ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PI, PID, GA-PID VE BA-PID KONTROLÖR ILE RÜZGÂR TÜRBİNİN KANAT HATVE AÇISI KONTROLÜ

İsmail MOHAMED SOUGUEH

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇANKIRI
2022

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Ismail MOHAMED SOUGUEH tarafından hazırlanan **"PI, PID, GA-PID ve BA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü"** adlı tez çalışması 25/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **:** Dr. Öğr. Üyesi Göksu GÖREL

Jüri Üyeleri **:**

Başkan **:** Doç. Dr. Fatih KORKMAZ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye **:** Doç. Dr. Hayati MAMUR
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Üye **:** Dr. Öğr. Üyesi Göksu GÖREL
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum "**PI, PID, GA-PID ve BA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü**" konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan "Bilimsel İntihal Tespit Programı"yla tarandığını, "intihal içermediğini" beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (25/07/2022).

Ismail MOHAMED SOUGUEH

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PI, PID, GA-PID VE BA-PID KONTROLÖR ILE RÜZGÂR TÜRBİNİN KANAT HATVE AÇISI KONTROLÜ

İsmail MOHAMED SOUGUEH

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Göksu GÖREL

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji piyasasındaki payı yükseliş içerisindedir. Bu kaynakların en önemlisi ise rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr hızına bağlı olarak rüzgâr türbin hız kontrolü önemli kontrol parametresidir. Bu hız parametresinin yüksek rüzgâr hızlarında türbin ve diğer önemli parçalara zarar vermemesi için denetim altında tutulması gerekmektedir. Bu tezinde, PI (Oransal Integral), PID (Oransal Integral Türev), GA-PID (Genetik Algoritma-Oransal Integral Türev) ve BA-PID (Bakteriyel Algoritma-Oransal Integral Türev) kontrolör ile bir rüzgâr türbinin hatve açısını kontrol etmek için bir modelleme yapılmıştır. Yüksek rüzgâr hızlarında enerji sistemine zarar verilmemesi ve değişken rüzgâr hızının çıkış gücüne etkisinin kabul edilebilir ölçülerde kalmasını sağlamak PI, PID, GA-PID ve BA-PID kontrolör yöntemi kullanılmıştır. Çıkış gücünün sabit tutulması hedeflenmiştir. Matlab/Simulink programında simülasyon olarak rüzgâr türbini modellenmiştir. Bu çalışmada çıkış gücünü noktası (500 KW) GA-PID ve BA-PID kontrolörün uygulanmasıyla daha optimum seviyede kalması sağlanmıştır.

2022, 124 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Bakteriyel algoritma, Genetik algoritma, Optimizasyon, Rüzgâr türbini

ABSTRACT

Master of Science Thesis

PITCH ANGLE CONTROL OF WIND TURBINE WITH PI, PID, GA-PID, AND BA-PID CONTROLLER

Ismail Mohamed Sougueh

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Science in Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Göksu GÖREL

Today, the share of renewable energy sources in the energy market is on the rise. The most important of these resources is wind energy. Depending on the wind speed, wind turbine speed control is an important control parameter. This speed parameter should be kept under control in order not to damage the turbine and other important parts at high wind speeds. In this study, a modeling has been made to control the pitch angle of a wind turbine with PI (Proportional Integral), PID (Proportional Integral Derivative), GA-PID (Genetic Algorithm-Proportional Integral Derivative), and BA-PID (Bacterial Algorithm-Proportional Integral Derivative) controllers. PI, PID, GA-PID, and BA-PID controller methods are used to ensure that the energy system is not damaged at high wind speeds and the effect of variable wind speed on output power remains acceptable. It is aimed to keep the output power constant. The wind turbine was modeled as a simulation in the Matlab/Simulink program. In this study, the output power point (500 KW) is kept at a more optimum level by applying the GA-PID, and BA-PID controller.

2022, 124 pages

Keywords: Bacterial algorithm, Genetic algorithm, Optimization, Wind turbine

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Her şeyden önce esirgemeyen tez danışmanım Dr. Doktor Öğretim Üyesi Göksu Görel bana yüksek lisans öğrencisi olma fırsatı ve zamanı verdiği için teşekkür ederim. Ondan bilimsel ve pratik açıdan çok şey öğrendim. Cömert zaman ayırdığı, cesaretlendirme ve rehberlikle desteği için de kendisine teşekkür ederim. Sevgili annem ve ailem bana desteklendiği için teşekkürlerim sunarım. Son olarak, Çankırı Karatekin Üniversitesi'ne ve tüm hocalarına özellikle Doktor Öğretim Üyesi Zafer Civelek, bu değerli tezin tamamlanmasında emeği geçen herkese çok teşekkür ederim.

Ismail MOHAMED SOUGUEH

Çankırı, Temmuz 2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**

ABSTRACT ..... **ii**

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... **iii**

İÇİNDEKİLER ..... **iv**

SİMGELER DİZİNİ ..... **vii**

KISALTMALAR DİZİNİ ..... **viii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiii**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Tezin Amacı **3**

1.2 LİTERATÜR TARAMASI **3**

2 RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİ **19**

2.1 Rüzgâr Enerjisinin Tanımı **19**

2.2 Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi **20**

2.3 Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları **22**

2.3.1 Rüzgâr enerjisinin avantajları **22**

2.3.2 Rüzgâr enerjisinin dezavantajları **23**

2.4 Rüzgâr Türbini Çeşitleri **24**

2.4.1 Karasal rüzgâr türbini **24**

2.4.2 Açık deniz rüzgâr enerjisi **25**

2.4.3 Sabit veya değişken hızlı rüzgâr türbini **25**

2.5 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması **27**

2.5.1 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri **27**

2.5.2 Dikey eksenli rüzgâr türbinleri **32**

2.5.3 Eğik eksenli rüzgâr türbinleri **33**

2.6 Rüzgâr Türbini Hatve Kontrol Optimizasyonu **34**

2.6.1 Optimizasyonun tarihçesi **34**

2.6.2 Optimizasyon yöntemleri **36**

2.6.3 Optimizasyon yöntemi seçimi **45**

3 MATERYAL VE YÖNTEM **47**

3.1 Rüzgâr Türbinin Bileşenleri **47**

3.1.1 Rotor **48**
3.1.2 Kule **48**
3.1.3 Nasel **48**
3.2 Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler **49**
3.2.1 Asenkron jeneratörler (AJ) **50**
3.2.2 Çift beslemeli asenkron jeneratörler (ÇBAJ) **50**
3.2.3 Doğru akım jeneratörleri (DAJ) **51**
3.2.4 Senkron jeneratörler (SJ) **51**
3.2.5 Sincap kafesli asenkron jeneratörler (SKAJ) **55**
3.3 Rüzgâr Enerji Sistemin Bütün Denklemleri **56**
3.3.1 Rüzgâr türbinin güç katsayısı **57**
3.3.2 Aerodinamik tork **59**
3.3.3 Rüzgâr türbinleri çalışma bölgeleri **59**
3.4 Rüzgâr Türbini Kontrolörü **60**
3.4.1 PI ve PID kontrolör tasarım **61**
3.4.2 PI ve PID kontrolörlerinin transfer fonksiyonları **63**
3.4.3 Rüzgâr türbini kontrolörü optimizasyonu **64**
3.5 Rüzgâr Enerji Sistemin Matlab Ortamında Modellenmesi **71**
3.5.1 Rüzgâr türbini modeli ve jeneratör modeli **71**
4 BULGULAR VE TARTIŞMA **73**
4.1 Matlab Simülasyon Sonuçları **73**
4.1.1 PI kontrolör **73**
4.1.2 PID kontrolör **79**
4.1.3 GA-PID kontrolör **85**
4.1.4 BA-PID kontrolör **91**
4.2 Tartışma **99**
4.2.1 Rampa fonksiyonu **99**
4.2.2 Basmak fonksiyonu **106**
4.2.3 Değişken rüzgâr hız fonksiyonu **107**
5 SONUÇ VE ÖNERİ **109**
KAYNAKLAR **110**
EKLER **118**

ÖZGEÇMİŞ.....124

SİMGELER DİZİNİ

A	Pervane süpürme alanı (Propeller sweep area)
β	Kanat hatve açısı (Pitch angle)
C_p	Türbin güç katsayısı (Power factor)
CO_2	Karbon dioksit (Carbon dioxide)
°C	Sıcaklık ünitesi (The unite oftemperature)
θ	Elektriksel konum
Iq / Id	Jeneratör eksenli akım (Generator axis current)
Kd	Türev kazanç (Derivative gain)
Ki	Integral kazanç (Integral gain)
Kp	Oransal kazanç (Proportional gain)
λ_m	Mıknatıs akısı (Magnet flux)
λ	Uç hızı oranı (Tip speed ratio)
NO_x	Azot Oksitler (Nitrogen Oxides)
Ω	Türbin rotoru açısal hız (Turbine rotor angular velocity)
P	Rüzgârın kinetik gücü (Kinetic power of the wind)
P_m	Rüzgâr türbinin mekanık gücü (Output wind power)
P_p	Jeneratör kutup çifti (Generator pole pair)
R	Rüzgâr türbininin rotorunun yarıçapı (radius of the rotor of the wind turbine)
ρ	Havanın yoğunluğu (Density of air)
SO_2	Kükürt Dioksit (Sulfur Dioxide)
T_g	Jeneratör momenti (Generator torque)
V	Rüzgâr hızı (Wind speed)
Vq / Vd	Jeneratör eksenli gerilim (Generator axis voltage)

KISALTMALAR DİZİNİ

AA/DA	Alternatif Akım Doğru Akım dönüştürücü (Alternating Current Direct Current Rectifier)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri (United States of America)
ACO	Karınca kolonisi optimizasyonu (Ant Colony Optimization)
ASSJ	Alan Sargılı Senkron Jeneratör (Field Winding Synchronous Generator)
BA	Bakteriyel toplayıcılık optimizasyon algoritması (Bacterial Foraging Optimization Algorithm)
CSO	Kedi sürüsü optimizasyonu (Cat swarm optimization)
ÇBAJ	Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör (Double Feed Induction Generators)
DA/AA	Doğru Akım Alternatif Akım çevirici (Inverter)
DA/DA	Doğru Akım doğrultucuyu
DC	Doğru Akım
DERT	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (Vertical Axis Wind Turbines)
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
GA	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
GSO	Kızdırma Solucanı Sürü Optimizasyonu (Glow-worm Swarm Optimization)
GW	Gigawatt
IAE	Mutlak Hatanın toplamı (Integral Absolute Error)
ISE	Hata Karelerinin toplamı (Integral Squared Error)
ITAE	Zaman ağırlıklı Mutlak Hatanın toplamı (Integral Time-weighted Absolute Error)
ITSE	Zaman ağırlıklı Hata Karelerinin toplamı (Integral Time-weighted Squared Error)
MÖ	Milattan önce (Before Christ)
MPPT	Maksimum güç noktası takibi (Maximum power point tracking)
PÇ	Popülasyon çaprazlamanın (Population crossover)
PI	Oransal Integral (Proportional Integral)
PID	Oransal Integral Türev (Proportional Integral Derivative)
PM	Popülasyon mutasyonun (Population mutation)
PSO	Parçacık sürüsü optimizasyonu (Particle swarm optimization)
RTD	Rotor tarafındaki dönüştürücü
SKAJ	Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör (Squirrel Cage Induction Generator)
SMSJ	Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör (Permanent Magnet Synchronous Generator)
ŞTD	Şebeke tarafı dönüştürücü

YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbines)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Rüzgâr enerjisine genel görüntü 20
Şekil 2.2 Rüzgâr enerjisiyle çalışan bir değirmenin temsili resmi 21
Şekil 2.3 Karasal rüzgâr türbini 25
Şekil 2.4 Açık deniz rüzgâr türbinleri 25
Şekil 2.5 Yatay eksenli rüzgâr türbini 27
Şekil 2.6 Kanatlara göre rüzgâr türbini türleri 30
Şekil 2.7 Rüzgârı arkadan ve önden alan rüzgâr türbini 32
Şekil 2.8 Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (A) Darrius (B) Savanius (C) Solarwind (D) Helical (E) Noguchi (F) Maglev (G) Cochrane (Tong 2010) 33
Şekil 2.9 Eğik eksenli rüzgâr türbinleri 34
Şekil 2.10 Optimize edilmesi gereken sistemleri 36
Şekil 2.11 Genetik algoritmasının akış şeması 40
Şekil 2.12 Balık sürüsünün şeması 41
Şekil 2.13 Bakteriyel algoritmanın akış şeması 45
Şekil 3.1 Rüzgâr türbininin bileşenleri 47
Şekil 3.2 ÇBAJ rüzgâr türbin sistemi modeli 51
Şekil 3.3 Değişken hızlı alan sargılı senkron jeneratör 52
Şekil 3.4 Sürekli mıknatıslı senkron jeneratör yapısı 54
Şekil 3.5 Sürekli mıknatıslı senkron jeneratör farklı yapısı 54
Şekil 3.6 Sincap kafesli asenkron jeneratör (SKAJ) 56
Şekil 3.7 Rüzgâr hız-kontrolsüz çıkış gücü eğrisi 57
Şekil 3.8 C_P- λ eğrisi 57
Şekil 3.9 Farklı β değerleri için Cp-λ grafiği 59
Şekil 3.10 Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri 60
Şekil 3.11 Rüzgâr enerjisinin sınırı 61
Şekil 3.12 PI ve PID kontrolör açık döngü katsayıları L ve T eğrisi 62
Şekil 3.13 PI kontrolörün transfer fonksiyonu 63
Şekil 3.14 PID kontrolörün transfer fonksiyonu 64
Şekil 3.15 Genetik algoritma programı 65
Şekil 3.16 ITAE'nin genetik algoritma ile modellenmesi 65
Şekil 3.17 ITAE hata sinyalinin değeri 66
Şekil 3.18 Optimizasyon aracı 66
Şekil 3.19 Genetik algorıtmasi optimizasyonun seçeneği 67
Şekil 3.20 Bakteriyel algoritmasın programı 70
Şekil 3.21 Düzeltmek gereken hata sinyali ıse değeri 70
Şekil 3.22 Rüzgâr türbini sisteminin genel görünümü 71
Şekil 4.1 Rampa fonksiyonu ile rüzgâr hız modellemesi 73
Şekil 4.2 Hata sinyalindeki değişimin grafiği 74
Şekil 4.3 Hatve açısı değişim grafiği 74

Şekil 4.4 Çıkış gücü değişim grafiği 75
Şekil 4.5 Basamak fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi 75
Şekil 4.6 Hata sinyalindeki değişimin grafiği 76
Şekil 4.7 Hatve açısı değişim grafiği 76
Şekil 4.8 Çıkış gücü değişim grafiği 77
Şekil 4.9 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi 78
Şekil 4.10 Hata sinyalindeki değişimin grafiği 78
Şekil 4.11 Hatve açısı değişim grafiği 78
Şekil 4.12 Çıkış gücü değişim grafiği 79
Şekil 4.13 Rampa fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi 80
Şekil 4.14 Hata sinyali değişim grafiği 80
Şekil 4.15 Hatve açısı değişim grafiği 81
Şekil 4.16 Çıkış gücü değişim grafiği 81
Şekil 4.17 Basmak fonksiyonu ile rüzgâr hız modellemesi 82
Şekil 4.18 Hata sinyalindeki değişimin grafiği 82
Şekil 4.19 Hatve açısı değişim grafiği 83
Şekil 4.20 Çıkış gücü değişim grafiği 83
Şekil 4.21 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi 84
Şekil 4.22 Hata sinyalinin değişim grafiği 84
Şekil 4.23 Hatve açısı değişim grafiği 84
Şekil 4.24 Çıkış gücü değişim grafiği 85
Şekil 4.25 Rampa fonksiyonu ile rüzgâr hız modellemesi 86
Şekil 4.26 Hata sinyalinin değişim grafiği 86
Şekil 4.27 Hatve açısı değişim grafiği 87
Şekil 4.28 Çıkış gücü değişim grafiği 87
Şekil 4.29 Basmak fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi 88
Şekil 4.30 Hata sinyalinin değişimin grafiği 88
Şekil 4.31 Hatve açısı değişim grafiği 89
Şekil 4.32 Çıkış gücü eğrisi 89
Şekil 4.33 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi 90
Şekil 4.34 Hata sinyali değişim grafiği 90
Şekil 4.35 Hatve açısı değişim grafiği 90
Şekil 4.36 Çıkış gücü değişim grafiği 91
Şekil 4.37 Rüzgâr hızı modellemesi 92
Şekil 4.38 Hata sinyali değişim grafiği 92
Şekil 4.39 Hatve açısı değişim grafiği 92
Şekil 4.40 Çıkış gücü değişim grafiği 93
Şekil 4.41 Basmak fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi 94
Şekil 4.42 Hata sinyali değişim grafiği 94
Şekil 4.43 Hatve açısı değişim grafiği 94
Şekil 4.44 Çıkış gücü değişim grafiği 95
Şekil 4.45 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi 95

Şekil 4.46 Hata sinyali değişim grafiği 96
Şekil 4.47 Hatve açısı değişim grafiği 96
Şekil 4.48 Çıkış gücü değişim grafiği 97
Şekil 4.49 Rüzgâr türbin açısal hız 98
Şekil 4.50 Jeneratör açısal hız 98
Şekil 4.51 Jeneratörün iki faz arasında gerilim eğrisi 98
Şekil 4.52 Jeneratörden çıkış üç faz gerilimi eğrisi 99
Şekil 4.53 PI ve PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması 100
Şekil 4.54 PI ve GA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması 101
Şekil 4.55 PI ve BA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması 102
Şekil 4.56 PID ve GA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması 103
Şekil 4.57 PID ve BA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması 104
Şekil 4.58 GA-PID ve BA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması 105
Şekil 4.59 Çıkış güçleri karşılaştırılmasın grafiği 106
Şekil 4.60 Çıkış güçleri karşılaştırılması 107
Şekil 4.61 Çıkış güçleri karşılaştırılması 108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Değişken ve sabit hızlı rüzgâr türbinin avantajları ve dezavantajları 26
Çizelge 3.1 PI ve PID açık döngü katsayıları hesaplanması 62
Çizelge 3.2 PI ve PID kapalı döngü katsayıların hesaplanması 63
Çizelge 3.3 Genetik algoritmalarda kullanılan parametreler 69
Çizelge 3.4 BA-PID kontrolörün parametreleri 71
Çizelge 4.1 Kontrolörlerin katsayıları 99

1 GİRİŞ

Ülkelerin kalkınmasına elektrik enerjisi büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç, küresel nüfus artışı ve teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak daha da artmıştır. Tarım ve sulama hızla modernleşen iki sektördür. Dünyada iki tür elektrik enerjisi vardır: yenilenebilir ve yenilenemeyen. Mevcut olanlar pahalı ve çevreye zararlı olduğu için yeni bir elektrik enerjisi kaynağı keşfedilmiştir. Birçok ülke, fosil kaynakların tükenmesinin bir sonucu olarak elektrik enerjisi arz ve talebi arasındaki dengeyi korumak için mücadele etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal vb. bulunmaktadır. Eski kaynaklar gibi tükenmez ve çevreye zararlı değildir (sera gazı). Yenilenebilir enerji arzı sonsuz ve doğaldır. Yenilenebilir enerji kaynakları küresel ölçekte giderek daha yaygın enerji kaynakları olarak kabul görmektedir. Çeşitli nedenler, özellikle elektrik sektöründe bu kaynakların hızla yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur (Alakour 2020).

2015 yılında eklenmesi beklenen 147 GigaWatt (GW) ile yenilenebilir enerji üretim kapasitesi benzersiz bir oranda artmıştır. Güneş ve rüzgâr, her ikisi de bol miktarda bulunduğu için enerji üretiminde kullanılmaktadır. Bu nedenle iklim değişikliği ve doğanın öngörülemezliği, güneş ve rüzgâr enerjisinin güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. En hızlı büyüme oranına sahip yenilenebilir enerji kaynağı rüzgâr enerjisidir. Son yıllarda rüzgâr enerjisi üretimi on katına çıkmıştır. Elektrik mühendisliği alanındaki araştırmacılar, rüzgâr türbinlerinin yaygın kullanımı sonucunda rüzgâr enerjisi sistemlerinin etkinliğini ve ürettikleri enerjinin kalibresini artırmanın yollarını aramaktadır (Almaz 2020).

İki tür rüzgâr türbini vardır: sabit hızlı rüzgâr türbinleri ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri. İlk olarak sabit hızlı rüzgâr türbinleri açıklanmıştır. Sabit hızlı rüzgâr türbini, şebekede yüksek oranda dalgalanan güç üreterek sistemi bozar. Bu tür bir türbin ayrıca yüksek mekanik gerilimleri absorbe etmek için sağlam bir mekanik tasarım gerektirmektedir. Diğer yandan, jeneratörün genellikle bir elektronik güç dönüştürücüsü ile donatıldığı ve daha sonra şebekeye bağlandığı değişken hızlı rüzgâr türbinleri de

bulunmaktadır. İkinci sistemin birincisine göre daha iyi MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) performansı, üretim ve şebeke frekansı arasında güvenilir bir dekuplaj sistemi, kontrol ve optimum çalışma açısından ikisi arasında iyi bir esneklik ve daha düşük maliyetle mekanik stresi kontrol etmede daha iyi etkinlik gibi bir dizi avantajı vardır. Bu faktörler, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin bugün pazardaki hâkimiyetini ve yaygın kullanımını açıklamaktadır (Terzioğlu *et al.* 2019).

Jeneratör tipleriyle ilgili olarak, sabit veya değişken hızlı rüzgâr enerjisi sistemleri çok çeşitli elektrik jeneratörleri kullanılmaktadır. Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör (SKAJ), Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör (SMSJ) ve elektronik AC-AC güç dönüştürücülü Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör (ÇBAJ) burada ele alınan rüzgâr sektöründeki üç teknolojidir. Özellikle asenkron jeneratör sistemleri, modellemedeki basitlikleri, güvenilirlikleri ve son derece yüksek rüzgâr hızlarında en fazla gücü üretme kabiliyetleri gibi çeşitli faktörler nedeniyle daha sık kullanılmaktadır. Ek olarak, rotor akımlarının bağımsız kontrolü ile aktif ve reaktif güç kontrolleri tamamen ayrılmıştır (Courbois 2013).

Literatürde bildirildiği üzere, son zamanlarda birçok çalışma değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kontrolüne odaklanmıştır. Jeneratör torkunu kontrol etmek için bu araştırmalarda ilk olarak oransal integral (PI) kontrolör gibi geleneksel kontrolörler kullanılmıştır. Üretilen gücü maksimize etmek için bu araştırmalar bulanık mantık kontrolörleri, PID-bulanık mantık kontrolörleri gibi bazı çağdaş kontrolörler kullanılarak sürdürülmüştür (Civelek *et al.* 2016).s

Doğru kontrolör ayarlarını bulmak zor olabilir çünkü kontrolün amacı rüzgâr türbininden mümkün olan maksimum gücü elde etmektir. Optimizasyon zorluklarının üstesinden gelmek için meta sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılabilmektedir. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), bakteriyel arama algoritmaları (BA) ve genetik algoritmalar (GA) bu yöntemlerden bazılarıdır (Leithead and Connor 2000).

Bu tezde, değişken bir rüzgâr türbini incelenmiştir. Jeneratör olarak sabit mıknatıslı senkron jeneratör kullanılmıştır (SMSJ). Sistemi kontrol etmek için ilk olarak

geleneksel PI ve PID kontrolörleri kullanılmıştır. Kontrolörler daha sonra genetik ve bakteriyel algoritmalar kullanılarak optimize edilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, değişken hızlı bir rüzgâr türbininin çıkış gücünü sabit tutmaktır. Güç çıkışının sürekli ve hatasız olması gerektiğinden, PI ve PID kontrolörlerinin katsayılarını belirlemek için Nichols-Ziegler yöntemi kullanılacaktır. Sistem, PI ve PID kontrolör katsayılarını ayarlamak için genetik ve bakteriyel algoritmalar kullanılarak optimize edilecektir. Optimum PID kontrolör katsayıları (Kp_{opt} , Ki_{opt} ve Kd_{opt}) bakteriyel ve genetik algoritmalar ile belirlenecektir.

1.2 LİTERATÜR TARAMASI

Rüzgâr enerjisi, fosil yakıt olmayan temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Hava kirliliğine neden olan kirleticiler rüzgâr enerjisi santrallerinde bulunmaz. Bu tür emisyonlar geleneksel enerji santrallerinde asit yağmurlarına, küresel ısınmaya ve sera etkilerine katkıda bulunur. Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji sistemleri arasında en uygun maliyetli seçenek olsa da geleneksel enerji santralleriyle rekabet edebilmek için hala çok maliyetlidir. Temel ve kurulum masrafları rüzgâr enerjisi tesislerinin ana sorunudur. Rüzgârın öngörülemezliği de bir başka dezavantajdır. İzole rüzgâr enerjisi sistemleri şebekeye bağlı olmadıklarında kararsızlık ve titreşim sorunları yaşamaktadır. Yeni güç elektroniği teknolojilerinin ilerlemesi ve gelişmesiyle birlikte bu sorunlar çözülmektedir. Çift yönlü güç dönüştürücüler değişken rüzgâr koşullarında sabit gerilim, sabit frekans çıkışları sağlayabilmektedir. Bu tezde, rüzgâr enerji sistemleri elektrik makinaları ve güç elektroniği açısından incelenmiş ve kendinden uyartımlı asenkron jeneratörlü izole sistem gerçekleştirilmiştir (Ünsalver 2008).

Bu çalışmada, bulanık mantık algoritması ile rüzgâr türbininin kanat eğim açısı kontrolörünün PID parametreleri ayarı üzerine bir araştırma sunulmaktadır. Klasik PI, bulanık kontrol ve bulanık PID kontrol gibi üç ayrı kontrol yöntemi kullanılarak

sistemin zararsız tutulması ve nominal çıkış gücünün korunması amaçlanmıştır. Kontrolörlerin Matlab/Simulink programı ile simülasyonu yapılarak farklı rüzgâr hızlarında rüzgâr türbini kanat eğim açısının kontrolü ve çıkış gücünün ayar noktasında sabit tutulması amaçlanmıştır. Simülasyon sonuçlarından elde edilen çıkış gücünün kararlı durum süresi ve kararlı durum hataları değerlendirilerek kontrol sistemlerinin performansları ölçülmüş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda bulanık PID kontrolörün PI ve Bulanık Kontrolörlere göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Civelek 2013)

Son zamanlarda rüzgâr enerjisinin giderek yaygınlaşması nedeniyle, rüzgâr çiftçileri rüzgâr çiftliklerinden giderek artan miktarda enerji üretme eğilimindedir. Hedefe ulaşmak için, birçok rüzgâr çiftliği, sınırlı bir arazi alanında birbirine yakın yerleştirilmiş çok sayıda türbinden oluşan bir yerleşim tasarımıyla işletilmektedir. Bu da "dümen etkisi" nedeniyle daha fazla enerji kaybına yol açmaktadır. Ayrıca, bu türbinlerin topolojik kısıtlamalar, izin verilen minimum kapasite faktörleri, türbinler arası mesafeler, gürültü kısıtlamaları vb. gibi birçok başka kısıtlamayı da karşılaması gerekmektedir. Bu nedenle, tüm kısıtları karşılarken toplam üretilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr türbinlerini bir çiftliğe yerleştirme problemi oldukça kısıtlı ve karmaşıktır. Türbin yerleştirme problemini çözmeye yönelik mevcut yöntemler tipik olarak çiftliğe yerleştirilecek toplam türbin sayısı hakkında bilgi sahibi olunduğunu varsaymaktadır. Ancak gerçekte, rüzgâr santrali geliştiricileri genellikle bir çiftliğe yerleştirilecek en uygun türbin sayısı hakkında çok az bilgiye sahiptir veya hiç bilgiye sahip değildir. Bu çalışma, bir rüzgâr çiftliğine yerleştirilecek türbinlerin optimum toplam sayısını ve optimum konumlarını eşzamanlı olarak belirlemek için yeni bir hibrit optimizasyon metodolojisi önermektedir. Önerilen hibrit metodoloji, olasılıksal genetik algoritmalar ile deterministik gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinin bir kombinasyonudur. Önerilen yöntemin temsili vaka çalışmalarına uygulanması, mevcut yöntemlerden ikisinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlardan daha yüksek yıllık enerji üretimi (AEP) sağlamaktadır (Mittal et al. 2016).

Rüzgâr enerjisi yaklaşık 2000 yıldır insanlık tarafından çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren yel değirmenleri ile

başlayan gelişim süreci, 21. yüzyılda açık deniz rüzgâr türbinleri ile devam etmektedir. Bu çalışmada, açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarım sürecindeki en önemli adım olan uygun yer seçim kriterleri detaylı olarak incelenmiştir. Uygun yer seçiminde kullanılan yöntemler ve mühendislik çözümleri değerlendirilmiştir. WAsP paket programı kullanılarak Kuzey Ege kıyılarındaki Gökçeada, Bozcaada, Çanakkale ve Ayvack bölgeleri için bir uygulama oluşturuldu. Rüzgâr hızı ve potansiyeli, derinlik koşulları, kısıtlı alanlar, deniz ulaşımı ve kablo hatları türbin yerleşiminde belirleyici kriterler olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, Bozcaada ve Gökçeada kıyıları açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun alanlar olarak belirlenmiştir (Tortumluoğlu ve Doğan 2021).

Enerji sektörü genel bir perspektiften incelenerek, günümüzde öne çıkan nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları incelenmiş, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ortaya konulmuştur. Bu inceleme yapılırken enerji-çevre ilişkisi her zaman kapsamlı bir şekilde göz önünde bulundurulmuştur. Rüzgâr enerjisinin ülkemiz için uygun bir kaynak olduğu tespit edilmiş ve potansiyelimizi kullanmamız gerektiği anlatılmıştır. Diğer ülkeler gibi Türkiye ‘de rüzgâr enerjisinin önemini kavramış ve bu alandaki yatırımlarına hız vermiştir. Ülkemiz 2007'den sonra en aktif pazardır. Yeni teknolojilerden bahsediliyor, bir üretim tesisinin elektrik ihtiyacını karşılayacak rüzgâr türbini tasarımı yapılıyor. Maliyetler analiz edilir ve geri ödeme süresi hesaplanır. Rüzgâr ve kanat arasındaki ilişki analiz edilir. Rüzgâr gücünün maksimum kullanımı için kanat profili büyük önem taşımaktadır. Özellikle kanat tasarımı üzerinde durulmuştur. Tasarımı etkileyen faktörler açıklanmıştır. Hücum açısının değiştirilmesinin güç katsayısı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. En uygun kanat yapısı olarak üç kanatlı türbin seçilmiştir. Uç hız oranı 8 olarak seçilmiştir. NACA 4415 kanat profili en çok tercih edilen kanat profillerinden biri olarak seçilmiştir. Tasarım SymLab programı kullanılarak yapılmıştır. Türbinin inşa edilebileceği iki bölge seçilmiştir. Tekirdağ ve Osmaniye bölgeleri karşılaştırıldı. Her iki yatırımın avantajlı yönleri anlatıldı. Osmaniye bölgesi ortalama rüzgâr hızı açısından daha yüksek bir potansiyele sahip olduğu için türbinin bu bölgede kurulması ile üretilen enerjinin Tekirdağ'daki üretim tesisinde kullanılan elektriği dengelemek için satılmasının uygun olacağı sonucuna varıldı. Maliyetler açısından ise Osmaniye bölgesinde kurulacak türbinlerin daha karlı bir yatırım olacağı sonucuna varılmıştır. Tekirdağ'da inşa edilecek türbinlerin

kendini amorti etmesi 12 yıl sürerken, Osmaniye'de inşa edilecek türbinlerin amorti süresi 6 yıla düşmektedir. Günümüzde sermayenin önemi göz önüne alındığında, Osmaniye bölgesinde inşa edilecek türbinler avantajlıdır (Karadağ 2009).

Çeşitli tiplerdeki rüzgâr türbinleri yüzyıllardır enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. İnsanların rüzgâr enerjisinden yararlanma çabaları yel değirmenlerinden günümüzdeki açık denizlere kadar gelişerek devam etmektedir. Çok çeşitli alanlarda yararlandığımız rüzgâr enerjisinden verimli enerji elde edebilmek için kurulacak rüzgâr türbinin mevcut koşullara göre seçilmesi çok önemlidir. Her rüzgâr türbini farklı özelliklere ve kullanım alanlarına sahiptir. Bu çalışmada, bilinen rüzgâr türbinlerin özellikleri analiz edilmiş, avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir (Nurbay ve Çınar 2005).

Rüzgâr enerjisi, teknolojisi ve kullanımı en hızlı gelişme gösteren ve ekonomisi fosil enerji kaynakları ile rekabet edebilir hale gelen en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgârdaki enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere rüzgâr türbini denir. Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, hızlarına, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum yerlerine göre sınıflandırılmaktadır. Rüzgâr türbinleri boyutlarına, rüzgâr yönüne, dönme eksenine ve kurulum yerine göre karşılaştırılır. Rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri ve yeni gelişmeler hakkında da bilgi verilmektedir. Ülkemizin yüksek rüzgâr potansiyeli ve üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin avantajları nedeniyle elektrik üreten kara rüzgâr santrallerinin neredeyse tamamında üç kanatlı rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Ancak üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizde çok yüksek bir offshore potansiyeli olmasına rağmen offshore rüzgâr türbinlerinden elektrik üretimi yaygınlaşmamıştır. Önümüzdeki yıllarda offshore rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşması ile yenilenebilir kaynakların tamamen ülkemizin enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılması sağlanacak, depolama yöntemlerinin de kullanılması ile yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji sürekli hale gelecektir (Elibüyük ve Üçgül 2014).

Optimizasyon yöntemi, belirli bir problem için tüm uygulanabilir seçenekler arasından en uygun çözümü seçmeyi içerir. Optimizasyon içeren durumlar için çok sayıda

algoritma önerilmiştir. Sezgisel algoritmalar, karmaşık optimizasyon problemlerini ideale yakın sonuçlarla makul bir sürede çözebilen algoritmalardır. Genel amaçlı sezgisel optimizasyon algoritmalarını kategorize etmek için altı kategori kullanılır: biyoloji tabanlı, fizik tabanlı, sürü tabanlı, sosyal tabanlı, müzik tabanlı ve kimya tabanlı. Kuşlar, balıklar, kediler ve arılar gibi hayvan sürülerinin eylemleri gözlemlenerek sürü zekâsı tabanlı optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Ateşböceği Algoritması, Ateşböceği Sürüsü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Yapay Balık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması, Bakteriyel Yemleme Optimizasyonu Algoritması ve Kurt Kolonisi Algoritmasının tanıtıldığı bu çalışmada, kedi sürüsü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritmaları daha detaylı olarak incelenmiştir (Akyol ve Alataş 2012).

Çevre konusundaki endişeler nedeniyle, yenilenebilir elektrik enerjisi üretim kaynaklarına büyük ilgi duyulmaktadır ve bunlardan en umut verici olanlardan biri de rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr türbinleri doğrudan elektrik enerjisi üretmek için bu enerji kaynağından yararlanır. Sabit hızlı ve değişken hızlı makineler olmak üzere temelde iki tür rüzgâr türbini vardır. Bu makalenin amacı, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin dinamiklerini araştırmak ve kontrol tasarımı görevini desteklemek için uygun modelleri belirlemektir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin temel ancak yaygın olarak kullanılan bir dinamik gösterimi ve kontrol tesisi dinamiklerinin ilgili modelleri başlangıçta tartışılmaktadır. Daha ayrıntılı, ancak yine de basit modeller, rüzgâr türbini dinamiklerinin tam modelini oluşturmak için birleştirilmeden önce rotor aerodinamiği, tahrik sistemi dinamikleri ve güç üretim birimi dinamikleri için ayrı ayrı türetilmiştir. Elde edilen birleşik model, kontrol tasarımı görevini desteklemenin yanı sıra, temel modellerin rüzgâr türbinini ne ölçüde temsil ettiğinin değerlendirilmesini sağlar. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin temel modellerinin yeterli olmadığı ve kontrol tasarımını desteklemek için gerekli dinamiklerin ilgili tüm yönlerini sergilemediği sonucuna varılmıştır (Leithead and Connor 2000).

Çift beslemeli asenkron jeneratör, farklı rüzgâr rejimlerine ve şebeke arızalarına hızlı tepki verebildiği için rüzgâr enerjisi sistemleri için çok arzu edilen bir alternatiftir. Ancak, karmaşık modeli ve çok sayıda faktörü nedeniyle kontrol edilmesi son derece

zordur. Bu tezde kontrolde kullanılan bazı temel teknikler ve ara adımlar açıklanmaktadır. Daha sonra çift beslemeli indüksiyon jeneratörlerini kontrol etmek için birincil teknikler tartışılmaktadır. Çift beslemeli endüksiyon jeneratörünün statoru genellikle doğrudan şebekeye bağlıdır ve kontrol girişleri bir dönüştürücü aracılığıyla rotordan uygulanır. Bu yapı bu tezde de kullanılmaktadır, ancak geleneksel alan yönlendirmeli kontrolden farklı bir kontrol stratejisi önerilmektedir. Bu farklılık, stator akısı ve torkunun tamamen ayrıştırılmış bir şekilde düzenlenmesidir. Buna ek olarak, bir rüzgâr modeli varsayılmakta ve rüzgâr parametrelerini tahmin etmek için en küçük kareler yaklaşımı kullanılmaktadır. Yaklaşımın arkasındaki temel fikirler açıklanmış ve çift beslemeli bir endüksiyon jeneratörünün simüle edilmiş bir modeline uygulanmıştır. Hem sürekli hem de aralıklı rüzgâr rejimi durumlarında, çift beslemeli asenkron jeneratörün kontrolü sağlanmakta ve rüzgâr kesildikten sonra kullanılabilecek en etkili devreden çıkarma stratejisi incelenmektedir. Bu bağlamda, üç farklı örnek tanımlanmış ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Rüzgârın gösterdiği niteliklere bağlı olarak hangisinin kullanılabileceğine ilişkin öneriler sunulmaktadır. Konuyla ilgilenen akademisyenlerin faydalanabilmesi için tezde kullanılan metodolojiye ait MATLAB kodları ekte sunulmuştur (Kılıçaslan 2015).

Bu çalışmada Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli ve kullanım oranları bölgesel olarak analiz edilmektedir. Ayrıca, Türkiye'deki kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi dünya ortalamaları ile karşılaştırılmaktadır. Türkiye'de rüzgâr enerjisine yönelik hedefler ve bu hedeflere ulaşma durumu değerlendirilmektedir. Türkiye'de ve diğer ülkelerde kullanılan rüzgâr türbinlerinin teknik detayları verilmektedir. Dünya genelinde, özellikle gelişmiş rüzgâr enerjisi sektörüne sahip ülkelerde kurulu rüzgâr türbinleri, Türkiye'de kurulu olanlarla karşılaştırılmakta ve mevcut rüzgâr türbini teknolojileri incelenmektedir. Rüzgâr türbinlerinin genel bir sınıflandırması yapılmakta, türbinleri oluşturan parçalar kısaca ele alınmakta ve elektrik üretimi için kilit makine parçası olan jeneratörler analiz edilmektedir. Modern rüzgâr türbinlerindeki en popüler jeneratörler olan çift beslemeli asenkron jeneratör ve sabit mıknatıslı senkron jeneratör, teknik ve ayırt edici özellikleriyle birlikte ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bu iki jeneratör karşılaştırılmış ve olumlu özellikleri listelenmiştir. Türk büyük güçlü rüzgâr türbini

üreticileri en iyi jeneratör tipini araştırmaktadır. Sonuçlar değerlendirilmiş ve son bölümde bazı öneriler sunulmuştur (Bıldırçin 2018).

Rüzgâr enerjisi santrallerinde senkron, asenkron ve doğru akım jeneratörleri kullanılmaktadır. Sürekli ve güçlü rüzgârın olduğu yerlerde senkron jeneratörler kullanılır. Değişken rüzgâr hızlarında ise asenkron ve doğru akım jeneratörleri kullanılır. Bu makalede rüzgâr enerjisi sistemlerinde en yaygın kullanılan senkron ve asenkron jeneratörler, sabit hızlı rüzgâr türbinleri ve değişken hızlı rüzgâr sistemleri ile birlikte incelenmiştir. Ayrıca, çeşitli rüzgâr türbini jeneratör tiplerinin faydaları ve dezavantajları tanımlanmıştır. Bu makale değişken hız jeneratörlü rüzgâr sistemlerini analiz etmektedir. Rüzgâr türbinlerinde türbin rotoru üzerindeki aerodinamik kuvvetleri azaltmak için belirli eylemlere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, orta ve büyük güçlü rüzgâr türbinleri pasif hız yavaşlatma regülasyonu ve kanat eğim modülasyonunu seçmektedir. Şaft gücü düzenlenerek türbin çıkış gücü maksimize edilir. Bunun için maksimum güç noktası monitörlü sistemlerin kullanılması amaçlanmıştır. Çünkü gücü ölçmek rüzgâr hızını ölçmekten daha kolaydır ve vektör kontrol tasarımı ölçülen güce bağlıdır. Bir rüzgâr enerjisi santralinin verimliliği, bulunduğu bölgedeki rüzgâr modellerine ve türbin tipi için en iyi jeneratörün kullanılmasına göre belirlenir. Hem SKAJ hem de DMSG düşük ve orta güçlü rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılmaktadır. Büyük ölçekli rüzgâr enerjisi kurulumları için hem CGV hem de senkron jeneratörler önerilir. Sistemin giriş ve çıkışındaki akım harmoniklerini azalttığı için DGM tekniğini kullanarak anahtarlama yapabilen sırt sırta gerilim kaynaklı dört bölgeli bir güç dönüştürücü kullanmak tercih edilir. Bu, jeneratörün tork titreşimlerini azaltır ve çıkış gücünün kalitesini artırır. Güç elektroniği alanındaki teknolojik gelişmeler, rüzgâr enerjisi sistemlerinin verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı mümkün kılacaktır (Uyar et al. 2005).

Dünya genelinde her geçen gün daha fazla enerji kullanılıyor. Sonuç olarak, fosil yakıtlar dışındaki kaynakları içeren enerji araştırmaları giderek daha önemli hale geliyor. Artık bu enerji kaynaklarından birinin, her zaman erişilebilir olan ve dünyanın her yerinde bulunan rüzgâr enerjisi olduğunu biliyoruz. Diğer fosil yakıtlarla karşılaştırdığımızda rüzgâr enerjisinin çeşitli faydaları olduğunu görebiliriz. Çevreye zarar vermemesi ve güneş var olduğu sürece her zaman var olacak olması onu

bunlardan en önemlisi haline getiriyor. NACA 4412 ve NACA 65-218 kanatçıkları kullanılarak çağdaş bir 3 kanatlı rüzgâr türbini tasarlamak bu tezin amacıdır. Ardından, belirlenen türbin parametrelerine uygun olarak, SOLIDWORKS programında bükümlü kanat tasarımı oluşturulmuş ve aerodinamik performansı ANSYS WORKBENCH programında çeşitli rüzgâr hücum açıları için kontrol edilmiştir. Fluent programında elde edilen tork değerleri, bulguları değerlendirmek için teorik tork değeriyle karşılaştırılmıştır. Optimizasyon süreçleri ile rüzgâr türbininin verimliliği artırılmıştır (Alakour 2020).

Rüzgâr enerjisi birçok uygulamada kullanılan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi en çok talep gören enerji kaynaklarından biridir. Rüzgâr enerjisinin amacı kinetik enerjiden elektrik üretmektir. Rüzgâr enerjisi elektrik enerjisi üretimi için kullanılır. Birçok ülke yenilenebilir enerjiyi başarıyla kullanmaktadır. Ancak, elektrik enerjisi üretimi için daha fazla enerjiye ihtiyacımız var ve bu enerji üretimi sera gazı etkilerini artırıyor. Sera gazı etkilerini azaltan rüzgâr türbinleri için eğim açısı kontrol sistemini simüle etmek için Simulink modelini tasarladık. Bu tez, yunuslama kontrollü sistemin rüzgâr hızı değişimlerine tepkisini tartışmaktadır. İncelenen yunuslama kontrol sisteminin büyük bir çıkış gücü değişimine ve yerleşme süresine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Pitch fonksiyonu mekanik güç üzerinde tam kontrol sağlar ve değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan en yaygın kontrol tekniğidir. Jeneratörün nominal gücünün altındaki rüzgâr hızlarında, hatve açısı maksimumdadır. Ancak, rüzgâr türbininin daha hızlı hızlanmasına yardımcı olmak için düşürülebilir. Nominal rüzgâr hızında, kanatların açısını azaltarak jeneratörü nominal güçte tutmak için hatve açısı kontrol edilir. Bu tez, MATLAB/SIMULINK'te dinamik modeller geliştirmekte, bunları deneylerle doğrulamakta, rüzgâr koşullarının türbülanslı yapısı sırasında hatve kontrolörünün davranışını araştırmakta ve küçük rüzgâr türbini jeneratörleri için yeni kontroller önermektedir. Önerilen yeni step motor mekanizmasının özellikleri hidrolik aktüatör yerine kullanılacaktır (Ahmad 2017).

Bu makale, rüzgâr türbini kanatlarının eğim açısının kontrolü üzerine bir çalışma sunmaktadır. Bulanık mantık kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Rüzgâr türbini kanadının hatve açısı kontrol edilerek çıkış gücü stabilize edilmiştir. Ayrıca yüksek rüzgâr

hızlarında aerodinamik olarak frenleme yapabilmişlerdir. Bulanık mantık kontrol yöntemi şu nedenle seçilmiştir; Bulanık kontrol, sistem parametrelerindeki değişikliklerden etkilenmez ve doğrusal olmayan sistemler için de uygun bir kontrol yöntemidir. Sonuç olarak, bulanık kontrolör kullanılarak rüzgâr türbini kanat eğim açısı başarılı bir şekilde kontrol edilmiştir. Böylece istenen çıkış gücü kararlılığı ve aerodinamik frenleme başarıyla sağlanmıştır (Civelek et al. 2016).

Enerjinin etkin ve ideal kullanımı açısından, bir rüzgâr türbininden maksimum gücün elde edilmesi önemli bir konudur. Bu çalışmada, şebekeye bağlı bir rüzgâr türbininden mümkün olan en fazla gücü elde etmek için maksimum güç noktası izleme (MGNT) adı verilen bir arama yöntemi oluşturulmuştur. Yaklaşım, kanat ucu hız oranı yöntemine dayanmaktadır. Ek olarak, alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemi hem jeneratör tarafını hem de şebeke tarafını kontrol etmek için kullanılır. Bu yöntem, sabit mıknatıslı senkron jeneratörün belirtilen aktif ve reaktif güç seviyelerini, DC bara voltajını ve jeneratör açısal hızını korumasını sağlar. Bu çalışmada, jeneratör belirlenen rüzgâr hızı için ideal devir sayısında çalıştırılarak halihazırda mevcut olan rüzgâr enerjisi potansiyelinden sonuna kadar yararlanılmıştır (Çiftçi ve Dursun 2017).

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin performans eğrilerini belirlemek için seri ve paralel bağlı 1 boyutlu sistemler MATLAB yazılımında "Double Multiple Streamtube (DMST)" tekniği kullanılarak modellenmiştir. Bu özellikleri oluşturulan modele dahil etmek için, literatürde deneysel olarak incelenmiş simetrik kanatlardan oluşan bir veri tabanı bulunmuştur. Bu kanatların belirli Reynolds sayısı değerleri için deneysel olarak belirlenmiş kaldırma ve sürükleme katsayıları modelin veri tabanında mevcuttur. Literatürde tonlarca deneysel verisi olan ve veri tabanındaki kanatçıklardan faydalanan türbinler ile bir test ve kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Doğrulamanın ardından, pasif akış kontrolünün sistemi nasıl etkileyeceğini görmek için sabit yunuslama açısının performans üzerindeki etkisi araştırıldı. Daha sonra, dinamik kontrolün etkisini görmek ve tezin ana amacını gerçekleştirmek için yunuslama açısının dinamik kontrolü sağlanmış ve sonuçların performans üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Temel kanatlardan elde edilen sonuçların ardından deneysel ve deneysel karakteristiklere sahip yüksek performanslı kanatlar belirlenmiş ve bunların karakteristikleri veri tabanına dahil

edilmiştir. Türbinlerin dinamik kontrolü, test edilmiş ve kalibre edilmiş deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve genel olarak kabul edilebilecek sonuçlar değerlendirilmiştir. Oluşturulan modelle birlikte kullanılmak üzere bir arayüz oluşturulmuştur. Kullanıcılar, istenen türbin özelliklerini seçtikten sonra, türbinin üreteceği tork ve güç hakkında anında genel bir bakış elde edebilirler. Saatler süren CFD analizinden önce bu model kullanılırsa türbin parametrelerinin seçimi daha kolay hale gelecektir. Ek olarak, kanat özelliklerinin deneysel veri setini veri tabanına dahil etmek kolaydır (Almaz 2020).

Son zamanlarda, enerji kıtlığı ve çevresel kaygılar nedeniyle yenilenebilir enerjiye, özellikle de rüzgâr enerjisine büyük önem verilmektedir. Rüzgâr enerjisinin elektrik şebekesine nüfuzu büyük ölçüde arttıkça, rüzgâr türbini sistemlerinin frekans ve gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi giderek daha önemli hale gelmektedir. Rüzgâr türbini rotoru farklı tipte yükler taşır; aerodinamik yükler, yerçekimi yükleri ve santrifüj yükler. Bu yükler kanatlarda yorulmaya ve titreşime neden olarak rotor kanatlarında bozulmaya yol açar. Bu yüklerin üstesinden gelinebilir ve toplanan güç miktarı, bir rüzgâr türbini rotor kanadının hücum açısını rüzgârın içine veya dışına ayarlayacak iyi bir hatve kontrolörü kullanılarak kontrol edilebilir. Her kanat, rotor kanatları boyunca rüzgâr hızının değişmesi nedeniyle farklı yüklere maruz kalır. Bu nedenle, gelecekte kanatların eğimini kontrol etmek için Bireysel Eğim Kontrolü adı verilen bir süreçte bireysel elektrikli sürücüler kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbininin matematiksel bir modeli (hatve kontrol sistemi) geliştirilmiş ve bir PID kontrolörü kullanılarak kontrol edilmiştir. Simülasyon sonuçları, Uyarlanabilir PID kontrolörünün, hatve sisteminin yanı sıra sistemle ilişkili bozuklukları ve belirsiz faktörleri de kontrol ettiği için optimum tepkiye sahip olduğunu göstermektedir (Baburajan and Ismail 2017).

Dünyanın dört bir yanındaki ülkeler yeşil enerjiye önem vermektedir ve rüzgâr sistemleri yenilenebilir enerji sistemleri için hayati bir rol oynayabilir. Bu çalışmada, rüzgâr türbininin gerçek değer modeli formüle edilmiştir. Rüzgâr türbini tarafından yakalanan mekanik tork ve güç de gerçek değerli WT Modeli için doğrulanmıştır. Sabit hatveli rüzgâr tahrikli rüzgâr türbini modeli, sabit mıknatıslı senkron makine (PMSM) ile güç üretimi için kullanılmıştır. Bu makale, bir mikro türbin üretim sisteminin

dinamik bir modelini sunmaktadır. Sistemin bileşenleri, ara bağlantılarıyla birlikte her bir parçanın dinamiğinden oluşturulmuştur. Model, SimPower Systems kütüphanesi kullanılarak MATLAB/Simulink'te uygulanmıştır. Uygulanan modelin performansı izole bir yük ile incelenmiştir. Rüzgâr türbinli tüm sistemin SIMULINK modeli geliştirilmiş ve sonuçlar PMSM için olduğu kadar yük ucu tarafındaki gerilim ve akım dalga şekilleri için de elde edilmiştir. Akım ve gerilim dalga şekilleri RL ve LCL filtresi ile elde edilmiştir (Gupta and Kumar 2012).

Bu makale, sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü (SMSJ) değişken hızlı bir rüzgâr türbininin dinamik modelini ve kontrol şemalarını sunmaktadır. Model, bir PMSG modeli, eğim açılı kontrollü bir rüzgâr türbini modeli ve bir aktarma organı modeli içermektedir. Aktarma organı modeli, jeneratör setinin mekanik özelliklerini temsil etmek için tek kütleli model kullanır. Jeneratör modeli dq-senkron dönen referans çerçevesinde oluşturulmuştur. Rüzgâr türbini modeli, türbinin bir hatve kontrolü ile değişken hızda çalışma mekanizmasını detaylandırmaktadır. Makaledeki kontrol şemaları rüzgâr türbini için bir hatve açısı kontrolü ve jeneratör için bir hız kontrolü içermektedir. Eğim açısı kontrolü, yüksek rüzgâr hızında normal çalışmayı sağlamak için giriş sinyalleri olarak rüzgâr hızlarını ve elektrik gücü çıkışını kullanır. Hız kontrolü, d ekseni akımının sıfıra ayarlandığı ve q ekseni akımının rüzgâr hızının değişimine göre jeneratörün dönme hızını kontrol etmek için kullanıldığı alan yönlendirmesi yoluyla gerçekleştirilir. Sunulan modeli ve kontrol stratejisini doğrulamak için MATLAB/Simulink yazılımı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları modelin ve kontrol şemalarının geçerliliğini kanıtlamaktadır (Yin et al. 2007).

Bu makale, 5 MW'lık bir rüzgâr türbini için oransal integral (PI) eğim açısı kontrolörünün kazançlarını hesaplamak için iki yöntem önermektedir. İlk yöntem analitiktir ve ikincisi simülasyona dayanmaktadır. İlk olarak, farklı eğim açıları için güç katsayısı karakteristikleri hesaplanmıştır. İkinci olarak, rotor hızına karşı çıkış gücü eğrileri cut-in'den cut-out rüzgâr hızlarına kadar simüle edilmiştir. Birinci ve ikinci analizlerden elde edilen sonuçlar, farklı rüzgâr hızlarında kontrol kazançlarını bulmak için kullanılmıştır. Son olarak, sonuçlar türbinin izleme özelliklerini belirlemek için bir

rüzgâr türbini modeli kullanılarak karşılaştırılmıştır. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kanat eğim açısının kontrolü için PI tabanlı bir kontrol tasarım şeması önerilmiştir. PI kazançlarını hesaplamak için bir analitik yöntem ve bir simülasyon tabanlı yöntem önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen her iki PI şeması için de iyi performans göstermiştir (Hwas and Katebi 2012).

Bu makale, kontrol performansını iyileştirmek için bir SMSJ rüzgâr türbininin PI kontrolör parametrelerini aramak için bir yöntem sunmaktadır. Çalışma koşulları rüzgâr hızına göre değiştiğinden, PI kontrolör parametreleri rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak belirlenmelidir. SMSJ rüzgâr türbininin küçük sinyal modellemesi, çeşitli çalışma koşulları altında ve PI kontrolör parametrelerinin ayarlanmasıyla koordine edilen SMSJ rüzgâr türbininin küçük sinyal modelinden elde edilen öz değerlerle kararlılığı analiz etmek için uygulanmıştır. Ayarlanacak parametreler, durum değişkenlerinin katılım faktörleri incelenerek seçilir, bu da ayarlanacak parametre sayısını azaltarak problemi basitleştirir. Bu PI kontrolör parametrelerini ayarlama işlemi parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) kullanılarak gerçekleştirilir. PI kontrolör parametrelerinin PSO yöntemi ile ayarlanmasının kontrol yönteminde sağladığı iyileştirmeleri karakterize etmek için PMSG rüzgâr türbini, elde edilen PI kontrolör parametreleri ile MATLAB/SimPowerSystems kütüphaneleri kullanılarak modellenmiştir (Kim et al. 2015).

Rüzgâr enerjisinin elektrik şebekesine nüfuzu yaygınlaştıkça, rüzgâr türbini sistemlerinin frekans ve gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi giderek daha önemli hale gelmektedir. Rüzgâr türbini rotoru farklı tipte yükler taşır; aerodinamik yükler, yerçekimi yükleri ve santrifüj yükler. Bu yükler kanatlarda yorulmaya ve titreşime neden olarak rotor kanatlarında bozulmaya yol açar. Bu yüklerin üstesinden gelinebilir ve toplanan güç miktarı, bir rüzgâr türbini rotor kanadının hücum açısını rüzgârın içine veya dışına ayarlayacak iyi bir hatve kontrolörü kullanılarak kontrol edilebilir. Her kanat, rotor kanatları boyunca rüzgâr hızının değişmesi nedeniyle farklı yüklere maruz kalır. Bu nedenle, gelecekte kanatların eğimini kontrol etmek için Bireysel Eğim Kontrolü adı verilen bir süreçte bireysel elektrikli sürücüler kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbininin doğrusal olmayan özellikleriyle başa çıkmanın yanı sıra

kanatlar üzerindeki yükleri azaltmak için bulanık mantık kontrolüne dayalı gelişmiş bir hatve açısı kontrol stratejisi önerilmektedir. Rüzgâr türbininin matematiksel bir modeli geliştirilmiş ve PID, Bulanık ve Adaptif Bulanık-PID olmak üzere üç kontrolör ile test edilmiştir. Önerilen üç strateji karşılaştırıldıktan sonra, simülasyon sonuçları Uyarlanabilir Bulanık-PID kontrolörün, sistemle ilişkili bozulmalar ve belirsiz faktörlerin yanı sıra hatve sistemini de düzenlediği için en iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir (Baburajan 2017).

Bu makale, bağımsız bir rüzgâr sisteminin MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmesini ve performans analizini sunmaktadır. Akümülatörlü rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan bağımsız sistemler, uzak evleri beslemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgâr türbini modeli, rüzgâr türbininin çalışmasını yöneten temel devre denklemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Bu makalede değişken hızlı çalışmaya dayalı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör (PMSG) kullanılmıştır. Rüzgâr türbininin hızı değişken olduğundan, jeneratör güç elektroniği cihazları tarafından kontrol edilmektedir. SMSJ'nün çıkış gerilimini doğrultmak için bir doğrultucu ve bu doğrultulmuş gerilimi batarya ve bağlı DC yükün gerilimine düşürmek için DC/DC buck dönüştürücü kullanılır. Buck dönüştürücü, rüzgâr sisteminin maksimum güç çıkışını elde etmek için kontrol edilir. İlk olarak bir rüzgâr türbininin matematiksel modellemesi yapılmış ve farklı parametreler için farklı özellikleri elde edilmiştir. İkinci olarak rüzgâr sisteminin bağımsız bir modeli modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu makale, bağımsız bir rüzgâr sisteminin rüzgâr hızındaki değişimin etkisini modellemek, simüle etmek ve incelemek için kullanışlıdır (Husain and Tariq 2014).

Rüzgâr türbini mikro yerleşimi, Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) kurulumlarında en önemli gündem maddelerinden biridir. Rüzgâr türbinlerinin uygun bir şekilde yerleştirilmesi, RES tarafından üretilen enerji miktarını artırmaktadır. Bu çalışmada, 10 rüzgâr türbininden oluşan RES kurulumu için bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında RES kurulum bölgesindeki rüzgâr hızı dağılımı modellenmiştir. Bu modelde; RES kurulum bölgesinden alınan rüzgâr ölçümleri, RES kurulum bölgesinin topografik haritası ve WASP (Wind Atlas Analysis and Application

Program) yazılımı kullanılmıştır. İkinci aşamada, bölgeye rastgele yerleştirilecek rüzgâr türbinlerinin üreteceği toplam enerjinin hesaplanması için genel bir yöntem oluşturulmuştur. Enerji hesabının gerçek üretime yakın olması için rüzgâr türbinine ait gerçek bir güç eğrisi kullanılmıştır. Bu güç eğrisi 2 MW çıkış gücüne sahip Bonus marka rüzgâr türbinine aittir. Çalışmanın üçüncü aşamasında optimizasyon modeli Genetik Algoritma (GA) yöntemi kullanılarak çözülmüş ve 10 adet optimum türbin koordinatı belirlenmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi için WASP yazılımı kullanılarak rüzgâr türbinleri bu koordinatlara yerleştirilmiştir. Yazılımdan elde edilen sonuçlara göre rüzgâr türbinlerinin yıllık enerji üretimi 56553,5 kWh olarak bulunmuştur. Ayrıca ortalama rüzgâr hızı haritasında enerji üretim potansiyeli yüksek olan bölgelere rüzgâr türbini yerleşimi yapıldığı görülmüştür. Bu sonuç, önerilen modelin RES kurulumunda türbinleri etkin bir şekilde yerleştirdiğini göstermiştir (Çelik et al. 2018).

Bu makalede, rüzgâr türbinlerinin güç kalitesini iyileştirmek ve türbinler üzerindeki mekanik yükleri hafifletmek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr türbininin çıkış gücü, nominal rüzgâr hızlarının üzerinde kanat hatve açısı ayarlanarak nominal değerde tutulmuştur. Buna ek olarak, rüzgâr türbini üzerindeki mekanik yükler bireysel hatve açısı kontrolü ile azaltılır. Rüzgâr türbini sabit mıknatıslı bir senkron jeneratör kullanmaktadır ve Matlab/Simulink'te modellenmiştir. Simülasyon sonuçları, bireysel hatve açısı kontrolünün sadece rüzgâr türbininin çıkış gücü kalitesini sağlamakla kalmayıp aynı zamanda rüzgâr türbini üzerindeki dengeli periyodik yükleri de azalttığını göstermektedir (Lüy et al. 2017).

Maksimum rüzgâr enerjisi üretimi, orta ve büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinin çeşitli parçalarının kontrol edilmesini gerektirir. Bu makale, oransal-integral-türevsel (PID) kontrolör aracılığıyla çok çeşitli simüle edilmiş rüzgâr hızlarında nominal rüzgâr türbini gücü için sağlam bir eğim açısı kontrol sistemi sunmaktadır. Buna ek olarak, karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve klasik Nichols- Ziegler (Z-N) algoritmaları, dalgalanan rüzgâr hızlarından rüzgâr türbinlerin nominal kararlı çıkış gücünü elde etmek için PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için kullanılmıştır. Önerilen sistem hızlı rüzgâr hızı değişimi altında simüle edilmiş ve sonuçları PID-ZN kontrolör ve PID-PSO ile karşılaştırılarak etkinliği doğrulanmıştır.

Önerilen yaklaşım, basit uygulamanın yanı sıra türbin parametrelerinin ve parametrik olmayan bazı belirsizliklerin toleransı gibi çeşitli avantajlar içermektedir. Jeneratör çıkış gücünün rüzgâr hızı değişimleri ile sağlam kontrolü de bu stratejinin önemli bir avantajı olarak düşünülebilir. Teorik analizlerin yanı sıra simülasyon sonuçları, önerilen kontrolörün PID-ZN ve PID PSO kontrolörlerine kıyasla geniş bir rüzgâr hızı aralığında daha iyi performans gösterebileceğini göstermektedir. Rüzgâr türbin modeli ve hibrit kontrolörler (PID-ACO ve PID-PSO) MATLAB/Simulink'te onaylanmış kontrolör modelleri ile geliştirilmiştir. Hibrit PID-ACO kontrolörünün, PID PSO ve geleneksel PID'ye kıyasla en uygun kontrolör olduğu görülmüştür. PID-ACO ile istenen güç ve rüzgâr türbinin çıkış gücü arasında hesaplanan kök ortalama kare (RMS) hatası 0,00036 olarak bulunmuştur ve bu, incelenen kontrolörler arasında en küçük sonuçtur (Sarkar et al. 2020).

Fosil yakıtların yerine rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerjilerin etkin bir şekilde kullanılması son derece arzu edilen bir durumdur. Rüzgâr enerjisi sabit değildir ve rüzgâr jeneratörü çıkışı rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır, bu da rüzgâr türbini jeneratörlerinin güç çıkışının dalgalanmasına neden olur. Rüzgâr çiftliklerinin çıkış gücü dalgalanmalarını azaltmak amacıyla, bu makalede rüzgâr çiftlikleri için rüzgâr çiftliği çıkış gücünün hem ortalamasına hem de standart sapmasına dayalı bir çıkış gücü dengeleme kontrol stratejisi; rüzgâr türbini jeneratörleri için bir kooperatif kontrol stratejisi ve rüzgâr türbini jeneratörlerinin tüm çalışma bölgelerine yönelik genelleştirilmiş bir öngörülü kontrolör (GPC) kullanan bir eğim açısı kontrol yöntemi sunulmaktadır. Rüzgâr çiftliği sistemleri için gerçek bir ayrıntılı model kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir (Senjyu et al. 2006).

Bu makale, optimum ayarlı bir PI denetleyici kullanarak değiştirilmiş bir histerezis akım denetleyicisine dayalı Matris Dönüştürücüyü (MD) kontrol etmek için geliştirilmiş bir hızlı dinamik sistem önermektedir. Rüzgârdan maksimum gücü elde etmek için Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratörün (SMSJ) aktif ve reaktif akım bileşenlerini kontrol etmek için geliştirilmiş bir Bakteriyel Arama Optimizasyonu (BA) tekniği kullanılmaktadır. Önerilen bu kontrolör, normal ve arıza koşullarında şebekeye hem

aktif hem de reaktif güç sağlama yeteneğine sahiptir. Sistem kararlılığını iyileştirmek için MC nominal akımı ile sınırlı bir aralıkta Düşük Gerilim Geçişi (DGG) sırasında şebekeye enjekte edilen reaktif gücü kontrol etmek için önerilen geliştirilmiş BA kontrolörü ile dinamik bir sınırlayıcı kullanılır. Rüzgâr enerji santralini mekanik hasarlardan korumak için önerilen kontrolörde hız sınırlayıcılı eğim açısı kontrolörü uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrolörün her koşul altında geçerliliğini kanıtlamaktadır (Saad et al. 2018).

Bu makalede, PID ayarlama için kullanılan modern ve klasik yaklaşımlar ve çeşitli alanlardaki uygulamaları incelenmektedir. Bugüne kadar uygulanan kontrol sistemlerinin çoğu, basit yapısı, uygulama kolaylığı ve PID ayarlama konusunda uzun süredir devam eden aktif araştırmalar nedeniyle PID kontrolünü kullanmaktadır. Bu makalede incelenen teknikler, PID ayarı için kullanılan klasik ve modern optimizasyon kurallarına göre sıralanmıştır. Bu makale, kontrol sistemleri ve biyo-tıbbi uygulamalar çağında PID kontrolünün literatür incelemesini ele almaya çalışmaktadır. Klasik PID'nin gelişimi ve akıllı kontrolün buna entegrasyonu çeşitli uygulama alanları göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu belgenin birincil amacı, insanların farklı uygulama alanlarında PID komutunu anlamaları için bir bilgi noktası sağlamaktır (Borase et al. 2020).

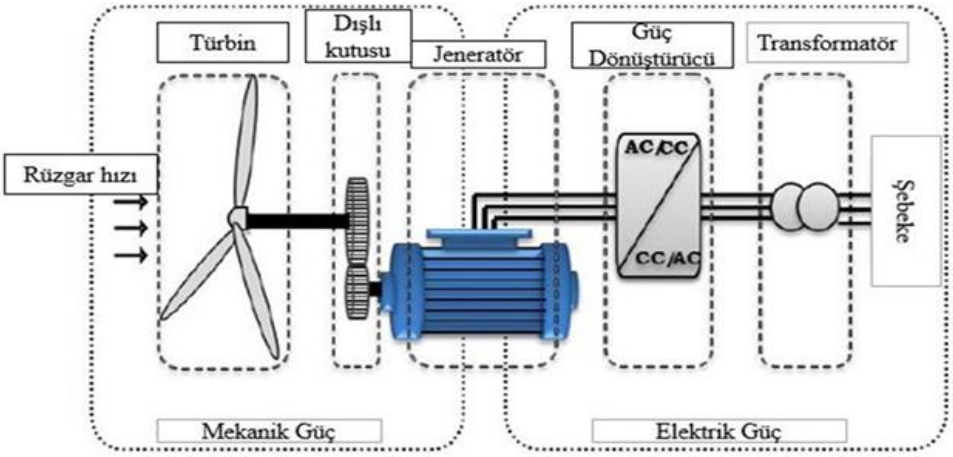
Bir genetik algoritma yaklaşımı, kurulu türbin sayısını ve her bir rüzgâr çiftliği tarafından işgal edilen arazinin dönümünü sınırlarken maksimum üretim kapasitesi için rüzgâr türbinlerinin optimum yerleşimini elde etmek için kullanılır. Özellikle, üç durum göz önünde bulundurulmuştur (a) tek yönlü tekdüze rüzgâr, (b) değişken yöne sahip tekdüze rüzgâr ve (c) değişken yöne sahip tekdüze olmayan rüzgâr. Durum (a)'da 600 birey başlangıçta 20 alt popülasyona dağıtılır ve 3000 nesil boyunca evrimleşir. Durum (b)'de 600 birey başlangıçta 20 alt popülasyona yayılmıştır ve 3000 nesil boyunca evrimleşir. Durum (c) 20 alt popülasyona yayılmış 600 bireyle başlar ve 2500 nesil boyunca evrimleşir. Optimal konfigürasyonlara ek olarak, sonuçlar her konfigürasyon için uygunluk, toplam güç çıkışı, güç çıkışının verimliliği ve türbin sayısını içerir. Daha önceki bir araştırmanın sonuçları ile uyuşmazlık çalışma gözlemlenmiş ve olası bir açıklama sunulmuştur (Grady et al. 2005).

2 RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİ

İlk olarak rüzgâr enerjisinin tanımı ve tarihçesi açıklanmıştır. Daha sonra rüzgâr enerjisinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Rüzgâr enerjisinin sınıflandırılması ve rüzgâr türbini türleri daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Son olarak, sistemi optimize etmek için PID kontrolörü kullanilarak genetik ve bakteriyel arama algoritmaları uygulanmıştır.

2.1 Rüzgâr Enerjisinin Tanımı

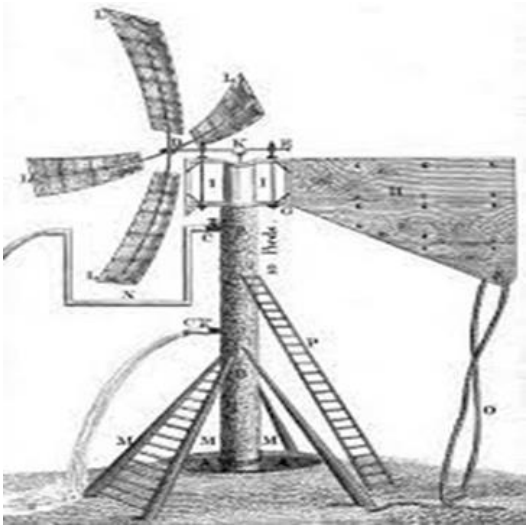
Rüzgâr enerjisi, rüzgârın kinetik enerjisinin bir kısmını hareket şaftında bulunan mekanik enerjiye ve ardından bir jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir. Bir rüzgâr türbini, dış gövdesiyle birlikte bir rotor ve kanatlar tarafından hareket ettirilen bir elektrik jeneratörü; bir kontrol sistemi, bir güç dönüştürücü; bir transformatör ve son olarak bir elektrik şebekesinden oluşmaktadır. Şekil 2.1 rüzgâr enerjisinin genel bir görüntüsünü göstermektedir. Rüzgâr enerjisi çevresel açıdan zararsız ve "yenilenebilir", coğrafi olarak dağınık ve mevsimsel olarak ilişkilidir (elektrik enerjisine olan talep, genellikle ortalama rüzgâr hızının en yüksek olduğu dönem olan kış aylarında çok daha yüksektir). Atmosferik emisyon veya radyoaktif atık üretmeyen bir enerji kaynağıdır. Ancak, zaman içinde tahmin edilemez ve yakalanması oldukça karmaşıktır; türbülanstan kaçınmak için coğrafi olarak açık alanlarda büyük kuleler ve kanatlar (multi-megawatt rüzgâr türbinleri için 60 m'ye kadar) gerekmektedir (Vechiu 2005).



Şekil 2.1 Rüzgâr enerjisine genel görüntü

2.2 Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

Dünyada yenilenemeyen ve yenilenebilir olmak üzere iki tür elektrik enerjisi bulunmaktadır. Yenilenemez enerji (kömür, gaz, petrol, nükleer) ve yenilenebilir enerji (rüzgâr, güneş, hidro, jeotermal, vb.). Yenilenemeyen enerjinin eninde sonunda tükeneceği öğrenildiğinden beri insanlar yeni kaynaklar keşfetmiştir (Ahmad 2017). Yenilenemeyen enerjiler çevreye zarar vermekte ve sera etkisi ile atmosferi kirletmektedir. Ancak insanlar son zamanlarda yenilenebilir enerjiye odaklanmaya başladı. Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerjilerden biridir. İlk yel değirmeni M.Ö. 200 yılında Bağdat'ta inşa edilmiştir. 7. yüzyılda Türkler ve İranlılar yel değirmenlerini kullanmaya başlamışlardır. Rüzgâr gücü insanlar tarafından uzun süredir teknelerde kullanılmaktadır. Yel değirmenleri, tarımsal ürünlerin öğütülmesi veya su pompalanması gibi amaçlarla kullanılmıştır. Yel değirmenleri, dünya çapında yüzyıllardır geleneksel tarım toplumlarında insan ve hayvanlarda kas gücünü desteklemek için kullanılmıştır (Vestergaard *et al.* 2004).



Şekil 2.2 Rüzgâr enerjisiyle çalışan bir değirmenin temsili resmi

Yaklaşık 3000 yıl önce gemiler rüzgârla çalışıyordu. Yel değirmenleri 19. yüzyılın ortalarından beri Avrupa'da kullanılmaktadır. Rüzgâr uzun yıllardır endüstride su pompalamak ve metal dövmek için kullanılmaktadır. Elektriğin modern bir enerji biçimi olarak gelişmesi ve ardından jeneratörlerin incelenmesiyle birlikte rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretebileceği fikri doğmuştur (Poitiers 2003). Danimarka ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bilim insanları ilk kez 1891 yılında rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeyi denemişlerdir. Birinci Dünya Savaşı ve ardından İkinci Dünya Savaşı sırasında fosil yakıtların yokluğu, fosil yakıtlara olan büyük bağımlılık konusunda bir farkındalık yaratmış ve rüzgâr enerjisine odaklanma artmıştır (Ünsalver 2008). Rüzgâr enerjisi, petrol kriziyle bağlantılı arz sorunları ve değişen fosil yakıt fiyatları nedeniyle yeniden ilgi görmeye başlamıştır. Son beş yılda küresel rüzgâr enerjisi sektörü %40'tan fazla büyümüştür. Almanya, İspanya, Danimarka ve ABD rüzgâr enerjisi için ana pazarlardır. Dünya lideri Danimarka, dünya elektriğinin %13-14'ünü rüzgâr enerjisinden üretirken, bu oran ABD'de %2'dir. Danimarkalı bilim insanları ve mühendisler rüzgâr teknolojisini bulmak ve uygulamak için özel bir çaba sarf etmiş, rüzgâr dışında doğal enerjisi olmayan (kömür, jeotermal, hidro vb.) ülkeyi rüzgârdan elektrik üreten dünyadaki ilk ülkelerden biri haline getirmişlerdir. Danimarka rüzgâr endüstrisinin tarihine göre, Askov'daki devlet lisesinde öğretmenlik yapan fizikçi Poul La Cour ve bir grup bilim insanı, 1891 yılında devlet desteğiyle ülkenin ilk rüzgâr türbini şirketini kurmuştur. Test tesisi ilk başta sadece okula enerji sağlarken, daha

sonra tüm Askov şehrine enerji sağlamaya başlamıştır. Poul La Cour'un rüyası gerçekleşmeye başlamıştır. Danimarka'nın tamamı ve 30 küçük köy elektrik santrali kısa sürede inşa edildi. Daha sonra rüzgâr türbinleri üzerinde çalışacak olan Danimarkalı "fizikçiler" Poul La Cour'un Askov Halk Lisesi'ndeki derslerine katılmışlardır. Danimarka'nın en büyük rüzgâr türbini endüstrisi Poul La Cour ve Lykkegaard da dahil olmak üzere öğrencilerinin yardımıyla kurulmuştur ve Danimarka bu sayede dünyada rüzgârdan bu kadar çok elektrik enerjisi üreten ilk ülke olmuştur (Vestergaard *et al.* 2004).

2.3 Rüzgâr Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Rüzgâr enerjisi, diğer enerji kaynakları arasında gelişmesine ve evrimleşmesine olanak tanıyan kendine özel avantajlara sahiptir. Aşağıda belirtilen dezavantajların etkisinden kaçınılması koşuluyla, gelecek için iyi bir alternatiftir.

2.3.1 Rüzgâr enerjisinin avantajları

- Birçok uzman artık bazı insan faaliyetlerinin doğa üzerinde olumsuz etkileri olduğunu kabul etmektedir. Bazı enerji kaynakları, özellikle asit yağmurları veya genel çevresel bozulma, küresel iklim değişikliği üzerinde etkili olmaktadır. Sanayi devrimi öncesinden bu yana karbondioksit (CO2) konsantrasyonu %25 oranında artmıştır ve 2050 yılına kadar iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle 1900 yılından bu yana sıcaklıklar 0,3 ila 0,6°C artmıştır ve 2100 yılına kadar bilim insanları ortalama 1 ila 3,5°C'lik bir sıcaklık artışı beklemektedir. Bu ısınmanın tüm etkileri öngörülebilir olmasa da örneğin 2100 yılına kadar deniz seviyelerinin 15 ila 95 cm yükselmesine neden olacaktır ve rüzgâr enerjisi kullanmak CO2 salınımına neden olmaz. (Camblong 2003).
- Fosil yakıtların aksine rüzgâr enerjisi yenilenebilir bir kaynak olduğu için asla tükenmeyecektir.
- Rüzgâr enerji santralleri fosil yakıtlı enerji santrallerinin yerini almıştır. Örneğin, günümüzde rüzgâr enerjisinin kullanımı, asit yağmurlarının ana

nedenleri olan 6,3 milyon ton CO2, 21.000 ton sülfür dioksit (SO2) ve 17.500 ton nitrojen dioksit (NOx) emisyonunu önlemektedir.

- Çoğu termik ve nükleer enerji santralinin sürekli süreçlerinin aksine, çalışan rüzgâr türbinleri hızla kapatılabildiğinden, rüzgâr enerjisinin kullanımı sürekli bir süreç değildir. Gerekli olmadığında bile enerji sağlarlar, bu da önemli kayıplara ve düşük enerji verimliliğine neden olur.
- Yakındaki enerji gereksinimlerini karşılayan yakındaki bir enerji kaynağıdır. Sonuç olarak uzun enerji taşımaları şebeke kayıplarını azaltmaktadır. Ayrıca, bu enerji kaynağı özellikle kırsal alanlarda ekonomiyi canlandırabilmektedir.
- Yenilenebilir enerjinin en ucuz şeklidir. Bu enerji kaynağı gelişmekte olan ülkeler için de çok önemlidir. Bu ulusların ilerlemek için sahip oldukları kritik enerji gereksinimlerini karşılamaktadır. Bir rüzgâr çiftliği veya türbini oldukça hızlı bir şekilde kurulabilmektedir. Daha geleneksel enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, gereken yatırım daha düşüktür. Son olarak, bu tür bir enerjinin mevcut bir elektrik sistemine entegrasyonu basittir.
- Diğer geleneksel enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisi, üretilen elektrik birimi başına daha fazla iş üretmektedir. Nükleer enerji, oyun alanı eşit olduğunda kömür ve gazla rekabet edebilir. Çevre açısından güvenli tarımsal ve endüstriyel faaliyetler devam edebilir (Çelik *et al.* 2018).

2.3.2 Rüzgâr enerjisinin dezavantajları

Aşağıda rüzgâr enerjisinin çeşitli dezavantajlarının bir listesi yer almaktadır:

- Bununla birlikte, görsel izlenim hala bir görüş meselesidir. Şanzımanda kaydedilen ilerlemeler sayesinde gürültü önemli ölçüde azaltılmış, özellikle mekanik gürültü neredeyse tamamen ortadan kaldırılmıştır. Aerodinamik gürültü rotor hızı ile ilişkilidir ve minimumda tutulması gerekmektedir.
- Bazı çalışmalar kuşların rüzgâr türbinlerinden kaçındığını, bazıları ise kaçmadığını göstermiştir. Diğer araştırmalara göre, göçmen kuşların türbinler tarafından çarpılmasını önlemek için, rüzgâr santralleri göçmen kuşların göç yolları üzerine kurulmamalıdır.

- Rüzgâr türbinleri tarafından üretilen elektrik enerjisi stokastik bir enerji kaynağı olduğu için kalitesi sabit değildir. Ancak rüzgâr enerjisinin gelişmesiyle, özellikle de yüksek rüzgâr potansiyeline sahip bölgelerde, bu kısım artık ihmal edilmemektedir. Rüzgâr türbinleri tarafından üretilen elektriğin kalitesi daha büyük bir etkiye sahiptir ve güç sistemi operatörlerinden daha fazla talepte bulunmaktadır.
- Rüzgâr enerjisinin fiyatı diğer enerji kaynaklarınınkiyle karşılaştırılmıştır. Güçlü rüzgâr enerjisi, en iyi sahalarda veya en çok rüzgâr alan yerlerde maliyet açısından çoğu geleneksel enerji kaynağıyla rekabet edebilir, ancak daha az rüzgâr alan yerlerde maliyet hala geleneksel kaynaklardan daha yüksektir (Bıldırçin 2018).

2.4 Rüzgâr Türbini Çeşitleri

Rüzgâr türbinleri iki yerde kurulabilir: karasal rüzgâr türbinleri ve açık deniz rüzgâr türbinleri. Her ikisi de rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek aynı şekilde çalışmaktadır. Türkiye'de karasal ve açık deniz rüzgâr türbinleri bulunmaktadır.

2.4.1 Karasal rüzgâr türbini

Açık deniz rüzgâr türbininin aksine, kurulum sırasında bazı avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Açık deniz rüzgâr türbini kurulumu deniz ortamı için üretilmiş özel ekipman gerektirdiğinden, karasal rüzgâr türbinleri açık deniz rüzgâr türbinlerine göre %30 ila %50 daha ucuzdur. İç korozyonu önlemek için, nem ve sıcaklık, nasıl çalıştıklarını kontrol etmek için kullanılan özel sensörler tarafından kontrol edilmektedir. Karadaki rüzgâr türbinlerinin de gürültü kirliliği ve engellere karşı hava direnci gibi dezavantajları vardır (Işık 2020).



Şekil 2.3 Karasal rüzgâr türbini

2.4.2 Açık deniz rüzgâr enerjisi

Bir açık deniz rüzgâr türbini kurulduğunda hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Karadaki rüzgâr türbinlerine göre, açık deniz rüzgâr türbinleri iki kat daha fazla elektrik üretebilmektedir. Deniz açık olduğu için rüzgarlar çok az engelle karşılaşmaktadır (Tortumluoğlu ve Doğan 2021). Ancak denize rüzgâr türbini yerleştirmek her zaman deniz ekosistemini bozma tehlikesi taşımaktadır ve açık deniz rüzgâr türbinleri karadakilere kıyasla daha pahalıdır (Hakyemez 2011).



Şekil 2.4 Açık deniz rüzgâr türbinleri

2.4.3 Sabit veya değişken hızlı rüzgâr türbini

Rüzgâr türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı türbinler olarak sınıflandırılabilmektedir. Bu türbinler arasındaki fark aşağıda açıklanmıştır.

2.4.3.1 Sabit hızlı rüzgâr türbini

Sabit hızlı rüzgâr türbinleri, adından da anlaşılacağı gibi, dişli oranına, şebeke frekansına ve jeneratör kutuplarının sayısına bağlı olan sabit bir hızda dönmektedir. Belirli bir rüzgâr hızında, maksimum güç verimliliği ancak gerçekleşebilmektedir. Sistemin verimliliği daha yüksek rüzgâr hızlarında düşmektedir. Kanatların aerodinamik özellikleri kontrol edilerek türbin, güçlü rüzgârların neden olabileceği potansiyel zararlardan korunmaktadır. Sabit hızdaki rüzgâr türbinleri şebekenin enerji üretimini bozar ve elektrik sistemini durma noktasına getirmektedir (Gupta and Kumar 2012).

2.4.3.2 Değişken hızlı rüzgâr türbini

Geniş bir rüzgâr hızı aralığında, değişken hızlı rüzgâr türbinleri en yüksek enerji dönüşüm verimliliğini sağlayabilmektedir. Rüzgâr hızına göre türbinin dönüş hızı sürekli olarak ayarlanabilmektedir. Sonuç olarak, uç hızı, çeşitli rüzgâr hızlarında güç dönüşüm verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için ideal seviyede tutulabilmektedir. Jeneratör, türbin hızının değiştirilebilmesi için bir güç dönüştürücü sistemi aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır. Dönüştürücü, rüzgâr türbininin rotoruna (kanatlarına) mekanik olarak bağlı olan jeneratörün hızını düzenlemektedir. Sabit ve değişken hızlara sahip rüzgâr türbinlerinin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.1'de gösterilmektedir (Çiftçi ve Dursun 2017).

Çizelge 2.1 Değişken ve sabit hızlı rüzgâr türbinin avantajları ve dezavantajları

Hız modu	Avantajları	Dezavantajları
Sabit hız	• Basit, güçlü, güvenilir. • Maliyetinin ve bakım düşük.	• Düşük enerji dönüşümü. • Yüksek mekanik stres. • Şebekede ağda yüksek güç dalgalanmaları.
Değişken hız	• Yüksek enerji dönüşüm verimliliği. • Konvertörlerin enerji kalitesinin iyileştirilmesi.	• Dönüştürücülerin kullanımıyla ilişkili ek maliyetler ve kayıplar. • Kontrol sistemi daha karmaşık.

2.5 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri eksenlerine göre üç ana tipe ayrılmaktadır: Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT) Şekil 2.5'te, dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) ise Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Son olarak, eğik eksenli rüzgâr türbinleri çok nadiren kullanılır ve Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

2.5.1 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, aerodinamik verimlilikleri dikey eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha yüksek olduğu için tercih edilmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, dikey eksenli rüzgâr türbinlerine göre mekanik strese daha az maruz kalır ve daha az maliyetlidir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri kanatlarına göre farklıdır: tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgâr türbinleri olarak ayrılmaktadır. Genel olarak yatay eksenli rüzgâr türbinleri üç kanatlı pervanelere sahiptir ve yel değirmenleri prensibiyle çalışmaktadır (Boulegroune 2020).



Şekil 2.5 Yatay eksenli rüzgâr türbini

2.5.1.1 Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin avantajları

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerine kıyasla çok az yer kaplamaktadır. Bu yapı, yüksekte olduğu ve rüzgârı yakaladığı için yere yakın olanlara göre çok daha düzenli ve güçlüdür. Kulenin tepesinde, motor bölümünde jeneratör ve kontrol üniteleri bulunmaktadır. Bu nedenle, ekipman için bir alan eklemeye gerek yoktur.

2.5.1.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin dezavantajları

Çok yüksek inşaat maliyeti. Ekipmanların kulenin tepesinde yer alması nedeniyle acil bir durumda müdahale etmek zordur. Bu yapı, dezavantajlarına rağmen şu anda en popüler olanıdır. Ancak izole bölgeler dikey eksenli binalar kullanarak elektrik üretmeye devam etmektedir. Akü şarjı gibi devam eden operasyonlar için yeterli güce sahip değillerdir (Stiebler 2008). Yatay eksenli ve değişken hızlı üç kanatlı yapı en etkili ve verimli yapıdır ve bu çalışmanın geri kalan bölümlerinin odak noktasıdır.

2.5.1.3 Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri nadirdir, çünkü iki veya üç kanatlı türbinlere kıyasla dönme eksenleri dengesizdir ve rüzgâr titreşimleri ömürlerini kısaltmaktadır. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri üreten bazı şirketler vardır, ancak bunlar giderek daha az yaygınlaşmaktadır. Tek kanatlı bir rüzgâr türbininin inşası, makinenin kütlesini ve rotor torkunu düşüren kanat sayısına göre yüksek dönme hızı ile gerekçelendirilmiştir. Kanat üzerindeki yapısal baskıları daha da azaltmak ve kanat mekanizmasının düzgün hareket etmesini sağlamak için rotor kanadı tek bir menteşe ile dengelenmeli ve iki karşı ağırlık ile dengelenmelidir. Buna karşılık, tek kanatlı rotorların kanat bağlantı yerleri, artan yüklerin neden olduğu aerodinamik dengesizliği ve mekanizma hareketini kontrol etmek için son derece dikkatli bir şekilde inşa edilmelidir. Tek kanatlı bir rüzgâr türbini Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Karadağ 2009).

2.5.1.4 Çift kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı konfigürasyonun bir dizi avantaj sunduğu doğrudur. Makine nispeten düşük rüzgâr hızlarında çalışabilir çünkü kanat sayısı arttıkça rotor miline iletilen tork da artmaktadır. Her kanadın avantajları ve dezavantajları vardır. Daha gürültülüdür ve rotorları daha hızlı hareket ettiği için çevre üzerinde daha belirgin bir görsel etkiye sahiptir. Bu, yerel halkın kurulumlarını kabul etmesinin önünde önemli bir engeldir. Ayrıca, çalıştırmak için üç kanatlı uçaklara göre daha fazla rüzgâr hızı gerektirmektedir.

Daha hafiftirler ve karşılaştırılabilir güce sahiplerse üretilmeleri daha az maliyetlidir. Ayrıca rüzgâra karşı daha dayanıklıdır. Hatta üç kanatlı kanatların aksine, teknik olarak bir fırtınada yere yatay olarak serilebilmektedirler. Çift kanatlı sistemler bu nedenle daha ucuzdur ve tekrarlayan kasırga ve siklonlara eğilimli bölgeler için daha uygundur. Tek kanatlı bir rotorla karşılaştırıldığında, iki kanatlı bir rotor daha eşit dengelidir. Ne yazık ki, iki kanatlı rotorun neden olduğu dinamik hareketleri durdurmak için gereken ek teknik güç, ek bir maliyet artışına neden olmaktadır. Rotor artık kanat bağlantı noktalarının titreşimini azaltmak için bir kadran sistemine sahiptir. Bu kadran hem rotor miline hem de iki rotor kanadına paralel olarak konumlandırılmıştır. Uçtaki yüksek hızlar, üç kanatlı rotora göre ana avantajdır. Bu rüzgâr türbininin düşük rüzgâr hızlarında (3 m/sn) çalışması ve çok fazla gürültü üretmesi dezavantajlarıdır. Şu anda kullanımda olan sadece birkaç iki kanatlı rotor vardır ve genişleyen pazara kısa bir süre için bile bakacak olursak, iki kanatlı rotor trendine dair herhangi bir belirti göremeyiz. Çift kanatlı rüzgâr türbini Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Karadağ 2009).

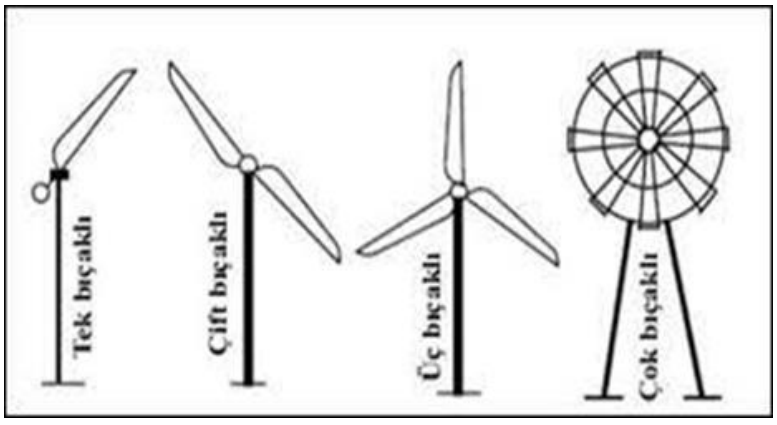
2.5.1.5 Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Tüm dünyada modern üç kanatlı türbinler kullanılmaktadır. Tork daha sabittir, bu da üç kanat kullanmanın ana gerekçesidir. Türbin yapısı üzerinde depolanan yükler türbinin salınımlı bir atalet momentine sahip olmasını önlediğinden, kanat bağlantı göbeği içinde pahalı titreşim önleyici bileşenlerin kullanılmasına gerek yoktur. İnkâr edilemez avantajı, aynı rüzgârda iki kanat kullanmaya kıyasla genellikle daha hızlı bir başlatmadır. Dengeyi iyileştirmek için yapılan bazı basit düzeltmeler dışında, üretim daha karmaşık değildir. Daha yüksek ağırlık dezavantajdır, ancak bu bir engel değildir. Bıçak eklentileri biraz daha karmaşık olsa da seçilen budur (Nurbay ve Çınar 2005).

2.5.1.6 Çok kanatlı rüzgâr türbinleri

İlk gelişmemiş rüzgâr türbinleri, genellikle rüzgâr gülü olarak bilinen çok kanatlı rüzgâr türbinleridir. Birkaç kanatlı bir rüzgâr türbini öncelikle bir tekerlektir. Bir göbekten, bir dizi kolun çıkıntı yaptığı merkezi bir kısımdan ve tek veya bölünmüş payandalardan oluşmaktadır. Tipik olarak bu kolları birbirine bağlamak için dairesel ya da düz

çubuklar kullanılmaktadır. Bu nedenle, tekerleğin çevresi çokgen veya dairesel olabilir. Bazen, bir göbek çıkıntısına bağlı bağlantı çubukları onu desteklemektedir. Tipik olarak, kanatlar tekerleğin tüm çevresine sabitlenmiştir. Kullanılan malzemeler, kanatların miktarı ve boyutu ve düz veya kavisli olup olmadıkları, montaja ek olarak bakılan şeylerdir. Çok kanatlı rüzgâr türbinlerini günümüzde fark etmek zordur çünkü bölgede görülebilenler genellikle eskidir. Göletlerin drenajı, asmaların su altında kalması ve ıslahı, tarlaların sulanması, ağaçların, bahçelerin sulanması ve en önemlisi köylerin ve kırsal bölgelerin içme suyu ihtiyaçları için 140 yıldır pompajlı rüzgâr türbinlerine ciddi bir ihtiyaç duyulmaktadır. Önceleri sadece su pompalamak için kullanılan bu türbinler, sürecin o anki ihtiyacını karşılamak için çok sayıda Kanat sahiptir. Çok kanatlı rüzgâr türbinleri düşük hızlarda çalışmaktadır. Pervanenin göbeğinden uçlarına doğru türbin kanatlarının genişliği artmaktadır. Otomobillerde kullanılan jeneratörler, pervane şaftının dişli kutusuna bağlanması ve jeneratör şaft hızının artırılması nedeniyle kullanılmaktadır. Rüzgâr gülleri ayrıca pervane düzleminin sürekli olarak rüzgârın yönüne paralel olmasını sağlayan bir yönlendirme mekanizmasına sahiptir. Birçok kanadı olan bir yel değirmeni Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Nurbay ve Çınar 2005).



Şekil 2.6 Kanatlara göre rüzgâr türbini türleri

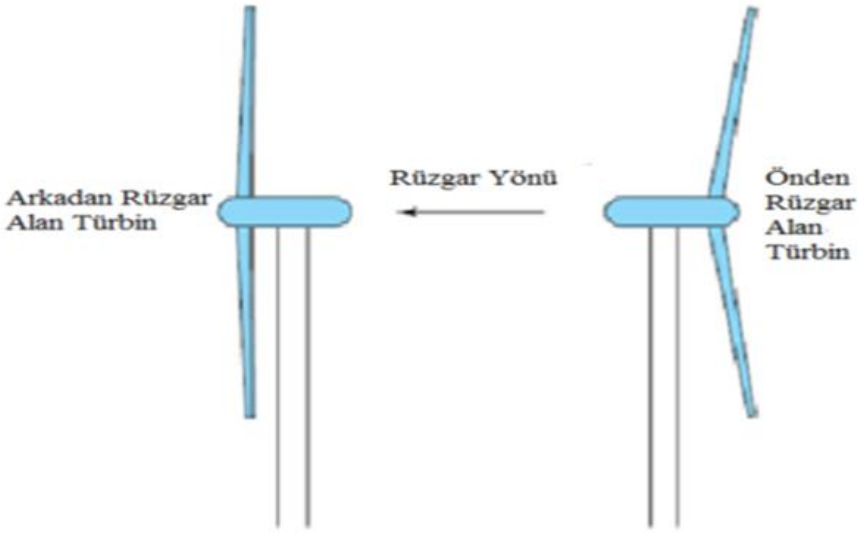
2.5.1.7 Rüzgârı önden alan rüzgâr türbinleri

Nacelle yönünde, rüzgâr kanatların önünden esmektedir. Kanatlar serttir ve bir yönlendirme mekanizması rotoru rüzgâr yönünde yönlendirmektedir. Uzun yıllardır

yaygın kullanımda olan bu cihazların rotor yüzü rüzgâra karşı donmuş durumdadır. Türbinin ürettiği güç, kule düz ve yuvarlak olmasına rağmen kanadın kuleden her geçişinde biraz daha azalmaktadır. Rüzgâr çekimi nedeniyle kanatların sağlam yapılması ve kuleden belli bir mesafede konumlandırılması gerekmektedir. Önden rüzgâr alan makinelerde rotoru rüzgâra karşı döndürmek için bir "yaw" mekanizması da gereklidir. Rüzgârı önden alan bir rüzgâr türbini Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Karadağ 2009).

2.5.1.8 Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinleri

Kanatların arkasındaki nacelle rüzgârın geldiği yerdir. Rotor esnektir ve kendi kendini yönlendirebilir. Yukarı akış türbini konfigürasyonu, basitliği ve yüksek güçteki üstün performansı nedeniyle en popüler olanıdır. Üstün stabilite vardır, kontrol yüzeyi yoktur ve manevraya daha az önem verilmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin kanatları her zaman rüzgâr yönüne bakmalıdır. Bu nedenle, türbin gövdesinde bu yön için yönlendirme araçları bulunmaktadır. Bu makinelerin rotorları kulenin arkasında konumlandırılmıştır. Ana avantajları, bir "sapma" cihazına ihtiyaç duymadan rüzgarla birlikte dönebilmeleridir. Eğer rotor ve nasel uygun şekilde inşa edilmişse, nasel pasif olarak rüzgârı takip etmektedir. Kanatların esnekliği çok daha değerli bir avantajdır. Büyük miktarlarda elektrik üretmek amacıyla, pervane tarzı bir rotora sahip yatay eksenli rüzgâr türbini şu anda büyük ilgi görmektedir. Bu, makinenin ağırlığı ve güç dinamikleri için büyük bir avantajdır. Önden rüzgârlı makinelere göre daha hafif yapılarının bir sonucu olarak, bu makineler kule yüklerini azaltma avantajına sahiptir. Ancak bu türbinler güç dalgalanmalarından ön rüzgâr türbinlerine göre daha fazla zarar görmektedir. Şekil 2.7'de rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbini gösterilmektedir (Karadağ 2009).



Şekil 2.7 Rüzgârı arkadan ve önden alan rüzgâr türbini

2.5.2 Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

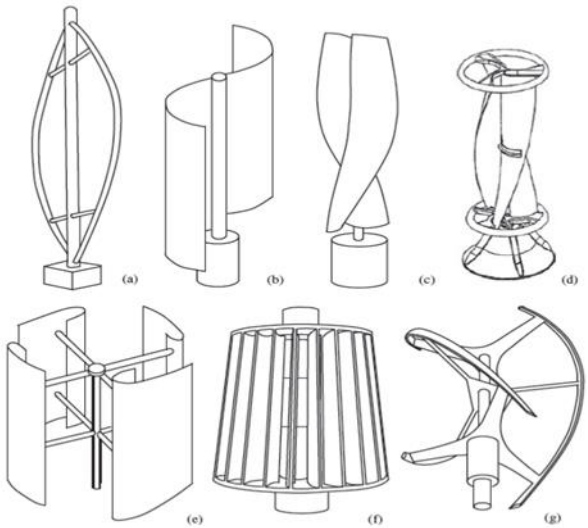
Yatay eksenle karşılaştırıldığında, bu tür makineler rüzgâr enerjisinden faydalanmak için kullanılan ilk makinelerdir. Şekil 2.8'de çeşitli dikey eksenli rüzgâr türbinleri gösterilmektedir. Yedi farklı tipte dikey eksenli rüzgâr türbini bulunmaktadır. Kontroller ve jeneratör zemin seviyesindedir, bu da onlara yüksek erişilebilirlik avantajı sağlamaktadır. Rüzgârın yönüne bağlı olan kanat yönlendirme sistemi gerekli değildir. Günümüzde bu tür rüzgâr türbinlerinin kullanımı çok daha az yaygın ve oldukça marjinaldir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri tercih edilmektedir çünkü dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin aeroelastisite sorunları vardır ve çok fazla toprak alanı kaplamaktadır (Jourieh 2007).

2.5.2.1 Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin avantajları

Dikey tasarım, dişli kutusu, jeneratör ve kontrol ünitelerini doğrudan zemine yerleştirme avantajına sahiptir. Dikey ekseni rotasyonel olarak simetriktir ve rotoru döndürmek zorunda kalmadan herhangi bir rüzgâr yönünde çalışmasına izin vermektedir. Tasarım basit, sağlam ve az bakım gerektirmektedir.

2.5.2.2 Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dezavantajları

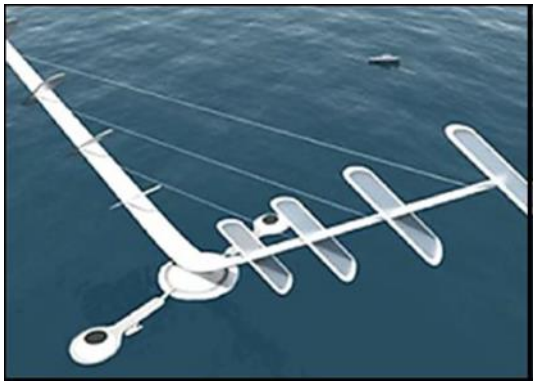
Yatay eksenli olanlara kıyasla daha az etkilidirler. Bu tür rüzgâr türbinleri, dikey tasarımları nedeniyle yere yakın bir rüzgarla çalışmak zorundadır, bu da kabartma rüzgârı yavaşlattığı için daha az güçlü olmasını sağlamaktadır. Kule, rüzgâr türbininden daha uzağa uzanmaktadır çünkü yere montajı için gerekli bağlantı çubuklarının kanatları geçmesi gerekmektedir (Tong 2010).



Şekil 2.8 Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (a) Darrius (b) Savanius (c) Solarwind (d) Helical (e) Noguchi (f) Maglev (g) Cochrane (Tong 2010)

2.5.3 Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Bunlar, dönme ekseni rüzgâr yönünde dikey bir açıda olan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı vardır. Şekil 2.9'da eğik eksenli bir türbin gösterilmektedir (Elibüyük ve Üçgül 2014).



Şekil 2.9 Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

2.6 Rüzgâr Türbini Hatve Kontrol Optimizasyonu

Optimizasyon, bir dizi alternatif arasından en uygun seçeneği seçme sürecidir. Optimum yer, koşulların en iyi ve en uygun olduğu yerdir. Belirli bir senaryoda erişilebilir bir dizi olasılığı temsil eden bir kümeye göre bir fonksiyonun maksimizasyonu veya minimizasyonu, bir optimizasyon konusunun tanımıdır. Bu özellik, potansiyel "en iyi" çözümü belirlemek için çeşitli olasılıkların karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Bir mal veya hizmetin üretiminde giderlerin en aza indirilmesi, kârın en üst düzeye çıkarılması, bir malın geliştirilmesinde hammaddelerin en aza indirilmesi veya üretimin en üst düzeye çıkarılması gibi belirli işletme parametrelerini en üst düzeye çıkaran veya en aza indiren çözümleri belirlemek için birçok araştırma alanında optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Marcoux 2013).

2.6.1 Optimizasyonun tarihçesi

1950'lerde ve 1960'larda birkaç bilgisayar bilimcisi, evrimin mühendislik problemleri için bir optimizasyon aracı olarak kullanılabileceği düşüncesiyle bağımsız olarak evrimsel sistemler üzerinde çalışmıştır. Tüm bu sistemlerdeki fikir, genetik varyasyon ve doğal seçilimden esinlenen operatörleri kullanarak belirli bir problem için aday çözümlerden oluşan bir popülasyon geliştirmekti. 1960'larda Rechenberg, çeşitli cihazların gerçek değerli parametrelerini optimize etmek için "evrimsel stratejiler" kullanmıştır. Bu fikir Schwefel (1975, 1977) tarafından daha da geliştirilmiştir.

Evrimsel stratejiler alanı, genellikle genetik algoritmalar alanından bağımsız olarak gelişen aktif bir araştırma alanı olarak kalmıştır (Hao *et al.* 2008).

1950'lerde ve 1960'larda çalışan birkaç kişi daha optimizasyon ve makine öğrenimi algoritmaları geliştirdi. Box (1957), Friedman (1959), Bledsoe (1961), Bremermann (1962) ve Reed, Toombs ve Baricelli (1967) evrim üzerine çalışmışlardır, ancak çalışmaları evrimsel stratejilerle çok az ilgilenmiştir. Genetik programlama ve algoritmalar gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bazı evrimsel biyologlar kontrollü deneyler yapmak amacıyla evrimi simüle etmek için bilgisayarları kullanmışlardır. Örneğin, Baricelli 1962, Fraser 1957, Martin ve Cockerham 1960'ın çalışmalarına atıfta bulunulmaktadır (Kılıç and Özdemir 2019).

John Holland 1960'larda genetik algoritmaları (GA'lar) yaratmış, kendisi ve Michigan Üniversitesi'ndeki öğrencileri 1960'lardan 1970'lere kadar bu algoritmaları geliştirmişlerdir. Evrimsel stratejiler ve evrimsel programlamanın aksine Holland'ın ilk amacı, belirli sorunları çözmek için algoritmalar tasarlamak değil, doğada meydana geldiği şekliyle adaptasyon olgusunu resmi olarak incelemek ve doğal adaptasyon mekanizmalarını bilgisayar sistemlerine çevirmek için yöntemler geliştirmekti. Holland tarafından yaratılan genetik algoritma, bir "kromozomal" popülasyondan yeni bir popülasyona geçmek için melezleme, mutasyon ve inversiyon gibi genetik olarak esinlenen operatörlerle bir tür doğal seçilim kullanmaktadır. Genetik algoritmalar, evrimsel stratejiler, evrimsel programlama ve diğer evrimsel yaklaşımlar arasındaki sınırlar, son yıllarda çeşitli evrimsel hesaplama yöntemlerini araştıran akademisyenler arasındaki yoğun temas sonucunda bir miktar daralmıştır. Günümüzde bilim insanları, Holland'ın ilk fikrinden çok farklı olan şeylerden sıklıkla "genetik algoritmalar" olarak bahsetmektedir (Karaboga 2005).

Optimizasyon, bir problemde belirli koşullar altında olası alternatifler arasından en iyisini seçme sürecidir. Optimizasyon problemleri için birçok algoritma önerilmiştir. Sezgisel algoritmalar, büyük ölçekli optimizasyon problemlerine kabul edilebilir bir zaman diliminde optimale yakın çözümler sunabilen algoritmalardır. Genel amaçlı sezgisel optimizasyon algoritmaları altı farklı grupta değerlendirilmektedir: biyoloji

tabanlı, fizik tabanlı, sürü tabanlı, toplum tabanlı, müzik tabanlı ve kimya tabanlı. Kuş, balık, kedi ve arı gibi sürülerin hareketleri incelenerek sürü zekasına dayalı optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Optimizasyon yöntemleri, optimum arayışına göre iki ana gruba ayrılabilir ve aşağıda açıklanmıştır (Charrouf 2012.).

2.6.2 Optimizasyon yöntemleri

Optimize edilmesi gereken bir fonksiyon veya sürecin diyagramının genel görünümü Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Optimize edilmesi gereken sistemleri

2.6.2.1 Deterministik yöntemleri

Adından da anlaşılacağı üzere, bu stratejiler belirli bir sorun ve başlangıç noktası için her zaman aynı optimum çözüme ulaşmaktadır. Bu tekniğin iki alt ailesi daha da alt bölümlere ayrılabilmektedir.

2.6.2.1.1 Gradyan yöntemi

Amaç fonksiyonunun kısmi türevleri, en yakın optimuma doğru hızlı bir iniş sağlayarak optimum arayışını yönlendirmek için kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar arasında özellikle Levenberg-Marquardt yöntemi, Newton veya yarı yöntemler, Newton ve en yüksek eğim (en dik iniş) tekniğini sayabiliriz. Bu tekniklerin üç temel dezavantajı vardır (Daas 2014).

- Özellikle sonlu farklarla değerlendirilmesi zor olan sayısal modellerde, kısmi türevlerin hesaplanmasını gerektirirler ve bu da her zaman kolay değildir.
- Çok modlu problemler söz konusu olduğunda, esasen yalnızca yerel yakınsamayı garanti etmektedirler ve yerel optimum tarafından kolayca yakalanmaktadırlar. Bu özellik genellikle tasarımcının yakınsamayı garanti etmek için çeşitli başlangıç ayarlarıyla birçok optimizasyon gerçekleştirmesini gerektirmektedir.
- Sürekli konulara uygulandıkları için, güneş panellerinin veya rüzgâr türbinlerinin sayısı gibi ayrık bir parametrenin doğrudan değerlendirilmesine izin vermemektedirler (Azzouz 2019).

Bununla birlikte, gradyan yöntemlerinin çok ilginç iki avantajı vardır. Birincisi, özellikle kısmi türevlerin tam bir sembolik ifadesine sahip olduğumuzda hızlı bir şekilde yakınsamalarıdır. İkincisi ise kesin yakınsama kriterlerine sahip olmalarıdır. Dolayısıyla bir optimuma hangi hassasiyetle ulaşıldığını söylemek mümkündür. Bu, yakınsama hassasiyetini ayarlayarak iyi çözümler elde etmeyi mümkün kılmaktadır (Abdelli 2007).

2.6.2.1.2 Geometrik veya sezgisel yöntemler

Belirli bir problem için kesin yöntemlerin kullanılması, genellikle uzun hesaplama süresi veya problemi ayrı ayrı tanımlamanın zorluğu veya bazı durumlarda imkansızlığı gibi bir dizi kısıtlama nedeniyle her zaman mümkün değildir. Bu kısıtlamalarla başa çıkmak için sezgisel olarak adlandırılan yaklaşım yöntemleri kullanılmaktadır. Sezgisel terimi, eski Yunanca'da "bulmak" anlamına gelen "heuristic" kelimesinden türetilmiştir. Keşif ve sömürü için kullanılan her şeyi karakterize etmektedir. Bu yöntemler yalnızca amaç fonksiyonunun değerlerini kullanmaktadır. Art arda denemeler yaparak çözüm uzayını keşfederler ve en uygun yönleri ararlar. Gradyan yöntemlerinde olduğu gibi, geometrik yöntemlerin yakınsaması "yerel" kalmaktadır, ancak özellikle optimize edilecek fonksiyon zayıf gürültülü veya süreksiz ise sağlamlık daha iyidir. Bu yöntemlerin temel dezavantajı, hesaplama maliyetinin tasarım değişkenlerinin sayısı ile

artmasıdır. Literatürde halihazırda önerilen çok sayıda sezgisel yöntem bulunmaktadır (Hezer and Yakup 2013).

2.6.2.2 Stokastik optimizasyon yöntemleri

Olasılıksal geçiş kuralları, çözüm uzayında rastgele bir arama yapmak için stokastik yöntemlerde kullanılmaktadır. Sonuç olarak, aynı başlangıç kurulumlarına sahip ardışık optimizasyonlar için bile optimuma giden yol farklılık gösterebilmektedir. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritmalar, enerji yönetimi ve hibrit bir sistemin ölçeklendirilmesi için tartışmasız en yaygın kullanılan stokastik tekniklerdir (Akyol ve Alataş 2012).

2.6.2.2.1 Genetik algoritmalar

Genetik algoritma (GA), bir seferde potansiyel çözümlerden oluşan bir popülasyonu manipüle eden bir meta sezgiseldir. Bir genetik algoritmanın çalışma şekli, doğal seçilimin biyolojik ilkeleri ve çevredeki en iyi adapte olmuş bireylerin hayatta kalması üzerine modellenmiştir. Doğal seçilim, birbirini takip eden nesillerdeki değişikliklerin, türlerin maruz kaldığı dış baskılar, örneğin kaynak kısıtlamaları, çevresel değişiklikler, avcılar ve parazitler vb. tarafından belirlendiği bir süreçtir. Sonuç olarak, çevreye daha iyi adapte olan bireyler daha uzun süre hayatta kalma ve daha sık üreme eğilimindedir. Bu mekanizmadan yararlanılarak genetik algoritma adı verilen bir optimizasyon yönteminin temeli atılmıştır. Bu yöntemin ortaya koyduğu sonuçlar neticesinde kombinatoryal optimizasyon problemleri üzerine birçok çalışma ele alınmıştır. Genetik algoritma, doğal seleksiyon ve genetikten esinlenen bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, arama uzayında rastgele başlatılan bir dizi olası çözümle başlamaktadır. Bireyler tasarım değişkenleri veya kodlamaları (kromozom) ile temsil edilmektedir. Başlangıç popülasyonunun bazı çözümleri, genetik operatörlerden (çaprazlama, mutasyon vb.) yeni bir popülasyon oluşturmak için kullanılmıştır. Bu, yeni nüfusun bir öncekinden daha iyi olacağı umuduyla yapılmıştır. Yeni çözümler oluşturmak için kullanılacak çözümler, değerlerine göre rastgele seçilmektedir. Oluşturulan probleme özgü, minimize veya maksimize edilmesi gereken bir amaç fonksiyonu ile temsil

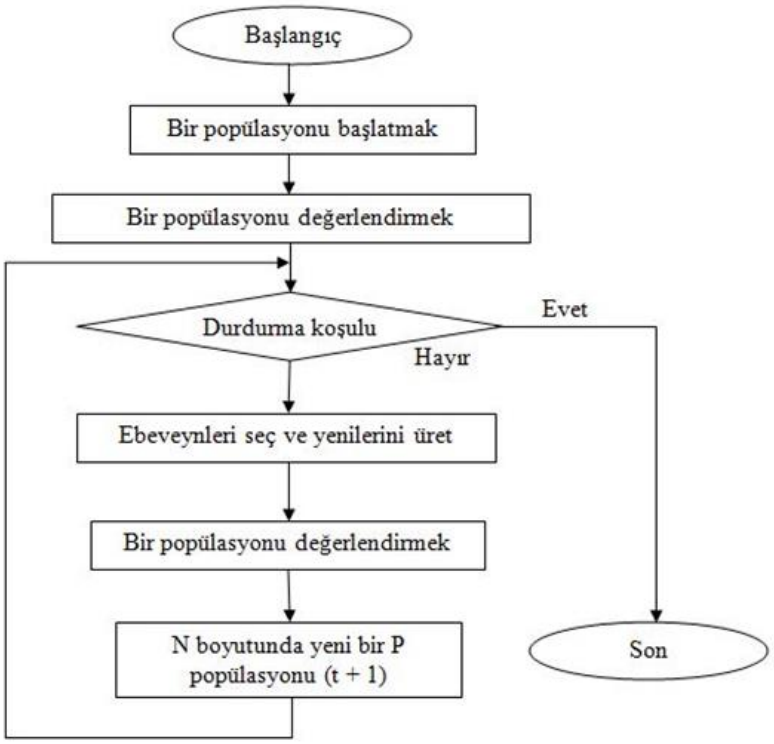
edilmektedirler: birey ne kadar iyi olursa, bir yakınsama kriterine ulaşılana kadar (genellikle sabit bir nesil sayısı veya amaç fonksiyonu tarafından ulaşılan bir hedef değer) hayatta kalma ve üreme olasılığı o kadar yüksektir. Genetik algoritmaların bazı avantajları aşağıda listelenmiştir:

- Yöntem sürekli, ayrık veya karma problemleri çözmek için kullanılabilmektedir.
- Yalnızca amaç fonksiyonunun değerini kullanmaktadırlar (türevini veya bir ara hesaplamayı değil).
- Amaç fonksiyonundaki herhangi bir süreksizliğin bu algoritmaların yakınsaması üzerinde çok az etkisi vardır.
- Yerel optimumlar tarafından kolayca tuzağa düşürülmemektedirler.
- Çok sayıda parametreyi işleyebilmektedirler ve paralel hesaplama için çok uygundurlar (Abdelhak 2015).

Tüm bu özellikler, çok çeşitli optimizasyon problemleri için genetik algoritmaların etkinliğine katkıda bulunmaktadır. Genetik algoritmalar genellikle üç tür genetik operatör kullanmaktadır. Bu operatörler, genetik özelliklerini geliştirmek ve çevrelerine uyum sağlamak için popülasyondaki bireylere uygulanmaktadır (Bechir 2016.):

- ✓ Çaprazlama.
- ✓ Mutasyon.
- ✓ Seçim.

Çaprazlama, mutasyon ve seçim olasılıkları genetik algoritmanın başında belirlenir. Bu olasılıklar normalde "deneysel" olarak aşağıdaki şekilde belirlenmektedir. Ancak, popülasyon çaprazlama olasılığı (PÇ), popülasyon mutasyon olasılığından (PM) daha yüksek olmalıdır (Grady *et al*. 2005). Popülasyona çok fazla yeni bilgi girmesini önlemek için PM düşük bir değere ayarlanabilmektedir. Genetik algoritmanın aşağıdaki akış şeması Şekil 2.11'de sunulmuştur.

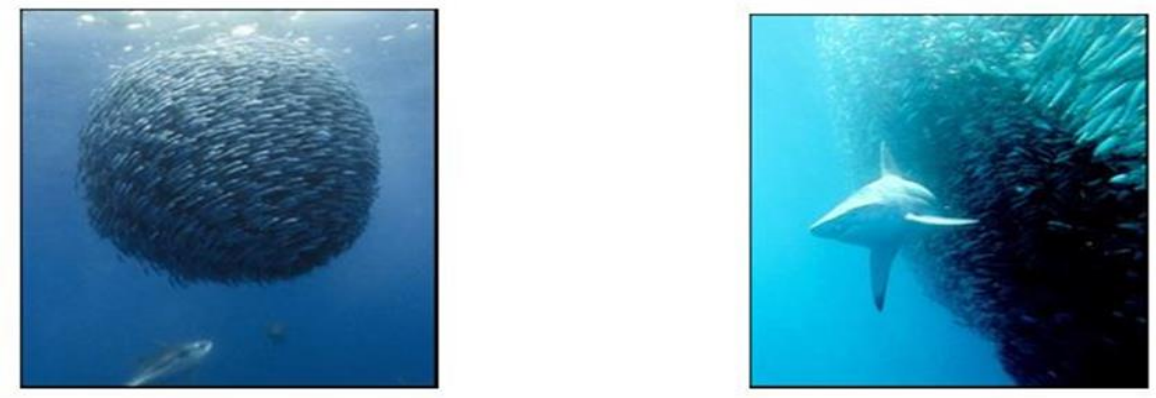


Şekil 2.11 Genetik algoritmanın akış şeması

2.6.2.2.2 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu, sosyal davranışın yeniden üretilmesine dayanan doğrusal olmayan fonksiyonlar için stokastik bir optimizasyon yöntemidir. 1995 yılında Dr. Russell Eberhart (elektrik mühendisi) ve Dr. James Kennedy (sosyal psikolog) tarafından geliştirilmiştir (Eberhart ve Kennedy 1995). Bu optimizasyon yöntemi, hayvan hareketlerinin kolektif davranışıyla yapılan bir analojiden doğmuştur. Dolayısıyla kuş grupları, balık sürüleri ve arı grupları gibi belirli hayvan gruplarının varlığı. Balık sürülerinde nispeten karmaşık hareket dinamikleri gözlemlenebilirken, bireylerin kendileri en yakın komşularının konumu ve hızı gibi çok sınırlı bilgiye erişebilmektedir. Örneğin, bir balık sürüsünün bir avcının saldırısından kaçınabildiğini gözlemleyebiliriz. Bu takım önce iki gruba ayrılacak ve daha sonra Şekil 2.12'de gösterildiği gibi takımı bir arada tutarak kendini yeniden inşa edecektir. Çevresel analize dayanan bu sosyal davranış, bu nedenle komşu bireylerin örüntülerini gözlemleyerek optimal bir arama yöntemidir. Her birey bir sonraki hamlesine karar vermek için sadece kendi hafızasını değil, aynı zamanda en yakın komşuları hakkındaki

yerel bilgileri de kullanmaktadır. Diğerleriyle aynı hızda hareket etmek, aynı yönde ilerlemek ve hatta komşularına yakın durmak gibi basit kurallar, tüm grubun uyumunu sağlamak için yeterli davranış örnekleridir. Bu karmaşık ve uyarlanabilir bir kolektif davranıştır (Kennedy ve Eberhart 1997).



Şekil 2.12 Balık sürüsünün şeması

Kennedy ve Eberhart, PSO algoritmasını oluşturmak için bu sosyal-psikolojik davranışlardan yararlanmıştır. Optimizasyon problemine yönelik bir grup potansiyel çözümü temsil eden bir parçacık sürüsü, küresel optimumu bulmak için arama uzayında hareket etmektedir. Bir parçacığın hareketi aşağıdaki üç bileşenden etkilenmektedir:

- Fiziksel bir bileşen: parçacık mevcut hareketin yönünü takip etme eğilimindedir, bu bileşen genellikle eylemsizlik bileşeni olarak adlandırılmaktadır.
- Bilişsel bir bileşen: parçacık mümkün olan en iyi yere ulaşmaya çalışmaktadır.
- Sosyal bir bileşen: parçacık, diğer parçacıkların deneyimleri üzerine inşa etmeye ve böylece komşuları tarafından zaten ulaşılmış olan en iyi yere gitmeye çalışmaktadır (Cooren 2008, El Dor 2012).

Birçok optimizasyon modeli veya tekniği ilhamını doğal sistemlerden ve olaylardan almaktadır. Çeşitli doğal sistemlere dayanan çok sayıda kolektif zekâ modeli son zamanlarda literatürde ortaya konmuş ve çok sayıda pratik uygulamada oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Kolonisi, Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu

(BA), Kedi Sürüsü Optimizasyonu (CSO), Yapay Bağışıklık Sistemi ve Glowworm Sürüsü Optimizasyonu kolektif zekâ modellerine (GSO) birkaç örnektir. En çok sevilen iki kolektif zekâ modeli olan bakteriyel besin arama optimizasyonu ve parçacık sürüsü optimizasyonu bu bölümün konusudur (Borase *et al.* 2020).

2.6.2.2.3 Bakteriyel besin arama optimizasyonu (BA)

Doğal seçilim, zayıf besin arama stratejilerine (besin bulma, taşıma ve yutma yöntemleri) sahip hayvanları eleme eğilimindedir ve başarılı üreme stratejilerine sahip hayvanlardan gelen genlerin yayılmasını teşvik etmektedir çünkü bu hayvanların başarılı üremeden (üremelerini sağlamak için yeterli besin elde etmek) faydalanma olasılıkları daha yüksektir. Birçok nesilden sonra, kötü besin arama stratejileri ortadan kaldırılmış veya iyi olanlara dönüştürülmüştür. Bu evrimsel ilkeler, bilim insanlarını besin arama faaliyetinin bir optimizasyon süreci olarak modellenmesi gerektiği varsayımına yönlendirmiştir (Saad *et al.* 2018).

Bu bölümde ilk olarak E. coli bakterisinin kemotaktik (besin arama) davranışının altında yatan biyoloji ve fizik ele alınmaktadır. Ardından, E. coli bakterilerinin besin ararken nasıl davrandıklarına dayanan algoritmik bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Bu yaklaşımın çeşitli aşırı fonksiyonları minimize veya maksimize etme problemini çözme yeteneği son bölümde gösterilmiştir.

Bakteriyel besin arama optimizasyonu (BA), Passino tarafından önerilen yeni bir evrimsel hesaplama yöntemidir. Bakterilerin davranışlarından esinlenilmiştir. Bakteriler, kemotaksis adı verilen bir aktivite yoluyla besin açısından zengin alanlarda kümelenme eğilimindedir. Bakterilerin, tersinir bir motor tarafından tahrik edilen, hücre duvarına gömülü kamçı benzeri bir kamçıyı döndürerek yüzdükleri bilinmektedir. E. coli, bir hücre gövdesinde rastgele dizilmiş 8-10 kamçıya sahiptir. Tüm kamçı saat yönünün tersine döndüğünde, hücreyi hareketlilik adı verilen bir yol boyunca sarmal bir şekilde ilerleten kompakt bir yapı oluştururlar. Kamçılar sağa döndüğünde bakterileri farklı yönlere fırlatarak aşağıya doğru düşmelerine neden olmaktadır. Bakteriyel besin arama sistemi temel olarak dört sıralı mekanizmadan oluşmaktadır: kemotaksis,

kaynaşma, üreme ve eliminasyon-dağılma. Bunlar aşağıdaki her bölümde kısaca açıklanmıştır (Mishra *et al.* 2004).

- Kemotaksis: Bir E. coli bakterisi kısa bir süre için yüzebilir veya takla atabilir ve yaşam döngüsü boyunca bu iki hareket arasında gidip gelmektedir. Takla BA'da rastgele bir yönde hareket eden bir yürüme birimi ile temsil edilmektedir ve bir hareket aynı yönde hareket eden bir yürüme birimi ile temsil edilmektedir. Aşağıda i'inci bakterinin kemotaksis hesaplamasındaki bir adımdan sonra nasıl hareket ettiği gösterilmektedir:

$$\theta^i(j+1,k,l) = \theta^i(j,k,l) + C(i) + \varphi(j) \quad (1)$$

Burada, $\theta^i(j,k,l)$ i-inci bakterinin j-inci kemotaksis adımındaki, k-inci üreme adımındaki ve l-inci eliminasyon ve dağılma adımındaki konumunu göstermektedir. $C(i)$, temel BA algoritmasında sabit olan yürüme biriminin uzunluğu ve $\varphi(j)$, j'inci adımın yön açısıdır. Faaliyet uygulandığında, $\varphi(j)$ $\varphi(j-1)$ ile aynıdır, aksi takdirde $\varphi(j)$ [0,2π] aralığında rastgele bir açıdır. Eğer $\theta^i(j+1,k,l)$'deki maliyet $\theta^i(j,k,l)$'deki maliyetten daha iyiyse, bakteri o yönde $C(i)$ büyüklüğünde bir adım daha atmaktadır, aksi takdirde geçiş yapmasına izin verilmektedir. Bu süreç, atılan adım sayısı kemotaksis döngülerinin (NC) sayısını aşana kadar devam etmektedir (Boukerma 2021).

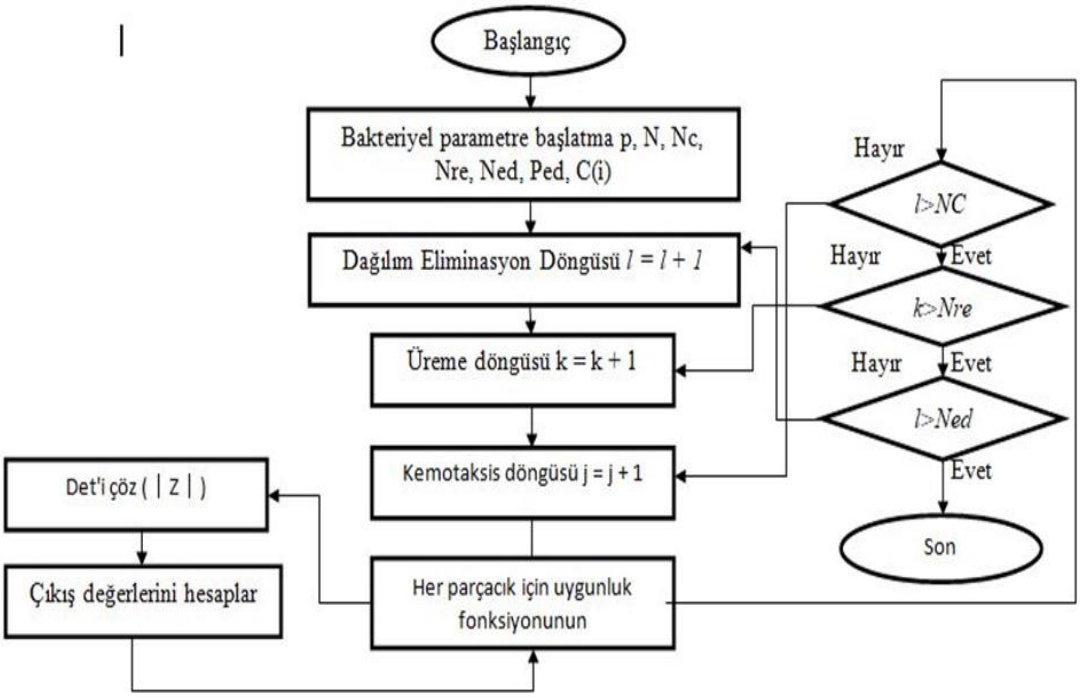
- Kaynaşma: Bakteriler, başları dertte olduğunda diğer bakterileri uyarmak için cezbedici maddeler yaymaktadır. Her bakteri aynı zamanda diğerlerini kendisine mümkün olduğunca yakın durmaları konusunda uyarmak için bir itici salgılar. Her birinin cezbedicinin çekeceği bir hücresi ve iticinin iteceği bir hücresi olacaktır. Bir E. coli sürüsündeki sinyal hücreleri matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$J_{cc}(\theta, P, (j,i,l)) = \sum_{i=1}^{N} J_{cc}(\theta, \theta^i(j,i,l)) \quad (2)$$

$$J_{cc}\left(\theta, P, (j,i,l)\right) = \sum_{i=1}^{N}[-d_a\, exp(w_a \sum_{m=1}^{P}(\theta_m - \theta_m^i)^2)] + \sum_{i=1}^{N}[-h_r\, exp(-w_r \sum_{m=1}^{P}(\theta_m - \theta_m^i)^2)] \quad (3)$$

Burada $J_{cc}\left(\theta, P, (j,i,l)\right)$ gerçek amaç fonksiyonuna eklenecek amaç fonksiyonunun değerini, N toplam bakteri sayısını, p optimize edilecek değişken sayısını ve $\theta = [\theta 1, \theta 2, \ldots, \theta p]^T$ p boyutlu arama uzayında bir noktayı temsil etmektedir. (da, wa, hr ve wr) doğru seçilmesi gereken katsayılardır. (Amir 2014).

- Üreme: Tüm Nc kemotaksis adımları tamamlandıktan sonra bir replikasyon adımı gerçekleşir. Bakterilerin uygunluk değerleri artan şekilde sıralanmıştır. Daha yüksek uygunluk değerine sahip bakterilerin alt yarısı ölür ve kalan bakteriler (Nr = N/2) iki özdeş bakteriye bölünebilir. Bu şekilde, üreme sonrası nüfus büyüklüğü sabit tutulmaktadır.
- Eliminasyon ve dağılım: Yerel bir minimumda takılıp kalma potansiyelini önlemek için bakterileri kademeli olarak veya aniden çeşitlendirmek hayati önem taşır çünkü bakteriler optimum başlangıç veya yerel konumlar etrafında takılıp kalabilmektedir. Bir dizi üreme olayından sonra dağılma süreci gerçekleşmektedir. Belirli bir P olasılığına göre, bir bakteri yayılmak ve ortamdaki başka bir alana geçmek için seçilmiştir. Bu olaylar, yerel minimumların başarılı bir şekilde yakalanmasını önlemeye katkıda bulunabilmektedir, ancak aynı zamanda optimizasyon sürecini istemeden de olsa durdurmaktadır. Bu fikrin incelikleri aşağıdaki Şekil 2.13'te gösterilmektedir (Parvandeh 2013).



Şekil 2.13 Bakteriyel algoritmanın akış şeması

- P: Arama uzayının boyutu,
- N: popülasyondaki bakteri sayısı,
- Nc: kemotaktik adımlar,
- Nre: üreme aşamalarının sayısı,
- Ned: dağılma eliminasyon olaylarının sayısı,
- Ped: bir olasılıkla eliminasyon dağılımı,
- C (i): takla tarafından belirtilen rastgele yönde atılan adımın boyutu.

2.6.3 Optimizasyon yöntemi seçimi

Optimum optimizasyon yaklaşımı veya yöntemi nedir, yani böyle bir problem için hangi yöntem uygundur? Bana göre, bir kullanıcının küresel bir optimizasyon problemiyle karşılaştığında atması gereken ilk adım problemi tanımlamaktır, yani problem için en uygun yöntem hangisidir? (Kouba 2017).

- Optimize edilecek fonksiyonla ilgili varsayımlar.

- Araştırma alanı ile ilgili varsayımlar.
- CPU süresi, gerekli alt yordam sayısı vb. gibi fonksiyonu değerlendirmenin maliyeti.
- Değerlendirme kolaylığı.
- Problemde mevcut olan kesinlik.

Böylece, incelenen problemin ayrıntılarını bilmenin kullanıcının görevini kolaylaştırabileceğini ve seçiminde ona rehberlik ederek hedeflerini buna göre belirlemesine olanak sağlayabileceğini görebiliriz. Ne yazık ki, tek bir optimizasyon yöntemi tüm durumlarla etkili bir şekilde başa çıkamamaktadır. Wolpert ve Macready, tüm olası optimizasyon problemleri göz önünde bulundurulduğunda hiçbir algoritmanın diğerinden daha iyi olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, bir algoritma veya diğerinin seçimi genel test durumları üzerinde karşılaştırma yapılarak yapılmamalıdır. Optimizasyon algoritmaları arasındaki karşılaştırma ancak çözülmesi gereken problem, yani amaç fonksiyonu belirlendikten sonra yapılabilmektedir. Optimizasyon sadece matematiksel bir teori değil, aynı zamanda kullanıcının hangi algoritmayı uygulayacağı konusunda deneyimle yönlendirildiği bir tür algoritmik mutfaktır. Bir problem için en uygun yöntem seçilirken dikkate alınan temel özellikler şunlardır:

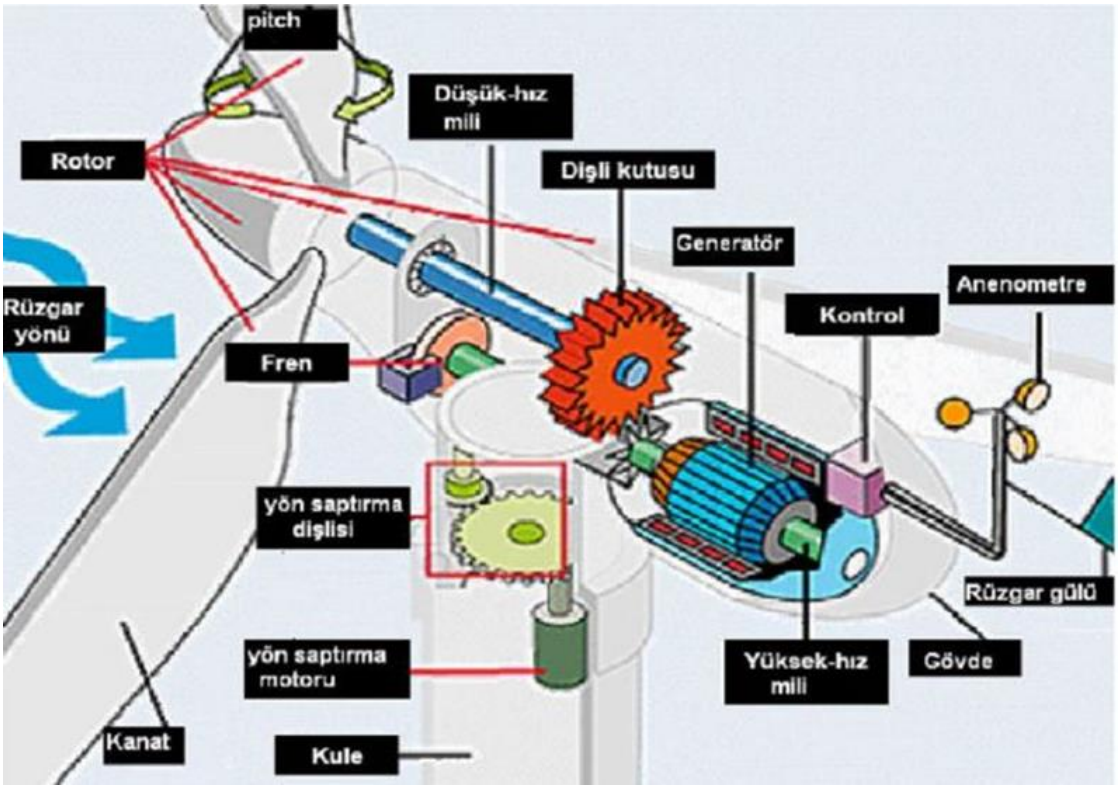
- Yerel minimumlardan kaçınma yeteneği.
- Bir optimumun sağlamlığı.
- Tek veya çok amaçlı problemlerle başa çıkabilme becerisi
- Yakınsama hızı.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde rüzgâr türbininin iç yapısından ve kullanılabilecek farklı jeneratörlerden bahsedilmektedir. Daha sonra Matlab simülasyonunda rüzgâr türbininin matematiksel denklemlerinin ifadeleri açıklanmıştır. PI ve PID kontrolörlerinin katsayılarının Nichols-Ziegler yöntemi ile hesaplandığı gösterilmiştir. Son olarak, genetik ve bakteriyel algoritmalar kullanılarak rüzgâr türbininin optimizasyonu ve PID kontrolör katsayılarının ayarlanması açıklanmaktadır.

3.1 Rüzgâr Türbinin Bileşenleri

Rüzgâr türbinlerinin bileşenleri farklı parçalardan oluşabilmektedir, ancak bazı unsurlar tüm rüzgâr türbinlerinde ortaktır. Şekil 3.1'de bir rüzgâr türbininin temel unsurları gösterilmektedir (Civelek 2013).



Şekil 3.1 Rüzgâr türbininin bileşenleri

3.1.1 Rotor

Rotor birkaç kanattan (genellikle üç) ve türbinin burnundan oluşmaktadır. Bıçaklar artık hem hafif hem de yeterli sertlik ve dayanıklılık sunan kompozit malzemelerden (fiberglas ve/veya fiber takviyeli polyester-karbon) yapılmaktadır. Rotorlar genellikle 30 ila 55 metre uzunluğunda ve rotor çapı 60 ila 110 metre arasındadır. Bir rüzgâr türbininin gücü, kanatları tarafından süpürülen alanla, yani rotor çapının karesiyle orantılıdır (Redjem 2009).

Kanatlar: Rüzgâr türbininin kanatları rüzgâr hızını yakalamaktadır ve en önemli unsurlardan biridir. Kanatlar rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Kanatların sayısı ve aerodinamikleri rüzgârdan elde edilebilecek gücü belirlemektedir. Bıçaklar uzunlukları, genişlikleri ve profilleri ile karakterize edilmektedir (Langlois 2006).

3.1.2 Kule

Genellikle metalden yapılmaktadır ve elektrik üretmek için kullanılan tüm ekipmanları (nasel, rotor, jeneratör, vb.) taşımaktadır. Zemine döşenen bir temele tutturulur, ağır bir beton temel ile sabitlenir ve stabilize edilir. Farklı yüksekliklerde olabilmektedir. Günümüzde bir rüzgâr türbininin kulesi, en güçlü olanları için 80 m yüksekliğe ulaşmaktadır. İstisnai olarak 100 m'ye kadar ulaşabilmektedirler (Bencharif 2013).

3.1.3 Nasel

Dişli kutusu: Rüzgâr türbininin en önemli bileşenlerinden biri dişli kutusudur. Jeneratör ile kanatlar arasında yer almaktadır. Jeneratörün nominal hızında çalışabilmesi için rotor milinin hızını artırmaktadır (Zerari 2015).

Elektrik jeneratörü: Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Rüzgâr türbinlerinde genellikle dört tip jeneratör kullanılmaktadır (senkron jeneratörler,

asenkron jeneratörler, çift beslemeli jeneratörler ve sincap kafesli jeneratörler). Jeneratörler iki kısma ayrılmaktadır (stator sabit kısımdır ve rotor dönen mekanizmanın hareketli kısmıdır) (Gaagaa 2012).

Anemometre ve rüzgâr gülü: Rüzgâr hızını ve yönünü ölçer. Daha sonra alınan bilgileri elektronik kontrol ünitesine iletmektedirler.

Fren: Yüksek rüzgâr durumunda türbin kanatlarını anında durduran ünitedir. Bu çalışmada, rüzgâr hızı 25 m/s'yi aştığında fren tüm sistemi durdurmaktadır.

Saptırma dişlisi: Türbin kanatlarının rüzgâr yönünde döndürülmesi daha fazla mekanik güç üretmektedir.

Düşük hızlı şaft: Rüzgâr türbini rotor kanatlarının rüzgârdan aldığı kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren şafttır.

Yüksek hızlı mili: Bu, dişli kutusundan sonraki jeneratör milidir.

Elektronik kontrolör: Rüzgâr türbininin farklı parçalarını elektronik kontrol eden parçadır.

Kanat aktüatörü: Bu, kanatların kendi kendine dönmesini sağlayan bir mekanizmadır.

Gövde: Bu, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren tüm ekipmanları içeren kısımdır.

3.2 Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler

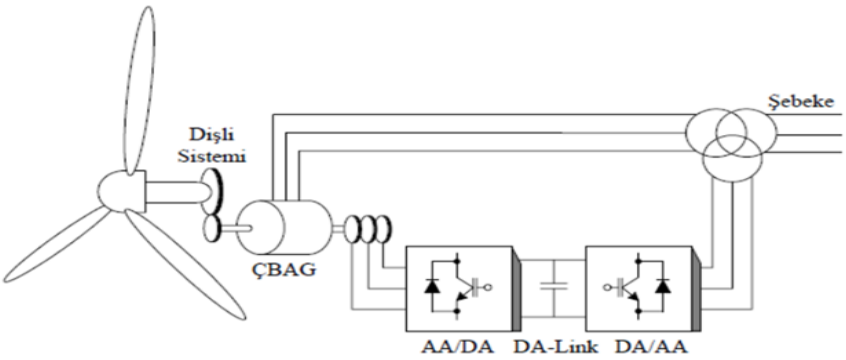
Rüzgâr türbinlerinde kullanılabilecek birçok jeneratör vardır. Her jeneratörün kendine özel avantajları ve dezavantajları vardır. Kullanılan farklı jeneratörler aşağıda açıklanmaktadır.

3.2.1 Asenkron jeneratörler (AJ)

Alternatif akım üretmek için üç fazlı asenkron jeneratörler veya endüksiyon jeneratörleri kullanılmaktadır. Asenkron jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Bu dönüşümü gerçekleştirmek için, senkronizasyon hızının üzerinde sürülmelidir. Bu tip jeneratörler, rüzgâr türbini endüstrisi ve küçük hidroelektrik santralleri dışında yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu jeneratörlerin güvenliği ve düşük maliyeti diğer jeneratörlere göre tercih sebebidir (Lüy *et al.* 2017).

3.2.2 Çift beslemeli asenkron jeneratörler (ÇBAJ)

Bu tür bir jeneratörde stator doğrudan şebekeye bağlanırken, rotor sargıları güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır (Boyette 2006). Bu dönüştürücüler, çift yönlü akım akışına sahip, darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile anahtarlanan iki gerilim kaynaklı invertörden oluşmaktadır. Şebeke tarafı dönüştürücü (ŞTD) DC bara voltajını sabit tutarken, rotor tarafı dönüştürücü (RTD) elektromanyetik tork kontrolü sağlamaktadır. Aynı zamanda RTD, jeneratörün gerektirdiği reaktif gücü de sağlayabilmektedir (Kılıçaslan 2015). ÇBAJ'ın rotor ve stator devrelerindeki üç fazlı sargılara rotor ve statordan enerji verilebilir veya enerjileri kesilebilir. Bu tür bir jeneratör, reaktif güç kontrolüne izin verdiği ve şebeke bağlantısı olmadan çalışabildiği için tercih edilmektedir (Zaimi 2014). ÇBAJ tarafından üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'u rotor tarafından sağlandığından, dönüştürücüler çok az gücü kontrol etmektedir ve geri kalan %70'i stator aracılığıyla doğrudan şebekeye verilmektedir. Bu, güç elektroniğinin boyutunu ve maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır (Sanchez and Ruiz-Cruz 2016).



Şekil 3.2 ÇBAJ rüzgâr türbin sistemi modeli

3.2.3 Doğru akım jeneratörleri (DAJ)

Doğru akım jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Bir bobin, bir mıknatısın manyetik alanında dönmektedir. Her devirde akım bobinde yön değiştirmektedir. Bir komütatör, akımın devre boyunca her zaman aynı yönde akmasını sağlamaktadır. Doğru akım jeneratörlerin hızı kolayca kontrol edilebildiğinden, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Doğru akım jeneratörler şebekeden bağımsız ve küçük kapasiteli rüzgâr türbinlerinde kullanım için tercih edilmektedir (Uyar *et al*. 2005).

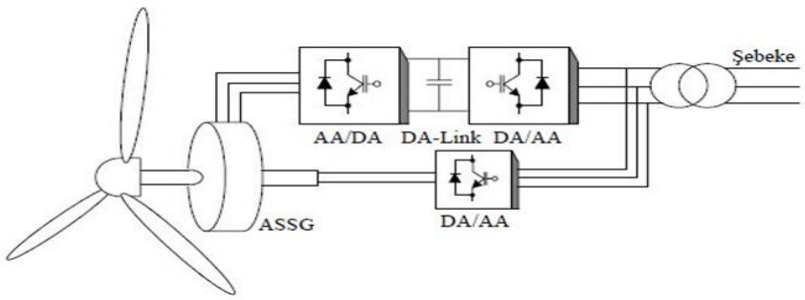
3.2.4 Senkron jeneratörler (SJ)

Senkron jeneratör bir elektrik makinesidir. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Senkron makine dönen bir parça (rotor) ve sabit bir parçadan (stator) oluşmaktadır. Düşük güç için rotor, örneğin saatlerde veya bilgisayar sabit disklerinde olduğu gibi sabit mıknatıslardan oluşmaktadır, ancak yüksek güç için bir elektromıknatıs kullanılmaktadır. Frekansı rotorun dönme hızına göre belirlenen bir elektrik akımı üretmektedir. Üç fazlı bir sargıdır ve stator yapısı asenkron jeneratörlerinkine benzemektedir. İndüksiyon makinelerinin aksine, uyarma hava aralığının dönen alanından bağımsız olarak üretilmektedir. Rotor üzerinde uyarma alanının oluşturulduğu kutuplar vardır. Sabit mıknatıslar kullanılarak, uyarma sargıları ile uyarma manyetik alanı elde edilebilmektedir. Senkron jeneratörler uyarma tiplerine göre iki sınıfta incelenebilmektedir. İki tip senkron jeneratör vardır: Birinci tip "Alan

Sargılı" veya "Rotor Sargılı", ikinci tip ise rüzgâr türbinlerinde kullanılan "Sabit Mıknatıslı senkron" jeneratörlerdir (Patel and Beik 1999).

3.2.4.1 Alan sargılı senkron jeneratörler (ASSJ)

Manyetik alanı oluşturmak için, bu jeneratörlerin rotorlarında uyarma sargıları vardır. Böylece makinenin hareketli parçası olan rotorda üretilen manyetik alan kutup sargısında yer almaktadır. Kutup sargısı doğru akımla beslenmektedir ve genliği sabit olan ve hava aralığında zamanla değişmeyen bir "doğrudan manyetik alan" üretmektedir. Bu manyetik alan, rotor döndükçe stator sargısının düzlemlerinden farklı açılarda geçer ve bir gerilim oluşturmaktadır. Bu sargıda bir alternatif gerilim gerilimi indüklenmektedir. ASSJ'yi şebekeye bağlamak için dört bölgeli bir invertör kullanılmaktadır. Dört bölgeli güç invertörü, arka arkaya bağlı iki çift yönlü invertörden oluşmaktadır ve stator sargısı DGM tarafından anahtarlanabilmektedir. Alan sargısı, kontrol edilebilir bir AA/DA invertör ile şebekeye bağlanmaktadır. Şekil 3.3 şebekeye bağlı değişken hızlı alan sargılı senkron jeneratörü göstermektedir. Şebeke tarafı invertörü bu sistem tarafından üretilen aktif ve reaktif gücü kontrol ederken, stator tarafı invertörü elektromanyetik momenti kontrol etmektedir (Patel ve Beik 1999).



Şekil 3.3 Değişken hızlı alan sargılı senkron jeneratör

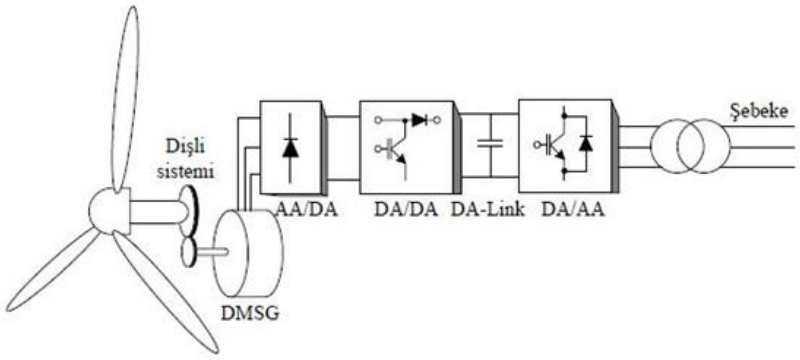
3.2.4.2 Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler (SMSJ)

Bu çalışmada, MATLAB/SİMULİNK'te modelleme için sürekli mıknatıslı bir senkron jeneratör kullanılmıştır. Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler (SMSJ), herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan kendi kendine uyarıldıkları için rüzgâr türbini

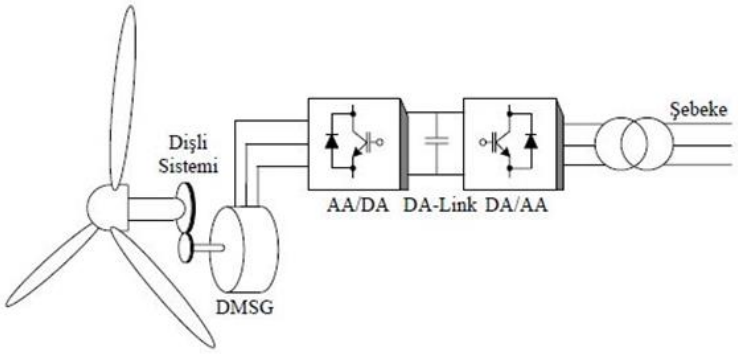
uygulamalarında tavsiye edilmektedir. En büyük avantajı, her hızda güç üretebilmesidir. Düşük bakım maliyetine sahiptir ve küçük ve hafif uygulamalar için uygundur. Jeneratörün hızı dişli kutusu kullanılmadan kontrol edilebildiği gibi dişli sistemi ile kullanılan modelleri de mevcuttur (Yin *et al.* 2007). Sabit mıknatıslı bir senkron jeneratörün rotoru sabit mıknatıslarla donatılmıştır ve stator sarılmıştır. En yaygın kullanılan tipler çapraz akı, radyal akı ve eksenel akıdır. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler başlangıç senkronizasyonu ve voltaj regülasyonu ile ilgili bazı sorunlara neden olabilmektedir (Rolan *et al.* 2009). Ayrıca sabit mıknatısların fiyatları çok yüksektir. SMSJ'lerin bir diğer dezavantajı ise mıknatısların manyetik özelliklerinin sıcaklıkla birlikte değişmesidir. Mıknatısların kısa devre durumunda ve yüksek sıcaklıklarda manyetik özelliklerini kaybettikleri bilinmektedir. SMSJ rotorunun sıcaklığını kontrol etmek önemlidir, bu nedenle soğutma sistemleri ile kontrol etmek gerekmektedir. (Patel ve Beik 1999).

Şekil 3.4'te sabit mıknatıslı senkron jeneratörün (SMSJ) rüzgâr sistemi gösterilmektedir. Sistem üç fazlı bir doğrultucuya ve ardından bir DA-DA yükseltici kıyıcıya bağlanmıştır. DA-DA kıyıcı elektromanyetik torku kontrol etmektedir. DA/AA dönüştürücü güç faktörünü kontrol eder ve ayrıca DA bağlantısının gerilimini regüle etmektedir. Bu yapı esas olarak küçük rüzgâr enerjisi sistemlerinde uygulanmaktadır.

Şekil 3.5, önceki SMSJ jeneratöründen farklı bir yapıyı göstermektedir. Bu sistemde, jeneratör ile DA bağlantısı arasına bir doğrultucu yerleştirilmiştir. PWM tekniği kullanan bu doğrultucu, invertör aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır. Bu sistemin avantajı saha kontrolünün kullanılmasıdır. Saha kontrolü, jeneratör ve güç elektroniğindeki kayıpları azaltmaktadır ve en iyi çalışma noktasına yakın çalışmayı sağlamaktadır. Bununla birlikte, jeneratör parametreleri sıcaklık veya frekansla değişirse, sistemin performansı da değişmektedir (Husain and Tariq 2014).



Şekil 3.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratör yapısı



Şekil 3.5 Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratör farklı yapısı

3.2.4.2.1 Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörün matematiksel modeli

Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratörün matematiksel modeli şöyle ifade edilmiştir.

$$V_q = Ri_q + L\frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d - \omega_e \lambda_m \quad (4)$$

$$V_d = Ri_d + L\frac{di_d}{dt} - \omega_e L_d i_q \quad (5)$$

$$T_g = J\frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_m \quad (6)$$

$$T_g = \frac{3P_p \lambda_m}{2} i_q \quad (7)$$

$$\theta_e = P_p \theta_r \quad (8)$$

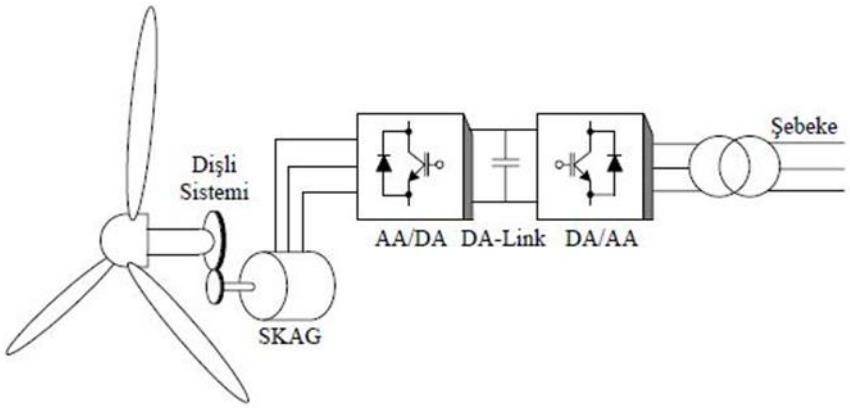
Burada, θ_r rotor konumu, ω_r rotor açısal hızı, V_d, V_q, i_d, i_q, d ve q ekseni gerilimleri ve akımları, T_g, T_m, θ_e generatör momenti, mekanik moment ve elektriksel konum, λ_m, P_p, J, B sırası ile mıknatıs akısı, kutup çifti, atalet momenti ve sürtünme sabitidir (Karabacak ve Kılıç 2017).

3.2.5 Sincap kafesli asenkron jeneratörler (SKAJ)

Rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılan bir başka jeneratör de Şekil 3.6'da gösterilen sincap kafesli asenkron jeneratördür (SKAJ). Bu sistemde stator sargısı DA bağlantısının her iki tarafına arka arkaya bağlanan iki gerilim kaynaklı DGM invertörden oluşan dört bölgeli bir güç dönüştürücü aracılığıyla şebekeye bağlanmıştır. Stator tarafı invertör kontrol sistemi, makinenin bir manyetik alan oluşturması ve elektromanyetik torku düzenlemesi için reaktif güç sağlamaktadır. Şebeke tarafı dönüştürücü DA bağlantısının yanı sıra sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü regüle etmektedir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılan sincap kafesli indüksiyon jeneratörünün avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Sincap kafesli asenkron jeneratörler güvenilir, ekonomik, fırçasız ve sağlam olmaları nedeniyle pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Doğrultucu, jeneratör için programlanabilir uyarım üretebilmektedir.
- İnvertör bir harmonik kompansatör olarak kullanılabilmektedir.

Bu sistemin dezavantajları, jeneratör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişmesidir, bu da sistemi kontrol etmeyi zorlaştırmaktadır. Stator tarafında makineye gerekli manyetik alanı sağlayabilmek için nominal gücünden %30-50 daha büyük boyutlarda yapılmaktadır. Ayrıca yukarıda açıklanan jeneratörler dışında; çift hızlı asenkron jeneratörler, çift fırçasız jeneratörler ve değişken relüktanslı jeneratörler de bazen rüzgâr enerjisi sistemlerinde özel uygulamalar için kullanılmaktadır (Uyar *et al.* 2005).



Şekil 3.6 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör (SKAJ)

3.3 Rüzgâr Enerji Sistemin Bütün Denklemleri

Rüzgâr enerjisi sistemlerinde çeşitli denklemler vardır ve bunlar aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Mekhiche 2012):

Rüzgârın kinetik gücü (P), denklem (9)'da verilen rüzgâr hızı (V) ile orantılıdır.

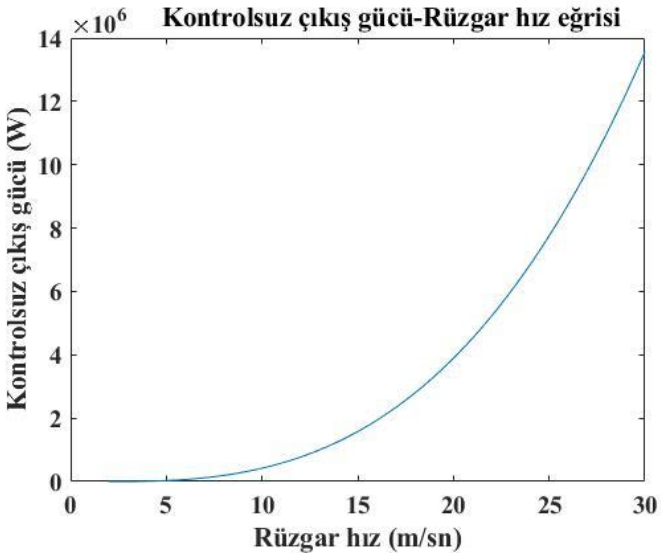
$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 \tag{9}$$

Burada ρ, V ve R sırasıyla 15℃ sıcaklığa ve 1bar atmosfer basıncına eşit hava yoğunluğu ρ=1.225 kg/m^3, rüzgâr hızı V (m/sn) ve kanatlar tarafından süpürülen alan $A = \pi R^2$ (m^2)'dir.

Bir rüzgâr türbininin mekanik çıkış gücü, rüzgâr hızının küpü ve kanat yarıçapının karesi ile orantılıdır. Bir rüzgâr türbininin mekanik çıkış gücü denklem (10)'da verilmiştir.

$$P_m = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3 C_p(\beta,\lambda) \tag{10}$$

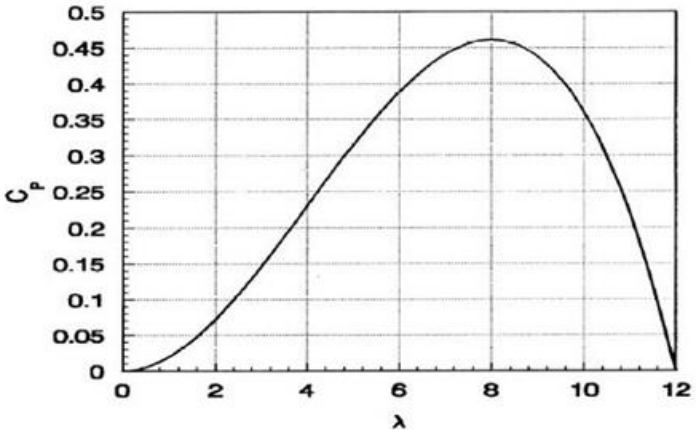
Bir rüzgâr türbininin çıkış gücü herhangi bir kontrolör olmadan şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Rüzgâr hız-Kontrolsüz çıkış gücü eğrisi

3.3.1 Rüzgâr türbinin güç katsayısı

Betz limitine göre güç katsayısı 0,59'u geçememeyip maksimum %59'u enerjiye dönüştürülebilir (Boukhezzar 2006). Şekil 3.8, Cp'nin λ ve (β)'nın bir fonksiyonu olarak değişim grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.8 C_p- λ eğrisi

Rüzgâr türbinin güç katsayısı C_p, denklem (11)'de verilmiştir. C_p Değeri, denklem (12)'de ve denklem (14)'te kullanılarak C_p hesaplanmıştır

Rüzgâr türbininin güç katsayısı (C_p) denklem (11)'de verilmiştir. C_p değeri denklem (12) ve (14) kullanılarak hesaplanmıştır. (Sarkar *et al.* 2020).

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5\right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (11)$$

Lamda_i'nin denklemini şöyle denklem (12)'de ifade edilmiştir.

$$(\text{Lamda}_i)\ \lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}\right)^{-1} \quad (12)$$

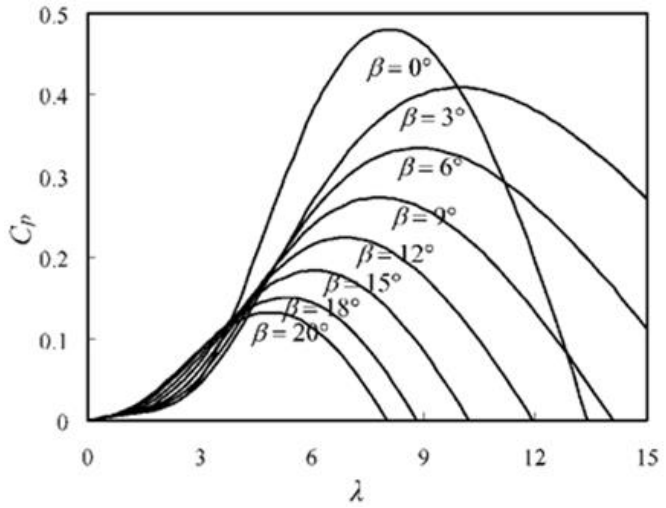
Lamda_i'nin başka bir şekilde ifade edilirse denklem (13)'te verilmiştir.

$$\text{Lamda_i}\ \frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}\right) \quad (13)$$

Kanat uç hız oranı (TSR) Denklem (14)'te verilmiştir.

$$(\text{Lamda})\ \lambda = \frac{\Omega R}{V_{ref}} \quad (14)$$

Şekil 3.9'da hatve açısının farklı değerleri için güç katsayısı ve tepe hız oranının değişim eğrilerini göstermiştir.



Şekil 3.9 Farklı β değerleri için C_p-λ grafiği

3.3.2 Aerodinamik tork

Rüzgâr türbininin aerodinamik torku denklem (15)'te verilmiştir.

$$T_m = \frac{P_m}{\Omega} \tag{15}$$

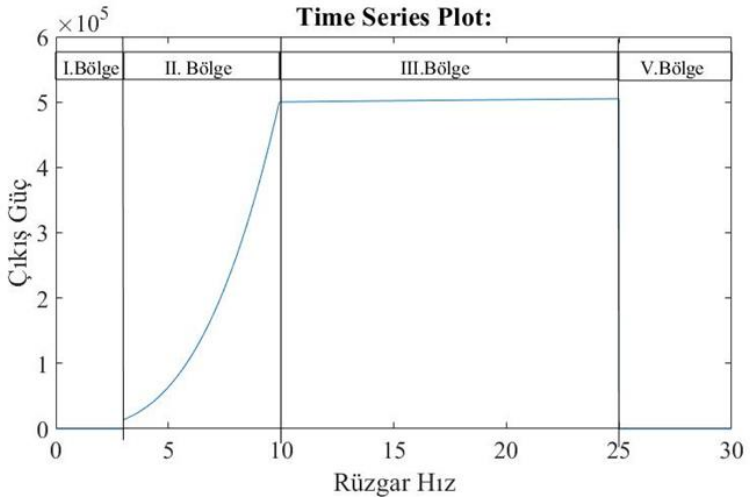
Denklem (10) ve denklem (14)'ün yerine konulmasıyla aerodinamik tork denklem (16)'da verilmiştir.

$$T_m = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 V^2 \frac{C_p(\beta,\lambda)}{\lambda} \tag{16}$$

3.3.3 Rüzgâr türbinleri çalışma bölgeleri

Rüzgâr türbininin çalışma bölgeleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Rüzgâr türbininin çıkış gücü dört bölgeye ayrılmaktadır. Bölge I, "cut-in" olarak adlandırılmaktadır ve bu bölgede çıkış gücü sıfırdır (rüzgâr hızı V≤3m/sn). Bölge II, sıfır ila nominal çıkış gücü arasındaki bir bölgedir (rüzgâr hızı 3 ila 12m/sn arasındadır). Bölge III, rüzgâr türbininin çıkış gücünün nominal güce eşit olduğu bölgedir (rüzgâr hızı 12 ila 25m/sn arasındadır). Son olarak bölge IV, "cut-out" olarak adlandırılmaktadır ve bu bölgede

rüzgâr hızı sınır aşamasındadır (V≥25m/sn), bu nedenle türbin güvenlik nedeniyle durdurulmaktadır.



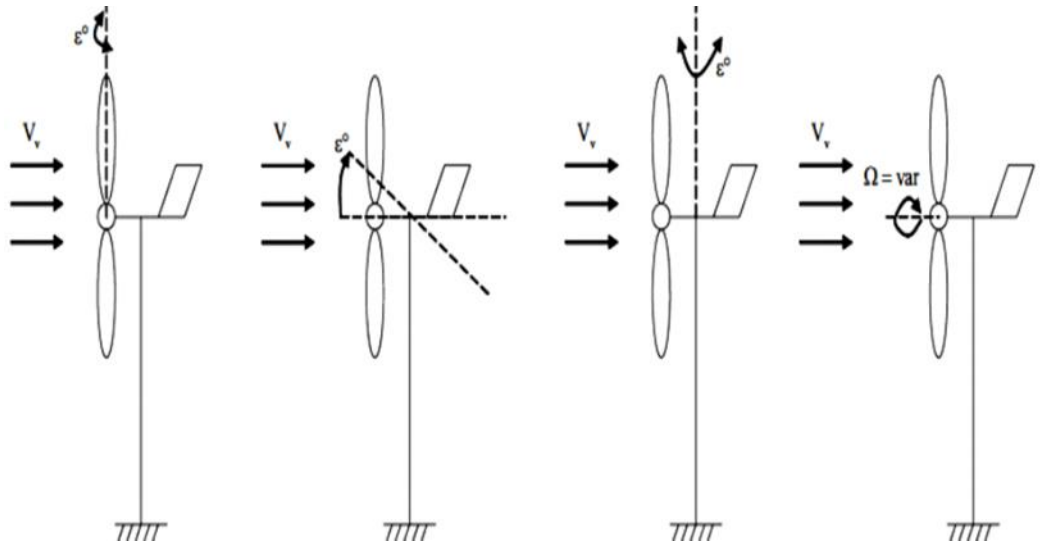
Şekil 3.10 Rüzgâr türbini çalışma bölgeleri

3.4 Rüzgâr Türbini Kontrolörü

Yüksek rüzgâr değerlerinde bir rüzgâr türbininin çıkış gücü sınırlamanın dört yolu vardır ve bunlar Şekil 3.11'de gösterilmiştir (Senjyu *et al.* 2006).

- ✓ Bu tekniklerden ilki "pitch angle" adı verilen oldukça pahalı ve karmaşık bir aktif tekniktir ve bu nedenle çoğunlukla orta ve yüksek güçlü değişken hızlı sistemlerde kullanılmaktadır. Kanatların kendi eksenleri üzerindeki açısal konumunun mekanik olarak ayarlanması ve böylece kanadın güç katsayısı eğrisinin dinamik olarak değiştirilmesinden oluşmaktadır.
- ✓ İkinci teknik pasif "kırılma" tekniğidir. Kanatların şeklinin, yüksek rüzgâr hızlarında kanatlardan geçen hava akışının dinamik olarak serbest kalmasını sağlayacak şekilde tasarlanmasından oluşmaktadır.
- ✓ Yukarıda bahsedilen iki teknolojinin kombinasyonları da bulunmaktadır.
- ✓ Gücü sınırlamanın üçüncü yolu, rotor eksenini dikey düzlemde (nasel eğerek) veya yatay düzlemde (direk ekseni etrafında dönerek) saptırmaktır. Bu, türbinin

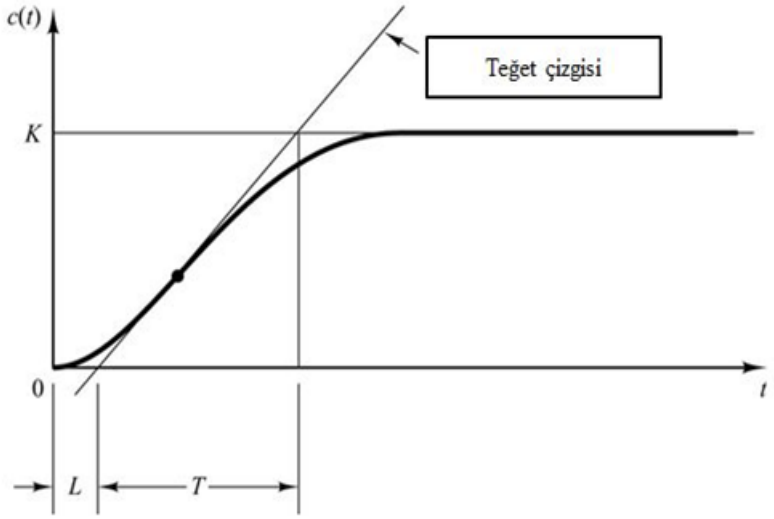
artık rüzgâra dönük olmadığı ve türbinin aktif yüzeyinin azaldığı anlamına gelmektedir. (Johnson 2006).



Şekil 3.11 Rüzgâr enerjisinin sınırı

3.4.1 PI ve PID kontrolör tasarım

İki sistem vardır: "açık döngü sistemi" ve "kapalı döngü sistemi". Şekil 3.12, açık çevrimli bir sistemde PI veya PID kontrolörün katsayılarını hesaplamak için kullanılmaktadır. L ve T değerleri, Matlab simülasyonundaki çıkış gücü eğrisi görüntülenerek belirlenmektedir. Daha sonra Çizelge 3.1 kullanılarak kontrolör katsayıları kolayca hesaplanabilmektedir (Ruge Ruge 2011).



Şekil 3.12 PI ve PID kontrolör açık döngü katsayıları L ve T eğrisi

Çizelge 3.1 PI ve PID açık döngü katsayıları hesaplanması

Kontrolör	$\mathbf{K_p}$	$\mathbf{T_i=K_p/K_i}$	$\mathbf{T_d=K_d/K_p}$
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	2L	0.5L

Bu çalışmada, kullanılan sistem kapalı çevrim olduğu için PI veya PID kontrolörün katsayıları Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ku ve Tu değerleri Matlab simülasyonunda görselleştirilmiş ve daha sonra Çizelge 3.2 kullanılarak kontrolör katsayılarının değerleri hesaplanmıştır.

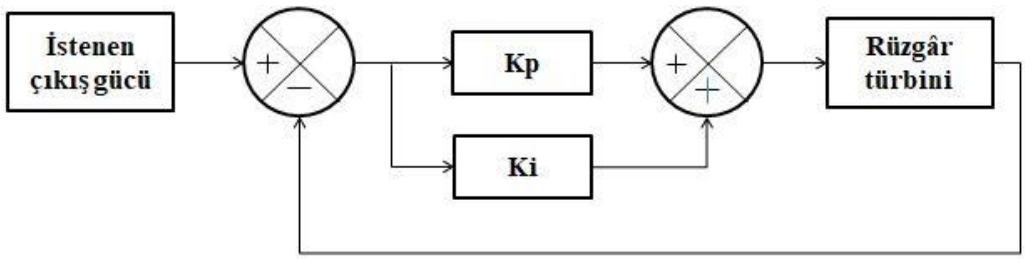
Çizelge 3.2 PI ve PID kapalı döngü katsayıların hesaplanması

Kontrolör	$\mathbf{K_p}$	$\mathbf{K_i}$	$\mathbf{K_d}$
P	$0.5\ K_u$	0	0
PI	$0.45\ K_u$	$\frac{1.2K_p}{T_u}$	0
PID	$0.6\ K_u$	$\frac{2K_p}{T_u}$	$\frac{K_pT_u}{8}$

3.4.2 PI ve PID kontrolörlerinin transfer fonksiyonları

- PI kontrolörün transfer fonksiyonu Şekil 3.13'te verilmiştir. Kontrolörün integral parçası, kontrolöre giriş sinyali üretmektedir. PI kontrolörü, sistemin kararlı durum hatasını bir derece iyileştirmektedir (Hwas ve Katebi 2012). PI kontrolörün transfer fonksiyonu denklem (17) ile verilmiştir. PI kontrolörü katsayı olarak sadece Kp ve Ki parametrelerini içermektedir.

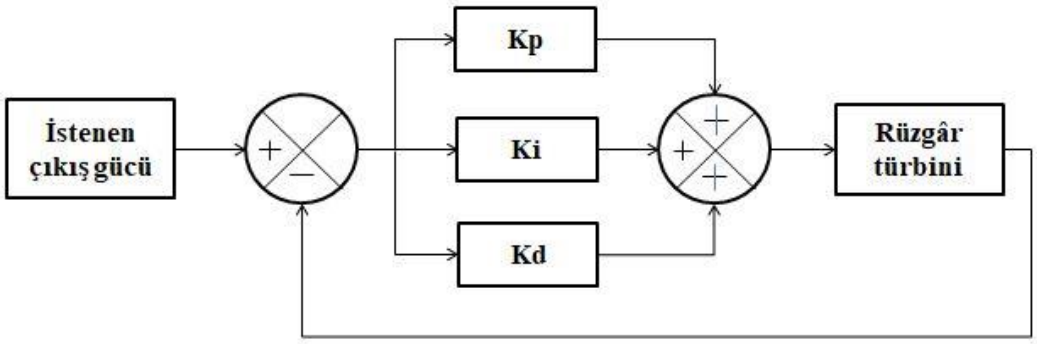
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \tag{17}$$



Şekil 3.13 PI kontrolörün transfer fonksiyonu

- PID kontrolörü Kp, Ki ve Kd'den oluşmaktadır ve transfer fonksiyonu Şekil 3.14'te verilmiştir. PID kontrolörün integral kısmı, kontrolör giriş sinyalinin zaman integrali ile orantılı bir sinyal üretmektedir (Baburajan 2017). PID kontrolörün transfer fonksiyonu denklem (18) ile verilmiştir.

$$G_c(S) = K_P + K_d S + \frac{K_i}{S} \quad (18)$$



Şekil 3.14 PID kontrolörün transfer fonksiyonu

3.4.3 Rüzgâr türbini kontrolörü optimizasyonu

Farklı optimizasyon yöntemleri vardır: yapay zekâ optimizasyon algoritmaları (Ateşböceği Sürüsü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Yapay Balık Sürüsü Algoritması, Bakteriyel Besleme Optimizasyon Algoritması, Kurt Kolonisi Algoritması) sunulmaktadır. Bu tezde, rüzgâr enerjisi sistemi optimizasyonu için bakteriyel besin arama (BA) algoritmaları ve genetik algoritmalar aşağıda açıklanmaktadır (Kim *et al.* 2015).

Genetik algoritmalar, doğal seçilim ve genetiğin evrimsel fikirlerine dayanan uyarlanabilir sezgisel yöntemlerdir. Bu nedenle, optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan rastgele aramanın akıllı bir kullanımını temsil etmektedir. Bir nesilden diğerine evrim üç operatörün kullanımına dayanmaktadır; popülasyonun tüm elemanlarına uygulanan seçim, çaprazlama ve mutasyon. Bu sürecin başlangıç popülasyonu, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere rastgele oluşturulmuş üç bölümü vardır. Sürecin ilk adımında, genetik algoritmanın başlangıç popülasyonu rastgele çözümler üretmektedir. İkinci adımda, rastgele sayı yeni bir yavrunun çaprazlanmasına yardımcı olmaktadır. Üçüncü adımda, nesillerdeki bazı bireyler rastgele bir mutasyon değeri ile değiştirilmektedir (Kahla 2018). Genetik algoritmalar kullanılarak PID kontrolör parametrelerini optimize etme prensibi Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Amaç, kararlılık alanındaki kp, ki ve kd parametrelerini bulunmaktır.

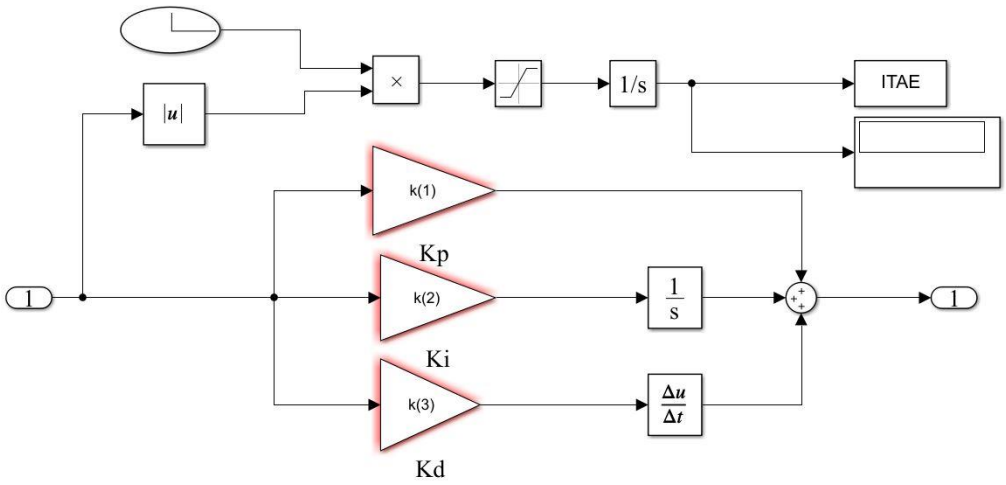
3.4.3.1 GA-PID kontrolör matlab ortamında modellenmesi

Burada, PID kontrolörünün nasıl modellendiğini ve genetik algoritma ile katsayıları ayarlamak için parametrelerinin Matlab'da nasıl ayarlandığını adım adım açıklanmıştır. İlk olarak, Matlab'da sistemi optimize eden bir fonksiyon kurmak gerekmektedir. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi ifade edilmiştir ve Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

```
1   function cost = optimize_PID(k)
2 -   assignin('base','k',k);
3 -   sim('GATuning_PID.slx');
4 -   cost = ITAE(length(ITAE));
5 -   end
```

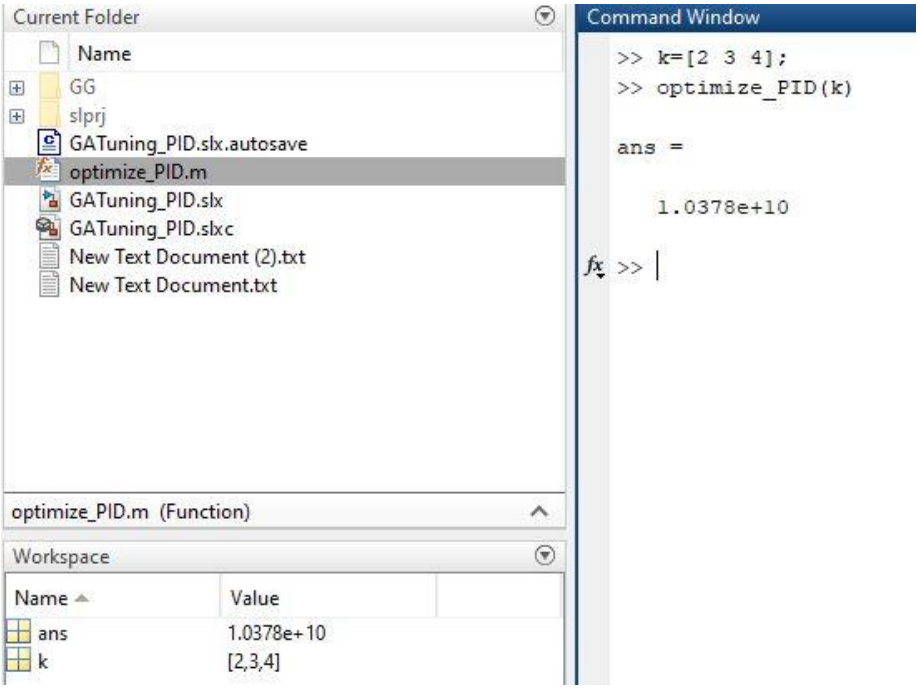
Şekil 3.15 Genetik algoritma programı

Daha sonra, PID kontrolörün önündeki sistemin hata sinyali (ITAE) Matlab'da modellenir ve Şekil 3.16'da gösterilir. Burada katsayılar (Kp, Ki ve Kd) belirlenmemiştir çünkü katsayıların değerlerinin genetik algoritmanın uygulanmasından sonra ayarlanması gerekmektedir.



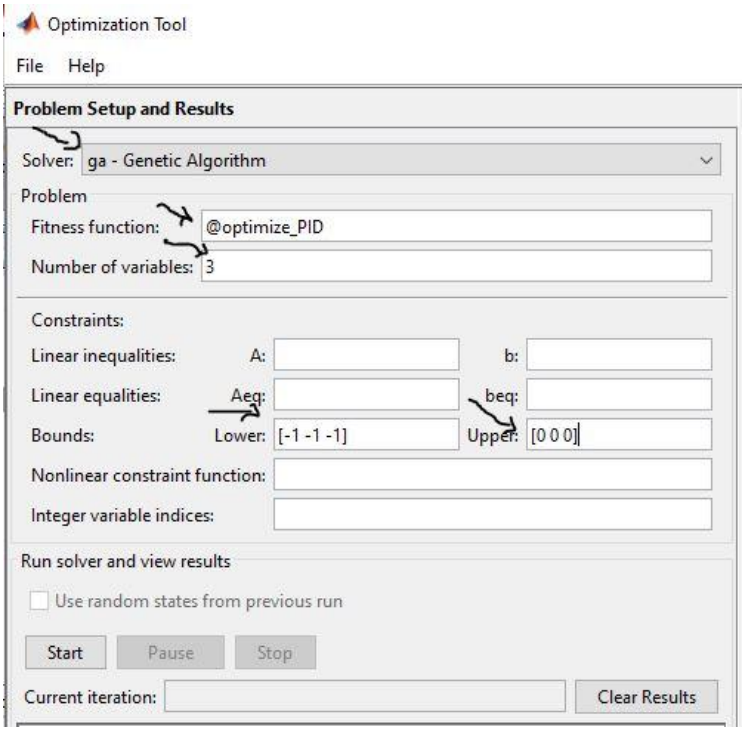
Şekil 3.16 ITAE'nin genetik algoritma ile modellenmesi

ITAE hata sinyalini hesaplamak için PID kontrolörünün katsayıları rastgele belirlenmektedir. Hata sinyalini hesaplamak için katsayılar Kp=2, Ki=3 ve Kd=4 olarak seçilmiştir. ITAE hata sinyali hesaplanmıştır ve değer Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 ITAE hata sinyalinin değeri

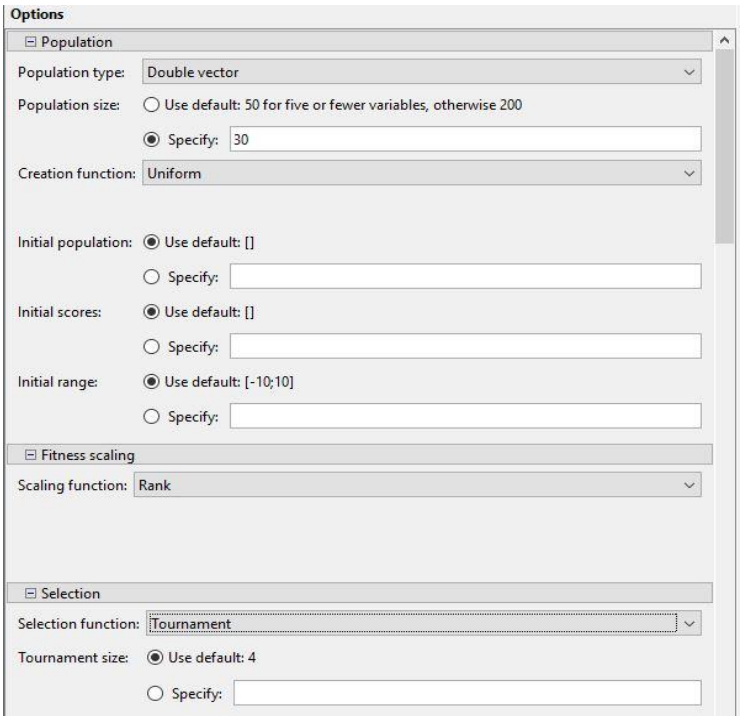
Matlab'da, ana sayfada "optimtool" yazılarak, genetik algoritma çözücü olarak seçilmeli ve Şekil 3.18'de gösterildiği gibi boşluklar doldurulmalıdır.



Şekil 3.18 Optimizasyon aracı

Şekil 3.18'de gösterildiği gibi, çözücü olarak genetik algoritma seçilmiştir ve uygunluk fonksiyonu "@optimise_PID" olarak adlandırılmıştır. PID kontrolörünün katsayıları (Kp, Ki ve Kd) üç kazanca sahiptir. Genetik algoritmalar kullanılarak ayarlanacak değişken sayısı "3" olarak seçilmiştir. Arama sınırları [-1 -1 -1] ve [0 0 0] arasındadır.

Bu bölümde genetik algoritmanın parametreleri bu şekilde seçilmiştir. Popülasyon sayısı "30" ve jenerasyon sayısı "100" olarak seçilmiştir. Seçim fonksiyonu turnuva, mutasyon fonksiyonu adaptif ve çaprazlama fonksiyonu aritmetik olarak seçilmiştir. Çizim fonksiyonu en iyi uyumdur ve görüntüleme seviyesi özyinelemelidir. Parametre ayarları şekil 3.19'da gösterilmektedir. Çözücünün çalıştırılmasıyla en iyi optimal katsayılar (Kp_{opt}, Ki_{opt} ve Kd_{opt}) elde edilmiştir.



Şekil 3.19 Genetik algorıtmasi optimizasyonun seçeneği

3.4.3.1.1 Amaç fonksiyonu

Genetik algoritmaların uygulanmasındaki en önemli adım, her bir kromozomun uygunluğunu değerlendirmek için kullanılan amaç fonksiyonlarının seçilmesidir. Bazı

çalışmalar performans indekslerini amaç fonksiyonu olarak kullanmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak genellikle dört performans endeksi bulunmaktadır. İntegral Zaman Mutlak Hatası (ITAE) denklem (19)'da verilmiştir. İntegral Mutlak Hata (IAE) denklem (20)'de verilmiştir. İntegral Kare Hata (ISE) denklem (21)'de verilmiştir. İntegral Zaman Kare Hatası (ITSE) denklem (22)'de verilmiştir. Bu çalışmada, hata sinyalini minimize etmek için zaman integrali ile mutlak hatanın çarpımı (ITAE) performans indeksleri olarak kullanılmıştır. Performans indeksleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Kılıç ve Özdemir 2019):

$$\mathrm{ITAE} = \sum_0^{t_{max}} t\,|e(t)| \tag{19}$$

$$\mathrm{IAE} = \sum_0^{t_{max}} |e(t)| \tag{20}$$

$$\mathrm{ISE} = \sum_0^{t_{max}} e(t)^2 \tag{21}$$

$$\mathrm{ITSE} = \sum_0^{t_{max}} t\,e(t)^2 \tag{22}$$

3.4.3.1.2 GA-PID Kontrolör optimizasyon parametreleri

Burada, e(t) hata sinyalidir ve kontrol kanununun hesaplanmasına yönelik adımlar aşağıdaki algoritmada özetlenmiştir.

1) Aşağıdaki parametrelerin tanıtılması:
   - $\max_{pop}$ Popülasyon başına düşen birey sayısı.
   - Başlangıç popülasyonu.
   - gen_{max} Jenerasyon sayısı.
2) Jenerasyon başlatılması (gen = 1).
3) Bireylerin başlatılması (j = 1).
4) T = 1 s'den tmax'a kadar popülasyondaki j'inci bireyin verimliliğinin değerlendirilmesi.

5) Bireysel sayacın artırılması (j = j + 1).
   - j<max_{pop} ise, 4. adıma geri dönün.
   - Aksi takdirde: yeni popülasyonu oluşturmak için genetik operatörlerin (Seçim, Çaprazlama, Mutasyon) uygulanması.
6) Üretim sayacının artırılması gen = gen + 1.
   - gen<gen_{max} ise, adım 3'e dönün.
7) Son popülasyondaki en iyi bireye (en uygun birey) karşılık gelen Kp_{opt}, Ki_{opt} ve Kd_{opt} değerlerini alın.

Aşağıda, genetik algoritma jenerasyon sayısı ile karakterize edilmektedir ve 100'e eşittir. Popülasyon çaprazlama oranı 0,8, popülasyon mutasyon oranı 0,08 ve popülasyon başına birey sayısı 30'dur (Mittal *et al*. 2016).

Çizelge 3.3 Genetik algoritmalarda kullanılan parametreler

Algoritma türü	Turnuva seçimi
Popülasyon sayısı n_{POP}	30
Jenerasyon sayısı n_{gen}	100
Çaprazlama olasılığı	0.8
Çapraz tip	Üniforma
Mutasyon olasılığı	0.08
Çözücü	Genetik Algoritmalar

3.4.3.2 BA-PID kontrolör matlab ortamında modellenmesi

Bakteriyel besin arama yöntemi kullanılarak PID kontrolör katsayılarının ayarlanması adım adım açıklanmıştır. İlk olarak, ana Matlab sayfasında sistemi optimize eden bir fonksiyon ayarlamak gerekir. Bu fonksiyon Şekil 3.20'de gösterilmiş ve Ek 1'de verilmiştir.

```
function F = tracklsq(pid)
        % Track the output of optsim to a signal of 1

        % Variables a1 and a2 are shared with RUNTRACKLSQ
        Kp = pid(1);
        Ki = 0;
        Kd = pid(2);

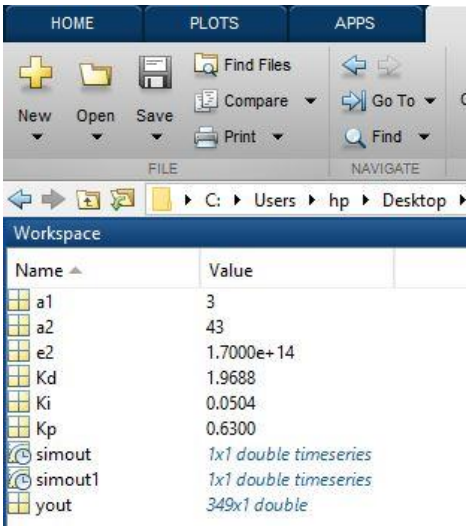
        sprintf('The value of interation Kp= %3.0f, Kd= %3.0f', pid(1),pid(2));
        % Compute function value
        simopt = simset('solver','ode5','SrcWorkspace','Current','DstWorkspace','Current');  % Initialize sim options
        [tout,xout,yout] = sim('optsim1',[-1 0],simopt);
        e=yout-1 ;  % compute the error
        sys_overshoot=max(yout)-1; % compute the overshoot

     alpha=10;beta=10;
     F=e2*beta+sys_overshoot*alpha;

end
```

Şekil 3.20 Bakteriyel algoritmasın programı

Bu bölümde sistem hata sinyalini hesaplamak için ISE kullanılmıştır ve denklem 21'de verilmiştir. ISE hata sinyalini hesaplamak için PID kontrolörünün katsayıları rastgele belirlenmiştir. Burada, ISE hata sinyali Kp=0.63, Ki=0.0504 ve Kd=1.9688 katsayıları rastgele seçilerek hesaplanmış ve ISE değeri (e2) olarak Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Düzeltmek gereken hata sinyali ISE değeri

3.4.3.2.1 BA-PID Kontrolör optimizasyon parametreleri

BA-PID kontrolörünün parametreleri aşağıdaki Çizelge 3.4'te görülmektedir.

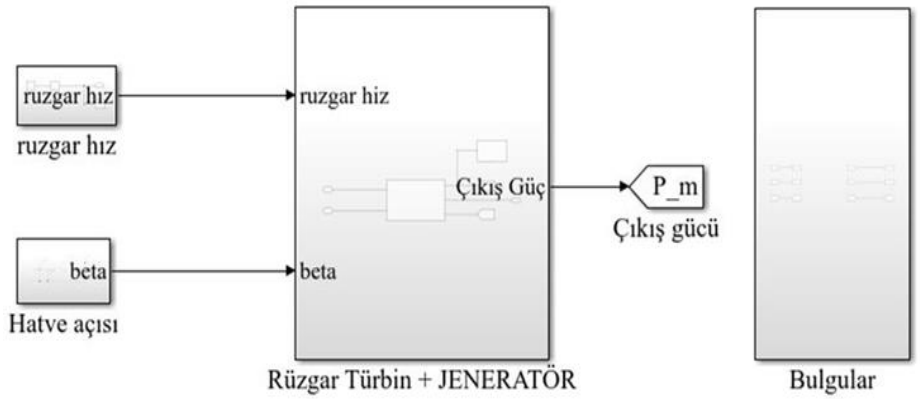
Çizelge 3.4 BA-PID kontrolörün parametreleri

Algoritma türü	Turnuva seçimi
Arama uzayının boyutu	2
Bakteri sayısı	10
Kemotaktik adımların sayısı	5
Yüzmenin uzunluğunu sınırlar	4
Üreme adımlarının sayısı	4
Eliminasyon-dağılma olaylarının sayısı	2
Jenerasyon başına bakteri üreme (bölünme) sayısı	5
Bakterinin yok edilme/dağılma olasılığı	0.25
Çözücü	Bakteriyel Algoritmalar

3.5 Rüzgâr Enerji Sistemin Matlab Ortamında Modellenmesi

3.5.1 Rüzgâr türbini modeli ve jeneratör modeli

Rüzgâr türbini sistemi Matlab'da aşağıdaki gibi modellenmiştir. Dört ana blok paylaşılmaktadır (rüzgâr hızı, hatve açısı, bulgular ve rüzgâr türbini artı jeneratör). Bir rüzgâr türbininin modellenmesinin genel görünümü şekil 3.22'de gösterilmektedir.



Şekil 3.22 Rüzgâr türbini sisteminin genel görünümü

- Simülasyon modellemesi
  - ✓ Rüzgâr hızı (Rampa fonksiyonu, Basamak fonksiyonu ve Değişken fonksiyonu) ile modellenmiştir.
  - ✓ Hatve açısı blok diyagramı birçok bileşen içermektedir. DC servo motor (aktüatör), PI ve PID kontrolörleri ve hata sinyali.
  - ✓ Rüzgâr türbini ve jeneratörünün blok diyagramı iki bölümden oluşmaktadır.
  - ✓ Bulgular blok diyagramı rüzgâr türbini sisteminin sonuçlarını göstermektedir.
- Aktüatör Modeli

Bir DC motor (servomotor) kullanarak hatve açısını kontrol etmektedir. Hatve silindiri sistemleri hidrolik veya elektrik kontrollü olabilmektedir. Elektrikli aktüatörde, her bir kanat bir servo motor tarafından ayrı ayrı ayarlanabilmektedir. Dünyanın en büyük rüzgâr türbini tedarikçileri elektrikli hatve kontrol sistemleri kullanmaktadır. Bu çalışmada, aktüatör olarak bir DC servo motor kullanılmıştır. Aktüatörlerin tasarımında, pozisyon kontrolünün transfer fonksiyonu denklem (23)'te verilmiştir (Baburajan and Ismail 2017).

$$G_P S = \frac{1}{s(s+1)} \tag{23}$$

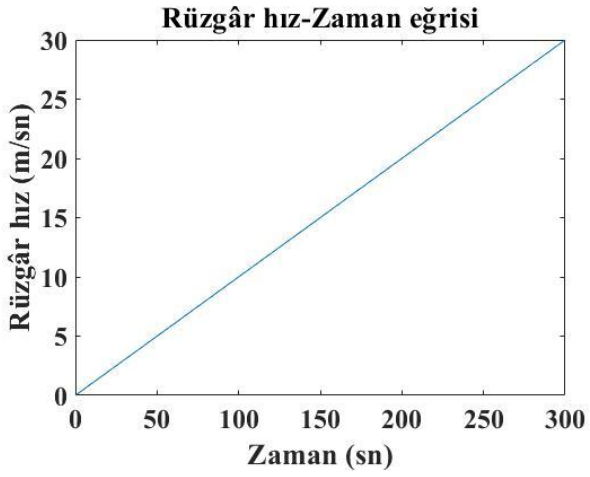
4 BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ilk olarak Matlab'da gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları sunulmuştur. Daha sonra bu tezin hedeflerine ulaşılıp ulaşılmadığı gösterilmiştir. PI ve PID kontrolörlerinin katsayıları Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra PID kontrolörünün katsayıları genetik ve bakteriyel algoritmalar kullanılarak ayarlanmıştır ve rüzgâr türbininin daha iyi optimize edildiği gösterilmiştir.

4.1 Matlab Simülasyon Sonuçları

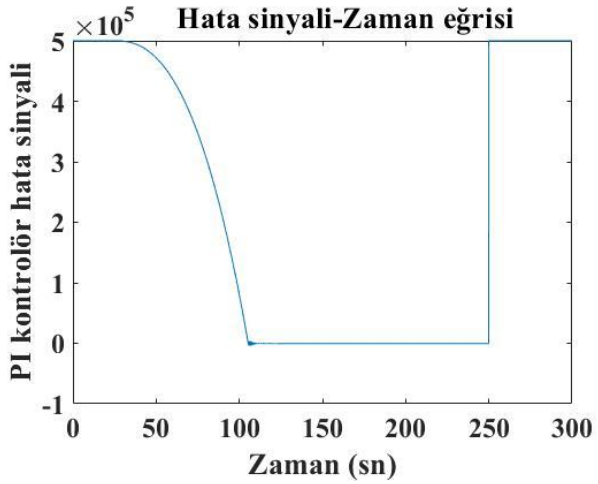
4.1.1 PI kontrolör

Herhangi bir kontrolör olmadan rüzgâr türbininin eğrisi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada rüzgâr türbininin rüzgâr hızı girişine farklı fonksiyonlar uygulanmıştır. Simülasyonun ilk bölümünde, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi rüzgâr türbininin giriş hızını modellemek için rampa fonksiyonu kullanılmıştır.



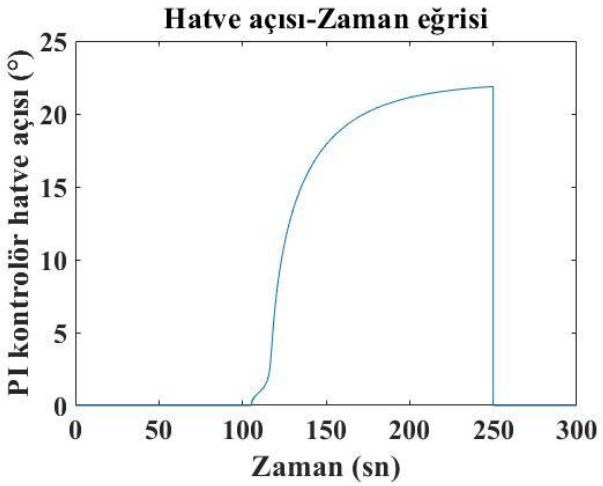
Şekil 4.1 Rampa fonksiyonu ile rüzgâr hız modellemesi

PI kontrolörünün katsayılarını ayarlamak için Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak, düzeltilecek hata sinyali sıfır ile sınırlandırılmıştır. Ancak 100 ila 120 saniye arasında kararsızlık vardır. Hata sinyali eğrisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



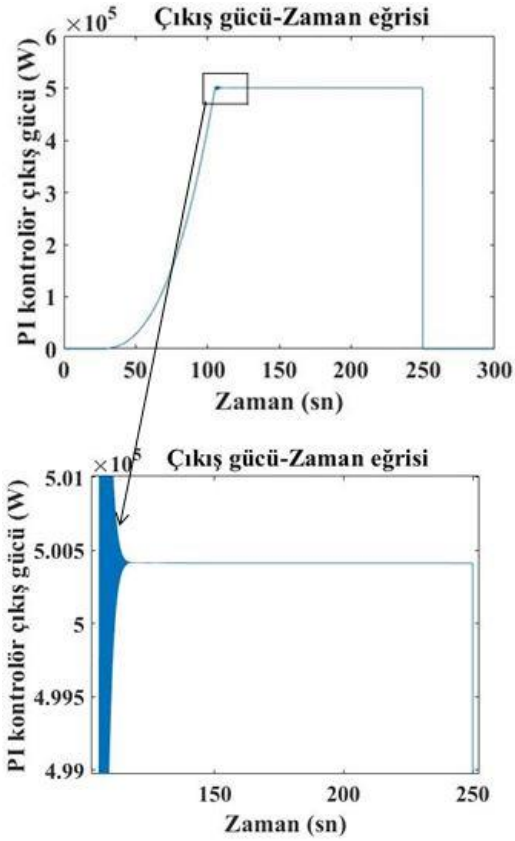
Şekil 4.2 Hata sinyalindeki değişimin grafiği

Şekil 4.3, rüzgâr türbininin hatve açısının PI kontrolörü kullanılarak nasıl çalışacağını göstermektedir.



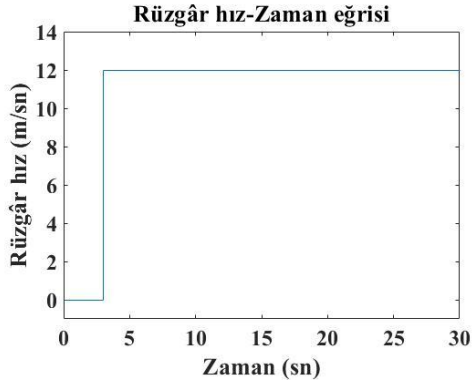
Şekil 4.3 Hatve açısı değişim grafiği

Simülasyon sonuçlarına göre, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, çıkış gücü seviyesinde (500KW) tutulur, ancak 100 ila 120 saniye arasında kararsızlık vardır. Şekil 4.4, PI kontrolör rüzgâr türbinine uygulandığında çıkış gücünün ayarlanan seviyenin yaklaşık ±%10'unda salındığını göstermektedir.

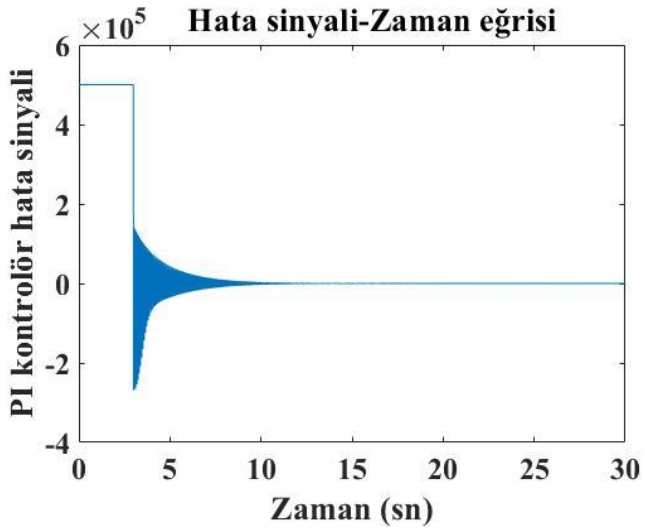


Şekil 4.4 Çıkış gücü değişim grafiği

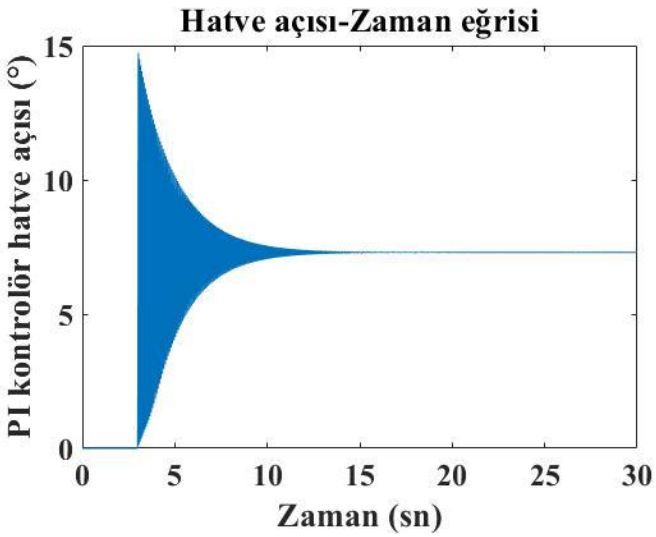
Simülasyonun ikinci bölümünde, rüzgâr hızını modellemek için basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Basamak fonksiyonu rüzgâr türbininin rüzgâr hızı girişine uygulanmıştır ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Daha sonra, hata sinyali, hatve açısı ve çıkış gücünün basamak fonksiyonunun bir fonksiyonu olarak değişimi sırasıyla Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de gösterilmiştir.



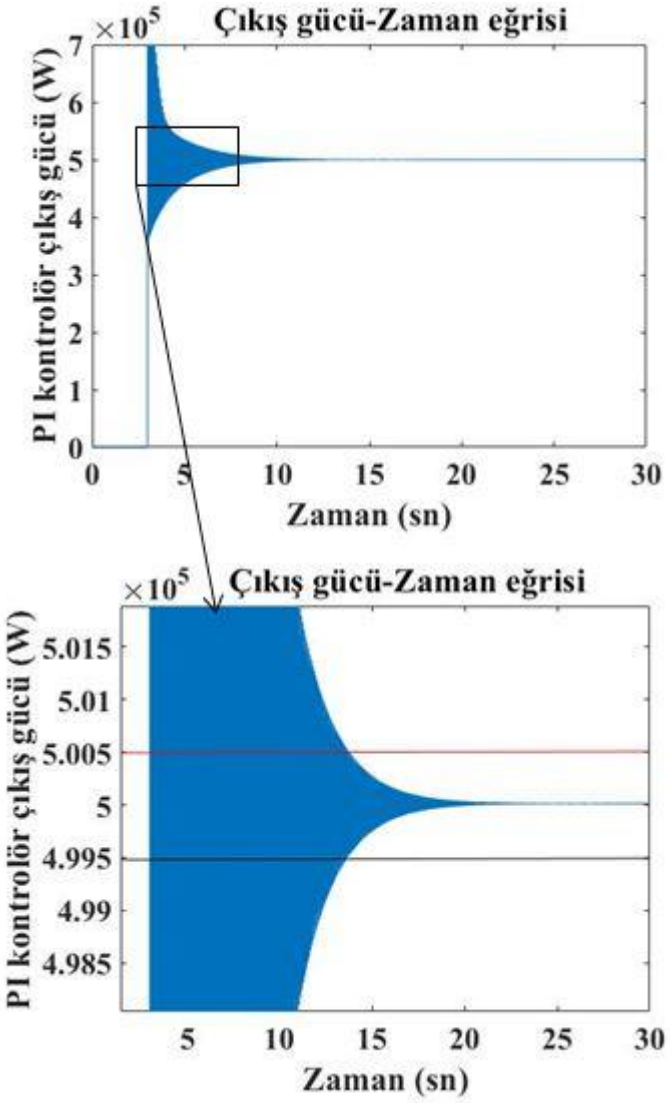
Şekil 4.5 Basamak fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi



Şekil 4.6 Hata sinyalindeki değişimin grafiği

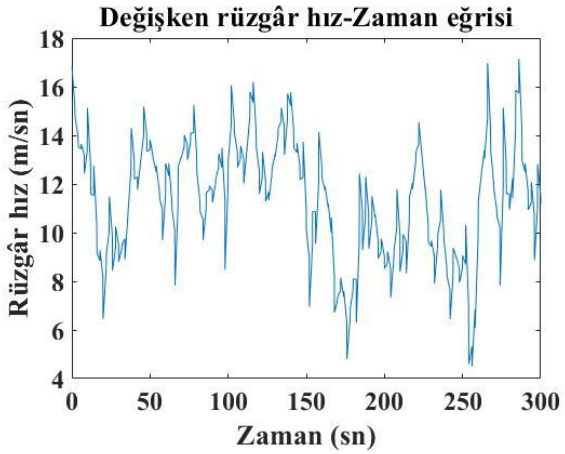


Şekil 4.7 Hatve açısı değişim grafiği

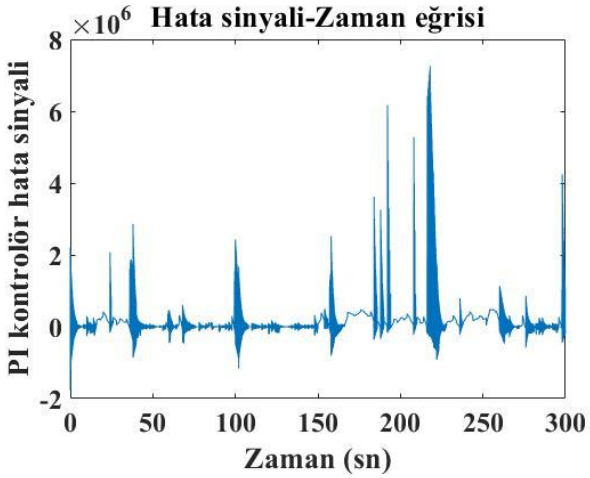


Şekil 4.8 Çıkış gücü değişim grafiği

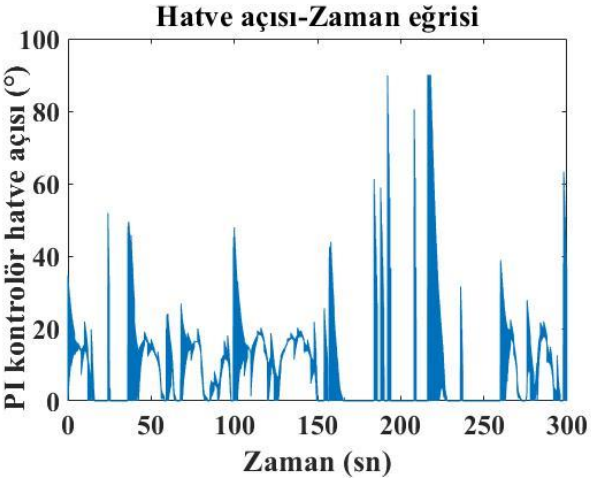
Simülasyonun üçüncü bölümünde rastgele bir rüzgâr hızı kullanılmıştır. Rüzgâr türbininde kullanılan değişken rüzgâr hızı 4,5 m/sn ile 17 m/sn arasındadır. Rüzgâr türbininin rastgele rüzgâr hızı eğrisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Daha sonra, değişken rüzgâr hızı kullanılarak rüzgâr türbini sisteminin hata sinyali, hatve açısı ve güç çıkışının değişimi sırasıyla Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de gösterilmiştir.



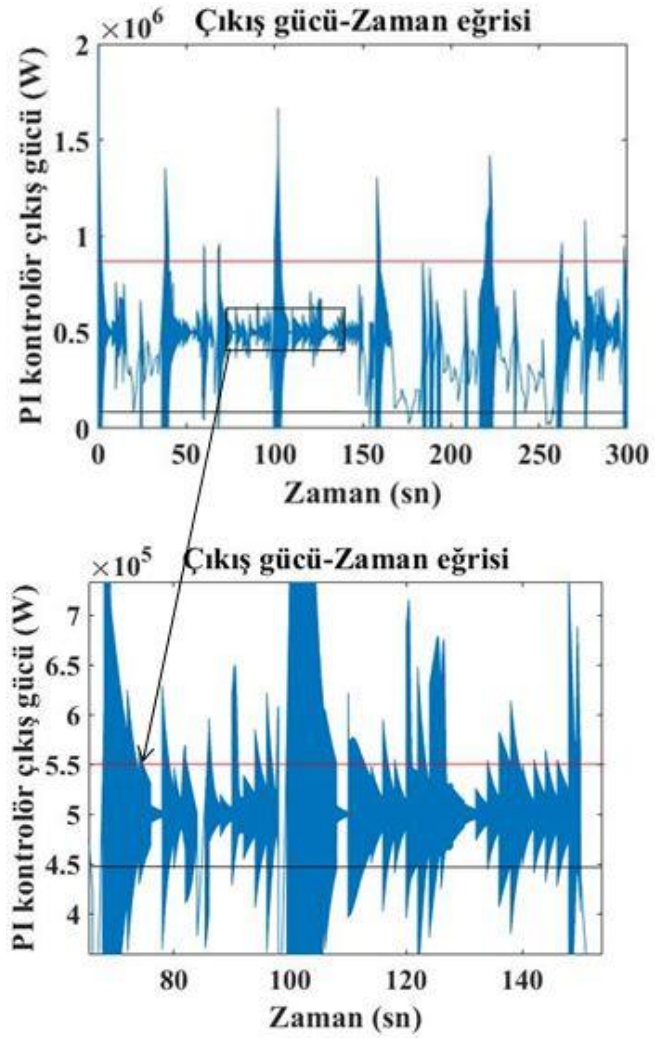
Şekil 4.9 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi



Şekil 4.10 Hata sinyalindeki değişimin grafiği



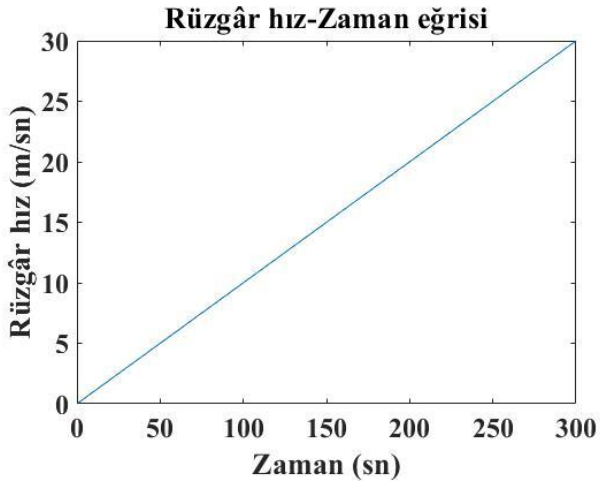
Şekil 4.11 Hatve açısı değişim grafiği



Şekil 4.12 Çıkış gücü değişim grafiği

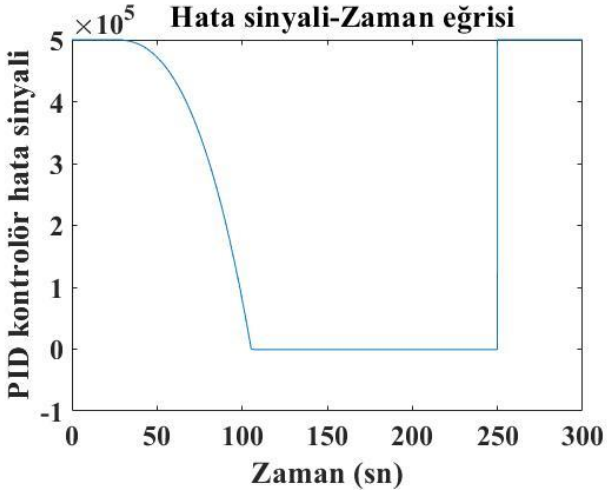
4.1.2 PID kontrolör

Simülasyonun ilk bölümünde, Şekil 4.13'te gösterildiği gibi rüzgâr türbininin giriş hızını modellemek için rampa fonksiyonu kullanılmıştır.



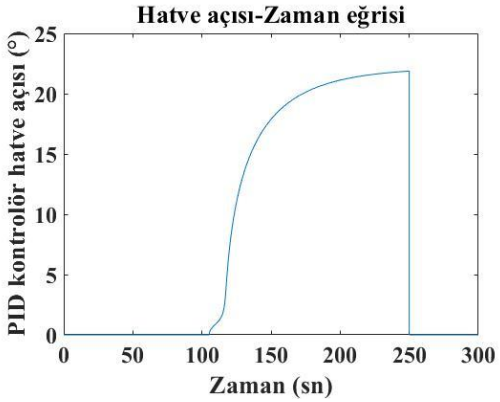
Şekil 4.13 Rampa fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi

PID kontrolörünün katsayılarını ayarlamak için Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak, düzeltilecek hata sinyali sıfır ile sınırlandırılmıştır. Hata sinyali eğrisi Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



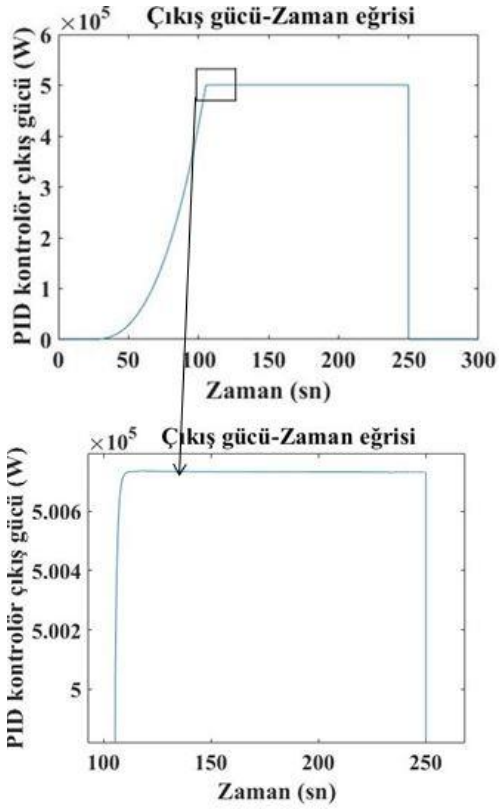
Şekil 4.14 Hata sinyali değişim grafiği

Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak, PID kontrolörün hatve açısı eğrisi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



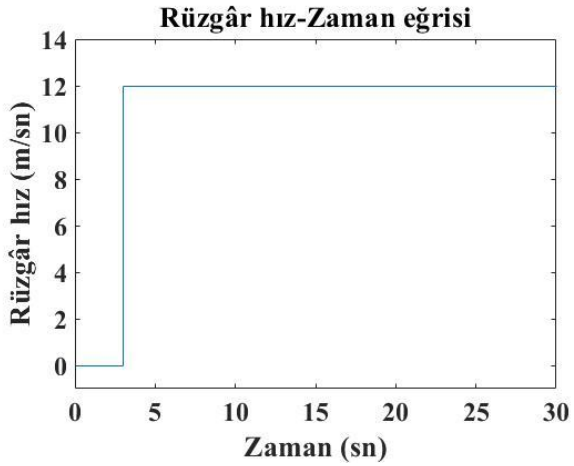
Şekil 4.15 Hatve açısı değişim grafiği

Şekil 4.16'da istenen çıkış gücü (500KW) PID kontrolörü kullanılarak elde edilmiştir. Kararsızlık yoktur ve çıkış gücü tam olarak istenildiği gibi sabittir. Bununla birlikte, PI ve PID kontrolörlerinin katsayıları (Kp, Ki ve Kd) ilk olarak Nichol-Ziegler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır ve çıkış gücü eğrileri Şekil 4.4-4.16'da verilmiştir. PID kontrolörünün PI kontrolöründen daha iyi optimizasyon yaptığı görülmektedir.

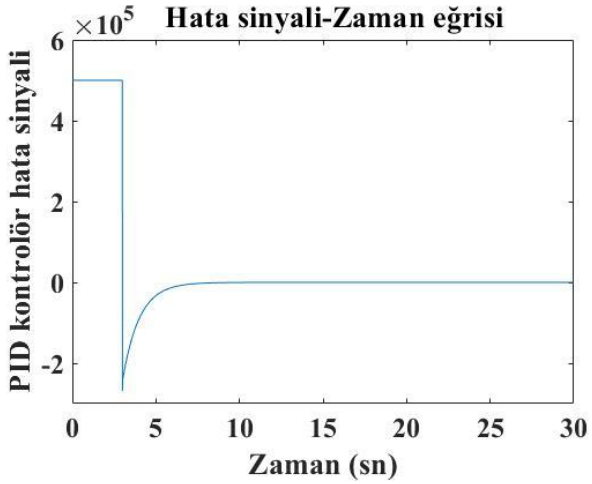


Şekil 4.16 Çıkış gücü değişim grafiği

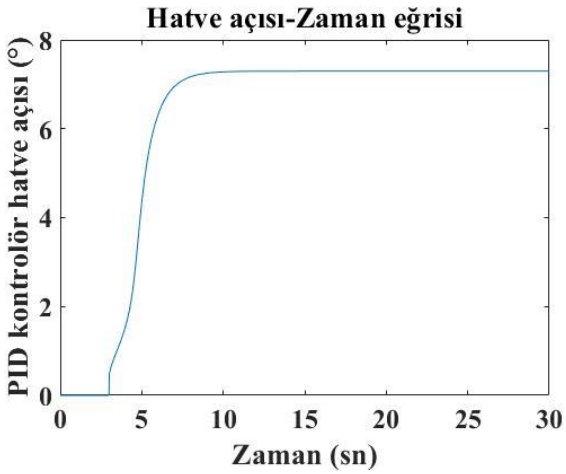
Simülasyonun ikinci bölümünde, rüzgâr hızını modellemek için basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Basamak fonksiyonu rüzgâr türbininin rüzgâr hızı girişine uygulanmıştır ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Daha sonra, hata sinyali, hatve açısı ve çıkış gücünün değişimleri sırasıyla Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20'de gösterilmiştir.



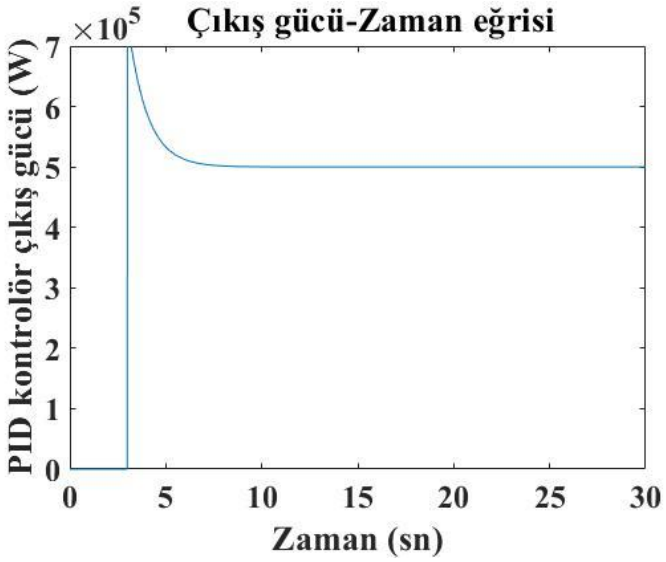
Şekil 4.17 Basmak fonksiyonu ile rüzgâr hız modellemesi



Şekil 4.18 Hata sinyalindeki değişimin grafiği

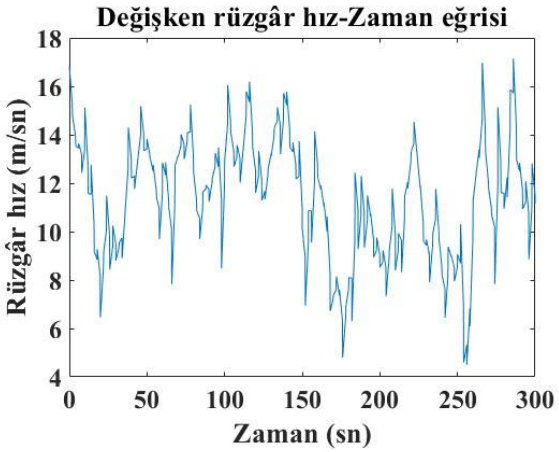


Şekil 4.19 Hatve açısı değişim grafiği

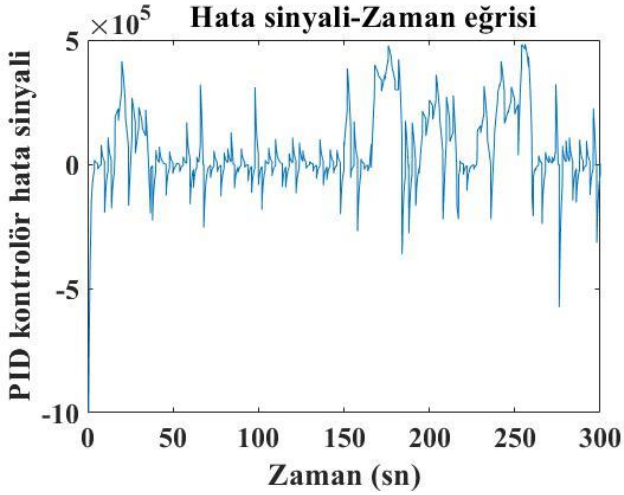


Şekil 4.20 Çıkış gücü değişim grafiği

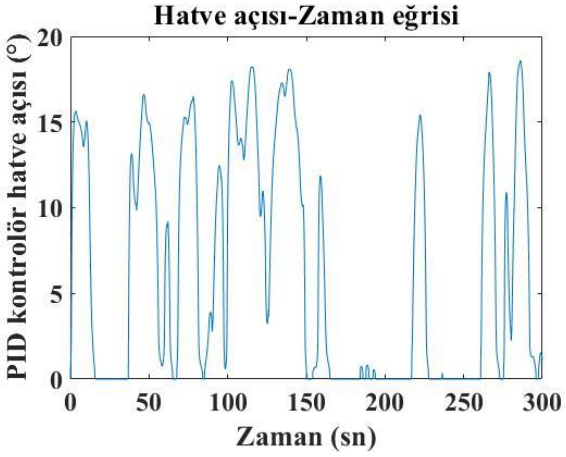
Simülasyonun üçüncü bölümünde rastgele bir rüzgâr hızı kullanılmıştır. Rüzgâr türbininde kullanılan değişken rüzgâr hızı 4,5 m/sn ile 17 m/sn arasındadır. Rüzgâr türbininin rastgele rüzgâr hızı eğrisi Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Daha sonra hata sinyali, hatve açısı ve güç çıkışının değişimleri sırasıyla Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te gösterilmiştir.



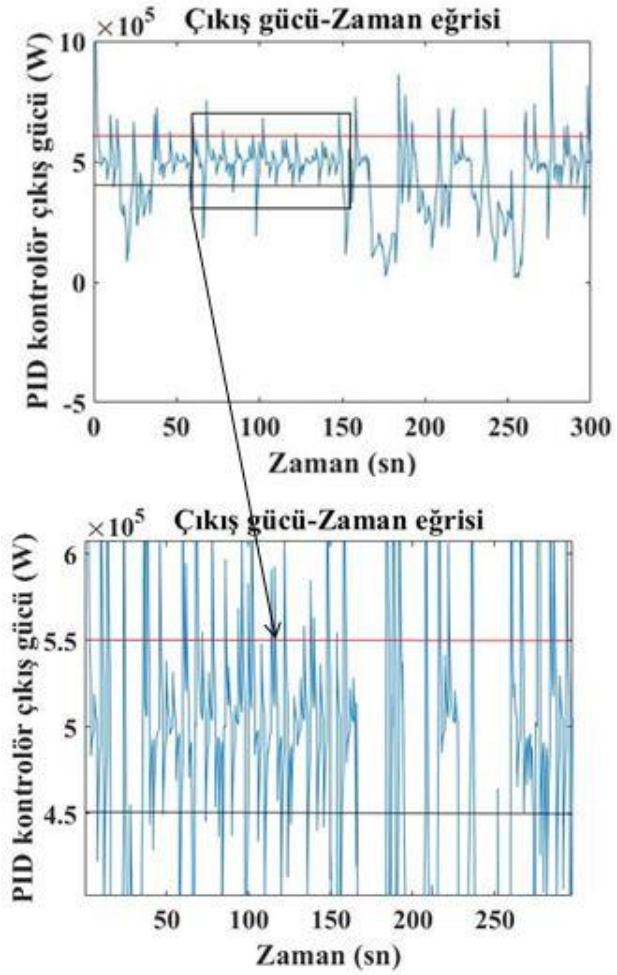
Şekil 4.21 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi



Şekil 4.22 Hata sinyalinin değişim grafiği



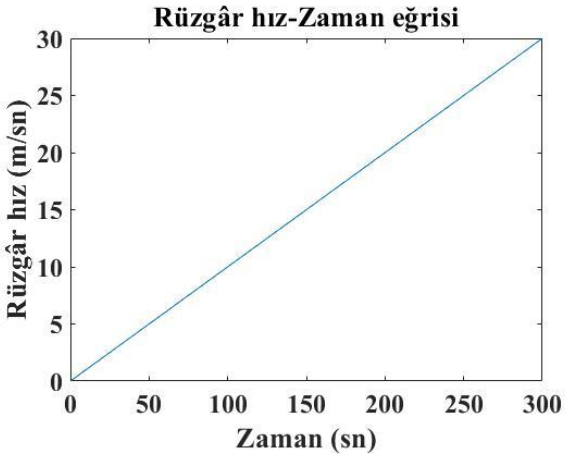
Şekil 4.23 Hatve açısı değişim grafiği



Şekil 4.24 Çıkış gücü değişim grafiği

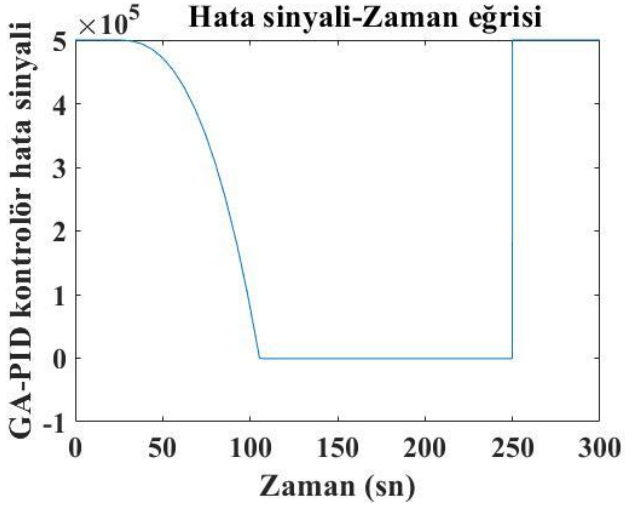
4.1.3 GA-PID kontrolör

Simülasyonun ilk bölümünde, Şekil 4.25'te gösterildiği gibi rüzgâr türbininin giriş hızını modellemek için rampa fonksiyonu kullanılmıştır.



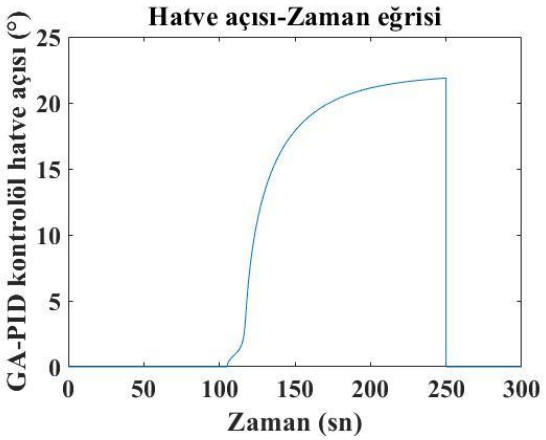
Şekil 4.25 Rampa fonksiyonu ile rüzgâr hız modellemesi

Genetik algoritmalar optimizasyonu kullanılarak PID kontrolör katsayıları ayarlanmıştır. Düzeltilecek hata sinyali sıfır ile sınırlandırılmış ve eğrisi Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



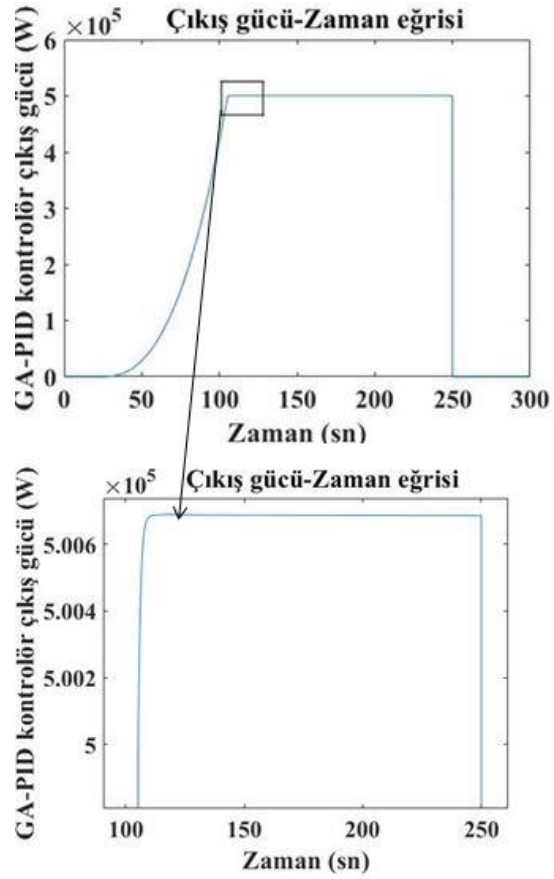
Şekil 4.26 Hata sinyalinin değişim grafiği

Genetik algoritmalar kullanılarak PID kontrolörünün katsayıları ayarlandığında, hatve açısı eğrisi Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



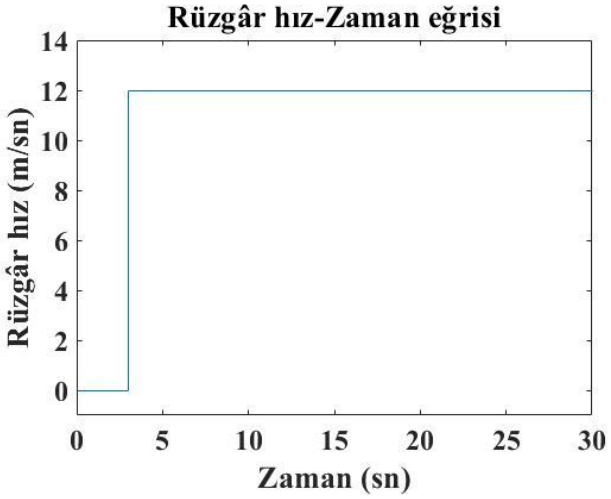
Şekil 4.27 Hatve açısı değişim grafiği

Çıkış gücü eğrisi Şekil 4.28'de gösterilmektedir. Genetik algoritmalar optimizasyonu kullanılarak PID kontrolörünün katsayılarının ayarlanmasıyla, Nichols-Ziegler yönteminden daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

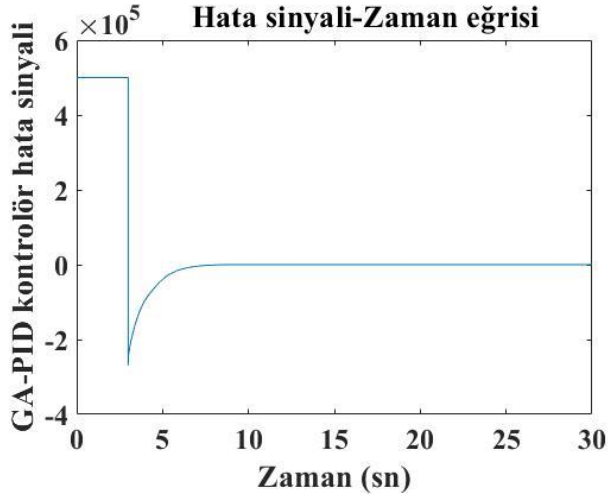


Şekil 4.28 Çıkış gücü değişim grafiği

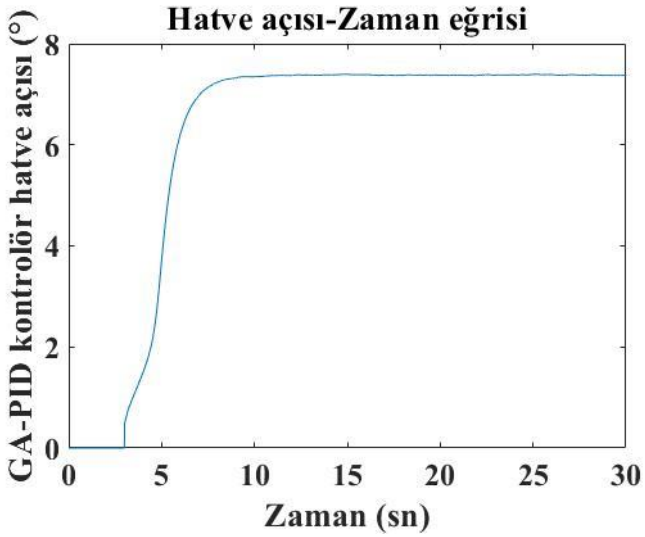
Simülasyonun ikinci bölümünde, rüzgâr hızını modellemek için basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Basamak fonksiyonu rüzgâr türbininin rüzgâr hızı girişine uygulanmıştır ve Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Daha sonra, hata sinyali, hatve açısı ve çıkış gücünün değişimleri sırasıyla Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32'de görülmektedir.



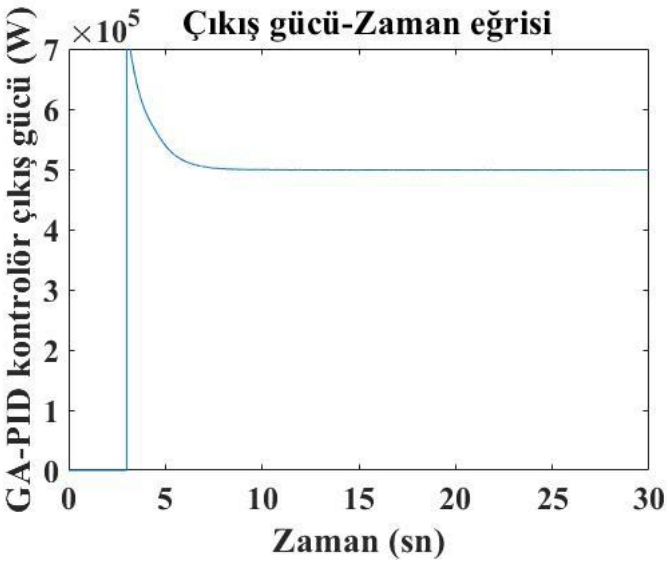
Şekil 4.29 Basmak fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi



Şekil 4.30 Hata sinyalinin değişimin grafiği

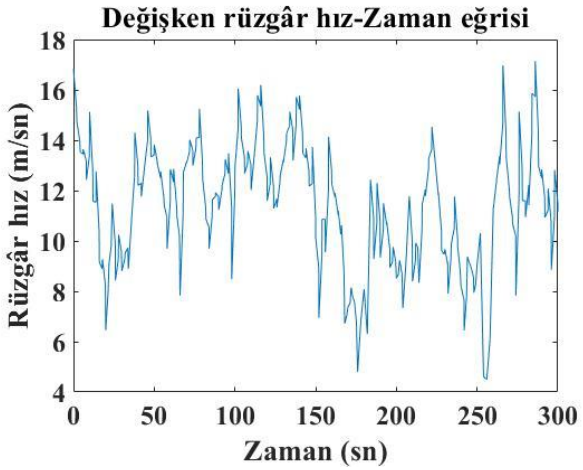


Şekil 4.31 Hatve açısı değişim grafiği

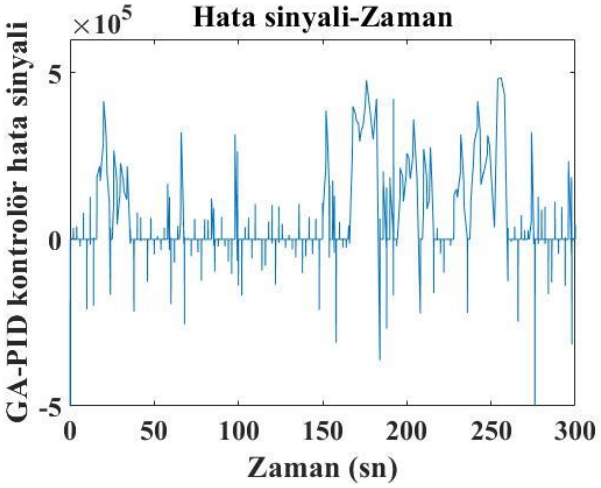


Şekil 4.32 Çıkış gücü eğrisi

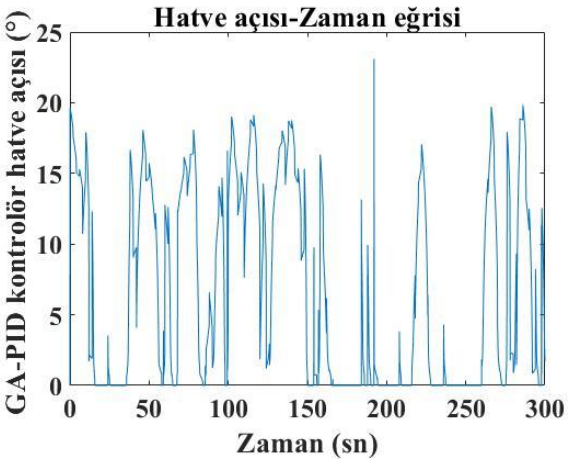
Simülasyonun üçüncü bölümünde rastgele bir rüzgâr hızı kullanılmıştır. Rüzgâr türbininde kullanılan değişken rüzgâr hızı 4,5 m/sn ile 17 m/sn arasındadır. Rüzgâr türbininin rastgele rüzgâr hızı eğrisi Şekil 4.33'te gösterilmektedir. Daha sonra hata sinyali, hatve açısı ve güç çıkışının değişimleri sırasıyla Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'da gösterilmiştir.



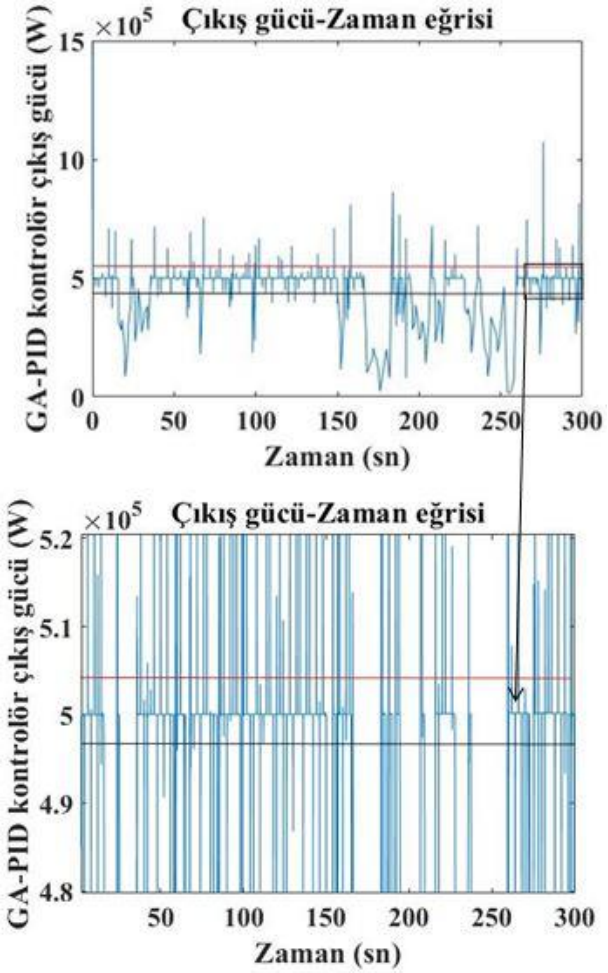
Şekil 4.33 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi



Şekil 4.34 Hata sinyali değişim grafiği



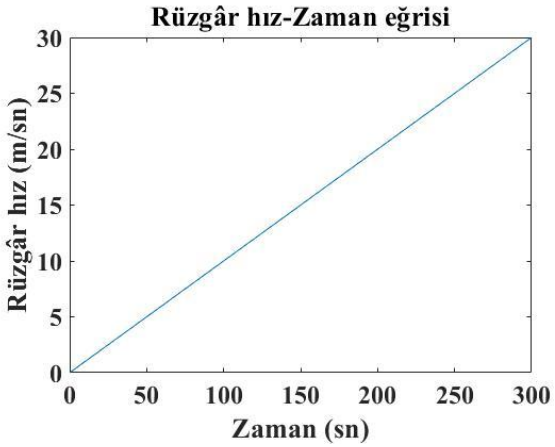
Şekil 4.35 Hatve açısı değişim grafiği



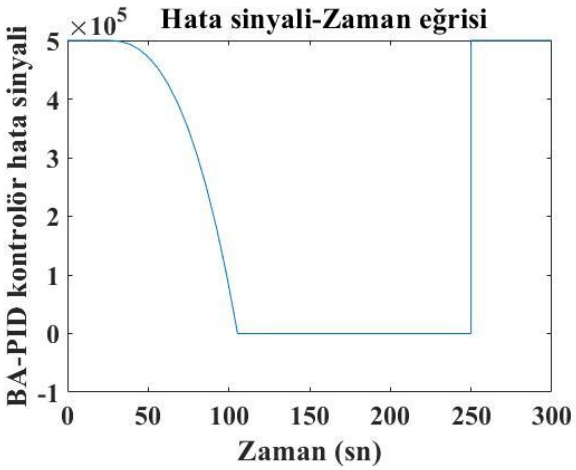
Şekil 4.36 Çıkış gücü değişim grafiği

4.1.4 BA-PID kontrolör

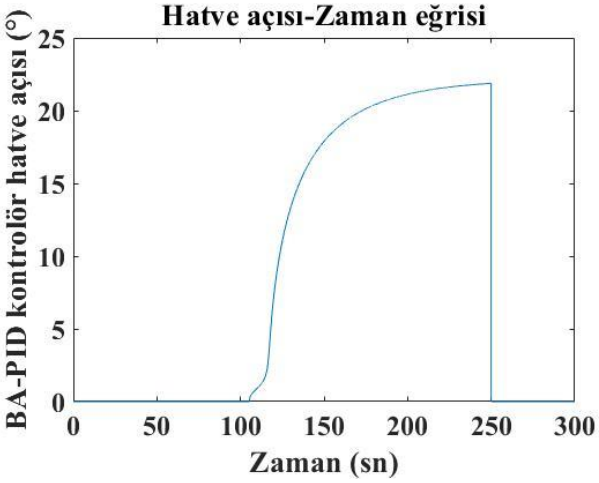
Simülasyonun ilk bölümünde, Şekil 4.37'de gösterildiği gibi rüzgâr türbininin giriş hızını modellemek için rampa fonksiyonu kullanılmıştır. Simülasyonun ilk bölümünde, Şekil 4.37'de gösterildiği gibi rüzgâr türbininin giriş hızını modellemek için rampa fonksiyonu kullanılmıştır. Daha sonra hata sinyali, hatve açısı ve çıkış gücü değişimleri sırasıyla Şekil 4.38, 4.39 ve Şekil 4.40'da görülmektedir.



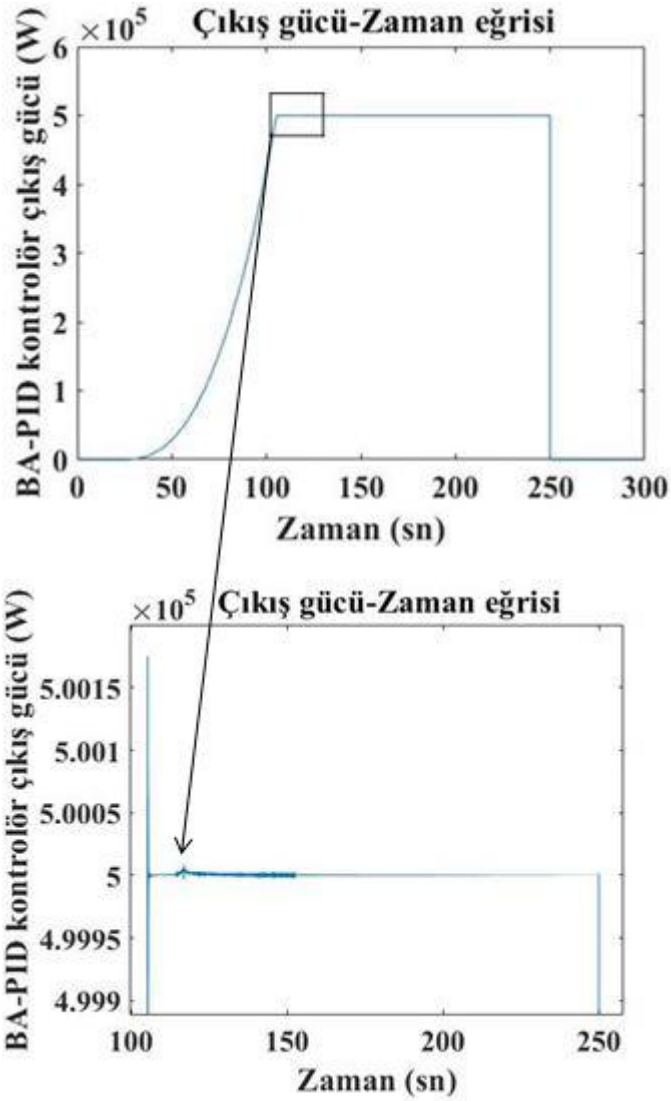
Şekil 4.37 Rüzgâr hızı modellemesi



Şekil 4.38 Hata sinyali değişim grafiği

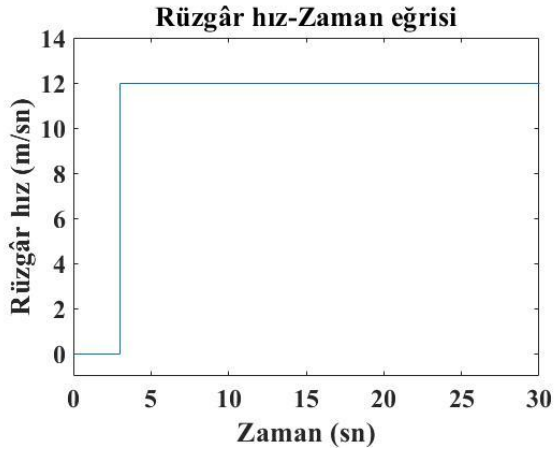


Şekil 4.39 Hatve açısı değişim grafiği

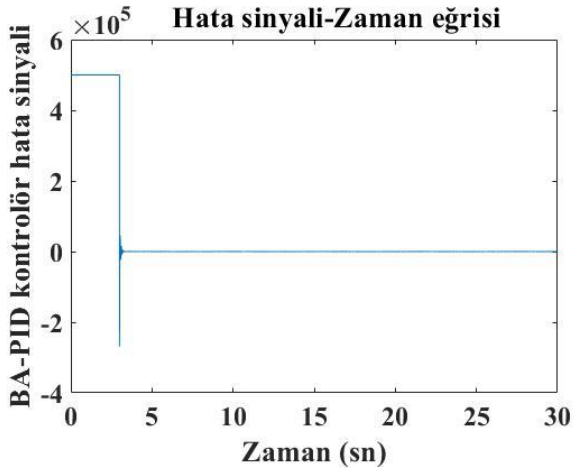


Şekil 4.40 Çıkış gücü değişim grafiği

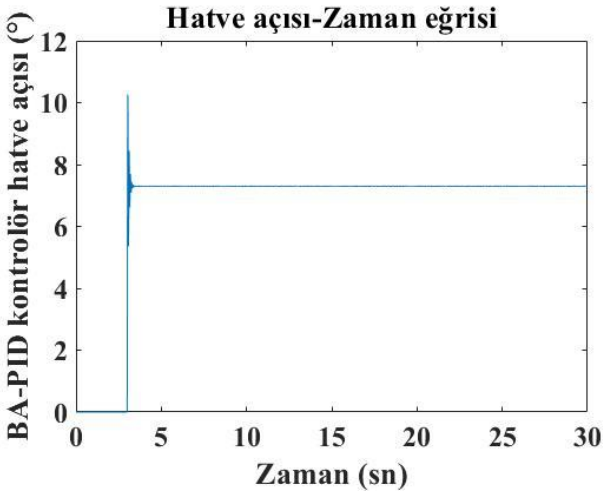
Simülasyonun ikinci bölümünde, rüzgâr hızını modellemek için basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Basamak fonksiyonu rüzgâr türbininin rüzgâr hızı girişine uygulanmıştır ve Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Daha sonra, hata sinyali, hatve açısı ve çıkış gücünün değişimleri sırasıyla Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'te görülmektedir.



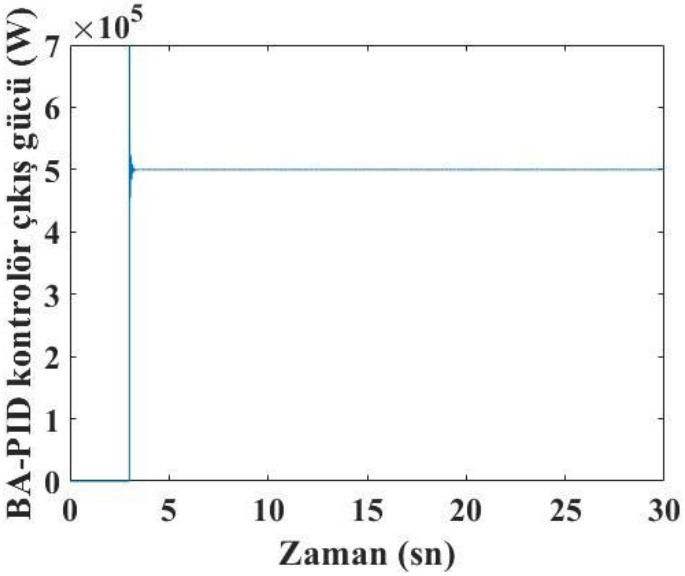
Şekil 4.41 Basmak fonksiyonu ile rüzgâr hızı modellemesi



Şekil 4.42 Hata sinyali değişim grafiği

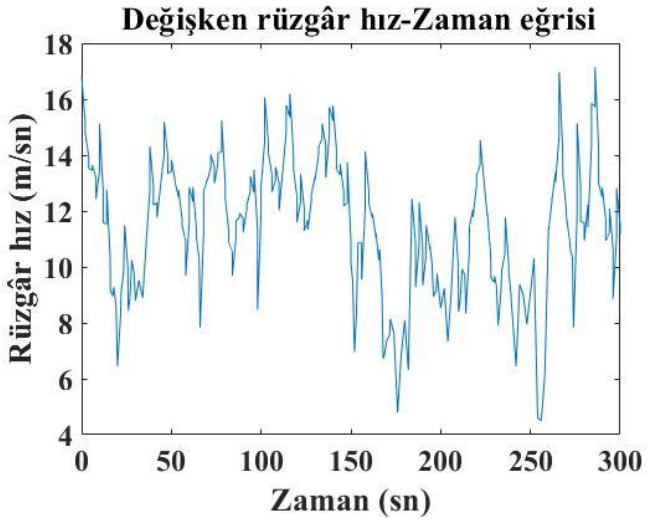


Şekil 4.43 Hatve açısı değişim grafiği

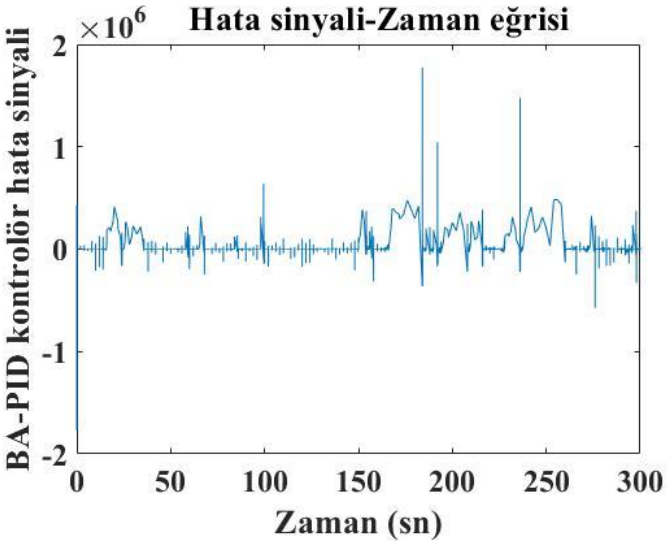


Şekil 4.44 Çıkış gücü değişim grafiği

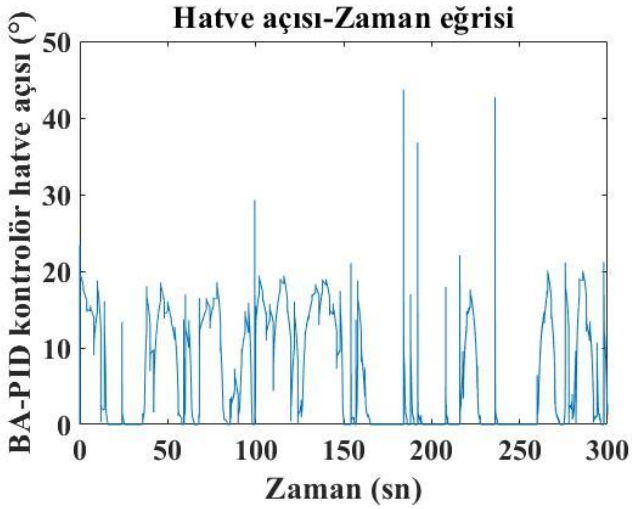
Simülasyonun üçüncü bölümünde rastgele bir rüzgâr hızı kullanılmıştır. Rüzgâr türbininde kullanılan değişken rüzgâr hızı 4,5 m/sn ile 17 m/sn arasındadır. Rüzgâr türbininin rastgele rüzgâr hızı eğrisi Şekil 4.45'te gösterilmektedir. Daha sonra hata sinyali, hatve açısı ve çıkış gücü değişimleri sırasıyla Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48'de gösterilmiştir.



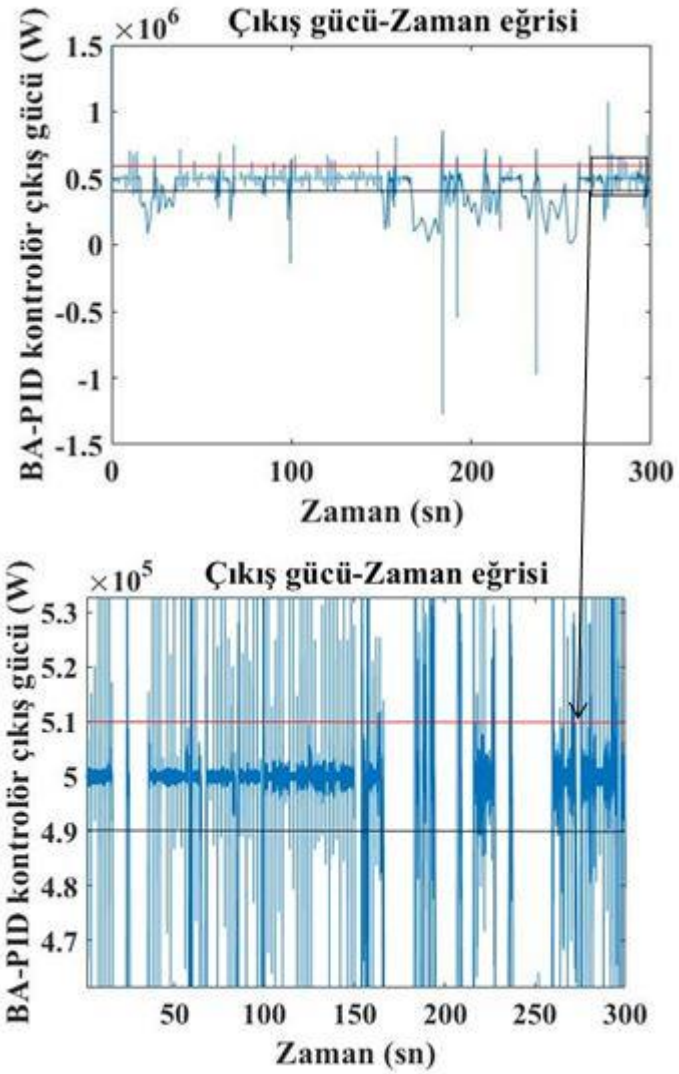
Şekil 4.45 Değişken rüzgâr hızının modellenmesi



Şekil 4.46 Hata sinyali değişim grafiği

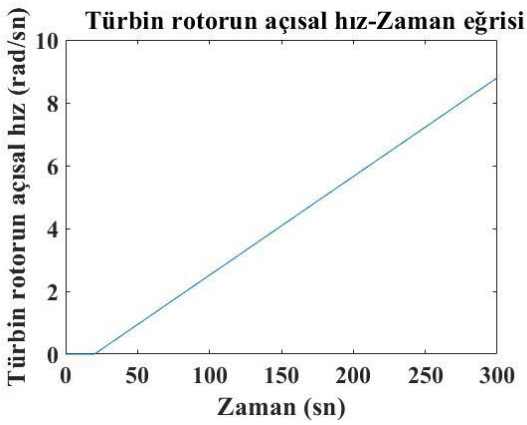


Şekil 4.47 Hatve açısı değişim grafiği

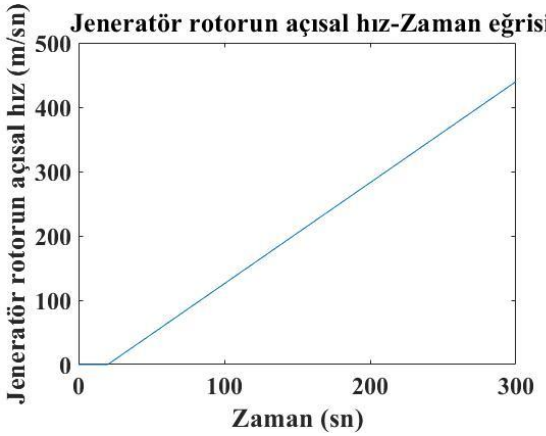


Şekil 4.48 Çıkış gücü değişim grafiği

Rüzgâr türbini rotorunun açısal hızı ve jeneratör rotorunun açısal hızı için eğriler sırasıyla Şekil 4.49 ve 4.50'de gösterilmektedir. Rüzgâr türbini rotoru ile jeneratör rotoru arasında bir dişli kutusu vardır ve değeri 1/50'dir.

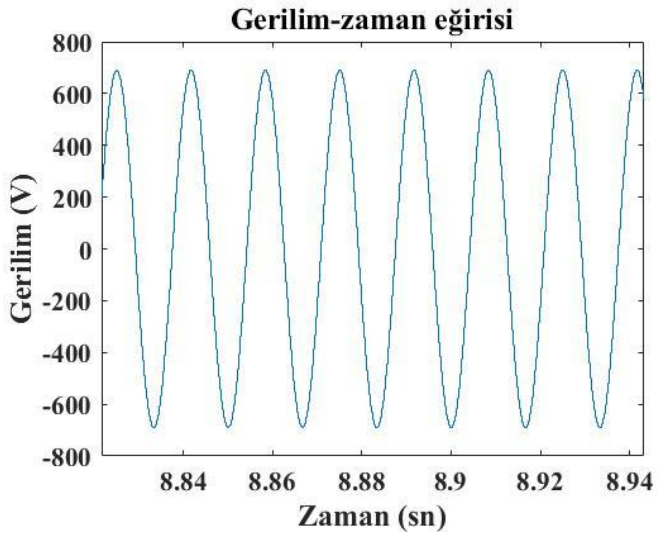


Şekil 4.49 Rüzgâr türbin açısal hız



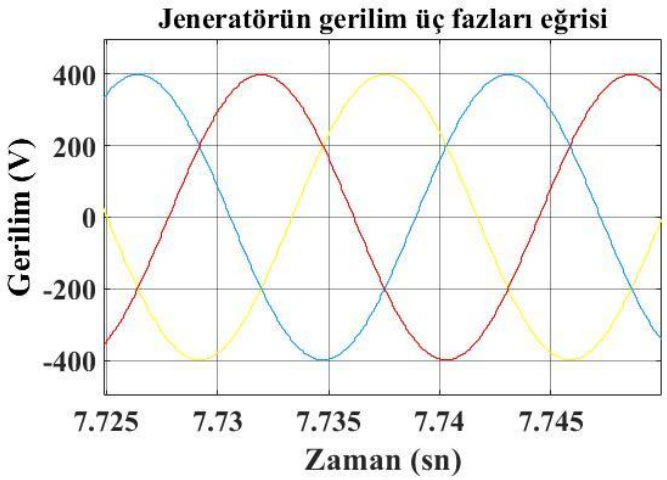
Şekil 4.50 Jeneratör açısal hız

Jeneratör dönmeye başladığında otomatik olarak manyetik alanlar üretir ve böylece elektrik üretir. İki faz arasındaki voltaj voltmetre ile ölçülmüştür ve eğri şekil 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil 4.51 Jeneratörün iki faz arasında gerilim eğrisi

Burada jeneratörün her fazının gerilimi ölçülmüştür ve şekil 4.52'de gösterilmiştir.



Şekil 4.52 Jeneratörden çıkış üç faz gerilimi eğrisi

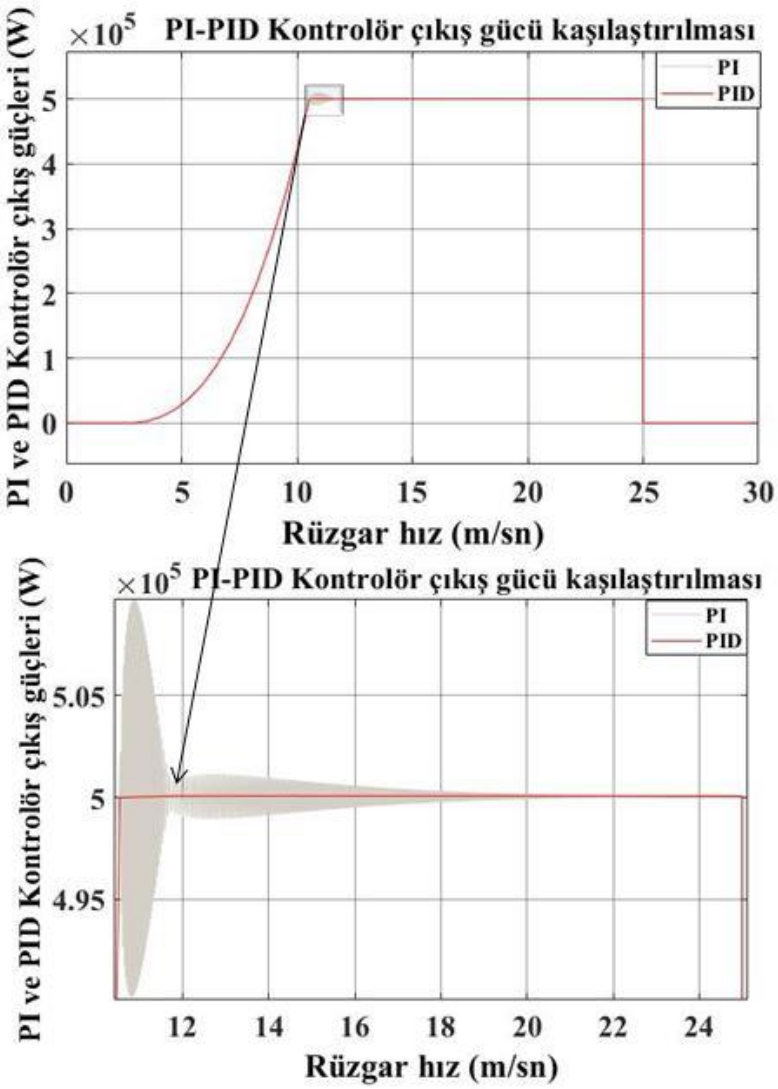
Çizelge 4.1 Kontrolörlerin katsayıları

Kontrolör / Katsayıların	PI	PID	GA-PID	BA-PID
Kp	-1	-0.9	-0.9841851386	-0.987
Ki	-0.00001	-0.000016	-0.00001641962	0
Kd	0	-0.9	-0.94609947604	-0.0040

4.2 Tartışma

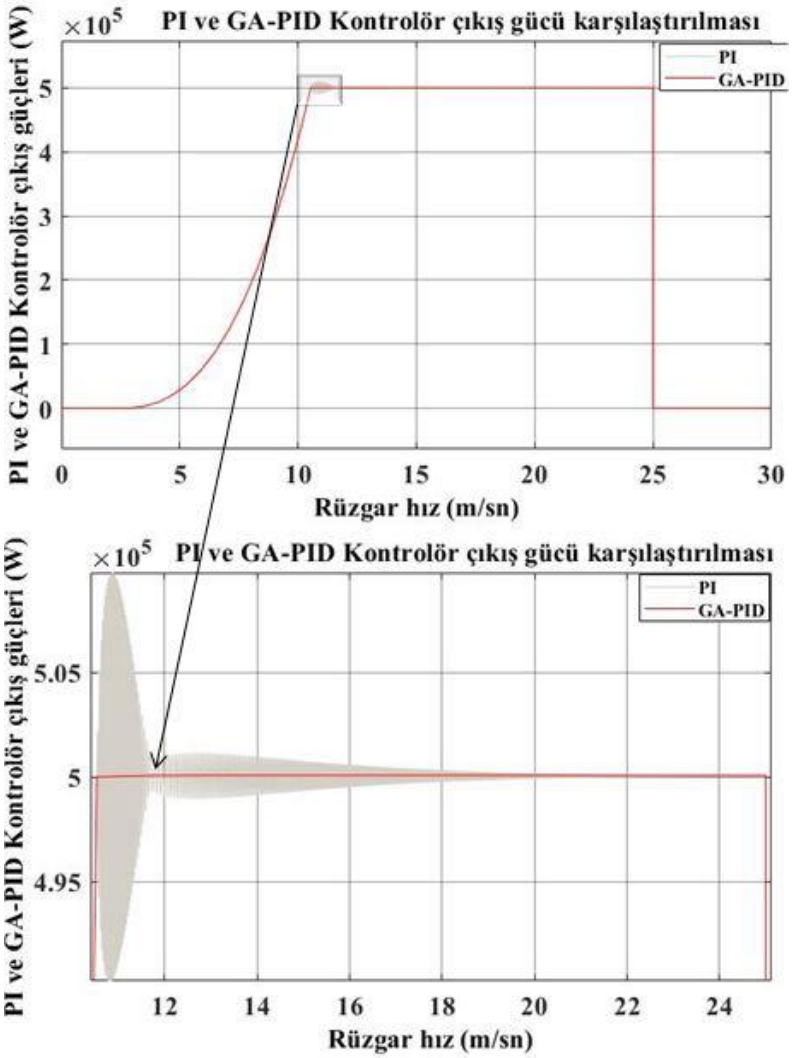
4.2.1 Rampa fonksiyonu

Bu bölümde, rüzgâr türbininin çıkış güçleri aynı grafikte ikişer ikişer karşılaştırılmıştır. İlk olarak, PI ve PID kontrolörlerinin katsayıları Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır ve çıkış güçleri Şekil 4.53'te gösterilmiştir. Burada Şekil 4.53'e göre PID kontrolörün PI kontrolörden rüzgâr türbini hatve açısı daha iyi kontrol ettiği gösterilmiştir.



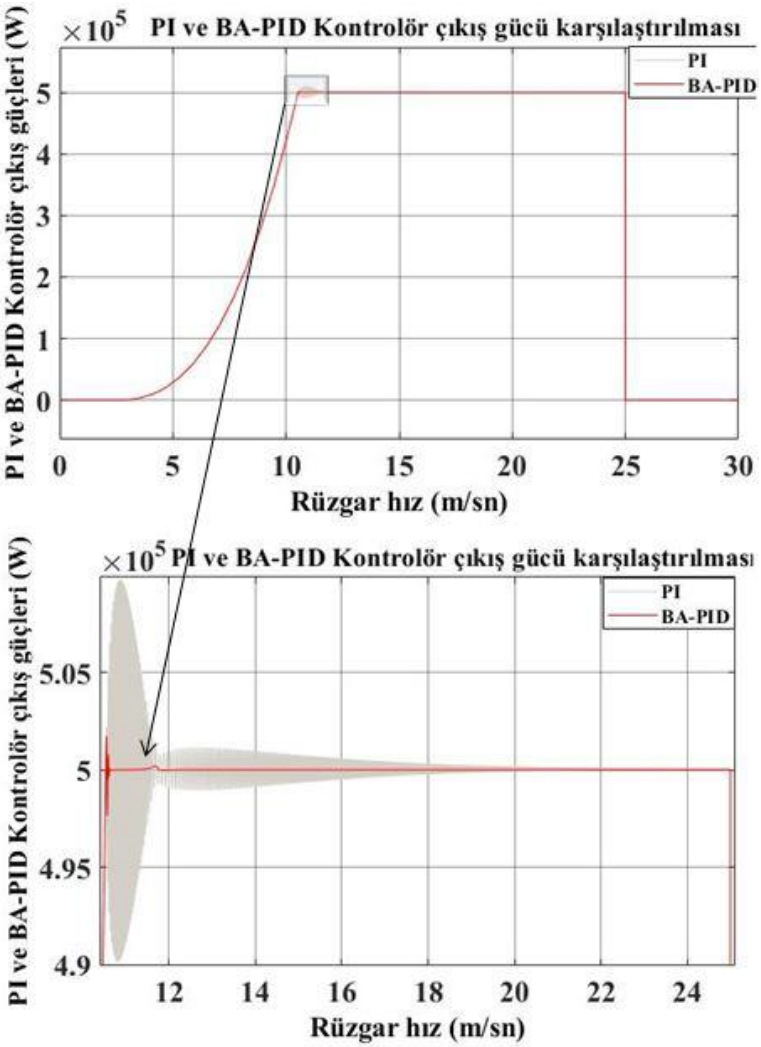
Şekil 4.53 PI ve PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması

PI ve GA-PID kontrolör çıkış gücü karşılaştırılmıştır ve Şekil 4.54'te görülmektedir. Burada GA-PID kontrolörün rüzgâr türbininin çıkış gücünü PI kontrolörden daha iyi kontrol ettiği açıkça gösterilmiştir.



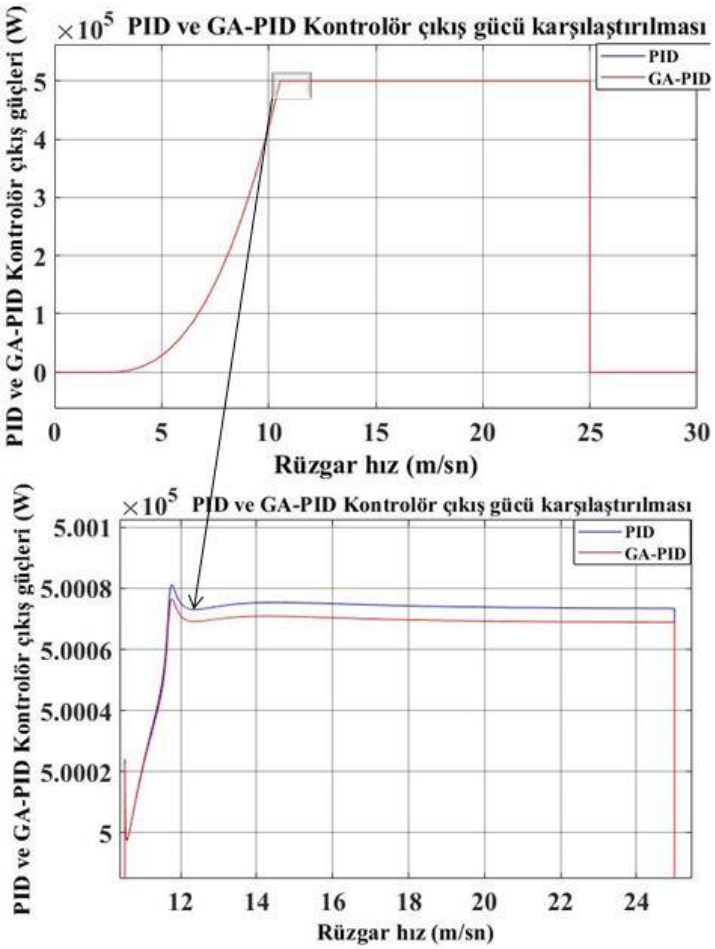
Şekil 4.54 PI ve GA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması

PI ve BA-PID kontrolörleri için çıkış gücü karşılaştırma eğrisi aşağıdaki Şekil 4.55'te gösterilmektedir. Her zamanki gibi, PI kontrolörü hiçbir zaman diğer kontrolörlerden daha iyi optimize edilmemiştir. Burada BA-PID kontrolörün rüzgâr türbini sistemini PI kontrolörden daha iyi kontrol ettiği gösterilmiştir.



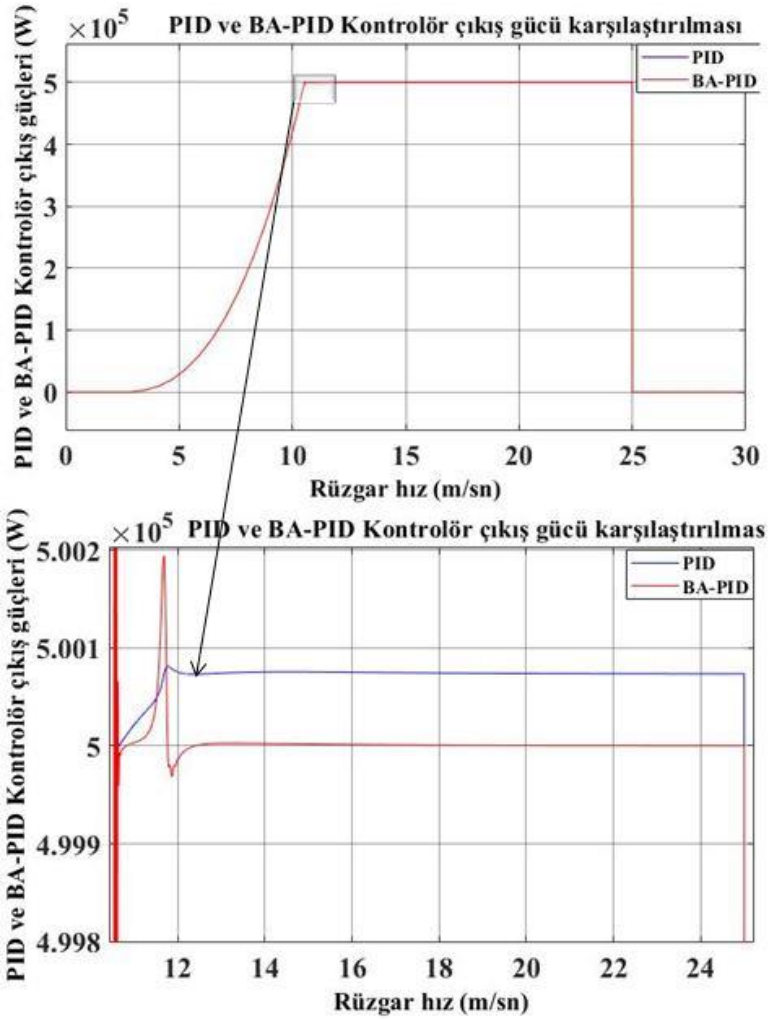
Şekil 4.55 PI ve BA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması

PID ve GA-PID kontrolörlerinin çıkış güçleri karşılaştırılmıştır ve Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Burada, PID ve GA-PID kontrolörün çıkış güçleri karşılaştırılmıştır ve çok az fark olduğu görülmüştür. GA-PID kontrolörün rüzgâr türbini sisteminin hatve açısını PID kontrolörden daha iyi kontrol edebildiği gösterilmiştir.



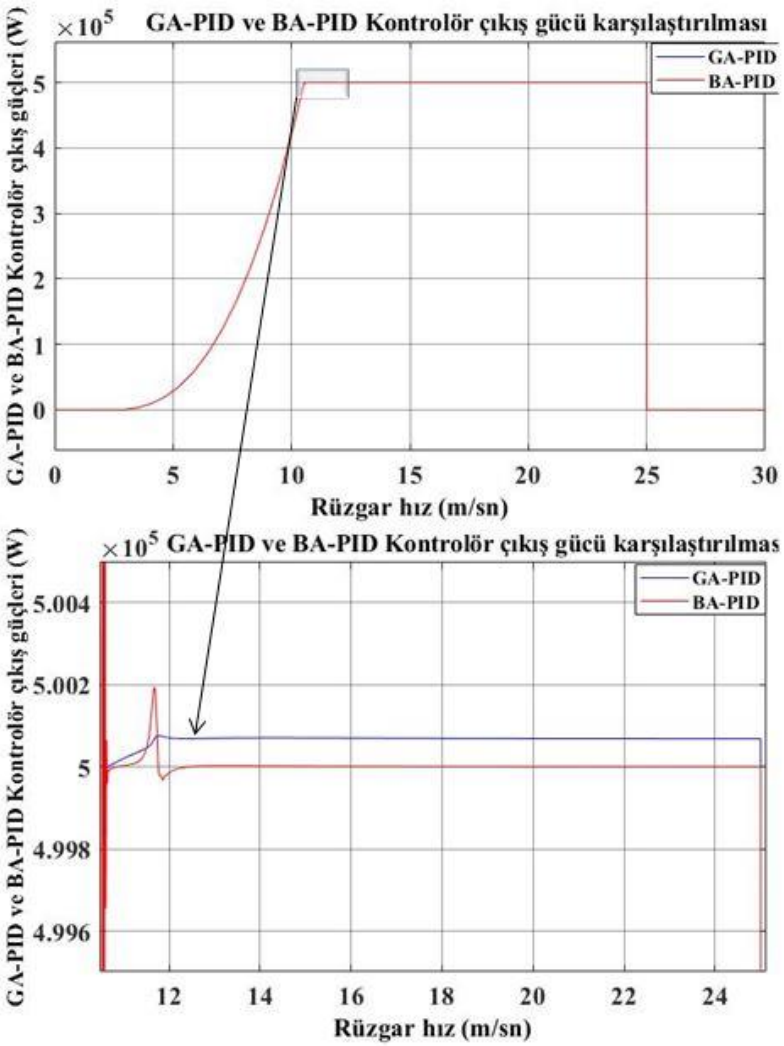
Şekil 4.56 PID ve GA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması

PID ve BA-PID kontrolörün rüzgâr türbini çıkış güçleri karşılaştırılmıştır ve Şekil 4.57'de gösterilmiştir. Burada BA-PID kontrolörün rüzgâr türbininin çıkış gücünü PID kontrolörden daha iyi optimize ettiği gösterilmiştir.



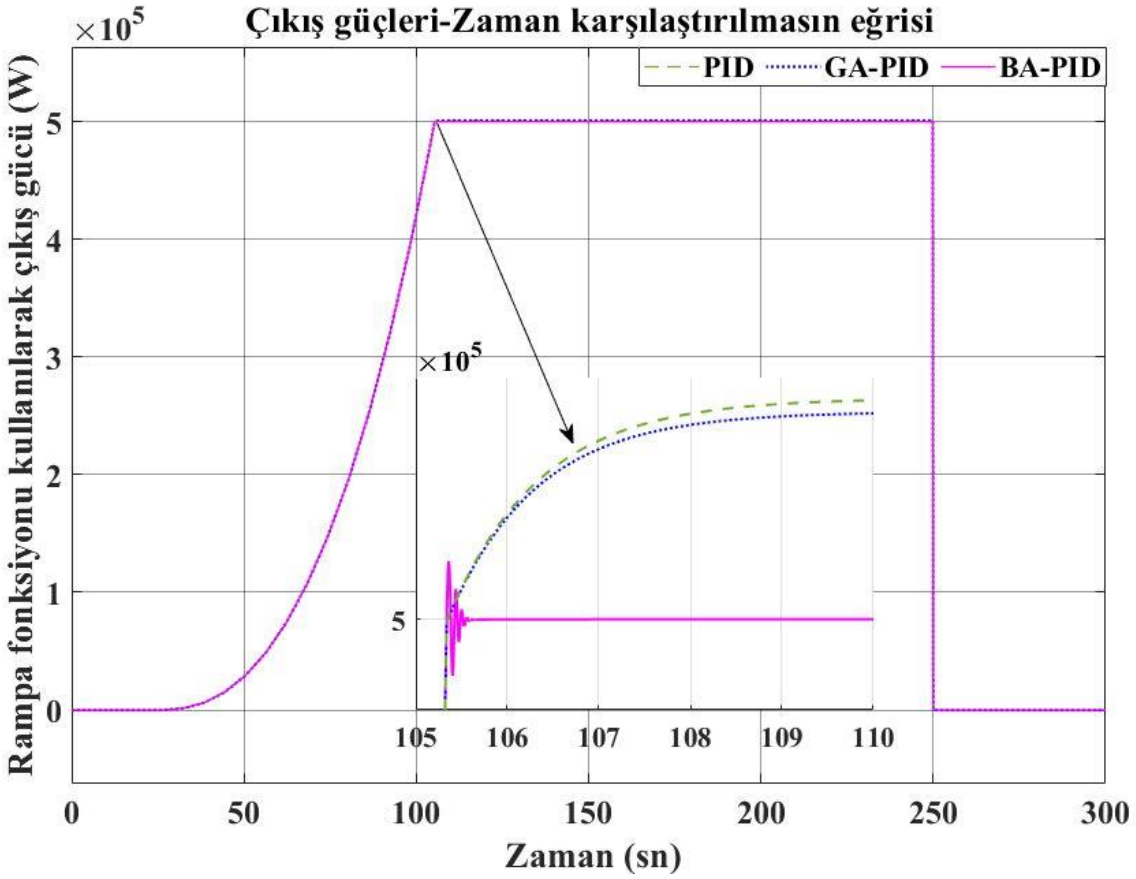
Şekil 4.57 PID ve BA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması

Son olarak, GA-PID ve BA-PID kontrolörleri karşılaştırılmıştır ve aşağıdaki Şekil 4.58'de gösterilmiştir. BA-PID kontrolörünün rüzgâr türbininin çıkış gücünü GA-PID kontrolöründen daha iyi kontrol edebildiği gösterilmiştir. Bu çalışmada, BA-PID kontrolörünün rüzgâr türbininin çıkış gücünü kontrol etmek için en iyi kontrolör olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.58 GA-PID ve BA-PID kontrolör çıkış güçlerin karşılaştırılması

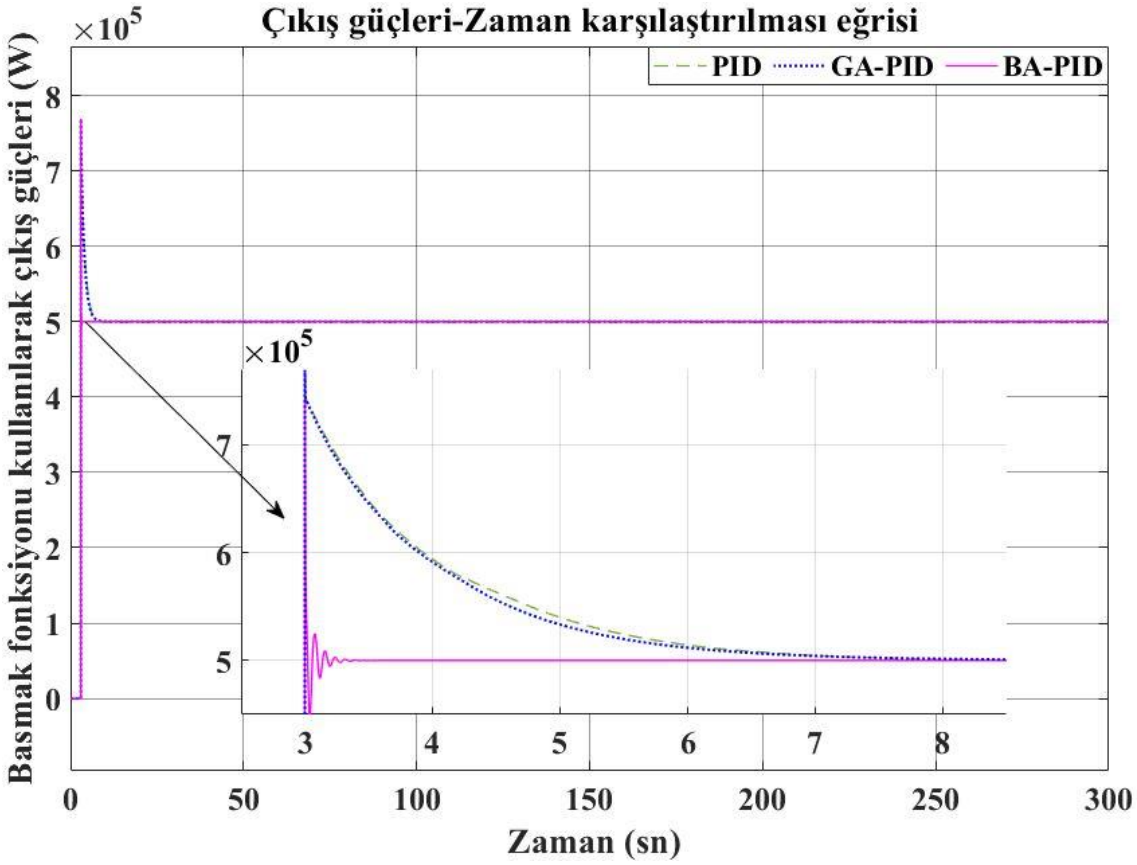
Daha sonra rampa fonksiyonu kullanılarak rüzgâr türbinin çıkış güçleri üçer üçer karşılaştırılmıştır ve Şekil 4.59'da görülmektedir.



Şekil 4.59 Çıkış güçleri karşılaştırılmasın grafiği

4.2.2 Basmak fonksiyonu

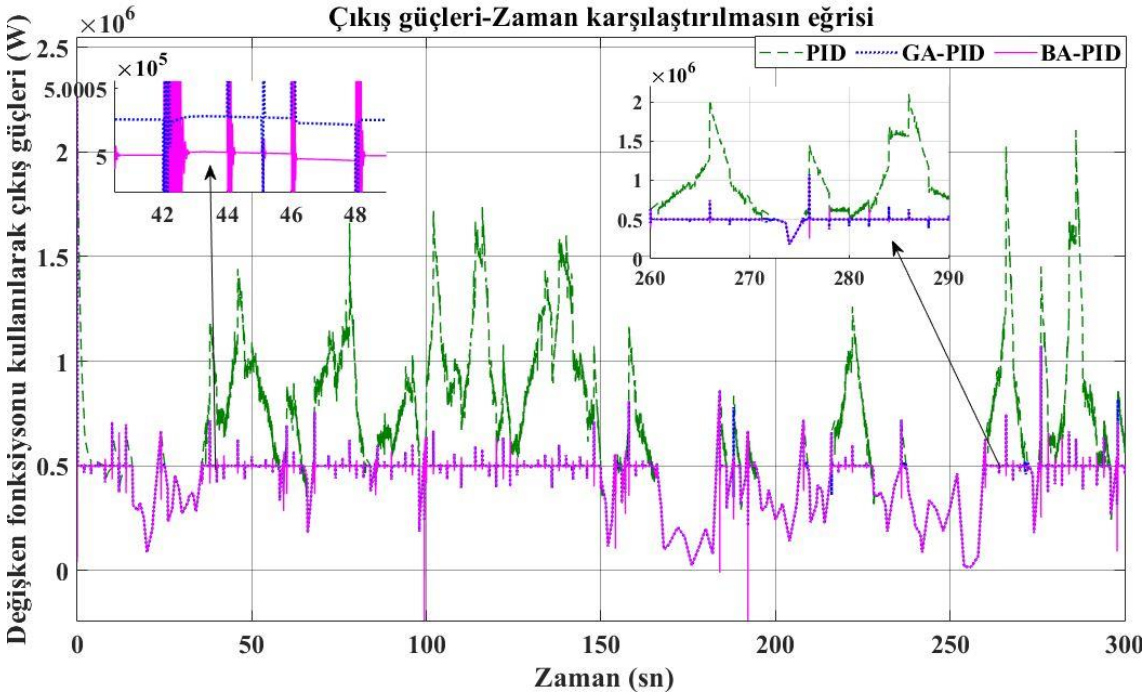
Basmak fonsiyonu kullanılarak çıkış güçleri üçer üçer kaşılaştırılmıştır ve Şekil 4.60'da görülmektedir.



Şekil 4.60 Çıkış güçleri karşılaştırılması

4.2.3 Değişken rüzgâr hız fonksiyonu

Değişken rüzgâr hız kullanılarak çıkış güçleri üçer üçer kaşılaştırılmıştır ve Şekil 4.61'de görülmektedir.



Şekil 4.61 Çıkış güçleri karşılaştırılması

5 SONUÇ VE ÖNERİ

Rüzgâr türbininin güç çıkışını kontrol edilmesi önemlidir. Herhangi bir kontrolör olmadan nominal çıkış gücü Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Rüzgâr türbininin hatve açısını kontrol etmek için birçok yöntem vardır. Bu çalışmada dört tip kontrolör kullanılmıştır. İlk olarak, PI kontrolörünün katsayılarını (Kp, Ki) ayarlamak için Nichols-Ziegler yöntemi kullanılmıştır. Çıkış gücü ayar noktasında (500KW) kontrol edilmiştir (stabilize edilmiştir). İstenilen sonuçlar elde edilmiştir, ancak bazı kararsızlıklar görülmüştür ve Şekil 4.4'e göre rüzgâr türbininin 100 saniye ile 120 saniye arasındaki çıkış gücü eğrisi ±%10'u aşmaktadır.

Daha sonra PID kontrolörlerinin katsayıları Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır ve eğri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. PID kontrolörün PI kontrolörden daha iyi sonuç elde edildiği açıkça görülmektedir.

PID kontrolör katsayılarını (Kp, Ki ve Kd) optimize etmek için, bu çalışmada GA ve BA optimizasyonu kullanılarak en iyi katsayılar (Kp_{opt}, Ki_{opt} ve Kd_{opt}) elde edilmiştir. GA-PID kontrolör kullanılarak çıkış gücü sabit tutulmuştur ve bu kontrolör PID'den daha iyidir. GA-PID kontrolörün güç çıkışı şekil 4.28'de gösterilmiştir. BA-PID kontrolörünün diğerleri arasında en iyi kontrolör olduğu gösterilmiştir ve şekil 4.40'da gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Abdelhak, B.J. 2015. Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 108 pages, Reims.

Abdelli, A. 2007. Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 212 pages, Toulouse.

Ahmad, C.H. 2017. Pitch angle control system design for wind turbine. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, 81 sayfa, Van.

Akyol, S. ve Alataş, B. 2012. Güncel sürü zekâsı optimizasyon algoritmaları. Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi., 1: 36-50.

Alakour, A. 2020. Rüzgâr türbini kanat tasarımı, analizi ve optimizasyonu. Staj Projesi, Karabük Üniversitesi, 52 sayfa, Karabük.

Almaz, R. 2020. Değişken kanat açılı düşey eksenli rüzgâr türbini tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 67 sayfa, İzmir.

Amir, M. 2014. Amélioration des performances des antennes imprimées basée sur des méthodes de modélisation et d'optimisation sophistiquées. Thèse de doctorat, Université de Batna, 158 pages, Batna.

Azzouz, S. 2019. Amélioration de la commande d'un système éolien à base d'une machine MADA utilisant les techniques intelligentes. Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 180 pages, M'Sila.

Baburajan, S. and Ismail, A. 2017. Design and Control of the Pitch of Wind Turbine through PID. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)., 4: 657-661.

Baburajan, S. 2017. Pitch control of wind turbine through PID, Fuzzy and adaptive Fuzzy-PID controllers. Master thesis, Kate Gleason College of Engineering, 62 pages, New York.

Bechir, A. 2016. Résolution de problèmes d'optimisation par les systèmes multi-agents et les approches évolutionnaires. Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 125 pages, Biskra.

Belkacem, T. 2010. Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable. Thèse de Master, Université de Batna, 131 pages, Batna.

Bencharif, S. 2013. Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne. Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 96 pages, Biskra.

Bıldırçin, H.B. 2018. Rüzgâr türbin teknolojileri ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi kaynağının genel durumu. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, 56 sayfa, Osmaniye.

Borase, R.P. Maghade, D.K. Sondkar, S.Y. and Pawar, S.N. 2020. A review of PID control, tuning methods and applications. International Journal of Dynamics and Control., 9: 818–827.

Boukerma, S. 2021. Etude et optimisation des codes pseudo-aléatoires pour les applications à accès multiple. Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 128 pages, M'sila.

Boukhezzar, B. 2006. Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, pages, Orsay.

Boulegroune, I.J.A. 2020. Etude et réalisation d'une turbine éolienne. Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 63 pages, Algérie.

Boyette, A. 2006. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, 138 pages, Nancy.

Camblong, H. 2003. Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 275 pages, Paris.

Charrouf, O. 2012. Optimisation d'un système de dessalement renouvelable. Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 120 pages, Biskra.

Civelek, Z. Çam, E. Lüy, M. and Görel, G. 2016. A new fuzzy controller for adjusting of pitch angle of wind turbine. The Online Journal of Science and Technology., 6: 1-8.

Civelek, Z. 2013. Bulanık PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbininin Hatve Açısının Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, 119 sayfa, Kırıkkale.

Cooren, Y. 2008. Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire: application en génie médical et en électronique. Thèse de doctorat, Université Paris 12 Val de Marne, 146 pages, Créteil.

Courbois, A. 2013. Étude expérimentale du comportement dynamique d'une éolienne offshore flottante soumise à l'action conjuguée de la houle et du vent. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 249 pages, Nantes.

Çelik, I. Yıldız, C. ve Şekkeli, M. 2018. Rüzgâr enerjisi santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji., 6: 898-908.

Çiftçi, A. ve Dursun, M. 2017. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron jeneratör ile maksimum güç noktası izleme algoritması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi., 5: 356-369.

Daas, M.S. 2014. Optimisation dynamique par des approches inspirées de la nature. Thèse de Master, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 99 pages, Oum El Bouaghi.

Eberhart, R. and Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. International Symposium on Micro Machine and Human Science., Conference: Nagoya.

El Dor, A. 2012. Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire: applications en segmentation d'images et en électronique. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 149 pages, Champs-sur-Marne.

Elibüyük, U. ve Üçgül, İ. 2014. Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi (Journal of YEKARUM)., 2: 1-14.

Gaagaa, A. 2012. Commande d'une éolienne par backstepping avec action intégrale. Thèse de Master, Université Larbi Ben M'Hidi d'Oum El Bouaghi, 84 pages, Oum El Bouaghi.

Grady, S.A. Hussaini, M.Y. and Abdullah, M.M. 2005. Placement of wind turbines using genetic algorithms. Renewable Energy., 30: 259–270.

Guérette, D. 2010. Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d 'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration. Thèse de Master, Université du Québec à Rimouski, 211 pages, Rimouski.

Gupta, J. and Kumar, A. 2012. Fixed pitch wind turbine-based permanent magnet synchronous machine model for wind energy conversion systems. Journal of Engineering and Technology., 2: 52-62.

Hakyemez, M.E. 2011. İstanbul Kilyos (Kumköy) Bölgesinin Rüzgâr Kaynaklı Enerjiler Açısından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 79 sayfa, İstanbul.

Hao, X. Zhang, W. Liu, X. and Liu, J. 2008. Aerodynamic and Aeroacoustic Optimization of Wind Turbine Blade by a Genetic Algorithm. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit., Reno.

Hezer, S. and Yakup, K. 2013. Eşzamanlı dağıtımlı ve toplamalı araç rotalama problemlerinin çözümü için bakteriyel besin arama optimizasyonu tabanlı bir algoritma. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University., 28: 373-382.

Husain, M.A. and Tariq, A. 2014. Modeling and study of a standalone PMSG wind generation system using MATLAB/SIMULINK. Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering., 2: 270-277.

Hwas, A. and Katebi, R. 2012. Wind turbine control using PI pitch angle controller. IFAC Proceedings., 45: 241-246.

Işık, E. 2020. Rüzgâr türbini kanat tasarımı ve analizi. Makina mekanik tasarım projesi, Kocaeli Üniversitesi, 61 sayfa, Kocaeli.

Johnson, G.L. 2006. Wind energy systems. Published by Kansas State University, 449 pages, Manhattan.

Jourieh, M. 2007. Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse de doctorat, l'´Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 160 pages, Paris.

Kahla, S. 2018. Modélisation et commande d'un système éolien. Thèse de doctorat, Université 8 mai 1945 Guelma, 152 pages, Guelma.

Karabacak, M. ve Kılıç, F. 2017. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin dayanıklı hibrit sensörsüz denetimi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi., 23: 126-132.

Karaboga, D. 2005. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report-TR06. Erciyes University, Engineering Faculty Computer Engineering Department, Kayseri.

Karadağ, I.H. 2009. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisinin önemi ve rüzgâr türbini tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 142 sayfa, İstanbul.

Kennedy, J. and Eberhart, R.C. 1997. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Conference: Orlando.

Kim, Y.S. Chung, I.Y. and Moon, S.I. 2015. Tuning of the PI controller parameters of a PMSG wind turbine to improve control performance under various wind speeds. Energies 2015., 8: 1406-1425.

Kılıçaslan, M.F. 2015. Rüzgâr türbinlerinde çift beslemeli asenkron jeneratör denetimi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, 94 sayfa, Kırıkkale.

Kılıç, E. and Özdemir, M.T. 2019. Güç sistemlerindeki optimum otomatik gerilim regülasyonu için çoklu amaç fonksiyonunun belirlenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi., 10: 1-12.

Kouba, N.E.Y. 2017. Contrôle Automatique des Groupes de Production en Présence d'Eoliennes avec Stockage. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 191 pages, Bab Ezzouar.

Langlois, J.D. 2006. Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau. Thèse de Master, École de Technologie Supérieure, 144 pages, Montreal, Quebec.

Leithead, W.E. and Connor, B. 2000. Control of variable speed wind turbines: Dynamic models. International Journal of Control., 73: 1173-1188.

Lüy, M. Civelek, Z. and Çam, E. 2017. Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolü ile çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi., 23: 504-511.

Marcoux, É. 2013. Optimisation des systèmes de transmission de puissance pour éolienne. Thèse de Master, École de Technologie Supérieure, 267 pages, Montréal.

Mekhiche, Y. 2012. L'optimisation de puissance des éoliennes à vitesse variable. Thèse de Master, Université de M'sila, 99 pages, M'Sila.

Mishra, S. Panigrahi, B.K. and Tripathy, M. 2004. A Hybrid Adaptive-Bacterial-Foraging and Feedback Linearization Scheme based D-STATCOM. International Conference on Power System Technology (POWERCON)., Conference Location: Singapore.

Mittal, P. Kulkarni, K. and Mitra, K. 2016. A novel hybrid optimization methodology to optimize the total number and placement of wind turbines. Renewable Energy an international journal., 86: 133-147.

Nurbay, N. and Çınar, A. 2005. Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması. III. Yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu ve sergisi., Kocaeli Üniversitesi, solar-academy.com., 1: 164-168.

Parvandeh, S. 2013. Bacteria foraging optimization with genetic operators for QAP and MQAP. Master thesis, Eastern Mediterranean University, 79 pages, Famagusta.

Patel, M.R. and Beik, O. 1999. Wind and solar power systems. Published by CRC Press, 350 pages, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.

Poitiers, F. 2003. Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse du doctorat, Université de Nantes, 167 pages, Nantes.

Redjem, R. 2009. Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne. Thèse de Master, Université Mentouri de Constantine, 78 pages, Constantine.

Rolan, A. Luna, A. Vázquez, G. Aguilar, D. and Azevedo, G. 2009. Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. IEEE International Symposium on Industrial Electronics., Conference Location: Seoul.

Ruge Ruge, I.A. 2011. Control signal optimization for PID regulators based on a Wind-Up anti-reset architecture. Tecnura., 15: 24-31.

Saad, N.H. El-Sattar, A.A. and Marei, M.E. 2018. Improved bacterial foraging optimization for grid connected wind energy conversion system based PMSG with matrix converter. Ain Shams Engineering Journal., 9: 2183-2193.

Sanchez, E.N. and Ruiz-Cruz, R. 2016. Doubly fed induction generators: control for wind energy. Published by CRC Press Taylor & Francis Group, 172 pages, Boca Raton.

Sarkar, M.R. Julai, S. Tong, C.W. Uddin, M. Romlie, M.F. and Shafiullah, G.M. 2020. Hybrid pitch angle controller approaches for stable wind turbine power under variable wind speed. Energies 2020., 13: 1-19.

Senjyu, T. Sakamoto, R. Urasaki, N. Higa, H. Uezato, K. and Funabashi, T. 2006. Output power control of wind turbine generator by pitch angle control using minimum variance control. Published online in Wiley Inter Science., 154: 10–18.

Stiebler, M. 2008. Wind energy systems for electric power generation. Published by Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG. 193 pages, Berlin.

Terzioğlu, H. Arslan, M. and Demirok, H.D. 2019. Rüzgâr enerjisi ile Elektrik üretimi. In: Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri, pp.219-241, Gece Akademi. Konya.

Tong, W. 2010. Wind power generation and wind turbine design. WIT Press publishes leading books in Science and Technology, 769 pages, USA, Canada and Mexico.

Tortumluoğlu, M.I. and Doğan, M. 2021. Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri için Uygun Yer Seçim Kriterlerinin İrdelenmesi ve Kuzey Ege Kıyılarına Uygulanması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi., 23: 25-42.

Uyar, M. Gençoğlu, M.T. and Yıldırım, S. 2005. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Jeneratör Sistemleri. 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 6 sayfa, Mersin.

Ünsalver, C. 2008. Rüzgâr enerji sistemlerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 70 sayfa, İstanbul.

Vechiu, I. 2005. Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. Thèse du doctorat, Université du Havre, 215 pages, Le Havre.

Vestergaard, J., Brandstrup, B. and Goddard, R. D. 2004. A brief history of the wind turbine ındustries in Denmark and the United States. in the Academy of International Business (Southeast USA Chapter) Conference Proceedings, November 2004, pp. 322-327.

Yin, M. Li, G. Zhou, M. and Zhao, C. 2007. Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. IEEE Power Engineering Society General Meeting., Conference Location: Tampa.

Zaimi, A. 2014. Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents. Thèse de Master, Cnam Maroc (Conservatoire National des Arts et Métiers), 122 pages, Casablanca.

Zerari, N. 2015. Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille. Thèse du doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 120 pages, Annaba.

EKLER

EK 1 Birinci Bakteriyel Algoritmasın programı

EK 2 İkinci Bakteriyel Algoritmasın programı

EK 3 Simüle edilen rüzgâr enerji sistemleri parametreleri

EK 1 Bakteriyel Algoritmasın programı

```
function F = tracklsq(pid)
        % Track the output of optsim to a signal of 1

        % Variables a1 and a2 are shared with RUNTRACKLSQ
        Kp = pid(1);
        Ki = 0;
        Kd = pid(2);

        sprintf('The value of interation Kp= %3.0f, Kd= %3.0f', pid(1),pid(2));
        % Compute function value
        simopt = simset('solver','ode5','SrcWorkspace','Current','DstWorkspace','Current');
% Initialize sim options
        [tout,xout,yout] = sim('optsim1',[-1 0],simopt);
        e=yout-1 ;  % compute the error
        sys_overshoot=max(yout)-1; % compute the overshoot

     alpha=10;beta=10;
     F=e2*beta+sys_overshoot*alpha;

end
```

EK 2 Bakteriyel Algoritmasın programı

```
%Initialization
clear all
clc
p=2;                    % dimension of search space
s=10;                   % The number of bacteria
Nc=5;                   % Number of chemotactic steps
Ns=4;                   % Limits the length of a swim
Nre=4;                  % The number of reproduction steps
Ned=2;                  % The number of elimination-dispersal events
Sr=s/2;                 % The number of bacteria reproductions (splits) per generation
Ped=0.25;               % The probabilty that each bacteria will be eliminated/dispersed
c(:,1)=0.05*ones(s,1);      % the run length
for m=1:s               % the initital posistions
   P(1,:,1,1,1)= 50*rand(s,1)';
   P(2,:,1,1,1)= .2*rand(s,1)';
  %P(3,:,1,1,1)= .2*rand(s,1)';
end

%%
%Main loop


%Elimination and dispersal loop
for ell=1:Ned


%Reprodution loop


   for K=1:Nre

%  swim/tumble(chemotaxis)loop

      for j=1:Nc

         for i=1:s
            J(i,j,K,ell)=tracklsq(P(:,i,j,K,ell));

% Tumble


            Jlast=J(i,j,K,ell);
            Delta(:,i)=(2*round(rand(p,1))-1).*rand(p,1);
            P(:,i,j+1,K,ell)=P(:,i,j,K,ell)+c(i,K)*Delta(:,i)/sqrt(Delta(:,i)'*Delta(:,i)); %
This adds a unit vector in the random direction
```

```
% Swim (for bacteria that seem to be headed in the right direction)

            J(i,j+1,K,ell)=tracklsq(P(:,i,j+1,K,ell));
            m=0;        % Initialize counter for swim length
               while m<Ns
                    m=m+1;
                    if J(i,j+1,K,ell)<Jlast
                      Jlast=J(i,j+1,K,ell);

P(:,i,j+1,K,ell)=P(:,i,j+1,K,ell)+c(i,K)*Delta(:,i)/sqrt(Delta(:,i)'*Delta(:,i)) ;
                      J(i,j+1,K,ell)=tracklsq(P(:,i,j+1,K,ell));
                    else
                      m=Ns ;
                    end

               end
            J(i,j,K,ell)=Jlast;
            sprintf('The value of interation i %3.0f ,j = %3.0f  , K= %3.0f, ell= %3.0f' , i,
j, K ,ell );

         end % Go to next bacterium

      end  % Go to the next chemotactic


%Reprodution
      Jhealth=sum(J(:,:,K,ell),2);            % Set the health of each of the S bacteria
      [Jhealth,sortind]=sort(Jhealth);         % Sorts the nutrient concentration in order of
ascending
      P(:,:,1,K+1,ell)=P(:,sortind,Nc+1,K,ell);
      c(:,K+1)=c(sortind,K);                % And keeps the chemotaxis parameters with
each bacterium at the next generation


%Split the bacteria (reproduction)
         for i=1:Sr
            P(:,i+Sr,1,K+1,ell)=P(:,i,1,K+1,ell); % The least fit do not reproduce, the
most fit ones split into two identical copies
            c(i+Sr,K+1)=c(i,K+1);
         end
      end %  Go to next reproduction


%Eliminatoin and dispersal
      for m=1:s
         if  Ped>rand % % Generate random number
            P(1,:,1,1,1)= 50*rand(s,1)';
            P(2,:,1,1,1)= .2*rand(s,1)';
```

```
            %P(3,:,1,1,1)= .2*rand(s,1)';
          else
             P(:,m,1,1,ell+1)=P(:,m,1,Nre+1,ell); % Bacteria that are not dispersed
          end
        end
    end % Go to next elimination and disperstal

%Report
        reproduction = J(:,1:Nc,Nre,Ned);
        [jlastreproduction,O] = min(reproduction,[],2);  % min cost function for each
bacterial
        [Y,I] = min(jlastreproduction);
        pbest=P(:,I,O(I,:),K,ell);
        Kp= pbest(1,:)
        Kd=pbest(2,:)
```

EK 3 Simüle edilen rüzgâr enerji sistemleri parametreleri

Nominal çıkış gücü	500 kW
Çalışma modu	Şebeke bağlantılı
Devreye grime rüzgâr hızı	3 m/s
Nominal rüzgâr hızı	12 m/s
Devreden çıkma rüzgâr hızı	25 m/s
Rotor çapı	48m
Süpürme alanı	1810 m^2
Kanat sayısı	3
Nominal rotor hızı	30 rpm
Rotor hız aralığı	10-30 rpm
Dişli kutusu oranı	1/50
Jeneratör adedi	2
Jeneratör tipi (P_p)	Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratör
Jeneratör nominal çıkış	250 kW
Jeneratör nominal devir	1500 rpm
Jeneratör gerilimi	690 V

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Ismail MOHAMED SOUGUEH

Eğitim

Yüksek Lisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	2022-Halen
Lisans	Universite de Djibouti Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2014-2017

İş Deneyimi

Yıl	**Kurum**	**Görev**