetilir. Avın başlangıç enerjisi E_0 olarak belirtilir ve bu değer, iterasyon süreci boyunca $[-1,1]$ aralığında güncellenir. Kaçış enerjisi E şu şekilde tanımlanır:

$$E = 2E_0(1 - \frac{t}{T}) \quad (3.41)$$

Burada t mevcut iterasyonu, T ise maksimum iterasyon sayısını temsil eder. E 'nin mutlak değeri, algoritmanın keşif veya sömürü aşamasına girip girmeyeceğini belirler. Harris şahini $|E| \geq 1$ olduğunda, keşif aşamasını gerçekleştirir ve $|E| < 1$ olduğunda ise sömürü aşamasına geçer (Heidari ve ark., 2019).

Harris şahini avı tespit ettiğinde sömürü aşamasına geçer. Şahinin saldırıya geçmeden önce avı yakalama olasılığını temsil eden yeni bir rastgele sayı g tanımlanır ve $[0,1]$ aralığındadır. Burada g değeri için kritik eşik 0.5'tir. Sömürü aşamasındaki saldırı stratejisi $|E|$ ve g kombinasyonuna bağlı olarak belirlenir.

Sömürü aşamasında yumuşak kuşatma $g \geq 0.5$ ve $|E| \geq 0.5$ olduğunda, av kaçmaya çalışır ancak ani bir saldırı ile çevrelenir. Bu duruma karşılık gelen formül şu şekildedir:

$$X(t + 1) = \Delta X(t) - E|B_r X_p(t) - X(t)| \quad (3.42)$$

$$\Delta X(t) = X_p(t) - X(t) \quad (3.43)$$

$$B_r = 2(1 - r_{d5}) \quad (3.44)$$

Burada, $\Delta X(t)$, t-inci iterasyonda av ile şahin arasındaki mesafeyi temsil eder, $r_{d5}, [0,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır ve B_r avın kaçış sırasındaki rastgele sıçrama gücünü ifade eder, $[0,2]$ aralığındadır.

Sömürü aşamasında sert kuşatma $g \geq 0.5$ ve $|E| < 0.5$ olduğunda, av güçlü bir şekilde çevrenir ve önemli enerji tüketiminden sonra yorgun düşerek yakalanır. Bu duruma ilişkin bağıntı şu şekildedir:

$$X(t+1) = X_p(t) - E|\Delta X(t)| \quad (3.45)$$

Sömürü aşamasında aşamalı hızlı dalışlarla yumuşak kuşatma $g < 0.5$ ve $|E| \geq 0.5$ olduğunda, Harris şahini dalış yapar. Lévy uçuşu (LF) fonksiyonu ile birleştirilen algoritma formülü aşağıdaki gibidir:

$$Y = X_p(t) - E|BX_p(t) - X(t)| \quad (3.46)$$

$$Z = Y + S \times LF(dim) \quad (3.47)$$

$$LF(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (3.48)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.49)$$

Burada,

dim , problem boyutunu,

S , $1 \times dim$ boyutunda rastgele bir vektörü,

LF , Lévy uçuşu fonksiyonunu,

u ve v , $[0,1]$ aralığında rastgele sayıları ifade eder ve

β , uçuş adımı olarak 1.5'e sabitlenir. LF 'nin tanıtılmasından sonra güncellenen yumuşak kuşatma stratejisi fonksiyonu şöyledir:

$$(t+1) = \begin{cases} Y, & \text{if } F(X) < F(X(t)) \\ Z, & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (3.50)$$

Sömürü aşamasında aşamalı hızlı dalışlarla sert kuşatma $g < 0.5$ ve $|E| < 0.5$ olduğunda, Harris şahini kaçamayan avı yakalamak için ortalama konum aralığını azaltır. Bu duruma ilişkin formül aşağıdaki gibidir:

$$(t+1) = \begin{cases} Y, & \text{if } F(X) < F(X(t)) \\ Z, & \text{if } F() < F(X(t)) \end{cases} \quad (3.51)$$

Burada yeni kurallara göre, Y ve Z , aşağıdaki şekilde optimize edilip ayarlanmalıdır:

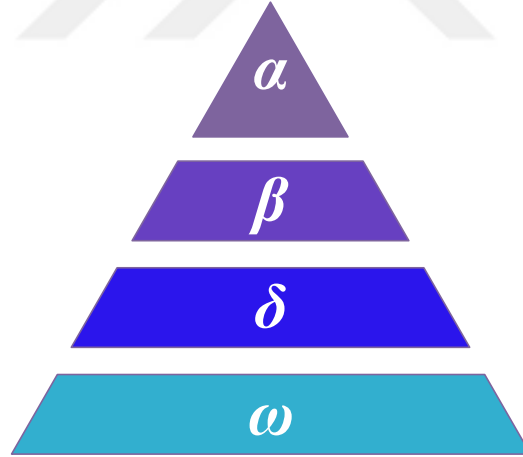
$$Y = X_p(t) - E|BX_p(t) - X(t)| \quad (3.52)$$

$$Z = Y + S \times LF(dim) \quad (3.53)$$

3.4.4 Gri Kurt Optimizasyonu

Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimization, GWO), 2014 yılında Seyedali Mirjalili ve ekibi tarafından geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Gri kurtların sosyal hiyerarşisi ve avlanma stratejilerinden esinlenmiştir. Temel mantık, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi “alfa”, “beta”, “delta” ve “omega” kurtlarının liderlik hiyerarşisi ile avın keşfedilmesi, kuşatılması ve saldırı aşamalarını matematiksel olarak modellemeye dayanır (Mirjalili ve ark., 2014; Faris ve ark., 2018). Algoritma, tek amaçlı optimizasyon problemleri için tasarlanmıştır ve MATLAB, Python gibi dillerde açık kaynak kodları mevcuttur.

GWO’da popülasyon, dört tür kurtla temsil edilir:



Şekil 3.7. Gri kurt hiyerarşisi (hakimiyet yukarıdan aşağıya doğru azalır) (Mirjalili ve ark., 2014)

Alfa (α): En iyi çözüm,

Beta (β): İkinci en iyi çözüm,

Delta (δ): Üçüncü en iyi çözüm,

Omega (ω): Diğer çözümler.

Kurtların av etrafında hareketi aşağıdaki eşitlikte belirtildiği şekilde modellenir:

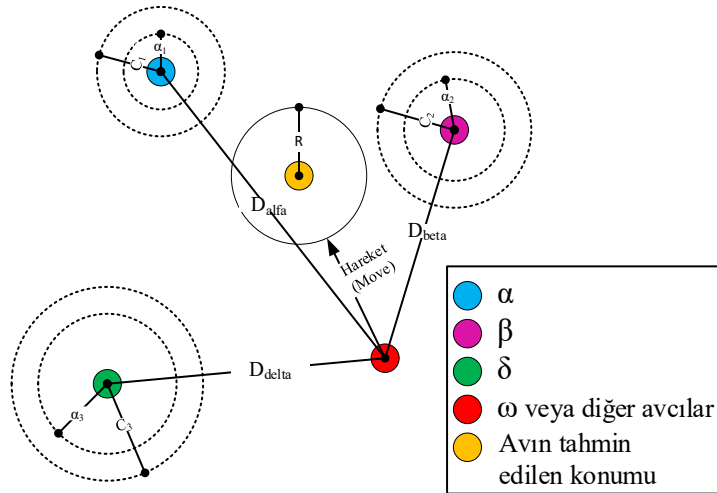
Gri kurtların avlanma davranışını matematiksel olarak modellemek için, avın potansiyel konumu hakkında alfa'nın en iyi, beta ve delta'nın diğer kurtlara göre daha iyi bilgiye sahip olduğunu varsayılır. Bu nedenle, şu ana kadar elde edilen ilk üç en iyi çözümü kaydedilir ve diğer arama ajanlarının (omega'lar dahil) pozisyonlarını en iyi arama ajanlarının pozisyonlarına göre güncellemelerini zorunlu kılınır (Mirjalili ve ark., 2014). Bu bağlamda aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır:

$$\begin{aligned}\vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}|,\end{aligned}\tag{3.57}$$

$$\begin{aligned}\vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta)\end{aligned}\tag{3.58}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}\tag{3.59}$$

Şekil 3.9'da GWO algoritmasında bir arama ajanının 2D arama alanında alfa, beta ve deltaya bağlı olarak konumunu nasıl güncellediği gösterilmektedir. Son konumun alfa, beta ve delta konumlarının oluşturduğu daire içerisindeki rastgele bir yer olduğu görülebilir. Diğer kurtla alfa, beta ve delta tarafından belirlenen avın konumunun etrafında konumlarını tekrar günceller (Mirjalili ve ark., 2014).



Şekil 3.9. GWO pozisyon güncelleme şeması

Gri kurtlar av hareket etmeyi bıraktığında ava saldırarak avı bırakırlar. Matematiksel olarak modellendiğinde ava yaklaştıkça $\vec{a}$ değeri azaltılır. Buna bağlı

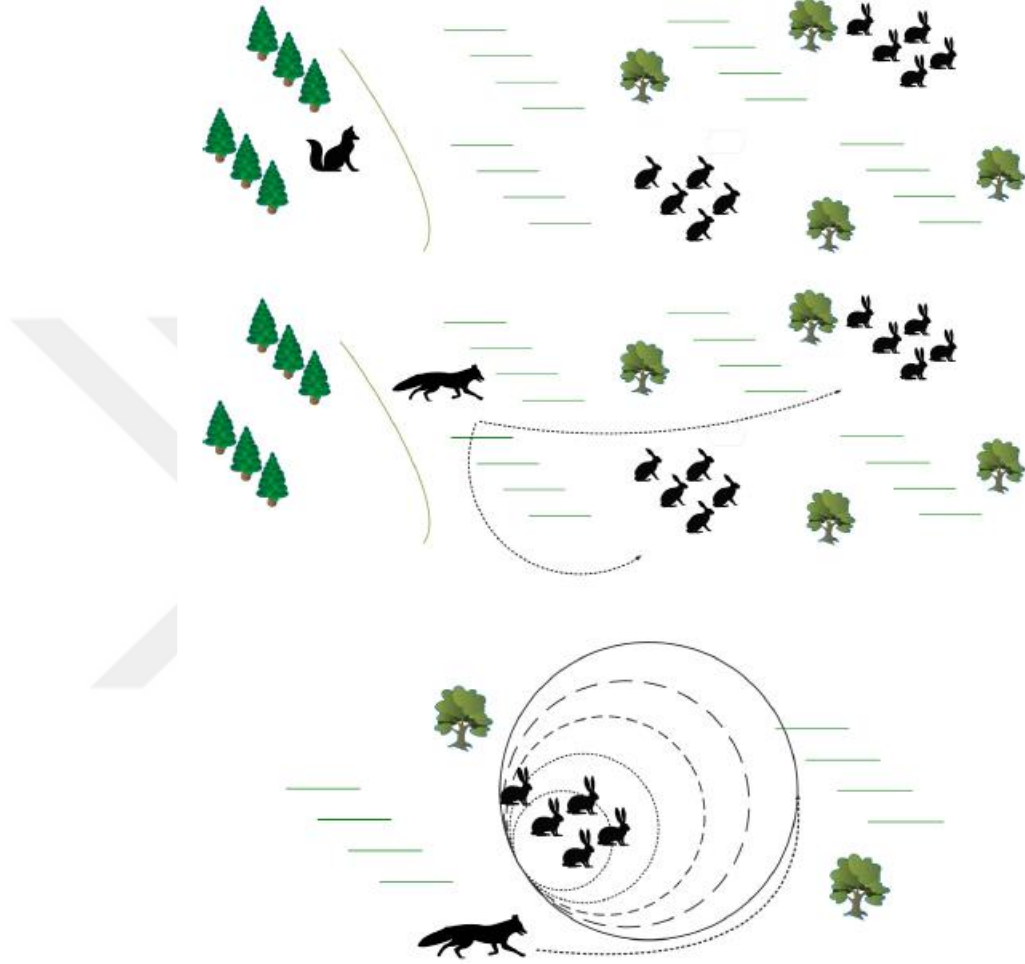
olarak $\vec{A}$ değeri de azalacaktır. $\vec{A}$ sayısı $[-2\alpha, 2\alpha]$ aralığında rastgele bir değer ve α değeri güncellemeler sırasında 2'den 0'a doğru azalmaktadır. $|\vec{A}| < 1$ olduğunda kurtlar avaya doğru saldırıya başlar. GWO algoritması arama ajanlarının konumlarını alfa, beta ve delta konumlarına göre güncellemelerine ve avına doğru saldırımlarına olanak tanır. Ancak, GWO algoritması bu operatörlerle yerel çözümlerde durgunluğa eğilimlidir. Önerilen kuşatma mekanizmasının bir dereceye kadar keşif gösterdiği doğrudur, ancak GWO'nun keşfi vurgulamak için daha fazla operatöre ihtiyacı vardır.

Gri kurtlar çoğunlukla alfa, beta ve delta pozisyonlarına göre arama yaparlar. Av aramak için birbirlerinden ayrılırlar ve avına saldırmak için birleşirler. Ayrışmayı matematiksel olarak modellemek için, arama ajanlarını avdan ayrılmaya zorlamak için 1'den büyük veya -1'den küçük rastgele değerlere sahip $\vec{A}$ kullanılır. Bu, keşfi vurgular ve GWO algoritmasının küresel olarak arama yapmasına olanak tanır. GWO'nun keşfi destekleyen bir diğer bileşeni $\vec{C}$ 'dir. $\vec{C}$ vektörü $[0, 2]$ aralığında rastgele değer alır. Eşitlik (3.54)'da bu bileşen mesafeyi tanımlamada avın etkisini vurgulamak için $\vec{C} > 1$ veya önemsizleştirmek için $\vec{C} < 1$ olacak şekilde rastgele ağırlıklar verilmektedir. Bu, GWO'nun optimizasyon boyunca daha fazla rastgele bir davranış göstermesine yardımcı olur, doğru keşfi ve yerel optimumlardan kaçınmayı destekler (Mirjalili ve ark., 2014). Burada şunu belirtmekte fayda var C , A 'nın aksine doğrusal olarak azaltılmaz. Sadece ilk yinelemelerde değil, aynı zamanda son yinelemelerde de keşfi vurgulamak için C 'nin her zaman rastgele değerler sağlamasını kasıtlı olarak istenir. Bu bileşen (C), özellikle son yinelemelerde yerel optimum durgunluğu durumunda çok faydalıdır (Mirjalili ve ark., 2014).

3.4.5 Kızıl Tilki Optimizasyonu

Kızıl tilki grupları, belirli bölgelerde yerleşik yaşayan ve göçebe bir yaşam tarzını benimseyen tilkilerden oluşur. Her tilki grubu, alfa çiftin liderliğinde tek bir bölgeyi paylaşır. Genç tilkiler olgunlaştıklarında, başka bir bölgeyi ele geçirme olasılığı yüksekse gruptan ayrılarak kendi topluluklarını oluşturabilirler. Ancak bu olasılık düşükse, aile içinde kalarak ebeveynlerinden avlanma bölgesini devralmayı beklerler (Larivière ve Pasitschniak-Arts, 1996). Kızıl tilki hem yabani hem de evcil küçük hayvanları avlamada oldukça kabiliyetli bir avcıdır. Bölgesinde dolaşırken her türlü yiyecek fırsatını değerlendirir, avına gizlice yaklaşır ve etkili bir saldırı için yeterince yakına gelene kadar saklanır. Tilkinin avlanma davranışlarının kavramsal çerçevesi Şekil 3.10'da

gösterilmiştir. Kızıl Tilki Optimizasyonu (Red Fox Algorithm, RFA) algoritmasında tilkinin yiyecek bulmak için geniş alanları taraması ve avı uzaktan tespit etmesi küresel arama olarak modellenmiştir. İkinci aşamada ise avına saldırmadan önce yaşam alanında ona mümkün olduğunca yaklaşması yerel arama olarak tanımlanmıştır (Larivière ve Pasitschniak-Arts, 1996).



Şekil 3.10. Kızıl tilkinin doğal avlanma davranışının optimizasyon stratejisine modellenen örnek sunumu (Połap ve Woźniak, 2021)

RFA, kızıl tilkilerin avlanma, bölge savunma ve sosyal davranışlarından esinlenen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır (Połap ve Woźniak, 2021). Temel mantık, tilkilerin keşif (exploration), izleme (tracking), ve sömürü (exploitation) stratejilerini matematiksel olarak modellemeye dayanır. Algoritma, özellikle çok modlu ve yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinde etkilidir. Aşağıda algoritmanın işleyiş ve aşamaları ele alınacaktır.

Algoritmada her iterasyonda bireylerin popülasyonu sabit sayıda tilkiden oluşmaktadır. Her biri n koordinatlarından bir noktayı $\bar{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ olarak temsil

etmektedir. Her iterasyondaki tilki $\bar{x}^i$ ile gösterilmekte ve çözüm uzayının boyutlarına göre $(\bar{x}^i_j)$ gösterimi kullanılmaktadır. Burada i popülasyondaki tilki sayısını ifade etmektedir. Tilkilerin amaç fonksiyonu için en iyi sonucu ararken verilen eşitlikleri kullanarak çözüm uzayında hareket ettiği varsayılmaktadır. RFA, üç ana aşamadan oluşur: Küresel Keşif, Yerel Sömürü ve Popülasyon Kontrolü.

Yemek Arama (Global Arama)

Bir sürüde, her tilki tüm aile üyelerinin hayatta kalması için önemli bir rol üstlenmektedir. Yerel yaşam alanında yiyecek yoksa ya da diğer bölgeleri keşfetmek için sürü üyeleri uzak yerlere giderler. Bu yolculukta edindikleri bilgileri ve tecrübeleri sürünün hayatta kalması ve gelişmesine yardımcı olmak için sürüdeki diğer tilkiler ile paylaşırlar. Çevredeki arazilerin keşfi tüm bireylerin uygunluğuna göre modellenir. Sürüdeki en iyi bireyin amaç fonksiyonuna göre en uygun arazileri keşfettiği ve bu bilgiyi sürüyle paylaşacağı varsayılır. Bu nedenle tilkiler önce sürü içerisinde uygunluk durumuna göre sıralanıyor ve $(\bar{x}^{eniyi})^t$ için popülasyondaki her bir bireye olan öklid mesafesinin karesi şu şekilde hesaplanıyor:

$$d((\bar{x}^i)^t, (\bar{x}^{eniyi})^t) = \sqrt{\|(\bar{x}^i)^t - (\bar{x}^{eniyi})^t\|} \quad (3.60)$$

ve popülasyondaki bireyleri en iyi bireye doğru aşağıdaki formülde ifade edildiği şekilde hareket ettiriliyor.

$$(\bar{x}^i)^t = (\bar{x}^i)^t + \alpha \text{sign}((\bar{x}^{eniyi})^t - (\bar{x}^i)^t) \quad (3.61)$$

Burada α popülasyondaki tüm bireyler için yinelemede bir kez ayarlanan rastgele seçilmiş ölçekleme parametresidir. Yeni pozisyonlar için uygunluk değerleri (en iyi konuma doğru hareket ettikten sonra) daha iyiye bireyler yeni pozisyonlarında kalırlar, aksi takdirde önceki pozisyonlarına geri dönerler. Bu, keşiften sonra aile üyelerinin eve dönüp diğerlerine nerede avlanacaklarını aktardıklarını gösterir. Aile üyeleri, keşifçilerin belirlediği yönle doğru hareket eder. Yiyecek bulma ihtimali varsa bölgede kalıp avlanırlar; aksi takdirde elleri boş şekilde geri dönerler. Ayrıca, uzak bölgelerde tilkinin nerede saklanacağını veya nasıl kaçacağını bilememesi, onu tehlikelere karşı savunmasız hale getirir. Bu biyolojik gözlemlerden yola çıkarak, popülasyondaki en düşük uyum düzeyine sahip bireylerin elenmesi ve en başarılı bireylerin üremeye ödüllendirilmesi algoritmada modellenmiştir (Połap ve Woźniak, 2021).

Lokal Habitattan Geçiş (Lokal Arama)

Kızıl tilki, avını bulmak için bölgesini gezer, tespit ettiğinde sessizce yaklaşır ve avı kandırmak için etrafında dolanır. Yaklaştığında hızlıca saldırır. RFA algoritmasında, bu kandırma ve yaklaşma davranışı yerel arama olarak modellenmiştir, tilkinin fark edilme olasılığı ise $\mu \in [0,1]$ rastgele değeriyle simüle edilmiştir.

$$\begin{cases} \text{Eğer } \mu > 0.75, \text{ava yaklaş} \\ \text{Eğer } \mu \leq 0.75, \text{bekle ve gizlen} \end{cases} \quad (3.62)$$

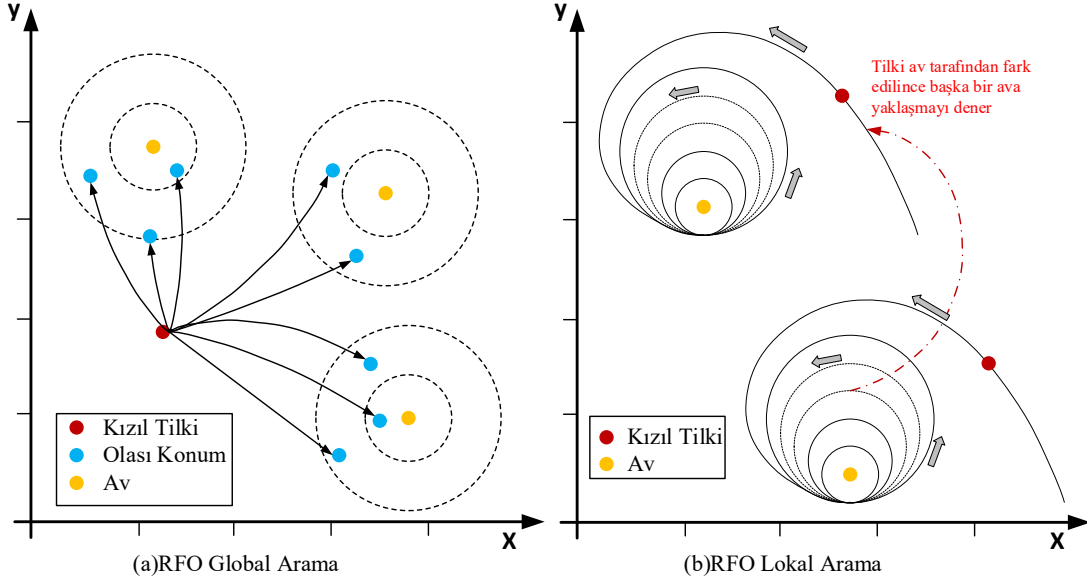
Burada μ katsayısının 0,75'ten büyük olması halinde tilkiler harekete geçmektedirler. Hareket eden tilkilerin gözlem yarıçapı iki parametre ile ifade edilmektedir; $\alpha \in (0,0.2)$ aralığında ölçeklendirme parametresidir ve tüm popülasyon için her iterasyonda rastgele atanarak güncellenmektedir. ϕ_0 ise bütün tilkiler için algoritmanın başında rastgele $\phi_0 \in (0,2\pi)$ aralığında atanır ve tilkilerin gözlem açısını belirler.

$$r = \begin{cases} \text{Eğer } \phi_0 \neq 0, & \alpha \frac{\sin(\phi_0)}{\phi_0} \\ \text{Eğer } \phi_0 = 0, & \theta \end{cases} \quad (3.63)$$

Burada θ , algoritma başlangıcında $[0-1]$ aralığında rastgele seçilen ve olumsuz hava koşullarını (sis, yağmur vb.) temsil eden bir parametredir. Tilkilerin arazi üzerindeki hareketleri, uzamsal koordinatlar için aşağıdaki eşitlik sistemiyle modellenir.

$$\begin{cases} x_0^{yeni} = \alpha r \cdot \cos(\phi_1) + x_0^{gercek} \\ x_1^{yeni} = \alpha r \cdot \sin(\phi_1) + \alpha r \cdot \cos(\phi_2) + x_1^{gercek} \\ x_2^{yeni} = \alpha r \cdot \sin(\phi_1) + \alpha r \cdot \sin(\phi_2) + \alpha r \cdot \cos(\phi_3) + x_2^{gercek} \\ \dots \\ x_{n-2}^{yeni} = \alpha r \cdot \sum_{k=1}^{n-2} \sin(\phi_k) + \alpha r \cdot \cos(\phi_{n-1}) + x_{n-2}^{gercek} \\ x_{n-1}^{yeni} = \alpha r \cdot \sin(\phi_1) + \alpha r \cdot \sin(\phi_2) + \dots + \alpha r \cdot \sin(\phi_{n-1}) + x_{n-1}^{gercek} \end{cases} \quad (3.64)$$

Burada $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n-1}$ değerleri $(0, 2\pi)$ aralığında sürüdeki her bir tilki için rastgele seçilir. Belirtilen bu hareket ile tilki, avını tespit ettikten sonra yaklaşabildiği kadar avın yakınına yaklaşır. Tilki, av tarafından fark edilmesi durumunda başka bir av seçerek aynı şekilde yeni ava yaklaşmaya çalışır. Bu hareket tilkinin lokal arama aşaması için modellenmiştir. Belirtilen yaklaşma hareketi Şekil 3.11 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kızıl tilkinin avın etrafını çevrelemek ve avlanmaya başlamak için olası konumları (Połap ve Woźniak, 2021)

Sürüden Ayrılma ve Sürüye Katılma

Kızıl tilkiler, doğada yiyecek kıtlığı veya insanlar tarafından avlanma gibi tehlikelerle karşı karşıyadır. Ancak, çoğu tilki zekâsı sayesinde hayatta kalarak ürer ve yeni nesiller oluşturur. RFA algoritmasında bu davranış, üreme ve göç modelleriyle simüle edilir. Her iterasyonda, amaç fonksiyonuna göre sürüdeki en kötü performansa sahip %5'lik birey seçilir; bu bireylerin göç ettiği veya avlandığı varsayılır. Popülasyonun sabit kalması için, bu tilkilerin alfa çiftin (en iyi iki birey: $(\bar{x}^{(1)})^t$ ve $(\bar{x}^{(2)})^t$) belirlediği yaşam alanı modeliyle yeni bireylerle değiştirilir. Alfa çiftin yaşam alanının merkezi, yeni bireylerin yerleşimi için hesaplanır. Bu süreç, tilki sürülerindeki doğal değişimleri ve hayatta kalma stratejilerini yansıtır (Połap ve Woźniak, 2021).

$$habitat^{(merkez)^t} = \frac{(\bar{x}^{(1)})^t + (\bar{x}^{(2)})^t}{2} \quad (3.65)$$

Daha sonra habitatın çapı Öklid uzaklığının karekökü hesaplanarak belirlenir.

$$habitat^{(cap)^t} = \sqrt{\|(\bar{x}^{(1)})^t + (\bar{x}^{(2)})^t\|} \quad (3.66)$$

Her iterasyon $\langle 0,1 \rangle$ arasında rastgele atanan k parametresine göre sürüye yeni katılacak tilkilerin nasıl katılım sağlayacağı belirlenir. Bu seçim aşağıdaki eşitlikte belirtildiği gibi yapılmaktadır.

$$\begin{cases} \text{Yeni göçebe kızıl tilkiler} & \text{eğer } k \geq 0.45 \\ \text{Alfa çiftinden üreyen kızıl tilkiler} & \text{eğer } k < 0.45 \end{cases} \quad (3.67)$$

Birinci durumda sürüye katılacak yeni kızıl tilkiler habitatın dışı ile arama uzayının sınırları arasında rastgele seçilir. İkinci durumda ise sürüye yeni katılacak olan kızıl tilkilerin alfa çiftinden üreyen kızıl tilkilerden geldiği varsayılmaktadır. Bu koşul ile sürüye yeni eklenen tilkilerin konumu eşitlik (3.68) ile ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{x}^{(\text{alfa çiftinden üreyen})^t} = k \frac{(\bar{x}^{(1)})^t + (\bar{x}^{(2)})^t}{2} \quad (3.68)$$

3.4.6 Balina Optimizasyon Algoritması

Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm WOA) kambur balinaların avlanma stratejilerini esas alan Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından önerilen metasezgisel bir algoritmadır.

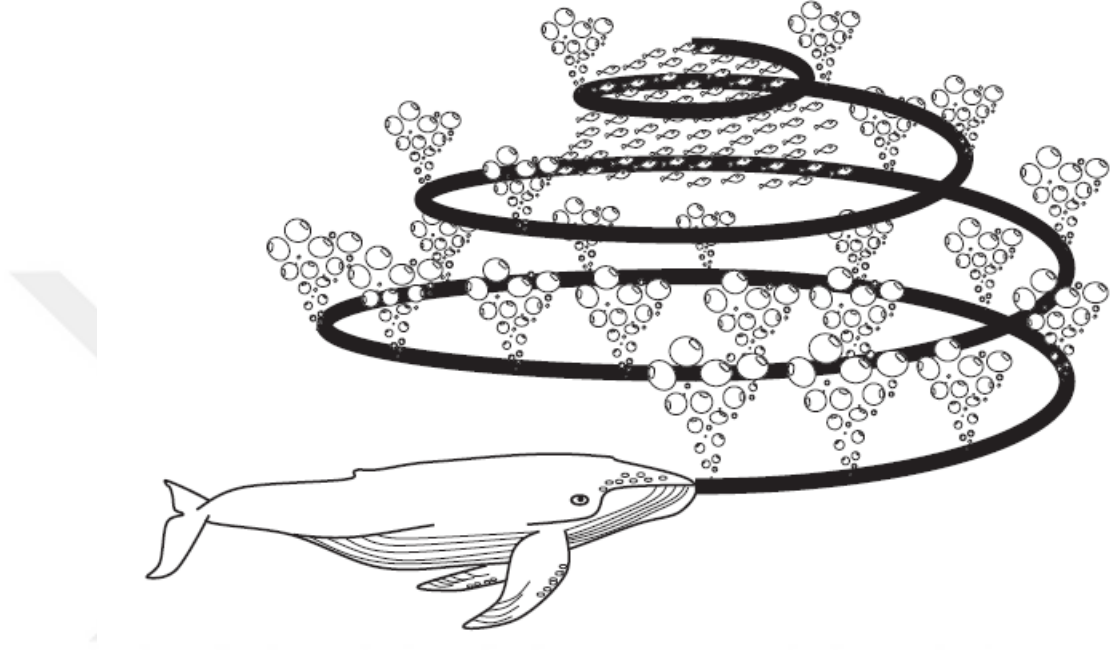
Balina Optimizasyon Algoritması yedi balina türü arasından bir otobüs büyüklüğünde olan kambur balinaların küçük balık sürülerini avlama stratejisi üzerine kurgulanmıştır. Kambur balinaların bu stratejisi çok ilginçtir, sadece kambur balinalara özgüdür ve “Kabarcık-ağ” adı ile isimlendirilir.

Kambur balinaların suyun altında soluk vererek hava kabarcığı bulutları ve sütunları oluştururlar. Bu hava kabarcıkları kümesi birbirleriyle bağlantılıdır ve avları bir araya toplar. Daha sonra, kambur balina oluşturduğu bu su kabarcıklarının arasından yüzeye doğru yükselir. Aynı zamanda yükselirken soluk alıp vererek kabarcık oluşturmaya da devam eder ve ava yaklaştıkça kabarcık çemberini küçülterek hedef küçültür. Kambur balinanın bu davranışı avın bulunması, avın hareketsiz hale getirilmesi ve şaşırtılması yoluyla yakalanmasına yardımcı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu davranış, avcıyı avdan gizleyebilir (Erol ve Eksin, 2006).

Kambur balinanın avlanma stratejisi avın etrafını sarması, ava doğru hareket etmesi ve av araması olarak üç aşamada modellenmiştir (Mirjalili ve Lewis, 2016). Şekil 3.12 Kambur balinaların “Kabarcık-ağ” yöntemi ile avlanmasını göstermektedir.

Kambur balinalar avlarının konumunu tahmin ederek etrafını hava kabarcıkları ile sarmalayabilirler. WOA algoritmasında av, ulaşılabilecek olan optimum nokta olarak kabul edilir. Optimizasyon problemlerinde doğru çözüm bilinmediğinden, doğru nokta ulaşılan

en iyi çözüm ya da onun etrafında bir nokta olarak kabul edilir. Amaç fonksiyonuna göre en iyi arama ajanı tespit edildikten sonra diğer arama ajanlarının konumları en iyi arama ajanına göre güncellenir. Kambur balının avının etrafını sarma davranışının matematiksel modeli eşitlik (3.69) ve eşitlik (3.70)'de gösterilmiştir (Mirjalili ve Lewis, 2016).



Şekil 3.12. Kambur balinaların “Kabarcık-ağ” yöntemi ile avlanması

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (3.69)$$

$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (3.70)$$

Burada $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ yakınsama vektörlerini, $\vec{X}^*$ elde edilmiş en iyi çözüm vektörünü ifade etmektedir. $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ yakınsama vektörleri şu şekilde hesaplanmaktadır (Mirjalili ve Lewis, 2016).

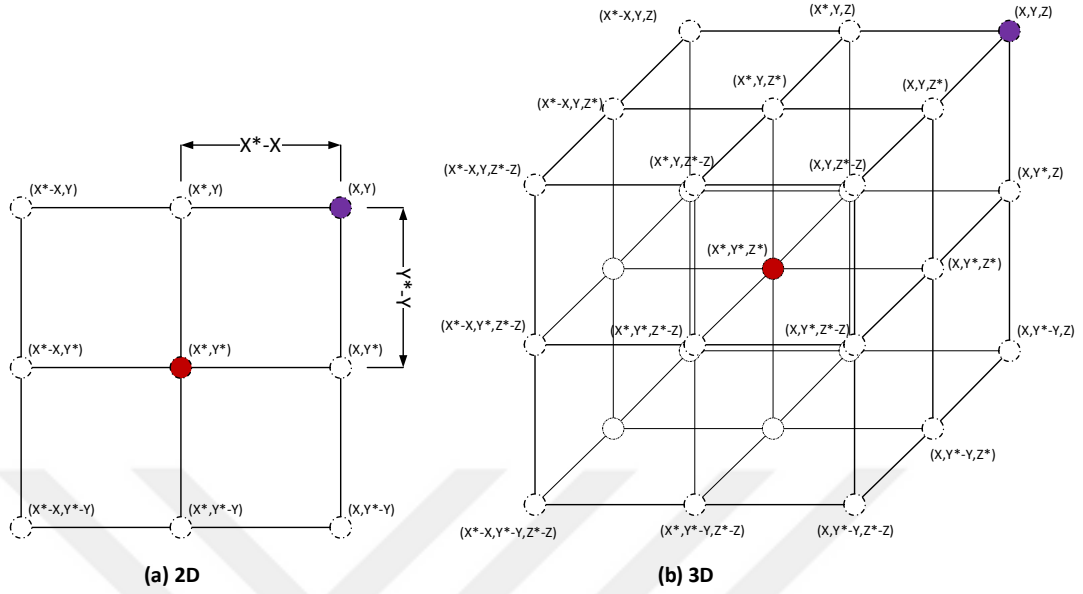
$$\vec{A} = 2\vec{\alpha} \cdot \vec{r} - \vec{\alpha} \quad (3.71)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (3.72)$$

Burada $\vec{r}$ rastgele vektörü ve $\vec{\alpha}$ iterasyonlar boyunca ikiden sıfıra doğru lineer olarak azalan vektörü göstermektedir.

Şekil 3.13 (a)'da 2 boyutlu problemler için arama uzayı verilmiştir. Bir arama ajanı (X,Y) pozisyonunu en iyi arama ajanına (X*,Y*) göre belirleyebilir. En iyi ajanın

etrafındaki noktalara ise $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ sabitleri ayarlanarak ulaşılabilir. Şekil 3.13 (b)'de ise 3 boyutlu arama uzayı gösterilmiştir (Mirjalili ve Lewis, 2016).



Şekil 3.13. Arama ajanlarının 2 ve 3 boyutlu pozisyon vektörleri ve bir sonraki iterasyonda olası konumları (Mirjalili ve Lewis, 2016)

Kambur balinaların ava doğru hareket etmesi kabarcık-ağ davranışı olarak adlandırılmakta ve iki aşamadan oluşmaktadır. Bu davranış avın etrafında oluşturduğu kabarcık çemberini daraltma ve spiral hareket olmak üzere modellenmiştir. Avın etrafındaki kabarcık çemberini daraltma, eşitlik (3.71)'deki $\vec{\alpha}$ 'nın değerinin azaltılması ile sağlanabilmektedir. Şekil 3.14'te arama ajanının spiral hareketi ve en iyi ajanın konumu gösterilmiştir. Gösterilen spiral hareket için hedef konum (en iyi ajan) ve arama ajanı arasındaki mesafe eşitlik (3.73) ile hesaplanmaktadır (Mirjalili ve Lewis, 2016).

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (3.73)$$

Burada $\vec{D}'$ en iyi nokta ile arama ajanı arasındaki mesafedir.

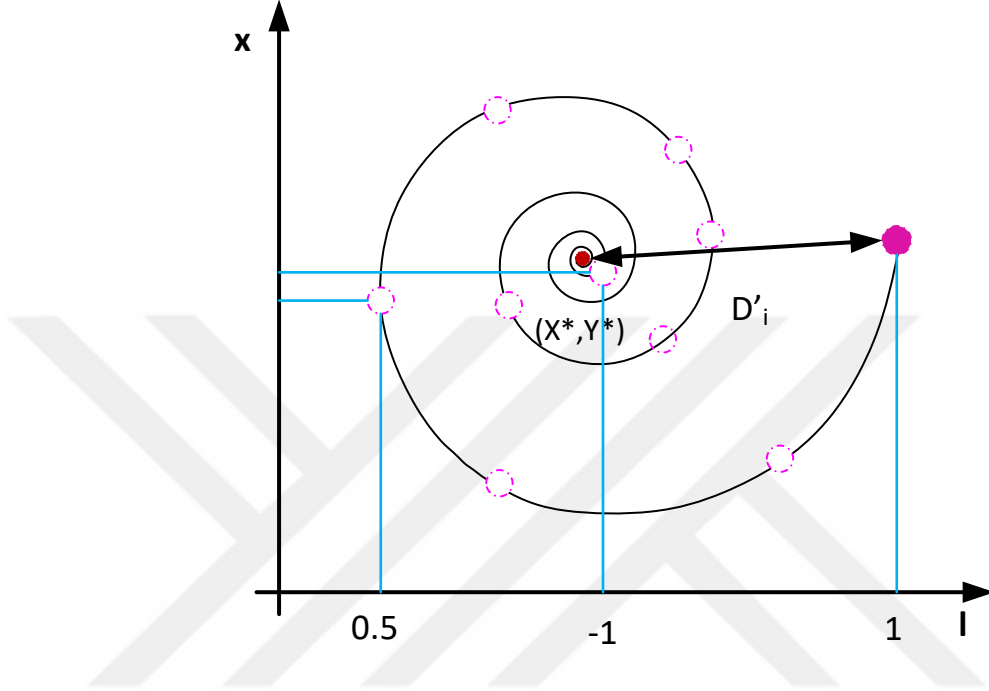
b logaritmik spiral sabiti,

l $[-1,1]$ aralığında rastgele sayıdır.

Kambur balinalar avlarına doğru hareket ederken eş zamanlı olarak hem yükselirler hem de spiral harekete devam ederler. Algoritmada her iterasyonda hangi hareketin yapılacağı aşağıda verilen eşitlikte ifade edilmektedir (Mirjalili ve Lewis, 2016).

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & , p < 0.5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & , p \geq 0.5 \end{cases} \quad (3.74)$$

Burada p değeri [0,1] aralığında rastgele sayıdır. Dolayısıyla spiral hareket mi doğrusal hareket mi yapılacağı yüzde elli olasılıkla rastgele belirlenmektedir.

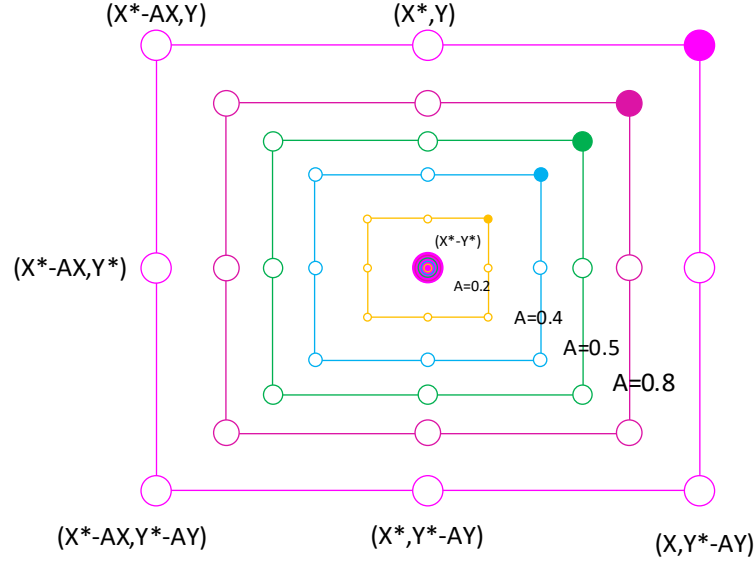


Şekil 3.14. Spiral Hareket (Mirjalili ve Lewis, 2016)

Kambur balinalar Kabarcık-ağ metodu dışında global arama için arama ajanlarının yeni konumları, bilinen en iyi nokta yerine, rastgele seçilen bir arama ajanı etrafında belirlenir. Global veya yerel aramalardan hangisinin yapılacağına ise $\vec{A}$ vektörünün değerine göre karar verilir. En iyi noktadan uzaklaşabilmek için $\vec{A}$ vektörünün [-1,1] aralığının dışında rastgele aldığı değerlerinden faydalanılır. Av Arama sürecinde Kabarcık-Ağ metodundan farklı olarak arama ajanının konumu güncellenirken şimdiye kadar bulunmuş en iyi arama ajanı yerine rastgele seçilen bir arama ajanı kullanılır. Şekil 3.15'te Balina Optimizasyon Algoritmasında $\vec{A}$ değerinin [-1,1] aralığının dışında olması ve rastgele bir arama ajanının seçilmesi durumunda global arama yapılmaktadır (Mirjalili ve Lewis, 2016). Bu durumu eşitlik (3.75) ve eşitlik (3.76)'da gösterilmiştir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{and} - \vec{X}| \quad (3.75)$$

$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (3.76)$$



Şekil 3.15. WOA'nın global arama davranışı (Mirjalili ve Lewis, 2016)

3.4.7 Diferansiyel Arama Algoritması

Diferansiyel Arama Algoritması (Differential Search Algorithm, DSA), (Civicioglu, 2012) tarafından süperorganizma davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş bir yöntemdir. DSA, özellikle jeodetik koordinat dönüşümü gibi sayısal optimizasyon gerektiren alanlarda rekabetçi performans sergilemektedir (Civicioglu, 2012; Civicioglu ve Besdok, 2013).

DSA'nın temelinde, doğada gözlemlenen süperorganizma göçü yer almaktadır. Süperorganizma; bakteri kolonileri, kuş sürüleri veya balık toplulukları gibi, birlikte hareket eden ve çevreye uyum sağlayabilen basit bireylerden oluşan organizasyonlardır. Bu topluluklar, daha verimli bir yaşam alanı bulmak amacıyla göç ederler ve bu süreçte keşif, değerlendirme ve adaptasyon gibi mekanizmalar geliştirirler. DSA, aday çözümlerin ("organizmaların") bu göç sürecini taklit ederek çok boyutlu çözüm uzayında optimum ya da optimuma yakın çözümler aramasını sağlar (Civicioglu, 2012).

DSA, çözüm uzayında bir popülasyon (organizma topluluğu) oluşturarak, bu popülasyonun rastgelelik ve diferansiyel hareketler aracılığıyla iteratif olarak "göç etmesini" sağlar. Temel adımlar; popülasyonun başlatılması, donör vektörlerin oluşturulması (mutasyon), çaprazlama (crossover), değerlendirme ve seçilimdir (Civicioglu, 2012).

Algoritmanın temelinde, göç eden süperorganizmalardaki Brownian hareketine benzer rastgele yürüyüşler ve yönlü arama davranışları yatmaktadır. Her aday çözüm,

diğer çözümlerle olan ilişkilerini dikkate alarak pozisyonunu günceller ve bir kolonideki bireylerin ortak hareketi gibi, toplu bir şekilde arama yapar (Civicioglu, 2012).

DS algoritmasında yapay bir organizmayı ($Superorganism_g, g = 1, 2, 3, \dots, N$) oluşturan yapay organizmalar $x_{i,j}, j = (1, 2, 3, \dots, D)$ problemin boyutu kadar üye bulundurmaktadır. Burada N süperorganizmadaki eleman sayısı, D ise ilgili problemin boyutunu belirtmektedir. Başlangıç pozisyonundaki bir yapay organizma üyesi aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir.

$$x_{i,j} = rand(up_j - low_j) + low_j \quad (3.77)$$

Yapay organizmalar $X_i = [x_{i,j}]$ şeklinde tanımlanır ve yapay organizmaların oluşturduğu süperorganizma da $Superorganism_g = [X_i]$ şeklinde gösterilir. DS algoritmasında, yapay organizmalar arasında kalan alanlarda bir konaklama bölgesi bulma mekanizması, Brownian benzeri bir rastgele yürüyüş modeli ile tanımlanabilir (Trianni ve ark., 2011). Yapay organizmaların rastgele seçilen bireyleri, başarılı bir göç için çok önemli olan konaklama bölgesini (stopover site) keşfetmek amacıyla hedef donöre $donor = [X_{random_shuffling(i)}]$ doğru hareket eder. Burada $random_shuffling$ fonksiyonu elemanların sayısını rastgele değiştirir. Yapay organizmalarının üyelerinin pozisyonlarında meydana gelen değişimin büyüklüğü ölçek değeri (scale value) tarafından kontrol edilmektedir (Civicioglu, 2012).

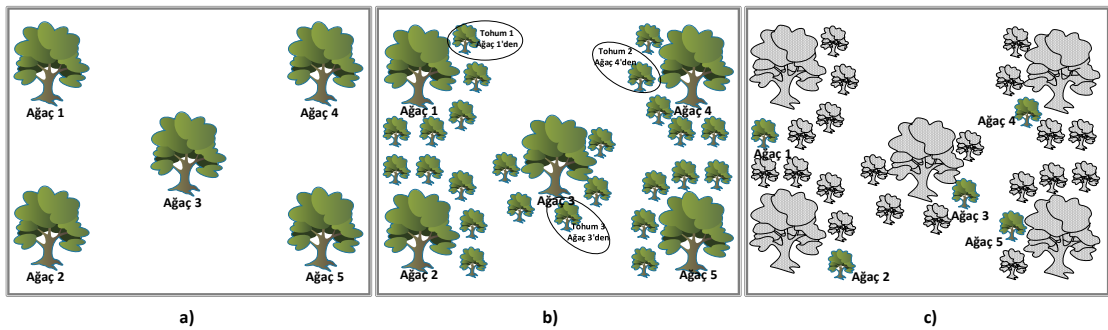
DS algoritmasında ölçek değeri (scale value) $[0,1]$ aralığında rastgele olarak belirlenmektedir. Ölçek değerinin hesaplanmasında kullanılan bu yapı süper organizmanın yönünü değiştirebilmesini sağlamaktadır. DS algoritmasında konaklama bölgesi (stopover site) aşağıda verilen eşitlik kullanılarak belirlenmektedir (Civicioglu, 2012).

$$StopoverSite = Superorganism + Scale.(donor - Superorganism) \quad (3.78)$$

DS'de, konaklama bölgesi arama sürecine katılacak olan süper organizmadaki yapay-organizmaların üyeleri (bireyler), rastgele bir süreçle belirlenir. DS algoritmasında, eğer bir konaklama bölgesi, o bölgeyi keşfeden bireylere sahip yapay-organizmanın sahip olduğu kaynaklardan daha verimliyse, ilgili yapay-organizma bu konaklama bölgesine hareket eder. Yapay-organizmalar konum değiştirirken, onları içeren süper organizma göçüne küresel minimuma doğru devam eder (Civicioglu, 2012).

3.4.8 Ağaç-Tohum Algoritması

Ağaç Tohum Algoritması (Tree-seed algorithm, TSA), sürü zekâsı kategorisinde doğadan esinlenen, popülasyon tabanlı, stokastik, metasezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. TSA, Kiran (2015) tarafından sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için ağaçlar ve tohumlar arasındaki üretme davranışlarından esinlenilerek önerilmiştir. Belirli bir habitat içerisinde yaşam döngülerini devam ettiren ağaçlar, yıllar boyu büyüme ve yaşlanma sonrasında nesillerinin devamını sağlamak amacıyla yeni bireylerin oluşması için tohum üretirler. Tohumlar üreme ve yayılma mekanizması olarak kullanılır. Tohumlar yapılarına uygun olarak taşınır. Bazı tohumlar kuşların tüylerine, hayvanların kürklerine ve kıyafetlerine tutunarak ağaçtan farklı yerlere taşınır. Böylece uygun ortamda tohumlar büyür ve ağaca dönüşürler. Tohumdan oluşan yeni çocuk ağaçların büyüme ve gelişme evreleri sonucunda gün ışığı, alınan su miktarı gibi çevresel etmenler ve genetik özelliklerinin de etkisiyle büyürler ve bu büyüme sonrasında kendilerini oluşturan ana ağaçtan daha kuvvetli veya daha zayıf bir ağaç haline gelebilirler. Zayıf olan ağaçlar, ana ağaca göre daha zayıf ve kısa olmalarından dolayı yeterince ve verimli bir güneşlenme gerçekleştirememesi sonucu gölgede kaldığı için hayatta kalamazken, güçlü ağaçlar ise kendilerini meydana getiren ağaçtan ve diğer zayıf çocuk ağaçlardan daha yükseğe ulaşabildiğinden daha verimli güneşlenebilmektedirler. Aynı durum güçlü genetik özelliklere sahip ağaçların gelişiminde etkili olan kökleri ile daha derine ve daha çok suya ulaşım, hastalıklara karşı da daha dayanıklı olabilme gibi durumlar için de geçerlidir. Güçlü yapıdaki ağaçlar popülasyon içerisinde varlıklarını devam ettirirken, zayıf ağaçlar ise yok olmaktadır. Ağaç ve tohum arasındaki bu döngü sayesinde doğada bulunan ağaçlar arasından zayıf olan ağaçların doğal seçim ile yok olması sonucu zamanla daha güçlü ağaçlardan oluşan bir popülasyonu haline gelir. Doğada ağaçların yaşam döngüsünden geliştirilen Ağaç-Tohum Algoritmasının tohum üretme ve hayatta kalma adımları sırası ile Şekil 3.16'da gösterilmiştir (Çınar, 2016).



Şekil 3.16. TSA çalışma diyagramı (Çınar, 2016)

Şekil 3.16 b’de popülasyonda bulunan her bir ağaçtan 5 adet tohum üretildiği görülmektedir. Ağaç Tohum Algoritmasının çalışma sürecinde her bir ağaç birden fazla ve birbirinden farklı sayılarda tohumlar üretebilir. Şekil 3.16 c’de her bir ağacın en iyi tohumu yaşamına devam ederken tohumu oluşturan ana ağaçların elenip yok olduğu görülmektedir. Ancak meydana gelen tohumların değerlendirilmesi sonucu en iyi tohum olduğu tespit edilen ağaç kendisini meydana getiren ana ağaçtan daha iyi sonuçlara ulaşıyorsa hayatta kalırken, ana ağaçtan daha başarısız olduğu durumlarda ise diğer tohumlarla birlikte yok edilir.

Yeryüzü optimizasyon probleminin arama uzayı olarak kabul edilir. Bu arada, ağaçlar ve tohumlar her ikisi de optimizasyon probleminin çözümü olarak kabul edilir. Algoritmanın arama ve sömürü süreci, metasezgisel yöntemlerin nitelikli çözümler elde etmesi için çok önemlidir. Arama aşamasında, ağaçlar arama uzayına rastgele dağıtılır ve sömürü aşamasında ağaçlarla aynı özelliklere sahip tohumlar kullanılır. TSA’nın uygulamaya başlanması sırasında sayıları önceden belirlenmiş ilk ağaçlar, problemin çözüm uzayının sınırları içerisinde aşağıda verilen eşitlik yardımıyla oluşturulur.

$$T_{i,j} = L_{j,min} + r_{i,j}(H_{j,max} - L_{j,min}) \quad (3.79)$$

Bu eşitlikte $L_{j,min}$ ve $H_{j,max}$ problemin çözüm uzayının o boyuttaki alt ve üst sınırlarını, $r_{i,j}$ ise problemin her bir boyutu için $[0,1]$ aralığında üretilen rastgele bir sayıyı göstermektedir. Bu eşitlik üretilen ağaçların problemin olası çözümlerini içeren sınırlar içerisinde olması sağlayarak problemin karmaşıklığının artırmasının önüne geçilir.

İlk ağaçlar tanımlandıktan sonra her bir ağaç, önceden tanımlanan sınırlar arasında farklı sayılarda tohumlar üretir. Ağaçlar tarafından üretilcek tohum sayısının alt ve üst sınırları algoritmada kullanılan ağaç popülasyonunun boyutuna bağlı olarak belirlenir. (Kiran, 2015), Ağaç Tohum Algoritmasının kontrol parametrelerinin etkileri analiz edildiğinde bir ağaç tarafından üretilcek tohum sayısının üst sınırı ağaç popülasyonun büyüklüğünün %25’i, alt sınırı ise ağaç popülasyonun büyüklüğünün %10’u olarak hesaplandığını ifade etmiştir. Tohumlar, tohum oluşturma sırasında en iyi ağacı veya rastgele seçilen ağacı seçmek için kullanılan ST’ye göre ve aşağıdaki gibi verilen iki tohum üretim eşitliği kullanılarak türetilir:

$$S_{k,j} = T_{i,j} + \alpha_{i,j} \times (B_j - T_{r,j}) \quad (3.80)$$

$$S_{k,j} = T_{i,j} + \alpha_{i,j} \times (T_{i,j} - T_{r,j}) \quad (3.81)$$

Burada, $S_{k,j}$ i-inci ağaçtan türetilen k-ıncı tohumun j-ıncı boyutu, $T_{i,j}$ i-ıncı ağacın j-ıncı boyutu, B_j řu ana kadar elde edilen en iyi ağaç konumunun j-ıncı boyutu, $T_{r,j}$ popölasyonda rastgele seçilen r-ıncı ağacın j-boyutu boyutu, $\alpha_{i,j}$ $[-1,1]$ aralığında rastgele üretilen ölçek faktörüdür. Arama sürecinde her ağacın tohumları arasında açgözlü bir seçim yapılır ve en iyi tohum belirlenir. En iyi tohumun çözüm kalitesi kendi ağacından daha iyiyse eski ağaç kurur ve en iyi tohum o ağacın yerine geçer. Sonlandırma koşulları sağlanana kadar TSA algoritması devam eder (Sahman ve ark., 2019).



4. SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ İLE EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN VE VERİMİN TAHMİNİ

Dünyada çalışmakta olan motorların %99,7'sini 500 HP'nin altındaki elektrik motorları oluşturmaktadır. Bu motorlar, büyük güçteki kurulumlar veya düşük yük koşulları nedeniyle nominal yüklerinin yaklaşık %60'ında çalışır ve bu nedenle, enerji kaybına ve ek maliyete neden olan düşük verimde çalışırlar. Motor kayıpları, düşük yük faktörü nedeniyle uzun bir süre boyunca önemli bir maliyet oluşturabilir (Lu ve ark., 2008). (Gigante, 1966). Enerji maliyetleri hem malzeme hem de üretici mal fiyatlarından bile daha hızlı bir oranda artmaktadır. Birçok sanayi kuruluşunun, tek amacı enerji maliyetlerini azaltmanın pratik yollarını bulmak olan enerji uzmanları işe almıştır. Bu uzmanlar, elektrik motorlarının maliyet azaltımı için büyük bir potansiyel oluşturabileceğini fark etmişlerdir (Hirzel, 1994; Montgomery, 2008). Endüstriyel sektörde boşa harcanan enerjiyi önemli ölçüde azaltmak ve kullanılan gücün maliyetini kontrol etmek için bir yaklaşım, standart verimli (standard efficient SE) motorları enerji verimli (energy efficient EE) motorlarla değiştirmektir (Pillay, 1997). Günümüzde Enerji Yasaları yeni üretilen ve yaygın olarak kullanılan elektrik motorlarının çoğunun enerji verimli tasarımlar olmasını zorunlu kılmaktadır.

Enerji tasarrufu ve yatırım maliyetini karşılama sürelerinin hesaplanması sonucunda düşük verimli bir motorun değiştirilmesi kararının sadece motor etiketinde belirtilen verimliliğe veya üreticinin verilerine dayanılarak alınması büyük hatalara yol açabilir (Pillay ve ark., 1998). Bir motorun gerçek verim değeri yaşlanma veya yeniden sarma nedeniyle önemli ölçüde azalabileceğinden veya IEEE Std 112TM Metod B'ye göre verilmeyebileceğinden, genellikle etiketinde belirtilen değerden farklıdır (Charette ve ark., 2000; Lu ve ark., 2006a). Bu konuda doğru bir karar vermek ve en uygun güçlendirme senaryosunu seçmek için mühendisler, test edilen motorların verim değerlerini mümkün olan en az hata ile tahmin edebilmelidir. Sanayiden gelen bu talep, asenkron motorların verim tahmini için tekniklerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi üzerine pratik çalışmaları ve araştırmaları teşvik etmektedir (Lu ve ark., 2006a), (Kueck, 1998) (Hsu ve ark., 1996) (Pillay ve ark., 1998).

Bir asenkron motorunun verimini tahmin etmek için tork ve hız ölçümleri gereklidir. Ancak, devam eden kritik bir endüstriyel süreç nedeniyle üretim sürecinin kesintiye uğramasına izin verilmeyen müdahalesiz (yerinde) verim tahmini gerektiğinde, tork ölçümüne gerek yoktur (Al-Badri ve ark., 2019).

Genel olarak, asenkron motorların bir veya daha fazla çalışma koşulundaki giriş gerilimi ve giriş gücü, verim tahmin yöntemlerinin çoğu için ve özellikle optimizasyon tabanlı verim tahmin yöntemi için giriş verileri olarak kullanılır (Lima ve ark., 1997; Chirindo ve ark., 2015). Aynı yük değerinde, motor sıcaklığındaki değişim bu giriş verilerini değiştirebilir (Al-Badri ve ark., 2019). Bu nedenle, çalışma verilerini kaydetmeden önce bir ASM'un kararlı çalışma sıcaklığına ulaşması gereklidir. Sıcaklığın artması, motor verimini tahmin etmek için gerekli bir diğer veri noktası olan rotor hızını azaltır.

Asenkron motorun altı parametresinin belirlenmesi de verimi tahmin etmek için iyi bilinen bir prosedürdür. Asenkron motoru modellemek için kullanılan bir faz eşdeğer devresinin altı parametresi yüksüz/kilitli rotor testi kullanılarak veya IEEE Std 112 empedans testi metodu kullanılarak çıkarılabilir. Bununla birlikte, her iki prosedür de yukarıda belirtilen yerinde (in-situ) durumda uygulanabilir değildir (Al-Badri ve ark., 2019). Bu tür yerinde uygulamalarda, optimizasyon algoritmaları, asenkron motorun altı eşdeğer devre parametresini belirlemede etkili ve başarılı yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Literatürde yapılan birçok çalışmada, motorun mevcut çalışma verilerine dayanarak bu parametreleri tahmin etmek amacıyla optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu kapsamda GA, PSO, DS, TSA, GWO, WOA, RFA ve HHO gibi algoritmalar tercih edilmiştir.

Sonuç olarak asenkron motorların veriminin hassas bir şekilde tahmin edilmesi; enerji tasarrufu, performans izleme ve endüstriyel süreçlerin etkin yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, sekiz farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak ve önceden test edilmiş motor verilerine dayanılarak, IEEE Form F2 – Yöntem F1 esaslı hesaplamalar aracılığıyla asenkron motorların yerinde verim tahmini gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, doğru akım (DA) testi ile birlikte tam yük çalışma noktasına ait etkin (RMS) gerilim, akım, giriş gücü ve hız ölçümlerini gerektirmektedir. Söz konusu yöntem müdahalesiz yerinde verim tahmin aracı olmakla birlikte, aynı zamanda maliyetli dinamometre (tork sensörü) sistemlerinin yerine kullanılabilecek pratik bir alternatif sunmaktadır. Yöntemin geçerliliği, farklı güç seviyelerinde altı farklı asenkron motor üzerinde yapılan testlerle doğrulanmıştır.

4.2 Asenkron Motor Eşdeğer Devre Parametreleri için Aralık Belirleme

Asenkron motor eşdeğer devre parametreleri için küçük bir aralık tanımlamanın, optimizasyon algoritmalarının daha doğru sonuçlar bulmasına katkı sağladığı

görülmüştür. Aralığın daraltılması, tahmin edilen verim sonuçlarının doğruluğunu artırmayabilir, ancak optimizasyon algoritmalarının yakınsamasını iyileştirir ve olası sapmayı önler. Parametre aralığını daha da daraltabilen başka yaklaşımlarda mevcuttur, ancak çok geniş güç aralığındaki motorlar için bu durum hatalı sonuçlara sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada altı farklı güçte motor kullanılmıştır. Bu motorlara ilişkin özellikler aşağıda tablo olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Asenkron Motorların Teknik Özellikleri

Güç (kW)	1.1	2	22	30	90	132
V_{hat} (V)	380	380	500	400	400	500
I_{hat} (A)	2.7	5.3	34	50	157	192
F (Hz)	50	50	50	50	50	50
Bağlantı	Y	Y	Δ	Δ	Δ	Δ
Hız (d/d)	1415	1424	987	992	1489	1493
NEMA	A	A	B	A	A	A
Kutup Sayısı	4	4	6	6	4	4

Bu tez kapsamında kullanılan asenkron motorlara ait parametre aralıkları, önceki bölümlerde açıklanan yöntemler doğrultusunda belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği üzere, her motor tipi için parametre aralıkları birbirinden farklıdır. Motorun nominal gücü, kutup sayısı ve diğer karakteristiklerine göre özelleştirilmiş bu aralıklar, arama uzayını daraltarak optimizasyon algoritmalarının hem yakınsama hızını hem de tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Özellikle rotor direnci R_2 , gibi “1” birimden daha küçük değerlere sahip parametreler için bu yöntem son derece etkilidir. Nitekim 22 kW, 30 kW, 90 kW ve 132 kW güçlerindeki motorlar için belirlenen R_2 aralıklarında, alt ve üst sınır arasında bir tam sayı bile bulunmamakta; bu da parametre aralığının oldukça dar bir bantta hassasiyetle belirlendiğini göstermektedir. Bu parametrelerden R_2 ve X_1 değerlerinin aralıkları dardır ancak X_m ve R_{fe} parametrelerinin aralıkları oldukça geniştir.

Çizelge 4.2. Parametre aralıkları

Güç (kW)	1.1	2	22	30	90	132
$X_{1,min}(\Omega)$	2.02	0.98	0.78	0.7	0.24	0.17
$X_{1,max}(\Omega)$	12.12	5.89	4.69	4.19	1.47	1
$X_{m,min}(\Omega)$	89.35	46	29.2	20	7.84	5.12
$X_{m,max}(\Omega)$	1007	2138	1233	904	305	210
$R_{fe,min}(\Omega)$	698	1481.2	854	626	211	145
$R_{fe,max}(\Omega)$	2617	5554	3204	2350	792	546
$R_{2,min}(\Omega)$	2.93	1.52	0.33	0.13	0.06	0.02
$R_{2,max}(\Omega)$	7.15	3.7	0.88	0.34	0.17	0.05

4.3 Algoritma Tabanlı Eşdeğer Devre Parametreleri ve Verim Tahmini

Bu tez çalışmasında, asenkron motorların farklı yük koşullarındaki verimini tahmin etmek amacıyla, yüksüz ve kilitli rotor testlerine ihtiyaç duymayan optimizasyon tabanlı bir verim tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Çalışmada, eşdeğer devre parametrelerinin yerinde (in-situ) tahmini için GA, PSO, DS, TSA, GWO, WOA, RFA ve HHO gibi sezgisel tabanlı sekiz farklı algoritma kullanılmıştır. Nominal veya nominale yakın yük altında çalışan motorlardan alınan temel işletme verilerine dayanarak hem devre parametrelerini hem de verimi hesaplanabilmektedir. Böylece, pahalı test altyapılarına veya özel sürücü sistemlerine ihtiyaç duyulmadan, sahada çalışan motorların verimi doğru bir şekilde analiz edilebilmektedir. Kullanılan algoritmaların parametre ayarları aşağıda verilmiştir.

PSO	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200 c1=c2=2 wmax=0,9 wmin=0,4
HHO	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200 Kaçış Enerjisi (E)=1 Levy Uçuş Parametresi=1,5
RFA	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200 c1=0,18 c2=1

WOA	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200 Spiral Güncelleme Katsayısı (b)=1
GA	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200 Mutasyon oranı=0,1 Çaprazlama oranı=0,8
GWO	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200
DS	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200
TSA	Popülasyon sayısı=200 İterasyon sayısı=200

Eşdeğer devre modeline dayalı olarak bir asenkron motorun verimini tahmin edebilmek için, eşdeğer devre parametrelerinin yanı sıra motorun çalışma sıcaklığı da bilinmelidir. Önceki bölümlerde, ölçüm yapılmaksızın tam yük sıcaklığının belirlenebilmesi için NEMA tasarım sınıfına dayalı bir yöntem açıklanmıştı. Asenkron motorun eşdeğer devresinde toplam sekiz bilinmeyen parametre bulunmaktadır: R_1 , X_1 , X_m , R_{fe} , R_2 , X_2 , s P_{FW} ve P_{SLL} . Bu parametrelerden R_1 ve s parametreleri doğrudan ve müdahalesiz olarak ölçülebilmektedir. P_{FW} ve P_{SLL} ise uluslararası standartlarda tanımlanan deneysel raporlar aracılığıyla elde edilmektedir. X_2 , motorun NEMA tasarımından elde edilen $\alpha = X_1/X_2$ oranıyla hesaplanmaktadır. Geriye kalan dört parametre (X_1 , X_m , R_{fe} , R_2) optimizasyon algoritmaları kullanılarak, motorun anma sıcaklığındaki tam yük verileri kullanılarak tahmin edilir. Optimizasyon algoritmalarını doğru sonuca yakınsamaya zorlamak için bu dört parametrenin aralığı mümkün olduğunca daraltılmalıdır.

Algoritmanın çalıştırılabilmesi için öncelikle gerekli tüm giriş verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, motor önce çalıştırılır ve yeterince ısındıktan sonra tam yük altında stator gerilimi, stator akımı, giriş aktif gücü, motor sıcaklığı ve rotor hızı ölçülür; ardından bu ölçümlerle birlikte etiket verileri algoritmaya giriş olarak sağlanır.

Motor soğuk sıcaklığı ($T_{soğuk}$) ve stator direnci ($R_{1,soğuk}$) etiket verilerine ek olarak girdilerin bir parçası olarak kullanılır. Bu veriler aynı zamanda daha önce belirtildiği gibi parametre aralığını belirlemek için de kullanılır. Ayrıca, X_1/X_2 oranı

motor tasarım sınıfına göre belirlenerek bilinmeyen sayısının azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Association, 2003).

Rüzgâr kaybı P_{FW} ve kaçak kaybı P_{SLL} değerleri de motorun gücüne göre aşağıdaki bağıntıdan belirlenir.

$$P_{SLL} = \begin{cases} 1.8\%P_{\text{çıkış}} & P_{\text{çıkış}} < 40Hp \\ P_{\text{giriş,tamyük}} \left[0.025 - 0.005 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{çıkış}}}{1kW} \right) \right] & P_{\text{çıkış}} > 40Hp \end{cases} \quad (4.1)$$

Burada $P_{\text{çıkış}}$ etikette belirtilen tam yük çıkış gücü ve $P_{\text{giriş,tamyük}}$ tam yük giriş yükünü ifade etmektedir. Kısmi yüklerde doğruluğu artırmak ve P_{SLL} kaçak kayıplardaki değişimi dikkate alarak, farklı yüklerde P_{SLL} 'yi tahmin etmek için eşitlik (3.4), (3.5) ve (3.6) kullanılır. P_{FW} , kutup sayısına göre eşitlik (3.7), (3.8) ve (3.9) kullanılarak belirlenir.

Bu noktada, motorun tam yükteki hızını ve sıcaklığını termal kararlılıkla kalibre etmek önemlidir. Son adımda, tüm bu veriler IEEE Std-112'nin F1 yöntemi olan F2 formunu kullanarak kısmi ve tam yükte verimi tahmin etmek için uygulanır (Trandafilov, 2004). Doyum nedeniyle endüktansların değişimi, makinenin nominal akımdan daha fazla akım çektiği durumlarda meydana gelir. Bu nedenle endüktanslar farklı yüklerde önemli ölçüde değişmez ve IEEE Std-112 tüm endüktansları tüm yüklerde sabit kabul eder. Ayrıca, yüklemeden kaynaklanan ek nüve kaybı P_{SLL} 'nin bir parçası olarak kabul edilir, bu nedenle nüve kaybı direnci IEEE Std-112'ye göre tüm yüklerde sabit kabul edilir. Verim tahmini amacıyla, stator ve rotor dirençleri, yüklemeden kaynaklı motor sıcaklığı değişimi nedeniyle yüke göre değişken parametrelerdir.

IEEE Std-112 kısmi yükler için sıcaklığı tahmin etme yöntemini açıklamaktadır. Yükün sıcaklık üzerindeki etkisini dikkate almak ve kısmi yük verimliliğini tahmin etmek için burada basit ve anlaşılır bir yaklaşım kullanılmaktadır. Motorun ısınmasının kaynağı kayıplar olduğundan, sıcaklık ve kayıplar arasında aşağıdaki gibi doğrudan bir ilişki olduğu varsayılır:

$$\frac{T_{\text{tamyük}}}{T_{\text{boş}}} = \frac{P_{\text{kayıp,tamyük}}}{P_{\text{kayıp,boş}}} \quad (4.2)$$

Burada $T_{\text{boş}}$ ve $T_{\text{tamyük}}$ sırasıyla yüksüz ve tam yük sıcaklıkları, $P_{\text{kayıp,boş}}$ ve $P_{\text{kayıp,tamyük}}$ ise yüksüz ve tam yük koşullarındaki motor toplam kayıplarıdır. $T_{\text{tamyük}}$, daha önceki belirtilen NEMA tasarım sınıfından yararlanılarak belirlenir. Tam yük kayıp değeri $P_{\text{kayıp,tamyük}}$, tam yük sıcaklık değeri $T_{\text{tamyük}}$ ve ilgili rotor hızı kullanılarak

tahmin edilir. Boş çalışmadaki kayıp $P_{kayıp,boş}$ değerini hesaplamak için sıcaklığın $T_{soğuk}$ veya T_{ortam} 'a eşit olduğu ve rotor hızının $n_s - 1$ 'e eşit olduğu varsayılır. Yüksüz durumda kaçak kayıplar P_{SLL} ihmal edilir. Şimdi yüksüz durumda sıcaklık $T_{boş}$ eşitlik (4.3)'den yararlanılarak tahmin edilebilir. Herhangi bir yükteki sıcaklık değeri aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak tahmin edilebilir.

$$T(x) = \frac{(T_{tamyük} - T_{boş})}{100}x + T_{boş} \quad (4.3)$$

Burada x yükleme oranı ve T(x) karşılık gelen sıcaklıktır. Tabi bu yaklaşım tam doğruluğu garanti etmese de elde edilen sıcaklık tüm yüklerde tam yük sıcaklığını $T_{tamyük}$ dikkate almaktan daha iyidir.

P_{FW} ve P_{SLL} kayıplarını belirlemek için daha önce anlatılan yöntemler kullanılmıştır. Bu parametrelerin varsayılan değerlerinin yanı sıra etiket verileri, eşdeğer devre parametre aralığını belirlemek için kullanılır.

Optimizasyon algoritmalarının amacı, giriş gücü, stator akımı ve faz farkının ölçülen ve tahmin edilen değerleri arasındaki farkı en aza indirmektir. Bu amaçla, optimizasyon algoritmalarında üretilen ve X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 değerlerini içeren popülasyon üyelerinin her biri eşdeğer devrede kullanılır. Daha sonra, ölçülen gerilim her bir eşdeğer devreye uygulanır ve böylece giriş gücü ve akımı aşağıdaki eşitlikler kullanılarak tahmin edilir:

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (4.4)$$

$$Z_f = R_{fe} // jX_m \quad (4.5)$$

$$Z_m = Z_f // Z_2 \quad (4.6)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.7)$$

$$Z_t = Z_1 + Z_m \quad (4.8)$$

$$I_{1,tah} = \frac{V_{ölç}}{Z_t} \quad (4.9)$$

$$P_{giriş,tah} = \text{real}(3V_{ölç}I_{1,tah}^*) \quad (4.10)$$

Bu ifadede kullanılan *real* operatörü, kompleks biçimde hesaplanan büyüklüğün yalnızca reel kısmını alarak aktif güç bileşenini temsil eder. $I_{1,tah}^*$ giriş akımının eşleniğidir. Stator ve rotor dirençlerinin motor çalışma sıcaklığına göre güncellenmesi gerekmektedir. Ayrıca çıkış gücü, eşdeğer devre kullanılarak aşağıdaki gibi tahmin edilen amaç fonksiyonunda kullanılır:

$$V_2 = V_{ölç} - (R_1 + jX_1)I_{1,tah} \quad (4.11)$$

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \quad (4.12)$$

$$P_{gap} = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (4.13)$$

$$P_{çıkış} = (1 - s)P_{gap} - P_{SLL} - P_{FW} \quad (4.14)$$

Tek amaçlı optimizasyon probleminin uygunluk fonksiyonunu oluşturan amaç fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$f_1 = \frac{real(I_{1,ölçülen}) - real(I_{1,tahmin})}{real(I_{1,ölçülen})} \quad (4.15)$$

$$f_2 = \frac{imag(I_{1,ölçülen}) - imag(I_{1,tahmin})}{imag(I_{1,ölçülen})} \quad (4.16)$$

$$f_3 = \frac{P_{giriş,ölçülen} - P_{giriş,tahmin}}{P_{giriş,ölçülen}} \quad (4.17)$$

$$f_4 = \frac{\theta_{1,ölçülen} - \theta_{1,tahmin}}{\theta_{1,ölçülen}} \quad (4.18)$$

$$f_5 = \frac{P_{çıkış,etiket} - P_{çıkış,tahmin}}{P_{çıkış,etiket}} \quad (4.19)$$

Burada θ_1 giriş akımı (I_1) ile giriş gerilimi arasındaki faz farkı, $P_{çıkış,etiket}$ nominal güç ve $P_{çıkış,tahmin}$ tahmin edilen çıkış gücüdür.

Bu fonksiyonlar amaç fonksiyonunun alt fonksiyonlarıdır ve amaç fonksiyonu minimizasyon aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonu farklı yöntemsel yaklaşımlar kapsamında çeşitli biçimlerde kullanılmaktadır. Yöntem I'de, amaç fonksiyonundan $|f_5|$ (motor etiket çıkış gücü) verisi bilinçli olarak çıkarılmıştır. Bu tercihin temel nedeni motor etiket verilerinde alabilecek olası hataların tahmin sürecine

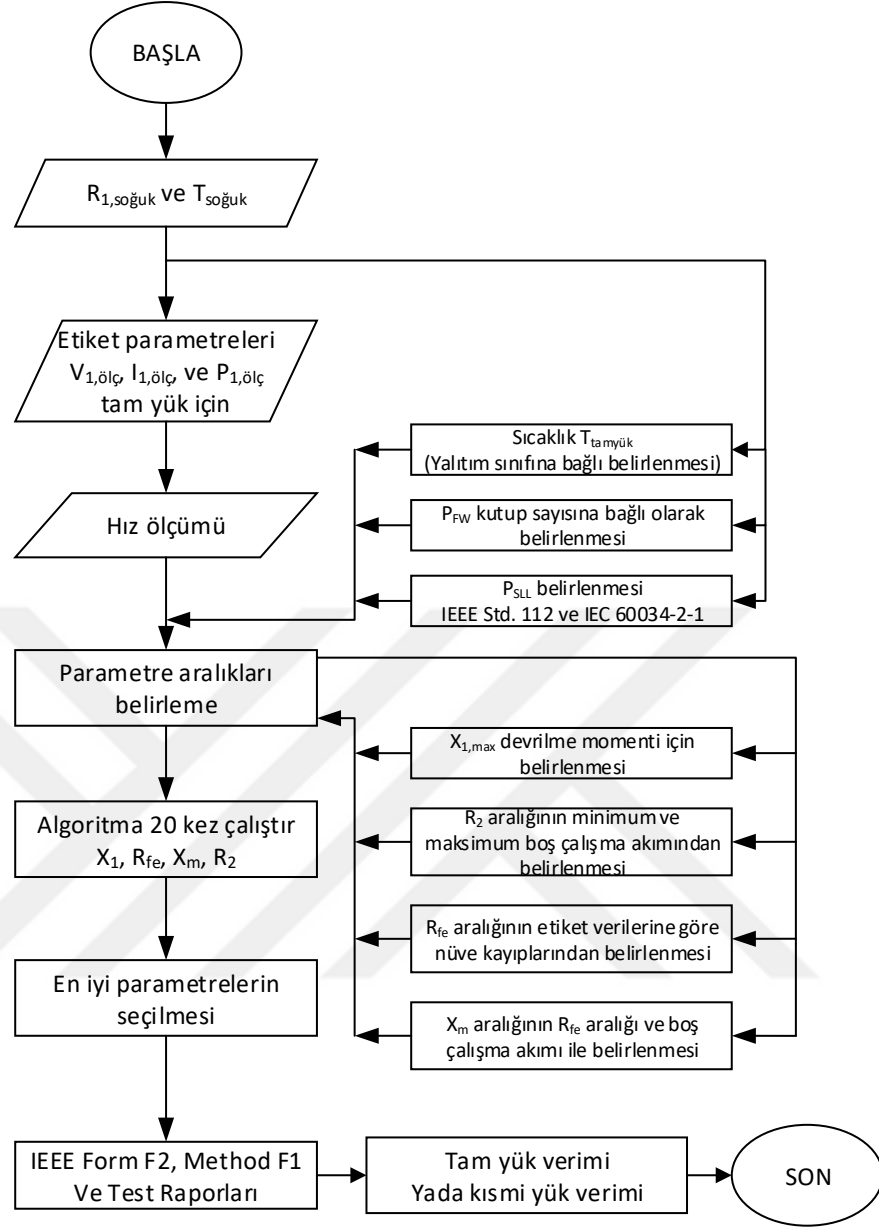
etkisini azaltmak ve daha güvenilir sonuçlar elde etmektir. Bu bağlamda Yöntem I'de, motorun gerçek performansını yansıtan verilerle, etiket verilerinden bağımsız bir şekilde parametre tahmini amaçlanmıştır.

Öte yandan Yöntem II'de amaç fonksiyonu aşağıda verilen haliyle eksiksiz biçimde kullanılmıştır. Bu yöntemde motor etiket çıkış gücü verisi olan $|f_5|$ bileşeni, tahmin sürecine doğrudan dahil edilmiştir. Dolayısıyla Yöntem II etiket verilerine tamamen güvenerek tahmin işlemini gerçekleştirmekte ve ilgili verilerdeki olası sapmaların sonuçlara etkisini dikkate almamaktadır.

Her iki yöntem de farklı veri güvenilirliği senaryoları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır ve algoritmaların başarımı bu yöntemler çerçevesinde analiz edilmiştir.

$$ff_{amaç} = |f_1| + |f_2| + |f_3| + |f_4| + |f_5| \quad (4.20)$$

Parametre ve verim tahmini için kullanılan akış şeması Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi süreç stator direnci ve soğuk durum sıcaklık ölçümüyle başlamakta ardından tam yük için etiket verileri olan faz gerilimi, faz akımı ve giriş gücü ile rotor hızı ölçülmektedir. Bu verilerle birlikte; yalıtım sınıfına göre tahmin edilen sıcaklık, kutup sayısına bağlı olarak belirlenen sürtünme rüzgâr kaybı ve standartlara dayalı olarak belirlenen kaçak yük kayıpları gibi parametreler hesaplanır. Motor tork karakteristiği, boşa çalışma akımı ve kayıplara göre eşdeğer devre parametrelerinin üst ve alt sınırları belirlenir. Bu sınırlar dahilinde optimizasyon algoritmaları 20 kez çalıştırılarak X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 . Eşdeğer devre parametreleri elde edilir. Bu sonuçlar arasından en iyi parametre kombinasyonu seçilir ve IEEE Form F2- Method F1'e göre tam yük veya kısmi yük verimi hesaplanarak süreç tamamlanır.

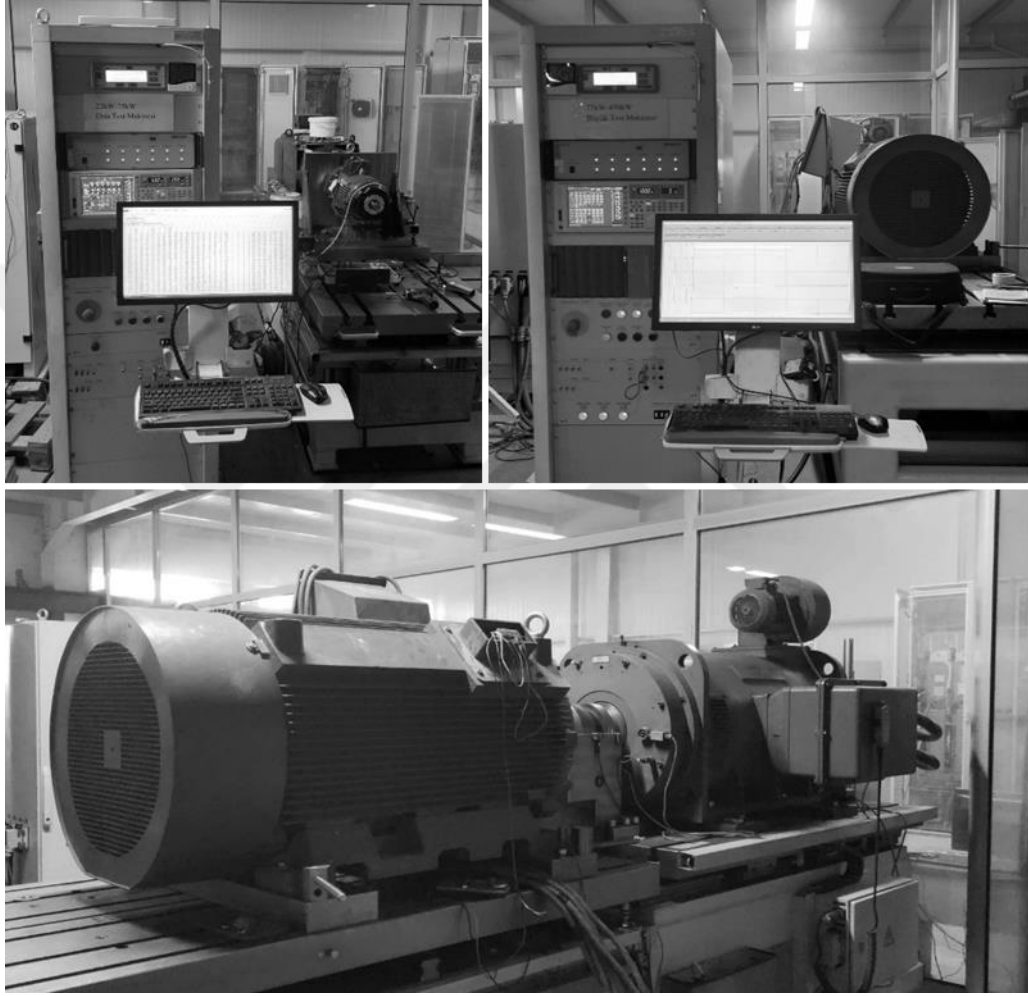


Şekil 4.1. Optimizasyon tabanlı verim tahmini akış şeması

4.4 Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada önerilen yöntem, sekiz farklı optimizasyon algoritması kullanılarak altı farklı güç seviyesine sahip asenkron motorlara uygulanmıştır. Çizelge 4.1’de kullanılan asenkron motorların teknik özellikleri belirtilmiştir. Tahmin sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, Aksaray Elektrik Motorları (AEMOT) fabrikasından söz konusu motorlara ait test verileri temin edilmiştir. Bu test sonuçları, motorların ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilen tüm ölçümlerini içermektedir. AEMOT fabrikasında, farklı güç seviyelerine sahip motorların testlerini tam otomatik olarak gerçekleştirebilen, standartlara uygun bir test altyapısı bulunmaktadır. Bu test sistemi Şekil 4.2’de görülmektedir. Çalışma kapsamında 22 kW, 30 kW, 90 kW ve 132

kW gücündeki dört motorun test verileri AEMOT'tan temin edilmiş; 1.1 kW gücündeki motor için ise gerekli test düzeneği tarafımızdan kurulmuş ve testler bizzat gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 2 kW gücündeki motorun test verileri, Arslan ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Tüm testler, IEEE Std 112 F1 yöntemi esas alınarak yürütülmüş; eşdeğer devre parametrelerinin ve verimin belirlenebilmesi amacıyla boşa çalışma ve kilitli rotor testleri de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. AEMOT ASM test düzeneği

IEEE Std-112 standardının A metodu ve F1 metoduna göre ölçülen ve hesaplanan verim değerleri Çizelge 4.3'de görülmektedir. IEEE Std-112'nin A metodu, verimin doğrudan çıkış ve giriş gücünün ölçülmesiyle belirlenmesini esas alırken; F1 metodu, boşa çalışma ve kilitli rotor testlerinin uygulanmasıyla motorun eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasını ve ardından IEEE Std-112'nin F2 formülü kullanılarak verimin belirlenmesini içermektedir.

Metot A ve Metot F1 ile elde edilen verim sonuçları arasında belirli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, büyük ölçüde eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasındaki belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Söz konusu hatalar çeşitli etkenlere bağlıdır. Örneğin, kaçak kayıpların belirlenmesinde deneysel verilere başvurulması ve motor sıcaklığının farklı yük koşullarında yalnızca yaklaşık olarak tahmin edilmesi bu etkenlerden bazılarıdır. Ayrıca, nüve kayıplarının belirlenme yöntemi de önemli bir hata kaynağıdır. Gerçekte motor yükü arttıkça nüve kayıpları da bir miktar artış gösterirken, eşdeğer devre modelinde bu kayıplar sabit bir direnç ile temsil edilmekte ve tüm yük koşulları için değişmez kabul edilmektedir. Bu varsayım, özellikle yüksek yüklerde verim tahmininde sapmalara yol açabilmektedir. R_1 ve X_1 üzerindeki gerilim düşüşü yük arttıkça artar. Bu nedenle, R_{fe} üzerindeki gerilim azalır ve nüve kaybı azalır. Bu nedenle, özellikle düşük yük koşullarında eşdeğer devre yöntemiyle tahmin edilen verim değerlerinin, Metot A ile doğrudan ölçülen değerlere kıyasla daha düşük çıkmasının başlıca nedenlerinden biri, nüve kayıplarının sabit kabul edilmesidir.

Bu noktadan sonraki değerlendirmelerde, A metodu ile doğrudan ölçülen verim değerleri referans olarak kabul edilmiş ve optimizasyon algoritmalarıyla tahmin edilen verim değerleri bu referanslarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.3. IEEE Std-112 A ve F1 yöntemlerine göre belirlenen verimler

kW	1.1		2		22		30		90		132	
Yük (%)	A	F1	A	F1	A	F1	A	F1	A	F1	A	F1
100	80,69	80,64	80,91	79,80	93,77	93,48	93,70	92,15	95,00	94,31	95,91	94,03
75	80,67	79,61	81,44	80,53	93,92	93,29	93,52	91,59	95,34	94,41	95,50	93,77
50	78,59	75,68	81,25	78,49	93,21	92,14	92,23	89,78	95,16	93,82	94,25	92,62
25	66,32	63,54	70,04	68,70	89,72	87,68	87,34	83,31	92,86	90,73	90,12	88,26

4.4.1 Verimlerin IEEE 112-A Yöntemi ile Karşılaştırılması

Sekiz farklı optimizasyon algoritması (PSO, HHO, RFA, WOA, GA, GWO, DS, TSA) kullanılarak geliştirilen Yöntem I ve Yöntem II, IEEE 112-A standardına göre hesaplanan verim değerleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yöntemlerin performansı; doğrudan ölçülen verim değerleri, tahmin edilen verimler ve bunlar arasındaki mutlak hata oranları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Testler, motor yükleme kademeleri %100, %75, %50 ve %25 olmak üzere dört farklı yükleme oranında gerçekleştirilmiştir.

GMK_1-1KW asenkron motorun IEEE 112-A standardına göre belirlenen verim değerlerinin tahmini sekiz farklı optimizasyon algoritması ve iki değişik yöntemin gösterdiği performanslar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. GMK_1-1KW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler

YÖNTEM I													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
GMK_1-1KW	80,7	80,7	78,6	66,3	PSO	80,1	79,5	76,2	65,5	0,6	1,2	2,4	0,8
					HHO	80,8	80,6	77,7	67,7	-0,1	0,1	0,9	-1,4
					RFA	80,2	79,7	76,5	65,9	0,5	1,0	2,1	0,5
					WOA	80,5	80,3	77,3	67,3	0,2	0,4	1,3	-0,9
					GA	80,9	80,4	77,3	66,9	-0,2	0,3	1,3	-0,6
					GWO	80,1	79,6	76,3	65,7	0,6	1,1	2,3	0,6
					DS	80,1	79,5	76,2	65,6	0,6	1,2	2,4	0,8
					TSA	80,5	79,9	76,6	66,0	0,2	0,8	2,0	0,3
YÖNTEM II													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
GMK_1-1KW	80,7	80,7	78,6	66,3	PSO	80,1	79,6	76,4	65,9	0,6	1,0	2,2	0,4
					HHO	79,6	79,1	75,7	64,8	1,1	1,6	2,9	1,5
					RFA	80,5	80,1	77,1	66,7	0,2	0,5	1,5	-0,4
					WOA	80,1	79,6	76,3	65,6	0,6	1,1	2,3	0,7
					GA	79,2	78,3	74,5	63,0	1,5	2,4	4,1	3,3
					GWO	80,1	79,5	76,2	65,5	0,6	1,1	2,4	0,8
					DS	80,1	79,5	76,2	65,5	0,6	1,2	2,4	0,8
					TSA	80,3	79,7	76,3	65,5	0,4	1,0	2,3	0,9

Yöntem I kapsamında tam yükte en düşük mutlak hata oranı HHO algoritmasına aittir. Bu algoritma, 80,7%’lik referans verim değeri karşısında 80,8%’lik bir tahminle yalnızca 0,1%’lik bir hata sergilemiştir. Buna göre HHO algoritmasının özellikle tam yük altındaki tahmin başarısını açıkça ortaya koymaktadır. Diğer algoritmalar ise sırasıyla WOA, TSA ve GA algoritmaları 0,2%’lik hata ile HHO’yu takip etmektedir. RFA algoritmasının hata oranı 0,5%, PSO, GWO ve DS algoritmalarının ise 0,6% seviyesindedir. Bu sonuçlara göre HHO algoritması tam yükte optimum tahmin performansı sergileyen yöntem olarak öne çıkmaktadır. Kısmi yüklerde (75%, 50%, 25%) yapılan değerlendirmelerde ise hata oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin GWO algoritması %75 yükte 1,1%, %50 yükte 2,3% ve %25 yükte 0,6% hata ile orta düzeyde performans sergilemiştir. Bu veriler

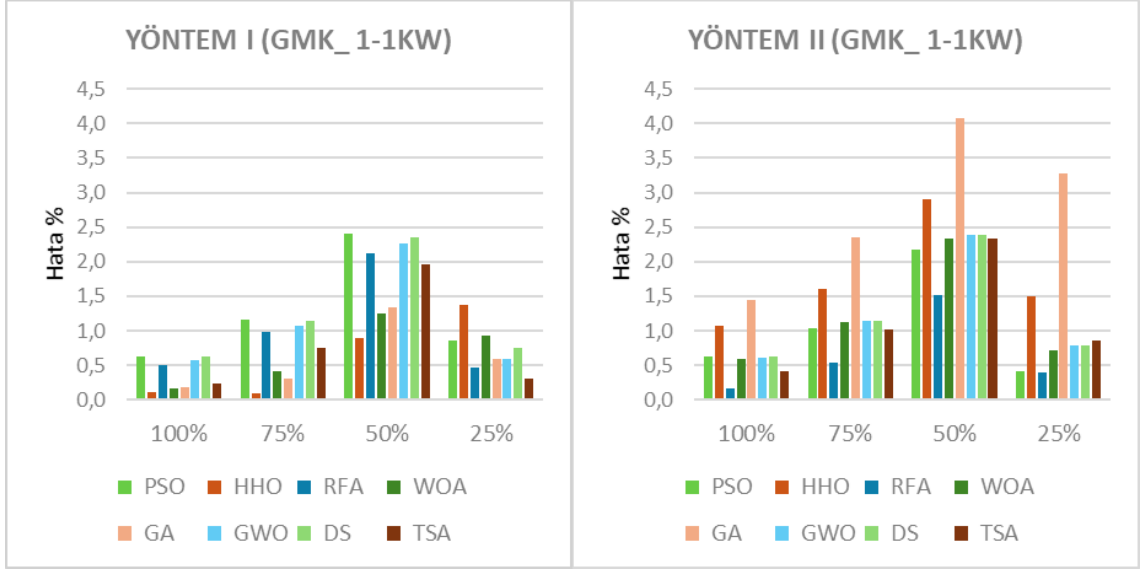
çoğu algoritmanın tam yükte daha yüksek doğruluk sunduğunu, daha düşük yüklerde ise performans farklılıklarının arttığını göstermektedir.

Yöntem II sonuçlarında ise en iyi tahmin performansının RFA algoritmasına ait olduğu görülmektedir. Tam yükteki hata oranı 0,2% ile en düşük seviyede kalırken, diğer yüklerdeki hata oranları da oldukça düşüktür (0,5%, 1,5%, 0,4%). Buna karşılık olarak HHO algoritması Yöntem II kapsamında tam yükte 1,1%'lik hata oranı ile Yöntem I'e kıyasla daha düşük bir başarı sergilemiştir.

Ayrıca GA algoritması her iki yöntemde de yüksek hata oranlarına sahiptir. Özellikle Yöntem II altında tam yükteki hata 1,5%, düşük yüklerde ise hata oranları 4,1%'e kadar ulaşmaktadır.

GMK_1-1KW için yapılan tahmin verilerine ilişkin genel bir değerlendirme yapıldığında, HHO algoritmasının Yöntem I'de RFA algoritması ise Yöntem II'de yüksek doğruluk sunduğu gözlemlenmiştir. Bu iki algoritma, tahmin sürecinde tam yük koşulları dikkate alındığında en yüksek uyumu göstererek, IEEE 112-A standardına en yakın verimlilik tahminlerini üretmiştir.

GMK_1-1kW gücündeki bir asenkron motorun, IEEE 112-A standardı esas alınarak sekiz farklı optimizasyon algoritması ile elde edilen verim tahminlerinin, Yöntem I ve Yöntem II kapsamında değerlendirilmesi Şekil 4.3'te görülmektedir. Yöntem I'e ait grafik incelendiğinde %100 ve %75 yük seviyelerinde tüm algoritmalar için hata oranlarının oldukça düşük olduğu ve bu nedenle tam yükte elde edilen parametrelerin yüksek ve orta yük koşullarında geçerliliğini büyük oranda koruduğu görülmektedir. Ancak %50 yük seviyelerinde belirgin bir hata artışı söz konusudur. Bu artış eşdeğer devre parametrelerinin düşük yük koşullarına genellenmesinde bazı algoritmaların sınırlı kaldığını göstermektedir. Yöntem I çerçevesinde %25 yükleme oranında en düşük hata oranı TSA'ya aittir. TSA'yı RFA, GA ve GWO takip etmekte; bu algoritmalar da %25 yüklerde görece düşük hata değerleri ile öne çıkmaktadır. Diğer yandan HHO, WOA ve DS algoritmaları bu yük seviyelerinde daha yüksek hata üretmiş ve özellikle HHO algoritması %25 yükleme oranında görece olarak en yüksek hata oranına ulaşmıştır.



Şekil 4.3. GMK_ 1-1KW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları (%)

Yöntem II'ye ait grafik ise ikinci tahmin yönteminin farklı algoritmalarla nasıl performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. %100 ve %75 yük seviyelerinde benzer şekilde düşük hata değerleri elde edilmiş olsa da %50 yüklerde yine belirgin bir hata artışı gözlenmektedir. Bu yöntemde de GA algoritması, tüm yükleme oranında en yüksek hata oranını vermiştir. Özellikle PSO ve RFA algoritmaları %25 yükleme oranında daha düşük hata oranları üretmiştir.

Genel olarak her iki yöntem de yüksek yük koşullarında yüksek doğruluk sunarken, düşük yük koşullarında algoritmalar arası farklar belirginleşmektedir. TSA algoritması, düşük hata oranlarıyla özellikle %25 yük seviyelerinde öne çıkarken; HHO, GWO ve PSO algoritmaları da düşük hata üretme potansiyelleriyle dikkate değer bulunmuştur. RFA ve WOA algoritmaları ise düşük yük koşullarında daha az güvenilir sonuçlar sunarak sınırlı genellenebilirlik göstermiştir. Bu bulgular, tahmin edilen parametrelerin yalnızca nominal yükte değil, farklı işletme koşullarında da geçerliliğini test etmenin önemini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3 göre, Yöntem II'nin genel olarak daha düşük hata oranlarına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, %100 ve %75 yük koşullarında PSO, GWO, RFA, DS ve TSA algoritmaları her iki yöntemde de düşük hata oranları ile yüksek doğruluk sunarken, RFA algoritması özellikle Yöntem II altında en başarılı performansı sergilemiştir. Buna karşılık, GA algoritması her iki yöntemde de yüksek hata sapmaları ile en zayıf sonuçları vermiştir. Yöntemlerin genel karşılaştırmasında, Yöntem I'nin hata oranlarını nispeten düşürdüğü görülmektedir.

GMK_2-2kW etiketli asenkron motorun, IEEE 112-A standardı esas alınarak ölçülen verim değerlerinin tahminine yönelik olarak, sekiz farklı optimizasyon algoritmasının iki ayrı yöntem kapsamındaki sonuçları analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçlarına Çizelge 4.5'te yer verilmiştir. Yöntem I verilerine göre, en düşük ortalama hata değerleri GA, WOA ve RFA algoritmalarında gözlemlenmiştir. Özellikle GA algoritması %100 yükte %0,4 pozitif hata, %25 yükte-%1,3'lük bir negatif sapma üretmiştir. WOA algoritması ise %100, %75 ve %50 yüklerde %0,3, -%0,3 ve %0,7 gibi oldukça küçük hata değerleriyle dikkat çekerken, %25 yükte-%2,9'luk bir hata ile orta düzeyde bir sapma göstermiştir. RFA algoritmasının da benzer şekilde %100 yükte %0,4 ve %25 yükte-%2,5'lik hata ile göreceli olarak dengeli bir performans sergilediği anlaşılmaktadır. Buna karşılık TSA algoritması özellikle %25 yükte-%4,4 ile en yüksek negatif hata oranına ulaşarak düşük yüklerde güvenilirliğini önemli ölçüde yitirmiştir. PSO, HHO ve DS algoritmalarının sonuçları birebir aynı olup %25 yükleme oranında-%3,8 hata üretmeleri bu algoritmaların düşük yükte benzer şekilde performans kaybı yaşadığını göstermektedir. GWO algoritması da benzer bir performans eğrisi sergileyerek %25 yükte-%3,0 hata oranına ulaşmıştır.

Yöntem II'ye baktığımızda, genel olarak hata oranlarında küçük iyileşmeler göze çarpmaktadır. Özellikle HHO algoritması, %25 yükteki hata oranını-%3,1'e düşürmüştür. Bu düşüş Yöntem I'e kıyasla %0,7'lik bir iyileşmeye işaret etmektedir. RFA algoritması yine %100 yükte %0,4 gibi düşük bir hata değeri üretirken, %25 yükte-%3,8 ile yüksek negatif sapma sergilemeye devam etmiştir. TSA algoritmasının performansında da belirgin bir iyileşme mevcuttur; %25 yükteki hata oranı-%4,4'ten-%3,2'ye düşerek kayda değer bir gelişme göstermiştir. GA algoritması ise Yöntem II altında %50 yükte %2,2 ve %25 yükte-%0,4 hata ile tahmin doğruluğunu korurken, %100 yükte %0,8 ve %75 yükte %0,6 değerleri ile Yöntem I'e göre hata sapmasını artırmıştır.

Her iki yöntem birlikte değerlendirildiğinde, %100 ve %75 yükleme oranında hata oranlarının genel olarak düşük olduğu; buna karşın %25 yükleme oranında birçok algoritmanın negatif sapmalarla daha yüksek hata değerlerine ulaştığı tespit edilmektedir. Yöntem II'nin kısmen daha düşük hata oranları ürettiği ve birçok algoritma için daha dengeli sonuçlar sunduğu görülmektedir. Bu bağlamda GWO ve HHO algoritmaları Yöntem II altında tüm yük seviyelerinde görece daha tutarlı sonuçlar sunarken, GA algoritması her iki yöntemde de düşük yüklerde performansı ile dikkat çekmiştir.

Sonuç olarak hem tahmin doğruluğu hem de yükler arası istikrar açısından GWO ve RFA algoritmaları GMK_2-2KW motoru özelinde daha başarılı performanslar sergilemiştir. Özellikle Yöntem II altında tahmin hatalarının daha dengeli olması, bu yöntemin algoritmaların tahmin performanslarını artırıcı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

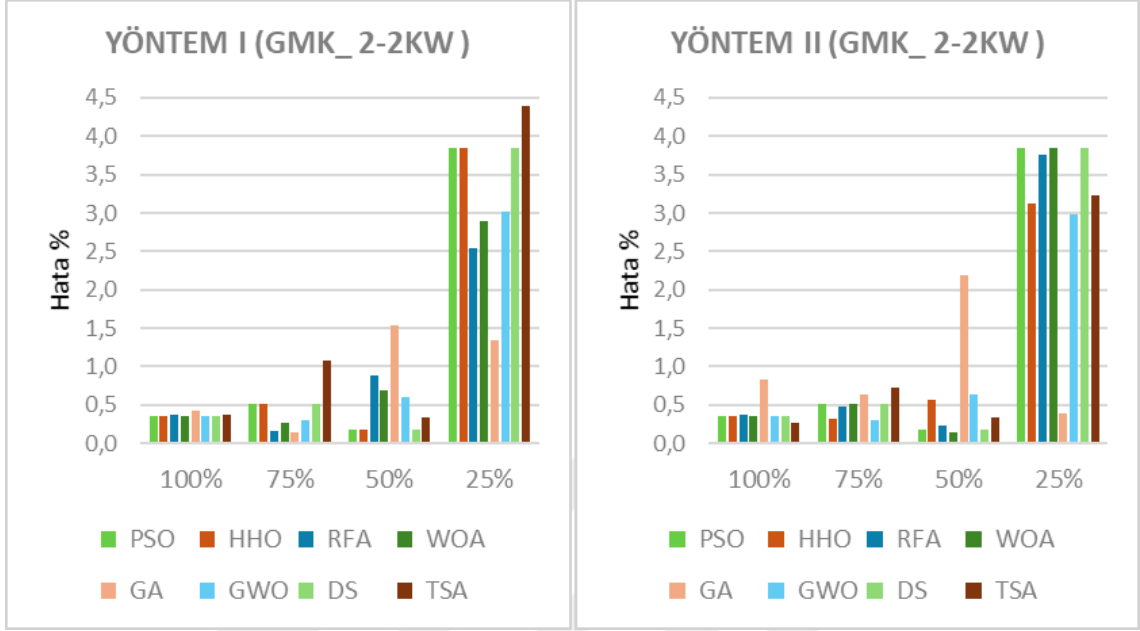
Çizelge 4.5. GMK_ 2-2KW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler

YÖNTEM I													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
GMK_ 2-2KW	80,9	81,4	81,3	70,0	PSO	80,6	82,0	81,1	73,9	0,3	-0,5	0,2	-3,8
					HHO	80,6	82,0	81,1	73,9	0,3	-0,5	0,2	-3,8
					RFA	80,5	81,6	80,4	72,6	0,4	-0,2	0,9	-2,5
					WOA	80,6	81,7	80,6	72,9	0,3	-0,3	0,7	-2,9
					GA	80,5	81,3	79,7	71,4	0,4	0,1	1,5	-1,3
					GWO	80,6	81,7	80,6	73,1	0,3	-0,3	0,6	-3,0
					DS	80,6	82,0	81,1	73,9	0,3	-0,5	0,2	-3,8
					TSA	81,3	82,5	81,6	74,4	-0,4	-1,1	-0,3	-4,4
YÖNTEM II													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
GMK_ 2-2KW	80,9	81,4	81,3	70,0	PSO	80,6	82,0	81,1	73,9	0,3	-0,5	0,2	-3,8
					HHO	80,6	81,8	80,7	73,2	0,3	-0,3	0,6	-3,1
					RFA	80,5	81,9	81,0	73,8	0,4	-0,5	0,2	-3,8
					WOA	80,6	82,0	81,1	73,9	0,3	-0,5	0,2	-3,8
					GA	80,1	80,8	79,1	70,4	0,8	0,6	2,2	-0,4
					GWO	80,6	81,7	80,6	73,0	0,3	-0,3	0,6	-3,0
					DS	80,6	82,0	81,1	73,9	0,3	-0,5	0,2	-3,8
					TSA	81,2	82,2	80,9	73,3	-0,3	-0,7	0,3	-3,2

GMK_2-2kW gücündeki asenkron motorun verim tahmin performansına ilişkin iki ayrı tablo verileri kullanılarak grafikler oluşturulmuş ve hata oranlarını dört farklı yükleme oranında (%100, %75, %50, %25) için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.4'te sunulmuştur.

Yöntem I grafiği incelendiğinde, özellikle %50 ve %25 yük seviyelerinde hata değerlerinde belirgin artış gözlemlenmektedir. TSA algoritması %25 yükleme oranında en yüksek hata değerine ulaşmış ve bunu sırasıyla PSO, HHO ve DS algoritmaları

izlemiştir. Düşük yük seviyelerinde tahmin hatalarının ciddi biçimde arttığını göstermektedir. %100 ve %75 yük seviyelerinde ise tüm algoritmalar genellikle %1'in altında hatalarla tahmin gerçekleştirmiştir.



Şekil 4.4. GMK_2-2KW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları

Yöntem II grafiğinde ise genel olarak hata oranlarının Yöntem I'e kıyasla kısmen daha homojen ve düşük seviyelerde seyrettiği dikkat çekmektedir. Özellikle PSO, RFA, WOA ve DS algoritmalarında %25 yükleme oranındaki hata değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve %4,0 civarında toplandığı görülmektedir. Bununla birlikte, GA algoritmasının %50 yükte %2,2'yi aşan hata değeriyle diğer algoritmalarından ayrıldığı ve tahmin istikrarını korumakta zorlandığı görülmektedir. TSA algoritması, Yöntem I kapsamında %25 yükleme oranında diğer algoritmalarla kıyasla görece yüksek bir hata oranı üretmiştir; ancak Yöntem II altında, Yöntem I'e kıyasla daha düşük bir hata oranı sergilemiştir.

Her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, %100 ve %75 yük seviyelerinde neredeyse tüm algoritmaların yüksek doğrulukla çalıştığı, ancak %50 ve özellikle %25 yük seviyelerinde tahmin sapmalarının belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu sapmalar motorun düşük yükte çalışması durumunda algoritmaların performansının düştüğünü ve bu koşullarda daha dikkatli algoritma seçimi yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca WOA, GWO ve RFA algoritmaları her iki yöntemde de görece düşük hata değerleriyle hem doğruluk hem de tutarlılık bakımından öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, GMK_2-2kW motoru için Yöntem II'nin hata oranlarını azaltıcı etkisi görülmektedir. Bulgular dikkate alındığında, GWO ve RFA algoritmalarının Yöntem II kapsamında daha tutarlı ve güvenilir tahminler ürettiği söylenebilir. Buna karşılık, GA ve TSA algoritmalarının özellikle düşük yük seviyelerinde görece daha yüksek hata oranlarına sahip olduğu görülmektedir.

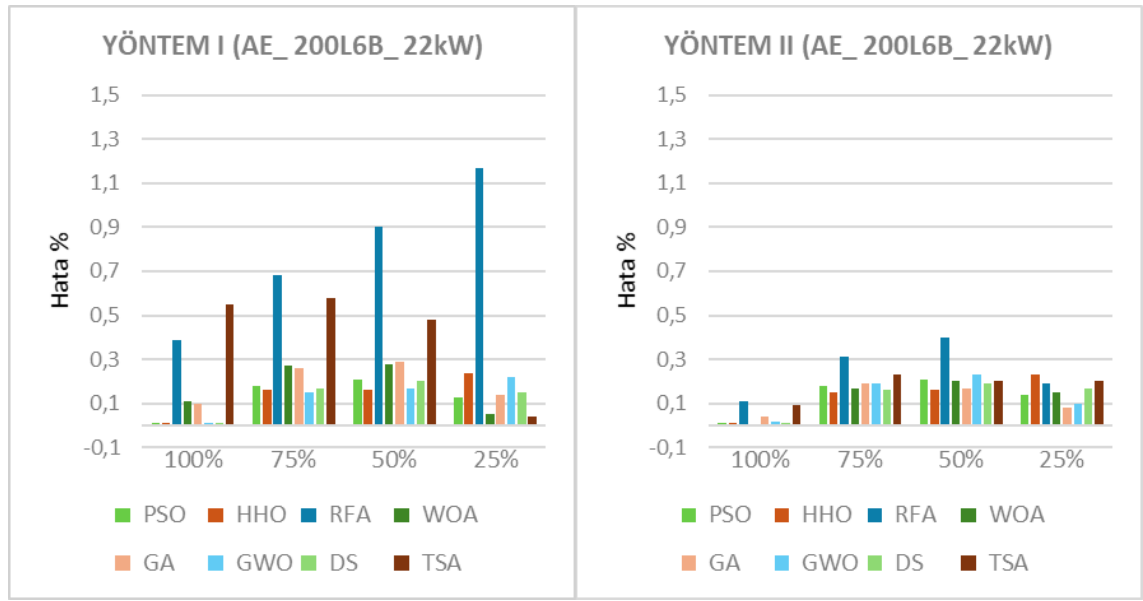
Çizelge 4.6. AE_200L6B_22kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler

YÖNTEM I													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)					verimler (%)							
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_200L6B_22kW	93,8	93,9	93,2	89,7	PSO	93,8	93,7	93,0	89,9	0,0	0,2	0,2	-0,1
					HHO	93,8	93,8	93,1	90,0	0,0	0,2	0,2	-0,2
					RFA	93,4	93,2	92,3	88,6	0,4	0,7	0,9	1,2
					WOA	93,7	93,7	92,9	89,8	0,1	0,3	0,3	0,0
					GA	93,7	93,7	92,9	89,6	0,1	0,3	0,3	0,1
					GWO	93,8	93,8	93,0	89,9	0,0	0,2	0,2	-0,2
					DS	93,8	93,8	93,0	89,9	0,0	0,2	0,2	-0,2
					TSA	93,2	93,3	92,7	89,7	0,5	0,6	0,5	0,0
YÖNTEM II													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)					verimler (%)							
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_200L6B_22kW	93,8	93,9	93,2	89,7	PSO	93,8	93,7	93,0	89,9	0,0	0,2	0,2	-0,1
					HHO	93,8	93,8	93,1	90,0	0,0	0,2	0,2	-0,2
					RFA	93,7	93,6	92,8	89,5	0,1	0,3	0,4	0,2
					WOA	93,8	93,8	93,0	89,9	0,0	0,2	0,2	-0,2
					GA	93,7	93,7	93,0	89,8	0,0	0,2	0,2	-0,1
					GWO	93,8	93,7	93,0	89,8	0,0	0,2	0,2	-0,1
					DS	93,8	93,8	93,0	89,9	0,0	0,2	0,2	-0,2
					TSA	93,7	93,7	93,0	89,9	0,1	0,2	0,2	-0,2

AE_200L6B_22kW asenkron motorunun farklı yüklenme durumlarındaki verim değerleri, sekiz farklı optimizasyon algoritması kullanılarak Yöntem I ve Yöntem II ile tahmin edilmiş ve IEEE 112-A standardına göre ölçülen referans verim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir. Yöntem I incelendiğinde, %100 yük koşulunda tüm algoritmaların hata oranlarının oldukça düşük olduğu ve genellikle $\pm 0,5\%$ aralığında değiştiği görülmektedir. Bu durum, tahmin edilen eşdeğer devre parametrelerinin tam yük altında yeterli doğrulukla elde edildiğini göstermektedir. En yüksek doğruluk seviyesine ulaşan algoritmalar arasında PSO, HHO, GWO ve DS öne

çıkmaktadır. Öte yandan, düşük yük seviyelerinde, özellikle %25 yük durumunda, RFA gibi bazı algoritmalarda tahmin doğruluğunun azaldığı ve hata oranlarının %1,2'ye kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. TSA algoritması ise %25 yükte %0,0 hata göstermesine rağmen, önceki yük seviyelerinde daha yüksek hata oranlarına sahip olması nedeniyle genel tutarlılığı açısından zayıf bir performans sergilemiştir.

Yöntem II'de de Yöntem I'e benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Ancak bu yöntemde genel hata oranlarının, Yöntem I'e kıyasla bir miktar daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle %50 ve %25 yük seviyelerinde, tüm algoritmaların hata oranları %0,4'in altına inmiş ve daha istikrarlı bir tahmin performansı sergilemiştir.



Şekil 4.5. AE_200L6B_22kW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, her iki yöntemde de her yük kademesinde RFA hariç tüm algoritmalar başarılı tahminler üretmiştir. %50 ve %25 yükleme oranında ise hata değerlerinin bariz şekilde yükselmediği bilakis diğer yük kademelerindeki hata oranlarına yakın sonuçlar üretildiği görülmüştür.

Sonuç olarak, genel olarak algoritmaları tüm yük seviyelerinde düşük hata oranları ve dengeli performanslarıyla öne çıkmıştır. Buna karşılık, RFA algoritması her iki yöntemde de daha yüksek sapmalar göstererek dalgalı bir tahmin eğrisi ortaya koymuştur.

Çizelge 4.7'de AE_225M6A_30kW motoruna ait verim tahminleri ve hata oranları verilmiştir. Yöntem I ve Yöntem II sonuçları incelendiğinde, her iki yöntemin de genel olarak yüksek doğrulukta tahminler ürettiği görülmektedir. Yöntem I

kapsamında elde edilen verilere göre özellikle RFA algoritmasının tüm yük koşullarında en yüksek hata oranlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle %50 yük durumunda %1,7 ve %75 yükte %1,6 hata oranı ile dikkat çekmektedir. Bu değerler, verim tahmini açısından bu algoritmanın AE_225M6A_30kW motoru için uygun bir model sunmadığını göstermektedir. Diğer yandan, en düşük hata oranları TSA algoritmasında görülmektedir. TSA tüm yük seviyelerinde en düşük ortalama hatayı vermiş ve özellikle %25 yük durumu hariç yüksek doğruluk sağlamıştır. Diğer algoritmalar da %1'in altında hata değerleri ile genel anlamda başarılı bir performans göstermiştir.

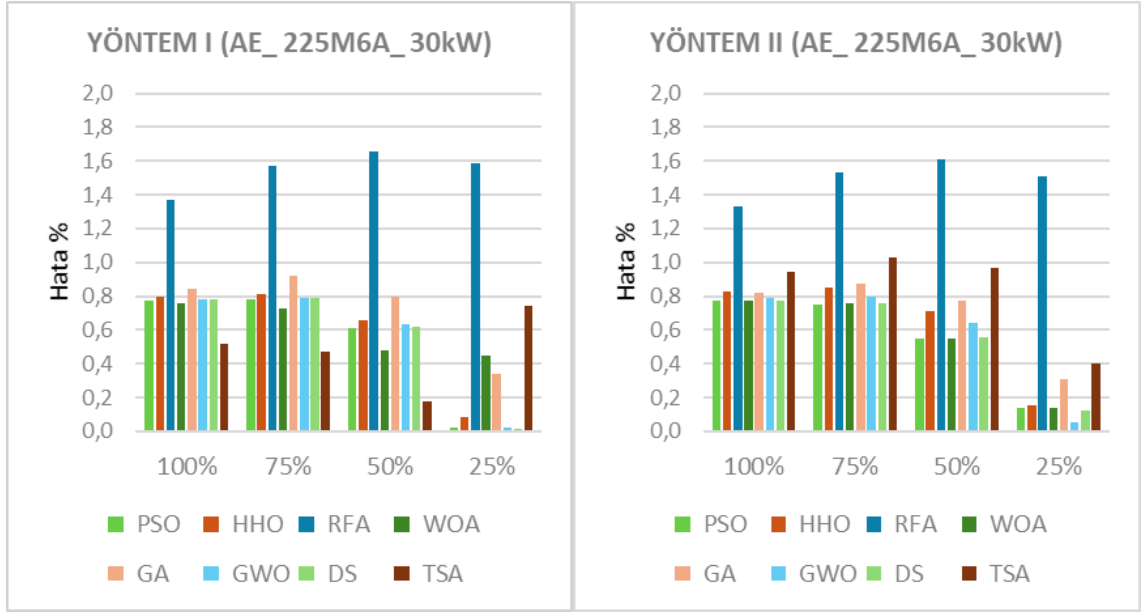
Çizelge 4.7. AE_225M6A_30kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler

YÖNTEM I													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_225M6A_30kW	93,7	93,5	92,2	87,3	PSO	92,9	92,7	91,6	87,4	0,8	0,8	0,6	0,0
					HHO	92,9	92,7	91,6	87,3	0,8	0,8	0,7	0,1
					RFA	92,3	92,0	90,6	85,8	1,4	1,6	1,7	1,6
					WOA	92,9	92,8	91,8	87,8	0,8	0,7	0,5	-0,5
					GA	92,9	92,6	91,4	87,0	0,8	0,9	0,8	0,3
					GWO	92,9	92,7	91,6	87,3	0,8	0,8	0,6	0,0
					DS	92,9	92,7	91,6	87,3	0,8	0,8	0,6	0,0
					TSA	93,2	93,1	92,1	88,1	0,5	0,5	0,2	-0,7
YÖNTEM II													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_225M6A_30kW	93,7	93,5	92,2	87,3	PSO	92,9	92,8	91,7	87,5	0,8	0,8	0,5	-0,1
					HHO	92,9	92,7	91,5	87,2	0,8	0,8	0,7	0,2
					RFA	92,4	92,0	90,6	85,8	1,3	1,5	1,6	1,5
					WOA	92,9	92,8	91,7	87,5	0,8	0,8	0,5	-0,1
					GA	92,9	92,7	91,5	87,0	0,8	0,9	0,8	0,3
					GWO	92,9	92,7	91,6	87,3	0,8	0,8	0,6	0,0
					DS	92,9	92,8	91,7	87,5	0,8	0,8	0,6	-0,1
					TSA	92,8	92,5	91,3	86,9	0,9	1,0	1,0	0,4

Yöntem II ile Yöntem I karşılaştırıldığında, hata oranlarının büyük ölçüde korunduğu ve algoritmaların sıralamasının benzer kaldığı görülmektedir. RFA algoritması, Yöntem II'de de en yüksek hata oranlarını üretmiş; %75 ve %50 yük seviyelerinde sırasıyla %1,6 ve %1,5 değerlerine ulaşmıştır. Buna karşılık, PSO ve WOA

algoritmaları kısmen düşük hata oranlarıyla öne çıkmıştır. GWO ve DS algoritmalarında Yöntem II'nin Yöntem I'e kıyasla aynı hata değerleri sağladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde, bu bulguların grafiksel olarak da doğrulandığı görülmektedir. RFA algoritması, her iki yöntemde de en yüksek hata oranlarıyla ayrılarak diğer algoritmalara kıyasla daha düşük doğrulukla çalıştığını ortaya koymaktadır. TSA algoritması, Yöntem I kapsamında başarılı bir performans sergilemişken, Yöntem II'de aynı düzeyde başarıyı sürdürememiştir. Diğer algoritmalar ise birbirine yakın hata değerleriyle orta düzeyde ve dengeli bir tahmin performansı sunmuştur.



Şekil 4.6. AE_225M6A_30kW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları

Sonuç olarak, AE_225M6A_30kW motoru için hem Yöntem I hem de Yöntem II kapsamında, genel doğruluk bakımından PSO ve WOA algoritmaları öne çıkmıştır. RFA algoritması ise her iki yöntemde de tutarlı şekilde yüksek hata oranları üretmiştir. GWO ve DS algoritmalarında ise her iki yöntemde de benzer hata oranları gözlemlenmiş, bu algoritmaların performansında belirgin bir değişim kaydedilmemiştir. Bu bulgular, optimizasyon algoritmalarının değerlendirilmesinde yalnızca tam yükteki performanslarının değil, tüm yük aralıklarındaki hata davranışlarının dikkate alınması açısından önemli olduğunu göstermektedir.

AE_280M4A_90kW kodlu asenkron motorun verim tahmini için sekiz farklı optimizasyon algoritmasının performansı Yöntem I ve Yöntem II kapsamında karşılaştırılmış ve sonuçlar Çizelge 4.8'de verilmiştir. Her iki yöntemde de algoritmalar yalnızca tam yük (%100) koşulu altında eşdeğer devre parametrelerinin tahmini amacıyla

çalıştırılmış; diğer yük seviyelerine ait verim değerleri ise bu tahmin edilen parametreler kullanılarak hesaplanmıştır. Hata oranları ise, bu hesaplanan verimlerin deneysel olarak ölçülen verim değerleriyle karşılaştırılması sonucunda elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. AE_280M4A_90kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler

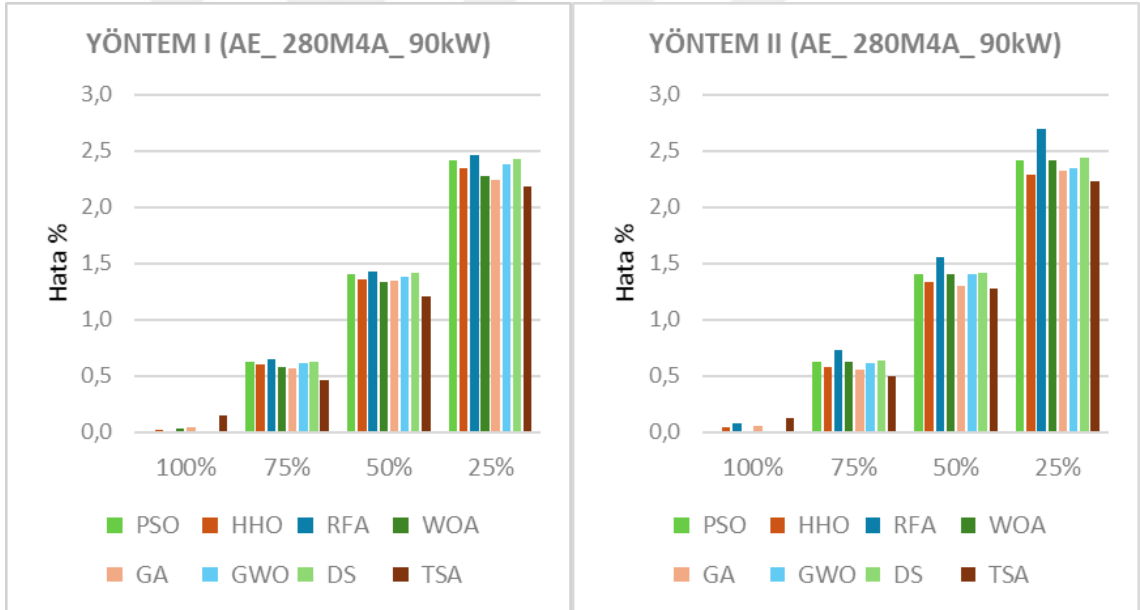
YÖNTEM I													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_280M4A_90kW	95,0	95,3	95,2	92,9	PSO	95,0	94,7	93,8	90,4	0,0	0,6	1,4	2,4
					HHO	95,0	94,7	93,8	90,5	0,0	0,6	1,4	2,3
					RFA	95,0	94,7	93,7	90,4	0,0	0,7	1,4	2,5
					WOA	95,0	94,8	93,8	90,6	0,0	0,6	1,3	2,3
					GA	95,0	94,8	93,8	90,6	0,0	0,6	1,3	2,2
					GWO	95,0	94,7	93,8	90,5	0,0	0,6	1,4	2,4
					DS	95,0	94,7	93,8	90,4	0,0	0,6	1,4	2,4
					TSA	95,2	94,9	94,0	90,7	-0,2	0,5	1,2	2,2
YÖNTEM II													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_280M4A_90kW	95,0	95,3	95,2	92,9	PSO	95,0	94,7	93,8	90,5	0,0	0,6	1,4	2,4
					HHO	95,0	94,8	93,8	90,6	0,0	0,6	1,3	2,3
					RFA	94,9	94,6	93,6	90,2	0,1	0,7	1,6	2,7
					WOA	95,0	94,7	93,8	90,5	0,0	0,6	1,4	2,4
					GA	95,1	94,8	93,9	90,5	-0,1	0,5	1,3	2,3
					GWO	95,0	94,7	93,8	90,5	0,0	0,6	1,4	2,3
					DS	95,0	94,7	93,8	90,4	0,0	0,6	1,4	2,4
					TSA	95,1	94,8	93,9	90,6	-0,1	0,5	1,3	2,2

Yöntem I sonuçlarına göre, tüm algoritmalar %100 yük durumunda oldukça düşük hata oranları (maksimum $\pm 0.2\%$) ile başarılı sonuçlar vermiştir. Bu durum, algoritmaların tam yük koşullarında motor parametrelerini oldukça doğru bir şekilde tahmin edebildiklerini göstermektedir. Ancak %75, %50 ve özellikle %25 yük durumlarında hata oranları belirgin bir şekilde artmaktadır. Özellikle %25 yük koşulunda en düşük hata TSA algoritması ile elde edilmiş olup bu algoritma 2.2% ile en iyi sonucu vermiştir. Buna karşılık RFA algoritması, %50 ve %25 yük seviyelerinde sırasıyla 1.4% ve 2.5% gibi diğer algoritmalara göre daha yüksek hata oranları ile en düşük başarı göstermiştir.

Yöntem II kapsamında gerçekleştirilen analizler incelendiğinde, genel eğilimin Yöntem I ile benzer olduğu görülmektedir. %100 yük durumunda tüm algoritmalar 0.0%

ile 0.1% arasında değişen son derece düşük hata oranları sergilemiştir. Bu durum, Yöntem II'nin de tam yük altında yüksek doğrulukla parametre tahmini yapabildiğini göstermektedir. Ancak kısmi yük koşullarında (özellikle %50 ve %25 yük seviyelerinde), hata oranlarının arttığı gözlemlenmektedir. Örneğin RFA algoritması %25 yükte 2.7% hata ile en yüksek sapmayı göstermektedir. Buna karşılık TSA algoritması, hem %50 hem de %25 yük seviyelerinde en düşük hata oranlarına (1.3% ve 2.2%) ulaşarak, Yöntem II'de de en başarılı algoritma konumuna yükselmiştir.

Şekil 4.7 her iki yöntemin de hata oranları gösterilmektedir. Grafiklerde her bir algoritmanın dört farklı yükleme oranındaki hata değerleri gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde özellikle %25 yükleme oranında hata oranlarının tüm algoritmalar için anlamlı biçimde arttığı açıkça görülmektedir. Bu artışın en düşük olduğu algoritmalar genellikle TSA, GA ve WOA olarak öne çıkarken, RFA algoritması en yüksek hata oranları ile dikkat çekmektedir.



Şekil 4.7. AE_280M4A_90kW asenkron motorun ölçülen verim değerleri ile Yöntem I ve Yöntem II kullanılarak tahmin edilen verimler arasındaki hata oranlarının karşılaştırılması

AE_280M4A_90kW motoru için yapılan analizler, her iki yöntemin tam yük koşullarında yüksek doğrulukla parametre tahmini sağladığını göstermektedir. Ancak kısmi yüklerde, özellikle %25 seviyesinde, tahmin doğruluğu belirgin şekilde azalmaktadır. TSA algoritması, her iki yöntemde de en düşük mutlak hata değerlerine ulaşarak en başarılı algoritma olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, RFA algoritması özellikle %25 yükte yüksek hata oranlarıyla daha az güvenilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Bu sonuçlar, algoritma performanslarının farklı yük koşullarında

ayrı ayrı değerlendirilmesinin uygulama başarısı açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.9. AE_315M4A_132kW ASM ölçülen ve iki yöntem ile tahmin edilen verimler

YÖNTEM I													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_315M4A_132kW	95,9	95,5	94,3	90,1	PSO	95,4	95,0	93,8	90,2	0,6	0,5	0,4	-0,1
					HHO	95,2	94,8	93,6	89,8	0,7	0,7	0,7	0,3
					RFA	95,2	94,8	93,7	89,8	0,7	0,7	0,6	0,4
					WOA	95,3	94,9	93,7	90,2	0,6	0,6	0,5	-0,1
					GA	94,1	93,4	91,6	86,6	1,8	2,1	2,7	3,5
					GWO	95,0	94,5	93,2	88,9	0,9	1,0	1,0	1,2
					DS	95,4	95,0	93,8	90,2	0,6	0,5	0,4	-0,1
					TSA	95,3	94,9	93,8	90,4	0,6	0,6	0,4	-0,3
YÖNTEM II													
MOTOR	IEEE METOD A				ALG	Tahmin edilen verimler (%)				Hata (%)			
	ölçülen verimler (%)												
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
AE_315M4A_132kW	95,9	95,5	94,3	90,1	PSO	95,4	95,0	93,8	90,2	0,6	0,5	0,4	-0,1
					HHO	95,2	94,8	93,6	89,8	0,7	0,7	0,7	0,3
					RFA	94,6	93,9	92,4	87,5	1,4	1,6	1,8	2,6
					WOA	95,3	94,9	93,7	89,9	0,6	0,7	0,6	0,2
					GA	95,0	94,4	93,2	88,8	1,0	1,1	1,1	1,3
					GWO	95,2	94,8	93,7	89,7	0,7	0,7	0,6	0,4
					DS	95,4	95,0	93,8	90,2	0,6	0,5	0,4	-0,1
					TSA	95,1	94,7	93,4	89,4	0,8	0,8	0,9	0,7

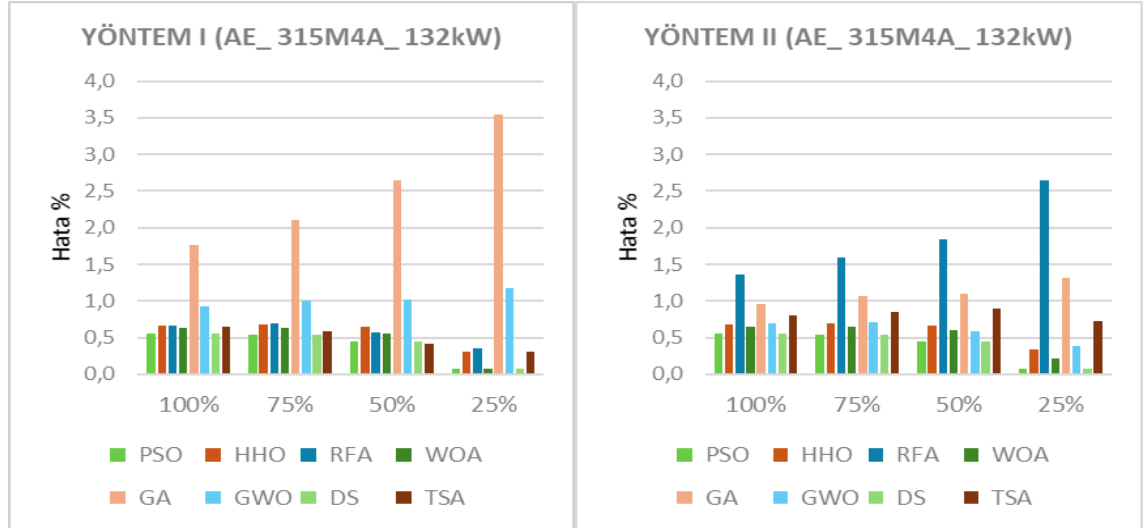
Çizelge 4.9’da AE_315M4A_132kW motor için yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Sezgisel optimizasyon algoritmaları Yöntem I ’de GA, Yöntem II’de RFA hariç farklı yük durumları altında yaklaşık aynı performansı göstermiştir. Her iki yöntemde de tam yük koşullarındaki hata değerleri genellikle 0,6% ile 0,8% arasında değişmektedir ve bu durum, algoritmaların tam yük için genel olarak başarılı parametre tahminleri gerçekleştirdiğini göstermektedir. GA algoritması, Yöntem I’de %25 yükte %3,5’lik bir hata oranına ulaşarak en yüksek sapmayı göstermiştir. Yöntem II’de ise aynı algoritmanın hata oranı %1,3 düzeyindedir. Bu sonuçlar GA algoritmasının düşük yük koşullarında yeterli genelleme sağlayamadığını ortaya koymaktadır. RFA algoritması da Yöntem II de %25 yükte %2,6 gibi yüksek hata değeriyle dikkat çekmektedir. Bu sonuç

RFA'nın yük düşüşüyle birlikte tahmin gücünde belirgin bir azalma yaşadığını göstermektedir.

En düşük hata değerlerine sahip algoritmalar incelendiğinde, DS ve PSO öne çıkmaktadır. DS ve PSO algoritmaları her iki yöntemde de %25 yükte hata oranını %0,1'de tutmayı başarmışlardır. Benzer şekilde PSO algoritması da %25 yükte oldukça düşük hata oranlarıyla başarılı bir performans sergilemiştir. WOA algoritması, her iki yöntemde de %25 yükte en düşük hata oranlarından birine (%0,1 ve %0,2) sahiptir. WOA'nın düşük yüklerde kararlı çalıştığına işaret etmektedir.

Genel ortalama hata açısından karşılaştırma yapıldığında, Yöntem II'nin bazı algoritmalar için Yöntem I'e göre daha düşük hata değerleri ürettiği görülmektedir. Bu durum, Yöntem II'nin genel performans açısından kısmen stabil ve düşük hata eğilimli bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.8 incelendiğinde, özellikle GA algoritmasının Yöntem I'deki hata değerlerinin belirgin şekilde diğer algoritmalarından ayrıldığı ve %25 yükleme oranında en yüksek hata oranına ulaştığı görülmektedir. İkinci en yüksek hata ise GWO algoritmasına aittir. Yöntem II'de ise en yüksek hata oranı RFA algoritmasında gözlemlenmiş, onu GA takip etmiştir. DS ve PSO algoritmaları ise her iki yöntemde de düşük hata oranlarıyla istikrarlı bir performans sergilemiştir.

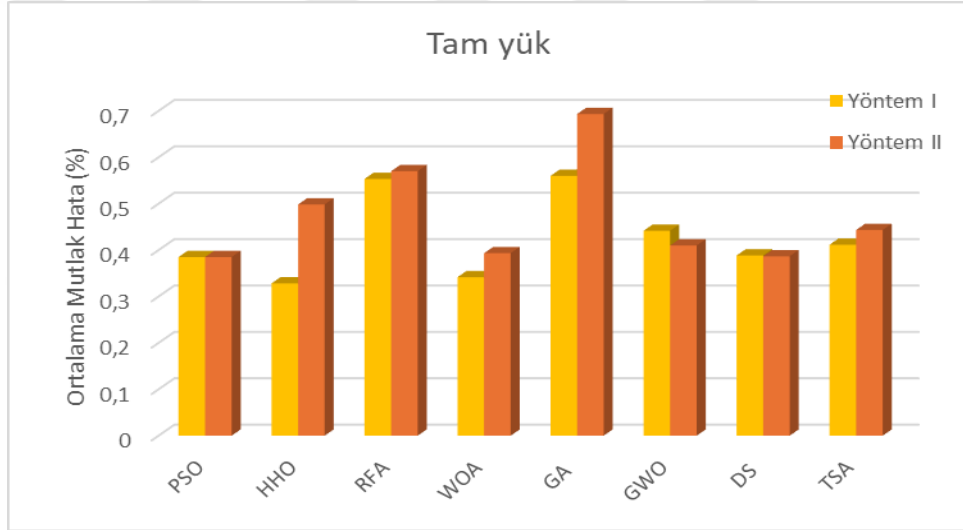


Şekil 4.8. AE_315M4A_132kW ASM ölçülen ve tahminler arasındaki hata oranları

Sonuç olarak, AE_315M4A_132kW motoru için yapılan analizlerde her iki yöntem, tam yük koşullarında başarılı tahmin sonuçları üretmiştir. Ancak düşük yük seviyelerinde özellikle GA ve RFA algoritmalarında belirgin hata artışları

gözlemlenmiştir. Genel ortalama hata açısından Yöntem II'nin bazı algoritmalar için daha düşük değerler üretmesi, bu yöntemin daha stabil ve güvenilir bir tahmin yapısı sunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.9'da farklı güçlerde altı motor ve sekiz farklı optimizasyon algoritmasının Yöntem I ve Yöntem II'ye ait ortalama mutlak hata (%) değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu şekil Çizelge 4.4'ten Çizelge 4.9'a kadar olan %100 hata oranları dikkate alınarak ve eşitlik (4.21) ile hesaplanarak elde edilen verilerden oluşturulmuştur. Genel olarak algoritmaların ortalama mutlak hata oranları % 0,3 ile % 0,7 arasında değişmekte olup, her iki yöntem de kabul edilebilir doğruluk düzeyleri sağlamaktadır. Yöntem II'nin bazı algoritmalar için daha düşük ortalama hata ürettiği ve bu açıdan daha tutarlı sonuçlar sunduğu gözlemlenmektedir. Her iki yöntemde de algoritmaların mutlak hata oranları birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Yöntem I ve Yöntem II için algoritmaların 6 adet motorun tam yük verim tahmininde ortalama hata oranları

$$\text{Ortalama mutlak hata} = \frac{\sum_{i=1}^N M(i)_{tamyükhata}}{N} \quad (4.21)$$

HHO ve WOA algoritması, Yöntem I'de de en düşük ortalama hataya (~%0,34) sahip olarak öne çıkmaktadır. PSO, WOA, GWO ve DS algoritmaları da Yöntem II'de yaklaşık %0,38–%0,41 bandında hata oranları ile dengeli ve güvenilir performans sergilemiştir. Her iki yöntemin ortalama hata oranlarını dikkate aldığımızda en düşük ortalama hata oranı (%0,37) ile WOA algoritmasıdır. WOA algoritmasını ortalama hata oranı %0,38 ile PSO, %0,39 ile DS ve %0,41 ile HHO algoritmaları takip etmektedirler. Buna karşılık RFA ve GA algoritmaları, her iki yöntemde de %0,5'in üzerinde hata

üretmek göreceli olarak daha yüksek sapma göstermiştir. GA algoritması Yöntem II'de %0,7 ile en yüksek ortalama hatayı üretmiş, Yöntem I'de bu oran %0,55'e düşmesine rağmen hâlâ yüksek kalmıştır.

Sonuç olarak, WOA, PSO ve DS algoritmaları her iki yöntemde de düşük hata değerleriyle en güvenilir yaklaşımlar olarak öne çıkarken; GA ve RFA algoritmalarının özellikle belirli yöntemlerde daha yüksek sapmalar göstermesi, algoritma seçiminin yöntemle birlikte değerlendirilmesinin kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak tam yük mutlak hata oranları ortalamasında tüm algoritmaların performansları her iki yöntemde de %0,7'in altında kalmış ve çok başarılı bir görünüm sergilemişlerdir. Tabi burada her iki yöntemde de yakın değerlerin olması çalışmamızda kullanmış olduğumuz motorların tamir görmemiş ve etiket verilerinin doğru olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak tamir görmüş ve etiket verilerinde hata olan motorlarda iki yöntem arasındaki hata oranları birbirlerinden çok farklı olacaktır. Bu durumda özellikle çıkış gücü amaç fonksiyonunda bulunmayan Yöntem I'in verilerini dikkate almak daha doğru olacaktır.

4.4.2 Parametrelerin IEEE 112-F Yöntemi ile Karşılaştırılması

Bu bölümde, asenkron motorun temel parametreleri olan X_1 , X_m , R_{fe} , ve R_2 'nin tahmini için iki farklı yaklaşım (Yöntem I ve Yöntem II) ile sekiz farklı optimizasyon algoritmasının (PSO, HHO, RFA, WOA, GA, GWO, DS, TSA) performansı incelenmiştir. Algoritmalar aracılığıyla tahmin edilen parametreler, deneysel olarak elde edilen ve IEEE 112-F standardına uygun referans değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu analiz, hem optimizasyon algoritmalarının asenkron motor parametre tahminindeki başarımını hem de kullanılan yöntemlerin doğruluk düzeylerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

GMK_1-1kW asenkron motoru için sekiz farklı sezgisel algoritmanın parametre tahmin performansı Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu karşılaştırma, X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 parametreleri bazında gerçekleştirilmiş olup, iki farklı yöntem (Yöntem I ve II) dikkate alınmıştır.

Öncelikle X_1 parametresi için referans değer 5,73 Ω olup, en yakın tahminleri Yöntem I'de 6,74 Ω ile GA algoritması ve Yöntem II'de 6,83 Ω ile yine GA algoritması sağlamıştır. X_m mıknatıslanma reaktansı IEEE 112-F değeri 125,2 Ω 'dur. DS (129,5 Ω) ve RFA (130,3 Ω) algoritmaları Yöntem I kapsamında referans değere oldukça yakın tahminler üretmiştir. Benzer şekilde WOA algoritması da her iki yöntemde de makul

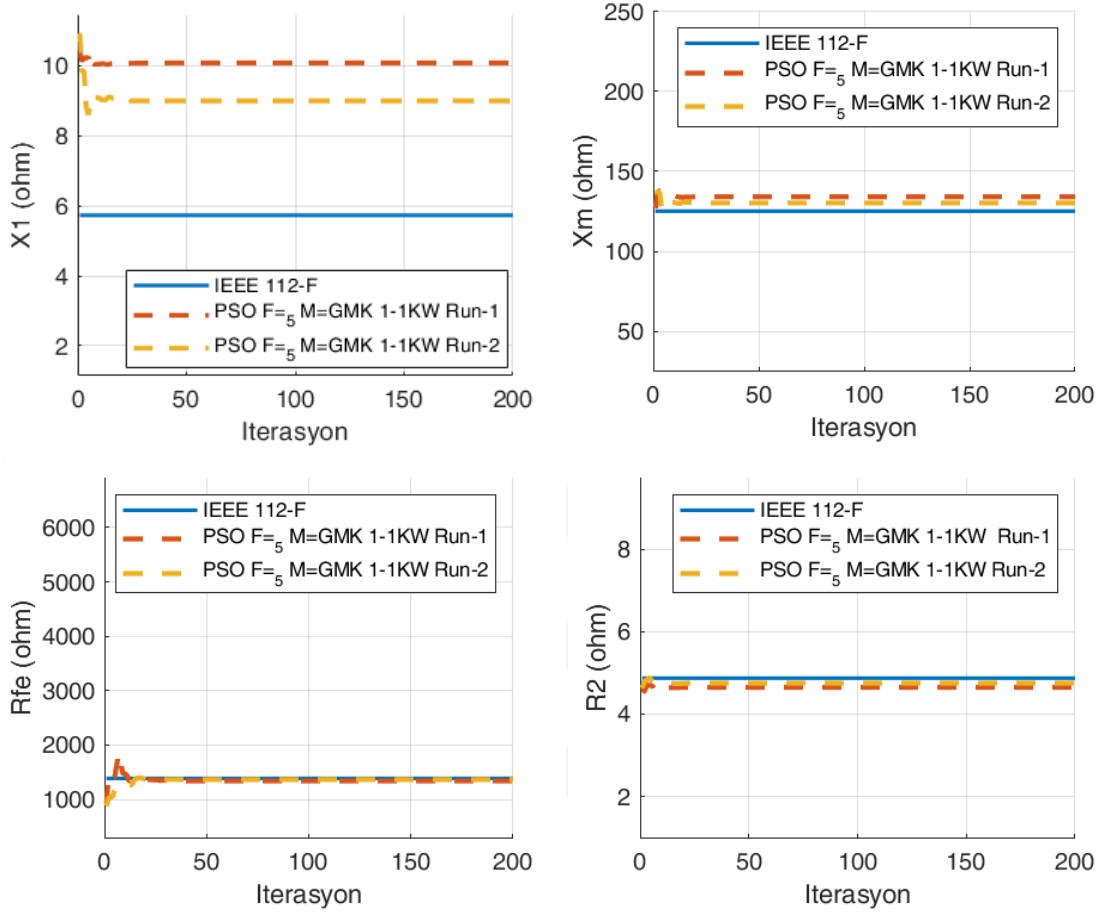
seviyelerde tahminler sunmuştur. Nüve kayıpları direnci (R_{fe}) parametresinde referans değer 1384 Ω olup, Yöntem I'de en yakın tahminler TSA (1356 Ω) ve GWO (1363 Ω) algoritmaları tarafından gerçekleştirilmiştir. Yöntem II'de ise WOA (1376 Ω) ve GWO (1375 Ω) algoritmaları dikkate değer sonuçlar vermiştir. Bu durum, özellikle GWO algoritmasının R_{fe} tahmininde yüksek doğrulukta çalışabildiğini göstermektedir. Rotor direnci (R_2) değerlendirmesinde ise referans değer 4,87 Ω 'dur. Yöntem I kapsamında PSO (4,80 Ω), DS (4,77 Ω), GWO (4,73 Ω) ve RFA (4,74 Ω) gibi algoritmalar yüksek başarı göstermiştir. Yöntem II 'de ise DS ve GWO algoritmaları (her ikisi de 4,78 Ω) referans değere çok yakın değerler üretmiştir.

Çizelge 4.10. GMK_ 1-1KW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler

MOTOR	ALG	PARAMETRELER				
		$X_1(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_{fe}(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	
GMK_1-1KW	Yöntem I	PSO	8,47	128,7	1377	4,80
		HHO	9,99	134,2	1538	4,61
		RFA	8,96	130,3	1392	4,74
		WOA	8,78	135,3	1516	5,06
		GA	6,74	121,4	1682	4,90
		GWO	9,05	131,4	1363	4,73
		DS	8,73	129,5	1370	4,77
		TSA	9,09	138,4	1356	4,57
	Yöntem II	PSO	10,07	134,2	1339	4,65
		HHO	10,12	134,1	1239	4,67
		RFA	9,04	130,7	1482	4,72
		WOA	8,71	128,9	1376	4,74
		GA	6,83	121,4	1242	4,94
		GWO	8,61	129,0	1375	4,78
		DS	8,63	129,2	1373	4,78
		TSA	9,31	131,1	1334	4,39
	IEEE 112- F		5,73	125,2	1384	4,87

Özetle, algoritmaların her bir parametre için farklı performans gösterdiği ve bazı algoritmaların belirli parametrelerde daha isabetli tahminler sunduğu tespit edilmiştir. GA algoritması özellikle X_1 , GWO algoritması R_{fe} ve R_2 , DS ve RFA ise X_m ve R_2 açısından başarılı performans sergilemiştir. Ancak 4 parametre ortak değerlendirildiğinde Yöntem I'de PSO, dört parametreyi birlikte en düşük ortalama hata ile tahmin etmiştir. Bu sonuç algoritmanın tutarlı ve referans değere yakın sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. WOA ve GWO algoritmaları Yöntem II kapsamında genel olarak başarılı tahminler

sunarak dikkat çekmiştir. RFA (Yöntem I) ise özellikle mıknatıslanma reaktansı ve nüve direnci tahminlerinde başarılı sonuçlar üretmiştir.



Şekil 4.10. PSO algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri

Şekil 4.10'da GMK_1-1kW gücündeki asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri için PSO algoritmasıyla gerçekleştirilen iki ayrı çalışmada (Run-1 ve Run-2) elde edilen tahmin değerlerinin, IEEE 112-F standardına göre belirlenen referans değerlere yakınsama davranışları gösterilmiştir. Dört ayrı alt grafikte, sırasıyla X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 parametreleri, iterasyon sayısı ekseninde gösterilmiştir.

X_1 parametresi açısından bakıldığında, her iki çalışmada da algoritmanın başlangıç değerlerinden itibaren referans değerinin oldukça üzerinde bir değerde sabitlenme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu durum, PSO algoritmasının ilk çalıştırmalarında X_1 için küresel minimuma yeterince yaklaşmadığını, ancak tutarlı bir yakınsama sağladığını ortaya koymaktadır. X_m parametresi içinse her iki çalışmada da yaklaşık 130–135 Ω civarına oturan ve IEEE 112-F referans değeri olan 125,2 Ω 'ya yakın seyreden bir sabitlenme gözlemlenmiştir. Bu durum, mıknatıslanma reaktansının

optimizasyonunda PSO algoritmasının nispeten başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir. R_{fe} parametresi özelinde incelendiğinde, ilk birkaç iterasyonda yüksek varyanslı dalgalanmalar gözlemlenmiş olsa da her iki çalışmanın da yaklaşık 1300–1400 Ω aralığında kararlı bir değere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu kararlılık, algoritmanın nüve kayıplarına ilişkin direnci makul bir sapmayla tahmin edebildiğini göstermektedir.

R_2 , parametresi için her iki çalışmanın da yaklaşık 4,5–4,8 Ω bandında oldukça düşük varyansla ve kararlı bir biçimde yakınsadığı görülmektedir. IEEE 112-F değeri olan 4,87 Ω göz önüne alındığında, bu sonuç PSO algoritmasının rotor direnci tahmininde yüksek doğrulukla çalışabildiğini ve ilk iterasyonlardan itibaren kararlı bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, PSO algoritmasının parametre tahmin sürecinde istikrarlı bir yakınsama davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle R_2 ve X_m parametrelerinde yüksek uyum gözlenmiş, R_{fe} parametresinde ise birkaç iterasyon içinde kararlı olan bir yapı meydana gelmiştir. X_1 parametresi için referans değerden bir sapma meydana gelmiş ve bu parametrenin tahmininde tam başarılı olamamıştır. Bu analiz sonuçları, PSO algoritmasının IEEE 112-F standardına uygun tahminler üretebildiğini göstermekte ve algoritmanın genel parametre tahmin yeteneğini doğrulamaktadır.

Çizelge 4.11’de GMK_2-2KW asenkron motorun parametre tahmin sonuçları verilmiştir. X_1 , parametresi incelendiğinde, IEEE 112-F standardına göre referans değeri 4,31 Ω olarak verilmiştir. Yöntem I kapsamında RFA (3,88 Ω), GA (3,16 Ω) ve TSA (3,93 Ω) algoritmaları, bu değere en yakın tahminleri üretmiş olup; Yöntem II içerisinde ise TSA (3,43 Ω) ve GA (3,21 Ω) algoritmalarının referans değere yüksek yakınlık gösterdiği görülmektedir. X_m açısından bakıldığında IEEE 112-F değeri 61,2 Ω ’dur. Bu değere en yakın tahminler Yöntem I’de PSO, HHO ve DS algoritmaları (hepsi 61,9 Ω) ile gerçekleştirilmiştir. Yöntem II için de PSO, RFA, DS (61,9 Ω) ve TSA (61,8 Ω) algoritmalarının yakınsadığı gözlemlenmektedir. Bu bağlamda, PSO ve DS algoritmalarının mıknatıslanma reaktansı tahmininde başarılı olduğu değerlendirilmektedir. R_2 değerlendirmesinde IEEE 112-F değeri 2,36 Ω ’dur. PSO, HHO ve DS algoritmaları (her iki yöntemde de 2,34 Ω) bu değere oldukça yakın tahminlerde bulunmuşlardır. TSA algoritması ise (2,38 Ω) küçük bir sapma ile doğruya yakın bir çıktı

üretmiştir. Bu durum, PSO ve DS algoritmalarının rotor direnci üzerinde kararlı tahminler yaptığını ortaya koymaktadır.

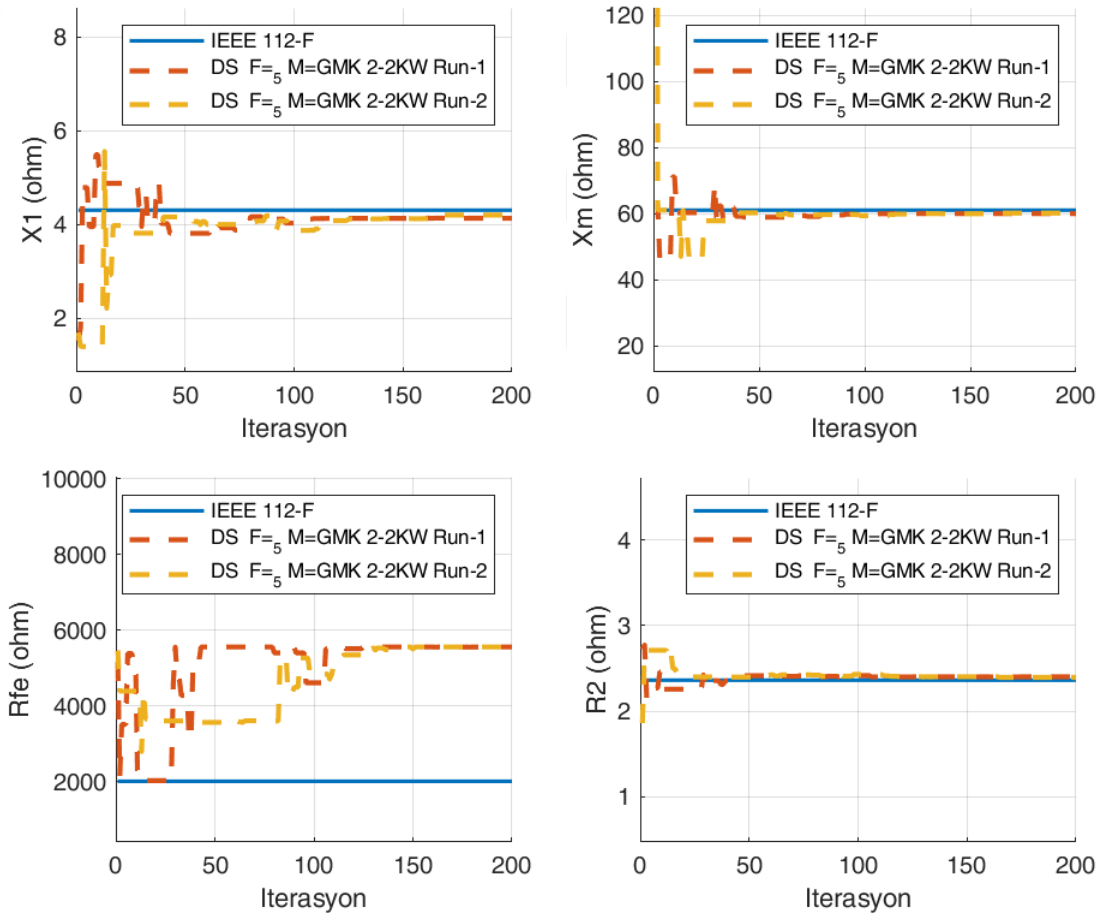
Çizelge 4.11. GMK_ 2-2KW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler

MOTOR		ALG	PARAMETRELER			
			$X_1(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_{fe}(\Omega)$	$R_2(\Omega)$
GMK_2-2KW	Yöntem I	PSO	4,79	61,9	5554	2,34
		HHO	4,79	61,9	5529	2,34
		RFA	3,88	59,5	5367	2,43
		WOA	4,11	60,0	5554	2,40
		GA	3,16	57,9	5034	2,49
		GWO	4,18	60,3	5526	2,40
		DS	4,79	61,9	5535	2,34
		TSA	3,93	65,0	5017	2,39
	Yöntem II	PSO	4,79	61,9	5554	2,34
		HHO	4,25	60,4	5554	2,39
		RFA	4,79	61,9	5327	2,34
		WOA	4,79	62,0	5525	2,34
		GA	3,21	58,0	3473	2,51
		GWO	4,22	60,2	5487	2,39
		DS	4,79	61,9	5554	2,34
		TSA	3,43	61,8	5248	2,38
	IEEE 112- F		4,31	61,2	2005	2,36

Şekil 4.11’de GMK_2–2kW asenkron motoruna ait eşdeğer devre parametrelerinin DS algoritması ile yapılan iki ayrı çalışmada (Run-1 ve Run-2) elde edilen tahmin değerlerinin, IEEE 112-F standardına göre belirlenen referans değerlere yakınsama eğilimleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Görsel dört alt grafikten oluşmakta olup sırasıyla X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 parametrelerinin iterasyon bazlı değişimlerini görülmektedir.

X_1 , parametresi tahmininde her iki çalışmanın da yaklaşık ilk 50 iterasyon süresince belirli bir dalgalanma gösterdiği, ardından yaklaşık 4 Ω düzeyinde sabitlenerek IEEE 112-F referans değeri olan 4,31 Ω ’a yakınsadığı görülmektedir. Özellikle Run-2’nin, daha düşük başlangıç değerlerine rağmen hızlı bir şekilde kararlılığa ulaşması, algoritmanın hızlı bir çözüm arayışı gerçekleştirdiğini göstermektedir. X_m parametresi için de benzer bir yapı gözlemlenmiştir. Her iki çalışmada da başlangıçta gözlenen dalgalanmalar 50. iterasyondan sonra azalmakta ve yaklaşık 61–62 Ω seviyelerinde sabitlenmektedir. Bu değerler, IEEE 112-F referans değeri olan 61,2 Ω ’ya oldukça yakın

olup DS algoritmasının mıknatıslanma reaktansını başarıyla tahmin edebildiğini ortaya koymaktadır. R_{fe} parametresi açısından ise en dikkat çekici durum, algoritmanın her iki koşumda da yüksek hatalı ve belirgin dalgalı bir yapı sergilemesidir. Özellikle ilk 60 iterasyonda geniş değer aralığında salınım gözlemlenmekte, ardından değerler 5000–6000 Ω aralığında sabitlenmektedir. Bu durum, DS algoritmasının nüve kayıplarına karşılık gelen direnci öngörmekte zayıf kaldığını ve referans değer olan 2005 Ω 'un oldukça üzerinde bir seviyede sonuçlar ürettiğini göstermektedir. R_2 parametresi için elde edilen sonuçlar oldukça istikrarlı bir yapı sergilemektedir. Her iki çalışmanın da yaklaşık 2,3–2,35 Ω düzeylerinde sabitlendiği ve bu değerın IEEE 112-F referans değeri olan 2,36 Ω ile neredeyse örtüştüğü dikkat çekmektedir.



Şekil 4.11. DS algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri

Genel olarak değerlendirildiğinde, DS algoritması özellikle X_m ve R_2 parametrelerinde başarılı bir yakınsama performansı sergilemiş, X_1 parametresinde makul düzeyde uyum sağlamış, ancak R_{fe} parametresinde referans değerden sapmıştır.

Çizelge 4.12. AE_200L6B_22kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler

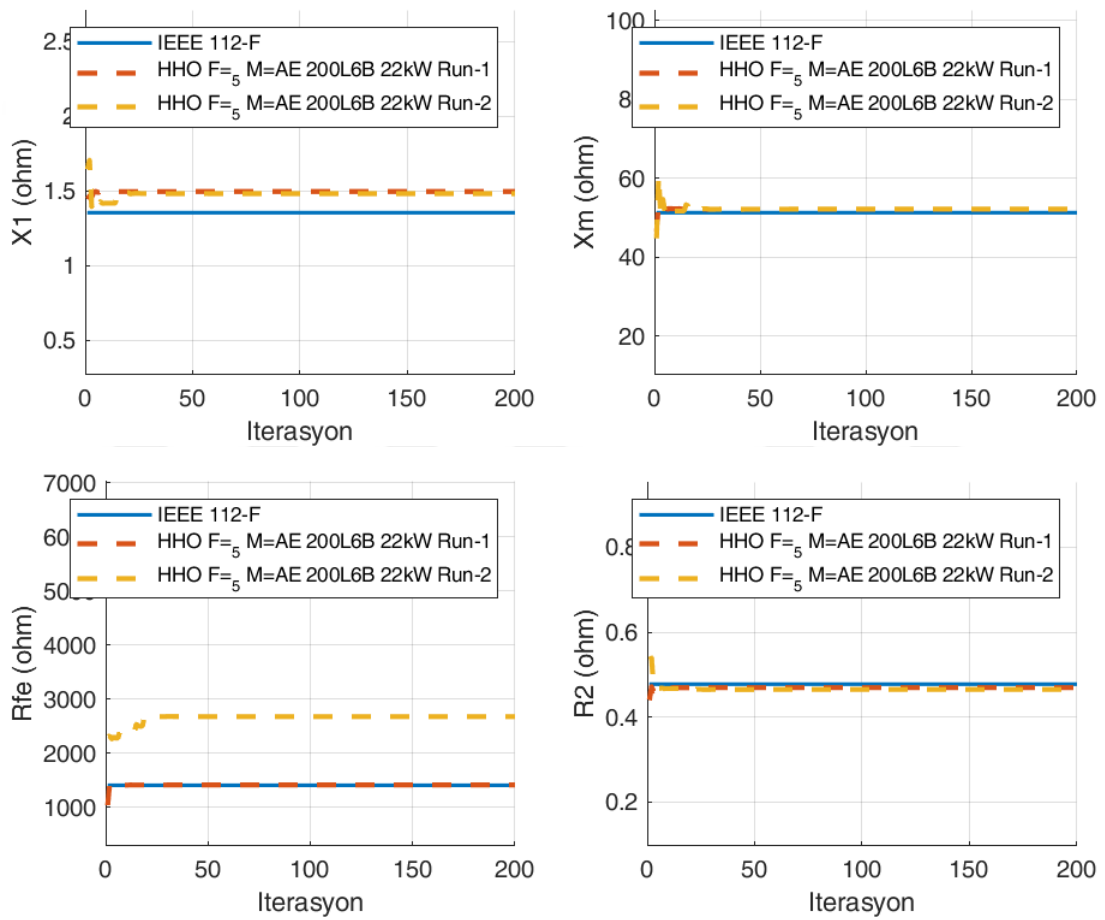
MOTOR	ALG	PARAMETRELER				
		$X_1(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_{fe}(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	
AE_200L6B_22kW	Yöntem I	PSO	1,26	50,8	3155	0,47
		HHO	1,48	52,2	3125	0,46
		RFA	1,27	50,8	2218	0,47
		WOA	1,39	53,4	2915	0,49
		GA	1,69	53,5	2817	0,46
		GWO	1,28	51,0	3204	0,47
		DS	1,30	51,0	3149	0,47
		TSA	1,53	48,2	3204	0,60
	Yöntem II	PSO	1,28	50,9	3153	0,47
		HHO	1,34	51,3	3203	0,47
		RFA	1,30	51,0	2839	0,47
		WOA	1,25	50,7	3185	0,47
		GA	1,68	53,6	2986	0,46
		GWO	1,28	50,9	3122	0,47
		DS	1,26	50,8	3204	0,47
		TSA	1,31	51,3	3204	0,50
	IEEE 112- F		1,36	51,3	1402	0,48

Çizelge 4.12’de AE_200L6B_22kW tipindeki bir asenkron motor için eşdeğer devre parametreleri X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 tahminindeki iki farklı yöntemin performans karşılaştırılması görülmektedir. Her bir algoritma tarafından tahmin edilen değerler, IEEE 112-F standardına göre belirlenmiş referans değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

X_1 parametresi için referans değer olan 1,36 Ω ’a en yakın sonuçları sunan algoritmalar Yöntem II’de yer alan RFA (1,30 Ω) ve DS (1,26 Ω) algoritmaları olmuştur. Bu algoritmalar düşük sapma ile doğru tahminler sunmuşlardır. GA algoritması her iki yöntemde de sistematik olarak yüksek değerler üretmiştir. X_m parametresi için IEEE 112-F değeri 51,3 Ω olarak belirtilmiş olup; bu değere Yöntem II’deki HHO ve TSA (her ikisi de 51,3 Ω) ile Yöntem I’deki GWO ve DS (51,0 Ω) algoritmaları oldukça yakın tahminlerde bulunmuştur. R_{fe} açısından incelendiğinde en çarpıcı fark burada gözlemlenmektedir. IEEE 112-F değeri 1402 Ω olmasına rağmen, tahmin edilen tüm değerler bu değerin oldukça üzerinde ve genellikle 2800–3200 Ω aralığındadır. Yöntem I’de RFA algoritması (2218 Ω), referans değere görece en yakın sonucu vermiştir. R_2 , parametresinde ise IEEE 112-F değeri olan 0,48 Ω ’a birçok algoritma yüksek düzeyde yakınsama göstermiştir. Özellikle Yöntem I ve II’deki PSO, HHO, RFA, GWO, DS

algoritmaları sistematik olarak $0,47 \Omega$ tahmininde bulunarak oldukça başarılı sonuçlar üretmiştir. TSA algoritmasının ($0,60 \Omega$ ve $0,50 \Omega$) bu parametre için daha yüksek değerler tahmin ettiği ve diğer algoritmalarından ayrıştığı görülmektedir.

Şekil 4.12’de AE_200L6B_22kW gücündeki asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerine ilişkin olarak HHO algoritmasıyla yürütülen iki bağımsız çalışmada (Run-1 ve Run-2) elde edilen tahmin değerlerinin, IEEE 112-F standardına göre belirlenen referans değerlere yakınsama davranışları sunulmaktadır. Her bir alt grafik, sırasıyla X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 parametrelerinin iterasyon bazlı değişimini içermektedir.



Şekil 4.12. HHO algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri

X_1 parametresi için referans değeri $1,36 \Omega$ olan IEEE standardına karşılık, her iki çalışmada da yaklaşık $1,48 \Omega$ seviyelerinde erken iterasyonlardan itibaren sabitlenen bir yakınsama gözlemlenmektedir. X_1 parametresi için HHO algoritmasının tutarlı ancak referans değerden hafif sapma içeren bir çözüm bulduğunu göstermektedir. İterasyon başlarında gözlenen sınırlı dalgalanmaların hızla söndüğü ve algoritmanın oldukça erken bir iterasyon sayısında kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. X_m parametresine ilişkin

analizde algoritmanın her iki koşmada da 51,3–52,2 Ω bandında değerler ürettiği ve bu değerlerin IEEE 112-F standardındaki 51,3 Ω referansına son derece yakınsadığı görülmektedir. Özellikle Run-1'in, ilk 25 iterasyon içerisinde oldukça hızlı bir şekilde referans değere yakın bir tahmin değeri üzerinde sabitlendiği, algoritmanın mıknatıslanma reaktansı üzerinde yüksek doğrulukla tahmin gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır. R_{fe} parametresi için referans değer 1402 Ω olmasına karşın, HHO algoritması Run-1'de bu değere oldukça yakın (yaklaşık 1300–1500 Ω bandında), istikrarlı bir yakınsama göstermektedir. Ancak Run-2'de, algoritmanın belirgin şekilde daha yüksek değerlere (yaklaşık 2500 Ω üzeri) saparak referans değerden uzaklaştığı dikkat çekmektedir. Bu durum, algoritmanın nüve kayıplarını modelleme sürecinde başlangıç koşullarına veya rastlantısallığa bağlı olarak değişken sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. R_2 ise her iki çalışmada da tahmin edilen değerlerin yaklaşık 0,46–0,47 Ω aralığında, referans değer olan 0,48 Ω 'ya son derece yakın ve sabit bir biçimde ilerlediği gözlemlenmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, HHO algoritması AE_200L6B_22kW motorunun parametre tahmininde oldukça dengeli bir performans sunmaktadır. X_m ve R_2 parametrelerinde yüksek doğruluk, X_1 'de makul uyum, R_{fe} 'de ise belirgin bir sapma gözlemlenmiştir. Özellikle iterasyon sayısının artmasıyla birlikte tahmin edilen değerlerin büyük ölçüde kararlı olması, algoritmanın yakınsama eğrisinin başarılı bir optimizasyon sürecini yansıttığını göstermektedir.

Çizelge 4.13'de AE_225M6A_30kW asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin (X_1 , X_m , R_{fe} , R_2) iki farklı tahmin yöntemi (Yöntem I ve II) ve sekiz farklı sezgisel optimizasyon algoritması ile elde edilen tahminlerini içermekte olup, bu değerler IEEE 112-F standardına göre belirlenmiş referans parametrelerle karşılaştırılmıştır.

X_1 parametresinde IEEE 112-F standardı 1,00 Ω olarak verilmiştir. Yöntem I'de, TSA (0,88 Ω), HHO (0,93 Ω), GWO (0,83 Ω) ve DS (0,82 Ω) algoritmaları bu referans değere oldukça yakın tahminler sunmuştur. Yöntem II'de ise özellikle WAO (1,03 Ω), TSA (1,02 Ω) ve DS (1,02 Ω) algoritmaları referans değeri çok küçük sapmalarla yakalamıştır. GA ve RFA algoritmaları her iki yöntemde de düşük değer tahmin ederek referans değerden sapmıştır. X_m için IEEE 112-F standardı 30,7 Ω 'dur. En yakın tahminler Yöntem II'de WOA (29,2 Ω) ve DS (29,2 Ω) algoritmalarına aittir. Genel

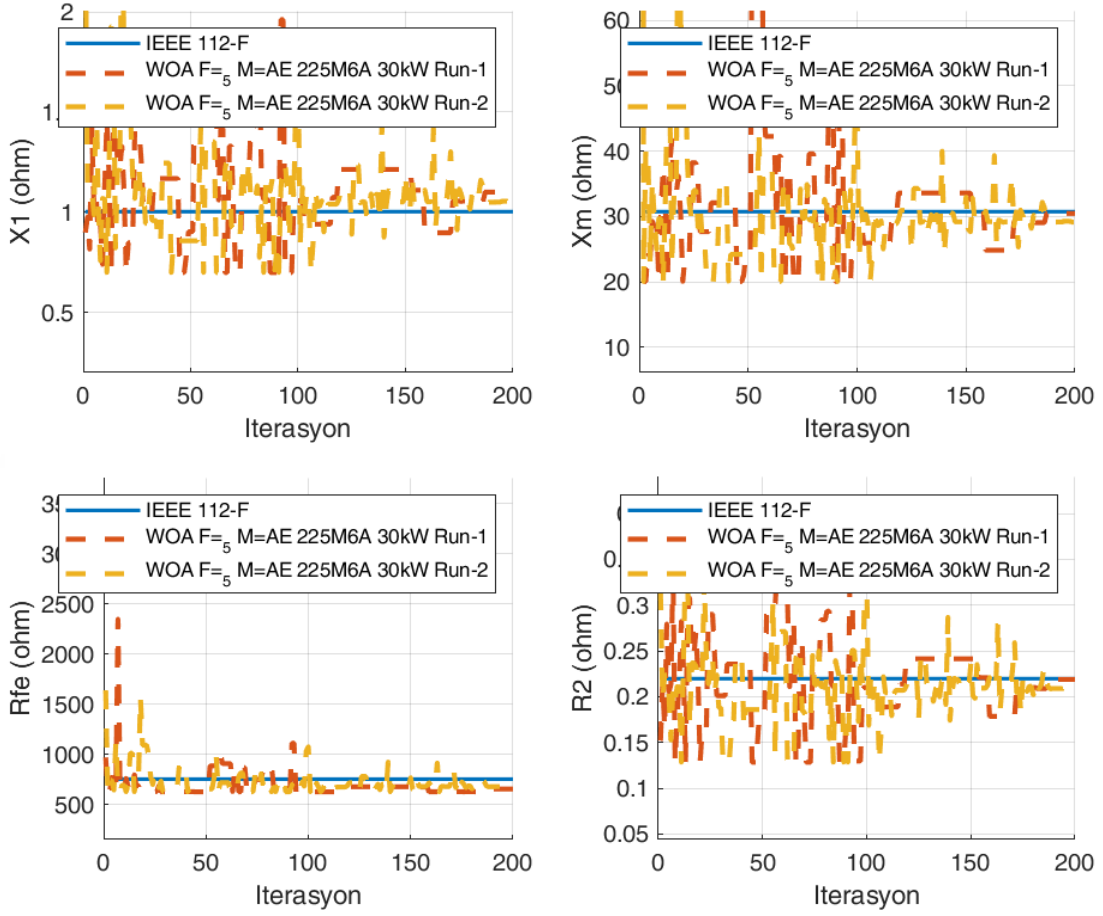
olarak tüm algoritmalar bu parametre için 28,1–29,2 Ω aralığında tahminler yapmış olup, bu da yaklaşık 1,5–2,5 Ω sapma ile çalıştıklarını göstermektedir. TSA algoritmasının Yöntem I’de tahmin ettiği 31,9 Ω değeri, bu aralıktan anlamlı biçimde ayrılmaktadır. R_{fe} yönünden en belirgin farklar gözlemlenmiştir. IEEE 112-F standardına göre bu değer 752 Ω olup, tahmin edilen değerler genellikle 1175–5091 Ω bandında yer almaktadır. Özellikle WOA ve PSO algoritmaları R_{fe} parametresi için sistematik olarak referans değer beş katı civarında değerler tahmin etmiştir. Ancak, Yöntem I’de DS algoritmasının (1175 Ω), R_{fe} için görece en yakın sonucu sunduğu ve bunu Yöntem II’de yine GA’nın 1175 Ω ile takip ettiği görülmektedir. R_2 için referans değer 0,22 Ω ’dur. Bu parametrede tüm algoritmalar istisnasız şekilde 0,18–0,21 Ω arasında çok yakın tahminler sunmuşlardır. R_2 parametresi tahmininde tüm algoritmaların yüksek kararlılığa ve genel doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Yöntem I ve II fark etmeksizin, neredeyse tüm algoritmalar rotor direnci için minimal sapma ile tahmin gerçekleştirmiştir.

Çizelge 4.13. AE_ 225M6A_ 30kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler

MOTOR		ALG	PARAMETRELER			
			$X_1(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_{fe}(\Omega)$	$R_2(\Omega)$
AE_ 225M6A_ 30kW	Yöntem I	PSO	0,80	28,6	4424	0,21
		HHO	0,93	28,9	3615	0,21
		RFA	0,80	28,6	2164	0,21
		WOA	0,80	28,6	3327	0,21
		GA	0,80	28,5	2050	0,21
		GWO	0,83	28,7	1560	0,21
		DS	0,82	28,6	1175	0,21
		TSA	0,88	31,9	4785	0,20
	Yöntem II	PSO	0,82	28,7	5091	0,21
		HHO	1,02	29,2	5091	0,20
		RFA	0,81	28,6	3812	0,21
		WOA	1,03	29,3	4629	0,21
		GA	0,80	28,1	1175	0,21
		GWO	0,84	28,6	3766	0,21
		DS	1,02	29,2	5091	0,20
		TSA	1,02	28,1	5075	0,18
	IEEE 112- F		1,00	30,7	752	0,20

Şekil 4.13’de AE_225M6A_30kW gücündeki asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin, WOA kullanılarak gerçekleştirilen iki farklı çalışmadaki (Run-1 ve Run-2) tahmin performansları görülmektedir. X_m , R_{fe} ve R_2 parametreleri, IEEE 112-F

standardına göre belirlenmiş referans değerle karşılaştırmalı bir biçimde analiz edilmektedir.



Şekil 4.13. WOA algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri

X_1 parametresi için referans değer 1,00 Ω olarak verilmiştir. Her iki çalışmada da iterasyon boyunca önemli dalgalanmalar gözlemlenmiş, ardından yaklaşık 1,03 Ω civarında sabitlenme eğilimi oluşmuştur. WOA algoritmasının X_1 için makul doğrulukla yakınsadığını, ancak iterasyonlarda kararsızlık yaşadığını göstermektedir. X_m parametresinde referans değer 30,7 Ω 'dur. Grafik incelendiğinde, Run-1 ve Run-2'de parametre tahminlerinin genel olarak dalgalı olduğu ve 150. iterasyondan sonra yaklaşık 29–30 Ω bandında kararlı hale geldiği anlaşılmaktadır. Algoritmanın mıknatıslanma reaktansı parametresi için tahmin doğruluğu yüksek olsa da, yakınsama süreci dalgalı bir eğilim göstermektedir. R_{fe} açısından en belirgin sapmaların olduğu gözlemlenmektedir. IEEE 112-F standardı 752 Ω olmasına rağmen, WOA algoritmasının her iki çalışmada da özellikle ilk 50 iterasyonda 500–2500 Ω arasında geniş spektrumda dalgalandığı ve ilerleyen iterasyonlarda ise yaklaşık 650–900 Ω bandına yakınsadığı görülmektedir. R_2

parametresi için referans değer 0,22 Ω 'dur. Run-1 ve Run-2'de elde edilen sonuçların büyük oranda 0,20–0,23 Ω aralığında seyrettiği, dolayısıyla rotor direnci parametresi için WOA algoritmasının yüksek doğruluk ile tahmin üretebildiği görülmektedir.

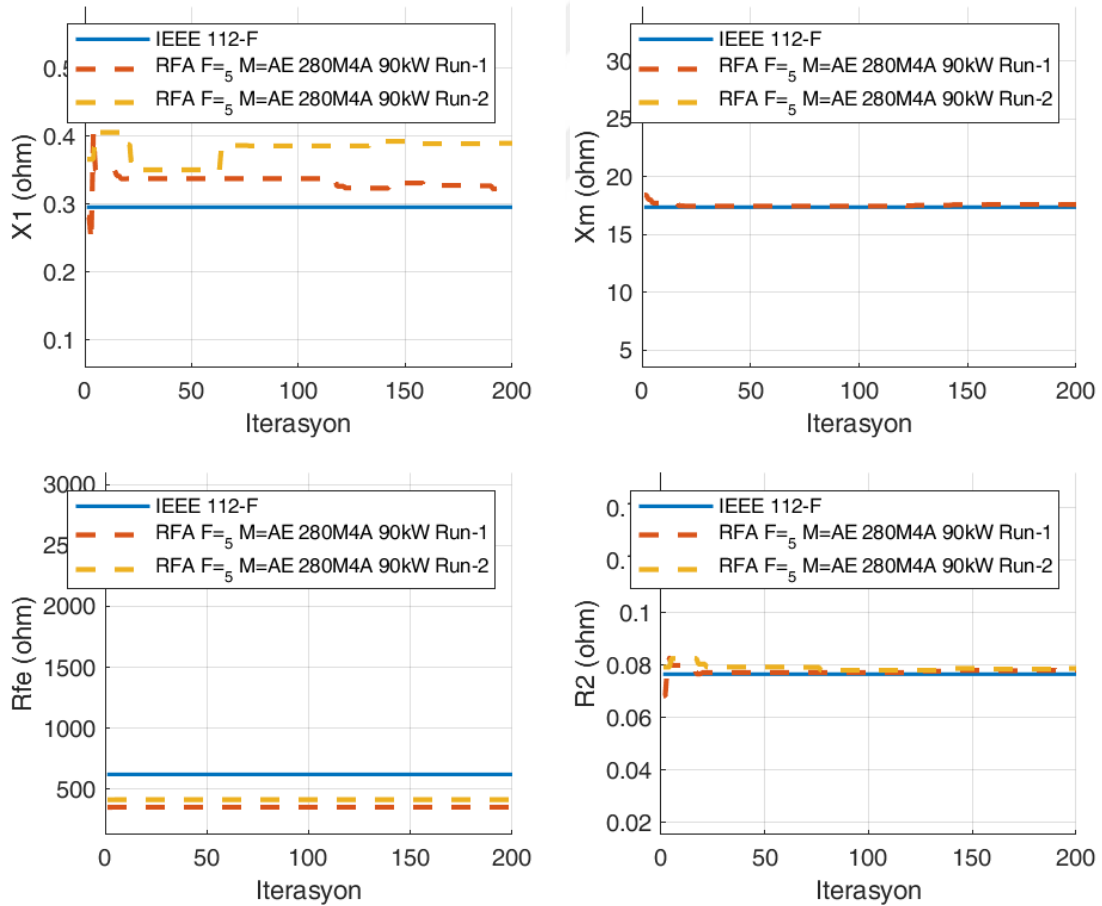
Genel olarak değerlendirildiğinde, WOA algoritmasının AE_225M6A_30kW motoruna ait parametre tahmin sürecinde özellikle X_1 ve X_m parametreleri için referans değere yakınsadığı ve R_2 için yüksek başarı sağladığı ancak R_{fe} parametresinde anlamlı sapmalar gösterdiği görülmektedir. Bu analiz, WOA algoritmasının bazı parametrelerde yüksek doğrulukla tahminler yapabildiğini, ancak yakınsama sürecinde, dalgalı bir davranış sergileyebildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.14. AE_280M4A_90kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler

MOTOR		ALG	PARAMETRELER			
			$X_1(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_{fe}(\Omega)$	$R_2(\Omega)$
AE_280M4A_90kW	Yöntem I	PSO	0,33	18,1	721	0,08
		HHO	0,33	18,0	738	0,08
		RFA	0,33	18,1	712	0,08
		WOA	0,38	18,6	740	0,08
		GA	0,40	18,8	740	0,08
		GWO	0,33	18,1	729	0,08
		DS	0,34	18,2	716	0,08
		TSA	0,34	17,9	792	0,07
	Yöntem II	PSO	0,34	18,1	720	0,08
		HHO	0,34	18,2	748	0,08
		RFA	0,33	18,0	669	0,08
		WOA	0,38	18,6	712	0,08
		GA	0,40	18,9	754	0,08
		GWO	0,34	18,5	728	0,08
		DS	0,34	18,1	716	0,08
		TSA	0,31	17,8	766	0,07
	IEEE 112- F		0,30	17,3	618	0,08

Çizelge 4.14'de AE_280M4A_90kW asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri, iki yöntem ve sekiz optimizasyon algoritmasıyla tahmin edilmiş; sonuçlar IEEE 112-F standardına göre referans değerlerle karşılaştırılmıştır. X_1 parametresi için referans değer 0,30 ohm olup, Yöntem I'de PSO, HHO, RFA ve GWO algoritmaları bu değere çok yakın tahminlerde bulunmuş; WOA ve GA algoritmaları ise daha yüksek değerler üretmiştir (0,38 ve 0,40 ohm). Yöntem II'de ise yine WOA ve GA algoritmaları dışındaki tüm algoritmalar 0,34 civarında değer üretmiştir. Bu sonuçlar, X_1 parametresi

açısından algoritmaların genel olarak oldukça başarılı tahminler sunduğunu göstermektedir. X_m parametresinin referans değer 17,3 ohm'dur. Bu değere en yakın tahminler TSA algoritması tarafından verilmiş olup (Yöntem I'de 17,9; Yöntem II'de 17,3 ohm), kalan algoritmalar genellikle 18,0–18,6 ohm aralığında değerler üretmiştir. R_{fe} parametresinde ise referans değer 618 ohm olup, tahmin edilen tüm değerlerin bu referansın üzerinde kaldığı dikkat çekmektedir. Özellikle Yöntem I ve II'de TSA algoritmasının 792 ve 766 ohm değerleriyle en yüksek sapmaları verdiği, diğer algoritmaların ise genellikle 710–750 ohm aralığında tutarlı tahminlerde bulunduğu görülmektedir. R_2 parametresi için tüm algoritmalar yüksek doğrulukta tahminler üretmiştir. Referans değer 0,08 ohm olması ve tahmin edilen değerlerin büyük ölçüde bu değere eşit çıkması, algoritmaların bu parametrede yüksek doğruluk ve kararlılık sağladığını açıkça göstermektedir. TSA algoritması ise bu parametre için 0,07 ohm tahminiyle çok küçük bir sapma göstermiştir.



Şekil 4.14. RFA algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri

Genel olarak analiz edilen tüm tahmin sonuçlarında X_1 , X_m ve R_2 parametreleri için yüksek doğruluk düzeyinde sonuçlar elde edilmiş ve algoritmalar referans değerlere son derece yakın tahminlerde bulunmuştur. R_{fe} parametresi ise görece daha büyük sapmalara maruz kalmıştır. Bununla birlikte algoritmalar arasında özellikle PSO, HHO, RFA ve DS algoritmalarının her iki yöntemde de tutarlı ve referansla uyumlu çıktılar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle DS algoritması tüm parametrelerde düşük hatalı ve kararlı sonuçlar sunarak istatistiksel olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 4.14’de AE_280M4A_90kW asenkron motorunun eşdeğer devre parametrelerine ilişkin olarak RFA algoritmasıyla yürütülen iki bağımsız çalışmanın, referans değerlere yakınsama davranışları sunulmaktadır.

X_1 parametresi için referans değer 0,30 Ω olduğu dikkate alındığında, RFA algoritması her iki çalışmada da 0,33 Ω ve 0,39 Ω civarlarında yakınsama göstermiştir. İlk 30 iterasyonda gözlemlenen düzensiz salınımlar kısa sürede yerini kararlı bir duruma bırakmıştır. X_m parametresinin referans değeri 17,3 Ω ’dur. İki çalışmada da elde edilen sonuçlar 18,0 Ω civarında sabitlenmiş ve oldukça az dalgalanma göstermiştir. RFA algoritmasının mıknatıslanma reaktansı tahmininde başarılı bir doğruluk düzeyine sahip olduğunu ve yalnızca ~0,7 Ω sapmayla referans değere yakınsadığını göstermektedir. R_{fe} parametresi için IEEE 112-F tarafından belirtilen değer 618 Ω ’dur. Bu parametrede her iki çalışmada da RFA algoritması sırasıyla yaklaşık 350 Ω ve 411 Ω aralığında bir değer üretmiştir. R_2 parametresi 0,08 Ω olarak belirlenmiş referans değere karşılık her iki çalışmada da oldukça kısa sürede ve yüksek isabetle 0,08 Ω çevresinde sabitlenmiştir. Run-2’de ilk 10 iterasyonda gözlemlenen küçük sapma da hızlı bir düzeltme ile hedef değere yaklaşmıştır. Bu sonuçlar RFA algoritmasının rotor direnci tahmininde son derece başarılı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak bakıldığında, RFA algoritması AE_280M4A_90kW motorunun parametrelerini tahmin ederken X_1 , X_m ve R_2 parametrelerinde yüksek doğruluk ve düşük hatayla çalışmış; sadece R_{fe} tahmininde sistematik sapmalar üretmiştir. Genel olarak tahminler kabul edilebilir hata aralıklarında kalmıştır.

Çizelge 4.15, AE_315M4A_132kW motorunun temel parametreleri sekiz farklı algoritma ve iki yöntemle tahmin edilmiş, sonuçlar IEEE 112-F standardına göre referans değerlerle karşılaştırılmıştır.

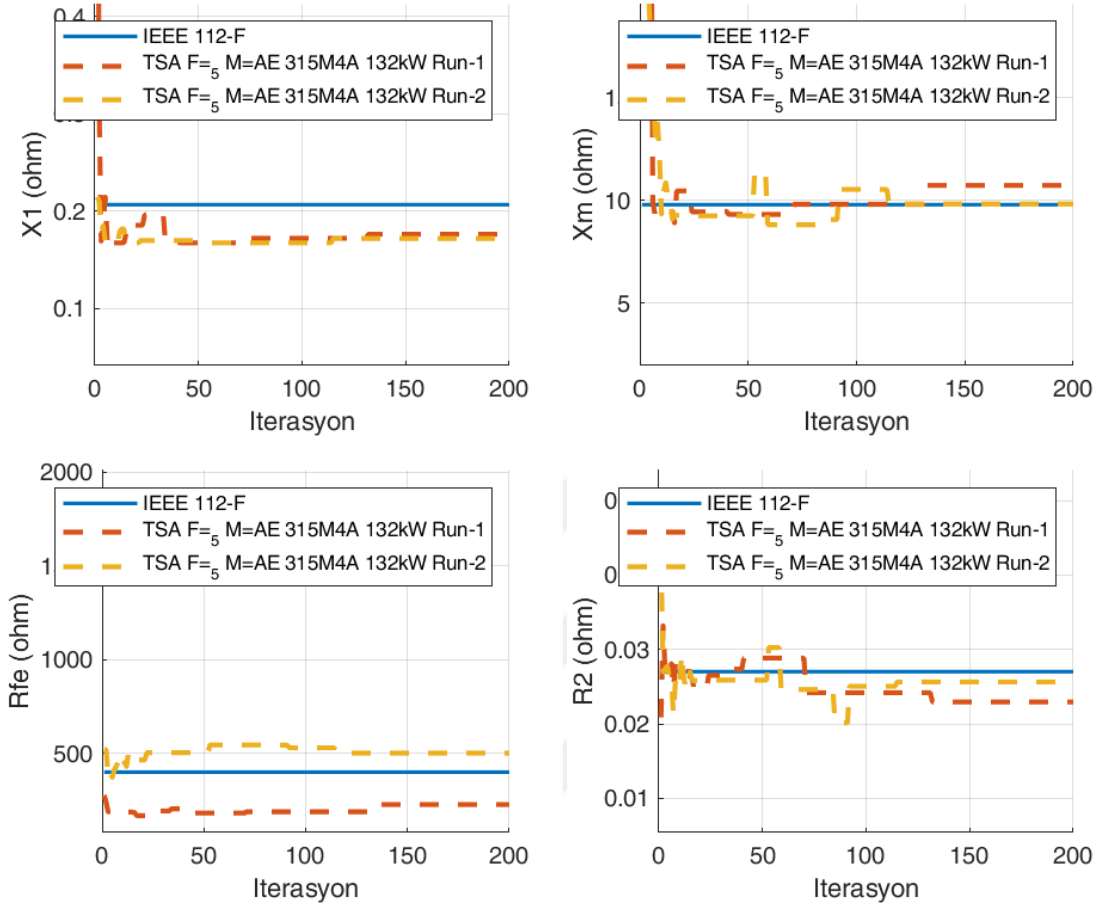
Stator kaçak reaktansı X_1 açısından değerlendirildiğinde, her iki yöntemde de tüm algoritmaların genellikle 0,17–0,18 Ω aralığında değerler ürettiği ve bu sonuçların IEEE 112-F standardındaki 0,21 Ω referans değeriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. TSA algoritması Yöntem I kapsamında bu parametreyi tam olarak 0,21 Ω ile tahmin etmiş ve referans değerle birebir örtüşmüştür. R_{fe} parametresine en yakın değeri GWO (393 Ω) algoritması üretmiş ve elde edilen sonuç başarılı bulunmuştur. Mıknatıslanma reaktansı X_m tahminleri de genel olarak 9,3 Ω seviyelerinde toplanmakta olup, 9,8 Ω olan referans değerle karşılaştırıldığında yakın bir yakınsama davranışı sergilemektedir. Rotor direnci R_2 parametresi içinse tüm algoritmalar her iki yöntemde de 0,03 Ω değeri üretmiş olup, bu durum IEEE 112-F standardı ile tam uyumluluk arz etmektedir. Bu sonuçlardan R_2 tahmininde tüm algoritmaların yüksek doğruluk gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 4.15. AE_315M4A_132kW motor için algoritmalar tarafından tahmin edilen parametreler ve IEEE 112-F yöntemi ile belirlenen parametreler

MOTOR	ALG	PARAMETRELER				
		$X_1(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_{fe}(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	
AE_315M4A_132kW	Yöntem I	PSO	0,18	9,3	546	0,03
		HHO	0,18	9,3	487	0,03
		RFA	0,17	8,8	499	0,03
		WOA	0,18	9,0	514	0,03
		GA	0,17	9,1	232	0,03
		GWO	0,17	9,2	393	0,03
		DS	0,18	9,3	546	0,03
		TSA	0,21	9,4	546	0,03
	Yöntem II	PSO	0,18	9,3	546	0,03
		HHO	0,18	9,3	482	0,03
		RFA	0,18	9,5	287	0,03
		WOA	0,18	9,3	499	0,03
		GA	0,17	9,1	383	0,03
		GWO	0,18	9,2	478	0,03
		DS	0,18	9,3	546	0,03
		TSA	0,18	9,2	428	0,03
	IEEE 112- F		0,21	9,8	401	0,03

Genel olarak değerlendirildiğinde, algoritmaların çoğu parametre tahminlerinde yüksek düzeyde bir doğruluk sergilemekte olup, özellikle X_1 , X_m ve R_2 gibi parametrelerde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. R_{fe} parametresinde ise referans değere göre bir sapma meydana gelmiştir. Bu sonuçlara bakarak söz konusu sezgisel algoritmaların yerinde müdahale gerektirmeyen uygulamalarda yüksek güvenilirlikte

sonuçlar üretmeye elverişli olduğu, tahminlerinin IEEE 112-F standardı ile tutarlı ve tekrar edilebilir nitelikte bulunduğu söylenebilir.



Şekil 4.15. TSA algoritması ilk iki tekrarda parametrelerin yakınsama grafikleri

Şekil 4.15 'te, AE_315M4A_132kW motorunun eşdeğer devre parametrelerinin tahmininde TSA algoritmasının performansı grafiksel olarak sunulmuştur. X_1 parametresi için referans değer $0,21 \Omega$ olup ve her iki çalışmada da TSA algoritmasının bu değere oldukça yakın ancak hafif altında sabitlendiği görülmektedir. Run-1 yaklaşık $0,18 \Omega$ civarında kalırken, Run-2'de $0,17 \Omega$ seviyesine kadar inen bir sabitlenme eğilimi gözlemlenmiştir. X_m parametresi açısından referans değer $9,8 \Omega$ olduğu göz önünde bulundurulduğunda TSA algoritmasının her iki çalışmada da bu değere yakınsadığı ve yaklaşık $9,8\text{--}10,5 \Omega$ aralığında sabitlendiği izlenmektedir. Bu değerler algoritmanın mıknatıslanma reaktansı için kararlı tahminler ürettiğini göstermektedir. R_{fe} parametresi için referans değer 401Ω 'dur. Run-1'de TSA algoritması yaklaşık 200Ω civarına kadar ulaşmıştır. Run-2'de ise daha yüksek (yaklaşık 500Ω) bir değer tahmini gerçekleştirilmiştir. R_2 parametresi için referans değer $0,027 \Omega$ 'dur. TSA algoritması bu

değere her iki koşulda da oldukça yakın tahminlerde bulunmuş ve yaklaşık 0,023–0,026 Ω aralığında sabitlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde TSA algoritmasının bu motor üzerinde özellikle X_1 ve R_2 parametrelerinde yüksek doğrulukla yakınsama sağladığı ve X_m için tutarlı ama referansın altında sabitlendiği ve R_{fe} için koşuma bağlı olarak daha belirgin sapmalar gösterdiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak bu bölümde, altı farklı asenkron motora ait eşdeğer devre parametrelerinin (X_1 , X_m , R_{fe} , R_2) sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak tahmin edildiği ve bu tahminlerin IEEE 112-F standardına göre belirlenen referans parametrelerle karşılaştırıldığı kapsamlı bir analiz ve değerlendirme yapılmıştır. Her bir motor için iki farklı tahmin yöntemi (Yöntem I ve II) uygulanmış ve her yöntemde sekiz farklı algoritmanın (PSO, HHO, RFA, WOA, GA, GWO, DS, TSA) performansı dikkate alınmıştır.

Yapılan analizlerde R_2 parametresi için tüm algoritmaların oldukça yüksek bir tahmin doğruluğu sunduğu gözlemlenmiştir. Neredeyse tüm motorlarda, algoritmalar R_2 değerini IEEE 112-F referans değerini isabetle tahmin etmiştir. Özellikle DS, PSO ve TSA algoritmaları bu parametrede hem yöntemler arasında hem de motorlar arası tutarlılığı en yüksek olan algoritmalarlardır.

X_1 parametresi için elde edilen tahminlerde genel olarak düşük sapma oranları gözlemlenmiştir. Tahmin edilen değerler çoğu durumda IEEE 112-F referans değerlerine $\pm 0,03 \Omega$ 'luk bir değer ile yaklaşmıştır. GA algoritması bazı motorlarda X_1 için sistematik olarak yüksek değerler üretmiş bu da bu algoritmanın diğerlerine kıyasla X_1 tahmininde daha hatalı çıktılar verdiğini göstermiştir. PSO, HHO, DS ve RFA algoritmaları ise X_1 için doğru tahminleri ile öne çıkmıştır.

X_m parametresi açısından algoritmaların performansı genel olarak tutarlıdır. Tahmin edilen değerler genellikle referans değer $\pm 1,0$ – $2,0 \Omega$ civarında seyrettiği ve bu durum algoritmaların X_m üzerinde yüksek düzeyde doğruluk sağladığını göstermiştir. TSA algoritması, bazı motorlar için X_m değerinde referansla birebir örtüşen tahminler üretmiş ve özellikle DS ve PSO ile birlikte dikkat çekici bir kararlılık sunmuştur.

R_{fe} parametresi tüm motorlar için algoritmaların en yüksek sapma gösterdiği parametre olarak öne çıkmıştır. Tahmin edilen R_{fe} değerleri, çoğunlukla IEEE 112-F

standardında belirtilen referans değerlerin %20 ila %100 üzerinde kalmıştır. Bu sonuç asenkron motor parametre tahmininde kısıtlı olan giriş verilerinden kaynaklanmaktadır. Ancak R_{fe} parametresi asenkron motor karakteristiğinde verim değerini en az etkileyen parametredir. Bu sebeple R_{fe} parametresindeki bu sapmalar motor verim analizine çok fazla etki etmemektedir.

Her iki yöntem genel olarak benzer doğruluk düzeyleri sunmuştur. Ancak bazı motorlarda (örneğin AE_225M6A_30kW ve AE_200L6B_22kW) Yöntem II'nin daha kararlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yöntem I ve II arasında belirgin bir fark bulunmamakla birlikte Yöntem II tahminlerinin kısmen daha az hata sonuçlandığı durumlar görülmüştür.

Bu bölümde anlatılan şekillere ek olarak Ek-A'da AE_200L6B_22kW motor için algoritmaların (GA, PSO, DS, TSA, GWO, WOA, RFA ve HHO) ilk iki çalıştırma (RUN) parametrelerin (X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2) yakınsama grafikleri ve Ek-B'de AE_200L6B_22kW motor Yöntem I ve Yöntem II ile elde edilen simülasyon grafikleri paylaşılmıştır. Bu grafiklerde tüm algoritmaların aynı motor için yakınsama, tork-hız ve yükleme faktörü grafikleri gösterilmektedir.

Sonuç olarak sezgisel algoritmaların eşdeğer devre parametrelerinin tahmininde genel olarak güvenilir sonuçlar sunduğu özellikle X_1 , X_m ve R_2 parametrelerinde yüksek doğruluk düzeyine ulaşıldığı ancak R_{fe} içinse görece daha yüksek sapmalarla karşılaşıldığı görülmüştür. Bu sonuçlar bu algoritmaların IEEE 112-F standardı ile uyumlu olacak biçimde sahada motor parametre ve verim belirleme süreçlerinde kullanılabilecek uygunlukta olduğunu ortaya koymaktadır.

5. DENGESİZ GERİLİMLERDE YERİNDE VERİM TAHMİNİ

Elektrik şebekelerinde görülen üç fazlı gerilimlerin simetrik olmaması, gerilim dengesizliği (voltage unbalance) olarak tanımlanmakta ve özellikle endüstriyel ortamlarda çalışan asenkron motorların performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Gerilim dengesizliği; fazlar arası gerilim genliklerinin eşit olmaması ya da faz açılarındaki simetrinin bozulması sonucu oluşur ve bu durum motorların tork-kararlılığını, akım simetrisini ve dolaylı olarak verimliliğini etkileyebilir. Gerilim dengesizliği pozitif ve negatif sekans gerilim değerleri kullanılarak eşitlik (2.16) ile hesaplanmaktadır.

NEMA MG 1 standardı, gerilim dengesizliğinin %5'in üzerine çıkmaması gerektiğini belirtmektedir (Association, 2011). Ancak güç sistemlerinde, büyük tek fazlı yüklerin beslenmesi, açık üçgen transformatör bağlantıları ya da kondansatör panolarındaki sigorta arızaları gibi nedenlerle bu sınırların aşılması oldukça sık karşılaşılan bir durumdur.

Bu tür koşullarda asenkron motorların doğrudan verim ölçümleri yapmak müdahaleci ve maliyetli olduğundan, yerinde ve müdahalesiz tahmin yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Al-Badri ve ark. (2015); (Aminu, 2020) tarafından geliştirilen algoritmalar, farklı dengesizlik seviyelerinde motor verimliliğinin tahmini için bazı yaklaşımlar sunmaktadır.

Al-Badri ve ark. (2015) dengesiz gerilim altında çalışan üç fazlı asenkron motorlar için IEEE Form F2 ve Method F1'e dayalı olarak genetik algoritma ile desteklenen yerinde verim tahmin algoritması önermiştir. Bu yöntemde yalnızca tam yük altında motor terminalinden ölçülen RMS gerilim, akım, giriş gücü ve hız bilgisi yeterlidir.

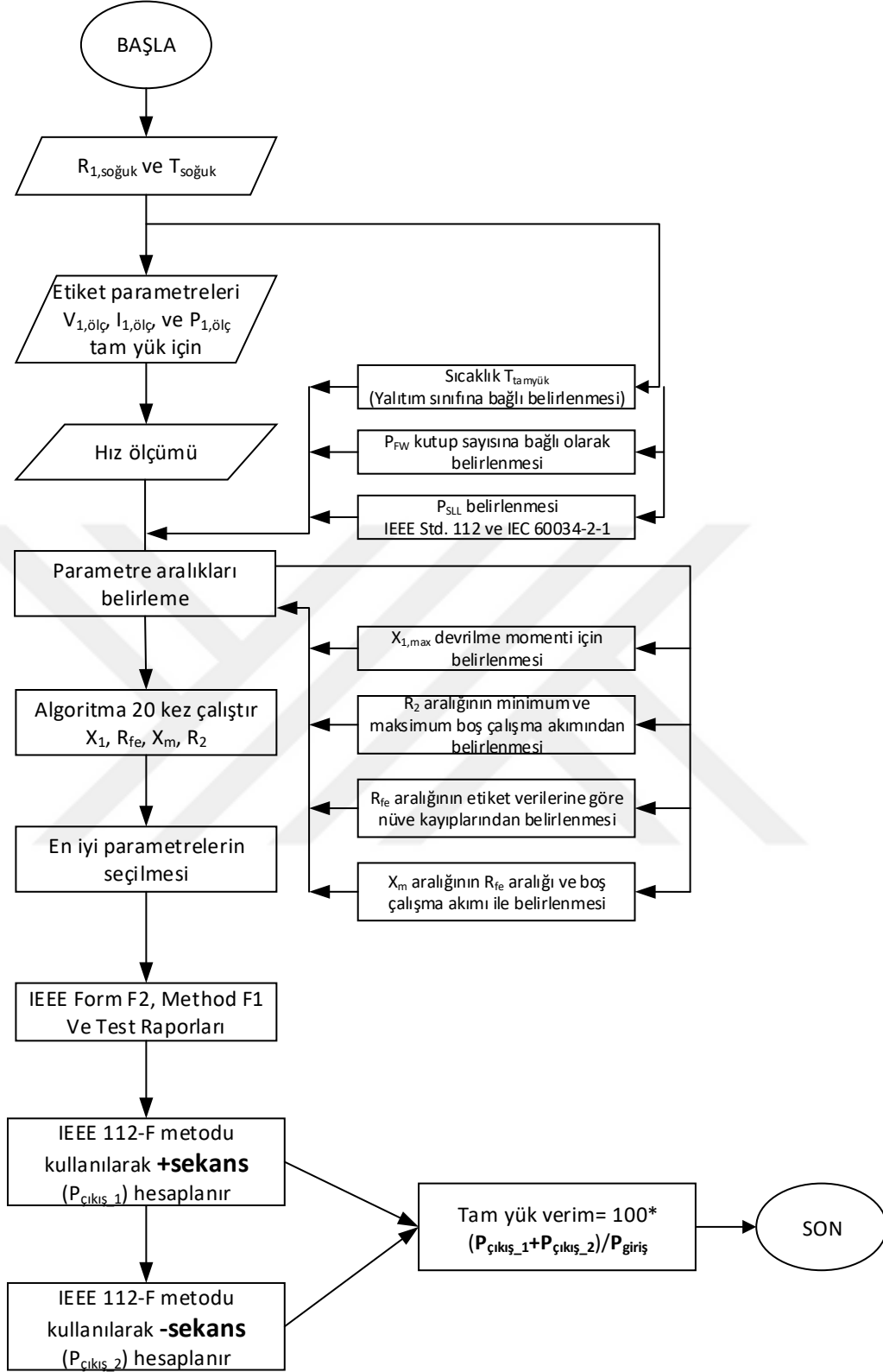
Benzer şekilde Aminu (2020) tarafından önerilen NFEE (Non-Intrusive Field Efficiency Estimation) yöntemi, modifiye edilmiş ters Γ -model eşdeğer devre üzerinden parametrik tanımlama yaparak motor verimini dengesiz gerilim altında tahmin etmektedir. Bu yöntemde hava aralığı torku ile sürtünme ve rüzgâr kayıpları doğrudan terminal ölçümlerinden çıkarılabilmekte ve yüksek doğrulukta verimlilik tahmini elde edilebilmektedir.

Bu yöntemlerin temel avantajı, motorun işletme koşullarında (in-situ) çalışmasının bozulmadan, yani motorun durdurulmasına gerek kalmadan kullanılabilmeleridir. Ayrıca, dengesiz gerilim kaynaklı rotor ve stator akım

dengelesizliklerinin analiz edilmesine olanak tanınmaları ve verim tahmini dışında motor güvenliği açısından da katkı sunmaktadır. Dengesiz gerilim koşulları altında çalışan asenkron motorlar için verim tahmini, geleneksel yöntemlerin kısıtları göz önünde alındığında, geliştirilen optimizasyon tabanlı ve müdahalesiz yöntemlerle daha hassas ve uygulanabilir hale gelmiştir. Bu yöntemler sayesinde hem enerji verimliliği artırılabilir hem de motor ömrü uzatılabilir.

Bu bölümde, asenkron motorların dengesiz gerilimlerde yerinde verim ve parametre tahmini için PSO algoritması uygulanmış ve karşılaştırılmıştır. Yöntemin temel varsayımı, stator sargısının soğuk direnci ile soğuk durum sıcaklığının veri sayfalarından veya motor çalıştırılmadan önce elde edilmiş olmasıdır. Ayrıca rotor kaçak reaktansı (X_2), stator kaçak reaktansı (X_1) ve motorun NEMA tasarım sınıfına göre belirlenen sabit oranlar kullanılarak tahmin edilmektedir.

Daha önce olduğu gibi altı parametreden dördü tahmin edilecektir; stator kaçak reaktansı X_1 , nüve kayıp direnci R_{fe} , mıknatıslanma kaçak reaktansı X_m ve rotor direnci R_2 . Önerilen yöntemi tam olarak gösteren bir akış şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Algoritmanın ilk giriş verisi stator sargısı soğuk direnci $R_{1,soğuk}$ ve soğuk sıcaklık $T_{soğuk}$ için önceden belirlenmiş değerlerdir. Daha sonra algoritmaya üç faz için hat gerilimi, üç faz hat akımı, toplam giriş gücü, etiket verileri, tam yük rms ölçülen değerleri girilir. Motorun sıcaklığı, kutup sayısına göre belirlenen fan kaybı ve dağılma yük kayıpları gibi ek bilgiler, standartlara (IEEE 112 ve IEC 60034-2-1) göre hesaplanır. Devamında X_1 , R_{fe} , X_m ve R_2 parametreleri için sınırlar tanımlanır ve algoritma 20 kez çalıştırılarak en iyi parametre seti seçilir. Bu parametreler IEEE Form F2 ve Method F1’e göre doğrulanır. Daha sonra IEEE 112-F metoduna göre pozitif ve negatif sekans güç bileşenleri hesaplanır ve nihai tam yük verimi, bu bileşenler üzerinden hesaplanarak elde edilir.



Şekil 5.1. Dengesiz gerilim altında çalışan ASM verim belirleme algoritma akış şeması

5.2 Tam Yük İçin Kaçak Yük Kaybı Belirlenmesi

Motor verimliliğinin hassas şekilde belirlenebilmesi açısından kaçak yük kaybı (P_{SLL}) oldukça önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. IEEE Std 112-B standardı,

literatürde kaçak yük kaybının ölçülmesine yönelik en uygun yöntemlerden biri olarak kabul edilmiştir (Committee, 2018). IEC 60034-2-1 ve JEC 37 gibi diğer uluslararası standartlar ise kaçak yük kaybını doğrudan ölçmek yerine varsayımsal sabit oranlarla tanımladıkları için, motor verimini olduğundan daha yüksek tahmin etme eğilimindedirler (Cao, 2009; Pillay ve ark., 2016).

Öte yandan, IEEE Std 112-B standardı da her zaman ölçüm yapmanın mümkün olmadığı durumlar için motorun güç değerine dayalı olarak kaçak yük kaybını deneysel verilere göre belirler. Ancak belirlenen bu değerlerin de gerçekteki kaçak yük kaybını olduğundan düşük gösterdiği ve dolayısıyla verim hesaplarının hatalı sonuçlara yol açabileceği bazı çalışmalarda ortaya konulmuştur (Al-Badri ve ark., 2015; Aminu, 2020). Yazarların kendi deneysel çalışmalarında da bu gözlem doğrulanmıştır ve varsayılan değerlerin gerçek değerlerin altında kaldığı belirtilmektedir.

Kaçak yük kaybının ölçümü kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, sıcaklık değişimleri, tork salınımları ve gerilim-faz dengesizliklerinden etkilenmektedir. Özellikle gerilim dengesizliği faktörü (VUF), hem büyüklük hem de açı olarak çok sayıda kombinasyona sahip olduğundan her motor için farklı kayıp değerlerine yol açmakta ve kaçak yük kaybının tahmininde yüksek derecede belirsizlik oluşturmaktadır (Ghasemi Bijan, 2019).

Bu sebeple, müdahaleci testlerin uygulanamadığı, yerinde (in-situ) tahmin yöntemlerinde önerilen algoritmalar, doğrudan ölçüm yerine geçmiş deneysel verilere dayanmaktadır. Bu çalışmada, kaçak yük kaybının makul şekilde tahmin edilebilmesi için dengeli gerilim koşullarında elde edilen deneysel test sonuçları kullanılmıştır. Ancak ölçümler dengeli besleme altında gerçekleştirildiğinden, aynı motorun dengesiz gerilim altında çalışması durumunda daha yüksek kaçak yük kaybı oluşması muhtemeldir.

Öte yandan, IEC 60034-2-1 standardına göre eşitlik (3.3)'e göre yapılan hesaplamalar, yukarıda belirtilen nedenlerle gerçekteki kayıpları aşırı tahmin edebilir. Bu nedenle, kaçak yük kaybının daha doğru tahmini için ölçülen değer ile IEC standardına göre hesaplanan değerlerin ortalamasının alınması önerilmektedir (Aminu, 2020; Chirindo, 2020). Bu yaklaşım, dengesiz besleme altındaki koşullarda çalışan motorlar için daha temsili bir verim değeri elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

5.3 Sürtünme ve Rüzgâr Kayıplarının Belirlenmesi

Dengesiz gerilimlerle çalışan endüksiyon motorlarındaki ilave ısınma, bakır kaybındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Negatif sekans akımı motorun ısınması açısından daha kötü bir etkiye sahiptir. Öte yandan, çekirdek kaybı ile sürtünme ve rüzgar kayıpları, negatif sekans gerilimi %15'in altında kaldığı sürece bu dengesizlikten büyük ölçüde etkilenmez (Gafford ve ark., 1959). Bu çalışmada, tüm testler NEMA tarafından belirlenen %5 dengesizlik sınırı dahilinde gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ve rüzgâr kayıplarının belirlenmesinde Bölüm 3'teki yöntem izlenmiştir.

5.4 Pozitif ve Negatif Sekans Bileşenlerinin Belirlenmesi

Üç fazlı güç sistemlerinde simetri ideal bir durumdur ancak uygulamada, özellikle dağıtım şebekelerinde ve yük dengesizliklerinde gerilimler genellikle simetrik değildir. Gerilim dengesizliği durumlarında fazlar arasında genlik veya faz farkı oluşarak sistem performansını olumsuz yönde etkileyen sekans bileşenleri meydana gelir. Simetrik bileşenler teorisine dayanan bu yaklaşımda üç fazlı bir sistem pozitif, negatif ve sıfır bileşenlere ayrıştırılır (Fortescue, 1918). Pozitif sekans bileşeni dengeli ve ileri yönlü dönen bileşeni temsil ederken, negatif sekans bileşeni ters yönlü dönen ve genellikle verim düşüşüne, ısınmaya ve tork salınımlarına neden olan bir unsurdur (Aminu, 2020). Bu nedenle negatif sekans bileşenlerinin hassas biçimde belirlenmesi özellikle asenkron motorların dengesiz gerilim altındaki çalışma koşullarının modellenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu bölümde pozitif ve negatif sekans bileşenlerinin matematiksel olarak nasıl belirlendiği ve motor verimliliği üzerindeki etkileri incelenecektir.

Simetrik bileşenler yöntemi ile üç fazlı (a, b, c) bir sistemin faz gerilimleri veya akımları; pozitif (V_1), negatif (V_2) ve sıfır (V_0) bileşenlerine ayrıştırılır. Dengesiz bir sistemde bu bileşenlerin büyüklüğü ve faz farkları sistemin simetriden ne kadar uzaklaştığını gösterir. Hat gerilimleri ve açılar aşağıda verilen bir dizi eşitlikler ile belirlenmektedir (Gross, 2006; Al-Badri, 2015).

$$\theta_{ab} = 0 \quad (5.1)$$

$$\theta_{V_{ab-bc}} = \cos^{-1} \left(\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 - V_{ca}^2}{2V_{ab}V_{bc}} \right) \quad (5.2)$$

$$\theta_{V_{bc-ca}} = \cos^{-1} \left(\frac{V_{bc}^2 + V_{ca}^2 - V_{ab}^2}{2V_{bc}V_{ca}} \right) \quad (5.3)$$

$$\theta_{V_{bc}} = -180 + \theta_{V_{ab-bc}} \quad (5.4)$$

$$\theta_{V_{ca}} = \theta_{V_{ab-bc}} + \theta_{V_{bc-ca}} \quad (5.5)$$

Pozitif ve negatif sekans gerilimleri V_1 ve V_2 eşitlik (5.6) ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Burada D değeri,

$$D = \begin{bmatrix} 1 - a^2 & 1 - a \\ a^2 - a & a - a^2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Burada $a = -0.5 + j0.866$ olarak alınmaktadır.

Üç fazlı sistemin dengesiz faz gerilimleri V_a , V_b ve V_c eşitlik (5.8) ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Burada A değeri,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Bu hesaplamalardan sonra V_a faz gerilimini referans değer olarak kabul edilir ve V_a geriliminin faz açısının mutlak değerini diğer faz ve hat açılarına ekleyerek yeni açılarını aşağıdaki eşitliklerde gösterildiği şekilde belirlenmektedir (Gross, 2006; Al-Badri, 2015).

$$\theta_{V_{a,yeni}} = \theta_{V_a} + |\theta_{V_a}| = 0^\circ \quad (5.10)$$

$$\theta_{V_{b,yeni}} = \theta_{V_b} + |\theta_{V_a}| \quad (5.11)$$

$$\theta_{V_{c,yeni}} = \theta_{V_c} + |\theta_{V_a}| \quad (5.12)$$

$$\theta_{V_{ab,yeni}} = \theta_{V_{ab}} + |\theta_{V_a}| \quad (5.13)$$

$$\theta_{V_{bc,yeni}} = \theta_{V_{bc}} + |\theta_{V_a}| \quad (5.14)$$

$$\theta_{V_{ca,yeni}} = \theta_{V_{ca}} + |\theta_{V_a}| \quad (5.15)$$

$$\theta_{V_{1,yeni}} = \theta_{V_1} + |\theta_{V_a}| \quad (5.16)$$

$$\theta_{V_{2,yeni}} = \theta_{V_2} + |\theta_{V_a}| \quad (5.17)$$

Giriş akımlarının açıları da aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak hesaplanır.

$$\theta_{I_a} = \cos^{-1} \left| \frac{P_a}{V_a I_a} \right| \quad (5.18)$$

$$\theta_{I_b} = \cos^{-1} \left| \frac{P_b}{V_b I_b} \right| \quad (5.19)$$

$$\theta_{I_c} = \cos^{-1} \left| \frac{P_c}{V_c I_c} \right| \quad (5.20)$$

Burada

P_a a fazına ait ölçülen giriş gücü

V_a a fazına ait hesaplanan gerilim değeri

I_a a fazına ait ölçülen giriş akımı

P_b b fazına ait ölçülen giriş gücü

V_b b fazına ait hesaplanan gerilim değeri

I_b b fazına ait ölçülen giriş akımı

P_c c fazına ait ölçülen giriş gücü

V_c c fazına ait hesaplanan gerilim değeri

I_c c fazına ait ölçülen giriş akımı

Pozitif ve negatif sekans akımları aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

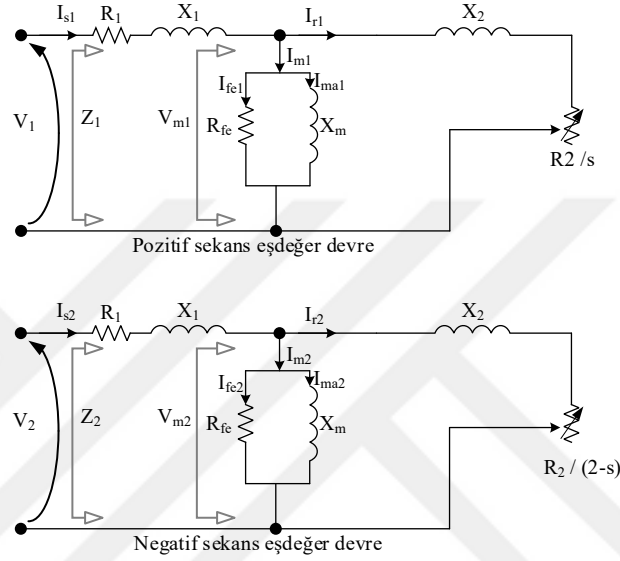
$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Burada A^{-1} değeri,

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

5.5 Dengesiz Gerilimlerde Asenkron Motor Eşdeğer Devresi ve Amaç Fonksiyonu

Asenkron motor eşdeğer devre parametrelerinden X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2 değerleri optimizasyon algoritmaları aracılığıyla tahmin edilmektedir. Verim tahmini akış şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Algoritmada amaç fonksiyonu hem pozitif hem de negatif sekans devreleri için çalıştırılmaktadır. Şekil 5.2’de gösterilen pozitif ve negatif sekans eşdeğer devresi için hesaplamalar aşağıda gösterilmektedir (Zocholl ve ark., 2007; Al-Badri, 2015; Aminu, 2020) .



Şekil 5.2. Pozitif ve negatif sekans eşdeğer devre (Zocholl ve ark., 2007)

$$Y_m = \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_{fe}} \quad (5.23)$$

$$Y_r = \frac{1}{\frac{R_2}{s_1} + jX_2} \quad (5.24)$$

$$Z_r = \frac{1}{Y_m + Y_r} \quad (5.25)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (5.26)$$

$$Z = Z_1 + Z_r \quad (5.27)$$

$$I_{s1} = \frac{V_1}{Z} \quad (5.28)$$

$$I_{r1} = I_{s1} \left[\frac{1/(Y_m + Y_r)}{1/Y_r} \right] \quad (5.29)$$

$$I_{m_1} = I_{s_1} - I_{r_1} \quad (5.30)$$

$$V_{m_1} = \frac{I_{m_1}}{Y_m} \quad (5.31)$$

$$Z_m = \frac{V_1}{I_{s_{1m}}} \quad (5.32)$$

Burada

Y_m	faz mıknatıslanma admitansı
X_m	faz mıknatıslanma kaçak reaktansı
R_{fe}	faz nüve kaybı direnci
Y_r	faz rotor admitansı
R_2	faz rotor direnci
X_2	faz rotor kaçak reaktansı
s_1	pozitif sekans kayma
Z_r	faz rotor ve mıknatıslanma devresi toplam empedansı
R_1	faz stator direnci
Z	faz toplam empedans
V_1	pozitif sekans faz gerilimi
I_{s_1}	pozitif sekans tahmin edilen stator akımı
I_{r_1}	pozitif sekans tahmin edilen rotor akımı
I_{m_1}	pozitif sekans tahmin edilen toplam mıknatıslanma devresi akımı
V_{m_1}	pozitif sekans tahmin edilen mıknatıslanma devresi gerilimi
Z_m	pozitif sekans ölçülen akıma bağlı olarak hesaplanan faz empedansı
$I_{s_{1m}}$	pozitif sekans ölçülen akım

Stator ve rotor dirençleri tam yük sıcaklık değerlerine göre aşağıda verilen formüllerle tekrar belirlenir.

$$R_{1,sıcak} = \frac{R_1(T_{tamyük} + K_1)}{T_{soğuk} + K_1} \quad (5.33)$$

$$R_{2,sıcak} = \frac{R_2(T_{tamyük} + K_2)}{T_{soğuk} + K_2} \quad (5.34)$$

Toplam nüve kayıpları, stator ve rotor bakır kayıpları aşağıda belirtilen eşitliklerden yararlanılarak tahmin edilir.

$$P_{nüve} = \frac{V_{m1}^2}{R_{fe}} \quad (5.35)$$

$$P_{scl} = 3I_{s1}^2 R_{1,sıcak} \quad (5.36)$$

$$P_{rcl} = 3I_{r1}^2 R_{2,sıcak} \quad (5.37)$$

Burada

$P_{nüve}$ toplam nüve kayıpları

P_{scl} toplam stator bakır kayıpları

P_{rcl} toplam rotor bakır kayıpları

Toplam kayıplar aşağıdaki eşitlik ile belirlenir

$$P_{top,kayıp} = P_{nüve} + P_{scl} + P_{rcl} + P_{fw} + P_{SLL} \quad (5.38)$$

Tahmin edilen çıkış gücü aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir.

$$P_{çıkış} = P_{giriş,tamyük} - P_{top,kayıp} \quad (5.39)$$

Toplam giriş gücü şu şekilde hesaplanır.

$$P_{giriş,hes1} = 3\text{real}(V_1 I_{s1}^*) \quad (5.40)$$

$$P_{giriş,hes2} = 3\text{real}(V_1 I_{s1}^*) \quad (5.41)$$

Burada,

$P_{giriş,hes1}$ ölçülen akım ile belirlenen giriş gücü

I_{s1m}^*	pozitif sekans ölçülen stator akımı eşleniği
$P_{giriş,hes2}$	hesaplanan akım değeri ile belirlenen giriş gücü
I_{s1}^*	pozitif sekans tahmin edilen stator akımı

Ölçülen ve tahmin edilen verilerin hata oranlarının mutlak değerlerinin toplanmasıyla elde edilen amaç fonksiyonu aşağıdaki eşitliklerde gösterilmektedir (Al-Badri, 2015).

$$f_1 = \frac{real(I_{s1m}) - real(I_{s1})}{real(I_{s1m})} \quad (5.42)$$

$$f_2 = \frac{imag(I_{s1m}) - imag(I_{s1})}{imag(I_{s1m})} \quad (5.43)$$

$$f_3 = \frac{P_{giriş,hes1} - P_{giriş,hes2}}{P_{giriş,hes1}} \quad (5.44)$$

$$f_4 = \frac{\theta_{zm} - \theta_z}{\theta_{zm}} \quad (5.45)$$

$$f_5 = \frac{P_{çıkış,etiket} - P_{çıkış,tah}}{P_{çıkış,etiket}} \quad (5.46)$$

$$ff_{amaç} = |f_1| + |f_2| + |f_3| + |f_4| + |f_5|$$

5.6 IEEE 112-F1 Metodu Hesaplamaları

IEEE Std. 112'nin F1 Metodu, önerilen eşdeğer devreye dayalı olarak verim hesaplamak için kullanılır. Bu hesaplamalar, Şekil 5.2'de gösterilen pozitif ve negatif sekans eşdeğer devrelerine uygun şekilde, Form F2'de yer alan eşitlikler (Committee, 2018) esas alınarak düzenlenmiştir. Toplam giriş gücü, çıkış gücü ve kayıpların belirlenmesinde süperpozisyon yöntemi uygulanmakta; böylece motor verimi, her iki sekansın etkisi göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Kullanılan eşitlikler aşağıda sunulmaktadır (Al-Badri, 2015; Aminu, 2020).

$$G_2 = \frac{s}{R_2} \quad (5.47)$$

$$G_m = \frac{R_e}{Z_m^2} \quad (5.48)$$

$$G = G_2 + G_m \quad (5.49)$$

$$B_m = -\left(\frac{X_m}{Z_m^2}\right) \quad (5.50)$$

$$B = B_m \quad (5.51)$$

$$Y_2^2 = G^2 + B^2 \quad (5.52)$$

$$R_g = \frac{G}{Y_2^2} \quad (5.53)$$

$$R = R_1 + R_g \quad (5.54)$$

$$X_g = -\left(\frac{B}{Y_2^2}\right) \quad (5.55)$$

$$X = X_1 + X_g \quad (5.56)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.57)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z} \quad (5.58)$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 \times Y_2^2}} \quad (5.59)$$

$$P_s = 3I_1^2 R \quad (5.60)$$

$$P_r = 3I_2^2 \left(\frac{R_2}{s_1}\right) \quad (5.61)$$

$$P_{scl} = 3I_1^2 R \quad (5.62)$$

$$P_{rcl} = s_1 P_r \quad (5.63)$$

$$P_{n\ddot{u}ve} = 3I_1^2 \left(\frac{G_m}{Y_2^2}\right) \quad (5.64)$$

$$P_{top,kayıp} = P_{scl} + P_{rcl} + P_{n\ddot{u}ve} + P_{fw} + P_{SLL} \quad (5.65)$$

$$P_{mek,1} = P_s - P_{tp,kayıp} \quad (5.66)$$

$$s_2 = 2 - s_1 \quad (5.67)$$

G_2	rotor kondüktansı
G	rotor ve manyetik devre toplam kondüktansı
B_m	mıknatıslanma suseptansı
B	rotor ve manyetik devre suseptansı
Y_2	rotor ve mıknatıslama devresi admitansı
R_g	rotor ve mıknatıslama devresi direnci
R	eşdeğer devrenin toplam direnci
X_g	rotor ve mıknatıslama devresi reaktansı
X	eşdeğer devrenin toplam reaktansı
Z	eşdeğer devrenin toplam empedansı
I_1	stator akımı
I_2	rotor akımı
P_s	stator gücü
P_r	rotor gücü
P_{scl}	stator bakır kaybı
$P_{nüve}$	nüve kaybı
P_{rcl}	rotor bakır kaybı
$P_{top,kayıp}$	toplam kayıp
$P_{mek,1}$	pozitif sekans dönüştürülen güç
$P_{mek,2}$	negatif sekans dönüştürülen güç
s_1	pozitif sekans kayma
s_2	negatif sekans kayma
η	verim

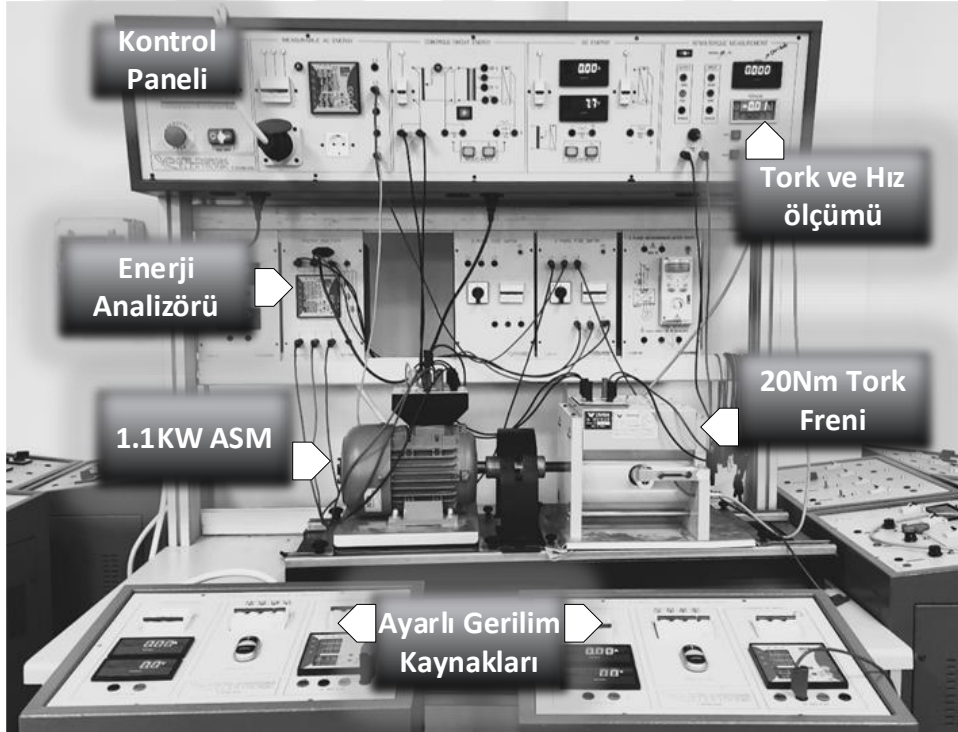
Pozitif sekans kayma değeri s_1 , negatif sekans kayması s_2 ile ve pozitif sekans giriş gerilimi V_1 , negatif sekans giriş gerilimi V_2 ile değiştirilerek yukarıda verilen eşitlik

dizisi (5.47)-(5.66) kullanılarak negatif sekans çıkış gücü $P_{mek,2}$ hesaplanır. Burada eşitlik (5.65) te negatif sekans toplam kayıplarının hesaplanmasında rüzgâr-sürtünme kayıpları ve kaçak kayıplar dikkate alınmaz. Daha sonra elde edilen pozitif sekans çıkış gücü ile negatif sekans çıkış kullanılarak aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi motor verimi tahmin edilir.

$$\eta = \frac{P_{mek,1} + P_{mek,2}}{P_s} \quad (5.68)$$

5.7 DeneySEL Sonuçlar

Bu çalışmada dengesiz gerilim koşullarında asenkron motor performansını değerlendirmek amacıyla kontrollü bir laboratuvar deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneği Şekil 5.3'te gösterilmekte olup temel olarak bir asenkron motor, manyetik yükleme ünitesi (manyetik tork freni), güç analizörleri ve kontrol panellerinden oluşmaktadır. Uygulamada GAMAK marka 1.1 kW gücünde üç fazlı asenkron motor kullanılmıştır. Motor miline 20Nm'ye kadar tork uygulayabilen ayarlanabilir bir manyetik fren sistemi bağlanmıştır. Bu sayede motor farklı yükleme seviyelerinde test edilebilmiştir.



Şekil 5.3. Asenkron motor dengesiz gerilim deney düzeneği

Deneyde kullanılan test düzeneğinde, faz bazında gerilimleri ayrı ayrı kontrol edebilen üç adet ayarlanabilir gerilim kaynağı kullanılmıştır. Bu sayede sistemdeki gerilim dengesizliği kontrollü olarak oluşturulmuş ve motorun farklı gerilim seviyeleri altındaki tepkileri gözlemlenmiştir. Deney süresince motorun uçlarına uygulanan gerilim, akım, aktif ve reaktif güç, giriş gücü, hız ve tork gibi veriler, yüksek hassasiyetli dijital analizörler aracılığıyla sürekli olarak kaydedilmiştir.

Deneyler kapsamında motor öncelikle tamamen dengeli üç fazlı gerilim altında çalıştırılmış ve bu durum referans kabul edilmiştir. Daha sonra gerilim dengesizliği kademeli olarak artırılarak sırasıyla %1, %2, %3, %4 ve %5 uygulanmıştır. Gerilim dengesizliği, negatif sekans geriliminin pozitif sekans gerilimine oranı olarak tanımlanan VUF (Voltage Unbalance Factor) ile ifade edilmiştir. Her bir dengesizlik seviyesinde, motor %25, %50, %75 ve %100 olmak üzere dört farklı yükleme düzeyinde test edilmiştir. Bu sayede, gerilim dengesizliğinin hem düşük hem de yüksek yük koşullarında motor performansı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. 1,1kW ASM un etiket değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneyde kullanılan 1,1kW ASM etiket bilgileri

GÜÇ	GERİLİM	AKIM	HIZ
1,1kW	400V	2,6A	1415d/d
KUTUP	VERİM	YALITIM SINIFI	NEMA TASARIM
4	%81	F	A

Veri toplama süreci dijital ölçüm cihazları üzerinden otomatik olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler MATLAB ortamına aktarılmıştır. Böylece pozitif/negatif sekans bileşenlerinin hesaplanmasına yönelik algoritmalar çalıştırılmıştır.

Bu deneysel düzenek dengesiz gerilim koşullarında motor verimliliği, tork dalgalanmaları ve faz akım eşitsizlikleri etkilerinin değerlendirilmesi açısından kapsamlı ve kontrollü bir ortam sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar hem geleneksel ölçüm yöntemlerinin doğruluklarının karşılaştırılmasına hem de geliştirilen yerinde verim tahmin yönteminin doğrulanmasına olanak tanımıştır.

Çizelge 5.2’de 1.1 kW gücündeki üç fazlı asenkron motorun yalnızca tam yük altında çalıştırıldığı durumda ve çeşitli gerilim dengesizliği seviyeleri (%0’dan %5’e

kadar) için elde edilen ölçüm değerleri sunulmaktadır. Gerilim dengesizliği fazlar arası gerilim değerlerinin asimetrik olarak uygulanması yoluyla oluşturulmuş ve her bir seviyede motorun uçlarına uygulanan faz gerilimleri, giriş akımları ve aktif güç değerleri dijital analizörler aracılığıyla hassas biçimde kaydedilmiştir.

Çizelge 5.2. Motora uygulanan %0-%5 aralığı dengesiz gerilimler ve ölçülen giriş verileri

VUF	V _{ab} [V]	V _{bc} [V]	V _{ca} [V]	I _a [A]	I _b [A]	I _c [A]	P _a [W]	P _b [W]	P _c [W]	pf _a	pf _b	pf _c
%5	230	238	217	3,01	3,45	1,88	616	526	263	0,88	0,64	0,64
%4	229	235	218	3,03	3,32	2,03	605	516	309	0,87	0,65	0,69
%3	228	232	220	2,92	3,09	2,17	560	484	344	0,84	0,67	0,71
%2	224	226	218	2,97	3	2,48	552	462	418	0,82	0,72	0,76
%1	225	225	222	2,85	2,87	2,6	512	478	442	0,79	0,73	0,76
%0	225	225	225	2,74	2,76	2,72	472	473	465	0,76	0,75	0,75

Uygulanan gerilim dengesizliği simetrik bileşenler yöntemiyle hesaplanan negatif sekans geriliminin pozitif sekans gerilimine oranı alınarak tanımlanan VUF yüzdesi ile ifade edilmiştir. %0 VUF seviyesi ideal dengeli çalışma durumunu temsil ederken; dengesizlik oranı %1 ila %5 arasında kademeli olarak artırıldığında motorun elektriksel karakteristiklerinde meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir.

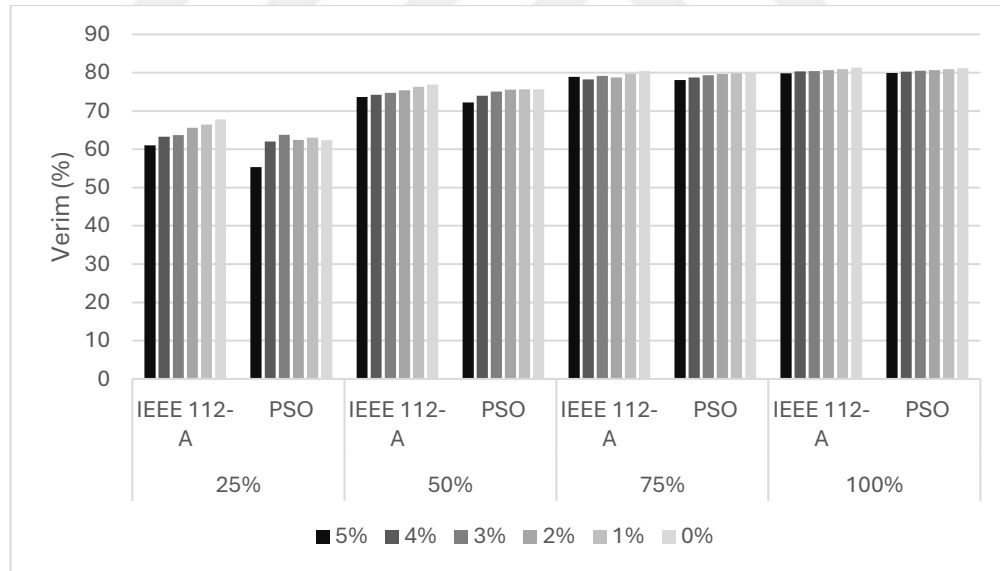
Üç fazlı asenkron motorların farklı gerilim dengesizliği seviyelerinde (VUF Voltage Unbalance Factor) ve değişen yük faktörleri altında (YF: %25, %50, %75 ve %100) gösterdiği verim performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Verim değerleri hem IEEE 112-A standardına göre doğrudan ölçülmüş hem de PSO algoritması aracılığıyla tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, VUF arttıkça özellikle düşük yük seviyelerinde (örneğin YF %25) tahmin edilen verimlerin ölçülen değerlere göre daha fazla sapma gösterdiği açıkça görülmektedir. YF %25 ve VUF %5 seviyesinde iken IEEE 112-A standardına göre ölçülen verim %61 iken tahmin edilen değer %55,37 olarak kaydedilmiş ve bu durumda mutlak hata %5,63 gibi oldukça yüksek bir seviyeye ulaşmıştır. Bu sonuç düşük yük altında ve yüksek VUF seviyelerinde tahmin modelinin hassasiyetinin azaldığını göstermektedir.

Diğer yandan yük faktörü arttıkça tahmin edilen verim değerlerinin IEEE 112-A ile elde edilen ölçüm değerlerine daha fazla yaklaştığı gözlemlenmektedir. Özellikle YF %100 seviyesinde ve tüm VUF koşullarında tahmin ile ölçüm verileri arasındaki fark

oldukça düşüktür. Örneğin VUF %5 ve YF %100 durumunda ölçülen verim %79,82 iken tahmin edilen değer %79,92 olup mutlak hata yalnızca %0,1 olarak hesaplanmıştır. Grafik üzerinden de bu uyum net bir şekilde görülebilmektedir; tüm yük seviyelerinde artan yük ile birlikte her iki yöntemin verim değerleri birbirine daha çok yaklaşmakta sütunlar arasında fark azalmaktadır.

Çizelge 5.3. 1.1kW ASM farklı gerilim dengesizliği değerlerinde algoritma ve IEEE 112-A yöntemi ile belirlenen verimler

YF	25%		50%		75%		100%		25%	50%	75%	100%
VUF	IEEE 112-A	PSO	IEEE 112-A	PSO	IEEE 112-A	PSO	IEEE 112-A	PSO	HATA			
5%	61	55,37	73,61	72,25	78,91	78,06	79,82	79,92	5,63	1,36	0,85	0,1
4%	63,29	62	74,19	73,97	78,22	78,77	80,32	80,29	1,29	0,22	0,55	0,03
3%	63,69	63,75	74,75	75,06	79,16	79,31	80,41	80,51	0,06	0,31	0,15	0,1
2%	65,63	62,48	75,38	75,53	78,76	79,65	80,67	80,69	3,15	0,15	0,89	0,02
1%	66,46	63,05	76,3	75,61	79,74	79,84	80,9	80,92	3,41	0,69	0,1	0,02
0%	67,78	62,35	76,87	75,67	80,44	80,17	81,31	81,15	5,43	1,2	0,27	0,16



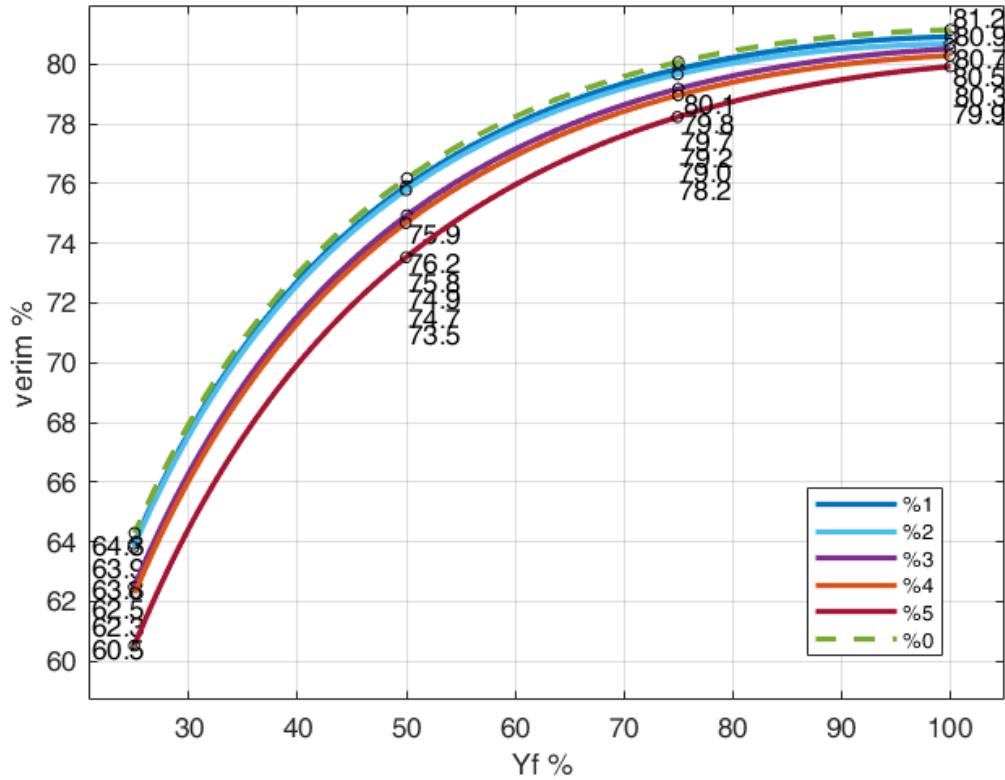
Şekil 5.4. 1.1kW ASM farklı gerilim dengesizliği değerlerinde algoritma ve IEEE 112-A yöntemi ile belirlenen verimler grafiği

VUF oranının %0 olduğu yani gerilim dengesizliği olmadığı durumda ise tahmin modeli tüm yük seviyelerinde yüksek doğruluk göstermektedir. Grafik üzerinde özellikle en açık ton gri sütunlarla temsil edilen %0 VUF verilerinin hem IEEE 112-A hem de tahmin edilen değerlerde oldukça yüksek ve birbirine yakın olmasından anlaşılmaktadır.

Örneğin YF %100 ve VUF %0 için ölçülen verim değeri %81,31 tahmin değeri ise %81,15'tir ve hata sadece %0,16 düzeyindedir.

Ayrıca %1 ve %2 düzeylerindeki düşük VUF oranlarında da modelin genel doğruluk seviyesi yüksek kalmaktadır. Ancak bu oranlar ile birlikte yük faktörü de düştüğünde (örneğin YF %25) tahmin hataları nispeten artmaktadır. Çizelge 5.3 incelendiğinde bu duruma karşılık gelen değerler arasında belirli oranda ayrışma olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen tahmin modeli VUF oranı düşük olduğunda ve yük faktörü arttığında son derece isabetli sonuçlar vermektedir. Ancak sistem dengesizliğinin arttığı ve özellikle düşük yük koşullarında çalıştığında tahmin performansında sapmalar ortaya çıkmaktadır. Bu durum hem verim tahmini için kullanılan modelin daha kararlı koşullarda yüksek başarı gösterdiğini hem de düşük yük-altı dengesizlik durumlarında iyileştirme gereksinimi bulunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.5. Optimizasyon algoritması farklı gerilim dengesizliklerinde yük faktörü verim grafiği

1.1 kW gücündeki üç fazlı asenkron motorun farklı gerilim dengesizliği (VUF) seviyelerinde ve %25 ile %100 arasındaki yükleme oranlarında PSO algoritması aracılığıyla tahmin edilen verim değerleri Şekil 5.5’de verilmiştir. Yatay ekseninde yük faktörü (%) yer almakta diğey ekseninde ise ilgili yük seviyelerinde elde edilen verim (%) değerleri gösterilmektedir. Grafik VUF oranlarının %0 (dengeli sistem) ile %5 (en yüksek dengesizlik seviyesi) arasında değıştiğı altı farklı durumu temsil eden eğrilerden oluşmaktadır. Grafikteki genel eğilim yük faktörü arttıkça motor veriminin de belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Tüm VUF seviyelerinde %25’lik yükleme oranında en düşük verim değerleri gözlemlenirken %100 tam yük durumunda verim değerlerinin birbirine oldukça yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, düşük yük seviyelerinde gerilim dengesizliğinin motor performansı üzerinde daha belirgin bir etki yarattığını ancak yük arttıkça bu etkinin azaldığını ortaya koymaktadır. %0 VUF yani sistemin dengeli çalıştığı durumda tüm yükleme oranlarında en yüksek verim değerlerine sahiptir. Bu eğri gerilim simetrisinin motor verimliliği üzerindeki olumlu etkisini açıkça yansıtmaktadır. Dengeli durumda %100 yükte yaklaşık %81,5 seviyesinde verim elde edildiğı görülmektedir. Bu değer dengesizlik oranı %5’e ulaştığında yaklaşık %79,8’e düşmektedir. Aradaki fark küçük görünmekle birlikte enerji verimliliğı açısından dikkate değer düzeydedir.

VUF seviyesi arttıkça eğrilerin daha düşük verim seviyelerine kaymasıdır. Özellikle %4 ve %5 VUF eğrileri düşük yük faktörlerinde (%25–%50 arası) diğer eğrilere kıyasla belirgin biçimde ayrılmaktadır. Bu durum yüksek gerilim dengesizliklerinin düşük yük koşullarında motor verimliliğini olumsuz etkilediğini ve algoritmalarında bu yönde tahminler geliştirdiğı görülmektedir.

Sonuç olarak, asenkron motorlarda yük faktörünün artmasının verimi yükselttiğı, ancak VUF oranındaki artışın özellikle düşük yükleme koşullarında verimi anlamlı düzeyde düşürdüğü tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular PSO algoritmasının dengesiz gerilim koşullarında asenkron motor veriminin başarıyla tahmin edilebildiğini göstermektedir. Farklı VUF seviyelerinde ve çeşitli yükleme oranlarında elde edilen verim değerleri, PSO tabanlı yöntemin anlamlı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, PSO algoritmasının yalnızca dengeli sistemlerde değil, aynı zamanda gerilim dengesizliğinin mevcut olduğu gerçek çalışma koşullarında da bir verim tahmin aracı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.2 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, asenkron motorların yerinde (in-situ) verim ve eşdeğer devre parametrelerinin tahmini için sekiz farklı sezgisel optimizasyon algoritması (PSO, HHO, RFA, WOA, GA, GWO, DS, TSA) iki ayrı tahmin yöntemi altında değerlendirilmiştir. Yapılan testlerde, farklı güç değerlerine sahip altı motorun hem dengeli hem de dengesiz gerilim koşullarında verim tahmin performansı analiz edilmiştir. Bu bağlamda çalışmada iki farklı verim tahmin yaklaşımı benimsenmiştir: Yöntem I, yalnızca ölçülen elektriksel büyüklüklere (akım, gerilim, güç faktörü) dayanarak verim tahmini yaparken; Yöntem II, bu değerlere ek olarak motor etiketinde belirtilen nominal çıkış gücünü de amaç fonksiyonuna dâhil ederek tahmin sürecini gerçekleştirmektedir. Etiket verisinin modele katılması, Yöntem II’de bazı motorlar için hata oranlarını düşürebilmekte; ancak bu durumda, söz konusu etiket bilgilerinin güvenilirliği kritik bir unsur hâline gelmektedir.

Bu çalışma, IEEE Std-112'nin A ve F1 test yöntemleri referans olarak motorun eşdeğer devre parametrelerinin (X_1 , X_m , R_{fe} , R_2) optimize edilmesini ve buna bağlı olarak veriminin belirlenmesini esas almaktadır. Parametre aralık belirleme yöntemi ile algoritmaların yakınsama kararlılığı artırılmış, farklı güçteki motorlara uyarlanabilir bir yapı elde edilmiştir. Bu kapsamda, sekiz farklı optimizasyon algoritması (PSO, HHO, RFA, WOA, GA, GWO, DSA, TSA) kullanılmış ve algoritmaların tahmin başarısı hem ölçülen verim değerleri hem de hata oranları üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sezgisel algoritmaların büyük bölümü düşük hata oranlarıyla çalışmış; bazı algoritmalar özellikle tam yük koşullarında IEEE 112-A yöntemiyle elde edilen verim değerlerine oldukça yakın sonuçlar üretmiştir. Optimizasyon algoritmaları her biri kendi parametre güncelleyici ve iyileştirme stratejisine sahip olmakla birlikte test sonuçları bakımından benzer başarımlar göstermiştir. Ancak, özellikle PSO gibi klasikleşmiş algoritmaların kararlı sonuçlar verdiği, RFO, HHO, WOA ve TSA gibi yeni yaklaşımların ise belirli koşullarda daha düşük hata oranlarına ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, düşük yük seviyelerinde (özellikle %25 yükte) Genetik Algoritma (GA), bazı durumlarda en düşük hata oranını üretmiş olsa da genel tutarlılık açısından zayıf bir profil sergilemiştir.

Çalışmada tahmin edilen verimler deneysel veriler ile karşılaştırıldığında Yöntem I ve Yöntem II’de elde edilen sonuçlar birbirlerini yakın değerler olduğu görülmüştür. Bu durum bu motorların yeni motor olmaları ve yeniden sarma işlemi yapılmamış

olmasından dolayı etiket bilgilerinin doğru olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak tamir görmüş ve etiket verilerinde hata olan motorlarda iki yöntem arasındaki hata oranları birbirlerinden çok farklı olacaktır. Bu durumda özellikle çıkış gücü amaç fonksiyonunda bulunmayan Yöntem I'in sonuçlarını dikkate olmak daha doğru olacaktır.

Ayrıca, 1,1kW'lık üç fazlı asenkron motorun farklı gerilim dengesizliği seviyelerinde (%0–%5 VUF) ve değişen yükleme oranlarındaki (%25, %50, %75, %100) verimi PSO algoritması kullanılarak tahmin edilmiş ve bu tahminler IEEE 112-A standardına göre ölçülen verim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, verim tahmin yönteminin özellikle tam yük koşullarında ve düşük VUF oranlarında yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Yük faktörü arttıkça tahmin edilen verim değerleri, ölçüm sonuçlarıyla daha fazla yakınsamış; özellikle %100 yük altında mutlak hata %0,1'e kadar düşmüştür. Ancak düşük yükleme (%25–%50) ve yüksek VUF durumlarında yöntemin doğruluğu azalmış, örneğin %25 yük ve %5 VUF için hata %5,63'e kadar çıkmıştır. Analizler de bu durumu doğrulamış, verimin yükle birlikte yükseldiği ancak VUF seviyesindeki artışla özellikle düşük yüklerde anlamlı sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak, sistemin dengeli çalıştığı (%0 VUF) koşullarda tüm yük seviyelerinde en yüksek verim elde edilmiş; VUF oranı arttıkça verimde sistematik bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, algoritmanın dengesizlik koşullarındaki hassasiyetinin azaldığını ancak nominal koşullarda güçlü tahminler üretebildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında geliştirilen yöntem, asenkron motorların hem dengeli hem de dengesiz gerilim koşulları altında yerinde verim ve eşdeğer devre parametrelerinin yüksek doğrulukla tahmin edilmesini mümkün kılmıştır. Sekiz farklı sezgisel optimizasyon algoritmasının iki ayrı yöntem kapsamında değerlendirilmesiyle, özellikle tam yük ve düşük VUF seviyelerinde mutlak hata oranlarının %0,1'e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. PSO gibi klasik algoritmalar kararlı performans sergilerken, WOA, TSA ve HHO gibi daha yeni yaklaşımlar belirli koşullarda daha düşük hata oranlarına ulaşmıştır. Ancak düşük yükleme ve yüksek VUF koşullarında hata oranlarının arttığı, dolayısıyla algoritmaların bu tür zorlu durumlarda daha az hassasiyetle çalıştığı belirlenmiştir. Genel bulgular, önerilen modelin nominal çalışma koşullarında güvenilir sonuçlar verdiğini ve müdahalesiz yapısıyla endüstriyel uygulamalarda yerinde verim tahmini için uygun bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Test tabanlı ve

müdahaleci yöntemlerin saha uygulamalarındaki sınırlılıklarını aşmaya yönelik geliştirilen bu yaklaşım, işletme koşullarında kullanılabilirliği ile dikkat çekmektedir.

6.3 Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda gerek akademik çalışmaların ilerletilmesine gerekse endüstriyel uygulamaların geliştirilmesine yönelik aşağıdaki öneriler sunulabilir:

Bu tezde kullanılan optimizasyon tabanlı verim tahmini yaklaşımı farklı güç aralıklarındaki motorlarda başarıyla uygulanmıştır. Gelecek çalışmalarda aynı yöntem daha farklı motor tipleri (örneğin tek fazlı motorlar, senkron motorlar, yüksek gerilim motorları vb.) üzerinde test edilerek modelin genellenebilirliği artırılabilir.

VUF değerlerinin sürekli olarak değişebildiği gerçek zamanlı şebeke koşullarında geliştirilen modelin anlık izleme sistemleriyle entegre edilmesi motorların daha etkin şekilde korunmasını ve enerji verimliliğinin sürekliliğini sağlayacaktır.

Sezgisel algoritmaların yanı sıra makine öğrenmesi ve derin öğrenme temelli modellerin geliştirilmesi parametre kestirim doğruluğunu artırabilir. Özellikle veri setlerinin genişletilmesiyle birlikte adaptif tahmin sistemlerinin oluşturulması mümkündür.

Geliştirilen algoritmanın doğruluğu laboratuvar ortamında ve kısmen sanayi üretimi ancak tamir görmemiş motorlar ile kanıtlanmıştır. Ancak yöntem farklı endüstriyel ortam koşullarında (yük değişkenliği, sıcaklık farkları ve tamir edilmiş motor vb.) test edilerek saha uyumluluğu değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda pilot saha uygulamaları önerilmektedir.

Geliştirilen hesaplama algoritması kullanıcı dostu bir yazılım arayüzüne entegre edilerek mühendislerin, bakım personelinin ve enerji yöneticilerinin kolayca kullanabileceği bir verim tahmin ve analiz platformuna dönüştürülebilir.

Bu sistem sadece verim tahminiyle sınırlı kalmamalı aynı zamanda dengesizliğe bağlı enerji kalitesi bozulmaları ve erken arıza teşhisi gibi yönlere genişletilmelidir. Bu sayede motorlar yalnızca verimlilik açısından değil aynı zamanda işletme güvenliği açısından da izlenebilir hale gelecektir.

KAYNAKLAR

- Agamloh, E. B., 2010, An evaluation of induction machine stray load loss from collated test results, *IEEE transactions on Industry Applications*, 46 (6), 2311-2318.
- Al-Badri, M., Pillay, P. ve Angers, P., 2014, A novel algorithm for estimating refurbished three-phase induction motors efficiency using only no-load tests, *IEEE transactions on energy conversion*, 30 (2), 615-625.
- Al-Badri, M., 2015, Algorithms for Induction Motor Efficiency Determination, *Concordia University*.
- Al-Badri, M., Pillay, P. ve Angers, P., 2015, A novel in situ efficiency estimation algorithm for three-phase IM using GA, IEEE method F1 calculations, and pretested motor data, *IEEE transactions on energy conversion*, 30 (3), 1092-1102.
- Al-Badri, M., Pillay, P. ve Angers, P., 2019, Induction machine rapid performance test, *IEEE transactions on Industry Applications*, 55 (5), 4685-4691.
- Aminu, M., 2020, Development of new methods for nonintrusive induction motor energy efficiency estimation.
- Anwari, M. ve Hiendro, A., 2010, New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with under-and overvoltage unbalance, *IEEE transactions on energy conversion*, 25 (3), 619-625.
- Arslan, M., Çunkaş, M. ve Sağ, T., 2012, Determination of induction motor parameters with differential evolution algorithm, *Neural computing and applications*, 21, 1995-2004.
- Association, N. E. M., 2003, NEMA Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2003, Revision 1-2004: Motors and Generators, National Electrical Manufacturers Association, p.
- Association, N. E. M., 2011, NEMA Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2011, Revision 1-2010: American National Standard Motors and Generators, American National Standards Institute, p.
- Bacher, J. P. ve Waldhart, F., 2008, Determination of three phase induction machine efficiency from start up data, *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, 1-5.
- Berndt, M. ve Schmitz, N., 1962, Derating of polyphase induction motors operated with unbalanced line voltages, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 81 (3), 680-683.
- Berndt, M. M., 1957, Theoretical and Experimental Methods of Derating Polyphase Induction Motors Under Conditions of Fixed Line Voltage Unbalance, University of Wisconsin--Madison, p.
- Bijan, M. G., Al-Badri, M., Pillay, P. ve Angers, P., 2018, Induction machine parameter range constraints in genetic algorithm based efficiency estimation techniques, *IEEE transactions on Industry Applications*, 54 (5), 4186-4197.
- Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M. ve Pastorelli, M., 2003, International standards for the induction motor efficiency evaluation: a critical analysis of the stray-load loss determination, *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, 841-848.
- Bradley, W. J., 2013, Current-based fault detection and diagnosis of induction motors, *Bradford: Design and Technology University of Bradford, School of Engineering*.
- Campbell, B. H., 1996, Failed motors-rewind or replace?, *Conference Record of 1996 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 117-121.
- Cao, W. ve Bradley, K. J., 2005, Assessing the impacts of rewind and repeated rewinds on induction motors: is an opportunity for Re-designing the machine being

- wasted?, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005., 278-285.
- Cao, W., 2009, Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1, *IEEE transactions on energy conversion*, 24 (3), 802-808.
- Chandrakanth, S. A., Chelliah, T. R., Srivastava, S. ve Thangaraj, R., 2012, In-situ Efficiency Determination of Induction Motor through Parameter Estimation, *Proceedings of the International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2011) December 20-22, 2011: Volume 1*, 689-700.
- Charette, A., Xu, J., Ba-Razzouk, A., Pillay, P. ve Rajagopalan, V., 2000, The use of the genetic algorithm for in-situ efficiency measurement of an induction motor, *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)*, 392-397.
- Chen, L., Song, N. ve Ma, Y., 2023, Harris hawks optimization based on global cross-variation and tent mapping, *The Journal of Supercomputing*, 79 (5), 5576-5614.
- Chirindo, M., Khan, M. A. ve Barendse, P. S., 2015, Considerations for nonintrusive efficiency estimation of inverter-fed induction motors, *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 63 (2), 741-749.
- Chirindo, M., 2020, Non-intrusive efficiency estimation of inverter-fed induction machines.
- Civicioglu, P., 2012, Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm, *Computers & Geosciences*, 46, 229-247.
- Civicioglu, P. ve Besdok, E., 2013, A conceptual comparison of the Cuckoo-search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms, *Artificial intelligence review*, 39, 315-346.
- Cochran, P., 1989, Polyphase induction motors, analysis: design, and application, CRC Press, p.
- Commission, I. E., 2007, Rotating Electrical Machines—Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles), *Brussels, Belgium*.
- Committee, E. M., 2018, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, *Technical Report 4*.
- Corcoles, F., Pedra, J., Salichs, M. ve Sainz, L., 2002, Analysis of the induction machine parameter identification, *IEEE transactions on energy conversion*, 17 (2), 183-190.
- Corino, S., Romero, E. ve Mantilla, L., 2008, How the efficiency of induction motor is measured?, *RE&PQJ*, 6 (1).
- Corres, J. M., Bravo, J., Arregui, F. J. ve Matias, I. R., 2006, Unbalance and harmonics detection in induction motors using an optical fiber sensor, *IEEE Sensors Journal*, 6 (3), 605-612.
- Cummings, P., Kerr, R. ve Dunki-Jacobs, J., 1984, Protection of induction motors against unbalanced voltage operation, *1984 Annual Meeting Industry Applications Society*, 143-158.
- Çınar, A. C., 2016, A Cuda-based Parallel Programming Approach to Tree-Seed Algorithm, *MSc Thesis, Selçuk University, GRADUATE SCHOOL OF NATURAL SCIENCES*.
- De Almeida, A., Ferreira, F. J., Busch, J. F. ve Angers, P., 2002, Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors, *IEEE transactions on Industry Applications*, 38 (2), 608-614.

- Dell'Aquila, A., Salvatore, L. ve Savino, M., 1984, A new test method for determination of induction motor efficiency, *IEEE transactions on power apparatus and systems* (10), 2961-2973.
- Diarra, M. N., Yao, Y., Li, Z., Niasse, M., Li, Y. ve Zhao, H., 2022, In-situ efficiency estimation of induction motors based on quantum particle swarm optimization-trust region algorithm (QPSO-TRA), *Energies*, 15 (13), 4905.
- Durak, G., 2025, KARBON AYAK İZİ VE RAPORLAMASINA GENEL BİR BAKIŞ, *Financial Analysis/Mali Cozum Dergisi*, 35 (187).
- Eberhart, R. C., Shi, Y. ve Kennedy, J., 2001, *Swarm intelligence*, Elsevier, p.
- El-Ibiary, Y., 2003, An accurate low-cost method for determining electric motors' efficiency for the purpose of plant energy management, *IEEE transactions on Industry Applications*, 39 (4), 1205-1210.
- Erol, O. K. ve Eksin, I., 2006, A new optimization method: big bang–big crunch, *Advances in engineering software*, 37 (2), 106-111.
- Faiz, J., Ebrahimpour, H. ve Pillay, P., 2004, Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor, *IEEE transactions on energy conversion*, 19 (4), 657-662.
- Faiz, J. ve Ebrahimpour, H., 2005, Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages, *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, 485-491.
- Farhani, F., Zaafour, A. ve Chaari, A., 2017, Real time induction motor efficiency optimization, *Journal of the Franklin Institute*, 354 (8), 3289-3304.
- Faris, H., Aljarah, I., Al-Betar, M. A. ve Mirjalili, S., 2018, Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications, *Neural computing and applications*, 30, 413-435.
- Ferreira, F. J. ve de Almeida, A. T., 2008, Considerations on in-field induction motor load estimation methods, *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, 1-8.
- Fortescue, C. L., 1918, Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 37 (2), 1027-1140.
- Fukuyama, Y., 2008, Fundamentals of particle swarm optimization techniques, In: *Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems*, Eds: Wiley, p. 71-87.
- Gafford, B., Duesterhoeft, W. ve Mosher, C., 1959, Heating of induction motors on unbalanced voltages, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 78 (3), 282-286.
- Gajjar, C., Khan, M. ve Barendse, P., 2014, Analysis of non-intrusive efficiency estimation of induction machines compared to the IEEE 112B and IEC 34-2-1 standards, *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 294-301.
- Gardel, J. D., 2000, IEEE Std C37. 96– 2000–IEEE Guide for AC Motor Protection, *IEEE-SA Standard Board. USA*.
- Ghannadi, A., 2024, Türkiye'Nin Enerji Ekonomi Politigi ve Yenilenebilir Enerji Politikası, *Marmara Universitesi (Turkey)*.
- Gharakhani Siraki, A., 2012, Efficiency estimation of induction machines with limited measurements, *Concordia University*.
- Ghasemi Bijan, M., 2019, Algorithms for In-situ Efficiency Determination of Induction Machines, *Concordia University*.

- Gigante, M., 1966, Rewind of large electric motors for the petroleum industry, *IEEE Transactions on Industry and General Applications* (2), 125-131.
- Gnacinski, P., 2008, Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over-or undervoltages, *IEEE transactions on energy conversion*, 23 (2), 363-371.
- Gnacinski, P., 2009, Derating of an induction machine under voltage unbalance combined with over or undervoltages, *Energy Conversion and Management*, 50 (4), 1101-1107.
- Goldberg, D., 1989, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, addison-wesley, reading, ma, 1989, *NN Schraudolph and J*, 3 (1).
- Gross, C. A., 2006, Electric machines, CRC press, p.
- Guru, B. S. ve Hiziroglu, H. R., 2001, Electric machinery and transformers, Oxford university press New York, p.
- Haupt, R. L. ve Haupt, S. E., 2004, Practical genetic algorithms, John Wiley & Sons, p.
- Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M. ve Chen, H., 2019, Harris hawks optimization: Algorithm and applications, *Future generation computer systems*, 97, 849-872.
- Hirzel, J. C., 1994, Impact of rewinding on motor efficiency, *Proceedings of IEEE Pulp and Paper Industry Conference*, 104-107.
- Holmquist, J. R., Rooks, J. A. ve Richter, M. E., 2004, Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values, *IEEE transactions on Industry Applications*, 40 (1), 242-248.
- Hsu, J. S. ve Scoggins, B. P., 1995, Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque, *IEEE transactions on energy conversion*, 10 (3), 477-483.
- Hsu, J. S., Kueck, J. D., Olszewski, M., Casada, D. A., Otaduy, P. J. ve Tolbert, L. M., 1996, Comparison of induction motor field efficiency evaluation methods, *IAS'96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*, 703-712.
- Hsu, J. S. ve Sorenson, P. L., 1996, Field assessment of induction motor efficiency through air-gap torque, *IEEE transactions on energy conversion*, 11 (3), 489-494.
- Huang, S.-Y. ve Wang, Y.-J., 2004, Analysis of a three-phase induction motor under voltage unbalance using the circle diagram method, *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.*, 165-170.
- Hubbi, W. ve Goldberg, O., 1993, A new method for quality monitoring of induction motors, *IEEE transactions on energy conversion*, 8 (4), 726-731.
- Hussien, A. G., Abualigah, L., Abu Zitar, R., Hashim, F. A., Amin, M., Saber, A., Almotairi, K. H. ve Gandomi, A. H., 2022, Recent advances in harris hawks optimization: A comparative study and applications, *Electronics*, 11 (12), 1919.
- Hydro, O., 1990, In-plant electric motor loading and efficiency techniques, *Ontario Hydro TSDD-90-043*.
- IEEE-Std.141, 1993, IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants, *Power Eng. J.*, 2, 103.
- J Chapman, S., 2004, Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill.
- Jia, H., Lang, C., Oliva, D., Song, W. ve Peng, X., 2019, Dynamic harris hawks optimization with mutation mechanism for satellite image segmentation, *Remote sensing*, 11 (12), 1421.
- Jover, P., Negrea, M. ve Arkkio, A., 2005, A general scheme for induction motor condition monitoring, *SDEMPED 2005-International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Vienna, Austria, 7-9 September 2005*.

- Kennedy, J. ve Eberhardt, R., 1995, Particle swarm optimization. proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks. Piscataway, NJ.
- Kersting, W. H. ve Phillips, W. H., 1997, Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines, *IEEE transactions on Industry Applications*, 33 (2), 415-420.
- Kiran, M. S., 2015, TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization, *Expert Systems with Applications*, 42 (19), 6686-6698.
- Kueck, J., Olszewski, M., Casada, D., Hsu, J., Otaduy, P. ve Tolbert, L., 1996, Assessment of methods for estimating motor efficiency and load under field conditions, *ORNL*.
- Kueck, J., 1998, Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition, *Conference Record of 1998 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 98CH36219)*, 67-72.
- Larivière, S. ve Pasitschniak-Arts, M., 1996, *Vulpes vulpes*, *Mammalian species* (537), 1-11.
- Lee, C.-Y., Chen, B.-K., Lee, W.-J. ve Hsu, Y.-F., 1998, Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition, *Electric Power Systems Research*, 47 (3), 153-163.
- Lee, C.-Y., 1999, Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor, *IEEE transactions on energy conversion*, 14 (2), 202-208.
- Lima, A. M. N., Jacobina, C. B. ve de Souza Filho, E. B., 1997, Nonlinear parameter estimation of steady-state induction machine models, *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 44 (3), 390-397.
- Lu, B., Habetler, T. G. ve Harley, R. G., 2006a, A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors, *IEEE transactions on Industry Applications*, 42 (4), 924-933.
- Lu, B., Habetler, T. G. ve Harley, R. G., 2006b, A nonintrusive efficiency estimation method for in-service motor testing using a modified induction motor equivalent circuit, *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1-6.
- Lu, B., Qiao, W., Habetler, T. G. ve Harley, R. G., 2006c, Solving induction motor equivalent circuit using numerical methods for an in-service and nonintrusive motor efficiency estimation method, *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 1-6.
- Lu, B., Habetler, T. G. ve Harley, R. G., 2008, A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring, *IEEE transactions on Industry Applications*, 44 (6), 1666-1674.
- Maru, B. H. ve Wennerstrom, C., 1983, Effect of modifications on the efficiency of ac induction motors, *IEEE transactions on Industry Applications* (6), 1019-1023.
- Mirabbasi, D., Seifossadat, G. ve Heidari, M., 2009, Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection, *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009*, I-189-I-192.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A., 2014, Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Mirjalili, S. ve Lewis, A., 2016, The whale optimization algorithm, *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
- Montgomery, D. C., 1984, The motor rewind issue-a new look, *IEEE transactions on Industry Applications* (5), 1330-1336.

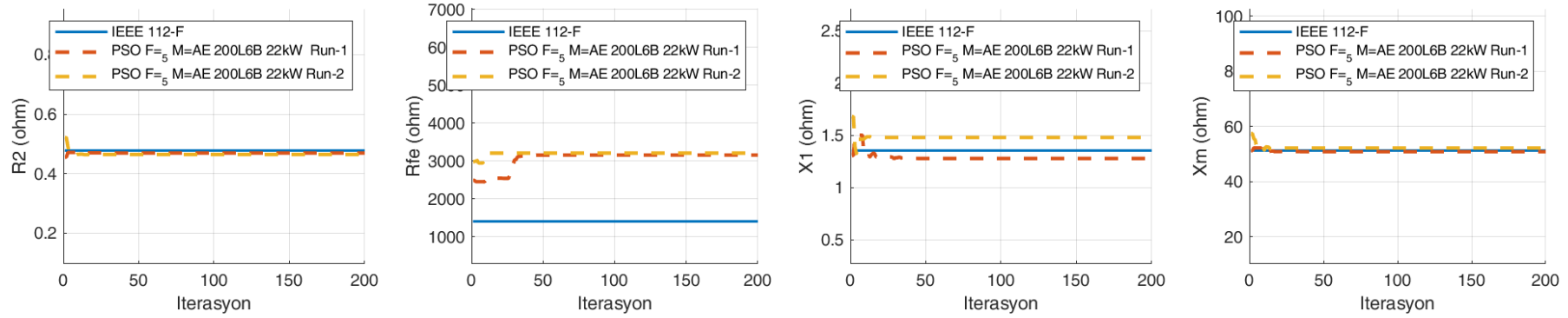
- Montgomery, D. C., 2008, The motor rewind issue-a new look, *IEEE transactions on Industry Applications* (5), 1330-1336.
- Moser, J. R., 1956, Derating of polyphase induction motors due to external unbalance, University of Wisconsin--Madison, p.
- Mosher, C. C., 1955, Reduced Continuous Rating of the Three Phase Induction Motor when Operated with Unbalanced Voltages, *University of Texas at Austin*.
- Mzungu, H., Manyage, M., Khan, M., Barendse, P., Mthombeni, T. ve Pillay, P., 2009, Application of induction machine efficiency testing standards in South Africa, *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 1455-1462.
- Naka, S., Genji, T., Yura, T. ve Fukuyama, Y., 2003, A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation, *IEEE Transactions on power systems*, 18 (1), 60-68.
- Nolan, R., Pillay, P. ve Haque, T., 1994, Application of genetic algorithms to motor parameter determination, *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 47-54.
- None, N., 2002, United States industrial electric motor systems market opportunities assessment, *EERE Publication and Product Library, Washington, DC (United States)*.
- Penrose, H. W., 1997, Anatomy of an energy efficient electric motor rewind, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 13 (1), 14-19.
- Pillay, P., 1997, Applying energy-efficient motors in the petrochemical industry, *IEEE Industry Applications Magazine*, 3 (1), 32-40.
- Pillay, P., Levin, V., Otaduy, P. ve Kueck, J., 1998, In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm, *IEEE transactions on energy conversion*, 13 (4), 326-333.
- Pillay, P. ve Hofmann, P., 2001, Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over-or undervoltages, *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194)*, 1365-1371.
- Pillay, P., Hofmann, P. ve Manyage, M., 2002, Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over-or under-voltages, *IEEE Power Engineering Review*, 22 (7), 51-51.
- Pillay, P., Al-Badri, M., Angers, P. ve Desai, C., 2016, A new stray-load loss formula for small and medium-sized induction motors, *IEEE transactions on energy conversion*, 31 (3), 1221-1227.
- Poław, D. ve Woźniak, M., 2021, Red fox optimization algorithm, *Expert Systems with Applications*, 166, 114107.
- Reed, H. ve Koopman, R., 1936, Induction motors on unbalanced voltages, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 55 (11), 1206-1213.
- Sahman, M., Cinar, A., Saritas, I. ve Yasar, A., 2019, Tree-seed algorithm in solving real-life optimization problems, *IOP conference series: materials science and engineering*, 012030.
- Sakthivel, V., Bhuvaneswari, R. ve Subramanian, S., 2010a, Non-intrusive efficiency estimation method for energy auditing and management of in-service induction motor using bacterial foraging algorithm, *IET Electric power applications*, 4 (8), 579-590.
- Sakthivel, V., Bhuvaneswari, R. ve Subramanian, S., 2010b, Immune algorithm based non-intrusive efficiency determination for in-situ induction motor, *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 7 (1), 31-41.

- Sakthivel, V., Bhuvaneswari, R. ve Subramanian, S., 2011, An accurate and economical approach for induction motor field efficiency estimation using bacterial foraging algorithm, *Measurement*, 44 (4), 674-684.
- Sakthivel, V., 2018, NATURE INSPIRED HEURISTIC ALGORITHM FOR EFFICIENCY DETERMINATION OF IN-SITU INDUCTION MOTOR.
- Santos, V. S., Felipe, P. V. ve Sarduy, J. G., 2013, Bacterial foraging algorithm application for induction motor field efficiency estimation under unbalanced voltages, *Measurement*, 46 (7), 2232-2237.
- Schueler, V. ve Douglass, J., 1995, Quality electric motor repair: A guidebook for electric utilities, *Washington State Energy Office, Olympia, WA (United States)*.
- Sen, P. C., 2021, Principles of Electric Machines and Power Electronics, International Adaptation, John Wiley & Sons, p.
- Shi, Y. ve Eberhart, R., 1998a, A modified particle swarm optimizer, *1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360)*, 69-73.
- Shi, Y. ve Eberhart, R. C., 1998b, Parameter selection in particle swarm optimization, *Evolutionary Programming VII: 7th International Conference, EP98 San Diego, California, USA, March 25-27, 1998 Proceedings 7*, 591-600.
- Siraki, A. G. ve Pillay, P., 2011a, An in situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies, *IEEE transactions on energy conversion*, 27 (1), 85-95.
- Siraki, A. G. ve Pillay, P., 2011b, A novel evolutionary based in-situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies, *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 1563-1568.
- Siraki, A. G., Pillay, P. ve Angers, P., 2013, Full load efficiency estimation of refurbished induction machines from no-load testing, *IEEE transactions on energy conversion*, 28 (2), 317-326.
- SOFUOĞLU, G., 2023, Harris Hawks optimizasyon algoritması ile sürü davranışlarının modellenmesi ve analizi.
- Standard, I., 1972, Rotating electrical machines—Part 2: Methods for determining losses and efficiency of electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles) with amendments 1: 1995 and 2: 1996, *IEC Std*, 60, 034-032.
- Sterling, C. A., 1996, Prevalence of components necessary for electrical demand side management savings persistence in the Albertan Industrial market sector.
- Thakur, V. k., 2020, Applications of Induction Motor: <https://circuitglobe.com/applications-of-induction-motor.html>.
- Thangaraj, R., Pant, M., Raj, C. T. ve Nagar, A. K., 2011, In situ efficiency determination of induction motor: A comparative study of evolutionary techniques, *Applied Artificial Intelligence*, 25 (2), 116-140.
- Trandafilov, V., 2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, *IEEE Std*, 112-2004.
- Trianni, V., Tuci, E., Passino, K. M. ve Marshall, J. A., 2011, Swarm cognition: an interdisciplinary approach to the study of self-organising biological collectives, *Swarm Intelligence*, 5, 3-18.
- Vaez-Zadeh, S. ve Hendi, F., 2005, A continuous efficiency optimization controller for induction motor drives, *Energy Conversion and Management*, 46 (5), 701-713.
- Viego Felipe, P. R., Gómez Sarduy, J. R., de Armas Teyra, M. A. ve Reyes Calvo, R., 2014, Determinación IN-SITU del factor de potencia y la eficiencia de motores asíncronos a cargas parciales, *Ingeniería Energética*, 35 (1), 15-26.

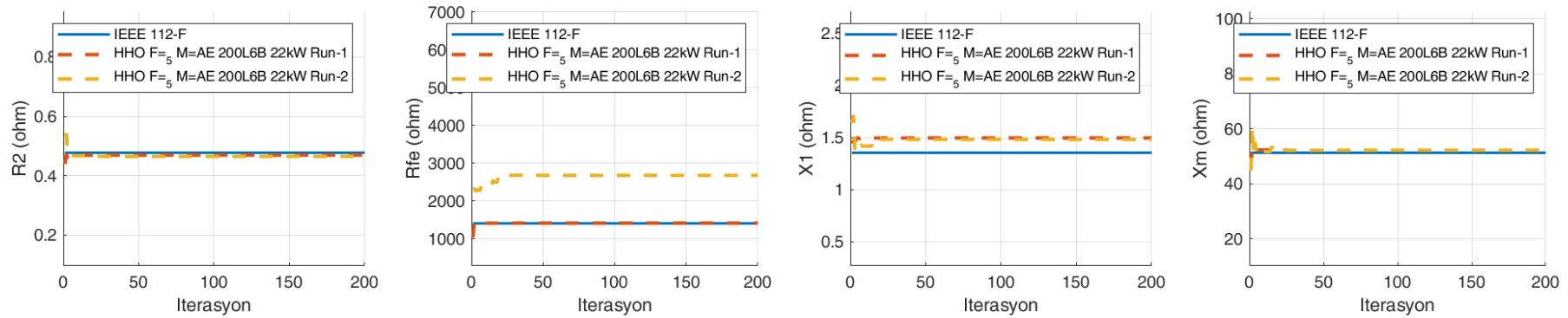
- Wallace, A., Von Jouanne, A., Wiedenbrug, E., Matheson, E. ve Douglass, J., 2001, A laboratory assessment of in-service and nonintrusive motor efficiency testing methods, *Electric Power Components and Systems*, 29 (6), 517-529.
- Wang, Y.-J., 2001, Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor, *IEEE transactions on energy conversion*, 16 (3), 270-275.
- Williams, J., 1954, Operation of 3-phase induction motors on unbalanced voltages [includes discussion], *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 73 (2), 125-133.
- Willis, J., Brock, G. ve Edmonds, J., 1989, Derivation of induction motor models from standstill frequency response tests, *IEEE Power Engineering Review*, 9 (12), 37-38.
- Woll, R., 1975, Effect of unbalanced voltage on the operation of polyphase induction motors, *IEEE transactions on Industry Applications* (1), 38-42.
- Yannopoulos-Lascaratos, P. ve Tegopoulos, J., 1994, END COMPONENT OF STATOR LEAKAGE REACTANCE OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS: Part 1. General analysis, *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 13 (1), 125-128.
- Yoshida, H., Kawata, K., Fukuyama, Y., Takayama, S. ve Nakanishi, Y., 2000, A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment, *IEEE Transactions on power systems*, 15 (4), 1232-1239.
- Zocholl, S. E., Schweitzer, E. O. ve Aliaga-Zegarra, A., 2007, Thermal protection of induction motors enhanced by interactive electrical and thermal models, *IEEE transactions on power apparatus and systems* (7), 1749-1755.

EKLER

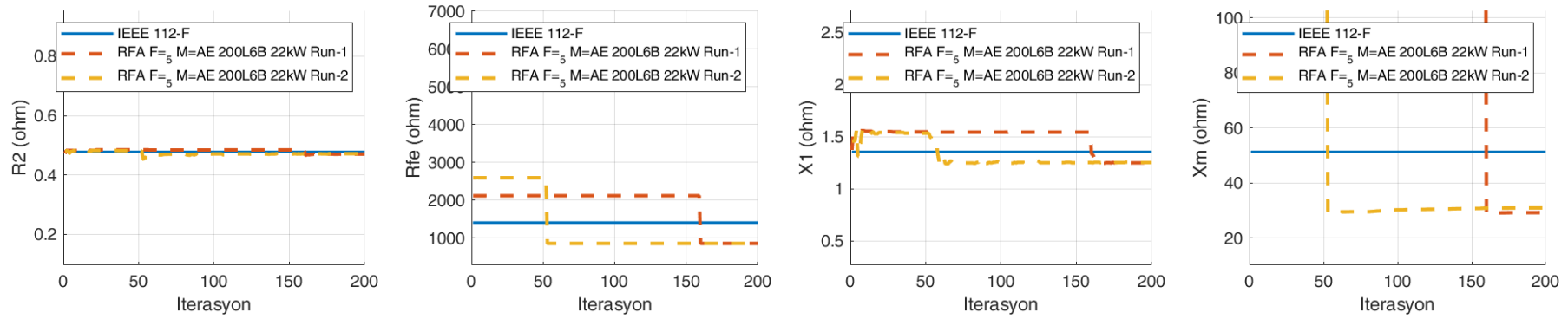
EK-A AE_200L6B_22kW motor için algoritmaların (GA, PSO, DS, TSA, GWO, WOA, RFA ve HHO) ilk iki çalıştırma (RUN) parametrelerinin (X_1 , X_m , R_{fe} ve R_2) yakınsama grafikleri



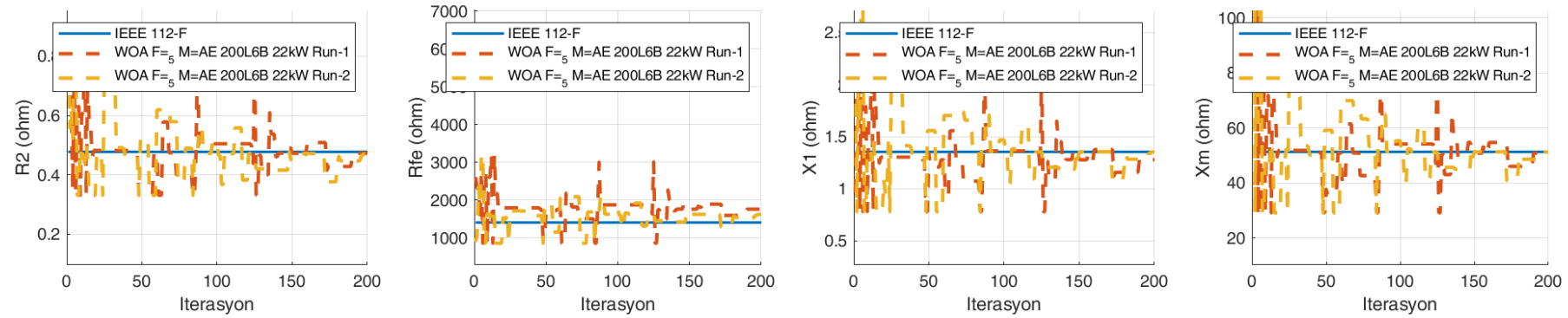
Şekil A1. AE_200L6B_22kW motor PSO ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri



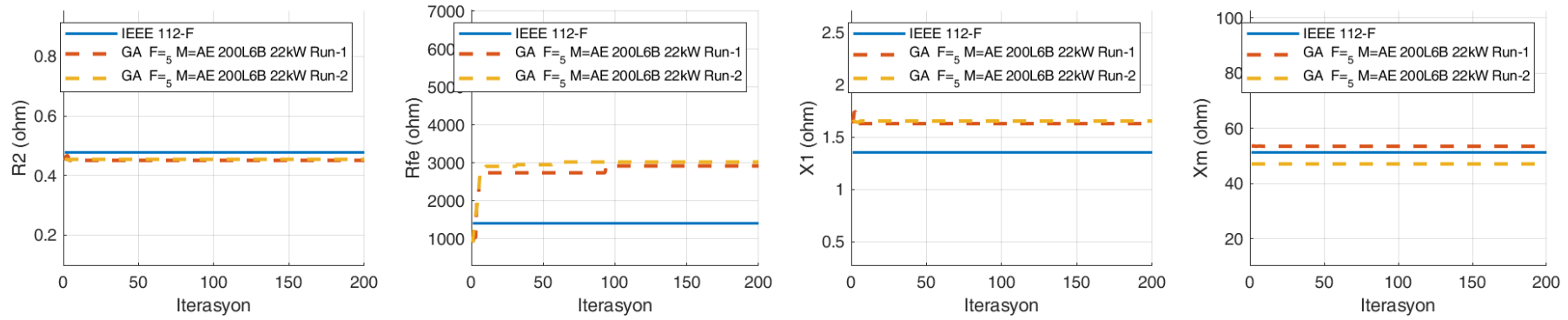
Şekil A2. AE_200L6B_22kW motor HHO ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri



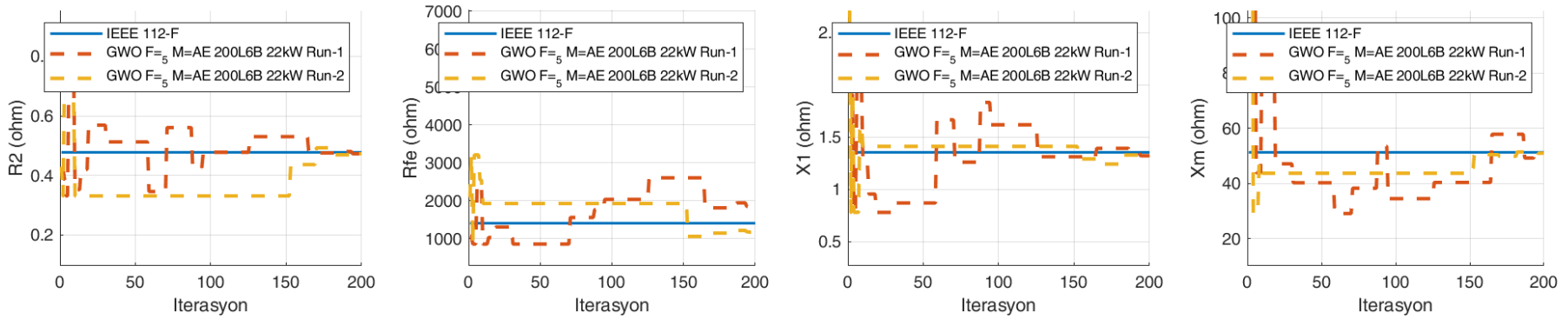
Şekil A3. AE_200L6B_22kW motor RFA ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri



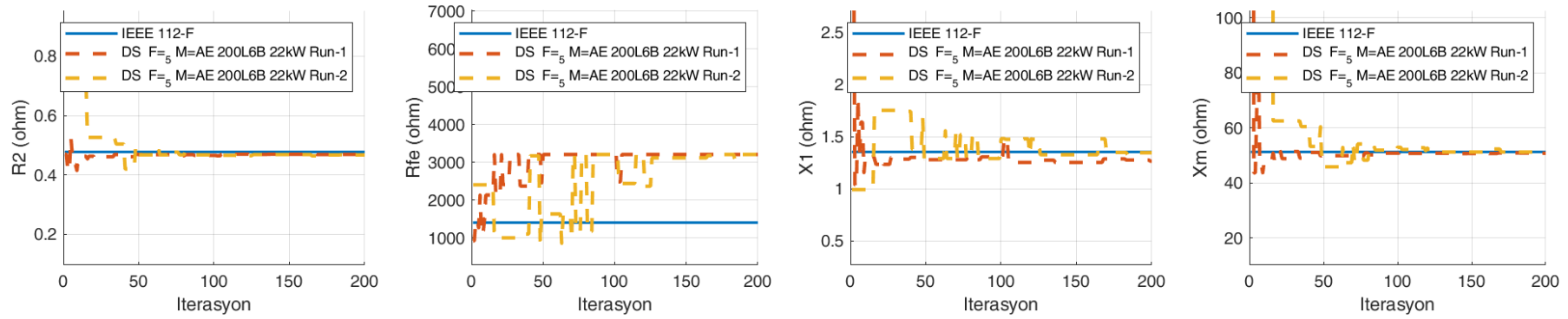
Şekil A4. AE_200L6B_22kW motor WOA ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri



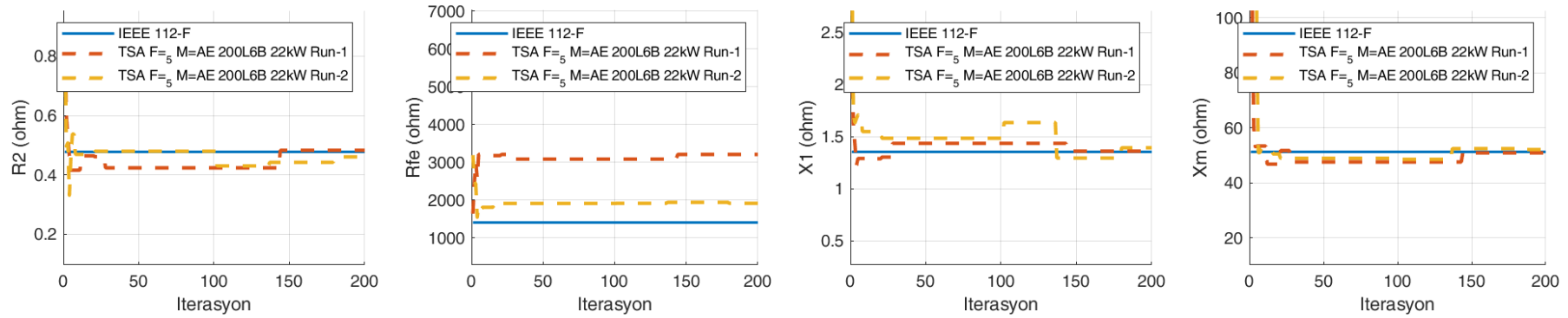
Şekil A5. AE_200L6B_22kW motor GA ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri



Şekil A6. AE_200L6B_22kW motor GWO ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri

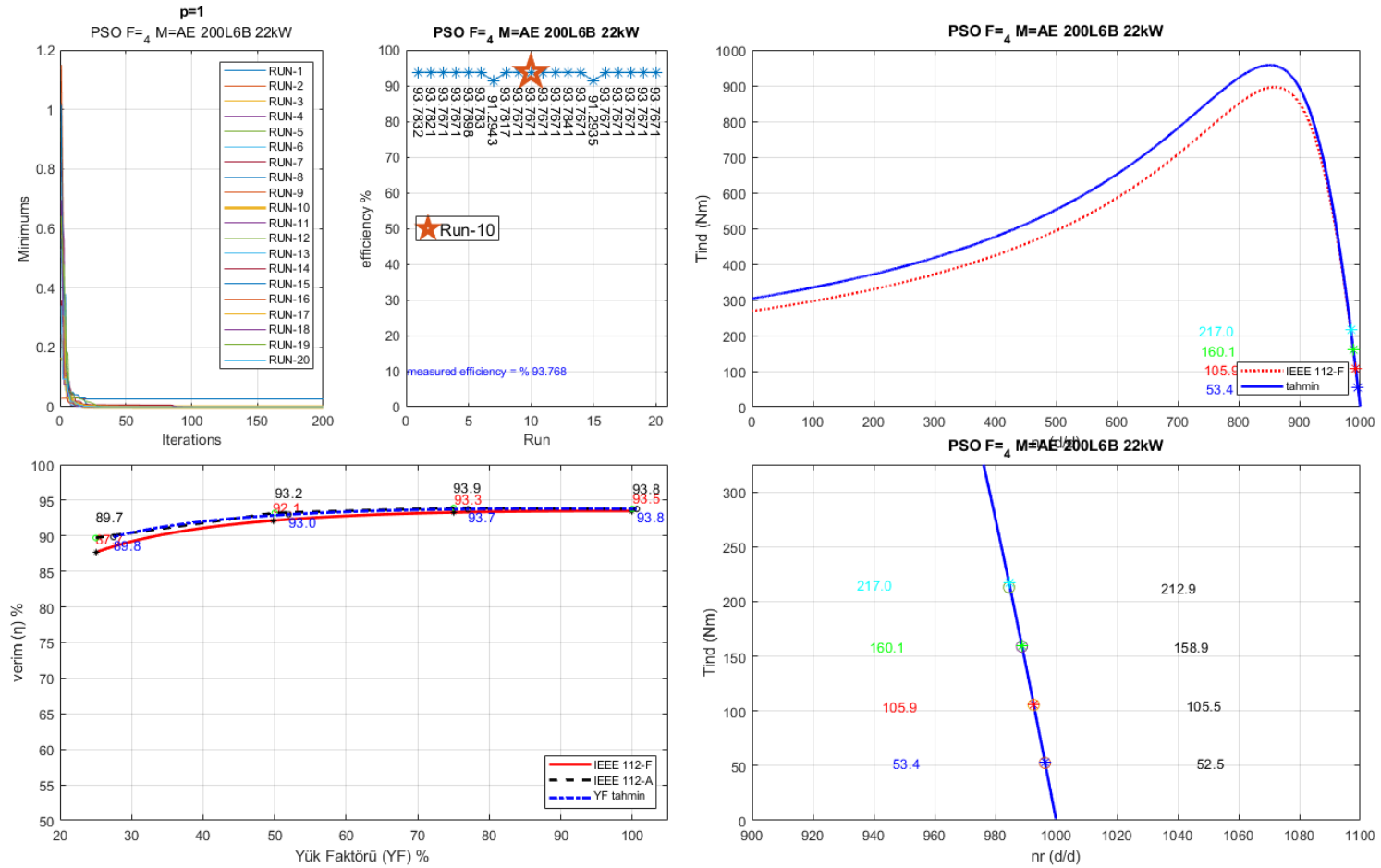


Şekil A7. AE_200L6B_22kW motor DS ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri

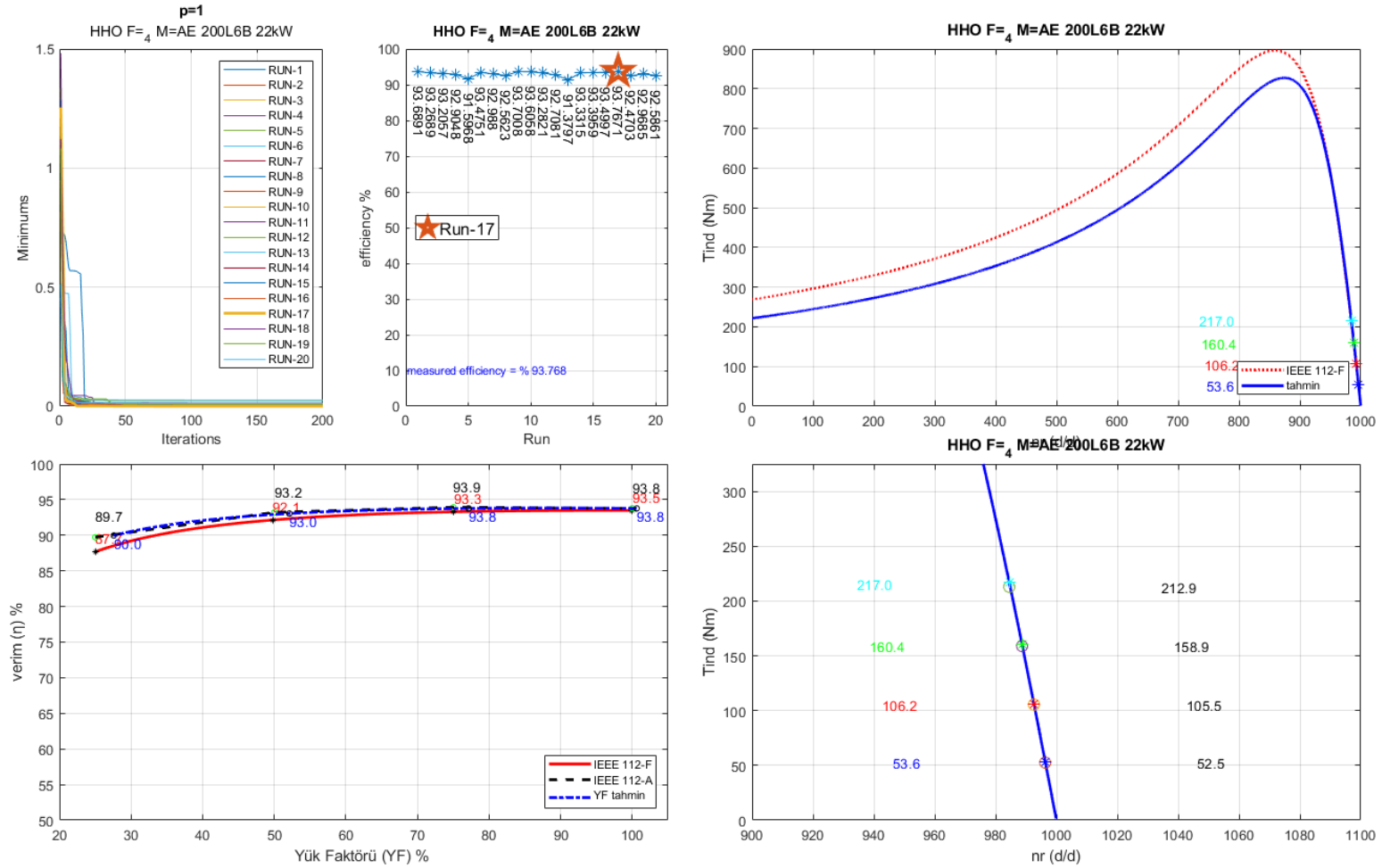


Şekil A8. AE_200L6B_22kW motor TSA ilk iki çalıştırma (RUN) parametre yakınsama grafikleri

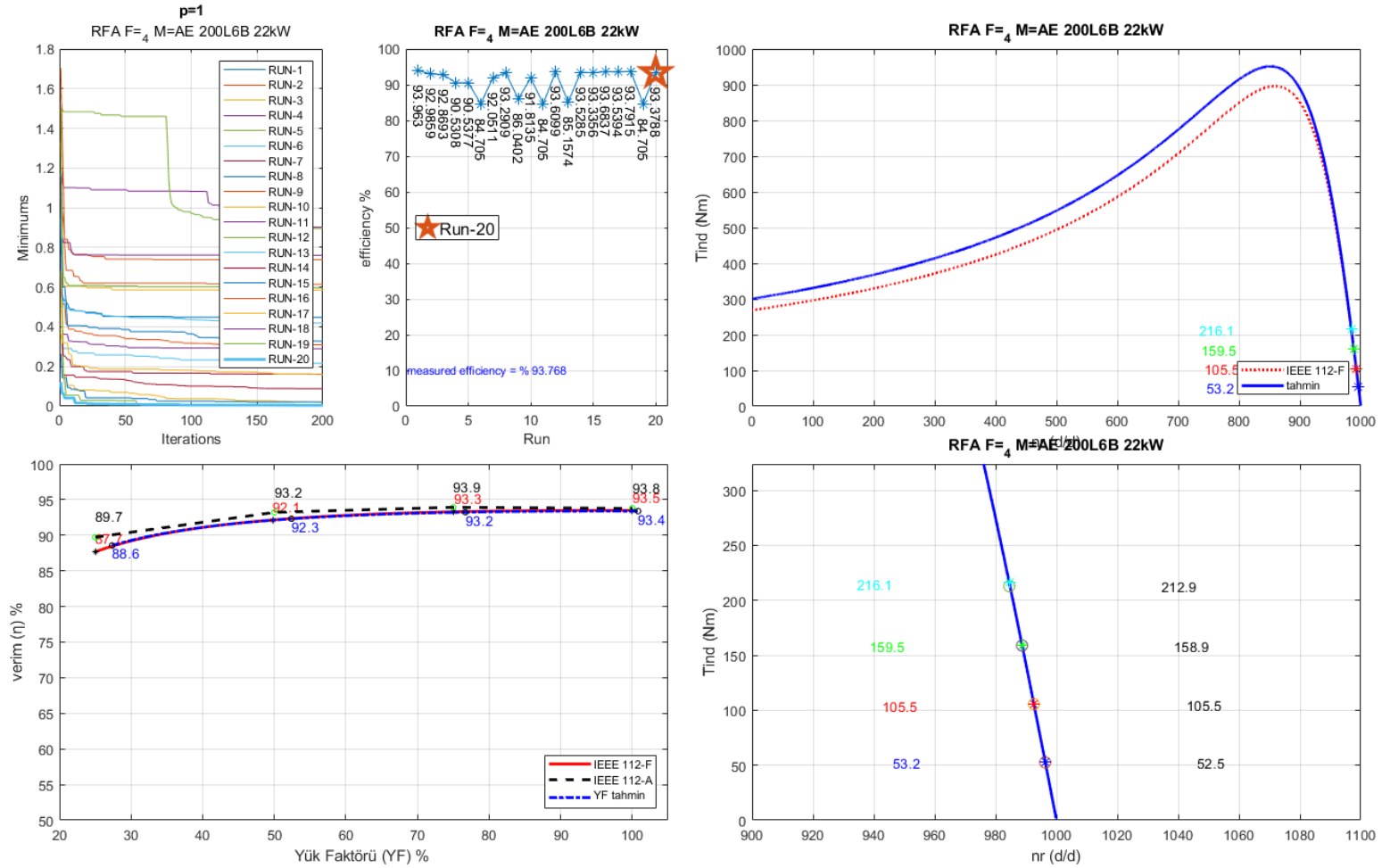
EK-B AE_200L6B_22kW motor Yöntem I ve Yöntem II ile elde edilen simülasyon grafikleri



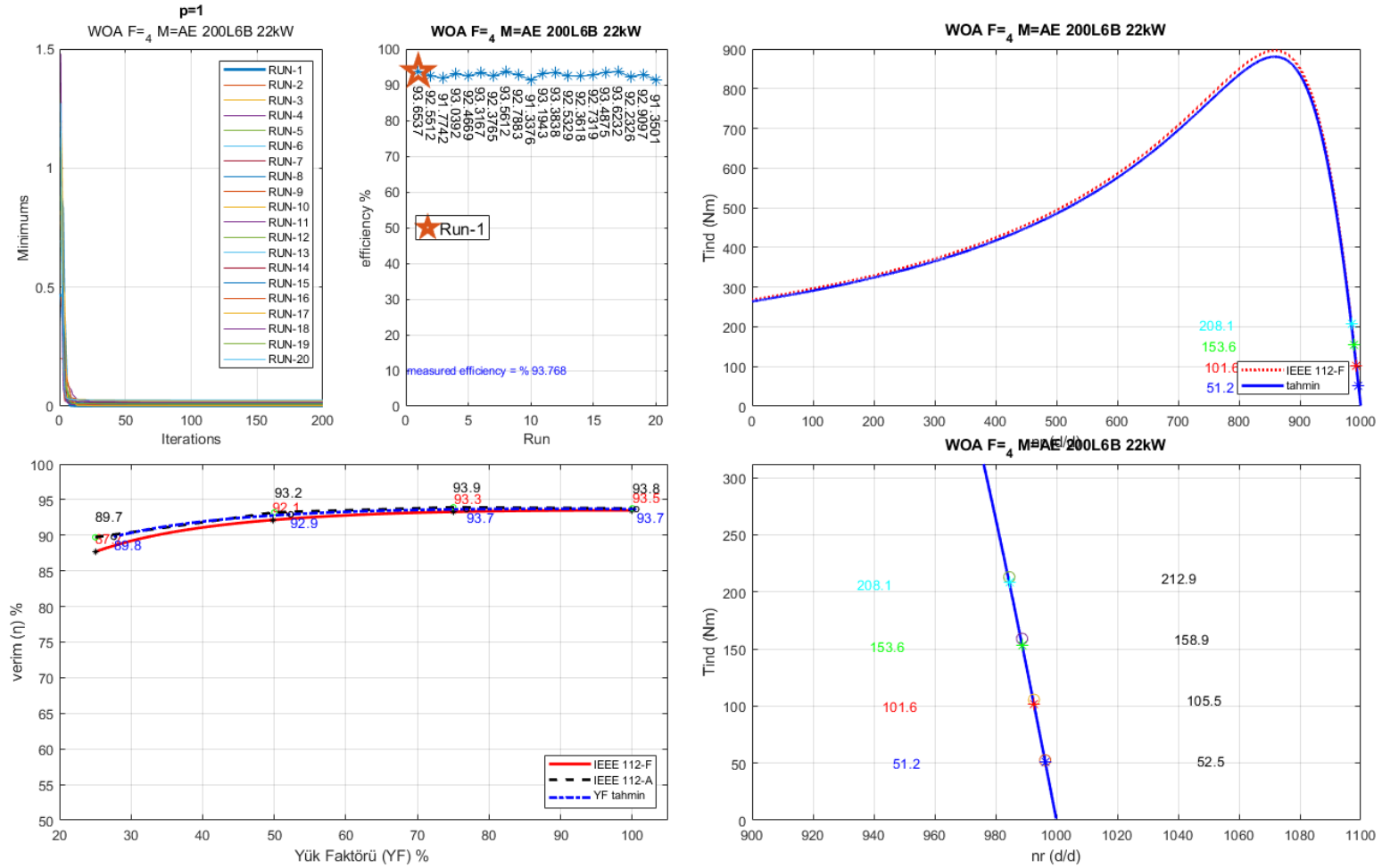
Şekil B1. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I PSO simülasyon grafikleri



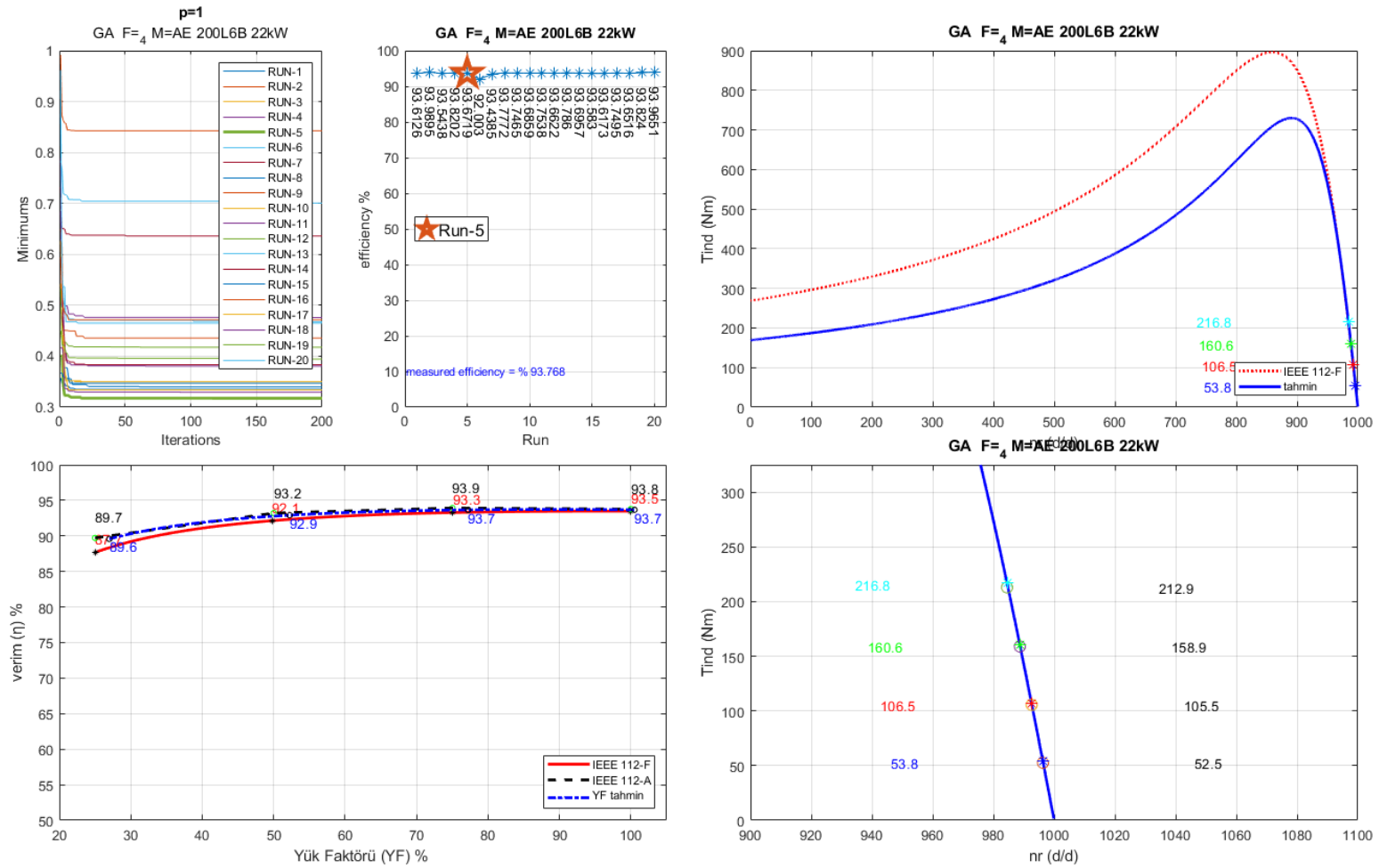
Şekil B2. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I HHO simülasyon grafikleri



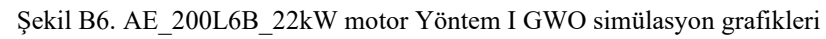
Şekil B3. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I RFA simülasyon grafikleri

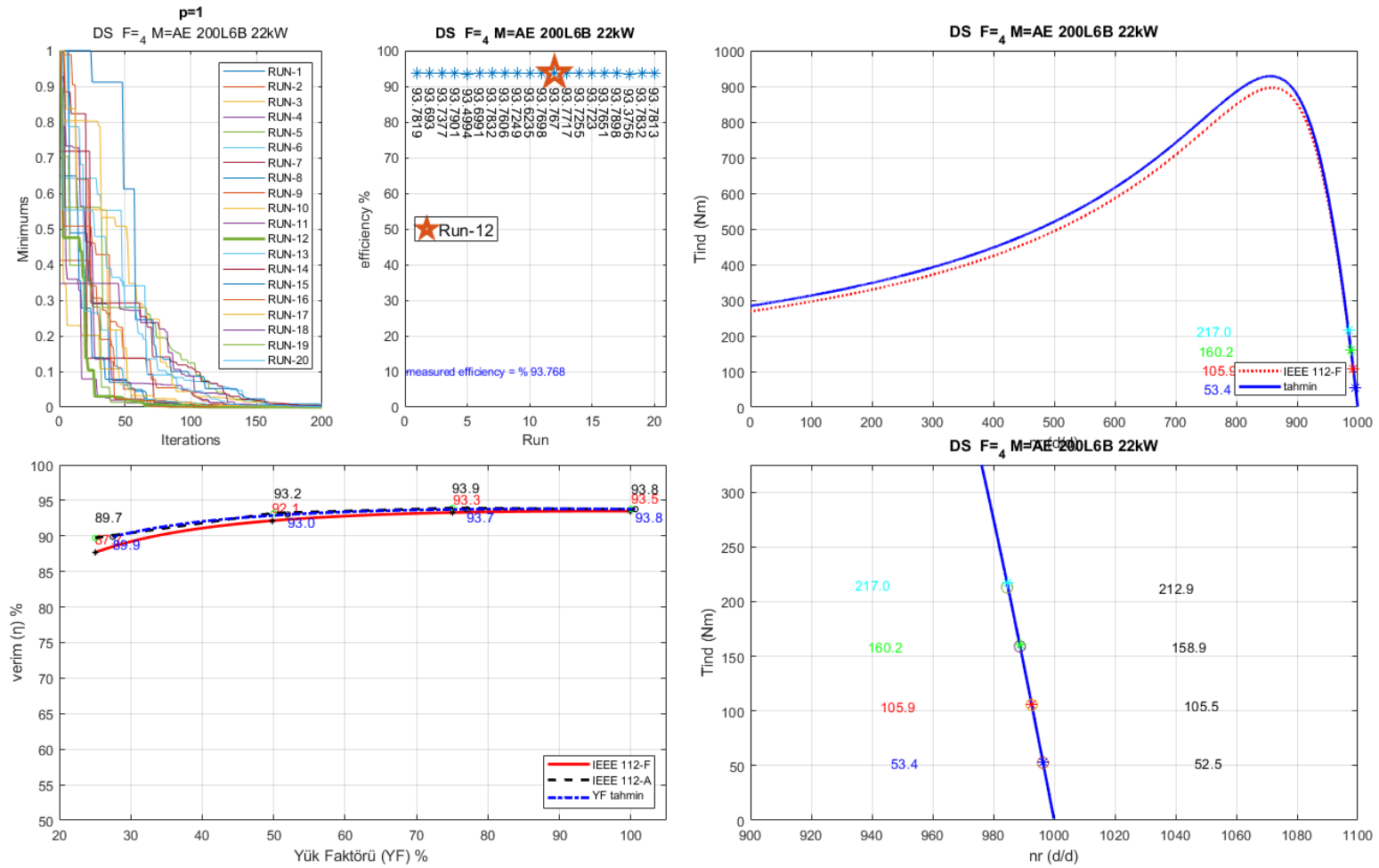


Şekil B4. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I WOA simülasyon grafikleri

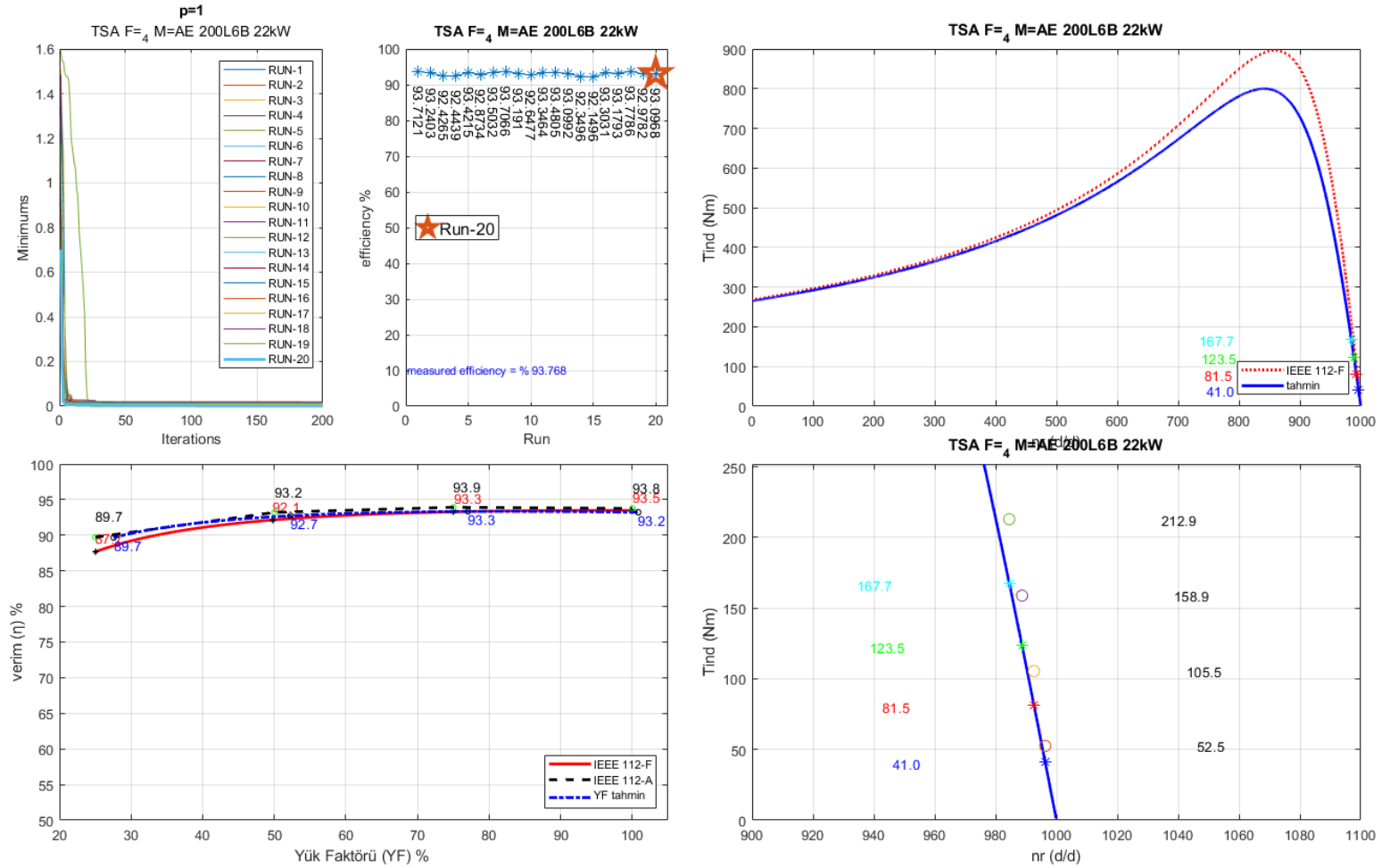


Şekil B5. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I GA simülasyon grafikleri

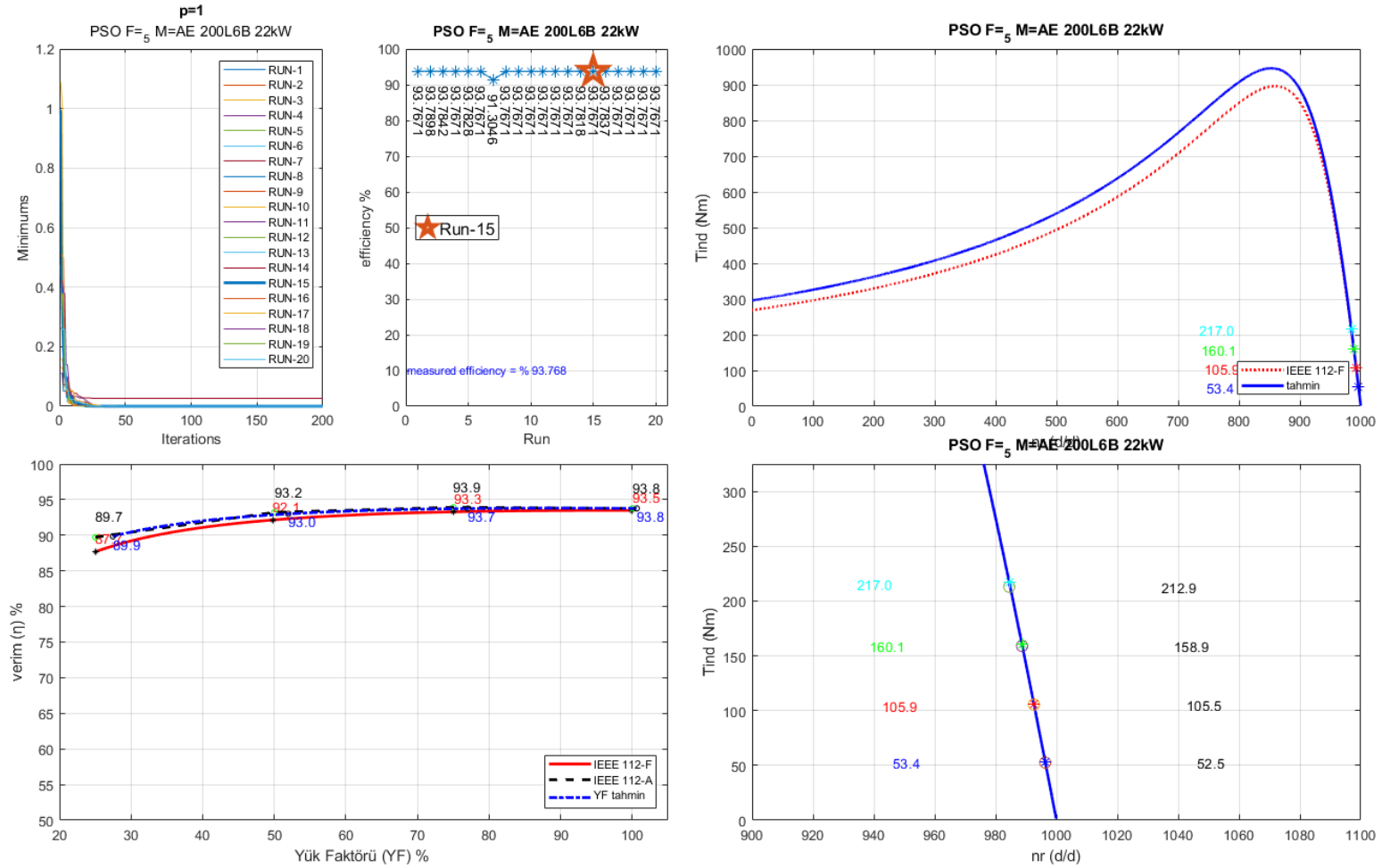




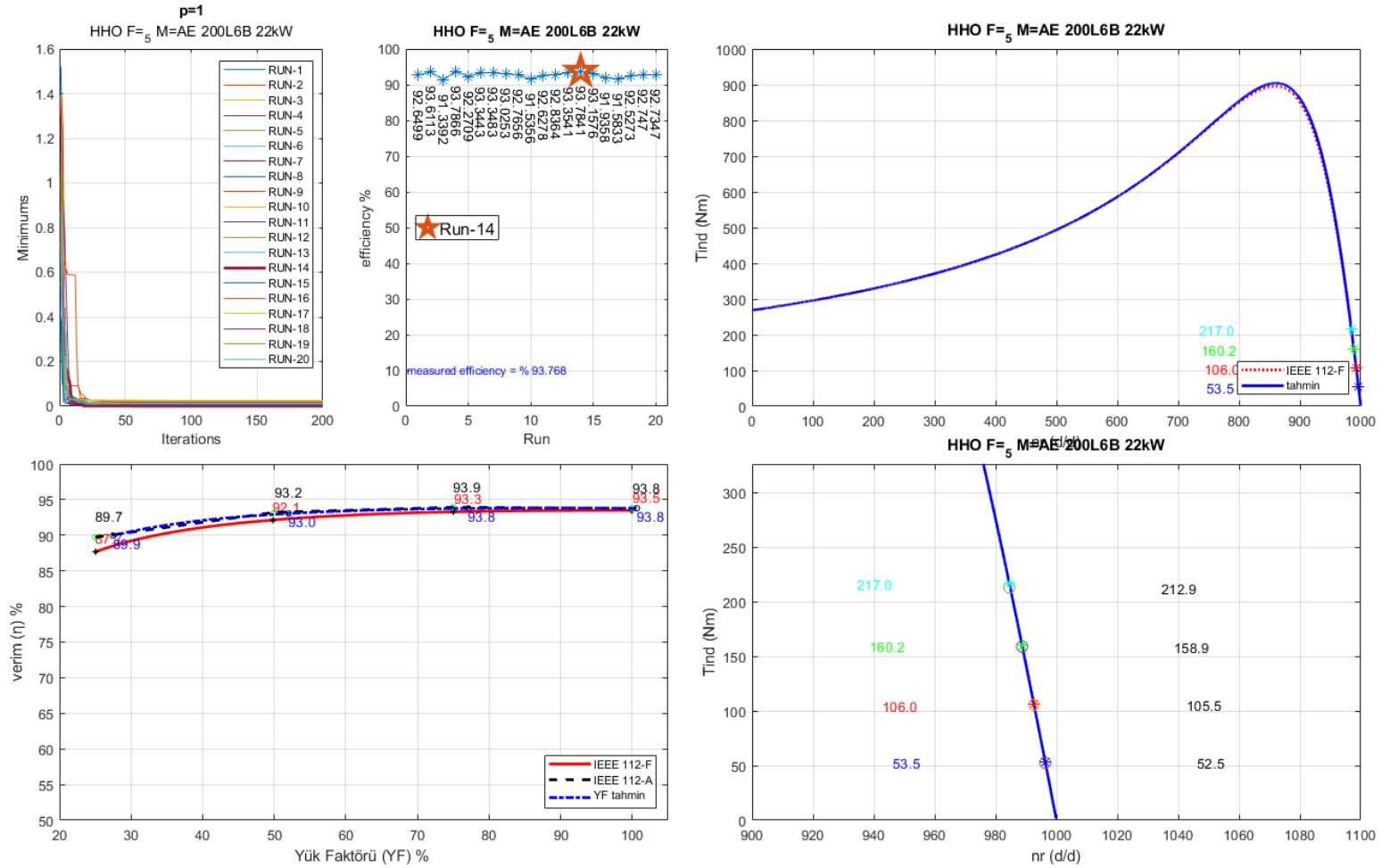
Şekil B7. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I DS simülasyon grafikleri



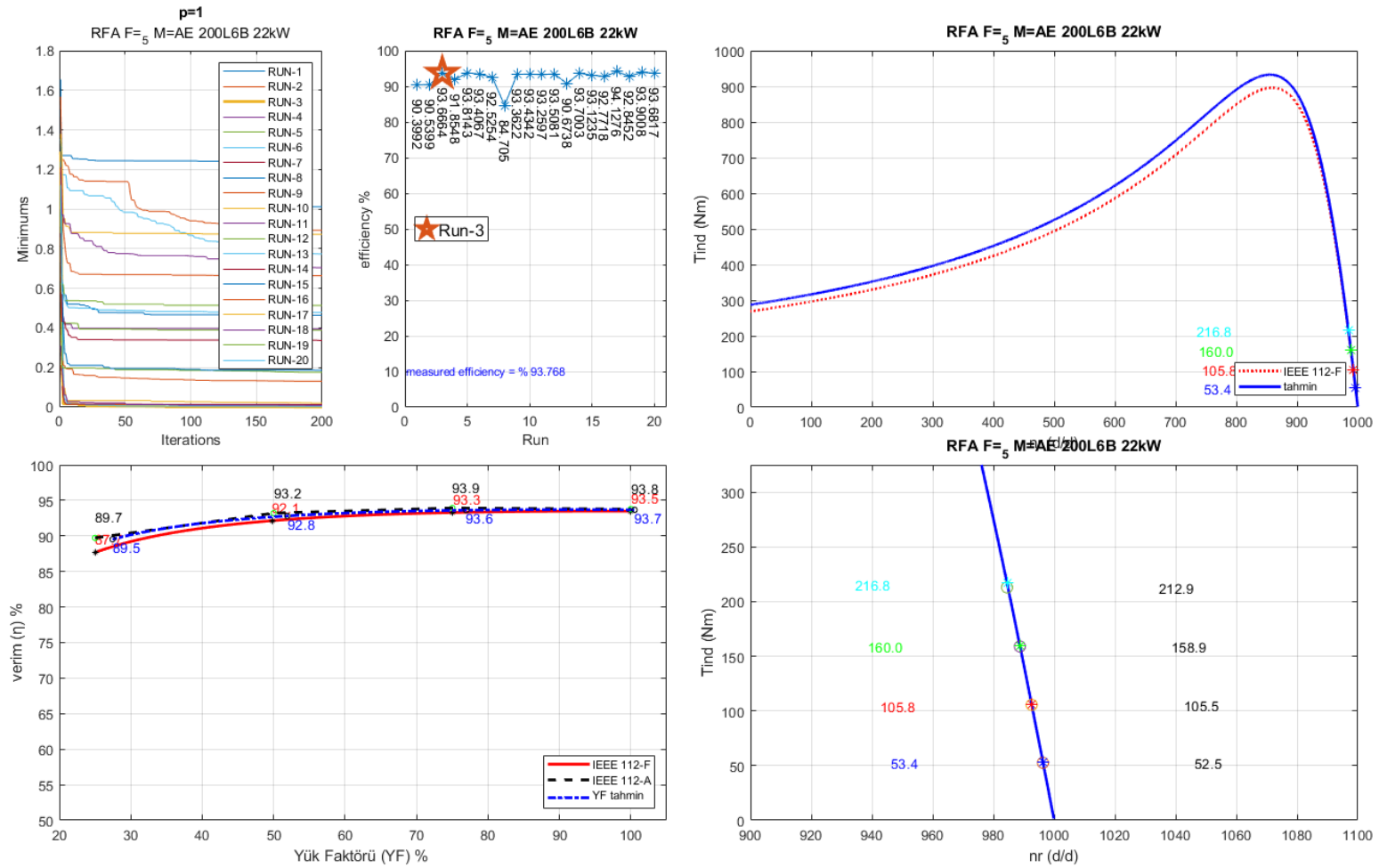
Şekil B8. AE_200L6B_22kW motor Yöntem I TSA simülasyon grafikleri



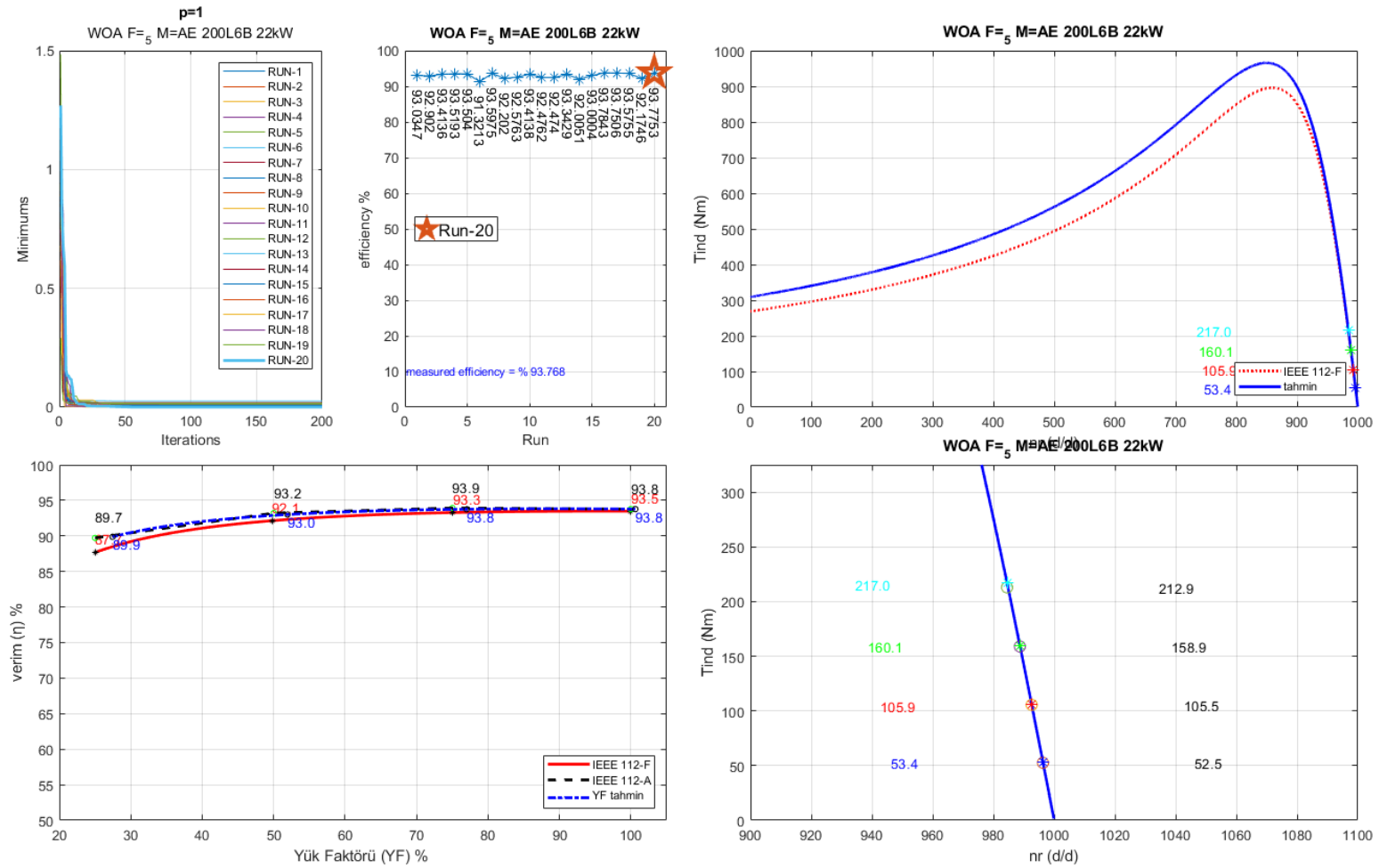
Şekil B9. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II PSO simülasyon grafikleri



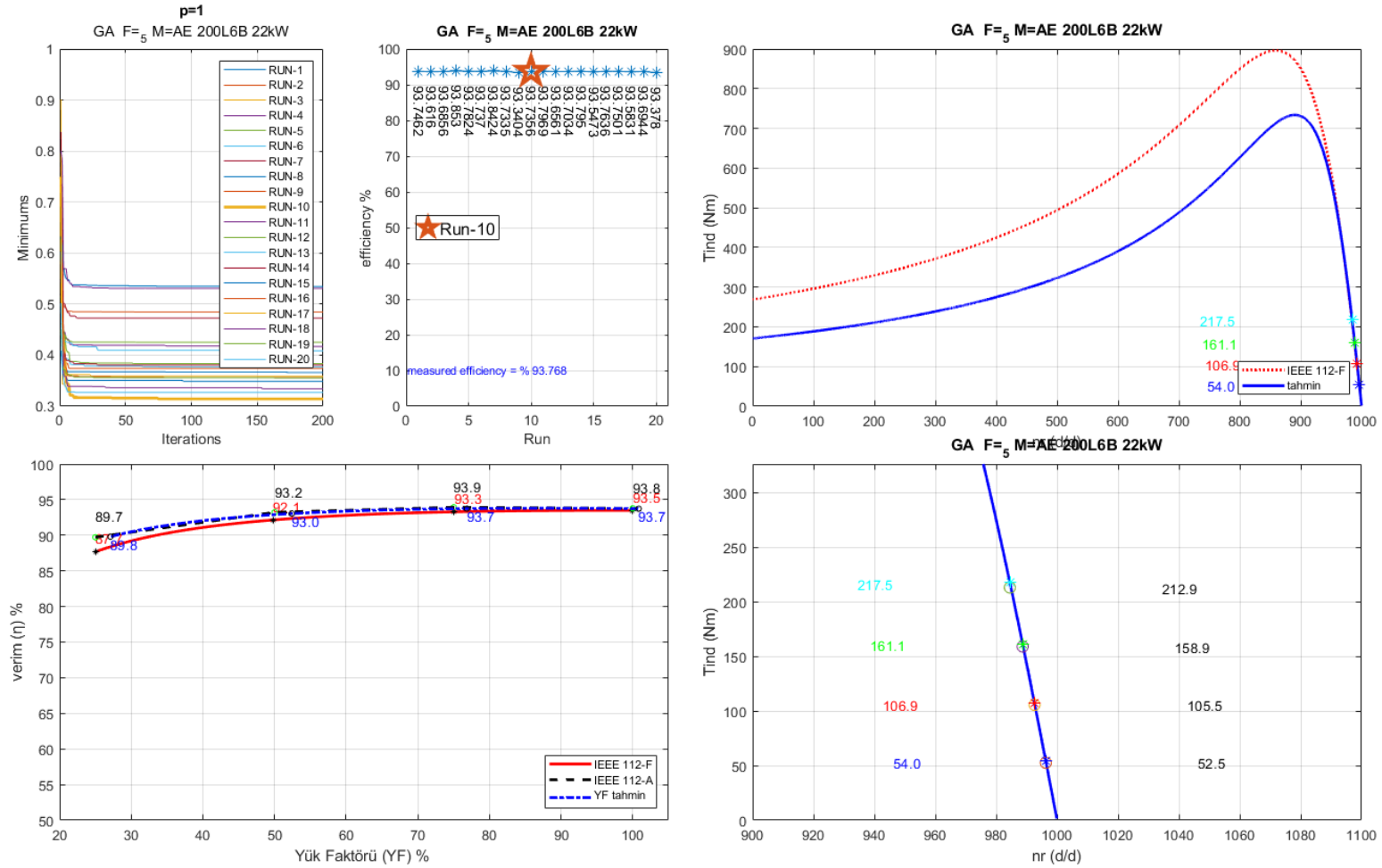
Şekil B10. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II HHO simülasyon grafikleri



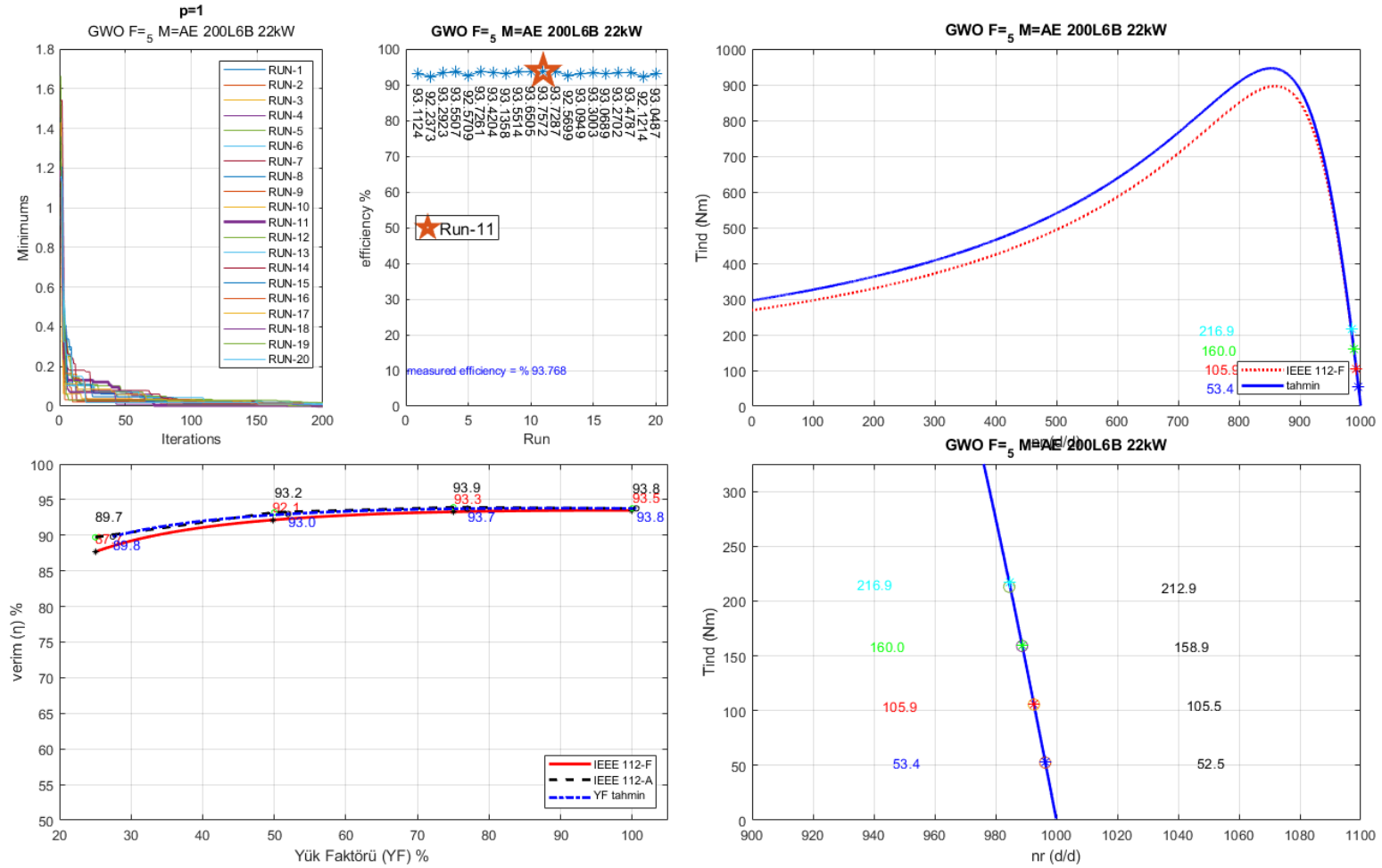
Şekil B11. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II RFA simülasyon grafikleri



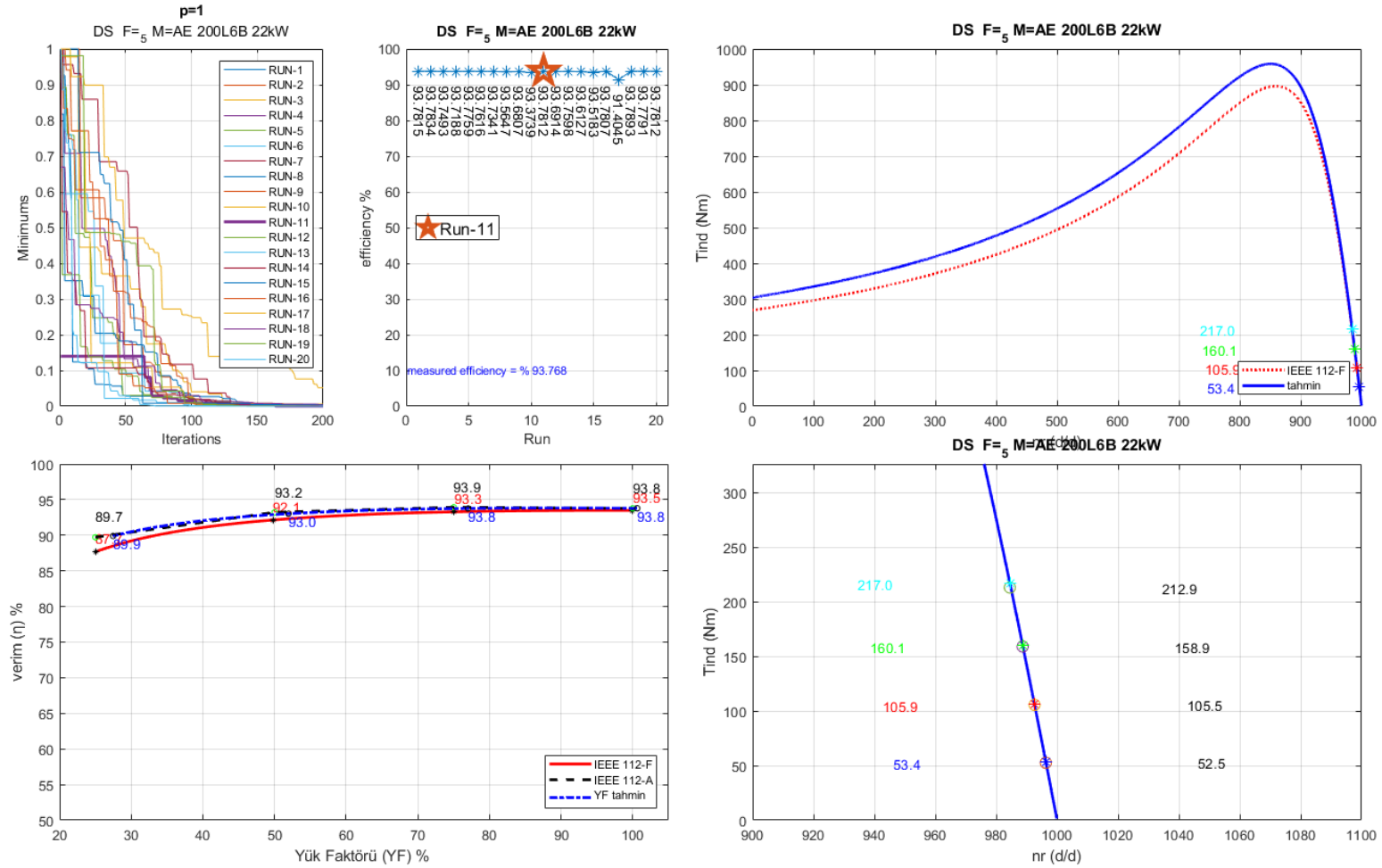
Şekil B12. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II WOA simülasyon grafikleri



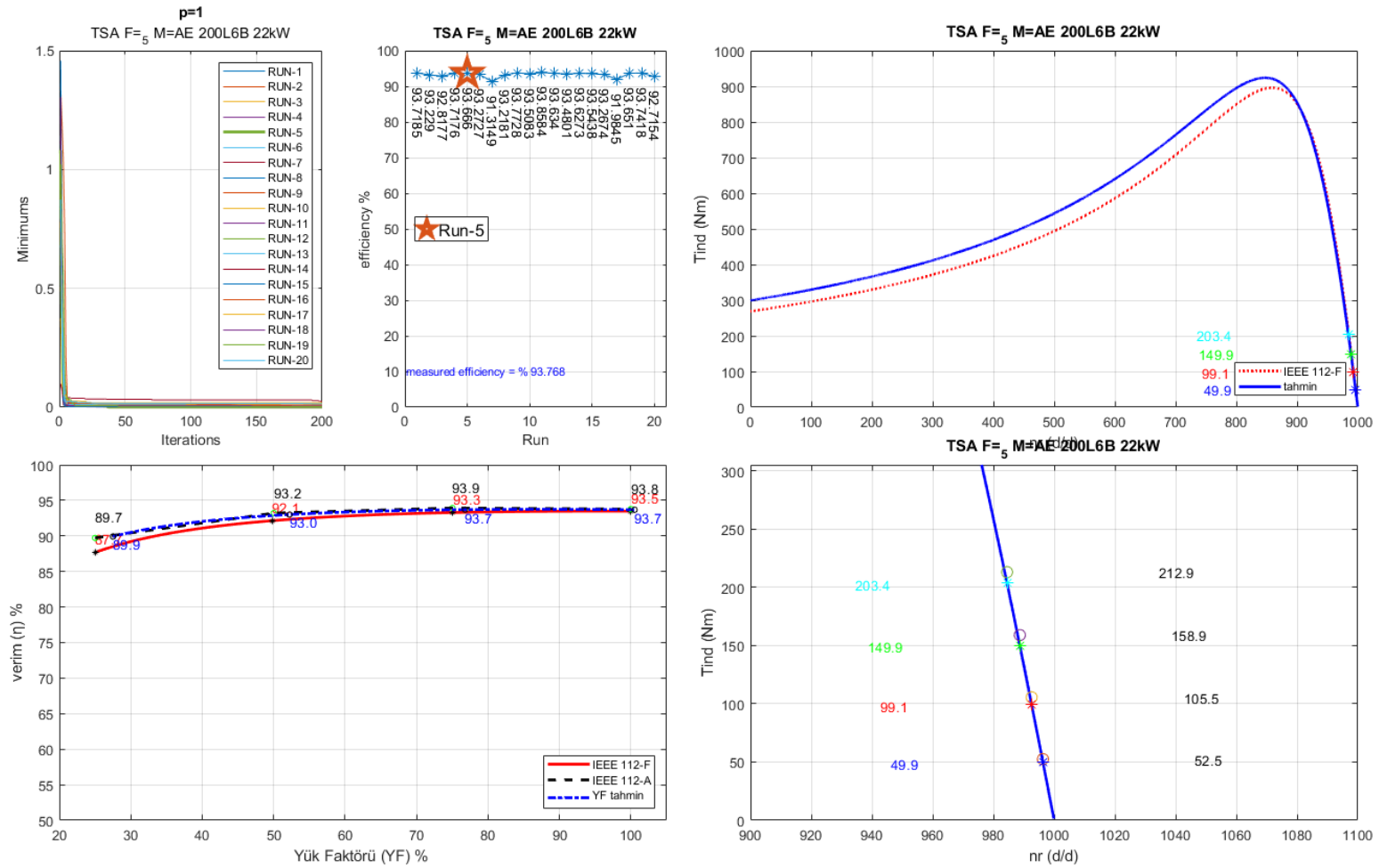
Şekil B13. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II GA simülasyon grafikleri



Şekil B14. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II GWO simülasyon grafikleri



Şekil B15. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II DS simülasyon grafikleri



Şekil B16. AE_200L6B_22kW motor Yöntem II TSA simülasyon grafikleri