

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ EĞRİLERİ İÇİN PARAMETRİK
MODELLEME YAKLAŞIMLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI

Tezi Hazırlayan
Ahmet ÖZCAN

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2024

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ EĞRİLERİ İÇİN PARAMETRİK
MODELLEME YAKLAŞIMLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI

Tezi Hazırlayan
Ahmet ÖZCAN

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2024

Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK danışmanlığında Ahmet ÖZCAN tarafından hazırlanan "**Rüzgâr Türbini Güç Eğrileri İçin Parametrik Modelleme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

02/07/2024

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Erdal IRMAK

Üye : Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Göksel GÖKKUŞ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../2024

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet ÖZCAN



TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgisini ve emeğini esirgemeyerek beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarıyla yol gösteren, yüksek lisans eğitimim süresince de her zaman deneyimleri ile beni destekleyen ve bugünlere gelmemde büyük katkısı olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK'a gönülden teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleriyle her türlü desteği veren Kayseri Üniversitesi Safiye Çıkrıkçıoğlu MYO'dan hocam Sayın Doç. Dr. Uğur Azizoğlu'na, Kayseri Üniversitesi Tomarza MYO'dan hocalarım Sayın Öğr. Gör. Dr. Abdüsselam Kesikoğlu'na ve Sayın Öğr. Gör. Atahan GÜVEN'e, Türk Telekom Kayseri Bölge Planlama ve Yatırım Müdürü ağabeyim Osman ÖZCAN'a ve İngilizce Öğretmeni kardeşim Ayşegül TAŞDEMİR'e teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarımın her aşamasında karşılaştığım zorlukları sabırla birlikte aştığımız ve tez çalışmamın her anında yanımda olarak tamamlanmasında maddi manevi fedakârlığı ile büyük desteği olan sevgili eşim Öğr. Gör. Dr. Zehra Almaz ÖZCAN'a, bu süreçte moral kaynağımız olan kızım Hayrunnisa ÖZCAN'a ve oğlum Recep Taha ÖZCAN'a, kendi işlerinden zaman ayırıp çalışmalarım için bana yardımcı olan tüm aile bireylerimize ve bütün eğitim hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da beni sabır, anlayış ve büyük bir özveriyle destekleyen anneme ve merhum babama minnet ve şükranlarımı sunarım.

RÜZGÂR TÜRBİNİ GÜÇ EĞRİLERİ İÇİN PARAMETRİK MODELLEME
YAKLAŞIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet ÖZCAN

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinin dünya çapında geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Ancak, rüzgâr dinamikleri, rüzgâr enerjisinin stokastik doğası ve rüzgâr türbinlerinin operasyonel özelliklerinden dolayı elektrik güç sistemlerinin kararlı olarak çalışmasında birçok zorlukla karşılaşmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmenin önemli yollarından biri de rüzgâr türbini güç eğrisinin doğru olarak modellenmesidir. Bu tez çalışmasında, öncelikle, metasezgisel optimizasyon tabanlı parametrik metotlar kullanılarak rüzgâr türbini güç eğrisi modelleri oluşturulmuş ve uyum iyiliği istatistikleri açısından detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Bu aşamada, Afrika akbabaları, balçık küfü, deniz yırtıcıları, Fick yasası ve geometrik ortalama optimizasyon algoritmaları tarafından 3, 4 ve 5 parametrelili lojistik, 5., 6. ve 7. dereceden polinom ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarının tasarım katsayıları bulunmuştur. Geliştirilen güç eğrisi modelleri arasında, deniz yırtıcıları optimizasyon algoritması tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli uyum iyiliği istatistikleri açısından en etkin performansı göstermiştir. Sonrasında, bu hibrit güç eğrisi modeline k-ortalamlar kümeleme algoritması entegre edilerek daha düşük karesel hataların toplamı ve karekök ortalama hata sonuçları elde edilmiş ve bu sayede, daha kararlı güç eğrisi modeli üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Türbini, Güç Eğrisi, Metasezgisel Algoritma, Parametrik Fonksiyon, Modelleme.

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK
Sayfa Adeti: 64

COMPARISON OF PARAMETRIC MODELING APPROACHES FOR WIND TURBINE POWER CURVES

(M.Sc. Thesis)

Ahmet ÖZCAN

NEVSEHIR HACI BEKTAS VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

As a sustainable and clean energy source, wind energy has a wide range of applications around the world. However, due to wind dynamics, the stochastic nature of wind energy and the operational characteristics of wind turbines, many difficulties are encountered in the stable operation of electrical power systems. One of the important ways to overcome these difficulties is to accurately model the wind turbine power curve. In this thesis, initially, wind turbine power curve models were created using metaheuristic optimization-based parametric methods, and compared in detail in terms of the goodness-of-fit statistics. At this stage, the design coefficients of 3-, 4- and 5- parameter logistic, 5th-, 6th- and 7th-degree polynomial and modified hyperbolic tangent functions were found by African vultures, slime mould, marine predators, Fick's law and geometric mean optimization algorithms. Among the power curve models developed, marine predators optimization algorithm-based modified hyperbolic tangent model showed the most effective performance in terms of the goodness-of-fit statistics. Afterwards, k-means clustering algorithm was integrated into this hybrid power curve model to obtain lower sum of squared errors and root mean squared error results, thus producing a more stable power curve model.

Keywords: *Wind Turbine, Power Curve, Metaheuristic Algorithm, Parametric Function, Modeling.*

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YEŞİLBUDAK

Page Number: 64

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1 Yenilenebilir Enerji.....	1
1.2 Rüzgâr Enerjisi.....	2
1.3 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi.....	4
1.4 Güç Eğrilerinin Modellenmesi Üzerine Literatür Taraması	6
2. BÖLÜM	
PARAMETRİK FONKSİYONLAR VE METASEZGİSEL ALGORİTMALAR.....	10
2.1 Parametrik Fonksiyonlar	10
2.2 Optimizasyon Teorisi.....	10
2.2.1 Optimizasyonun temelleri	12
2.2.2 Problem formülasyonunun unsurları.....	13
2.2.3 Arama prosedürünün özellikleri.....	16
2.2.4 Sezgisel optimizasyon.....	17
2.2.5 Metasezgisel optimizasyon	19

2.3	Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması.....	20	
2.4	Balçık Küfü Optimizasyon Algoritması	24	
2.5	Deniz Yırtıcıları Optimizasyon Algoritması.....	26	
2.6	Fick Yasası Optimizasyon Algoritması	28	
2.7	Geometrik Ortalama Optimizasyon Algoritması.....	32	
3. BÖLÜM			
METASEZGİSEL OPTİMİZASYON TABANLI PARAMETRİK METOTLAR			
KULLANILARAK GÜÇ EĞRİSİ MODELLEMESİ			35
3.1	Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (AAOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi.....	36	
3.2	Balçık Küfü Optimizasyon Algoritması (BKOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi.....	36	
3.3	Deniz Yırtıcıları Optimizasyon Algoritması (DYOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi.....	37	
3.4	Fick Yasası Optimizasyon Algoritması (FYOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi.....	37	
3.5	Geometrik Ortalama Optimizasyon Algoritması (GOOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi.....	38	
3.6	Kümeleme ve Metasezgisel Optimizasyona Dayalı Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi Modellemesi.....	50	
4. BÖLÜM			
SONUÇLAR			52
KAYNAKÇA			54
ÖZGEÇMİŞ			64

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	AAOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması	39
Tablo 3.2.	AAOA ile elde edilen tasarım katsayıları	39
Tablo 3.3.	BKOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması.....	41
Tablo 3.4.	BKOA ile elde edilen tasarım katsayıları	41
Tablo 3.5.	DYOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması	43
Tablo 3.6.	DYOA ile elde edilen tasarım katsayıları	43
Tablo 3.7.	FYOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması	45
Tablo 3.8.	FYOA ile elde edilen tasarım katsayıları.....	45
Tablo 3.9.	GOOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması	47
Tablo 3.10.	GOOA ile elde edilen tasarım katsayıları	47

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Bir rüzgâr türbininin karakteristik güç eğrisi.....	5
Şekil 2.1.	Sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması.....	18
Şekil 2.2.	Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması.....	20
Şekil 3.1.	AAOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları	40
Şekil 3.2.	BKOA tabanlı 6. derece polinom modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları.....	42
Şekil 3.3.	DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları	44
Şekil 3.4.	FYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları.....	46
Şekil 3.5.	GOOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları	48
Şekil 3.6.	Rüzgâr türbini güç eğrisi modelleri için KOH ve KHT sonuçları	49
Şekil 3.7.	k-ortalamlar algoritması ile belirlenen küme merkezleri	50
Şekil 3.8.	Kümeleme ve metasezgisel optimizasyona dayalı güç eğrisi modelleme sonuçları.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CO₂	Karbon dioksit
°C	Santigrat derece
€	Euro
3PLF	3 parametrelı lojistik fonksiyon
4PLF	4 parametrelı lojistik fonksiyon
5PLF	5 parametrelı lojistik fonksiyon
5DP	5. dereceden polinom
6DP	6. dereceden polinom
7DP	7. dereceden polinom
MHT	Modifiye hiperbolik tanjant
m/s	Metre/saniye
kW	Kilovat
m	Metre
KHT	Karesel hataların toplamı
KOH	Karekök ortalama hata
AAOA	Afrika akbabaları optimizasyon algoritması
BKOA	Balçık küfü optimizasyon algoritması
DYOA	Deniz yırtıcıları optimizasyon algoritması
FYOA	Fick yasası optimizasyon algoritması
GOOA	Geometrik ortalama optimizasyon algoritması

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Yenilenebilir Enerji

Enerji, iş yapma yeteneği veya kapasitesi olarak tanımlanabilir [1]. Sürekli enerji tedariki, sürdürülebilir ekonomik büyüme ve ulusal güvenlik için kritik öneme sahiptir [2]. Yenilenemeyen fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarının kullanımı; hava kirliliğine, CO₂ emisyonları nedeniyle küresel ısınmaya, sera gazı emisyonlarına, asit yağmurlarına ve çevresel bozulmalara sebep olmaktadır [3]. Sanayi Devrimi'nden bu yana CO₂ konsantrasyonu %47 oranında artarak dünya sıcaklığını 1,9 °F ve deniz seviyesini 7" artırmıştır. Bu durum yeryüzündeki insan yaşamı için ciddi sonuçlar doğurmuştur [4, 5]. Bu sebeple, tüm ülkeler CO₂ emisyonlarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya yönelmiştir [5-7]. Yenilenebilir enerji kaynakları dünya çapında CO₂ emisyon düzeyini azaltarak küresel ısınmanın, dolayısıyla iklim değişikliğinin hızını yavaşlatabilir [8-12]. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımların artmasının ve bu kaynakların kullanılmasının temel nedeni budur [13].

Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak enerji tüketiminin de her geçen gün artmasıyla birlikte alternatif enerji kaynaklarına yönelim zorunlu hâle gelmiştir [1, 4, 14-16]. Yenilenebilir enerji, artan enerji talebini karşılamak ve çevresel endişeleri gidermek için kritik önem taşımaktadır [17]. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğaları gereği çevre dostu bir yapıya sahiptir. Yenilenebilir enerji yardımıyla daha fazla enerji tasarrufu sağlanabilir, fosil yakıtları yenilenebilir enerjiyle ikame ederek daha iyi bir çevre oluşturulabilir [1, 18]. Son 20 ila 30 yılda çevreyle ilgili problemlerin daha fazla ortaya çıkmasıyla birlikte yenilenebilir enerji teknolojisinin uygulanması daha iyi çevre koşulları için oldukça etkin bir duruma gelmiştir. Günümüz insanları sürdürülebilir, temiz, kolay ulaşılabilir, daha az maliyetli ve yeryüzünde daha fazla miktarda bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarını daha çok önemsemektedir [1, 14, 19-22].

Uluslararası Enerji Ajansı'nın resmi bir raporunda, 2019 yılından bu yana fosil yakıt kullanımının elektrik üretiminde azalmaya başladığı, küresel enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kullanımının arttığı belirtilmektedir [14, 20]. Dünyadaki toplam

elektrik üretiminin 2016 yılında yaklaşık %7,4'ü yenilenebilir enerjiden karşılanmış, 2021 yılında ise %12,8'e yükselmiştir [23]. Yenilenebilir enerji teknolojisinde, çevre dostu olan rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji gibi doğal enerji kaynakları kullanılmaktadır [1, 20].

Ülkemizin enerji talebi, özellikle 1980'li yıllardan itibaren artan yaşam standardı, nüfus ve büyüyen ekonomiyle birlikte artmaktadır. Yurt içi rezervlerin yetersiz olması nedeniyle petrol ve doğal gazın yaklaşık %80'i ithal edilmektedir [24-28]. Enerjide ithalat bağımlılığını azaltmak, yerli kaynak kullanımını maksimuma çıkarmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırma ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında enerji portföyü geliştirme çabaları sürmektedir [29, 30]. Türkiye'nin bir Akdeniz ülkesi olması ve coğrafi olarak nemli ve ılıman bir iklime sahip olması, yenilenebilir enerji açısından önemli bir potansiyel oluşturmaktadır [24, 31]. Rüzgâr ve güneş enerjileri, kullanılan fosil yakıt miktarının azaltılmasında önemli rol oynayacak iki adaydır [26]. Hâlihazırda Türkiye'nin, ülkedeki enerji talebini karşılamaya yönelik arzının %56'sı fosil yakıtlı enerji kaynaklarından, %44'ü ise hidroelektrik dâhil yenilenebilir enerjiden oluşmaktadır [32].

Türkiye rüzgâr, güneş, hidrolik, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin olmasına rağmen, enerji tüketim hızı üretimden daha yüksek olduğundan, yenilenemeyen diğer enerji kaynaklarının kullanımına bağlı olarak çevreye salınan emisyon miktarı artmaktadır [33, 34]. 2023 yılında elektrik ihtiyacının %30'unun modern yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması hedeflenmiştir [32]. Yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin 2023 hedeflerine ulaşılmış olsa da sera gazı emisyonlarının azaltılması hedefine ulaşmak için çalışmalar sürmektedir [28, 30]. Stratejik hedefler yenilenebilir enerjinin daha da yaygınlaşmasına işaret ederken, Türkiye karbondan arınma yönünde önemli adımlar atmıştır. Bu doğrultuda Paris Anlaşması imzalanmış ve 2053 yılına kadar net sıfır karbon emisyonuna ulaşma taahhüdünde bulunulmuştur [30].

1.2 Rüzgâr Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynakları doğal olarak oluşurlar ve yenilenemeyen kaynaklara olan bağımlılığın azaltılmasını sağlarlar [35]. Gelecek vaat eden yenilenebilir enerji

türlerinden biri olarak rüzgâr enerjisinin kullanımında son yıllarda küresel ölçekte hızlanan bir ilerleme gözlenmektedir [36-40]. 2000-2018 yılları arasında rüzgâr enerjisi kullanımı, toplam elektrik üretiminin % 0,2'sinden % 4,8'ine çıkmıştır ve bunun 2040 yılında % 12'nin üzerine çıkması beklenmektedir [39]. Dünya çapında pek çok ülke, fosil yakıtların yerine ulusal şebekelerine daha fazla temiz enerji eklemek için rüzgâr enerji santralleri kurmakta, mevcut enerji alt yapısını iyileştirmek ve çevreyi korumak için rüzgâr enerjisinin geliştirilmesine yönelmektedir [36, 37, 41, 42]. Rüzgâr enerjisi, Paris Anlaşması kapsamındaki emisyon azaltma hedeflerinin karşılanmasında da öncü bir rol oynamaktadır [43]. Bununla birlikte, ekonomik büyümede, daha fazla istihdam fırsatı yaratmada ve teknolojinin gelişimini desteklemede hayati bir rol oynamaktadır [36].

Rüzgâr enerjisi, hem karada hem de denizde büyüyen en önemli yenilenebilir kaynaklardan biridir [44, 45]. Hidroelektrik enerjinin dışında yenilenebilir enerji kategorisinin en büyük bileşenini rüzgâr enerjisi tüketimi oluşturmaktadır [44]. Bunun sebebi; yenilenebilir enerji teknolojileri içerisinde rüzgârın en hızlı büyüyen, en rekabetçi, en az zararlı ve en yaygın kullanılanlarından biri olmasıdır [36, 43, 44, 46].

Dünya genelinde yenilenemeyen kaynakların küresel rezervlerinin azaldığı günümüzde, rüzgâr enerjisi, enerji güvenliğine katkıda bulunarak sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunar [35]. 2100 yılına kadar rüzgâr enerjisi kullanımından iklim değişikliğinin azaltılmasındaki öngörü, takip edilen rüzgâr enerjisi genişleme senaryosuna bağlı olarak 0,3 ila 0,8 °C arasında değişmektedir. Rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesindeki yıllık artışların, mevcut oranların yaklaşık iki katı kadar hızlı bir şekilde artması; sanayi öncesi seviyelere göre 2 °C ısınma eşliğinin geçilmesini büyük ölçüde geciktirebilir [42]. Avrupa Birliği (AB) de yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi ve çözümlerine büyük önem vermektedir. Rüzgâr enerjisi, 2018 yılında AB'de ilk kez yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük paya sahip olmuştur [47].

Türkiye de yenilenebilir kaynaklar arasında rüzgâr enerji potansiyeli oldukça yüksek olan bir ülkedir [48]. Türkiye'de rüzgâr enerjisi üretiminin gelişimi, küresel ölçekteki genel gelişimle uyumlu bir şekilde ilerlemiş ve rüzgâr enerjisi yatırımları önemli oranda artmıştır. Son yıllarda yenilenebilir enerji üretimini artırmak amacıyla vergi

muafiyetleri, sabit fiyat garantileri, kamu arazi tahsisi gibi bir takım teşvikler verilmiştir. Bu teşvikler sayesinde, rüzgâr enerjisi yatırımları ivme kazanmış ve çok sayıda yatırımcı, bu alanda yatırım çalışmaları gerçekleştirmiştir [49, 50].

Türkiye, 2020 yılında 1 milyar €'yu aşan arazi ve rüzgâr enerjisi yatırımlarıyla rüzgâr enerjisine en fazla yatırım yapan ilk beş Avrupa ülkesi arasında yer almıştır. Aynı zamanda, en yüksek kurulu yenilenebilir enerji kapasitesine sahip Avrupa'nın 6., Dünya'nın 13. ülkesi olmuştur. 2022 yılında ülkedeki rüzgâr enerji santrali sayısı 300'e yaklaşmıştır [51]. Bunun, önümüzdeki yıllarda daha da artacağı beklenmektedir. Dolayısıyla, ülkemizdeki rüzgâr enerji sistemlerinin güvenilirliğinin ve kullanılabilirliğinin artırılması, büyüyen enerji ihtiyacının karşılanmasına yardımcı olması ve küresel karbon emisyonu hedeflerinin azaltılmasına katkıda bulunması açısından büyük önem taşımaktadır [52-54]. Ayrıca, Türkiye, Paris Anlaşması kapsamında ilk adım olarak karbon emisyonlarını 2030 yılına kadar % 21 oranında azaltmayı taahhüt etmiştir [48].

1.3 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

Rüzgâr enerji sistemlerinde seçilen sahanın rüzgâr hızı dağılımı, rüzgâr türbininin göbek yüksekliği ve rüzgâr türbininin güç çıkış eğrisi, rüzgâr türbinlerinin performansını etkileyen başlıca faktörlerdir ve bunların, rüzgâr türbinlerinin modellenmesinde dikkate alınması gerekir [55, 56]. Rüzgâr türbini güç eğrileri, rüzgâr enerji değerlendirmesinde, rüzgâr türbini seçiminde, durum izlemede, sorun gidermede, kontrol ve optimizasyonda önemli bir rol oynar [57]. Bir rüzgâr türbinine ait teorik güç Denklem (1.1) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (1.1)$$

P : Rüzgâr gücü (Watt)

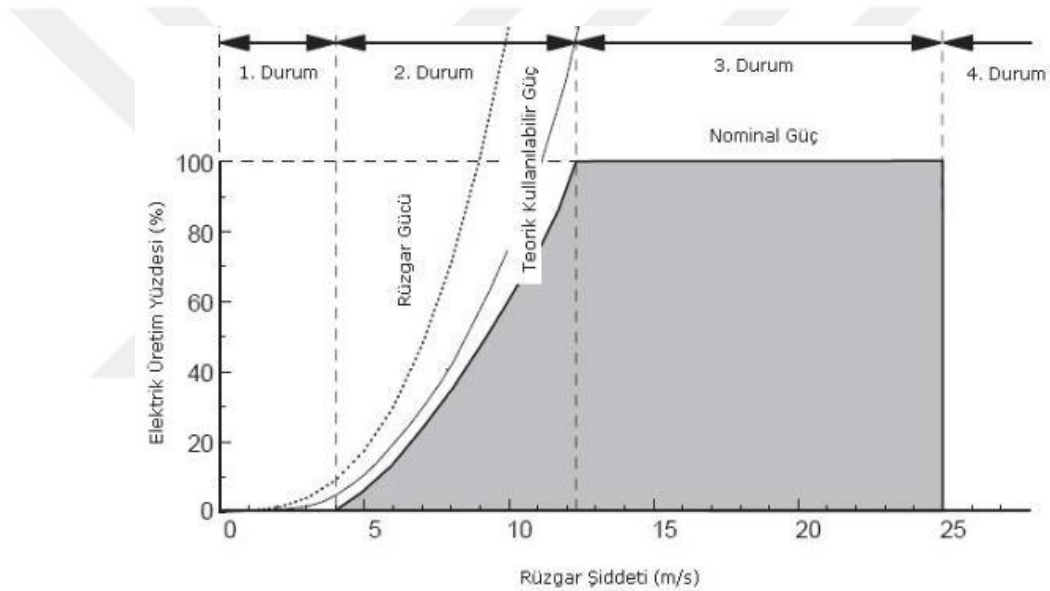
ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : Kanatların süpürdüğü alan (m^2)

V : Rüzgâr hızı (m/s)

C_p : Kapasite faktörü

Bir rüzgâr türbini güç eğrisi, esas olarak dört bölgeden oluşur. Devreye girme hızı (cut-in speed) olarak bilinen minimum hız eşiğinin altındaki ilk bölge, sıfır güç çıkışına sahiptir. Türbinin nominal çıkış gücüne ulaşana kadar uzanan ikinci bölge, nominal hıza (rated speed) kadar güçte hızlı artışı gösterir. Üçüncü bölge, kesme hızına (cut-out speed) ulaşılan kadar sabit bir güç çıkışı verir. Dördüncü bölgede ise, kesme hızı aşıldığı için sistem kapatılır ve enerji üretilmez. Devreye girme hızı, güç üretimi için gereken minimum hız değeridir. Devreden çıkma hızı ise, türbinin devre dışı kalacağı maksimum hız değeridir [55]. Şekil 1.1’de bir rüzgâr türbininin karakteristik güç eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Bir rüzgâr türbininin karakteristik güç eğrisi [58]

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde rüzgâr enerjisi, rüzgâr hızına göre önemli ölçüde değişir [59]. Türbinin teknik özellikleri (aerodinamik verimlilik limitleri, güç yoğunluğu, devreye girme hızı, dönüş hızı, devreden çıkma hızı, vb.) ve çevresel faktörler (rüzgâr kayması, rüzgâr sapması, türbülans yoğunluğu, hava yoğunluğu, vb.) güç eğrilerinin bireysel olarak birbirinden çok farklı olmasındaki temel etmenlerdendir [60, 61]. Bir güç eğrisi, rüzgâr türbini üretim sisteminin bileşenlerine dair ayrıntılar olmadan rüzgâr enerjisinin tahmin edilmesine yardımcı olur [62, 63]. Aynı zamanda, rüzgâr enerjisi entegrasyonu için depolama kapasitesini daha gerçekçi bir şekilde boyutlandırmak, rüzgâr türbini güç eğrisinin doğru bir şekilde modellenmesi ile mümkündür [64, 65]. Güç eğrisini modellemek için, uzun bir süre boyunca periyodik

aralıklarla kaydedilen rüzgâr hızı ve güç çıkışı verileri, SCADA sisteminden veya rüzgâr çiftliklerinden elde edilebilir [62].

1.4 Güç Eğrilerinin Modellenmesi Üzerine Literatür Taraması

Rüzgâr türbini güç eğrilerinin modellenmesi üzerine literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Shokrzadeh ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi karakterizasyonu için 5. ve 6. dereceden polinom fonksiyonlar, yerel ağırlıklı regresyon, kübik eğrisel çizgi regresyonu ve cezalandırılmış eğrisel çizgi regresyonu uygulamışlardır. Bunların optimum parametrelerini en küçük kareler yöntemini kullanarak bulmuşlardır [64]. Long ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi profilini doğrusal ve Weibull rüzgâr hızı dağılım fonksiyonlarına dayalı en küçük kareler yöntemini kullanarak oluşturmuşlardır [66].

Villanueva ve Feijóo, güç eğrisi modellemesinde lojistik fonksiyon parametrelerinin yeniden formüle edilmesi için deterministik süreç kullanan 4 parametrelili lojistik, basitleştirilmiş deterministik süreç kullanan 4 parametrelili lojistik ve deterministik süreç kullanan 3 parametrelili lojistik modelleri karşılaştırmışlardır [63]. Sohoni ve çalışma arkadaşları, güç eğrisini oluşturmak için 4 ve 5 parametrelili lojistik fonksiyonları kullanmışlar ve optimum katsayıları en küçük kareler yöntemini kullanarak belirlemişlerdir [67].

Marčiukaitis ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi yaklaşımı için 3 parametrelili üstel, 6. dereceden polinom ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarını uygulamışlar ve her modelin tasarım parametrelerini en küçük kareler yöntemini kullanarak tahmin etmişlerdir [68]. Zou ve çalışma arkadaşları, güç eğrisini elde etmek için 3, 4, 5 ve 6 parametrelili lojistik ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarını uygulamışlar ve optimum katsayıları gri kurt, yusufçuk ve geri izleme arama algoritmalarını kullanarak bulmuşlardır [69].

Taslimi-Renani ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi karakterizasyonu için 4 ve 5 parametrelili lojistik, 7. dereceden polinom ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarını uygulamışlardır. Bunların tasarım katsayılarını Cuckoo arama algoritması, geri izleme arama algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu kullanarak belirlemişlerdir [70]. Seo ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi profilini 4 parametrelili lojistik ve Weibull rüzgâr hızı

dağılım fonksiyonlarına dayalı maksimum olabilirlik yöntemini kullanarak oluşturmuşlardır [71].

Wadhvani ve Shukla, güç eğrisi modellemesi için 3. dereceden polinom, 3. dereceden ağırlıklı polinom, 10. dereceden polinom, 10. dereceden ağırlıklı polinom, kübik polinom ve eğrisel çizgi düzleştirme fonksiyonlarını uygulamışlardır. Bunların tasarım parametrelerini en küçük kareler yöntemini kullanarak elde etmişlerdir [72]. Wei ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi oluşturmak için 3 ve 6 parametrelili lojistik, 6. ve 9. dereceden polinom fonksiyonları kullanmışlar ve optimum parametreleri gri kurt optimizasyon algoritması kullanarak belirlemişlerdir [73].

Wang ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi yaklaşımı için 4 ve 5 parametrelili lojistik, 6. ve 9. dereceden polinom regresyonu uygulamışlar ve her modelin tasarım parametrelerini en küçük kareler yöntemini kullanarak tahmin etmişlerdir [74]. Sohoni ve çalışma arkadaşları, güç eğrisini elde etmek için 4 ve 5 parametrelili lojistik, doğrusal, karesel, binom, kübik, Weibull tabanlı ve çift üstel fonksiyonların modelleme performansını analiz etmişlerdir. Bunların optimum katsayılarını en küçük kareler ve maksimum olabilirlik yöntemlerini kullanarak belirlemişlerdir [75].

Wang ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi karakterizasyonu için 3, 4, 5 ve 6 parametrelili lojistik, çift üstel, düzeltilmiş çift üstel ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarını kullanmışlar ve her modelin optimum parametrelerini en küçük kareler yöntemi, akıllı optimizasyon ve deterministik süreç yöntemini kullanarak belirlemişlerdir [76]. Rogers ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi profilini parçalı doğrusal ve hiperbolik tanjant fonksiyonlarına dayalı kuantum parçacık sürüsü optimizasyonunu kullanarak oluşturmuşlardır [77]. Xie ve çalışma arkadaşları, 4 parametrelili lojistik ve 7. dereceden polinom fonksiyonlarını çalıştırmışlardır [78].

Wang ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi modellemesi için 4 ve 5 parametrelili lojistik fonksiyonlar ve 8. ve 9. dereceden polinom fonksiyonları uygulamışlardır. Her modelin tasarım parametrelerini genetik algoritma ve en küçük kareler yönteminin birleşimine dayalı olarak tahmin etmişlerdir [79]. Raj ve çalışma arkadaşları, güç eğrisini oluşturmak için 4., 7. ve 9. dereceden polinom, bulanık c-ortalamlar ve çıkarımlı kümeleme uygulamışlardır. Bunların optimum parametrelerini en küçük kareler, olasılık

ve küme merkezi yöntemini kullanarak bulmuşlardır [80]. Chang ve çalışma arkadaşları, Weibull rüzgâr hızı dağılımına dayalı doğrusal, karesel ve kübik güç eğrisi modelleri oluşturmuşlardır [81].

Pei ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi yaklaşımı için 3, 4, 5 ve 6 parametrelili lojistik ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarını uygulamışlar ve her modelin parametrelerini geri izleme arama algoritması kullanarak optimize etmişlerdir [82]. Saxena ve Rao, güç eğrisini elde etmek için 8. dereceden polinom ve Weibull rüzgâr hızı dağılım fonksiyonlarını kullanmışlar ve optimum katsayıları en küçük kareler ve Gram-Schmidt ortogonalleştirme yöntemini kullanarak belirlemişlerdir [83]. Fahmy ve çalışma arkadaşları, güç eğrisi profilini 1. dereceden 10. derece polinom fonksiyona kadar test etmişler ve optimum parametreleri en küçük kareler yöntemini kullanarak belirlemişlerdir [84].

Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbini güç eğrisi modellemesi için metasezgisel optimizasyon tabanlı parametrik metotlar geliştirilmiş ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Metasezgisel optimizasyon için, rüzgâr türbini güç eğrisi modellemesinde henüz uygulanmamış olmaları nedeniyle, Afrika akbabaları, balçık küfü, deniz yırtıcıları, Fick yasası ve geometrik ortalama optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Parametrik modelleme için, rüzgâr türbini güç eğrisi modellemesinde sıklıkla karşılaşılan parametrik yaklaşımlar olmaları nedeniyle, 3, 4 ve 5 parametrelili lojistik, 5., 6. ve 7. dereceden polinom ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Güç eğrisi modelleme sonuçlarının kıyaslanmasında ise, karesel hataların toplamı ve karekök ortalama hata ölçekleri açısından uyum iyiliği istatistikleri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Son olarak, k-ortalamlar kümeleme algoritmasının da kullanılmasıyla birlikte rüzgâr türbini güç eğrisinin operasyonel özellikleri yüksek bir doğrulukta modellenmiştir. Yüksek doğrulukta modellenen bir rüzgar türbini güç eğrisi rüzgâr enerjisine dayalı sistemlerin kararlılığını ve performansını iyileştirme, optimum sistem tasarımı, depolama kapasitesinin belirlenmesi ve rüzgâr türbinlerinin kontrolü açılarından yararlı olacaktır.

Bu tez çalışması 4 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde yenilebilir enerji, rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbini güç eğrilerinden bahsedilmiş, güç eğrilerinin modellenmesi ile ilgili literatür taraması sunulmuştur. 2. Bölümde öncelikle parametrik fonksiyonlar ve

optimizasyon temelleri açıklanmış, sonrasında bu tez çalışmasında uygulanan metasezgisel algoritmaların matematiksel altyapısı ve çalışması anlatılmıştır. 3. Bölümde metasezgisel optimizasyon tabanlı parametrik metotlar kullanılarak güç eğrisi modellemeleri yapılmış ve uyum iyiliği istatistikleri karşılaştırılmıştır. 4. Bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilmiş, sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.



2. BÖLÜM

PARAMETRİK FONKSİYONLAR VE METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

2.1 Parametrik Fonksiyonlar

Parametrik fonksiyonlar, bir bağımlı değişkenin bir veya daha fazla bağımsız değişkenle ifade edilmesini sağlayan matematiksel ifadelerdir. Bu tez çalışmasında, Denklem (2.1)'den (2.7)'ye kadar verilen, sırasıyla, 3 parametrelili lojistik fonksiyon (f_{3PL}), 4 parametrelili lojistik fonksiyon (f_{4PL}) ve 5 parametrelili lojistik fonksiyon (f_{5PL}), 5. dereceden polinom fonksiyon (f_{5DP}), 6. dereceden polinom fonksiyon (f_{6DP}) ve 7. dereceden polinom fonksiyon (f_{7DP}) ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonu (f_{MHT}) kullanılmıştır. Bu denklemlerde k_1, k_2, \dots, k_n parametrik fonksiyonların vektör katsayısını temsil eder.

$$f_{3PL}(x) = \frac{k_1}{1 + e^{-k_2(x-k_3)}} \quad (2.1)$$

$$f_{4PL}(x) = k_1 \left(\frac{1 + k_2 e^{\frac{-x}{k_3}}}{1 + k_4 e^{\frac{-x}{k_3}}} \right) \quad (2.2)$$

$$f_{5PL}(x) = k_1 + \frac{k_2 - k_1}{\left(1 + \left(\frac{x}{k_3}\right)^{k_4}\right)^{k_5}} \quad (2.3)$$

$$f_{5DP}(x) = k_6 x^5 + k_5 x^4 + k_4 x^3 + k_3 x^2 + k_2 x + k_1 \quad (2.4)$$

$$f_{6DP}(x) = k_7 x^6 + k_6 x^5 + k_5 x^4 + k_4 x^3 + k_3 x^2 + k_2 x + k_1 \quad (2.5)$$

$$f_{7DP}(x) = k_8 x^7 + k_7 x^6 + k_6 x^5 + k_5 x^4 + k_4 x^3 + k_3 x^2 + k_2 x + k_1 \quad (2.6)$$

$$f_{MHT}(x) = \frac{k_1 e^{k_2 x} - k_3 e^{-k_4 x}}{k_5 e^{k_6 x} + k_7 e^{-k_8 x}} + k_9 \quad (2.7)$$

2.2 Optimizasyon Teorisi

Optimizasyon, en genel anlamıyla; tüm olası alternatifleri açıkça sıralamak ve değerlendirmek zorunda kalmadan, bir alternatifler topluluğundan en iyi adayı bulmak ve tanımlamak için kullanılan matematiksel sonuçlar ve sayısal yöntemler bütünü olarak

ifade edilebilir. Kısaca, “mevcut koşullar altında en iyi sonucu ifade eder” şeklinde tanımlanabilir [85, 86].

Mühendisliğin klasik işlevi; yeni, daha iyi, daha verimli ve daha ucuz sistemler tasarlamasının yanı sıra mevcut sistemlerin daha iyi çalışması için plan ve projeler tasarlamak olduğundan, optimizasyon süreci mühendisliğin temelinde yer almaktadır [85, 87, 88]. Optimizasyon, mühendisliğin yanı sıra tüm ana disiplinlerin tasarım faaliyetlerinin gerekli bir parçası haline gelmiştir. Ekonomik açıdan uygun ürün veya hizmeti en iyi kaliteyle üretme isteği, bunun temel nedenidir. Ucuz hesaplama kaynakları yoluyla sinerji oluşturan gelişmiş üretim ve tasarım araçları, özellikle mühendislik ürünleri olmak üzere yeni gelişmelerde optimizasyon yöntemlerinin dikkate alınmasına yardımcı olmuştur. Somut bir ürünün yokluğunda bile optimizasyon belirli bir ölçüde fayda sağlayan çözümlere odaklanırken, sorunları tanımlama ve keşfetmede de yararlı olur [87].

Optimizasyon, sıklıkla bir ürün, hizmet veya tasarımla ilişkilendirilir. Hava araçlarındaki gereksiz ağırlık taşımayla ilgili maliyeti önemli ölçüde düşürmeye yönelik olarak, optimizasyonu benimseyen ilk disiplinler arasında havacılık ve uzay tasarımı yer almaktadır. Bununla birlikte, optimizasyon teorisinin mühendisliğin tüm dallarındaki uygulama alanlarından bazıları şu şekilde sıralanabilir [85-87]:

- Bileşenlerin veya tüm sistemlerin kontrolü,
- Mevcut operasyonların planlanması ve analizi,
- Konveyör, kamyon ve vinç gibi taşıma araçlarının minimum maliyetle tasarlanması,
- Optimum üretim planlama, kontrol ve çizelgeleme,
- Kimyasal işleme ekipman ve tesislerinin optimum tasarımı,
- Proses endüstrileri için optimum boru hattı ağlarının tasarımı,
- Endüstri için yer seçimi,
- İşletme maliyetlerini azaltmak için ekipmanların bakımının ve değiştirilmesinin planlanması,
- Envanter kontrolü,
- Dinamik sistemlerin kontrolü,

- Faydayı en üst düzeye çıkarmak için kaynakların veya hizmetlerin çeşitli faaliyetler arasında tahsis edilmesi,
- Üretim hatlarında bekleme ve boşa kalma sürelerinin kontrol edilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi,
- Rakipler karşısında maksimum kar elde etmek için en iyi stratejiyi planlamak,

Son yıllarda kompleks optimizasyon problemlerini çözebilmek amacıyla klasik matematiksel programlama yöntemlerinden kavramsal olarak farklı birtakım optimizasyon metotları geliştirilmiştir. Bu metotlardan çoğu moleküler, biyolojik, böcek sürülerinin ve nörobiyolojik sistemlerin belirli davranışlarına ve özelliklerine dayanmaktadır [86, 88]. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir [86, 89]:

- Genetik algoritmalar
- Tavlama benzetimi
- Tabu araştırma algoritması
- Karınca kolonisi optimizasyonu
- Parçacık sürüsü optimizasyonu
- Yapay ısıtma işlem algoritması
- Yapay bağışıklık algoritması
- Diferansiyel gelişim algoritması
- Bulanık optimizasyon
- Sinir ağı tabanlı yöntemler

2.2.1 Optimizasyonun temelleri

Optimizasyon tüm disiplinlere uygulanabilir. Optimizasyon teorisinin matematiksel sonuçlarını ve sayısal tekniklerini somut mühendislik problemlerine uygulamak için, optimize edilecek mühendislik sisteminin sınırlarını açıkça belirlemek, adayların hangi temele göre sıralanacağını belirleyen niceliksel kriteri tanımlamak gerekir. Çözümün nicel açıklaması sorunun niceliksel bir tanımını gerektirir. Buna matematiksel model denir. Tasarım karakterizasyonu ve koşulları matematiksel olarak ifade edilmelidir. İyi problem formülasyonu, optimizasyon çalışmasının başarısının anahtarıdır [85, 87].

2.2.2 Problem formülasyonunun unsurları

Optimizasyon probleminin amacı, amaç fonksiyonunu maksimum ya da minimum yapan değişkenlerin değerlerini hesaplamaktır. Optimizasyonun belirli bir problem için tasarım kurallarının bilinmesi, öncelikle tasarımı matematiksel terimlerle tanımlama yeteneği gerektirir. Bu terimler tasarım değişkenlerini, tasarım parametrelerini ve tasarım fonksiyonlarını içerir. Optimizasyonun, her biri kabul edilebilir bir ürün üretebilecek adaylar arasında en iyi tasarımı aramaya yönelik bir prosedür olduğunun bilinmesi de önemlidir [86, 87, 90, 91].

Tasarım Değişkenleri: Tasarım değişkenleri, belirli bir tasarımı tanımlayan varlıklardır. Optimum tasarım arayışında bu varlıklar, önceden belirlenmiş bir aralıkta değişecektir. Bu değişkenlerin değerleri, belirli bir tasarımı karakterize eder. Bu kümeye ait varlıkların sayısı ve türü, nicel tasarım probleminin tanımlanmasında ve kurulmasında çok önemlidir. Bu seçimin, tasarlanan nesnenin özünü yakalaması ve aynı zamanda tasarım probleminin niceliksel bir karakterizasyonunu sağlaması önemlidir.

Uygulamalı matematik terminolojisinde tasarım değişkenleri, çözülen problemin bilinmeyenleridir. Tasarım değişkenlerinin seçimi, sezgi, uzmanlık ve bilginin yönlendirdiği tasarımcının sorumluluğundadır. Tasarım değişkenleri kümesinin doğrusal olarak bağımsız olmaları gerekir. Bu, temel aritmetik işlemler yoluyla tasarım değişkenlerinden birinin değerinin, geri kalan diğer değişkenlerin değerlerinden oluşturulamayacağı anlamına gelir. Örneğin; dikdörtgen kesitli bir tasarımda uzunluk, genişlik ve alanı temsil eden üç değişkene sahip olamazsınız. İlk ikisi bilinirse, üçüncüsü otomatik olarak oluşturulur [86, 87, 91].

Tasarım Parametreleri: Tasarım parametreleri, farklı tasarımlar karşılaştırıldıkça değişmeyecek sabitleri tanımlar. Parametre örnekleri arasında malzeme özelliği, uygulanan yükler ve şekil seçimi yer alır. Soyut matematiksel bir modeldeki parametreler, p karakterinin kullanılması dışında tasarım vektörüne benzer bir biçimde temsil edilir. Dolayısıyla, $[P]$, P , $[p_1, p_2, p_3, \dots, p_q]$ problemin parametrelerini temsil eder. Parametreler, önceden belirlenmiş sabitlerdir ve q , parametre vektörünün uzunluğudur [87, 90].

Tasarım Fonksiyonları: Tasarım fonksiyonları, tasarımla ilgili anlamlı bilgileri tanımlar. Bahsedilen tasarım değişkenleri ve tasarım parametreleri tasarım fonksiyonları tarafından kullanılarak değerlendirilirler ve tasarım probleminin matematiksel modelini kurarlar. Bu işlevler tasarım hedeflerini ve/veya kısıtlamalarını temsil edebilir. Tasarım hedefi, en uygun tasarım arayışına yönlendirir. Kısıtlamaların karşılanması, tasarımın geçerliliğini sağlar. Birçok problemde, aynı fonksiyonun farklı tasarım senaryoları sağlayacak şekilde rol değiştirmesi mümkündür [87, 90].

Amaç Fonksiyonu: Geleneksel tasarım optimizasyon problemi, tek bir amaç fonksiyonu kullanılarak tanımlanır. Bunun anlamı, genellikle bazı tasarım fonksiyonları kullanılarak hesaplanan bazı miktarları en aza indirmek veya en üst düzeye çıkarmaktır. Amaç fonksiyonu, tasarım değişkenlerine bağlı olmalıdır. Bir maksimum problemi, amaç fonksiyonu için kullanılan fonksiyonun negatifi veya tersi kullanılarak bir minimizasyon problemi olarak yeniden biçimlendirilebilir.

Soyut matematiksel bir modelde amaç fonksiyonu, f sembolüyle temsil edilir. Tasarım değişkenlerine bağımlılığını belirtmek için sıklıkla $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ biçiminde ifade edilir. Kısaca $f(X)$ şeklinde temsil edilir. Tek amaçlı problemlerin f ile gösterilen tek bir fonksiyonu vardır. Çok amaçlı tasarımda ise, optimum tasarım arayışını yönlendirmek için birkaç farklı tasarım fonksiyonu kullanılır. Bunların genellikle birbiriyle çelişen hedefler olması beklenir. Popüler yaklaşım, çoklu hedeflerin uygun şekilde ağırlıklandırılmış doğrusal kombinasyonunu kullanmaktır fakat bu yaklaşımın sınırlamalarından biri, modelde kullanılan ağırlıkların seçimidir. Birincil hedefi tanıma ve tek amaç problemini, kalan amaç fonksiyonlarına dayalı ek kısıtlamalarla çözme şeklindeki alternatif bir yaklaşım, genellikle kabul edilebilir bir çözüm üretebilir [86, 87, 89, 90].

Kısıtlama Fonksiyonları: Kısıtlama fonksiyonlarının biçimi, tasarım gereksinimi veya tasarımcı tarafından belirlenen sayısal bir sınırlayıcı değerle karşılaştırılmasını gerektirir. Bu değer, problemin optimizasyonu sırasında sabit kalır. İyi tanımlanmış bir tasarım probleminin, bir vektör olarak temsil edilebilecek bu tür birçok fonksiyonu içermesi beklenir. Karşılaştırma, genellikle, üç standart ilişkisel operatör ($=$, \leq ve \geq) kullanılarak yapılır.

Kısıtlama fonksiyonları, eşitlik kısıtlamaları veya eşitsizlik kısıtlamaları olarak sınıflandırılabilir. Bazı optimizasyon problemleri herhangi bir kısıtlama içermez. Eğer problemde kısıtlama yoksa, bu problemlere kısıtlamasız problemler denir. Kısıtlamalar mevcutsa, tasarım değişkenlerinin mevcut değerlerine göre oluşturulan tasarımın geçerli ve kabul edilebilir olarak değerlendirilmesi için kısıtlamanın sağlanması gereklidir. Kısıtlamalar sağlanmazsa, çözüm olmaz. Uygulanabilir bir tasarım, tüm kısıtlamaların karşılandığı tasarımdır. Optimum çözüm, tasarım hedefini karşılayan çözümdür. Optimum tasarımın uygulanabilir olması gerekir. Kısıtlamaların çevrelediği tasarım alanına uygun alan adı verilir [87, 91].

Eşitlik Kısıtlamaları: Eşitlik kısıtlamaları, matematiksel olarak düzenli ve kullanımı kolaydır fakat sayısal olarak karşılaştırması daha fazla çaba gerektirir. Eşitlik kısıtlamaları, çözümün elde edilebileceği bölgeyi sınırladıkları için tasarım açısından daha kısıtlayıcıdır. Soyut matematiksel bir modelde eşitlik kısıtlarını temsil eden sembol h 'dir. Tasarım probleminde birden fazla eşitlik kısıtlaması olabilir. Dolayısıyla, eşitlik kısıtlamaları için $[H]$, H , $[h_1, h_2, \dots, h_l]$ vektör gösterimini temsil eder ve l vektörün uzunluğudur.

Optimizasyonun gerçekleşebilmesi için problemdeki tasarım değişkenlerinin sayısı olan n 'nin, eşitlik kısıtlamalarının sayısı olan l 'den daha büyük olması gerekir. Eğer n , l 'ye eşitse, problem amaca bakılmaksızın çözülecektir. Matematiksel açıdan denklem sayısı, bilinmeyenlerin sayısı eşleşir. Eğer n , l 'den küçükse, o zaman tutarsız bir problem tanımıyla sonuçlanabilecek aşırı belirlenmiş bir ilişkiler kümesi mevcut demektir. Eşitlik kısıtlamaları kümesi, doğrusal olarak bağımsız olmalıdır. Bu, genel olarak, kalan kısıtlamalar üzerinde temel cebirsel işlemler uygulayarak kısıtlamalardan birinin elde edilemeyeceği anlamına gelir. Dolayısıyla, matematiksel çözüm arayışının başarılı olmasını sağlar. Bu teknikler, doğrusal cebirdeki yöntemlere dayanmaktadır [87, 89].

Eşitsizlik Kısıtlamaları: Eşitsizlik kısıtlamaları, problem formülasyonunda daha doğal bir şekilde ortaya çıkar. Eşitsizlik kısıtlamaları, aynı zamanda tasarım seçiminde daha fazla esneklik sağlar. Soyut matematiksel bir modelde eşitsizlik kısıtlamalarını g temsil eder. Tasarım probleminde birden fazla eşitsizlik kısıtlaması olabilir. Dolayısıyla, eşitsizlik kısıtlamaları için $[G]$, G , $[g_1, g_2, \dots, g_m]$ vektör gösterimini temsil eder ve m

vektörün uzunluğudur. g , hem küçük veya eşit (\leq) hem de büyük veya eşit (\geq) kısıtlamalarını tanımlamak için kullanılır. Çözümlerin, genellikle, kısıtlama sınırında yer alması beklendiğinden kesinlikle büyük ($>$) ve kesinlikle küçük ($<$) optimizasyonda pek kullanılmaz.

Eşitsizlik kısıtlamaları durumunda, tasarım değişkenlerinin kısıtlama sınırında mı yoksa kısıtlamayla sınırlanan bölgenin iç kısmında mı olduğuna göre bir ayırım yapılır. Tasarım değişkenleri kümesinin, kısıtlama sınırında yer alması matematiksel olarak kısıtlamanın katı eşitlikle karşılandığını ifade eder. Bu kısıtlama, bir eşitlik kısıtlaması gibi davranır. Optimizasyonda bu özel kısıtlamaya aktif kısıtlama denir. Tasarım değişkenleri kümesi sınırda değilse, yani kısıtlamaların bulunduğu bölgenin içinde yer alıyorsa, bunlar etkin olmayan kısıtlamalar olarak kabul edilir. Dolayısıyla, bir eşitsizlik kısıtlaması aktif veya pasif olabilir [87, 89].

Yan Kısıtlamalar: Yan kısıtlamalar çözüm tekniklerinin, özellikle sayısal olanların gerekli bir parçasıdır. Tasarım değişkenlerinin aralığını ifade ederler. Her tasarım değişkeni, alt ve üst limitleri için sayısal değerlere bağlı olmalıdır. Tasarımcı bu seçimi kabul edilebilir bir tasarım beklentisine dayanarak yapar [87, 90, 91].

Tasarım Uzayı: Optimum tasarım için aranacak olan tasarım uzayı, n bağımsız tasarım değişkenini temsil eden X tarafından oluşturulan Öklid veya Kartezyen n boyutlu uzaydır. Yan kısıtlamalar arama bölgesini sınırlandırır, bu da yalnızca belirli bir bölgede bulunan çözümlerin kabul edilebilir olacağı anlamına gelir [87, 90, 91].

2.2.3 Arama prosedürünün özellikleri

En uygun çözümün aranması, çözülen problemin niteliğine bağlıdır. Geleneksel optimizasyon problemleri, tasarım karakteristiğine göre sürekli ve kesikli, tasarım değişkenlerinin sayısına göre tek değişkenli ve çok değişkenli, problemin formülasyonuna göre kısıtlamalı ve kısıtlamasız ve amaç ve kısıtlayıcı fonksiyonlara göre doğrusal ve doğrusal olmayan türlere ayrılmaktadır [86, 89, 92]. Bir optimizasyon veya matematiksel programlama problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [86-88]. Burada x , tasarım vektörü adı verilen n boyutlu bir vektördür. $f(x)$, amaç fonksiyonu

olarak adlandırılır. $g_j(x)$ ve $h_j(x)$, sırasıyla, eşitsizlik ve eşitlik kısıtlamaları olarak bilinir.

$$x\text{'i bul; } x = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{cases}; \text{ Hangi } x, f(x)\text{'i en aza indirir?} \quad (2.8)$$

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.9)$$

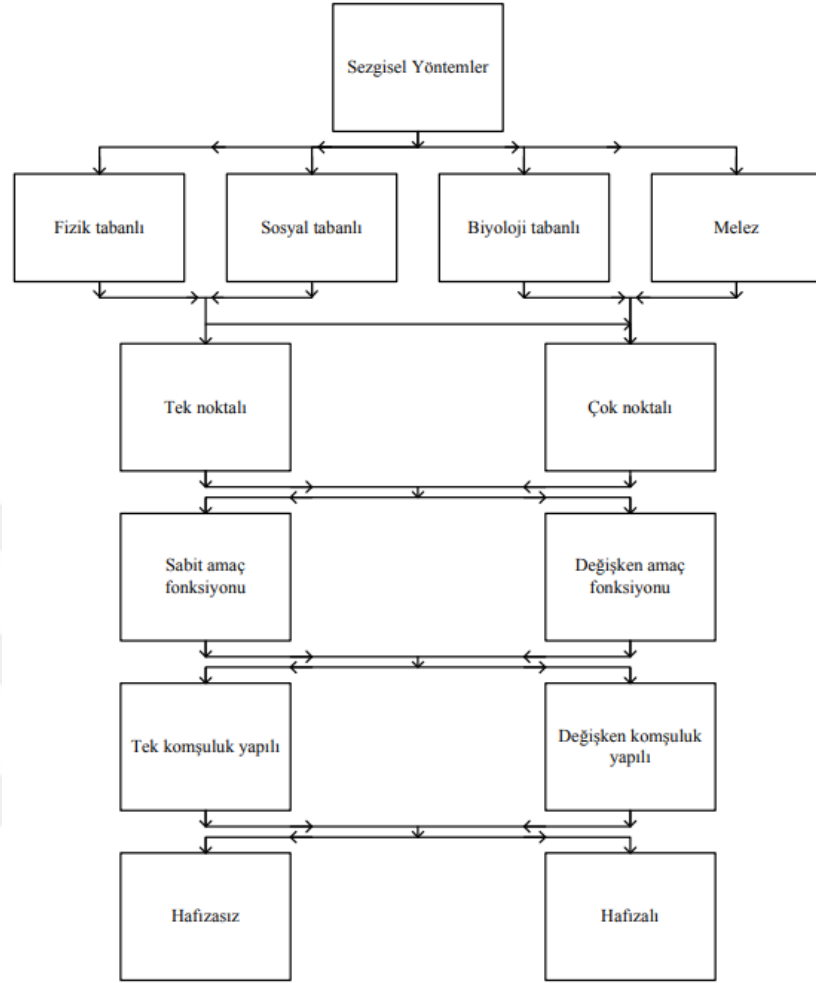
$$h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2.10)$$

Optimizasyon problemlerine çözüm bulmaya yönelik kullanılan tekniklere arama yöntemleri denir. Uygulamalı matematikte bunlara yinelemeli yöntemler de denir. Yinelemeli yöntemler, sorunların ortaya çıktığı disiplinden bağımsız olarak, doğrusal olmayan sorunlara sayısal çözümler uygulamanın uygun yoludur. Arama süreci, tipik olarak ilk tasarım çözümünü tahmin etmeye çalışarak başlatılır. Tasarımcı, bu seçimi kendi deneyimine dayandırabilir. Pek çok durumda optimizasyonun başarısı, iyi bir başlangıç çözümü seçme yeteneğine bağlı olabilir.

Arama yöntemi tutarlı bir şekilde kullanılsa bile çözülmekte olan belirli soruna farklı yanıtlar verir. Doğrusal olmamanın derecesi ve türü, problem formülasyonunda herhangi bir tutarsızlık olmadığı varsayıldığında, sıklıkla yöntemin başarısız olmasına neden olabilir. Çoğu zaman, tasarım değişkenlerinin sayısı, kısıtlamaların sayısı ve kötü bir ilk tahmin, yöntemin standart uygulaması altında beklenmeyen davranışlarda rol oynar. Ayrıca, bu arama yöntemlerinin standart uygulamaları her yinelemede çözüme yaklaştırmaya çalışarak ilerlemektedir. Buna çözüme yakınsama denir. Optimizasyon tekniklerinde bu aynı zamanda uygun bir çözümün belirlenmesi anlamına da gelebilir [86, 87].

2.2.4 Sezgisel optimizasyon

Sezgisel sözcüğünün kökeni, eski Yunanca “*heuriskein*” kelimesinden gelir ve problemleri çözmek amacıyla en yeni stratejiler keşfetme sanatı anlamını taşır [88]. Doğruluk, hassasiyet, optimallik ve eksiksizlik, sezgisel optimizasyonun taşıdığı özelliklerdendir. Şekil 2.1’de sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.1. Sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması [93]

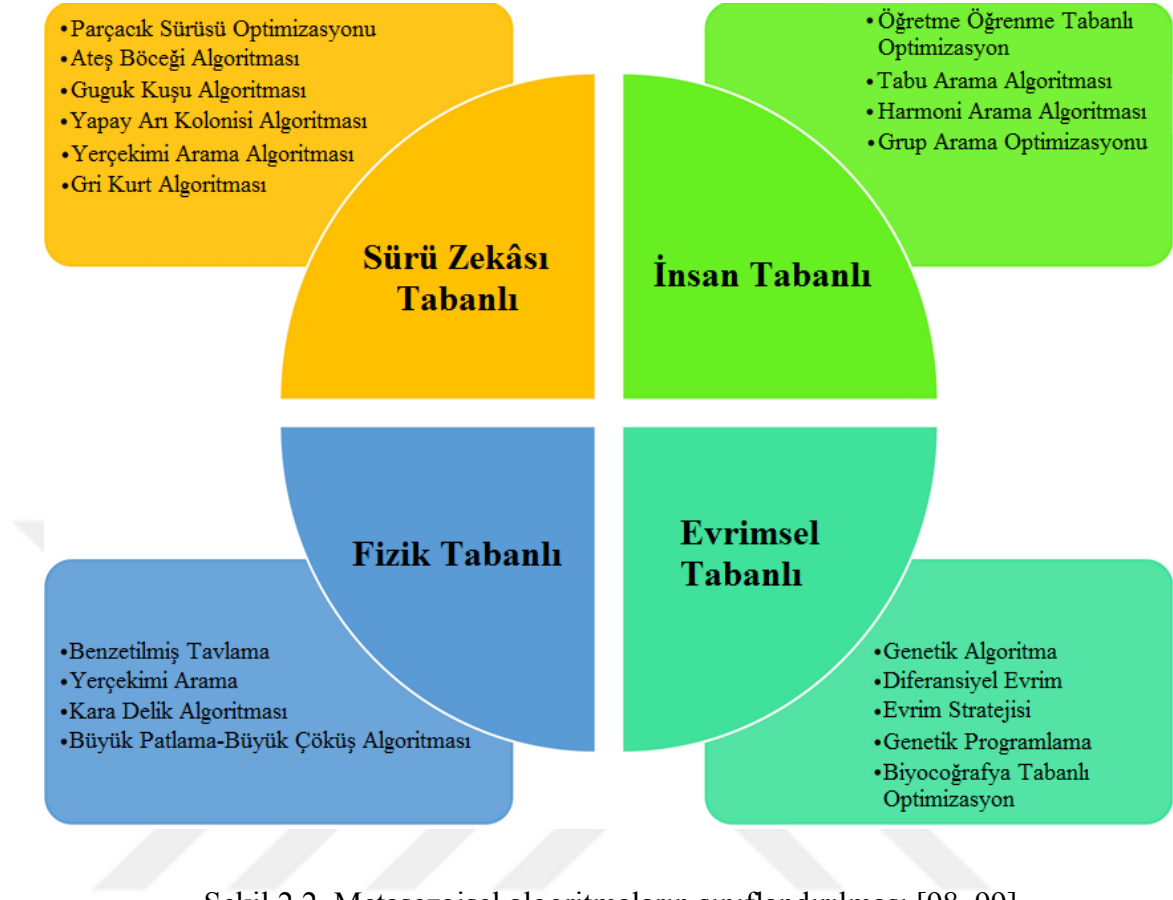
Sezgisel optimizasyon algoritmaları, bir problemin sahip olacağı en iyi çözüme yakınsamayı garanti ederler yani en iyi çözümü, çözüm uzayında spesifik olarak doğrudan bulamazlar [94]. Sezgisel optimizasyon algoritmaları teknoloji değişimleri, etkileşimli hesaplama, basitlik ve analiz edilebilirlik, esneklik, kod basitliği ve gerçekleştirilebilirlik, çözüm kalitesi ve hesaplama zamanı kriterlerine göre değerlendirilir [86, 88, 89]. Değiştirilebilir parametrelere sahip olmak, algoritmanın başarısıyla ilişkilendirilebilir. Parametrelerin değiştirilebilir olması, çözümün kalitesi ile hesaplama zamanı arasında bir ilişki kurmada kullanıcıya olanak tanır. Ayrıca, algoritmanın prensipleri kolay uygulanabilir ve anlaşılabilir olmalıdır [94].

2.2.5 Metasezgisel optimizasyon

Yunanca bir kelime olan meta öneki “*üst düzey metodoloji*” anlamına gelir. Metasezgisel arama yöntemleri, belirli optimizasyon problemlerini çözmek için temel buluşsal yöntemlerin tasarlanmasında yol gösterici stratejiler olarak kullanılabilen üst düzey genel metodolojiler olarak tanımlanabilir [88].

Metasezgisel algoritmalar, yapay zekâ alanındaki geniş uygulamaları nedeniyle aktif olarak araştırılmakta ve modern optimizasyonun önemli bir parçası haline gelmektedir. Son yirmi yılda çok çeşitli metasezgisel algoritmalar ortaya çıkmış ve parçacık sürüsü optimizasyonu gibi birçok metasezgisel yöntem giderek daha popüler hale gelmiştir [95, 96]. Metasezgiselliğin popülaritesinin ve başarısının birçok nedeni vardır. Ana nedenlerden biri; bu algoritmaların biyolojik sistemler dâhil olmak üzere doğadaki en başarılı süreçler ile fiziksel ve kimyasal süreçleri taklit ederek geliştirilmiş olmasıdır [97].

Metasezgisel algoritmalar sürü zekâsı tabanlı yöntemler, insan tabanlı yöntemler, fizik tabanlı yöntemler ve evrim tabanlı yöntemler olmak üzere dört ana kategoride gruplandırılabilirler [98, 99]. Şekil 2.2’de metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması görülmektedir. Sürü zekâsı tabanlı yöntemler, hayvanların sosyal davranışlarını taklit ederler. İnsan tabanlı yöntemler, insan davranışlarından ilham almıştır. Fizik tabanlı yöntemler, evrendeki fiziksel kuralları taklit ederler. Evrim tabanlı yöntemler ise, doğal evrim yasalarından esinlenmiştir [98]. Ayrıca, metasezgisel optimizasyon teknikleri, basitlik, esneklik, dinamiklik ve kapsamlı bir şekilde çözüm arama gibi kendine has özelliklerinden dolayı mühendislik problemlerinin çözümünde oldukça popüler hale gelmiştir [100, 101].



Şekil 2.2. Metasezgisel algoritmaların sınıflandırılması [98, 99]

2.3 Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması

Afrika akbabaları optimizasyon algoritması, Afrika akbabalarının yaşam tarzından ilham alır ve Afrika akbabalarının yiyecek arama ve gezinme davranışlarını taklit eder [102]. Optimizasyon sürecinde başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra tüm çözümlerin uygunlukları hesaplanır. 1. en iyi çözüm, 1. grubun en iyi akbabası ve 2. en iyi çözüm 2. grubun en iyi akbabası olarak atanır. Diğer akbabalar, Denklem (2.11) ve (2.12)'den yararlanarak 1. ve 2. grupların en iyi çözümlerine doğru hareket ederler. Her iterasyonda popülasyonun tamamı tekrardan hesaplanır. Bu denklemlerde L_1 ve L_2 , 0 ile 1 arasında değer alırlar ve her iki parametrenin toplamı 1'dir.

$$R(i) = \begin{cases} BestVulture_1, p_i = L_1 \\ BestVulture_2, p_i = L_2 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2.12)$$

Optimizasyon sürecinin ikinci aşamasında, akbalar toksa, yüksek enerjiye sahiptirler ve bu durumda yiyecek aramak için daha uzun mesafeler kat ederler. Ancak, akbalar açsa, daha güçlü akbabanın yanında uzun süre uçup yiyecek aramak için yeterli enerjileri yoktur ve saldırganlaşırlar. Bu kural, Denklem (2.13) ve (2.14)'ten yararlanarak modellenir. Bu denklemlerde *maxiterations* toplam iterasyon sayısı ve *iteration_i* mevcut iterasyon sayısıdır. *z*, her iterasyonda değişen -1 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. *h*, -2 ile 2 arasında rastgele bir sayıdır. *rand₁*, 0 ile 1 arasında rastgele bir değere sahiptir.

$$F = (2 \times rand_1 + 1) \times z \times \left(1 - \frac{iteration_i}{maxiterations}\right) + t \quad (2.13)$$

$$t = h \times \left(\sin^w \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{iteration_i}{maxiterations}\right) + \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{iteration_i}{maxiterations}\right) - 1\right) \quad (2.14)$$

z değerinin 0'ın altına düşmesi akbabanın aç olduğunu, 0'a çıkması ise akbabanın doyduğu ifade eder. Ayrıca, $|F|$ değeri 1'e eşit veya 1'den büyük olduğunda, Afrika akbaları optimizasyon algoritması keşif aşamasına girer ve akbalar farklı alanlarda yiyecek ararlar. $|F|$ değeri 1'den küçük olduğunda, Afrika akbaları optimizasyon algoritması sömürü aşamasına girer ve akbalar çözümün bulunduğu komşulukta yiyecek ararlar.

Optimizasyon sürecinin üçüncü aşamasında, Denklem (2.15)'teki P_1 ve $rand_{P_1}$ 'den yararlanarak keşif aşaması çalıştırılır. P_1 'in değeri, arama işleminden önce değerlendirilir ve 0 ile 1 arasında bir değere sahip olması gerekir. $rand_{P_1}$ 'in değeri ise, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayıdır. P_1 parametresi, $rand_{P_1}$ parametresinden büyük veya eşit olduğunda Denklem (2.16) kullanılır. P_1 parametresi, $rand_{P_1}$ parametresinden küçük olduğunda Denklem (2.18) kullanılır.

$$P(i+1) = \begin{cases} \text{Denklem (2.16)}, P_1 \geq rand_{P_1} \\ \text{Denklem (2.18)}, P_1 < rand_{P_1} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$P(i+1) = R(i) - D(i) \times F \quad (2.16)$$

$$D(i) = |X \times R(i) - P(i)| \quad (2.17)$$

$$P(i + 1) = R(i) - F + rand_2 \times ((ub - lb) \times rand_3 + lb) \quad (2.18)$$

$P(i + 1)$, bir sonraki iterasyondaki akbabanın konum vektörüdür. F , Denklem (2.13) kullanarak geçerli iterasyonda elde edilen akbabanın doygunluk oranıdır. $R(i)$, Denklem (2.11) kullanılarak mevcut iterasyonda seçilen en iyi akbabalardan biridir. Ayrıca X , akbabaların yiyecekleri diğer akbabalardan korumak için rastgele hareket ettiği yerdir. $X = 2 \times rand$ formülü kullanılarak elde edilir. $rand$, 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. $P(i)$, mevcut iterasyondaki akbabanın konum vektörüdür. $rand_2$, 0 ile 1 arasında rastgele bir değere sahiptir. lb ve ub , değişkenlerin üst ve alt sınırını gösterir. $rand_3$, rastgelelik katsayısını arttırmak için kullanılan 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

Optimizasyon sürecinin dördüncü aşamasında, $|F|$ değeri 1 ve 0,5 arasında olduğunda, Denklem (2.19)'daki P_2 ve $rand_{p_2}$ 'den yararlanarak sömürü aşamasının ilk fazı çalıştırılır. P_2 'in değeri, arama işleminden önce değerlendirilir ve 0 ile 1 arasında bir değere sahip olması gerekir. $rand_{p_2}$ 'in değeri ise, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayıdır. P_2 parametresi, $rand_{p_2}$ parametresinden büyük veya eşit olduğunda Denklem (2.20) kullanılır. P_2 parametresi, $rand_{p_2}$ parametresinden küçük olduğunda Denklem (2.22) kullanılır.

$$P(i + 1) = \begin{cases} \text{Denklem (2.20)}, P_2 \geq rand_{p_2} \\ \text{Denklem (2.22)}, P_2 < rand_{p_2} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$P(i + 1) = D(i) \times (F + rand_4) - d(t) \quad (2.20)$$

$$d(t) = R(i) - P(i) \quad (2.21)$$

$$P(i + 1) = R(i) - (S_1 + S_2) \quad (2.22)$$

$rand_4$, rastgelelik katsayısını arttırmak için kullanılan 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. Akbabaların dönme uçuşu için kullanılan sarmal hareketin modellenmesinde Denklem (2.22), (2.23) ve (2.24) kullanılır. Bu sayede, tüm akbabalar ile en iyi iki akbabadan biri arasında bir sarmal denklem oluşturulur. Bu denklemlerde $rand_5$ ve $rand_6$, 0 ile 1 arasında rastgele sayılardır. cos ve sin , sırasıyla, kosinüs ve sinüs fonksiyonlarını temsil eder.

$$S_1 = R(i) \times \left(\frac{rand_5 \times P(i)}{2\pi} \right) \times \cos(P(i)) \quad (2.23)$$

$$S_2 = R(i) \times \left(\frac{rand_6 \times P(i)}{2\pi} \right) \times \sin(P(i)) \quad (2.24)$$

Optimizasyon sürecinin dördüncü aşamasında, $|F|$ değeri 0,5'den küçük olduğunda, Denklem (2.25)'teki P_3 ve $rand_{P_3}$ 'den yararlanarak sömürü aşamasının ikinci fazı çalıştırılır. P_3 'ün değeri, arama işleminden önce değerlendirilir ve 0 ile 1 arasında bir değere sahip olması gerekir. $rand_{P_3}$ 'in değeri ise, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayıdır. P_3 parametresi, $rand_{P_3}$ parametresinden büyük veya eşit olduğunda Denklem (2.26) kullanılır. P_2 parametresi, $rand_{P_3}$ parametresinden küçük olduğunda Denklem (2.27) kullanılır.

$$P(i+1) = \begin{cases} \text{Denklem (2.26)}, P_3 \geq rand_{P_3} \\ \text{Denklem (2.27)}, P_3 < rand_{P_3} \end{cases} \quad (2.25)$$

$$P(i+1) = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (2.26)$$

$$P(i+1) = R(i) - |d(t)| \times F \times Levy(d) \quad (2.27)$$

Bazen akbalar aç kalır ve birden fazla akbaba türünün tek bir besin kaynağında toplanmasına neden olabilecek büyük bir yiyecek rekabeti ortaya çıkar. Bu hareketin modellenmesinde Denklem (2.28) ve (2.29) kullanılır. Bu denklemlerde $BestVulture_1(i)$ mevcut iterasyondaki 1. grubun en iyi akbabası ve $BestVulture_2(i)$ mevcut iterasyondaki 2. grubun en iyi akbabasıdır. Son olarak, Denklem (2.26) kullanılarak tüm akbaların toplanması gerçekleştirilir.

$$A_1 = BestVulture_1(i) - \frac{BestVulture_1(i) \times P(i)}{BestVulture_1(i) - P(i)^2} \times F \quad (2.28)$$

$$A_2 = BestVulture_2(i) - \frac{BestVulture_2(i) \times P(i)}{BestVulture_2(i) - P(i)^2} \times F \quad (2.29)$$

$|F| < 0,5$ iken, baş akbalar aç kalır, zayıflar ve diğer akbalarla başa çıkmak için yeterli enerjileri olmaz. Öte yandan, diğer akbalar da yiyecek arayışında

saldırılanlar ve baş akbabaya doğru farklı yönlerde hareket ederler. Bu hareketin modellenmesinde Denklem (2.27) kullanılır. Bu denklemde $d(t)$, akbabanın iki grupta bulunan en iyi akbabalardan birine olan uzaklığını göstermektedir.

Bunlara ilaveten, Afrika akbabaları optimizasyon algoritmasının etkinliğini artırmak için Denklem (2.30) ve (2.31)'den yararlanılarak Levy uçuşu (LF) kalıpları kullanılır. Bu denklemlerde d , problemin boyutlarını temsil eder. u ve v , 0 ile 1 arasında rastgele sayılardır. β , 1,5 olarak sabit ve varsayılan bir sayıdır.

$$LF(x) = 0,01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.30)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma(1 + \beta/2) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.31)$$

2.4 Balçık Küfü Optimizasyon Algoritması

Balçık küfü optimizasyon algoritması, balçık küfünün doğadaki salınımına dayanan stokastik bir optimizasyon algoritmasıdır [103]. Yiyecekleri bağlamak için en uygun yolu oluşturmak üzere, biyo-osilatöre dayalı olarak balçık küfünün yayılma dalgasının pozitif ve negatif geri bildirim üretme sürecinde uyarlanabilir ağırlıklar kullanır. Optimizasyon süreci yiyeceğe yaklaşma, yiyeceği sarma ve salınım aşamalarını içermektedir.

Yiyeceğe yaklaşma aşamasında, balçık küfü yiyeceğe havadaki kokuya göre yaklaşır. Bu daralma hareketinin modellenmesinde Denklem (2.32) kullanılır. Bu denklemde t , mevcut iterasyon sayısıdır. \vec{vb} , $[-a, a]$ aralığındaki bir değeri ifade eder. \vec{vc} , 1'den 0'a doğrusal olarak azalır. \vec{X} , balçık küfünün konumunu belirtir. \vec{W} , balçık küfünün ağırlığını belirtir. \vec{X}_b , mevcut iterasyonda bulunan en yüksek koku konsantrasyonuna sahip bireysel konumu temsil eder. \vec{X}_A ve \vec{X}_B , balçık küfünden rastgele seçilen iki bireyin konumunu temsil ederler.

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \begin{cases} \overrightarrow{X}_b(t) + \overrightarrow{vb} \cdot (\overrightarrow{W} \cdot \overrightarrow{X}_A(t) - \overrightarrow{X}_B(t)), r < p \\ \overrightarrow{vc} \cdot \overrightarrow{X}(t), r \geq p \end{cases} \quad (2.32)$$

p ve a , sırasıyla, Denklem (2.33) ve (2.34) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemlerde $i \in 1, 2, \dots, n$ 'dir. $S(i)$, \vec{X} 'in uygunluğunu belirtir. DF, tüm iterasyonlarda elde edilen en iyi uygunluğu temsil eder. max_t , maksimum iterasyon sayısıdır.

$$p = \tanh|S(i) - DF| \quad (2.33)$$

$$a = \operatorname{arctanh} \left(- \left(\frac{t}{max_t} \right) + 1 \right) \quad (2.34)$$

\vec{W} , Denklem (2.35) ve (2.36) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemlerde *koşul*, $S(i)$ 'nin popülasyonun ilk yarısını sıraladığını gösterir. r , $[0, 1]$ aralığındaki rastgele değeri ifade eder. bF , mevcut iterasyonda elde edilen optimum uygunluğu belirtir. ωF , mevcut iterasyonda elde edilen en kötü uygunluğu belirtir. *SmellIndex*, sıralanmış uygunluk değerlerinin sırasını temsil eder.

$$\overrightarrow{W}(SmellIndex(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log \left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1 \right), \text{koşul} \\ 1 - r \cdot \log \left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1 \right), \text{diğer} \end{cases} \quad (2.35)$$

$$SmellIndex = \operatorname{sort}(S) \quad (2.36)$$

Yiyeceği sarma aşamasında, balçık küfü arama yaparken venöz dokunun kasılma hareketini simüle eder. Damarın temas ettiği gıda konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa, biyo-osilatör tarafından üretilen dalga o kadar güçlü, sitoplazma o kadar hızlı ve damar o kadar kalın olur. Denklem (2.35)'teki *Koşul*, balçık küfünün arama örüntülerini yiyeceğin kalitesine göre ayarlamasını simüle eder. Yiyecek konsantrasyonu yeterliyse, bölgeye yakın ağırlık daha büyük olur. Yiyecek konsantrasyonu çok düşükse, bölgenin ağırlığı azalır ve böylece, diğer bölgeleri

aramaya dönülür. Bu ilkeye dayanarak, Denklem (2.37) aracılığıyla balçık küfünün konumu güncellenir.

$$\vec{X}^* = \begin{cases} rand \cdot (UB - LB) + LB, rand < z \\ \vec{X}_b(t) + \vec{vb} \cdot (W \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), r < p \\ \vec{vc} \cdot \vec{X}(t), r \geq p \end{cases} \quad (2.37)$$

UB ve LB , arama aralığının üst ve alt sınırlarını temsil eder. r ve $rand$, $[0,1]$ aralığındaki rastgele değerleri gösterir. z parametresinin aralığı $[0,0.1]$ 'dir ve $[0, 0.01]$ aralıklarla 11 değer bulunmaktadır. Salınım aşamasında, balçık küfü, damarlardaki sitoplazmik akışı değiştirmek için biyolojik osilatör tarafından üretilen yayılma dalgasına bağlıdır. Böylece, damarlar, gıda konsantrasyonu açısından daha iyi bir konumda olma eğilimindedir. \vec{W} , \vec{vb} ve \vec{vc} , balçık küfünün venöz genişliğindeki değişiklikleri simüle etmek amacıyla kullanılır.

2.5 Deniz Yırtıcıları Optimizasyon Algoritması

Deniz yırtıcıları optimizasyon algoritmasının ilham kaynağı, deniz yırtıcılarında yaygın olarak görülen; Brownian ve Lévy hareketi adı verilen yiyecek arama stratejisi ile yırtıcı ve av arasındaki biyolojik etkileşimde optimum karşılaşma oranıdır [104]. Deniz yırtıcıları, avın bol olduğu alanlar için Brownian hareketini kullanırken, av yoğunluğunun düşük olduğu ortamlar için Lévy hareketini kullanır.

Optimizasyon süreci, farklı hız oranlarını göz önünde bulunduran ve aynı zamanda yırtıcının ve avın tüm yaşamını taklit eden üç ana aşamaya bölünmüştür. Bunlar; avın yırtıcıdan daha hızlı hareket ettiği yüksek hız oranı, hem yırtıcı hem de avın neredeyse aynı hızda hareket ettiği birim hız oranı ve yırtıcının avdan daha hızlı hareket ettiği düşük hız oranıdır.

Yüksek hız oranı aşaması ($Iter < Max_Iter/3$), keşfin önemli olduğu optimizasyonun ilk iterasyonlarında gerçekleşir. Bu aşamada yırtıcı için en iyi strateji, hiç hareket etmemektir. Bu kural, Denklem (2.38) ve (2.39) kullanılarak modellenir. Bu denklemlerde $P = 0,5$ olarak sabit bir sayıdır. R , $[0,1]$ aralığında düzgün rastgele sayılar içeren bir vektördür. $Iter$ mevcut iterasyon sayısını, Max_Iter maksimum

iterasyon sayısını gösterir. R_B , Brownian hareketini temsil eden normal dağılıma sahip rastgele sayılar içeren bir vektördür.

$$\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_B \otimes (\overrightarrow{Elite}_i - \vec{R}_B \otimes \overrightarrow{Prey}_i) \quad (2.38)$$

$$\overrightarrow{Prey}_i = \overrightarrow{Prey}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{stepsize}_i \quad (2.39)$$

Birim hız oranı aşaması ($Max_Iter/3 < Iter < 2Max_Iter/3$), aramanın geçici olarak sömürüye dönüştürülmeye çalışıldığı optimizasyonun ara aşamasında meydana gelir ve hem keşif hem de sömürünün önemli olduğu kısımdır. Bu aşamada hem yırtıcı hem de av kendi avlarını arar. Popülasyonun yarısı keşif için, diğer yarısı da sömürü için ayrılmıştır.

Popülasyonun ilk yarısı için kural, Denklem (2.40) ve (2.41) kullanılarak modellenir. Bu denklemlerde R_L , Lévy dağılımına dayanarak Lévy hareketini temsil eden rastgele sayıların bir vektörüdür.

$$\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_L \otimes (\overrightarrow{Elite}_i - \vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Prey}_i) \quad (2.40)$$

$$\overrightarrow{Prey}_i = \overrightarrow{Prey}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{stepsize}_i \quad (2.41)$$

Popülasyonun ikinci yarısı için kural, Denklem (2.42) ve (2.43) kullanılarak modellenir. Bu denklemlerde $CF = (1 - (Iter/Max_Iter))^{2(Iter/Max_Iter)}$ olup, yırtıcı hareketinin adım boyutunu kontrol etmek için uyarlanabilir bir parametredir.

$$\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_B \otimes (\vec{R}_B \otimes \overrightarrow{Elite}_i - \overrightarrow{Prey}_i) \quad (2.42)$$

$$\overrightarrow{Prey}_i = \overrightarrow{Elite}_i + P \cdot CF \otimes \overrightarrow{stepsize}_i \quad (2.43)$$

Düşük hız oranı aşaması ($Iter > 2Max_Iter/3$), çoğunlukla yüksek sömürü yeteneği ile ilişkilendirilen, optimizasyon sürecinin son aşamasıdır. Bu aşamada yırtıcı için en iyi strateji Lévy'dir. Bu kural, Denklem (2.44) ve (2.45) kullanılarak modellenir.

$$\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_L \otimes (\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Elite}_i - \overrightarrow{Prey}_i) \quad (2.44)$$

$$\overrightarrow{Prey}_i = \overrightarrow{Elite}_i + P.CF \otimes \overrightarrow{stepsize}_i \quad (2.45)$$

Ayrıca, balık toplama cihazları (FADs), deniz yırtıcılarında davranışsal değişime neden olan bir husustur. FAD etkisi, Denklem (2.46) kullanılarak modellenir. Bu denklemde $FADs = 0,2$ olarak FADs'in optimizasyon süreci üzerindeki etkisinin olasılığıdır. \vec{U} , 0 ve 1 içeren dizilere sahip ikili vektördür. r , $[0,1]$ aralığında düzgün rastgele bir sayıdır. \vec{X}_{min} ve \vec{X}_{max} , problem boyutlarının alt ve üst sınırlarını içeren vektörlerdir.

$$\overrightarrow{Prey}_i = \begin{cases} \overrightarrow{Prey}_i + CF[\vec{X}_{min} + \vec{R} \otimes (\vec{X}_{max} - \vec{X}_{min})] \otimes \vec{U} & \text{if } r \leq FADs \\ \overrightarrow{Prey}_i + [FADs(1 - r) + r](\overrightarrow{Prey}_{r1} - \overrightarrow{Prey}_{r2}) & \text{if } r > FADs \end{cases} \quad (2.46)$$

2.6 Fick Yasası Optimizasyon Algoritması

Fick yasası optimizasyon algoritması, Fick'in birinci yasasının kullanıldığı difüzyon kuralını taklit eden fizik tabanlı metasezgisel bir algoritmadır [105]. Fick'in difüzyon kuralına göre; moleküller, daha yüksek konsantrasyon bölgelerinden daha düşük konsantrasyon bölgelerine doğru yayılma eğilimindedir.

Fick yasası optimizasyon algoritmasında moleküllerin, kararlı konumlarını bulması için difüzyon operatörü (DO), denge operatörü (EO) ve kararlı durum operatörü (SSO) olmak üzere üç hareket aşaması vardır. Bu aşamalar arası geçiş, Denklem (2.47) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu denklemde $TF^t = \sinh\left(\frac{t}{T}\right)^{C_1}$ olup, t mevcut iterasyon sayısını ve T maksimum iterasyon sayısını temsil eder. C_1 ise 0,5 olarak alınır.

$$X_i^t = \begin{cases} \text{DO} & TF^t < 0,9 \\ \text{EO} & TF^t \leq 1 \\ \text{SSO} & TF^t > 1 \end{cases} \quad (2.47)$$

Difüzyon aşamasında, iki bölge olduğu ve aralarında yüksek bir konsantrasyon farkı olduğu göz önüne alınır. Eğer $T_{DO}^t = (C_5 \times TF^t - r) < rand$ ise moleküller i bölgesinden j bölgesine hareket ederler. Aksi takdirde, moleküller ters yönde hareket ederler. Keşif aşamasında i bölgesinin j bölgesinden daha yüksek bir konsantrasyona sahip olduğu varsayılırsa, Denklem (2.48) kullanılarak i bölgesinden j bölgesine geçen

molekül sayısı NT_{ij} ve Denklem (2.49) kullanılarak i bölgesinde kalan molekül sayısı NR_i hesaplanır. Bu denklemlerde C_3, C_4 ve C_5 sırasıyla 0,1, 0,2 ve 2'ye eşit sabitlerdir.

$$NT_{ij} \approx N_i \times r_1 \times (C_4 - C_3) + N_i \times C_3 \quad (2.48)$$

$$NR_i \approx N_i - NT_{ij} \quad (2.49)$$

NT_{ij} moleküllerinin konumları Denklem (2.50) kullanılarak güncellenir. Bu denklemde $r_2, [0,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır. $DF_{p,i}^t$, yön faktörünü (± 1) belirtir. $X_{EO,j}^t$, j bölgesindeki denge konumu temsil eder. $X_{p,i}^t$, p parçacığının i grubundaki konumunu temsil eder.

$$X_{p,i}^{t+1} = X_{EO,j}^t + DF_{p,i}^t \times DOF \times r_2 \times (J_{i,j}^t \times X_{EO,j}^t - X_{p,i}^{t+1}) \quad (2.50)$$

Zamanla değişen akış yönünü ifade eden DOF , Denklem (2.51) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde $r_1, [0,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır. $C_2, 2'$ ye eşit bir sabittir.

$$DOF = \exp(-C_2(TF^t - r_1)) \quad (2.51)$$

Difüzyon akısını ifade eden $J_{i,j}^t$, Denklem (2.52) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde D , etkin yayılma faktörünü (0,1) belirtir.

$$J_{i,j}^t = -D \frac{dc_{i,j}^t}{dx_{i,j}^t} \quad (2.52)$$

$dc_{i,j}^t$ ve $dx_{i,j}^t$, sırasıyla, Denklem (2.53) ve (2.54) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde $X_{m,i}^t$ ve $X_{m,j}^t$, sırasıyla, moleküllerin i ve j bölgelerindeki konumlarının ortalamasını temsil eder.

$$dc_{i,j}^t = X_{m,j}^t - X_{m,i}^t \quad (2.53)$$

$$dx_{i,j}^t = \sqrt{(X_{EO,j}^t)^2 - (X_{p,i}^t)^2 + eps} \quad (2.54)$$

NR_i moleküllerinin konumları Denklem (2.55) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde L ve U , problem boyutlarının alt ve üst sınırlarını temsil eder.

$$X_{p,i}^{t+1} = \begin{cases} X_{EO,i}^t & rand < 0.8 \\ X_{EO,i}^t + DOF \times (r_3 \times (U - L) + L) & rand < 0.9 \\ X_{p,i}^{t+1} & otherwise \end{cases} \quad (2.55)$$

Denge aşaması, keşiften sömürüye geçiş aşamasıdır. Bu aşamada iki konsantrasyon hemen hemen eşittir ve parçacıklar denge durumuna ulaşmaya çalışır. Bu, yeni bir bölgedeki her parçacığın, başka bir bölgeye göç etmeden mevcut bölgedeki en kararlı konuma göre hareket etmesiyle gerçekleşir. Bu aşamada Denklem (2.56) kullanılarak moleküller konumlarını günceller. Bu denklemde $X_{p,g}^t$, g grubundaki p parçacığının konumudur. $X_{EO,g}^t$, g grubundaki denge konumudur.

$$X_{p,g}^{t+1} = X_{EO,p}^t + Q_{EO,g}^t \times X_{p,g}^t + Q_{EO,g}^t \times (MS_{p,EO}^t \times X_{EO,g}^t - X_{p,g}^t) \quad (2.56)$$

g grubundaki bölgenin bağıl miktarını ifade eden $Q_{EO,g}^t$, Denklem (2.57) ve (2.58) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemlerde R_1^t , $[0,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır. $DRF_{EO,g}^t$, g grubundaki difüzyon hızı faktörüdür.

$$Q_{EO,g}^t = R_1^t \times DF_g^t \times DRF_{EO,g}^t \quad (2.57)$$

$$DRF_{EO,g}^t = \exp\left(-\frac{J_{p,EO}^t}{TF^t}\right) \quad (2.58)$$

$J_{p,EO}^t$, Denklem (2.59) kullanılarak hesaplanır.

$$J_{p,EO}^t = -D \frac{dc_{g,EO}^t}{dx_{p,EO}^t} \quad (2.59)$$

$dc_{g,EO}^t$ ve $dx_{p,EO}^t$, sırasıyla, Denklem (2.60) ve (2.61) kullanılarak hesaplanır.

$$dc_{g,EO}^t = X_{g,EO}^t - X_{m,g}^t \quad (2.60)$$

$$dx_{p,EO}^t = \sqrt{(X_{g,EO}^t)^2 - (X_{p,g}^t)^2} + eps \quad (2.61)$$

$MS_{p,EO}^t$, Denklem (2.62) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde $FS_{g,EO}^t$, t zamanında g grubundaki en iyi uygunluk değeridir. $FS_{p,g}^t$, t zamanında g grubundaki p parçacığının uygunluk değeridir.

$$MS_{p,EO}^t = \exp\left(-\frac{FS_{g,EO}^t}{FS_{p,g}^t + eps}\right) \quad (2.62)$$

Kararlı durum aşaması, optimizasyon sürecindeki sömürü aşamasıdır. İki bölgedeki iki konsantrasyon dengeye ulaştıktan sonra, bariyer hareket ettirilir ve bariyerden kaynaklanan boşluk, ajanların, tanktaki en kararlı konuma hareket ederek daha kararlı hale gelmesini sağlar. Bu aşamada Denklem (2.63) kullanılarak moleküller konumlarını günceller. Bu denklemde X_{SS}^t , kararlı durum konumudur. $X_{p,g}^t$, p parçacığının konumudur.

$$X_{p,g}^{t+1} = X_{SS}^t + Q_g^t \times X_{p,g}^t + Q_g^t \times (MS_{p,g}^t \times X_{SS}^t - X_{p,g}^t) \quad (2.63)$$

g bölgesinin bağıl miktarını ifade eden Q_g^t , Denklem (2.64) ve (2.65) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemlerde DRF_g^t , g grubundaki difüzyon hızı faktörüdür.

$$Q_g^t = R_1^t \times DF_g^t \times DRF_g^t \quad (2.64)$$

$$DRF_g^t = \exp\left(-\frac{J_{p,ss}^t}{TF^t}\right) \quad (2.65)$$

$J_{p,ss}^t$, Denklem (2.66) kullanılarak hesaplanır.

$$J_{p,ss}^t = -D \frac{dc_{g,ss}^t}{dx_{p,ss}^t} \quad (2.66)$$

$dc_{g,ss}^t$ ve $dx_{p,ss}^t$, sırasıyla, Denklem (2.67) ve (2.68) kullanılarak hesaplanır.

$$dc_{g,ss}^t = X_{m,g}^t - X_{SS}^t \quad (2.67)$$

$$dx_{p,ss}^t = \sqrt{(X_{SS}^t)^2 - (X_{p,g}^t)^2 + eps} \quad (2.68)$$

$MS_{p,g}^t$, Denklem (2.69) kullanılarak hesaplanır.

$$MS_{p,g}^t = \exp\left(-\frac{FS_{ss}^t}{(FS_{p,g}^t + eps)}\right) \quad (2.69)$$

2.7 Geometrik Ortalama Optimizasyon Algoritması

Geometrik ortalama optimizasyon algoritması, matematikteki geometrik ortalama operatöründen ilham alır [106]. Geometrik ortalama optimizasyon algoritmasında belirli bir ajanın karıştırlarının ölçeklendirilmiş amaç değerlerinin geometrik ortalaması, bu ajana, arama sürecinde diğer ajanlara rehberlik etme uygunluğunu temsil eden ağırlığı olarak atanır.

t . iterasyonda o ana kadarki en iyi j . bireysel ajanın bulanık üyelik değeri MF_j^t , Denklem (2.70) kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde N , popülasyon büyüklüğünü gösterir. $Z_{best,j}^t$, t . iterasyonda o ana kadarki en iyi j . bireysel ajanın uygunluk fonksiyonu değerini temsil eder. σ^t ve μ^t , sırasıyla, t . iterasyonda o ana kadarki en iyi tüm bireysel ajanların uygunluk fonksiyonu değerlerinin standart sapmasını ve ortalamasını belirtir.

$$MF_j^t = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{4}{\sigma^t \sqrt{e}} \times (Z_{best,j}^t - \mu^t)\right)}, j = 1, 2, \dots, N \quad (2.70)$$

Arama ajanlarının çeşitliliğini ve uygunluğunu aynı anda değerlendirmek için çift uygunluk indeksinden yararlanılır. t . iterasyonda i . ajanın çift uygunluk indeksi DFI_i^t , Denklem (2.71) kullanılarak hesaplanır.

$$DFI_i^t = MF_1^t \times \dots \times MF_{i-1}^t \times MF_{i+1}^t \times \dots \times MF_N^t = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N MF_j^t \quad (2.71)$$

Ayrıca, o ana kadarki tüm en iyi bireysel ajanların, her bir ajan için benzersiz bir küresel rehber ajan Y_i^t üretilmesine katkıda bulunması için Denklem (2.72) kullanılır. Bu

denklemden ε , tekillikten kaçınmak için çok küçük pozitif bir sayıyı gösterir. X_j^{best} , j . arama ajanının o ana kadarki en iyi bireysel konum vektörünü temsil eder.

$$Y_i^t = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N DFI_j^t \times X_j^{best}}{\sum_{j=1}^N DFI_j^t + \varepsilon} \quad (2.72)$$

Hem algoritmanın arama sürecini daha etkili hale getirmek ve hem de algoritmanın hesaplama yükünü hafifletmek için her bir rehber ajanın hesaplanmasında sadece o ana kadarki en iyi seçkin bireysel ajanlar değerlendirilebilir. Bu amaçla, Denklem (2.72), Denklem (2.73)'e dönüştürülerek en yüksek DFI 'dan en düşük DFI 'ya doğru o ana kadarki en iyi tüm bireysel ajanlar sıralanır ve o ana kadarki en iyi ilk N_{best} adet bireysel ajan seçilir. N_{best} sayısı, iterasyonlar süresince doğrusal olarak düşürülerek ilk iterasyonda popülasyon büyüklüğüne ve son iterasyonda ise 2'ye eşit olacak şekilde ayarlanabilir.

$$Y_t^i = \frac{\sum_{j \in N_{best}, j \neq i} DFI_j^t \times X_j^{best}}{\sum_{j \in N_{best}} DFI_j^t + \varepsilon} \quad (2.73)$$

Rehber ajanların çeşitliliğini daha iyi korumak amacıyla Y_t^i 'ye Gauss mutasyonu Denklem (2.74) ile uygulanır. Bu denklemde $randn$, standart normal dağılıma sahip rastgele bir vektördür. Std^t , t . iterasyonda o ana kadarki en iyi bireysel ajanlar için hesaplanan standart sapma vektörüdür. Std_{max}^t , t . iterasyonda o ana kadarki en iyi bireysel ajanların boyutlarının maksimum standart sapma değerlerini içeren bir vektördür. $Y_{i,mut}^t$, arama ajanlarına rehberlik etmek için kullanılan mutasyona uğramış Y_i^t 'dir.

$$Y_{i,mut}^t = Y_i^t + \left(1 - \frac{t}{t_{max}}\right) \times randn \times (Std_{max}^t - Std^t) \quad (2.74)$$

Görüldüğü üzere, arama uzayındaki bir boyuta ait standart sapma ne kadar büyükse, en iyi ajanlar arasındaki mevcut yüksek çeşitliliği korumak için rehber ajanların mutasyon adımı o kadar küçüktür ve bu da tüm popülasyonun arama uzayında çeşitliliğini korumasına yardımcı olur. Öte yandan, arama uzayındaki bir boyuta ait standart sapma ne kadar küçükse, mutasyon mekanizmasında o kadar büyük bir adım alınır ve bu da

arama uzayının genişletilmesine ve belirli boyuttaki ajanların çeşitliliğinin artırılmasına yardımcı olur.

Son olarak, Denklem (2.75), (2.76) ve (2.77) kullanılarak $(t + 1)$. iterasyondaki i . arama ajanının hız vektörü V_i^{t+1} , Denklem (2.78) kullanılarak $(t + 1)$. iterasyondaki i . arama ajanının konum vektörü X_i^{t+1} güncellenir. Bu denklemlerde $rand$, $[0,1]$ aralığında üretilen rastgele bir sayıdır. t mevcut iterasyon sayısı, t_{max} maksimum iterasyon sayısıdır. φ , i . arama ajanının rehberine doğru attığı adımları belirleyen bir ölçeklendirme parametresinin vektörüdür.

$$V_i^{t+1} = w \times V_i^t + \varphi \times (Y_{i,mut}^t - X_i^t) \quad (2.75)$$

$$\varphi = 1 + (2 \times rand - 1) \times w \quad (2.76)$$

$$w = 1 - \frac{t}{t_{max}} \quad (2.77)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (2.78)$$

3. BÖLÜM

METASEZGİSEL OPTİMİZASYON TABANLI PARAMETRİK METOTLAR KULLANILARAK GÜÇ EĞRİSİ MODELLEMESİ

Bu bölümde güç eğrisi modellerini oluşturmak için Afrika akbabaları, balçık küfü, deniz yırtıcıları, Fick yasası ve geometrik ortalama optimizasyon algoritmaları ile 3, 4 ve 5 parametrelili lojistik, 5., 6. ve 7. dereceden polinom ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonları birlikte kullanılmıştır. Tüm metasezgisel optimizasyon algoritmaları için maksimum iterasyon ve arama ajanı sayıları, sırasıyla, 1500 ve 20 olarak atanmış ve alt ve üst sınırlar, sırasıyla, -1 ve 1 olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, rastlantısallığı gidermek için 30 kez bağımsız çalışma yapılmıştır. *Open Platform for French Public Data & ENGIE*'den elde edilen ham güç eğrisi verileri kullanılmıştır [107]. Toplam veri seti, rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü parametreleri için 10 dakikalık zaman aralıklarında kaydedilmiş toplam 47282 adet gerçek zamanlı ölçümleri içermektedir. Rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü parametrelerinin birimleri, sırasıyla, m/s ve kW olarak alınmıştır.

İlgili rüzgâr türbininin rotor çapı 82 m, kule yüksekliği 80 m ve nominal gücü 2050 kW'tır. Devreden çıkma, nominal ve devreye girme rüzgâr hızı değerleri, sırasıyla, 25 m/s, 14,5 m/s ve 3,5 m/s'dir. Toplam veri setindeki rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü parametrelerinin standart sapma değerleri 2,5266 m/s ve 462,3057 kW, ortalama değerleri ise 5,6893 m/s ve 395,9681 kW'tır. Denklem (3.1)'de verilen Karesel Hataların Toplamı (KHT) eşitliği [57] optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Bu denklemde n toplam veri noktası sayısını, RG_k k. veri noktasının gerçek rüzgâr gücü değerini ve \widehat{RG}_k k. veri noktasının tahmini rüzgâr gücü değerini ifade etmektedir. Ayrıca, uyum iyiliği istatistiklerinin değerlendirilmesi amacıyla KHT'nin yanı sıra Denklem (3.2)'de verilen Karekök Ortalama Hata [57] sonuçları da sunulmuştur.

$$KHT = \sum_{k=1}^n (RG_k - \widehat{RG}_k)^2 \quad (3.1)$$

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (RG_k - \widehat{RG}_k)^2} \quad (3.2)$$

3.1 Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (AAOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi

AAOA tabanlı güç eğrisi modellerinin uyum iyiliği istatistikleri Tablo 3.1’de, tasarım katsayıları ise Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.1’de görüldüğü gibi, AAOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli 66,9071 kW’lık KOH ve $2,1166 \times 10^8$ ’lik KHT değerleri ile en doğru güç eğrisi modellemesini gerçekleştirmiştir. Ayrıca, AAOA tabanlı güç eğrisi modelleri için uyum iyiliği istatistikleri açısından modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonundan sonra, sırasıyla, 6. dereceden polinom, 7. dereceden polinom, 4 parametrelili lojistik, 5. dereceden polinom ve 5 parametrelili lojistik fonksiyonları ön plana çıkmıştır. Bu değerlendirmelere ek olarak, AAOA tabanlı 3 parametrelili lojistik model 608,0478 kW’lık KOH ve $1,7481 \times 10^{10}$ ’luk KHT değerleri ile en kötü güç eğrisi modellemesini gerçekleştirmiştir. AAOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin tasarım katsayıları $k_1=0,6810$, $k_2=-0,0596$, $k_3=1$, $k_4=-0,5837$, $k_5=-0,0012$, $k_6=0,5227$, $k_7=-0,3629$, $k_8=0,2680$ ve $k_9=0,1052$ olarak bulunmuştur.

AAOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeliyle elde edilen yakınsama eğrisi ve tahmini güç verileri Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

3.2 Balçık Küfü Optimizasyon Algoritması (BKOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi

BKOA tabanlı güç eğrisi modellerinin uyum iyiliği istatistikleri Tablo 3.3’te, tasarım katsayıları Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.3’te gösterildiği gibi, BKOA tabanlı 6. derece polinom modeli 69,8808 kW’lık KOH ve $2,3089 \times 10^8$ ’lik KHT değerleri ile en tutarlı güç eğrisi modellemesini sağlamıştır. Bununla birlikte, BKOA tabanlı güç eğrisi modelleri için uyum iyiliği istatistikleri bakımından 6. derece polinom modelini, sırasıyla, 7. dereceden polinom, 5. dereceden polinom, modifiye hiperbolik tanjant, 5 parametrelili lojistik ve 4 parametrelili lojistik fonksiyonları takip etmiştir. Öte yandan, BKOA tabanlı 3 parametrelili lojistik model 608,0478 kW’lık KOH ve $1,7481 \times 10^{10}$ ’luk KHT değerleri ile en kararsız güç

eğrisi modellemesini gerçekleştirmiştir. BKOA tabanlı 6. derece polinom modelinin tasarım katsayıları $k_1=-1$, $k_2=-1$, $k_3=-1$, $k_4=-0,9660$, $k_5=0,9003$, $k_6=-0,0897$ ve $k_7=0,0024$ olarak hesaplanmıştır.

BKOA tabanlı 6. derece polinom modeliyle elde edilen yakınsama eğrisi ve tahmini güç verileri Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

3.3 Deniz Yırtıcıları Optimizasyon Algoritması (DYOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi

DYOA tabanlı güç eğrisi modellerine ait uyum iyiliği istatistikleri Tablo 3.5'te, tasarım katsayıları ise Tablo 3.6'da özetlenmiştir.

Tablo 3.5'te gösterildiği üzere, DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli 65,7707 kW'lık KOH ve $2,0453 \times 10^8$ 'lik KHT değerleri ile en tutarlı güç eğrisi modellemesini sağlamıştır. Ayrıca, DYOA tabanlı güç eğrisi modelleri için uyum iyiliği istatistikleri açısından modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonundan sonra, sırasıyla, 7. dereceden polinom, 6. dereceden polinom, 4 parametrelili lojistik, 5. dereceden polinom ve 5 parametrelili lojistik fonksiyonları ön plana çıkmıştır. Buna karşın, en kararsız güç eğrisi modellemesini, 608,0478 kW'lık KOH ve $1,7481 \times 10^{10}$ 'luk KHT değerleri ile DYOA tabanlı 3 parametrelili lojistik model gerçekleştirmiştir. DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin tasarım katsayıları $k_1=1$, $k_2=0,1918$, $k_3=0,8046$, $k_4=-0,0016$, $k_5=0,0010$, $k_6=0,1373$, $k_7=0,3312$, $k_8=0,7029$ ve $k_9=0,7059$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.3, DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeliyle elde edilen yakınsama eğrisini ve tahmini güç verilerini göstermektedir.

3.4 Fick Yasası Optimizasyon Algoritması (FYOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi

FYOA tabanlı güç eğrisi modellerine ait uyum iyiliği istatistikleri Tablo 3.7'de, tasarım katsayıları Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.7'den görüldüğü üzere, FYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli 67,4448 kW'lık KOH ve $2,1508 \times 10^8$ 'lik KHT değerleri ile en iyi güç eğrisi modellemesini yapmıştır. Öte yandan, FYOA tabanlı güç eğrisi modelleri için uyum iyiliği istatistikleri bakımından modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonunu, sırasıyla, 6. dereceden polinom, 7. dereceden polinom, 4 parametrelilik lojistik, 5. dereceden polinom ve 5 parametrelilik lojistik fonksiyonları takip etmiştir. Bu değerlendirmelere ilaveten, FYOA tabanlı 3 parametrelilik lojistik model 608,0478 kW'lık KOH ve $1,7481 \times 10^{10}$ 'luk KHT değerleri ile en tutarsız güç eğrisi modellemesini vermiştir. FYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeline ait tasarım katsayıları $k_1=-0,9602$, $k_2=1$, $k_3=1$, $k_4=-1$, $k_5=-1$, $k_6=0,1008$, $k_7=-0,0025$, $k_8=-0,9349$ ve $k_9=-0,9451$ olarak bulunmuştur.

FYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeliyle gerçekleştirilen yakınsama eğrisi ve tahmini güç verileri Şekil 3.4'te sunulmaktadır.

3.5 Geometrik Ortalama Optimizasyon Algoritması (GOOA) Tabanlı Güç Eğrisi Modellemesi

Tablo 3.9, GOOA tabanlı güç eğrisi modellerinin uyum iyiliği istatistiklerini, Tablo 3.10 tasarım katsayılarını listelemektedir.

Tablo 3.9'dan gözlemlendiği gibi, GOOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli 67,1549 kW'lık KOH ve $2,1323 \times 10^8$ 'lik KHT değerleri ile en kararlı güç eğrisi modellemesini yapmıştır. Bununla birlikte, GOOA tabanlı güç eğrisi modelleri için uyum iyiliği istatistikleri açısından modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonu, sırasıyla, 6. dereceden polinom, 7. dereceden polinom, 4 parametrelilik lojistik, 5. dereceden polinom ve 5 parametrelilik lojistik fonksiyonlarını geride bırakmıştır. Bu analizlere ek olarak, GOOA tabanlı 3 parametrelilik lojistik model 608,0478 kW'lık KOH ve $1,7481 \times 10^{10}$ 'luk KHT değerleri ile en hatalı güç eğrisi modellemesini vermiştir. GOOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeline ait tasarım katsayıları $k_1=0,7916$, $k_2=0,8037$, $k_3=-0,0591$, $k_4=0,1594$, $k_5=0,0010$, $k_6=0,7374$, $k_7=0,4048$, $k_8=0,1028$ ve $k_9=0,1739$ olarak hesaplanmıştır.

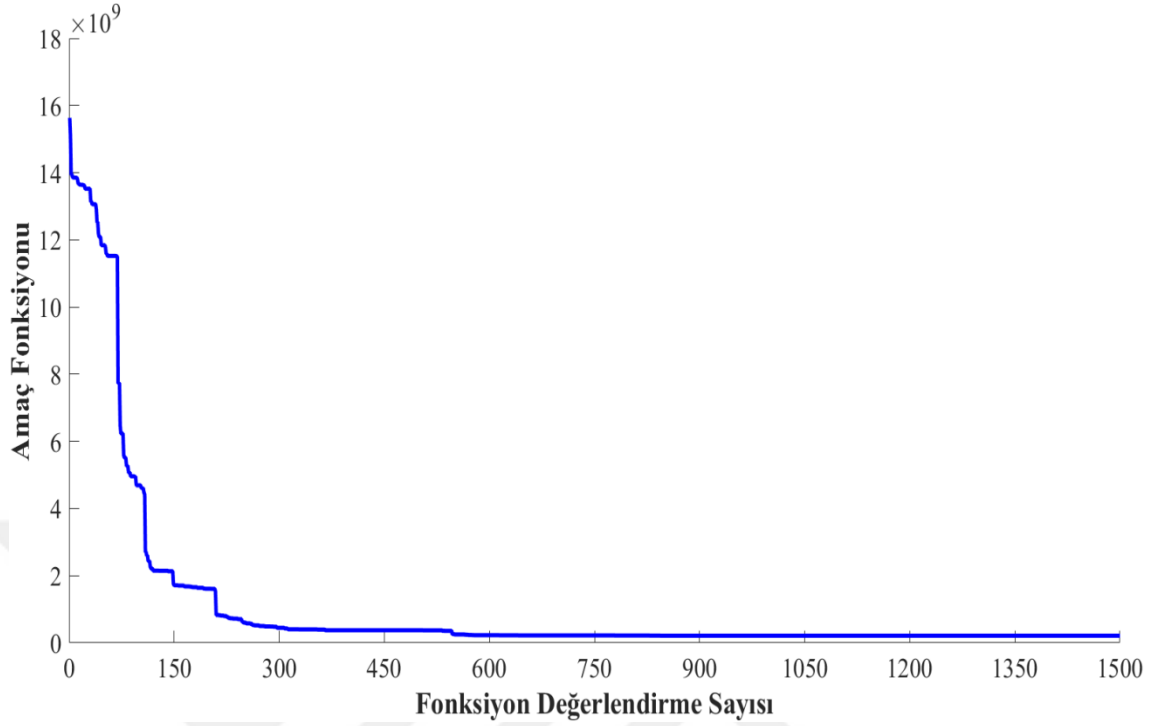
GOOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeliyle gerçekleştirilen yakınsama eğrisi ve tahmini güç verileri Şekil 3.5'te sunulmaktadır.

Tablo 3.1. AAOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması

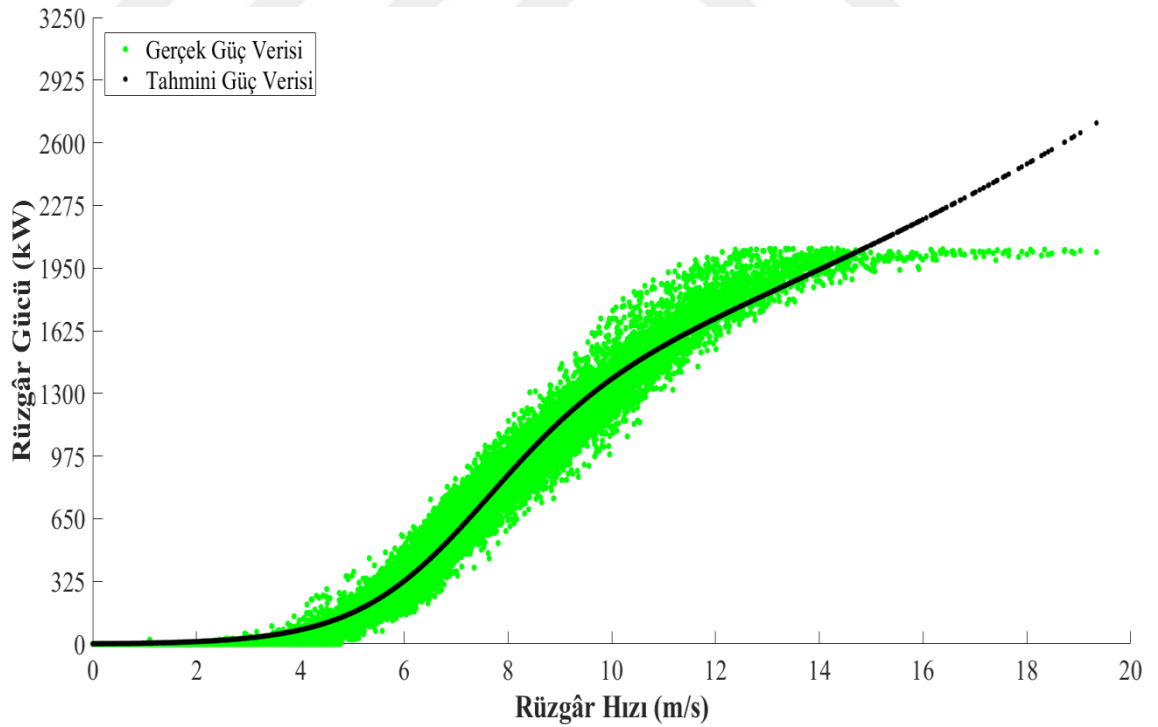
Parametrik Fonksiyonlar	KOH	KHT
3 Parametrelili Lojistik	608,0478	$1,7481 \times 10^{10}$
4 Parametrelili Lojistik	97,2518	$4,4719 \times 10^8$
5 Parametrelili Lojistik	287,8338	$3,9172 \times 10^9$
5. Dereceden Polinom	103,1711	$5,0328 \times 10^8$
6. Dereceden Polinom	72,6258	$2,4939 \times 10^8$
7. Dereceden Polinom	73,1551	$2,5304 \times 10^8$
Modifiye Hiperbolik Tanjant	66,9071	$2,1166 \times 10^8$

Tablo 3.2. AAOA ile elde edilen tasarım katsayıları

Tasarım Katsayıları	Parametrik Fonksiyonlar						
	f_{3PL}	f_{4PL}	f_{5PL}	f_{5DP}	f_{6DP}	f_{7DP}	f_{MHT}
k_1	1	0,9133	-0,9996	0,0403	0,1894	0,0005	0,6810
k_2	1	0,9204	-0,3034	0,9987	-0,0754	-0,0090	-0,0596
k_3	-1	-1	0,0081	0,9919	-0,2200	0,0011	1
k_4	-	0,0005	1	1	0,2093	0,0707	-0,5837
k_5	-	-	-1	0,1078	0,5276	0,5260	-0,0012
k_6	-	-	-	-0,0089	-0,0564	-0,0535	0,5227
k_7	-	-	-	-	0,0015	0,0014	-0,3629
k_8	-	-	-	-	-	0,0000	0,2680
k_9	-	-	-	-	-	-	0,1052



a) Yakınsama eğrisi



b) Gerçek ve tahmini güç verileri

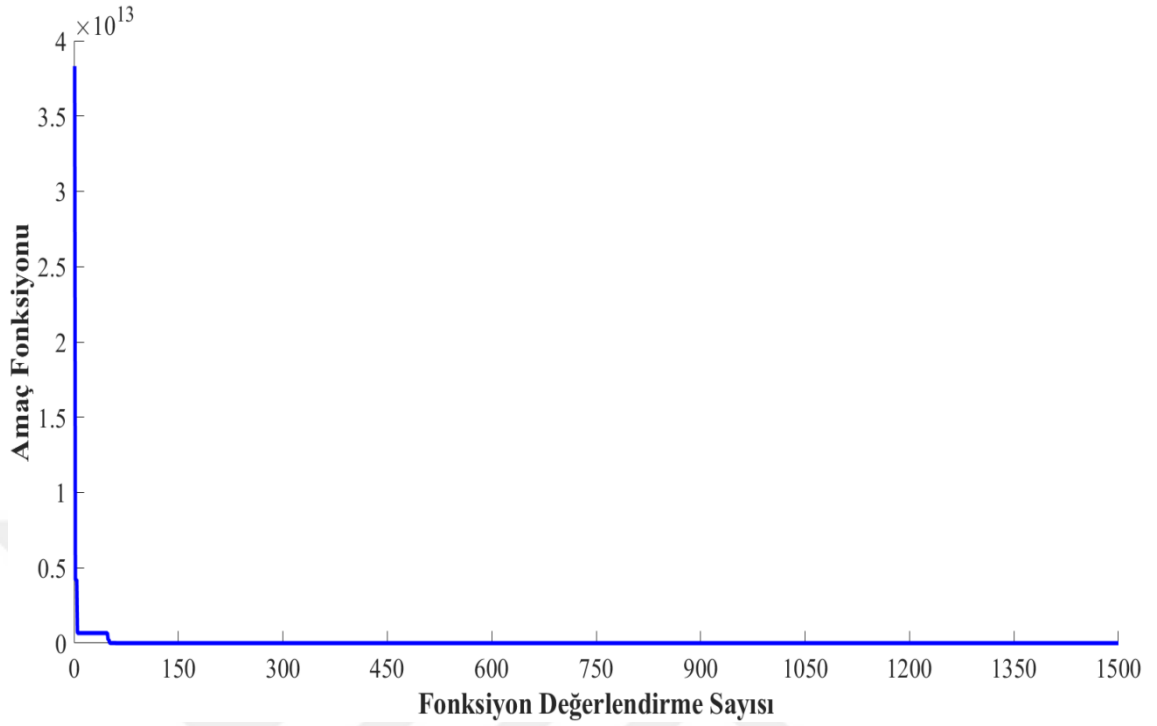
Şekil 3.1. AAOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları

Tablo 3.3. BKOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması

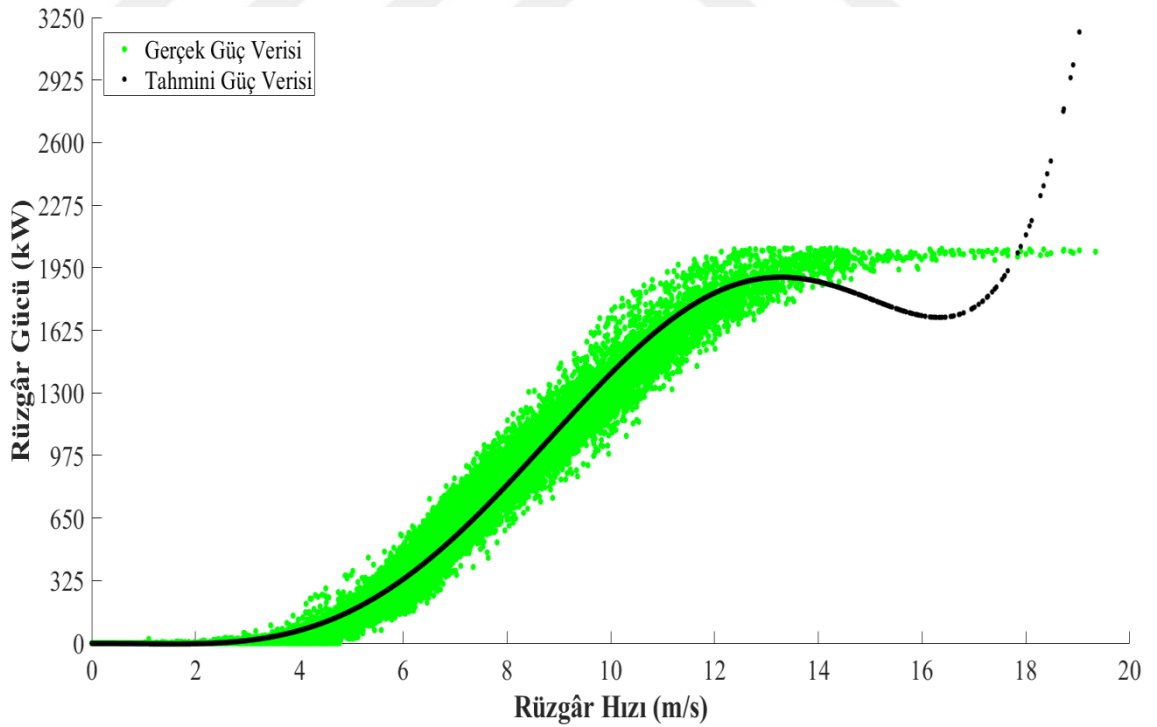
Parametrik Fonksiyonlar	KOH	KHT
3 Parametrelili Lojistik	608,0478	$1,7481 \times 10^{10}$
4 Parametrelili Lojistik	559,8724	$1,4821 \times 10^{10}$
5 Parametrelili Lojistik	531,6006	$1,3362 \times 10^{10}$
5. Dereceden Polinom	102,9379	$5,0101 \times 10^8$
6. Dereceden Polinom	69,8808	$2,3089 \times 10^8$
7. Dereceden Polinom	75,5674	$2,7000 \times 10^8$
Modifiye Hiperbolik Tanjant	412,7367	$8,0546 \times 10^9$

Tablo 3.4. BKOA ile elde edilen tasarım katsayıları

Tasarım Katsayıları	Parametrik Fonksiyonlar						
	f_{3PL}	f_{4PL}	f_{5PL}	f_{5DP}	f_{6DP}	f_{7DP}	f_{MHT}
k_1	1	-1	-0,8232	0,4273	-1	0,0065	0,7605
k_2	1	-1	0,8491	1	-1	-0,1506	-0,0655
k_3	-1	-1	0,1172	1	-1	0,0601	-0,4422
k_4	-	0,0119	1	1	-0,9660	0,9118	-0,2688
k_5	-	-	-1	0,1032	0,9003	0,2092	0,0067
k_6	-	-	-	-0,0085	-0,0897	-0,0106	0,0752
k_7	-	-	-	-	0,0024	-0,0012	0,1522
k_8	-	-	-	-	-	0,0001	0,3873
k_9	-	-	-	-	-	-	0,1665



a) Yakınsama eğrisi



b) Gerçek ve tahmini güç verileri

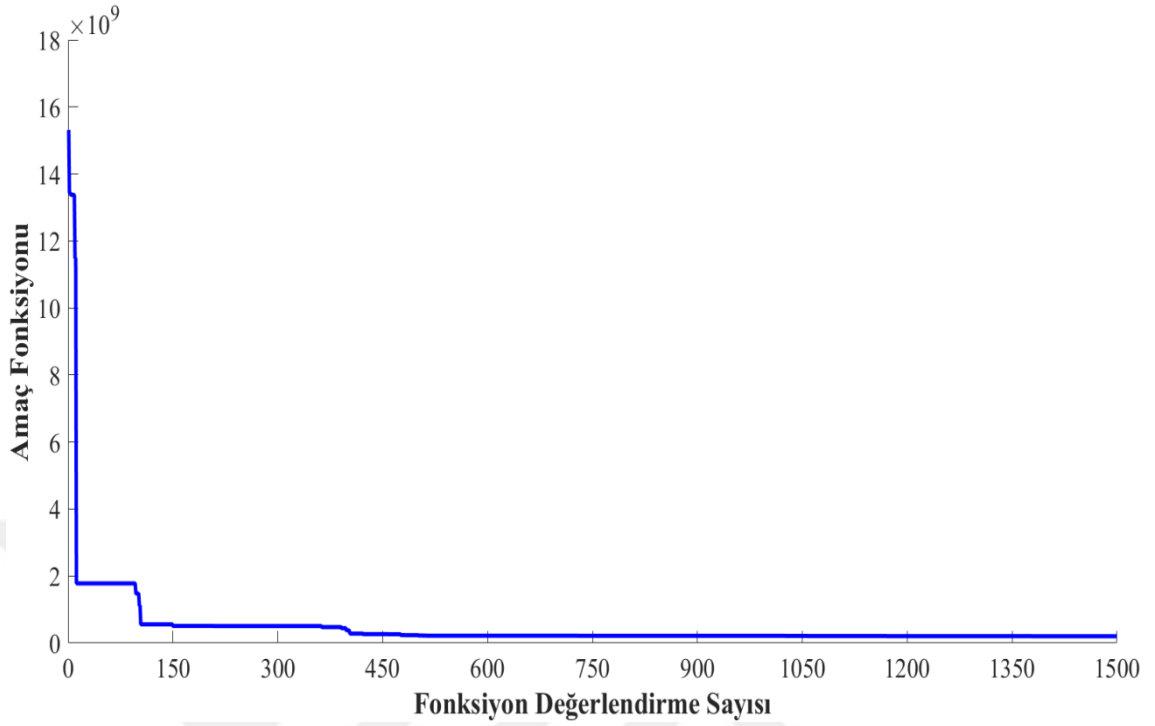
Şekil 3.2. BKOA tabanlı 6. derece polinom modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları

Tablo 3.5. DYOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması

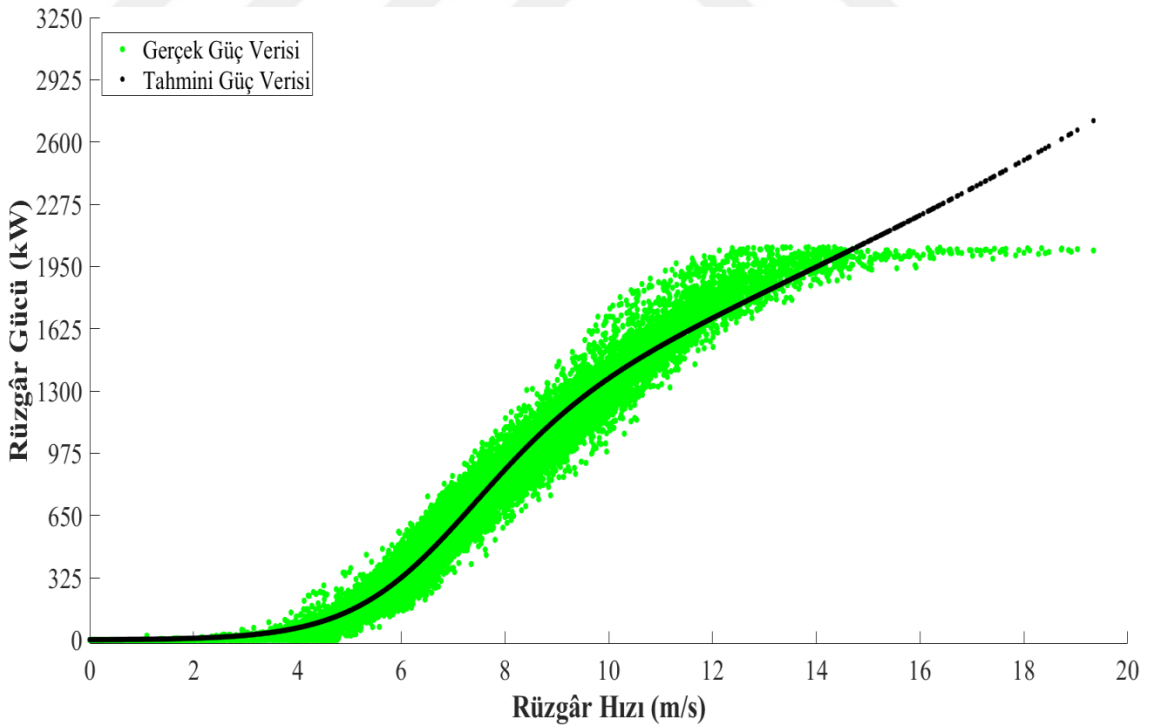
Parametrik Fonksiyonlar	KOH	KHT
3 Parametrelili Lojistik	608,0478	$1,7481 \times 10^{10}$
4 Parametrelili Lojistik	97,2423	$4,4710 \times 10^8$
5 Parametrelili Lojistik	287,6637	$3,9126 \times 10^9$
5. Dereceden Polinom	102,9379	$5,0101 \times 10^8$
6. Dereceden Polinom	69,2849	$2,2697 \times 10^8$
7. Dereceden Polinom	67,0857	$2,1279 \times 10^8$
Modifiye Hiperbolik Tanjant	65,7707	$2,0453 \times 10^8$

Tablo 3.6. DYOA ile elde edilen tasarım katsayıları

Tasarım Katsayıları	Parametrik Fonksiyonlar						
	f_{3PL}	f_{4PL}	f_{5PL}	f_{5DP}	f_{6DP}	f_{7DP}	f_{MHT}
k_1	1	1	-1	0,4186	-1	-1	1
k_2	1	0,8402	-0,8157	1	-1	-1	0,1918
k_3	-1	-1	0,0021	1	-1	-1	0,8046
k_4	–	0,0005	1	1	-0,4521	-0,9472	-0,0016
k_5	–	–	-1	0,1032	0,7564	1	0,0010
k_6	–	–	–	-0,0085	-0,0772	-0,1169	0,1373
k_7	–	–	–	–	0,0021	0,0047	0,3312
k_8	–	–	–	–	–	-0,0001	0,7029
k_9	–	–	–	–	–	–	0,7059



a) Yakınsama eğrisi



b) Gerçek ve tahmini güç verileri

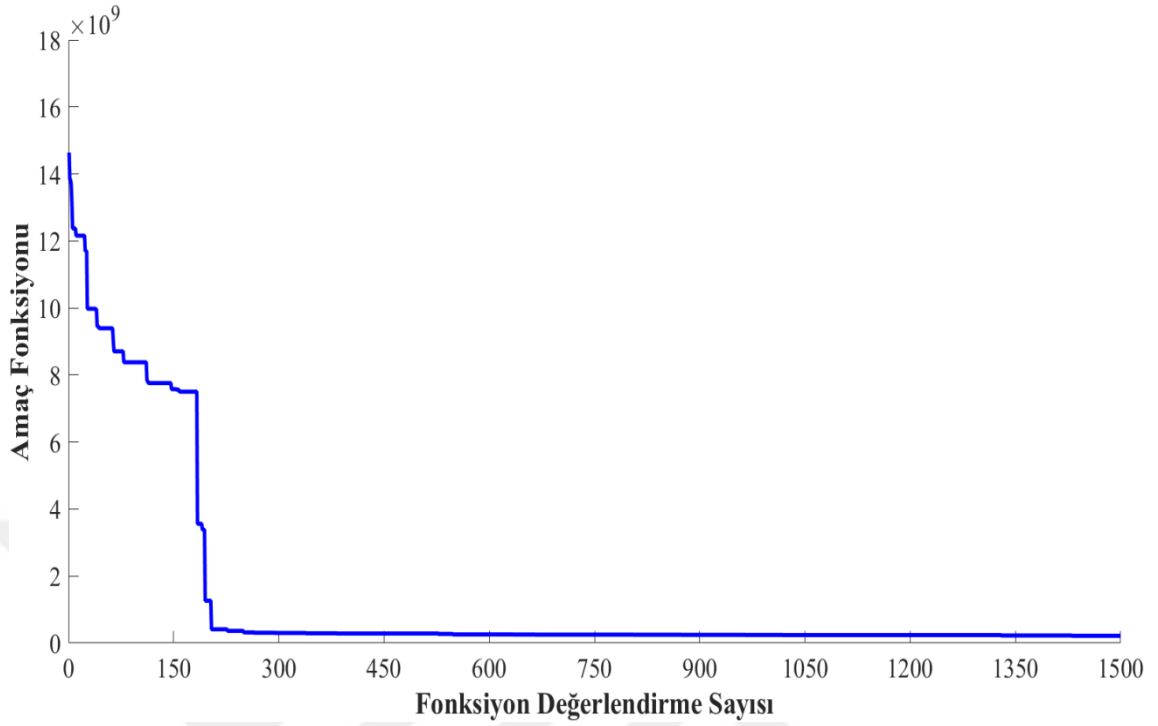
Şekil 3.3. DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları

Tablo 3.7. FYOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması

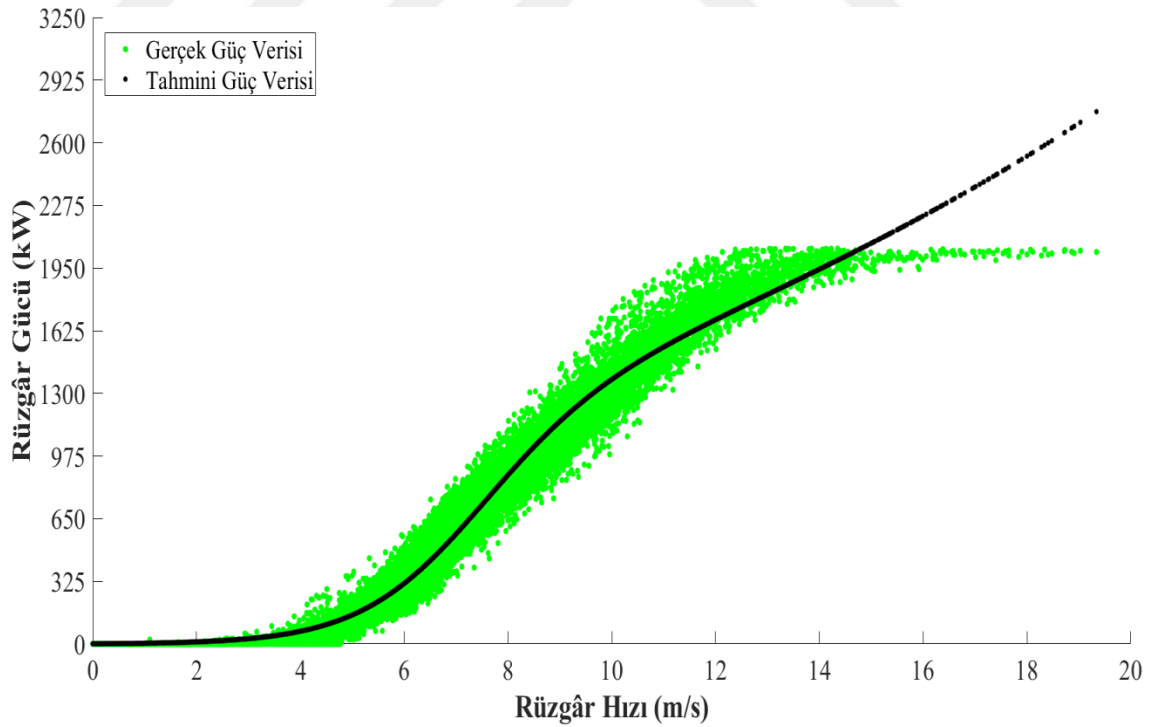
Parametrik Fonksiyonlar	KOH	KHT
3 Parametrelili Lojistik	608,0478	$1,7481 \times 10^{10}$
4 Parametrelili Lojistik	97,2633	$4,4730 \times 10^8$
5 Parametrelili Lojistik	287,8055	$3,9165 \times 10^9$
5. Dereceden Polinom	102,9386	$5,0102 \times 10^8$
6. Dereceden Polinom	70,5064	$2,3505 \times 10^8$
7. Dereceden Polinom	72,8615	$2,5101 \times 10^8$
Modifiye Hiperbolik Tanjant	67,4448	$2,1508 \times 10^8$

Tablo 3.8. FYOA ile elde edilen tasarım katsayıları

Tasarım Katsayıları	Parametrik Fonksiyonlar						
	f_{3PL}	f_{4PL}	f_{5PL}	f_{5DP}	f_{6DP}	f_{7DP}	f_{MHT}
k_1	1	0,9836	-0,9998	0,7278	-1	-1	-0,9602
k_2	1	0,8640	-0,3821	1	-1	-1	1
k_3	-1	-1	0,0072	1	-1	-1	1
k_4	-	0,0005	1	1	0,2613	0,8546	-1
k_5	-	-	-1	0,1029	0,5568	0,2802	-1
k_6	-	-	-	-0,0085	-0,0597	-0,0159	0,1008
k_7	-	-	-	-	0,0016	-0,0012	-0,0025
k_8	-	-	-	-	-	0,0001	-0,9349
k_9	-	-	-	-	-	-	-0,9451



a) Yakınsama eğrisi



b) Gerçek ve tahmini güç verileri

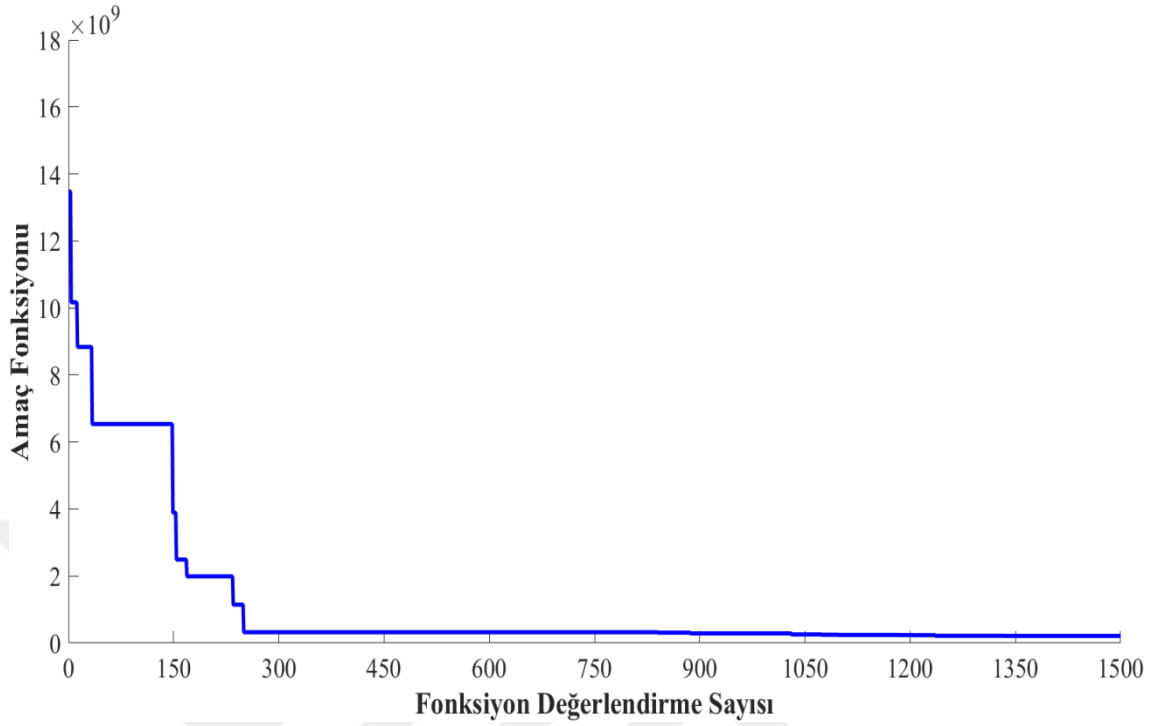
Şekil 3.4. FYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları

Tablo 3.9. GOOA tabanlı güç eğrisi modellerinin karşılaştırılması

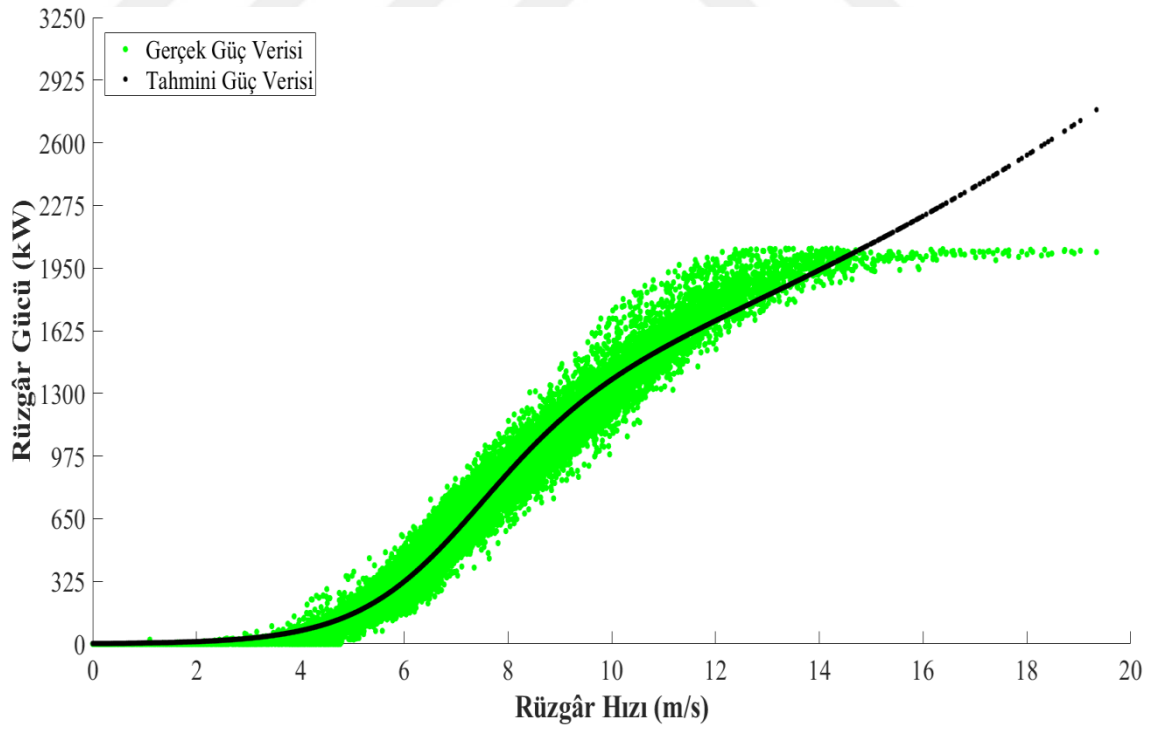
Parametrik Fonksiyonlar	KOH	KHT
3 Parametrelili Lojistik	608,0478	$1,7481 \times 10^{10}$
4 Parametrelili Lojistik	100,6211	$4,7871 \times 10^8$
5 Parametrelili Lojistik	592,5337	$1,6601 \times 10^{10}$
5. Dereceden Polinom	124,9294	$7,3795 \times 10^8$
6. Dereceden Polinom	92,6553	$4,0592 \times 10^8$
7. Dereceden Polinom	100,1508	$4,7425 \times 10^8$
Modifiye Hiperbolik Tanjant	67,1549	$2,1323 \times 10^8$

Tablo 3.10. GOOA ile elde edilen tasarım katsayıları

Tasarım Katsayıları	Parametrik Fonksiyonlar						
	f_{3PL}	f_{4PL}	f_{5PL}	f_{5DP}	f_{6DP}	f_{7DP}	f_{MHT}
k_1	1	-0,9902	-0,4713	0,2202	0,1243	-0,1486	0,7916
k_2	1	-0,9917	0,8065	0,2057	-0,2415	0,0957	0,8037
k_3	-1	-1	0,3852	-0,1909	0,0059	0,0718	-0,0591
k_4	–	0,0006	0,9604	0,5128	0,4634	0,0736	0,1594
k_5	–	–	-0,9929	0,2149	0,3220	0,0241	0,0010
k_6	–	–	–	-0,0134	-0,0297	0,0706	0,7374
k_7	–	–	–	–	0,0006	-0,0084	0,4048
k_8	–	–	–	–	–	0,0002	0,1028
k_9	–	–	–	–	–	–	0,1739



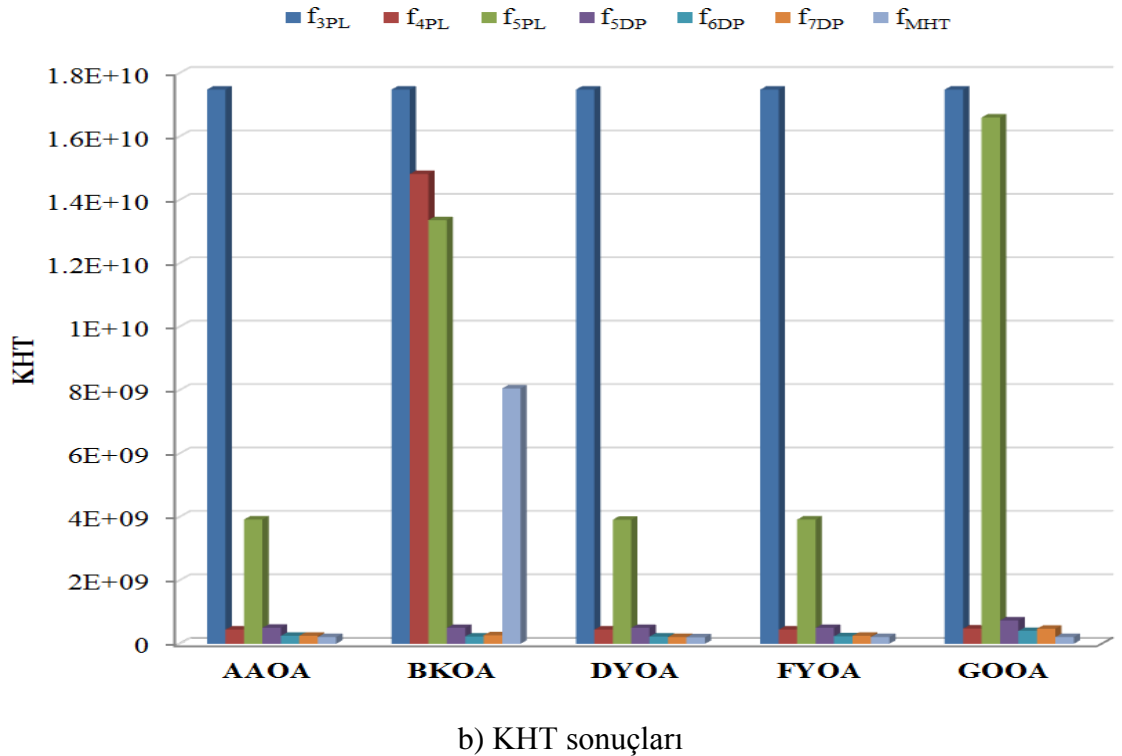
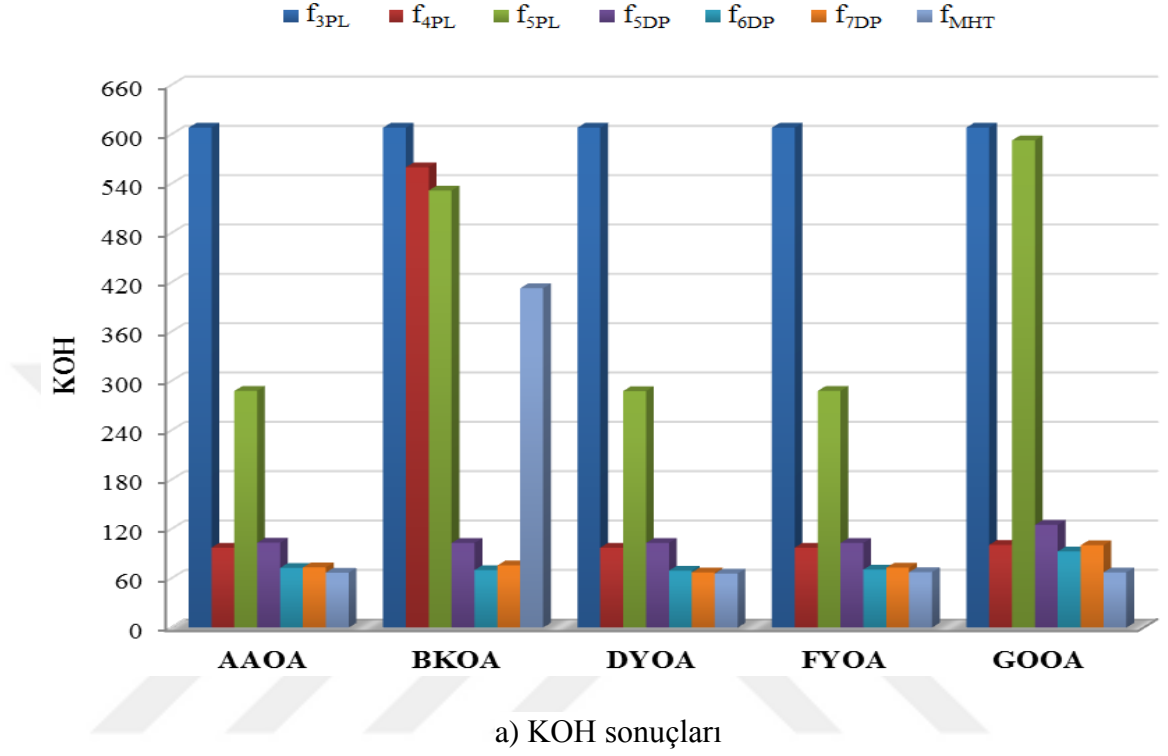
a) Yakınsama eğrisi



b) Gerçek ve tahmini güç verileri

Şekil 3.5. GOOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modelinin güç eğrisi modelleme sonuçları

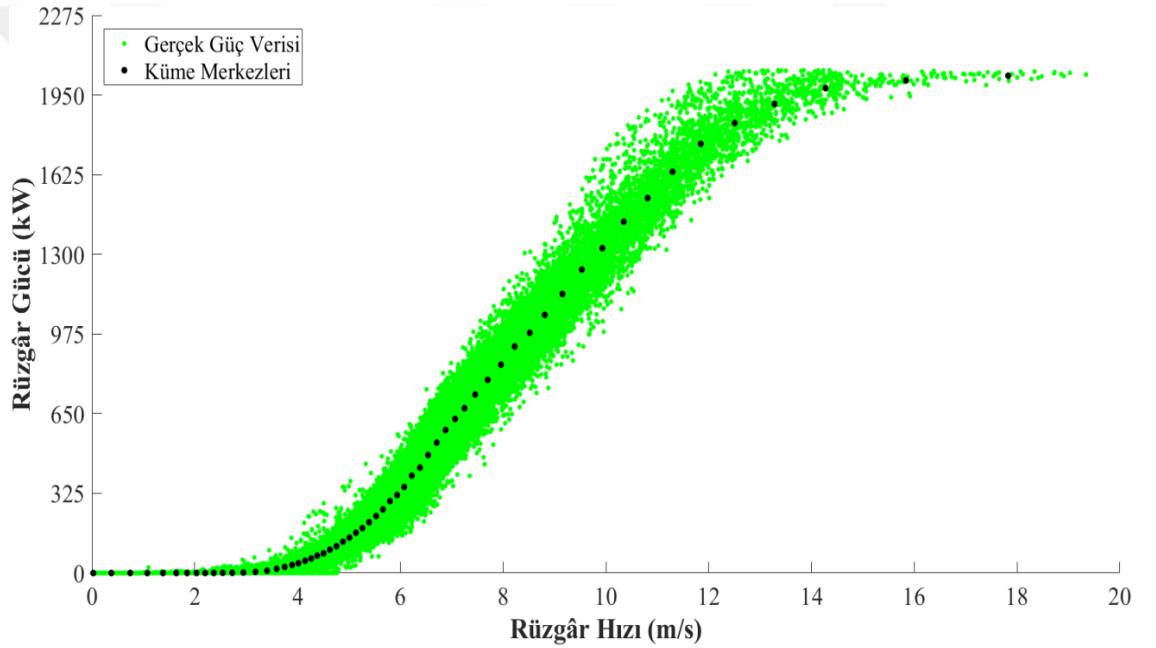
Oluşturulan tüm rüzgar türbini güç eğrisi modelleri için KOH ve KHT sonuçları Şekil 3.6'da detaylı olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Rüzgar türbini güç eğrisi modelleri için KOH ve KHT sonuçları

3.6 Kümeleme ve Metasezgisel Optimizasyona Dayalı Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi Modellemesi

Uyum iyiliği sonuçlarını daha da iyileştirmek amacıyla, DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modellemesinden önce [108]'de önerilen k-ortalamalar algoritması tabanlı güç eğrisi kümelemesi yapılmıştır. Bölümleme aşamasında küme sayısı olan k 60 olarak atanmıştır ve uzaklık ölçümü için Karesel Öklid kullanılmıştır. Bölümleme sonuçlarına göre toplam ortalama siluet değeri 0,5716 olarak hesaplanmıştır. k-ortalamalar algoritması ile belirlenen küme merkezleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



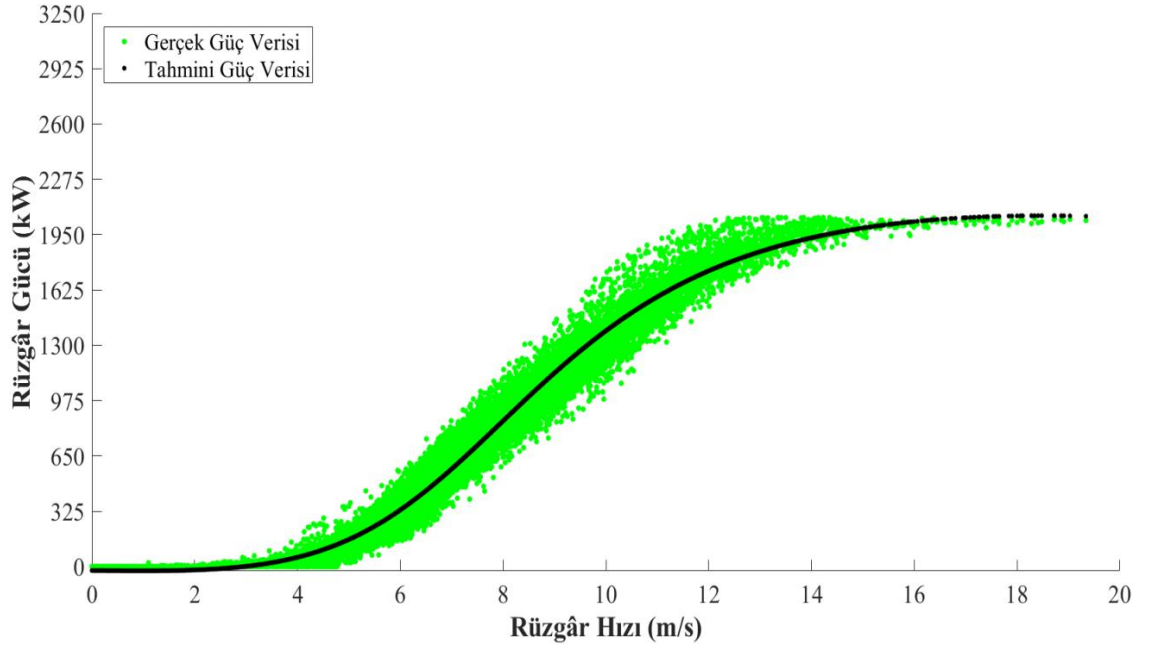
Şekil 3.7. k-ortalamalar algoritması ile belirlenen küme merkezleri

Elde edilen küme merkezleri DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeliyle kullanıldığında, maksimum iterasyon ve arama ajanı sayıları, sırasıyla, 30000 ve 30 olarak atanmış ve alt ve üst sınırlar, sırasıyla, -1 ve 1 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre KOH ve KHT değerleri, sırasıyla, 22,4751 kW ve $3,0308 \times 10^4$ olarak bulunmuştur. Tasarım katsayıları $k_1=-0,740505$, $k_2=0,369998$, $k_3=-0,740516$, $k_4=-0,369993$, $k_5=-8,539984 \times 10^{-9}$, $k_6=0,435190$, $k_7=-4,675255 \times 10^{-7}$, $k_8=0,140886$ ve $k_9=1$ olarak hesaplanmıştır. DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeliyle gerçekleştirilen yakınsama eğrisi Şekil 3.8(a)'da gösterilmektedir. Tüm güç verileri için belirlenen tasarım katsayıları kullanıldığında, KOH ve KHT, sırasıyla,

62,9362 kW ve $1,8728 \times 10^8$ olarak elde edilmiştir. k-ortalamalar algoritması ve DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli kullanılarak gerçekleştirilen gerçek ve tahmini güç verileri Şekil 3.8(b)'de sunulmaktadır.



a) Yakınsama eğrisi



b) Gerçek ve tahmini güç verileri

Şekil 3.8. Kümeleme ve metasezgisel optimizasyona dayalı güç eğrisi modelleme sonuçları

4. BÖLÜM

SONUÇLAR

Rüzgâr türbinlerinin gerçek performansını belirlemek ve işletme maliyetlerini azaltmak için güç eğrilerinin modellenmesine ihtiyaç duyulur. Rüzgâr türbini güç eğrisi, rüzgâr türbininin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı ile buna karşılık gelen aktif güç üretimi arasındaki ilişkiyi temsil eder ve enerji üretim performansının önemli bir göstergesidir. Rüzgâr hızı tahminleriyle birlikte güç eğrisi, rüzgâr türbininin aday kurulum sahasında beklenen enerji verimini değerlendirmek için kullanılır.

Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbini güç eğrisi modellerini oluşturmak amacıyla metasezgisel optimizasyon algoritmaları ve parametrik fonksiyonlar hibritlenmiştir. Hibritleme sürecinde Afrika akbabaları, balçık küfü, deniz yırtıcıları, Fick yasası ve geometrik ortalama optimizasyon algoritmaları 3, 4 ve 5 parametrelili lojistik fonksiyonlar, 5., 6. ve 7. dereceden polinom fonksiyonlar ve modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonu ile birleştirilmiştir.

5 parametrelili lojistik fonksiyon uygulamasında DYOA en doğru sonucu vermiştir. DYOA'yı uyum iyiliği istatistikleri açısından, sırasıyla, FYOA, AAOA ve BKOA takip etmiştir. GOOA ise en yanlış sonucu vermiştir. 4 parametrelili lojistik fonksiyon uygulamasında da DYOA en kararlı sonucu üretmiştir. DYOA'yı uyum iyiliği istatistikleri açısından, sırasıyla, AAOA, FYOA ve GOOA izlemiştir. BKOA ise en kararsız sonucu üretmiştir. 3 parametrelili lojistik fonksiyon uygulamasında ise tüm metasezgisel algoritmalar eşit ve kötü performans göstermiştir. Tüm lojistik fonksiyonlar içerisinde en düşük KOH ve KHT değerleri, DYOA tabanlı 4 parametrelili lojistik model tarafından elde edilmiştir.

7. dereceden polinom fonksiyon uygulamasında DYOA en kararlı sonucu vermiştir. DYOA'yı uyum iyiliği istatistikleri açısından, sırasıyla, FYOA, AAOA ve BKOA izlemiştir. GOOA ise en kararsız sonucu vermiştir. 6. dereceden polinom fonksiyon uygulamasında da DYOA en doğru sonucu üretmiştir. DYOA'yı uyum iyiliği istatistikleri açısından, sırasıyla, BKOA, FYOA ve AAOA ve takip etmiştir. GOOA ise en yanlış sonucu üretmiştir. 5. dereceden polinom fonksiyon uygulamasında ise DYOA

ve BKOA eşit ve en kararlı sonucu vermiştir. DYOA ve BKOA'yı uyum iyiliği istatistikleri açısından, sırasıyla, FYOA ve AAOA izlemiştir. GOOA ise en kararsız sonucu üretmiştir. Tüm polinom fonksiyonlar içerisinde en az KOH ve KHT değerleri, DYOA tabanlı 7. dereceden polinom model tarafından bulunmuştur.

Modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonu uygulamasında DYOA en doğru sonucu vermiştir. DYOA'yı uyum iyiliği istatistikleri açısından, sırasıyla, AAOA, GOOA ve FYOA takip etmiştir. BKOA ise en yanlış sonucu üretmiştir. Tüm parametrik fonksiyonlar içerisinde en düşük KOH ve KHT değerleri, DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant modeli tarafından sağlanmıştır. Ayrıca, uyum iyiliği istatistiklerini daha da iyileştirmek için k-ortalamar algoritması kullanılarak ham güç eğrisi verileri yüksek korelasyonlu kümelere bölünmüş ve belirlenen küme merkezleri DYOA tabanlı modifiye hiperbolik tanjant fonksiyonuyla modellenmiştir. Bu sayede, hem güç eğrisi modellemesindeki KOH ve KHT değerleri daha da düşürülmüş hem de ideale yakın bir rüzgâr türbini güç eğrisi elde edilmiştir.

Yüksek kararlılıkta modellenen rüzgâr türbini güç eğrileri, yalnızca rüzgâr türbinlerinin üretim performanslarının değerlendirilmesi için önemli bir referans sağlamakla kalmaz, aynı zamanda güvenilir rüzgâr gücü tahminine imkan vererek rüzgâr enerji santrallerinin istikrarlı ve optimum işletiminde önemli rol oynar. Gelecek çalışmalarda, rüzgâr hızı girişine ek olarak rüzgâr yönü, kanat pozisyonu, kanat açısı, rotor hızı vb. girişler, güç eğrisi üzerindeki etkilerini değerlendirmek üzere metasezgisel optimizasyon tabanlı parametrik metotlara dahil edilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Dey, S., Sreenivasulu, A., Veerendra, G. T. N., Rao, K. V., Babu, P. A., “Renewable energy present status and future potentials in India: An overview”, *Innovation and Green Development*, 1 (1), s. 1-22, 2022.
2. Su, C. W., Khan, K., Umar, M., Zhang, W., “Does renewable energy redefine geopolitical risks?”, *Energy Policy*, 158, 2021.
3. Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Farooqi, Z. U. R., Lee, C., “Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (77), s. 33112-33134, 2022.
4. Chen, H., Shi, Y., Zhao, X., “Investment in renewable energy resources, sustainable financial inclusion and energy efficiency: A case of US economy”, *Resources Policy*, 77, 2022.
5. Oliveira, A. M., Beswick, R. R., Yan, Y. “A green hydrogen economy for a renewable energy society”, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33, 2021.
6. Shahbaz, M., Raghutla, C., Chitted, K. R., Jiao, Z., Vo, X. V., “The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index”, *Energy*, 207, 2020.
7. Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., Abdelkareem, M. A., “Renewable energy and energy storage systems”, *Energies*, 16 (3), 1415, 2023.
8. Zhao, Z., Gozgor, G., Lau, M. C. K., Mahalik, M. K., Patel, G., Khalfaoui, R., “The impact of geopolitical risks on renewable energy demand in OECD countries”, *Energy Economics*, 122, 2023.
9. Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W. C., Tee, B. T., You, S., “Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review”, *Energy and Buildings*, 256, 2022.
10. Levenda, A. M., Behrsin, I., Disano, F., “Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy Technologies”, *Energy Research & Social Science*, 71, 2021.

11. Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., Wang, X., Zhao, Y., “Review and outlook on the international renewable energy development”, *Energy and Built Environment*, 3 (2), s. 139-157, 2022.
12. Rasoulinezhad, E., Taghizadeh-Hesary, F., “Role of green finance in improving energy efficiency and renewable energy development”, *Energy Efficiency*, 15 (2), 14, 2022.
13. Maradin, D., “Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization”, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11 (3), s. 176-183, 2021.
14. Ang, T. Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., Prabakaran, N., “A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions”, *Energy Strategy Reviews*, 43, 2022.
15. Wang, W., Yuan, B., Sun, Q., Wennersten, R., “Application of energy storage in integrated energy systems-A solution to fluctuation and uncertainty of renewable energy”, *Journal of Energy Storage*, 52, 2022.
16. Chen, C., Hu, Y., Karuppiah, M., Kumar, P. M., “Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 2021.
17. Khan, K., Su, C. W., Rehman, A. U., Ullah, R., “Is technological innovation a driver of renewable energy?”, *Technology in Society*, 70, 2022.
18. Liu, Y., Feng, C., “Promoting renewable energy through national energy legislation”, *Energy Economics*, 118, 2023.
19. Lee, C. C., Zhang, J., Hou, S., “The impact of regional renewable energy development on environmental sustainability in China”, *Resources Policy*, 80, 2023.
20. Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., Al-Jiboory, A. K., Sameen, A. Z., Salman, H. M., Jaszczur, M., “The renewable energy role in the global energy Transformations”, *Renewable Energy Focus*, 48, 2024.
21. Cantarero, M. M. V., “Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries”, *Energy Research & Social Science*, 70, 2020.

22. Ammari, C., Belatrache, D., Touhami, B., Makhloufi, S., “Sizing, optimization, control and energy management of hybrid renewable energy system-A review”, *Energy and Built Environment*, 3 (4), s. 399-411, 2022.
23. Yolcan, O. O., “World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation”, *Innovation and Green Development*, 2 (4), 2023.
24. Karaaslan, A., Gezen, M., “The evaluation of renewable energy resources in Turkey by integer multi-objective selection problem with interval coefficient”, *Renewable Energy*, 182, s. 842-854, 2022.
25. Karaaslan, A., Çamkaya, S., “The relationship between CO2 emissions, economic growth, health expenditure, and renewable and non-renewable energy consumption: Empirical evidence from Turkey”, *Renewable Energy*, 190, s. 457-466, 2022.
26. Celik, A. N., Özgür, E., “Review of Turkey’s photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 2020.
27. Çeçen, M., Yavuz, C., Tirmikçi, C. A., Sarıkaya, S., Yanıkoğlu, E., “Analysis and evaluation of distributed photovoltaic generation in electrical energy production and related regulations of Turkey”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, s. 1-16, 2022.
28. Erat, S., Telli, A., Ozkendir, O. M., Demir, B., “Turkey’s energy transition from fossil-based to renewable up to 2030: Milestones, challenges and opportunities”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, s. 401-412, 2021.
29. Özgül, S., Koçar, G., Eryaşar, A., “The progress, challenges, and opportunities of renewable energy cooperatives in Turkey”, *Energy for Sustainable Development*, 59, s. 107-119, 2020.
30. Nikolakakis, T., Broekman, E. B., Chattopadhyay, D. M., Merino, A. M., “Analysis of long-term variable renewable energy heavy capacity plans including electric vehicle and hydrogen scenarios: Methodology and illustrative case study for Turkey”, *IEEE Access*, 11, 2023.
31. Acaroğlu, H., Güllü, M., “Climate change caused by renewable and non-renewable energy consumption and economic growth: A time series ARDL analysis for Turkey”, *Renewable Energy*, 193, s. 434-447, 2022.

32. Uddin, R., Shaikh, A. J., Khan, H. R., Shirazi, M. A., Rashid, A., Qazi, S. A., “Renewable energy perspectives of Pakistan and Turkey: Current analysis and policy recommendations”, *Sustainability*, 13 (6), 2021.
33. Önder, H. G., “Renewable energy consumption policy in Turkey: An energy extended input-output analysis”, *Renewable Energy*, 175, s. 783-796, 2021.
34. Mukhtarov, S., “Do renewable energy and total factor productivity eliminate CO₂ emissions in Turkey?”, *Environmental Economics and Policy Studies*, 26 (2), s. 307-324, 2024.
35. Roga, S., Bardhan, S., Kumar, Y., Dubey, S. K., “Recent technology and challenges of wind energy generation: A review”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 2022.
36. Shi, H., Dong, Z., Xiao, N., Huang, Q., “Wind speed distributions used in wind energy assessment: a review”, *Frontiers in Energy Research*, 9, 2021.
37. Olabi, A. G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Salameh, T., Sayed, E. T., Husain, K. S., Abdelkareem, M. A., “Selection guidelines for wind energy technologies” *Energies*, 14 (11), 2021.
38. Nazir, M. S., Ali, N., Bilal, M., Iqbal, H. M., “Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective”, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13, s. 85-90, 2020.
39. Schrottenboer, A. H., Veenstra, A. A., uit het Broek, M. A., Ursavas, E., “A green hydrogen energy system: Optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 2022.
40. Tan, J. D., Chang, C. C. W., Bhuiyan, M. A. S., Nisa’Minhad, K., Ali, K., “Advancements of wind energy conversion systems for low-wind urban environments: A review”, *Energy Reports*, 8, s. 3406-3414, 2022.
41. Msigwa, G., Ighalo, J. O., Yap, P. S., “Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives”, *Science of The Total Environment*, 849, 2022.
42. Barthelmie, R. J., Pryor, S. C., “Climate change mitigation potential of wind energy”, *Climate*, 9 (9), 136, 2021.
43. Summerfield-Ryan, O., Park, S., “The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures”, *Ecological Economics*, 210, 2023.

44. Sadorsky, P., “Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook”, *Journal of Cleaner Production*, 289, 2021.
45. Garcia Marquez, F. P., Peinado Gonzalo, A., “A comprehensive review of artificial intelligence and wind energy”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29 (5), s. 2935-2958, 2022.
46. Zhao, C., Wu, Y., Dai, X., Han, J., Dong, B., Huang, L. B., “Calliopsis structure-based triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and self-powered wind speed/direction sensor”, *Materials & Design*, 221, 2022.
47. Wolniak, R., Skotnicka-Zasadzień, B., “Development of wind energy in EU countries as an alternative resource to fossil fuels in the years 2016-2022”, *Resources*, 12 (8), 96, 2023.
48. Yildirim, A., “The technical and economical feasibility study of offshore wind farms in Turkey”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25 (1), 125-142, 2023.
49. Yildiz, S. S., “Determining wind energy potential using geographic information system functions: A case study in Balıkesir, Turkey”, *Applied Sciences*, 13 (16), 2023.
50. Ozturk, S., Karipoglu, F., “Investigation of the best possible methods for wind turbine blade waste management by using GIS and FAHP: Turkey case”, *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (6), s. 15020-15033, 2023.
51. Büyüközkan, G., Karabulut, Y., Göçer, F., “Spherical fuzzy sets based integrated DEMATEL, ANP, VIKOR approach and its application for renewable energy selection in Turkey”, *Applied Soft Computing*, 158, 2024.
52. Sarma, N., Tuohy, P. M., Özgönenel, O., Djurović, S., “Early life failure modes and downtime analysis of onshore type-III wind turbines in Turkey”, *Electric Power Systems Research*, 216, 2023.
53. Yilmaz, I., “A hybrid DEA–fuzzy COPRAS approach to the evaluation of renewable energy: A case of wind farms in Turkey”, *Sustainability*, 15 (14), 2023.
54. Darwish, A. S., Al-Dabbagh, R., “Wind energy state of the art: present and future technology advancements”, *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 5 (7), 2020.

55. Lydia, M., Selvakumar, A. I., Kumar, S. S., Kumar, G. E. P., “Advanced algorithms for wind turbine power curve modeling”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4 (3), s. 827-835, 2013.
56. Thapar, V., Agnihotri, G., Sethi, V. K., “Critical analysis of methods for mathematical modeling of wind turbines”, *Renewable Energy*, 36, s. 3166-3177, 2011.
57. Yesilbudak, M., “Implementation of novel hybrid approaches for power curve modeling of wind turbines”, *Energy Conversion and Management*, 171, s. 156-169, 2018.
58. Terzioğlu, H., Arslan, M., Demirok, H. D., “Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi”, *Research Articles in Engineering Publisher: Gece Akademi*, s. 219-241, 2019.
59. Üstüntaş, T., Şahin, A. D., “Wind turbine power curve estimation based on cluster center fuzzy logic modeling”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, s. 611-620, 2008.
60. Saint-Drenan, Y. M., Besseau, R., Jansen, M., Staffell, I., Troccoli, A., Dubus, L., Schmidt, J., Gruber, K., Simões, S. G., Heier, S., “A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions”, *Renewable Energy*, 157, s. 754-768, 2020.
61. Pelletier, F., Masson, C., Tahan, A., “Wind turbine power curve modelling using artificial neural network”, *Renewable Energy*, 89, s. 207-214, 2016.
62. Lydia, M., Kumar, S. S., Selvakumar, A. I., Kumar, G. E. P., “A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, s. 452-460, 2014.
63. Villanueva, D. and Feijóo, A. E., “Reformulation of parameters of the logistic function applied to power curves of wind turbines”, *Electric Power Systems Research*, 137, s. 51-58, 2016.
64. Shokrzadeh, S., Jozani, M. J., Bibeau, E., “Wind turbine power curve modeling using advanced parametric and nonparametric methods”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5 (4), s. 1262-1269, 2014.
65. Goudarzi, A., Davidson, I. E., Ahmadi, A., Venayagamoorthy, G. K., “Intelligent analysis of wind turbine power curve models”, *IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG)*, s. 1-5, 2014.

66. Long, V, Wang, L., Zhang, Z., Song, Z., Xu, J., “Data-driven wind turbine power generation performance monitoring”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (10), s. 6627-6635, 2015.
67. Sohoni, V., Gupta, S. C., Nema, R. K., “A comparative analysis of wind speed probability distributions for wind power assessment of four sites”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24 (6), s. 4724-4735, 2016.
68. Marčiukaitis, M., Žutautaitė, I., Martišauskas, L., Jokšas, B., Sfetsos, A., “Non-linear regression model for wind turbine power curve”, *Renewable Energy*, 113, s. 732-741, 2017.
69. Zou, R., Yang, J., Wang, Y., Liu, F., Essaaidi M., Srinivasan D., “Wind turbine power curve modeling using an asymmetric error characteristic-based loss function and a hybrid intelligent optimizer”, *Applied Energy*, 304, s. 1-23, 2021.
70. Taslimi-Renani, E., Modiri-Delshad, M., Elias, M. F. M., Rahim, N. A., “Development of an enhanced parametric model for wind turbine power curve”, *Applied Energy*, 177, s. 544-552, 2016.
71. Seo, S., Oh, S. D., Kwak, H. Y., “Wind turbine power curve modeling using maximum likelihood estimation method”, *Renewable Energy*, 136, s. 1164-1169, 2019.
72. Wadhvani, R., Shukla, S., “Analysis of parametric and non-parametric regression techniques to model the wind turbine power curve”, *Wind Engineering*, 43, s. 225-232, 2019.
73. Wei, D., Wang, J., Li Z., Wang, R., “Wind power curve modeling with hybrid copula and grey wolf optimization”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 13, s. 265-276, 2022.
74. Wang, Y., Hu, Q., Srinivasan, D., Wang, Z., “Wind power curve modeling and wind power forecasting with inconsistent data”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10 (1), s. 16-25, 2019.
75. Sohoni, V., Gupta, S. C., Nema, R. K., “A critical review on wind turbine power curve modelling techniques and their applications in wind based energy systems”, *Journal of Energy*, 2016, 2016.
76. Wang, Y., Hu, Q., Li, L., Foley, A. M., Srinivasan, D., “Approaches to wind power curve modeling: A review and discussion”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 2019.

77. Rogers, T., Gardner, P., Dervilis, N., Worden, K., Maguire, A., Papatheou, E., Cross, E., “Probabilistic modelling of wind turbine power curves with application of heteroscedastic Gaussian Process regression”, *Renewable Energy*, 148, s. 1124-1136, 2020.
78. Xie, H., Zhou, Q., Zhong, S., Xi, Z., Wang, H., “Data Cleaning and Modeling of Wind Power Curves”, *10th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE)*, s. 188-193, 2023.
79. Wang, Z., Wang, X., Liu, W., “Genetic least square estimation approach to wind power curve modelling and wind power prediction”, *Scientific Reports*, 13 (1), 2023.
80. Raj, M. M., Alexander, M., Lydia, M., “Modeling of wind turbine power curve”, *ISGT 2011*, s. 144-148, 2011.
81. Chang, T. P., Liu, F. J., Ko, H. H., Cheng, S. P., Kuo, S. C., “Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor”, *Energy*, 73, s. 88-95, 2014.
82. Pei, S., Li, Y., “Wind turbine power curve modeling with a hybrid machine learning technique,” *Applied Sciences*, 9 (22), s. 1-18, 2019.
83. Saxena, B. K., Rao, K. V. S., “Comparison of Weibull parameters computation methods and analytical estimation of wind turbine capacity factor using polynomial power curve model: Case study of a wind farm”, *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2 (3), 2015.
84. Fahmy, M. S. E., Ahmed, F., Durani, F., Bojnec, Š., Ghareeb, M. M., “Predicting Electricity Consumption in the Kingdom of Saudi Arabia”, *Energies*, 16 (1), 506, 2023.
85. Ravindran, A., Reklaitis, G. V., Ragsdell, K. M., “Engineering optimization: Methods and applications”, 2nd Edition, *John Wiley & Sons Publication*, s. 1-31, New Jersey, 2006.
86. Rao, S. S., “Engineering optimization: Theory and practice”, 4th Edition, *John Wiley & Sons Publication*, s. 1-36, 693-755, New Jersey, 2009.
87. Venkataraman, P., “Applied optimization with Matlab programming”, *John Wiley & Sons Publication*, s. 1-25, New York, 2002.
88. Talib, E., “Metaheuristics from design to implementation”, *John Wiley & Sons Publication*, s. 1-50, New Jersey, 2009.

89. Karaboğa, D., “Yapay zeka optimizasyon algoritmaları”, *Nobel Akademik Yayıncılık*, s. 1-20, Ankara, 2011.
90. Deb, K., “Optimization for engineering design: Algorithms and examples”, 2nd Edition, *PHI Learning Pvt. Ltd.*, s. 1-35, New Delhi, 2012.
91. Martins, J. R., Ning, A., “Engineering design optimization”, *Cambridge University Press*, s. 1-30, New York, 2021.
92. Aggarwal, C. C., Aggarwal, L. F., Lagerstrom-Fife, “Linear algebra and optimization for machine learning”, 1st Edition, *Springer International Publishing*, s. 1-40, 255-297, Cham, 2020.
93. Alataş, B., “Kaotik haritalı parçacık sürü optimizasyonu algoritmaları geliştirme”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, s.1-5, Elazığ, 2007.
94. Sağlıyan, Ö., “Türkiye’nin aylık elektrik enerjisi tüketim verilerinin karınca aslanı optimizasyon algoritması kullanılarak modellenmesi”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 13-23, Nevşehir, 2019.
95. Yang, X. S., “Metaheuristic optimization: Algorithm analysis and open problems”, *International Symposium on Experimental Algorithms*, s. 21-32, Berlin, 2011.
96. Wong, W., Ming, C. I., “A review on Metaheuristic algorithms: Recent trends, benchmarking and applications”, *7th International Conference on Smart Computing & Communications (ICSCC)*, s. 1-5, Malezya, 2019.
97. Gandomi, A. H., Yang, X. S., Talatahari, S., Alavi A. H., “Metaheuristic algorithms in modeling and optimization”, 1st Edition, *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*, s. 1-24, Waltham, 2013.
98. Ayan, S. “Sezgisel optimizasyon algoritması kullanılarak hibrit (fotovoltaik-rüzgâr) enerji sistemi için boyut optimizasyonu”, *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 47-52, Kırklareli, 2019.
99. Abbasi, B., Majidnezhad, V., Mirjalili, S., “ADE: Advanced differential evolution”, *Neural Computing and Applications*, s. 1-32, 2024.
100. Adetunji, K. E., Hofsajer, I. W., Abu-Mahfouz, A. M., Cheng, L., “A review of metaheuristic techniques for optimal integration of electrical units in distribution networks”, *IEEE Access*, 9, s. 5046-5068, 2020.

101. Çelik, Y., Yıldız, İ., Karadeniz, A. T., “Son üç yılda geliştirilen metasezgisel algoritmalar hakkında kısa bir inceleme”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Özel Sayı*, s. 463-477, 2019.
102. Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F. S., Mirjalili, S., “African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems”, *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107408, s. 1-37, 2021.
103. Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., Mirjalili, S., “Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization”, *Future Generation Computer Systems*, 111, s. 300-323, 2020.
104. Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., Gandomi, A. H., “Marine predators algorithm: A nature-inspired metaheuristic”, *Expert Systems with Applications*, 152, 113377, s. 1-28, 2020.
105. Hashim, F. A., Mostafa, R. R., Hussien, A. G., Mirjalili, S., Sallam, K.M., “Fick’s law algorithm: A physical law-based algorithm for numerical optimization”, *Knowledge-Based Systems*, 260, s. 1-22, 2023.
106. Rezaei, F., Safavi, H. R., Abd Elaziz, M., Mirjalili, S., “GMO: Geometric mean optimizer for solving engineering problems”, *Soft Computing*, 27 (15), s. 10571-10606, 2023.
107. İnternet: Open Platform for French Public Data & ENGIE, <https://opendata-renewables.engie.com/explore/?sort=modified>.
108. Yesilbudak, M., “A novel power curve modeling framework for wind turbines”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 19 (3), 29-40, 2019.