

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**RÜZGAR ENERJİ GÜÇ SİSTEMİNDE
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİNİN
BULANIK MANTIK TABANLI GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

BURHAN AKSOY

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGÂR ENERJİ GÜÇ SİSTEMİNDE MAKSİMUM GÜÇ
NOKTASI TAKİBİNİN BULANIK MANTIK TABANLI
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

BURHAN AKSOY

Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Hüseyin ÇALIK

Jüri Üyesi, Giresun Üniversitesi

.....

Dr.Öğr.Üyesi Murat AYAZ

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 17.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, elektrik şebekesinden uzak ve rüzgâr hızlarının uygun olduğu bölgelerde kurulması planlanan, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin en verimli şekilde değerlendirilmesine imkân verecek en uygun Maksimum Güç Noktası Takibi yönteminin belirlenmesi, dolayısıyla enerji ihtiyacının en uygun yöntemle sağlanabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca sürecin en zor zamanlarında çalışmalarımda kıymetli desteklerini esirgemeyen, bilgisi, görgüsü ve mesleki bilgi ve becerisiyle her zaman örnek aldığım kıymetli hocam, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca kıymetli desteklerini esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarım Meltem KAYA KAYIKÇI ve değerli eşi Fatih KAYIKÇI, Murat BAYKAL ve Batu BELHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte ilgisi sabrı ve sonsuz desteğini ve dualarını hiç esirgemeyen, hayatımın her anında yanımda olduğuna şükrettiğim sevgili eşim Selda AKSOY'a sevgi ve ilgisinden dolayı minnettarım.

Çalışmalarımın başından sonuna kadar gerek ders aşamasında gerek tez yazım sürecinde en büyük destekçilerimden olan kıymetli oğlum, göz aydınlığım Göktuğ AKSOY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2021

Burhan AKSOY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ii
TABLOLAR DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. RÜZGAR ENERJİSİ.....	4
1.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi	5
1.2. Dünya’da Rüzgâr Enerjisinin Durumu.....	7
1.3. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Durumu.....	11
1.4. Rüzgâr Hızını Etkileyen Faktörler	19
1.4.1. Yükseklik	19
1.4.2. Pürüzlülük (Roughness).....	20
1.4.3. Türbülans	23
1.4.4. Wake (iz) etkisi	24
1.4.5. Tünel etkisi	25
1.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	25
1.5.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri	26
1.5.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri	31
1.5.2.1. Darrieus tip rüzgâr türbinleri;	31
1.5.2.2. Savonius tip rüzgâr türbinleri;	32
1.6. Rüzgâr Enerjisi Eşitliği.....	33
1.7. Hava Yoğunluğu Hesabı.....	34
1.8. Mgmt Yöntemi	37
2. MALZEME VE YÖNTEM	39
3. KMSG MODELİ.....	42
4. TASARIMDA KULLANILAN MPPT MODELLERİ.....	45
4.1. S&G Modeli	45
4.2. BMD Modeli	48
5. BUCK-BOOST DÖNÜŞTÜRÜCÜ	55
5.1. Buck-Boost Çeviricinin Kararlı Durum Analizi	57
5.2. Bobin ve Kondansatör Hesapları.....	60
5.3. Doğrultma Diyodu Hesapları	62
6. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ	64
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	70
7.1. 6 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi.....	71
7.2. 8 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi.....	74
7.3. 10 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi.....	76
7.4. 11 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi.....	79
7.5. 12 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi.....	81
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84

8.1. Değişken Hızlar için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi	84
KAYNAKLAR	86
EKLER	93
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	95
ÖZGEÇMİŞ	96



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dünya rüzgar potansiyelinin kıtalar bazında dağılımı.....	8
Şekil 1.2.	Dünya toplam rüzgâr gücü kurulumları.....	10
Şekil 1.3.	Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle değişimi	11
Şekil 1.4.	Yerli ve ithal kaynakların toplam kurulu güç içindeki payı.....	12
Şekil 1.5.	2019 kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı.....	14
Şekil 1.6.	Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum.....	15
Şekil 1.7.	Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için yıllar bazında kurulum.....	15
Şekil 1.8.	RES'lerin illere göre dağılımı	16
Şekil 1.9.	Ülkemizdeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı	17
Şekil 1.10.	RES'lerin bölgelere göre dağılımı	18
Şekil 1.11.	2019 yılı itibariyle inşa halindeki RES'ler.....	18
Şekil 1.12.	Rüzgâr hızı ile yükseklik arasındaki ilişki	19
Şekil 1.13.	Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği	21
Şekil 1.14.	Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği	22
Şekil 1.15.	Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği	22
Şekil 1.16.	Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi örneği	23
Şekil 1.17.	Wake (iz) etkisi	24
Şekil 1.18.	Rüzgârı alışı biçimlerine göre rüzgâr türbinleri	27
Şekil 1.19.	Tek kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini	28
Şekil 1.20.	İki kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini.....	29
Şekil 1.21.	Üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini	30
Şekil 1.22.	Çok kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini	30
Şekil 1.23.	Darrieus tip dikey eksenli rüzgâr türbini.....	32
Şekil 1.24.	Savonius tip dikey eksenli rüzgâr türbini.....	33
Şekil 1.25.	Rüzgâr türbinlerinin C_p - λ karakteristiği.....	37
Şekil 1.26.	Değişken rüzgâr hızlarında rüzgâr türbininde üretilen güç.....	38
Şekil 2.1.	SIMULINK ortamında tasarlanmış önerilen yöntem.....	41
Şekil 2.2.	Sistem girişine uygulanan değişken rüzgar hızları.....	41
Şekil 3.1.	SIMULINK ortamında tasarlanmış REDS modeli.....	44
Şekil 4.1.	S&G yönteminin akış şeması	47
Şekil 4.2.	S&G prensip şeması	47
Şekil 4.3.	SIMULINK ortamında tasarlanmış S&G yöntemi.....	48
Şekil 4.4.	SIMULINK ortamında tasarlanmış BMD modeli.....	49
Şekil 4.5.	BMD algoritmasına bağlı olarak görev döngüsü sinyali (d).....	52
Şekil 4.6.	Bulanık denetleyicilerin girişlerinin (e) sinyali	52
Şekil 4.7.	Bulanık denetleyicilerin girişlerinin (ce) sinyali	52
Şekil 4.8.	Görev döngüsü sinyaline (d) ait üyelik fonksiyonları.....	54
Şekil 5.1.	Çeviricilerde yüke güç aktarımı (a) Buck ve boost çeviricilerde (b) Tek anahtarlı buck-boost çeviricilerde	56
Şekil 5.2.	Buck ve boost çeviricinin arka arkaya bağlanması ile elde edilen buck-boost çevirici	56
Şekil 5.3.	Anahtarlar iletimde iken çevirici eşdeğer devresi.....	57

Şekil 5.4.	Anahtarlar kesimde iken çevirici eşdeğer devresi.....	57
Şekil 5.5.	Buck-Boost dönüştürücüye ait SIMULINK şeması.....	59
Şekil 5.6.	REDS gerilim çıkışı eğrisi	60
Şekil 5.7.	REDS üretilen akım çıkışı eğrisi.....	60
Şekil 6.1.	Batarya yönetim algoritması	66
Şekil 6.2.	SIMULINK ortamında tasarlanmış EYS modeli	66
Şekil 6.3.	Batarya yönetim algoritması SIMULINK modeli.....	67
Şekil 6.4.	Şarj durumunda batarya davranışları.....	68
Şekil 6.5.	Deşarj durumunda batarya davranışları	69
Şekil 7.1.	6 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç.....	72
Şekil 7.2.	6 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları	72
Şekil 7.3.	6 m/s hızındaki KMSG-S&G ve	
	BMD algoritmalarının karşılaştırılması	73
Şekil 7.4.	6 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması.....	73
Şekil 7.5.	8 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç.....	74
Şekil 7.6.	8 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları	75
Şekil 7.7.	8 m/s hızındaki KMSG-S&G ve	
	BMD algoritmalarının karşılaştırılması	75
Şekil 7.8.	8 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması.....	76
Şekil 7.9.	10 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç.....	77
Şekil 7.10.	10 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları	77
Şekil 7.11.	10 m/s hızındaki KMSG-S&G ve	
	BMD algoritmalarının karşılaştırılması	78
Şekil 7.12.	10 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması.....	78
Şekil 7.13.	11 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç.....	79
Şekil 7.14.	11 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları	80
Şekil 7.15.	11 m/s hızındaki KMSG-S&G ve	
	BMD algoritmalarının karşılaştırılması	80
Şekil 7.16.	11 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması.....	81
Şekil 7.17.	12 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç.....	82
Şekil 7.18.	12 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları	82
Şekil 7.19.	12 m/s hızındaki KMSG-S&G ve	
	BMD algoritmalarının karşılaştırılması	83
Şekil 7.20.	12 m/s için KMSG-Önerilen algoritma çıkışları.....	83
Şekil 8.1.	Değişken hızlarda önerilen algoritmaların karşılaştırılması.....	85

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Ülkelerin rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri	10
Tablo 1.2. Avrupa ülkelerinin rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri.....	10
Tablo 1.3. Türkiye’de yenilenebilir kaynaklar bazında elektrik üretimi	13
Tablo 1.4. Yüzey şekillerine göre pürüzlülük sınıfları ve uzunluk değerleri.....	20
Tablo 3.1. Tasarımda kullanılan rüzgâr türbini ve KMSG parametreleri	44
Tablo 4.1. BMD'yi modellemek için kullanılan kural tablosu	51
Tablo 5.1. REDS giriş ve çıkış parametreleri.....	61
Tablo 7.1. 6 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları.....	73
Tablo 7.2. 8 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları.....	76
Tablo 7.3. 10 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları	78
Tablo 7.4. 11 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları.....	81
Tablo 7.5. 12 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları.....	83
Tablo 8.1. Değişken hızlar için KMSG-önerilen algoritma çıkışları.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Rüzgârın esme yönüne dik alan, (m ²)
Ah	: Pürüzlülük elemanının bölge üzerine dağılmış ortalama yatay kesit alan
CF	: Kapasite faktörü
C_{out}	: Kondansatör Kapasitansı(Farad)
CP	: Güç faktörü
d	: Görev Döngüsü
E	: Enerji, (Joule, N.m)
fs	: Mosfetlerin Frekansı
h	: Pürüzlülük elemanının yükseklik değeri
I	: Türbülans Yoğunluğu
id	: d eksenli stator akımı(Amper)
iq	: q eksenli stator akımları(Amper)
L	: Bobin Endüktansı(Henry)
Ld	: d eksenli endüktansı(Henry)
m	: Kütle, (kg)
J	: Eylemsizlik momenti
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık, (Kelvin)
P	: Kutup sayısı
Pe	: Aktif Güç(Watt)
Pk	: Referans güç
Pem	: Elektromekanik güç
S	: Görünür Güç(VA)
s	: Pürüzlülük elemanının rüzgâra karşı gelen dikey kesit alanı
t	: Zaman, (s)
Te	: Elektromanyetik moment (Nm)
Tm	: Mekanik moment (Nm)
Q	: Reaktif Güç (Var)
v	: Yatay rüzgâr hızı, (m/s)
V_0	: Çıkış gerilimi(Volt)
Vd	: d eksenli stator gerilimi(Volt)
Vq	: q eksenli stator gerilimi(Volt)
Z_0	: Pürüzlülük uzunluğu
ρ	: Havanın özgül kütlesi, (kg/m ³)
σ	: Rüzgâr hızının standart sapması
ce	: Birim zamanda mevcut güç ile yeni oluşan güç değişimi
e	: Referans güç değeri ile birim zamanda mevcut güç değerinin farkı
β	: Kanat eğim açısı
λ	: Kanat uç hız oranı
λm	: Mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısı
ωr	: Rotorun mekanik hızı (rad/s)
ΔI_l	: Bobin dalgalanma akımı

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BBD	: Buck-Boost Dönüştürücü
BMD	: Bulanık Mantık denetleyici
BYS	: Batarya Yönetim Sistemi
CO2	: Karbondioksit
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EMO	: Elektrik Mühendisleri Odası
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EÜAŞ	: Elektrik Üretim A.Ş.
GWEC	: Global Wind Energy Council (Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi)
KMSG	: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
PWM	: Pulse Width Modulation(Darbe Genişlik Modülasyonu)
P&O	: Perturb and Observe(Saptır ve Gözle)
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
REDS	: Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sistemleri
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş
TÜREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
WWEA	: World Wind Energy Association (Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği)

RÜZGÂR ENERJİ GÜÇ SİSTEMİNDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİNİN BULANIK MANTIK TABANLI GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Teknolojik ilerlemelere rağmen günümüzde halen elektrik bağlantısı olmayan bölgeler bulunmaktadır. Bu çalışmada rüzgâr türbini ve bataryadan oluşan güç sistemi ile elektrik şebekesinden uzakta bulunan bölgelere ekonomik ve sürdürülebilir bir güç sağlanması amaçlanmıştır. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sisteminin (REDS) temel amacı, değişken rüzgâr hızlarında maksimum gücü elde edebilmektir. Önerilen sistemde maksimum gücü tespit edebilmek amacıyla, Saptır ve Gözle (S & G) ve Bulanık Mantık denetleyici (BMD) yöntemlerinin sistem üzerindeki çalışmaları karşılaştırılmıştır. Çalışmaları gözlemleyebilmek amacıyla Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG), Bulanık Mantık Denetleyici (BMD), Saptır ve Gözle (S & G) ünitesi, Enerji Yönetim Sistemi (EYS) ve Buck-Boost dönüştürücüden(BBD) oluşan bir sistem tasarlanmıştır. Maksimum gücü elde etmek için BMD ve S&G yöntemlerinden oluşan Maksimum Güç Noktası Takibi algoritmaları (MGNT) önerilmekte ve sonuçları karşılaştırılmaktadır. REDS'den maksimum gücü elde edebilmek için farklı rüzgâr hızı koşullarında çalışması izlenecek olan KMSG tabanlı REDS modeli tasarlanmış ve sisteme girilen değişken rüzgâr hızlarıyla sistemin çalışması her iki algoritmada izlenmiştir. Çalışma MATLAB (SIMULINK) ortamında modellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Mantık, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Genaratör, Maksimum Güç Noktası Takibi, Saptır ve Gözle, Yenilenebilir Enerji.

FUZZY LOGIC BASED REALIZATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING AT WIND ENERGY SYSTEM

ABSTRACT

Despite technological advances, there are still regions without electricity connection today. In this study, it is aimed to provide an economical and sustainable power to the regions far away from the network with the power system consisting of wind turbine and battery. The main purpose of the Wind Energy Conversion System (WECS) is to achieve maximum power at variable wind speeds. In order to determine the maximum power in the proposed system, the studies of the Perturb and Observe (P&O) and Fuzzy Logic controller (FLC) methods on the system were compared. In order to observe the works, a system consisting of Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), Fuzzy Logic Controller (FLC), Perturb and Observe (P&O) unit, Energy Management System (EMS) and Buck-Boost converter were designed. Maximum power tracking algorithms (MPPT) consisting of (FLC) and (P&O) methods are recommended to obtain the maximum power and the results are compared. To get maximum power from WECS. The PMSG based WECS model, which will be monitored under different wind speed conditions, was designed and the operation of the system with variable wind speeds entered into the system was monitored in both algorithms. The study is modeled in MATLAB (Simulink).

Keywords: Fuzy Logic, Permanent Magnet Senkron Genarator, Maximum Power Tracking, Pertub and Observe, Renewable Energy.

GİRİŞ

Son yıllarda, artan enerji talebi ve elektrik üretiminde kullanılan kömür gibi fosil yakıtların hızla tükenmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında artış gözlenmektedir. Ayrıca, iklim değişikliği konusu büyük bir sorun oluşturduğundan Karbondioksit (CO₂) emisyonunu azaltmak için birçok düzenleme önerilmektedir. Yenilenebilir enerji türlerinden olan güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi, kurulum maliyetlerinin nispeten uygun olması ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran çok daha fazla bölgede uygulanabilir olmasından dolayı daha fazla tercih edilmektedir.

Rüzgâr enerjisinden güvenilir, uygun maliyetli ve daha kaliteli güç elde etmek için daha etkin kontrol stratejileri araştırılmaktadır. Günümüzde geleneksel enerji kaynaklarının yerini yenilenebilir enerji kaynakları almakta ve rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinden elektrik enerjisi üretiminde artış gözlenmektedir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin kullanılması ile temiz enerji elde edilmekte ve kirlilik içermeyen CO₂ emisyonu sağlanmaktadır. Kırsal alanlar için en uygun sistemlerden biri olan küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde verimlilik ve bakım maliyeti önemli bir faktördür. Günümüzde her geçen gün ilerleme kaydeden teknolojiye bağlı olarak elektrik enerjisine olan talep artış göstermektedir. Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sistemlerinden (REDS) elektrik enerjisi üretilmesi bahsedilen çalışmalardan bir tanesidir. [1].

Küçük ölçekli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Genaratörlü (KMSG) rüzgâr türbinleri; yüksek tork yoğunluğu, düşük atalet, daha fazla verim ve harici bir uyarma devresi gerektirmemesi gibi avantajlarından dolayı yaygın şekilde kullanılmaktadır [2]. Küçük ölçekli (100 kW'a kadar) rüzgâr türbinleri, konvansiyonel yollarla elektrik üretiminden elde edilen enerjinin yerini almak amacıyla savunma dahil olmak üzere çeşitli şebeke içi ve dışı uygulamalar, kırsal alan elektrifikasyonu, su pompalama ve tuzdan arındırma, batarya şarj, telekomünikasyon gibi alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır [3].

Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde etmenin maliyetini azaltmanın bir yöntemi de Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) yapılmasıdır. MGNT ile Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sisteminin en etkin şekilde çalışmasını sağlayacak etkili algoritmaların kullanılması ile maksimum güç elde edilecektir. Rüzgâr enerji sistemlerinin geniş uygulamalarda kullanılabilmesi ve ekonomik kısıtlamalar, bu enerjinin dönüşüm zincirinin sağlam ve güvenilir olmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca daha iyi bir verimlilik sunmalı ve düşük maliyetle gerçekleştirilebilir olmalıdır. Bu nedenle rüzgâr türbininden maksimum güç takibinin yapılması gerekliliği doğmaktadır [4]. Saptır ve Gözle Yöntemi (S & G) sisteme uygulanması basit ve kolay olmasından dolayı maksimum güç elde etmek için rüzgâr türbini sistemlerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir [5].

S&G yöntemi ile mekanik sensörlerin kullanımı azaltılmış olduğundan rüzgar hızının ve rüzgar türbini özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç kalmamaktadır. Sistemimize entegre edilmiş olan S & G yönteminde zamana bağlı olarak izlenecek olan sistemin akım ve gerilim bilgisi, adım büyüklüğü olarak adlandıracağımız hız ve performans izleme sistemini oluşturacaktır. Gerçekleştirdiğimiz REDS ile ihtiyacımız olan veriler simülasyon sistemimize entegre olan akım ve voltaj sensörleri ile sağlanmıştır. Adım büyüklüğü arttıkça, sistemden alınan anlık akım ve gerilim bilgisi takibi daha hızlı olacak, ancak sabit durum koşullarında büyük salınımlara neden olacaktır. Küçük adım boyutu azami gücü izlemede hassasiyeti artıracak ancak daha uzun bir zaman gerektirecektir.

S&G yönteminin zamana bağlı olarak değişen rüzgâr hızlarında yetersiz kalması nedeniyle, KMSG gücü ve hızına bağlı olarak maksimum güç elde etmek için Bulanık Mantık Denetleyicileri (BMD) kullanılmaktadır [6]. S&G yönteminde olduğu gibi BMD tabanlı sistemlerde de rüzgâr türbinine ait türbin bilgilerinin bilinmesine ihtiyaç yoktur. Bulanık mantık tabanlı sistemlerle uyumlu çalışacak sistemlerde çıkıştan ölçülen akım ve gerilim değerlerine göre görev döngüsünü belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde buck-boost dönüştürücünün (BBD) görev döngüsünün (d) ayarlanarak maksimum güç noktasının bulunabilmesi için bulanık mantık tabanlı bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem sayesinde sıklıkla kullanılan her iki yöntem karşılaştırılarak sonuçları analiz edilmiştir.

Değişken rüzgâr hızlarının uygulama üzerindeki etkisi analiz edilmek üzere sisteme beş farklı rüzgâr hızı verilmiş ve her iki yöntemin davranışları izlenerek sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı elektrik şebekesinden uzakta bulunan ve rüzgâr hızlarının uygun olduğu bölgelerde kurulacak olan küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin çalışmasında kullanılacak en uygun yöntemin belirlenmesi ve bu sayede enerji ihtiyacının en uygun yöntemle sağlanabilmesi olmuştur.



1. RÜZGAR ENERJİSİ

Teknolojik gelişmelerin temelinde enerji ve enerjinin etkin şekilde kullanılması ön plana çıkmaktadır. Gelişen ve değişen yaşam standartları enerji ihtiyacının da artması sonucunu doğurmaktadır. Söz konusu artış bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Geleneksel elektrik üretim yöntemleri önemli çevre sorunlarına neden olabilmektedir. Bu sebeple yenilenebilir ve mümkün olduğunca çevreye az zarar veren enerji kaynaklarına talep her geçen gün artmaktadır [7]. Rüzgâr enerjisi, güneşin yeryüzünü eşit oranda ısıtmamasından kaynaklı olarak oluşan sıcaklık farklarının oluşturduğu basınç farklarının atmosferde bulunana havayı yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru hareket etmesi sonucu oluşmaktadır. Rüzgâr enerjisinin sağladığı avantajları aşağıdaki gibi sıralayabilmekteyiz [8].

- Ücretsizdir, doğada bol miktarda bulunur.
- Ucuzdur.
- Temiz bir enerji kaynağıdır ve CO₂ salımı yoktur.
- Dış bağımlılığı azaltır.
- Hızlı kurulabilir.
- Araziyi her iki yönlü kullanmaya olanak sağlar.

Rüzgâr enerjisi; çevre üzerinde olumsuz bir etkisi az olarak kabul edilebilecek bir yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır. Konvansiyonel sistemlerle elektrik enerjisi üretmenin oluşturduğu çevresel sorunlara, rüzgâr enerjisinde rastlanmamaktadır. Araştırmalar, 500 kW'lık bir rüzgâr türbininin 57.000 ağacın yaptığı CO₂ temizleme işine eşdeğer bir iş yaptığını göstermektedir. Ayrıca, tüm dünya üzerindeki elektrik enerjisi ihtiyacının %10'luk kısmının 2025 yılına kadar rüzgâr enerjisinden sağlanabilmesi halinde karbondioksit emisyonunun yıllık bazda 1.41 Gton azalması öngörülmektedir [9].

Ülke olarak sahip olduğumuz doğal kaynaklarımızı ve çevreyi koruma amacıyla rüzgâr enerjisi sektöründeki gelişmeler enerji politikalarımız açısından bakıldığında büyük önem kazandığı görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması, çevre koruma politikalarıyla paralellik göstermesinin yanı sıra enerjide dışa bağımlılığı da azaltacağından, ülkemizin gelişim kapasitesini arttırması açısından da büyük önem arz etmektedir [10]. Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içinde en gelişmiş ve ticari açıdan en elverişli olanıdır. Bütünüyle doğa ile uyumlu, çevreye zarar vermeyen ve tükenme ihtimali olmayan enerji kaynağıdır. Sera gazı emisyonlarını önlemenin ötesinde, rüzgâr enerjisi civa, kükürt, kükürt dioksit ve azot oksit gibi zararlı fosil kirleticileri önlemekte, hava ve suyun daha temiz olmasını sağlamaktadır. Uygun rüzgâr alanlarında fosil yakıtlar ve nükleer enerji ile rekabet edebilmektedir [11].

1.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişimleri incelendiğine birçok kaynakla karşılaşılabilmekle birlikte, rüzgârın kullanıldığı bilinen en ilkel rüzgâr kuvvet makinesi olan yel değirmeninin, bundan yaklaşık 3000 yıl kadar önce İskenderiye civarında yapıldığı düşünülmektedir. Türkler tarafından ilk kez M.S. 640'lı yıllarda imal edilen yel değirmeni çeşitleri, haclı seferleri ile Avrupa'ya taşınmıştır. Yel değirmenlerine, 1105 tarihinde Fransa'da rastlanır ve 1143'de İngiltere'de ilk yel değirmeninin yapıldığını bilmekteyiz. 19. yüzyıl sonlarında Almanya'da rüzgâr gücü ile çalışan kuvvet makinaları görülmektedir. Hollanda'da ise yel değirmenleri 18. yüzyılın başlarında kullanıldığı bilinmektedir [12]. Yazılı belgelerde karşımıza çıkan ilk yel değirmeni, M.S. 644 yılına ait İran-Afganistan bölgesinin sınırındaki Seistan'da kentindedir. Yel değirmenleri, Çin'de M.S.750-850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanması amacıyla kullanılmıştır. Düşey eksenli yel değirmenlerine ilk başlarda Doğuda rastlansa da geliştirilmesi ve yatay eksenli hale getirilmesi Batılılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yatay eksenli ilk yel değirmenine 1180 yılında Normandiya Krallığında rastlanmaktadır. Yatay eksenli ve mekanik enerjinin işe dönüştürülmesi amaçlı kullanılan yel değirmenlerinin gelişimi;

- Ayaklı Yel Değirmeni (Almanya)
- Kule Tipi Yel Değirmeni (Akdeniz Ülkeleri, Alaçatı)
- Döner Çatılı Hollanda Tipi Yel Değirmeni (Hollanda)
- Rüzgâr Yönü Yönlendiricisi Takılan Çok Kanatlı Amerikan Tipi Yel Değirmeni (1850 yılında Daniel Halladay) olarak sıralanabilir.

Fransa, İngiltere ve Hollanda’da yel değirmenlerinin ilk olarak kullanımına M.S. 12. yüzyılda rastlanmaktadır. Amerika kıtasının yel değirmenleriyle tanışması 18. yüzyılda Hollandalı göçmenler ile olmuştur. Endüstri devrimi ile birlikte buhar makinelerinin kullanılmaya başlanması, rüzgâr türbinlerinin kullanımının ikinci planda kalmasına neden olmuştur. 19. yüzyılın sonlarında ve 20. Yüzyılın başlarında yel değirmenleri ile kuyudan su çekmek ve elektrik üretme amaçlı değişik uygulamalar hayata geçirilmiştir [13].1882 yılında New York’ta elektrik santrali kurulmasıyla birlikte elektrik enerjisinde kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Rüzgâr enerjisinden elektrik ilk olarak 1891 yılında Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından üretilmiştir.

Doğru akım üreten Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etmiş ve bu yolla rüzgârdan üretilen elektrik enerjisini depolamayı başarmıştır. 1918 yılı sonrasında büyük yerleşim yerlerinin elektriğe kavuşmasıyla ortaya çıkan enerji ihtiyacı dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle bu yöntemlerle karşılanmıştır bu nedenle rüzgâr enerjisinin kullanma düşüncesi ve değerlendirmesi düşünülmemiştir. Elektrik üretme amaçlı ilk rüzgâr türbini 1891’de Dane Poul LaCour tarafından üretilmiş olmasına rağmen, modern sanayileşmenin başlarında (1900-1950’li yıllarda) rüzgâr enerjisinin yerine, daha tutarlı kaynaklar olan fosil yakıt kullanan enerji üretim sistemleri kullanılmaktaydı. Fakat bu süreçte de rüzgâr türbini teknolojisini geliştirmeye yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

Rüzgâr enerjisinin ikinci planda kalması, petrol kaynaklarına ulaşımın mümkün olmadığı ve enerji sıkıntısının baş gösterdiği 2. Dünya Savaşı’na kadar devam etmiştir. Rüzgâr enerjisi kullanımında; 1942 yılında üretilen 17,5 m pervane çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smidth rüzgâr türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgâr türbini önemli kilometre taşlarıdır [14,15].1970’li yıllarda Rüzgâr gücünden, uygun bir donanım yardımıyla mekanik güç üretimi, iki şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir.

İlk yöntem değirmenlerin, bıçkı-hızır makinelerinin çalıştırılması ve ot, saman ve pamuk balyalarının sıkıştırılması işlemi yapacak bir sistemi çalıştıracak şekilde, bir makineyi hareketlendirmek olurken, ikincisi ise su pompalarını çalıştırarak, içme-kullanma ve sulama suyunun çıkarılması olmuştur.

Hollanda'da Polder'lerin kurutulması ve Roma döneminden kalan madenlerin tekrar işleme açılmasında kullanılan rüzgâr enerjisinden elde edilen mekanik gücün kullanımına tarım alanlarında biriken fazla taban suyunun araziden uzaklaştırılması işleminde de rastlanmaktadır [13].1960'lı yıllardan sonra dizel motorların kullanımının artması ve elektrik üretimindeki gelişmelerin sonucu olarak ekonomik nedenlerle rüzgâr türbinlerinin kullanımında azalma göze çarpmaktadır. 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi sonrası alternatif kaynak arayışı hız kazanmış ve rüzgâr türbinlerinin kullanımı tekrar gündeme gelmiştir. 1980'li yıllarda evlerin ihtiyacına yetecek kadar güç üreten küçük rüzgâr türbin tasarımları yapılmış ve ardından 1981 yılında Dünya Meteoroloji Organizasyonu (WMO)'nun yürüttüğü bazı deneylerde rüzgâr enerji kaynağı olarak kullanılmış ve ardından rüzgâr çiftlikleri kurulmaya başlanmıştır [16].

Günümüzde, tek bir rüzgâr türbininden elde edilebilecek güç megawattlarla ifade edilecek kadar artmıştır ve sürekli artış göstermektedir. Şu an kullanımda olan ve 17 MW güce ulaşan rüzgâr türbinleri bulunmaktadır [17].Rüzgâr türbinleri üzerine yapılan araştırma ve çalışmalar ile yakın gelecekte bu değerlerin daha da artacağı düşünülmektedir [18].

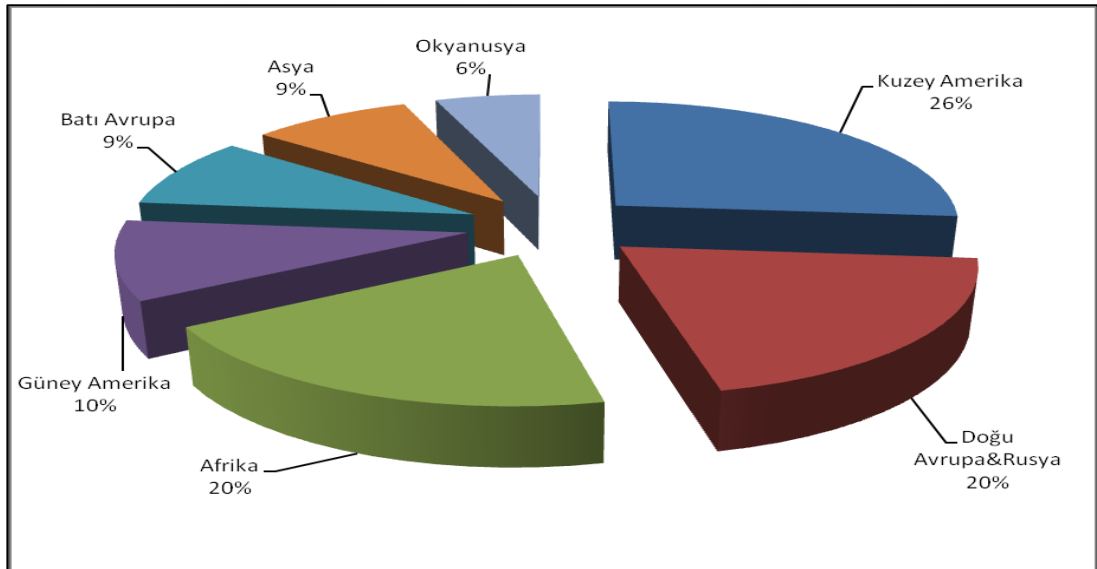
1.2. Dünya'da Rüzgâr Enerjisinin Durumu

Dünya genelinde birçok ülkede rüzgâr enerji potansiyelinden yararlanmak için, yoğun araştırmalar yapılmakta ve bu alanda önemli teknolojik gelişmeler izlenmektedir [19].Temelde rüzgâr, dünya yüzeyinin dengesiz ısınması ve değişen basınç farklılıkları nedeniyle atmosferdeki havanın hareketine bağlı olarak oluşmaktadır. Bir enerji kaynağı olarak, eski zamanlardan günümüze kadar birçok medeniyette rüzgârdan yararlanılmıştır.

Günümüzde modern rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmekte ve rüzgâr çiftlikleri şeklindeki rüzgâr türbinlerinde ihtiyaca uygun olarak elektrik üretilmektedir. Son 50-60 yılda, dünya üzerinde elektrik üretimi birçok bölgede artış göstermiştir. En hızlı büyüme gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşmiştir ancak enerji erişiminin, ekonomik kalkınmanın ve çevresel sürdürülebilirliğin dengelenmesi sadece ilgili ülkeler için değil, aynı zamanda küresel toplum için de büyük bir zorluk olarak karşımızda durmaktadır.

Dünyanın elektrik taleplerini karşılamak için enerji kaynakları sınırlı olan bölgeleri, aynı zamanda rüzgâr enerjisinin en fazla kullanıldığı bölgelerdir. 2000 ile 2013 yılları arasında 100 GW'dan fazla rüzgâr enerjisi kapasitesinin eklendiği Avrupa buna bir örnek olarak gösterilebilir. Avrupa'nın fosil yakıtlara olan ithalat bağımlılığının artması ve ithal edilen gazın 2030 yılına kadar toplam tüketimin %80'ini oluşturması beklenmektedir. Benzer şekilde, Amerika Birleşik Devletleri'nde tüketilen enerjinin %80'inden fazlası petrolden, doğalgazdan veya kömürden üretilen enerjiden karşılanmaktadır [20]. Rüzgâr enerjisi, uygulama sahası giderek genişleyen temiz bir enerji kaynağıdır. 2018 yılında tüm dünyada rüzgâr santrallerinin üretmiş olduğu toplam elektrik enerjisi 340 TWh ile küresel elektrik üretiminin %2'sini aşmıştır [8].

Yapılan çalışmalar neticesinde dünyadaki teknik rüzgar potansiyelinin yılda 53.000 TWh olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan bu 53.000 TWh'lik teknik potansiyelin %26 lık kısmı Kuzey Amerika'da, %20 lik kısmı Doğu Avrupa&Rusya'da, %20 lik kısmı Afrika'da, %10 luk kısmı Güney Amerika'da, %9 luk kısmı Batı Avrupa'da, %9 luk kısmı Asya'da, %6 lık kısmı ise Okyanusya'da yer almaktadır. Şekil 1.1. de dünya üzerindeki teknik rüzgâr potansiyelinin kıtalar bazında dağılımı görülmektedir [21].

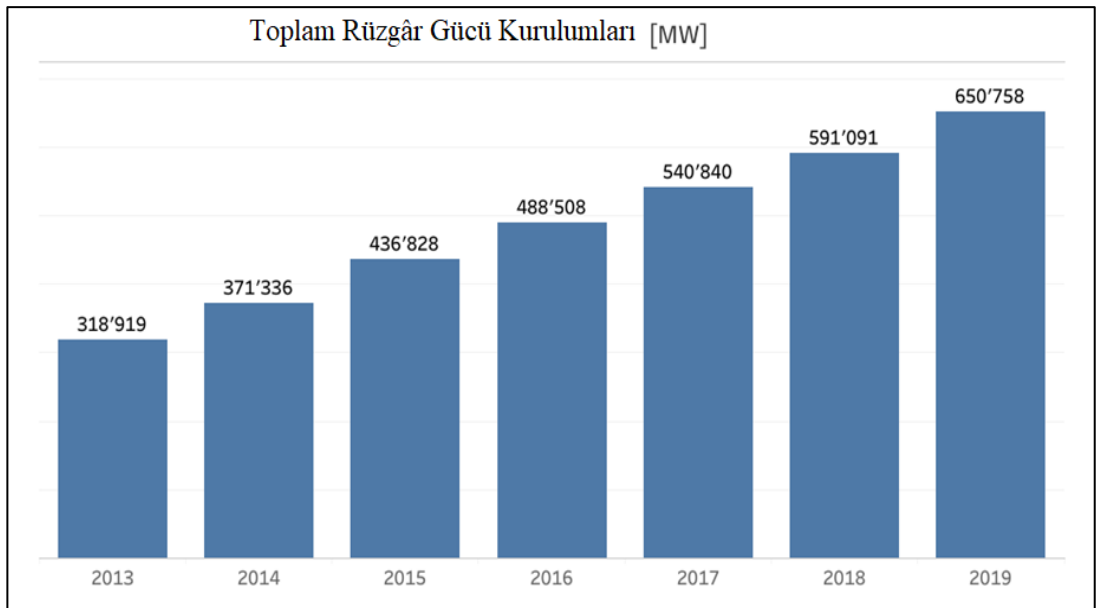


Şekil 1.1. Dünya rüzgâr potansiyelinin kıtalar bazında dağılımı [21].

Rüzgâr türbinleri, yüksek kurulum maliyetlerine rağmen konvansiyonel elektrik üretim tesislerinde olduğu gibi enerji üretimi için hammaddeye ihtiyaçları olmadığından işletme maliyetleri oldukça düşüktür.

Teknolojik ilerlemelerle birlikte rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretim maliyeti azalma eğilimindedir. Maliyetteki bu azalma rüzgâr türbinlerini; diğer enerji santralleriyle ekonomik anlamda rekabet edecek düzeye getirmektedir. Kilovat saat bazında elektrik üretim maliyeti yaklaşık olarak 4.5-6 cent civarında olan rüzgâr türbinlerinde maliyetin zamanla daha da düşeceği ön görülmektedir [22].

Şekil 1.2. de görüldüğü üzere dünya üzerinde kurulu rüzgâr kapasitesi her yıl artış göstermektedir. Rüzgâr Enerjisi, dünya üzerinde kullanım alanını en çok geliştiren yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. 2020 yılı sonu itibari Küresel Toplam Kurulu Kapasite 650.758 MW'a ulaşmıştır [23]. Şekil 1.2. de görüldüğü gibi Küresel Toplam Kurulu Kapasite her geçen yıl artış göstermekte ve dünya üzerinde rüzgâr enerjisine olan ilgi her geçen yıl artarak devam etmektedir. Toplam rüzgâr gücü kapasitesine ülkeler bazında bakıldığında gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin rüzgâr kapasitelerini artırma eğiliminde oldukları görülebilmektedir. Özellikle Çin Halk Cumhuriyeti, ABD ve Almanya gibi ülkelerin toplam rüzgâr gücü kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığı görülebilmektedir. Tablo 1.1. 2015-2019 yılları arasında bazı ülkelerin kurulu rüzgâr güçlerindeki değişimleri göstermektedir. Tablo 1.2. Avrupa ülkelerin rüzgâr enerji santrali kurulu güçlerini göstermektedir. Tablo 1.1 ve Tablo 1.2. deki veriler incelendiğinde ülkemiz Avrupa'daki ülkeler arasında rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri için sıralama yapıldığı zaman 7. sırada, dünya genelinde bakıldığında ise 11. sırada yer aldığı görülmektedir [24].



Şekil 1.2. Dünya toplam rüzgâr gücü kurulumları [23].

Tablo 1.1. Ülkelerin rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri [23].

ÜLKELER	ÜLKELERİN RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ KURULU GÜÇLERİ (MW)				
	2019	2018	2017	2016	2015
Çin	27.989	216.870	195.730	168.730	148.000
ABD	15.452	96.363	88.775	82.033	73.867
Almanya	16.646	59.313	56.190	50.019	45.192
Hindistan	23.515	35.017	32.879	28.279	24.759
İspanya	25.808	23.494	23.026	23.020	22.987
İngiltere	37.529	20.743	17.852	14.512	13.614
Fransa	61.357	15.313	13.760	12.065	10.293
Brezilya	105.433	14.490	12.763	10.800	8.715
Kanada	237.029	12.816	12.239	11.898	11.205
İtalya	10512	9958	9700	9257	8958
İsveç	8985	7406	6721	6493	6029
Türkiye	8056	7369	6872	6106	4718
Diğer Ülkeler Toplamı	127.989	102.138	93.173	85582	76653
Genel Toplam	650.758	596.556	546.388	486.939	435.284

Tablo 1.2. Avrupa ülkelerinin rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri[25].

SIRA	ÜLKE	İLAVE GÜÇ(MW)	KURULU GÜÇ
1	Almanya	3.371	59311
2	İspanya	397	23494
3	Birleşik Krallık	1.901	20970
4	Fransa	1.565	15407
5	İtalya	452	9958
6	İsveç	720	7407
7	Türkiye	497	7369
8	Polonya	16	5864
9	Danimarka	281	5758
10	Portekiz	67	5380

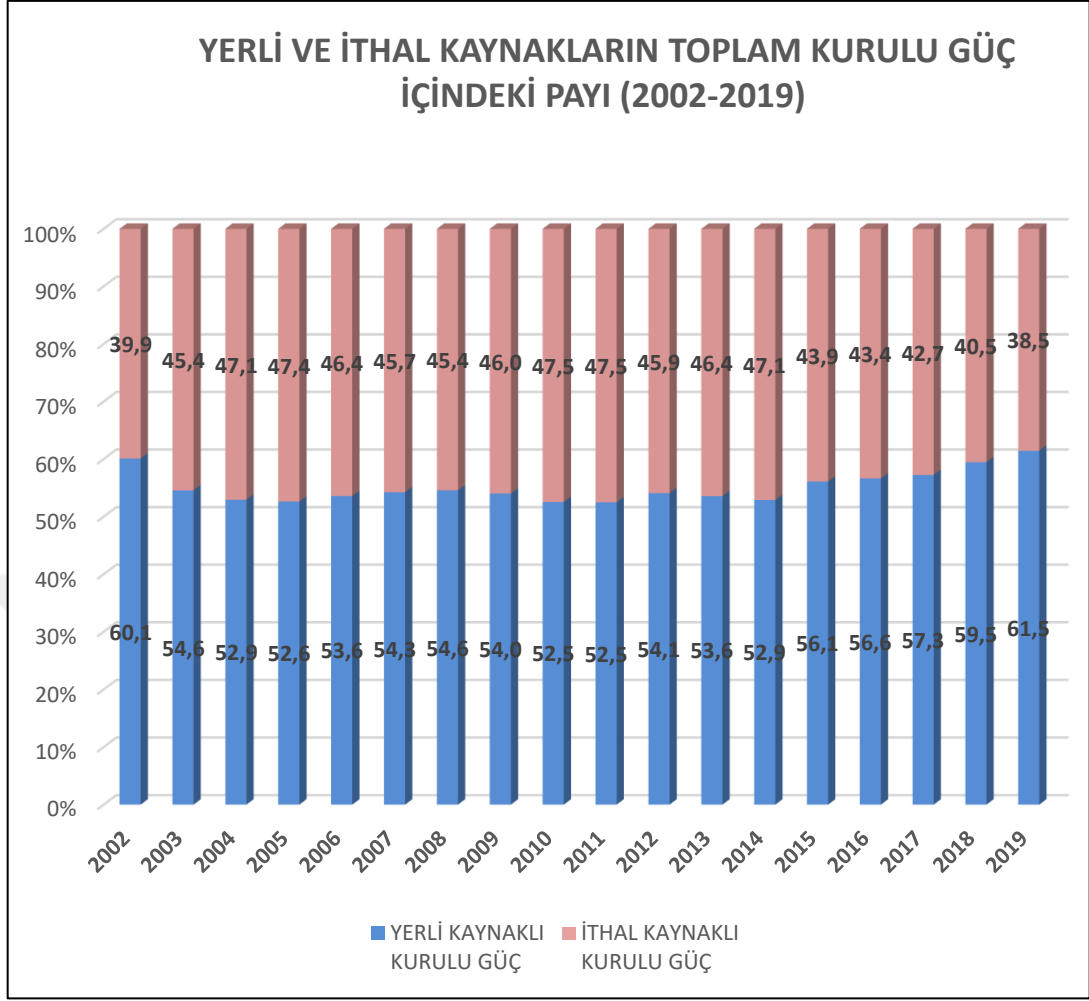
1.3. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Durumu

Gelişmekte olan ülkeler arasında yerini alan ülkemizde, her geçen gün gelişme gösteren sanayi tesisleri ve gelişmelere paralel olarak beraberinde gelişen kişi başına düşen enerji talebi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yeni kaynaklara yönelimi hızlandırmıştır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ)’tan alınan ve Şekil 1.3. te de görüleceği gibi son 30 yılda ülkemizin kurulu gücü sürekli artış göstererek 91.267 MW seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 1.3. Türkiye kurulu gücünün yıllar itibariyle değişimi [26].

Şekil 1.4. te görüleceği üzere ülkemizin bahsi geçen artan enerji talebinin 2019 yılı itibariyle çok yakıtlı santrallerin gücü dahil edilmeden yapılan hesaplamalarla %38,5’lik kısmı ithal kaynaklardan sağlandığı görülmektedir. Enerji konusunda yaşanan dışa bağımlılık ülkemiz açısından bakıldığında sahip olduğumuz yenilenebilir kaynakların kullanımının önemini göstermektedir.



Şekil 1.4. Yerli ve ithal kaynakların toplam kurulu güç içindeki payı [26].

Şekil 1.5. te görünen ülkemize ait 2019 kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımına ait grafiğe bakıldığında yenilenebilir enerji üretiminde üretimin toplam üretimin %48,6'lık kısmını karşıladığı görülebilmektedir. Yenilenebilir enerji alanında üretimin en önemli pay hidroelektrik santrallere ait olmasının yanında rüzgâr ve güneş enerjisinden üretilen enerjinin payının yaklaşık olarak %15 olduğu görülmektedir.

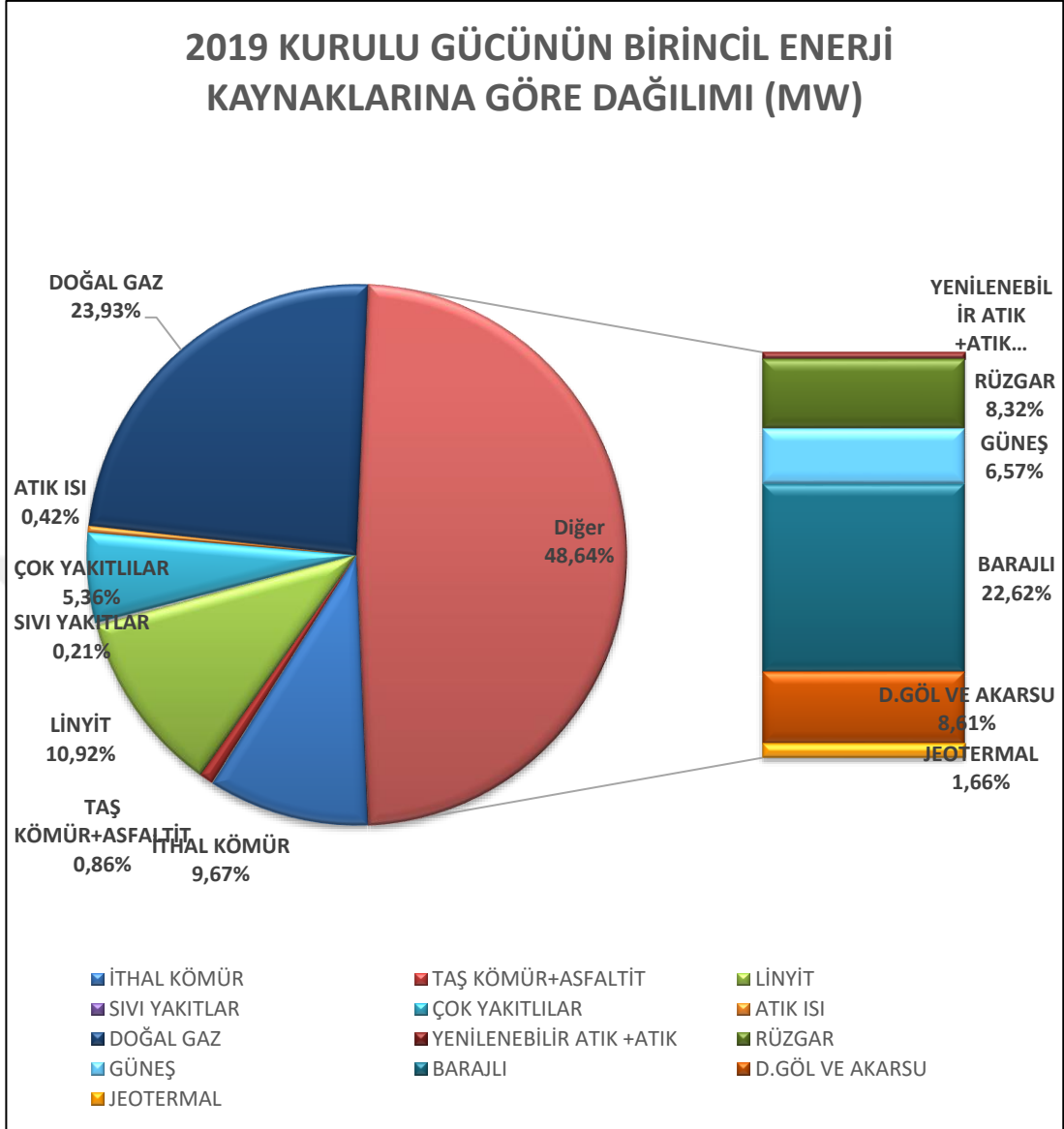
2007 yılında Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından geliştirilen Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) ile ülkemizde ortalama rüzgar şiddeti 8,5 m/s ve üzerinde olan bölgelerde en az 5.000 MW, 7 m/s'nin üzerindeki bölgelerde ise en az 48.000 MW rüzgar enerjisi potansiyeli olduğu tespit edilmiştir [27].Tespit edilen bu 48.000 MW'lık potansiyelin 8.000 MW'lık kısmı çok verimli, 40.000 MW'lık kısmı ise orta verimli olarak sınıflandırılmıştır [13].

Ülkemiz sahip olduğu bu potansiyele rağmen rüzgâr enerjisi kurulu gücümüz 2019 Eylül ayı sonu itibariyle termik ve hidrolik santrallerimizin yanında çok düşük bir oranda kalmıştır. Şekil 5. te görüldüğü üzere toplam kurulu gücümüzün %51,36 ‘lık kısmını termik santraller, %31,23 lük kısmını hidrolik santraller, %8,32’lik kısmını rüzgâr santralleri oluşturmaktadır [26].

Yenilenebilir kaynaklar arasındaki dağılıma bakıldığında ise barajlı olarak adlandırılan hidroelektrik enerji üretim tesislerinin %49,84 ile en büyük payı aldığını görülmektedir. Rüzgâr enerjisi tüm yenilenebilir kaynaklar arasında %16,84 lük bir paya sahiptir. Tablo 1.3. yenilenebilir kaynaklar bazında elektrik üretimine ait dağılımı göstermektedir [26].Rüzgâr enerjisinin; temiz ve sürekli bir enerji kaynağı olması ve ülkemizde var olan potansiyelinin küçük bir kısmının kullanıldığı düşünüldüğünde ilerleyen yıllarda kullanımının artış göstereceği görülmektedir.

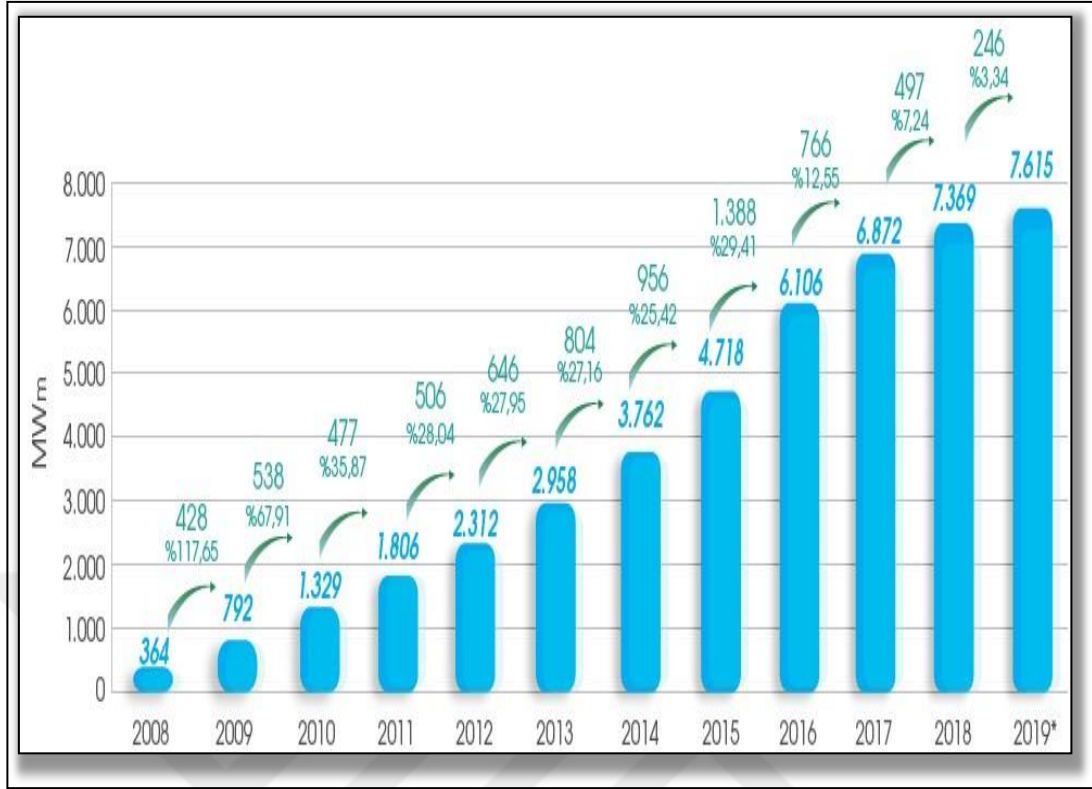
Tablo 1.3. Türkiye’de yenilenebilir kaynaklar bazında elektrik üretimi [26].

ENERJİ TÜRÜ	GWh	%
YENİLENEBİLİR ATIK+ATIK	3.522,70	2,66
RÜZGAR	21.730,70	16,43
GÜNEŞ	9.249,80	6,99
BARAJLI	65.926,20	49,84
D.GÖL VE AKARSU	22.896,60	17,31
JEOTERMAL	8.951,70	6,77
TOPLAM	132.277,80	100

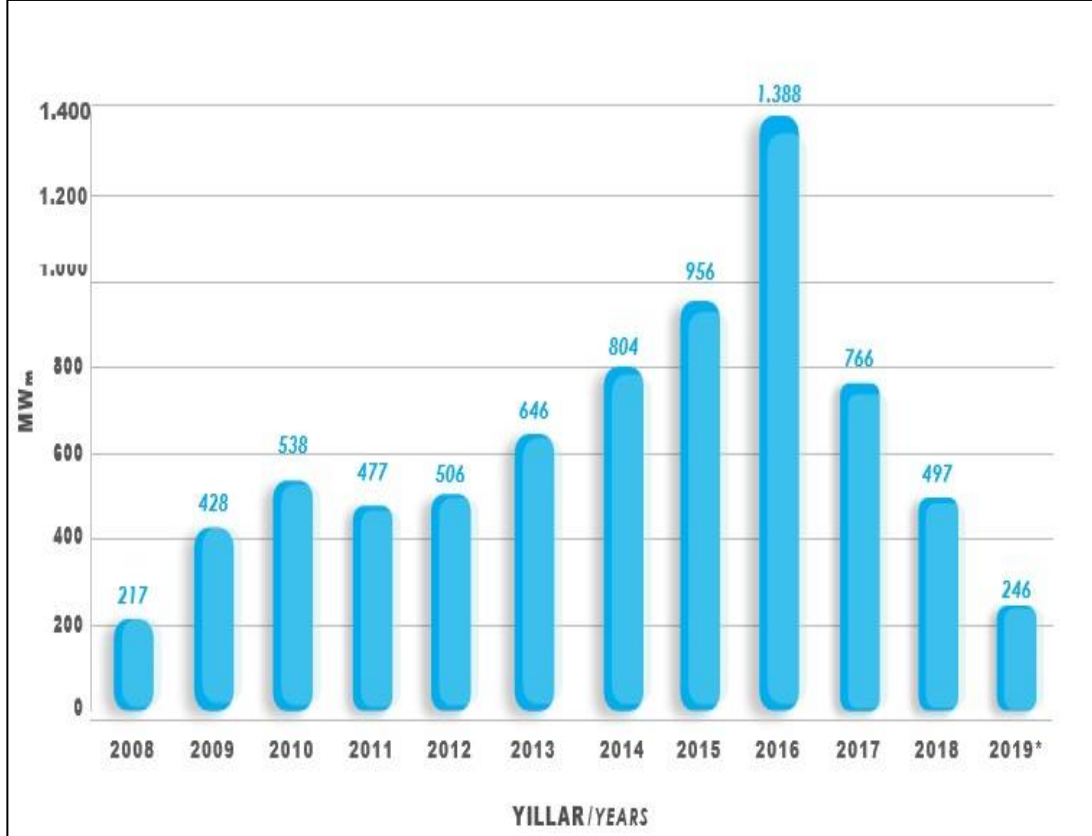


Şekil 1.5. 2019 kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı [26].

Ülkemizde rüzgâr enerji sistemlerine olan ilgi her geçen yıl artarak devam etmektedir. Ülkemizin sahip olduğu rüzgâr enerji potansiyeli düşünüldüğünde önümüzdeki yıllarda bu artışın devam edeceği öngörülebilir. 2008 yılında 364 MW olan RES kurulu gücü 2019 yılı itibarıyla 7615 MW'a yükselerek işletmedeki RES sayısı ise 183'e yükselmiştir. Ülkemizde kurulan RES'lerin 2008-2019 yılları arasındaki toplam kurulum güçleri Şekil 1.6.'da görülmektedir [28]. Ülkemizdeki son 12 yıldaki rüzgâr enerji santralindeki değişime bakıldığında, en büyük yatırımın 2016 yılında yapıldığı ve 1388 MW kurulu gücün devreye alındığı görülmektedir. Ülkemizdeki rüzgâr enerjisi santralleri için yıllık kurulumu gösteren grafik Şekil 1.7. de gösterilmiştir [28].

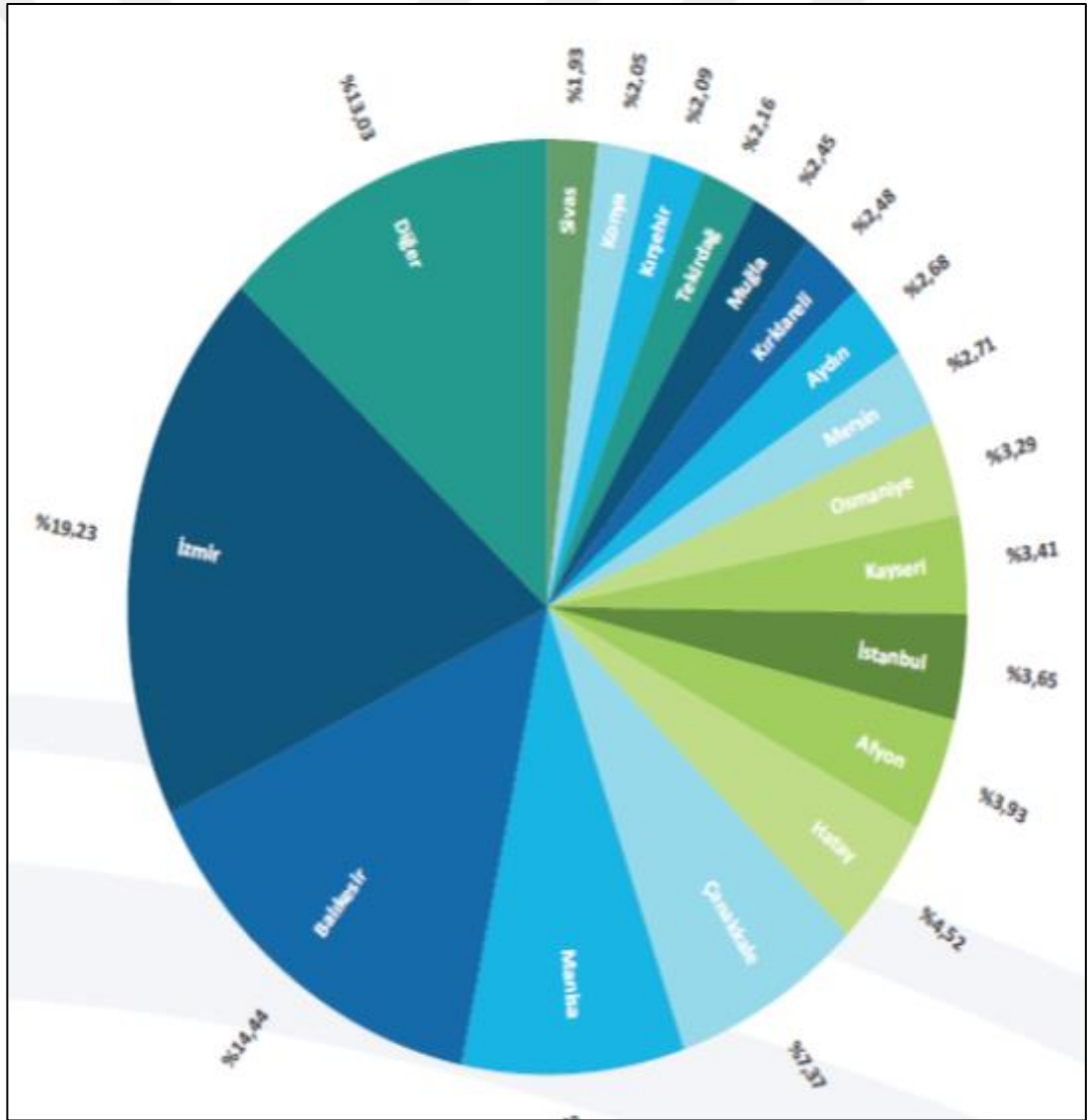


Şekil 1.6. Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum [28].



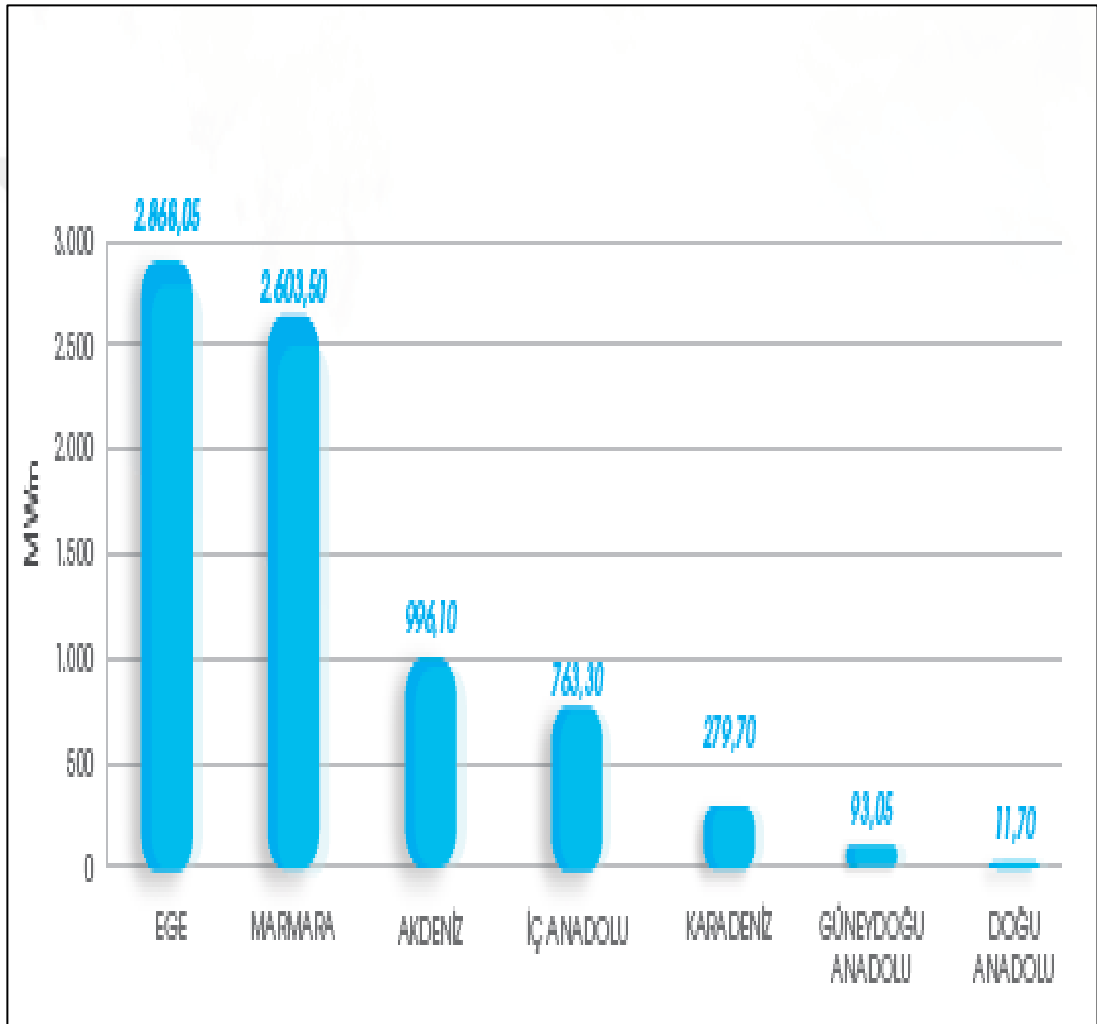
Şekil 1.7. Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için yıllar bazında kurulum [28].

Ülkemizdeki RES kurulumuna iller bazında bakıldığında RES'lerin ülkemizin rüzgâr potansiyelinin en yüksek olduğu bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 1.8.'de net şekilde görüleceği üzere kurulu olan RES'lerin dağılımında ilk beş ilimiz kurulu gücün yaklaşık %55'ine sahiptir. Bu illerin seçilmesinde bölgenin aldığı rüzgâr önemli bir faktör olmakla birlikte diğer faktörlerde göz önüne alınarak yatırımlar bu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Şekilde de görüleceği üzere ülkemizde kurulu bulunan RES'lerin %19,23'ü İzmir'de, %14,44'ü Balıkesir'de, %8,56'sı Manisa'da, %7,37'si Çanakkale'de ve %4,52'si Hatay'da bulunmaktadır. Geriye kalan yaklaşık olarak %45'lik orana denk gelen kurulu güç oranı ise diğer 26 ilimizde çeşitli oranlarda paylaşılmaktadır.



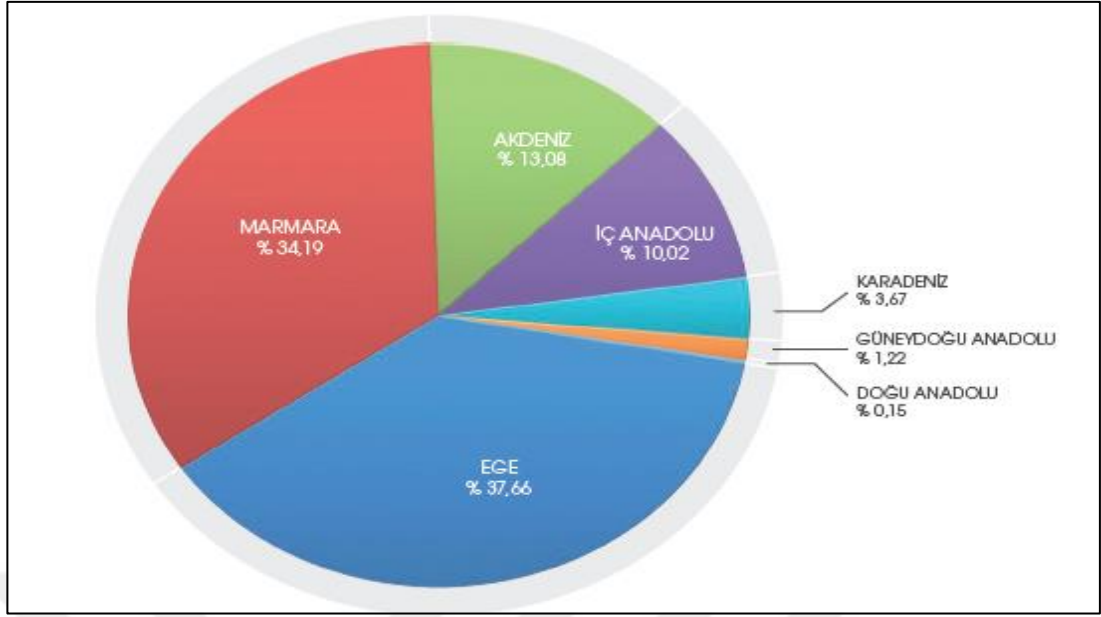
Şekil 1.8. RES'lerin illere göre dağılımı [28].

Şekil 1.9.'da paylaşıldığı üzere Ülkemizdeki RES'lerin bölgelere göre dağılımına bakıldığında; RES kurulu gücünde 2868,05 MW ile Ege bölgesinin lider konumda bulunduğu görülebilmektedir. Marmara Bölgesi ise 2603 MW ile ikinci sırada yer almaktadır. Akdeniz Bölgesi ise 996,10 MW ile üçüncü sırada yer almaktadır. İç Anadolu Bölgesi'nde ise 763,30 MW kurulu gücün bulunduğu raporlanmıştır. RES'lere ait kurulu gücümüzün kalan kısmının diğer bölgelerde yer aldığı tespit edilmiştir.



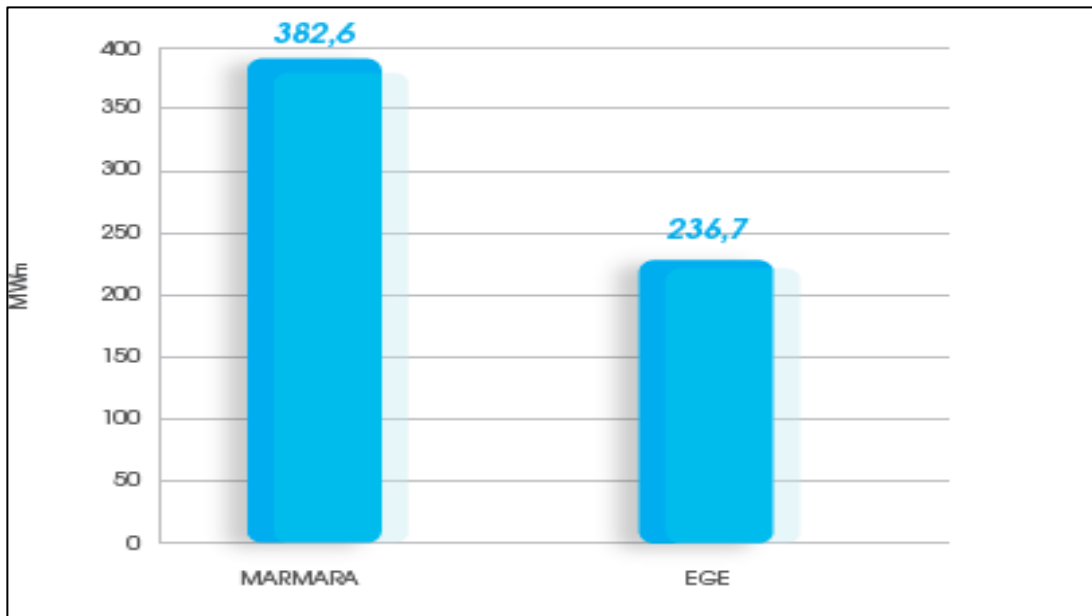
Şekil 1.9. Ülkemizdeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [28].

RES'lerin kurulu gücünün dağılımına oransal olarak bakıldığında; RES kurulu gücünün %37'sinin Ege Bölgesi'nde, %34'ünün Marmara Bölgesi'nde, %13'ünün Akdeniz Bölgesi'nde, %10'unun İç Anadolu Bölgesi'nde %6'sının da diğer bölgelerde yer aldığı tespit edilmiştir. Bölgelere ait toplam RES kurulu güç bilgileri Şekil 1.10.'da paylaşılmıştır.



Şekil 1.10. RES'lerin bölgelere göre dağılımı [28].

Her ne kadar RES'lerin kurulu gücünün dağılımında Ege Bölgesi önde olsa da 2019 yılı itibariyle inşa halindeki RES lere bakıldığında Marmara Bölgesi'nde 382,6 MW lık bir gücün inşa aşamasında olduğu görülebilmektedir. Bu oran Ege Bölgesinde 236,7 olarak raporlanmıştır. İnşa halindeki RES'lerin devreye alınması ile birlikte ülkemizdeki RES'lere ait bölgesel dağılım değişecektir. 2019 verilerine bakıldığında Marmara bölgesine ilginin arttığı söylenebilir. İnşa halindeki RES'ler ait toplam bilgileri Şekil 1.11. de paylaşılmıştır.



Şekil 1.11. 2019 yılı itibariyle inşa halindeki RES'ler [28].

1.4. Rüzgâr Hızını Etkileyen Faktörler

Yükseklik, pürüzlülük, türbülans, iz etkisi ve tünel etkisi gibi etkenler rüzgâr hızını etkileyen faktörlerdendir. Rüzgâr gücü, elektrik üretimi için rüzgâr türbinleri, mekanik güç sağlamak için yel değirmeni, su pompalamak için rüzgâr pompaları veya gemileri yürütmek için yelken kullanımı rüzgâr enerjisinin kullanıldığı alanlardır.

1.4.1. Yükseklik

Yükseklik, rüzgârın hızını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Daha önce 10 metre referans yükseklikte ölçülmekte olan rüzgâr hızı, günümüzde RES kurulumu planlanan bölgede tesis edilen 80 metrelik direklerle ölçülmektedir. Şekil 1.12. de görüleceği üzere düşük seviyedeki engeller rüzgâr akışını engellediği için, rüzgâr hızı yükseklikle orantılı olarak artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin çalışma koşulları incelendiğinde 100 metre ve üstündeki yükseklikler; daha yüksek ve stabil rüzgâr hızı, düşük türbülans gibi olumlu etkileri düşünüldüğünde en ideal koşulları oluşturduğu görülmektedir [29]. Türbin hub yüksekliğinin artması ile ortalama rüzgâr hızının ve üretilebilecek enerjide artış sağlandığı tespit edilmiştir [30]. Rüzgâr enerjisinde kule yükseklikleri de düşünüldüğünde 80-100 metrede elde edilen rüzgâr RES'ler için oldukça önemlidir. Rüzgâr hızı yükseklikle orantılı olarak kademeli olarak artmakta ve belli bir yükseklikten sonra sabitlenmektedir [31].



Şekil 1.12. Rüzgâr hızı ile yükseklik arasındaki ilişki [31].

1.4.2. Pürüzlülük (Roughness)

Rüzgâr türbinlerinin üreteceği enerjinin gerçeğe yakın oranda hesaplanabilmesi için, bölgenin coğrafi verilerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, bir bölgenin bitki örtüsü, arazi yapısı, çevrede kurulu bulunan yapılaşma gibi pürüzlülüğe etki eden elemanlarının boyutlarına ve hedef bölgedeki dağılımlarına bağlıdır [29,32]. Yüzey pürüzlülüğü, bölgedeki rüzgâr hızında belirleyici bir etkiye sahip olduğu için rüzgâr potansiyeli çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça havada oluşacak sürtünme kuvvetinin artacağı ve rüzgâr hızının azalacağı öngörülmektedir. Rüzgâr hızının yere yakın noktalarda daha düşük olduğu bilinmektedir. Yüzey şekilleri bazında pürüzlülük sınıfları ve pürüzlülük uzunluk değerleri Tablo 1.4.'te paylaşılmıştır [33,29].

Tablo 1.4. Yüzey şekillerine göre pürüzlülük sınıfları ve uzunluk değerleri [33,29].

Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Uzunluğu Z0(m)	Enerji Göstergesi (%)	Ortam Yüzeyi
0	0,0002	100	Su yüzeyleri
0,5	0,0024	73	Açık Araziler (Beton, havaalanlarındaki beton yollar, otoban, çayır ekili alanlar vb.)
1	0,03	52	Uzak aralıklı yapılara sahip çitsiz ve engelsiz açık tarımsal araziler (Çok hafif engebeli)
1,5	0,055	45	Birkaç binalı ve 1250 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler
2	0,1	39	Birkaç binalı ve 500 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler
2,5	0,2	31	Pekçok bina, çalı ve bitkiye sahip ya da 250 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler
3	0,4	24	Köyler, küçük şehirler, çok ya da yüksek çitli, tarımsal araziler, ormanlar, çok yoğun ve pürüzlü bölgeler
3,5	0,8	18	Yüksek yapılara sahip büyük şehirler
4	1,6	13	Yüksek binalara ve gökdelen yapılarına sahip büyükşehirler

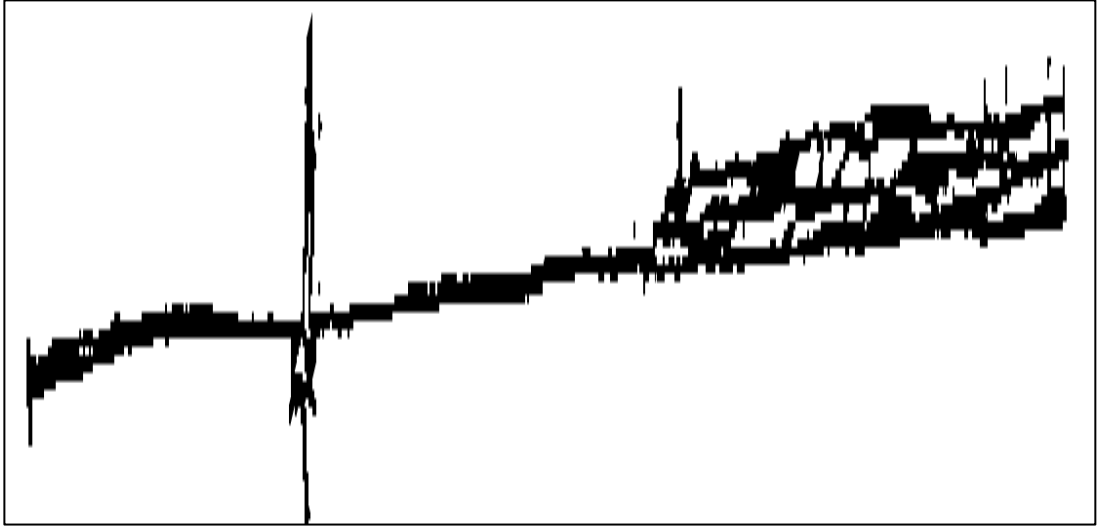
Tablo 1.4.'te görüldüğü gibi; düz zeminler, havaalanı, deniz yüzeyi gibi pürüzlülüğü düşük ortamların rüzgâr hızı üzerindeki etkisi daha az olurken, büyük ağaçlı ormanlar, tepeler ve büyük binalar gibi pürüzlülüğün fazla olduğu ortamların rüzgâr hızı üzerinde etkisi daha fazladır.

Pürüzlülük uzunluğunun (Z_0) Tablo 4'te belirtilen pürüzlülük yüzeyleri ile ilişkisi, Denklem (1.1)'de verilmiştir;

$$Z_0 = \frac{hs}{2A_h} \quad (1.1)$$

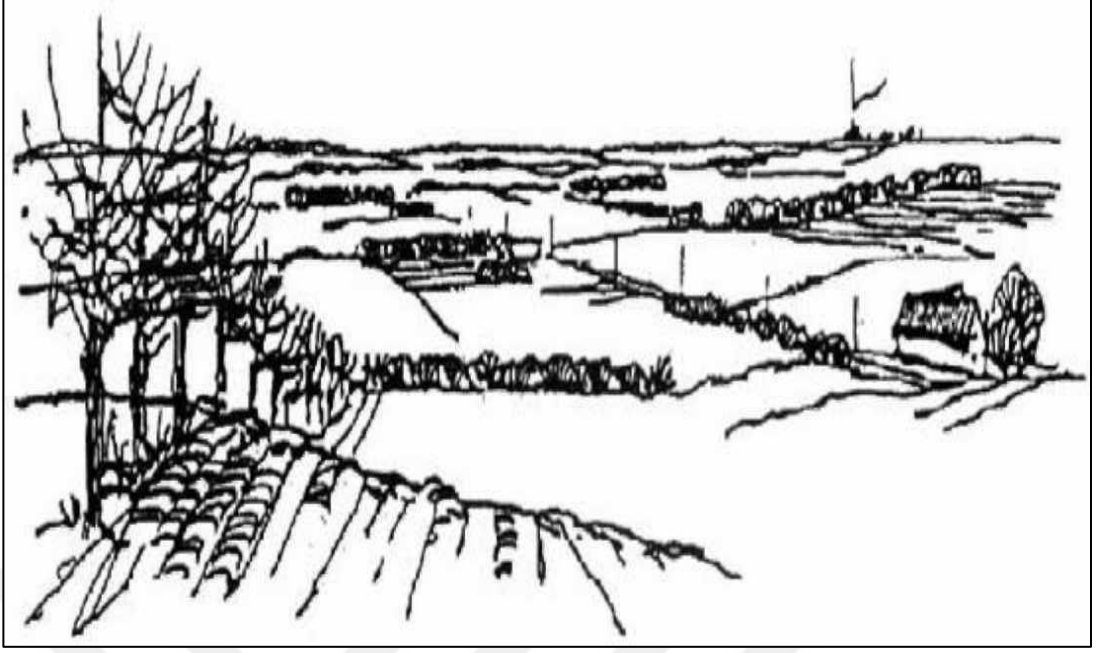
Denklem (1.1)'de h ; pürüzlülük elemanının yükseklik değerini, s ; pürüzlülük elemanının rüzgâra karşı gelen dikey kesit alanını, A_h ise pürüzlülük elemanının bölge üzerine dağılmış ortalama yatay kesit alanını belirtmektedir.

Su alanları, denizler, fiyortlar ve göller pürüzlülük sınıfının 0 kabul edildiği bölgelerdir. Bu bölgelerde pürüzlülük uzunluğu Z_0 , 0,0002 m olarak tanımlanır. Şekil 1.13.'de pürüzlülük sınıfının 0 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [34].



Şekil 1.13. Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği [34].

Açık alanlar içinde rüzgâr hızına etki edecek birkaç engelin, basit şekil, ağaç ve çalılıkların bulunduğu açıklıklar, düz alanlar ve yumuşak engebeler, pürüzlülük sınıfının 1 olarak tanımlandığı bölgelerdir. Pürüzlülük uzunluğu Z_0 0,03 m olarak kabul edilir. Şekil 1.14.'te pürüzlülük sınıfının 1 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [34].



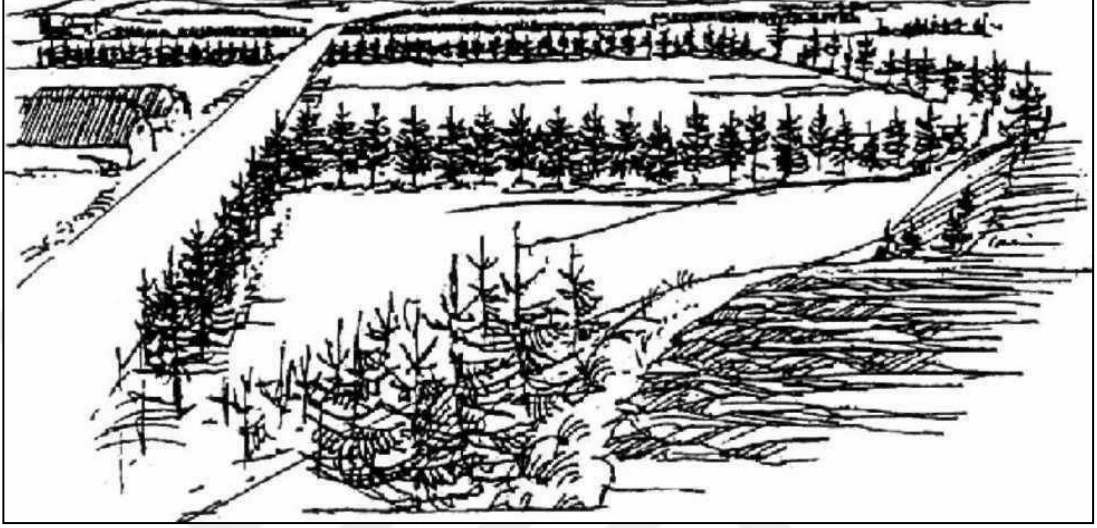
Şekil 1.14. Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği [34].

Rüzgâra etki eden kırıcıların birbirinden ortalama 1000 m'den fazla uzaklıkta olduğu, yapıların dağınık bir halde bulunduğu, çok sayıda ağaç ve yapının bulunduğu alanlar, pürüzlülük uzunluğu Z_0 'ın 0,10 m olarak ifade edildiği, pürüzlülük sınıfının 2 olarak tanımlandığı bölgelerdir. Şekil 1.15.'te pürüzlülük sınıfının 2 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır[34].



Şekil 1.15. Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği [34].

Şehir alanları, ormanlar ve ortalama birkaç yüz metre aralıklarla çok sayıda rüzgâra etki edecek kırıncıların bulunduğu araziler, pürüzlülük yüksekliği Z_0 0,40 m olarak ifade edildiği, pürüzlülük sınıfının 3 olarak tanımlandığı bölgelerdir. Şekil 1.16.'da pürüzlülük sınıfının 3 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [34].



Şekil 1.16. Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi örneği [34].

1.4.3. Türbülans

Türbülans, rüzgâr hızındaki ve yönündeki hızlı dalgalanmalar olarak adlandırılmaktadır. Türbülansın türbin performansı ve yüklemesi üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Türbülansın en yaygın göstergesi 10 dakikalık bir kayıt aralığında 1-2 saniyelik verilerden hesaplanan rüzgâr hızının standart sapması (σ) olarak belirtilebilir. Türbülans yoğunluğu; standart sapmanın ortalama rüzgâr hızına bölünmesi ile elde edilen birimsiz bir nicelik olarak adlandırılmaktadır.

σ rüzgâr hızının standart sapmasını ve v ortalama rüzgâr hızı olmak üzere türbülans yoğunluğu Denklem (1.2)'de verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$I = \frac{\sigma}{v} \quad (1.2)$$

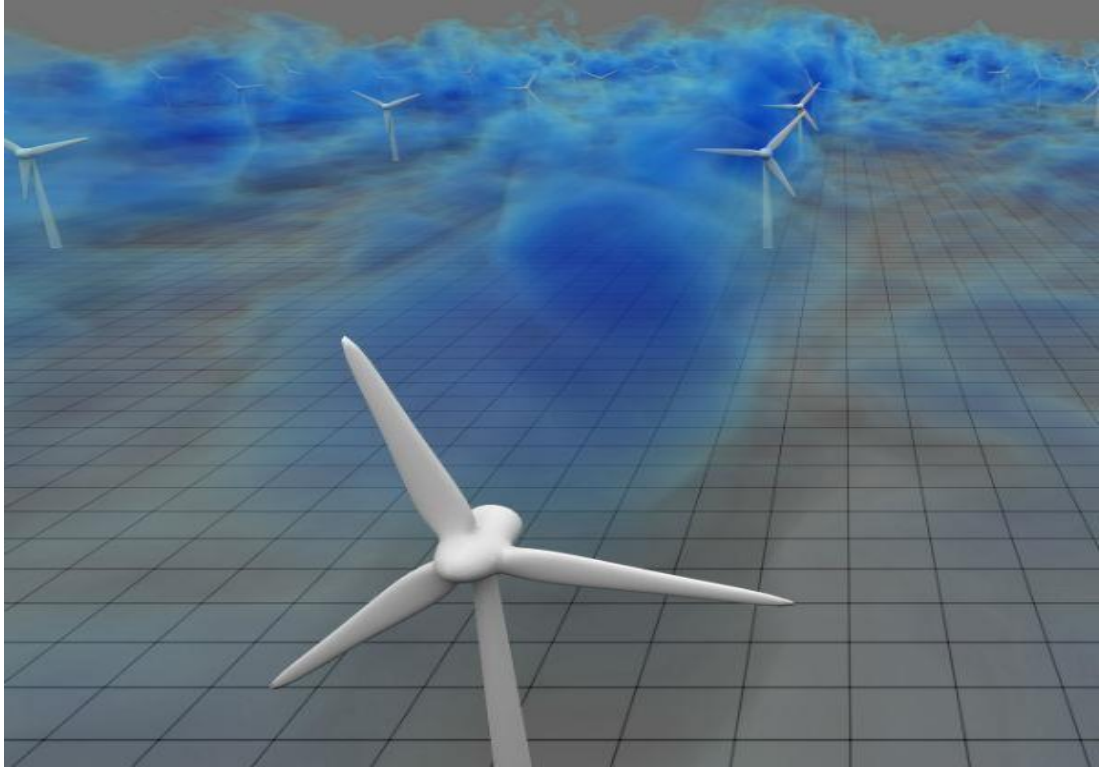
Rüzgâr türbinleri açısından bakıldığında rüzgâr türbinlerinin kurulacağı bölgede türbülans yoğunluğu değeri; 0-0,1 aralığında ise düşük türbülanslı bölge, 0,1-0,25 aralığında ise orta türbülanslı bölge, 0,25 değerinden büyük ise yüksek türbülanslı bölge olarak tanımlanmaktadır. Türbülans yoğunluğu değerinin 0,25 değerinden fazla olduğu bölgelerde rüzgâr enerji santrali kurulumu yapılması önerilmemektedir [30,35].

1.4.4. Wake (iz) etkisi

Bir rüzgâr türbini, kanatlarına çarpan rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin belirli bir kısmını kullanıp hareket enerjisine dönüştürebilir, enerjinin korunumu ilkesine göre türbinden çıkan rüzgârın enerjisinin türbine giren rüzgâr enerjisinden daha düşük olması beklenmektedir [36].

Rüzgâr türbinleri rüzgâr akışı yönünde enerjiyi dönüştürmesinin ardından arkalarında bir iz bırakmaktadır ve bırakılan bu iz rüzgâr hızını düşürmektedir. Wake (iz) etkisi rüzgâr çiftliğinin kurulduğu alanlarda, kurulu türbinlerin arkalarına daha yavaş bir rüzgâr hızı aktarmalarından dolayı enerji üretimine yapacakları etki olarak tanımlanmaktadır [37].

Türbinlerin elektrik üretimlerini olumsuz yönde etkileyen bu durumun en aza indirebilmek için rüzgâr çiftliği yerleşiminde türbin yerleşimlerinde uygun mesafelere dikkat edilmelidir. Genel anlamda bir türbinin, arkasındaki türbinin elektrik üretimine olan etkisini azaltmak için türbinler arasındaki mesafenin en az, öndeki türbinin kanat çapının 7 katı olacak şekilde yerleştirilmesi önerilmektedir. Şekil 1.17.'de bir rüzgâr türbinin arkasında oluşan wake (iz) etkisinin görüntüsü paylaşılmıştır [38].



Şekil 1.17. Wake (iz) etkisi [38].

1.4.5. Tünel etkisi

Rüzgâr enerji sistemlerinde tünel etkisine daha çok bölgede kurulu yapılar arasında veya dar dağ geçitlerinin olduğu bölgelerde rastlandığı söylenebilir. Havanın, bina veya dağların rüzgârlı kısımlarında sıkıştığı gözlenmekte ve rüzgâr şiddetinin belirgin bir oranda arttığı söylenebilir, buna tünel etkisi denilmektedir. Rüzgâr şiddeti açık arazide 6m/s olarak ölçüldüğünde doğal tünel etkisi nedeniyle rüzgâr hızı 9m/s ye çıkabilmektedir [39].

Rüzgâr türbinlerinin kurulum aşamasında tünel etkisinin dikkate alınarak arazi içerisinde uygun ve düzgün alanlara kurulumunun planlanması, rüzgâr enerjisinin daha verimli kullanılması ve enerji üretiminin daha etkin olması açısından avantaj sağlamaktadır. Rüzgâr enerji sistemlerinde verimli bir üretim için olumlu bir tünel etkisi sağlamak önemli bir detay olarak göze çarpmaktadır. Bu amaçla türbinin yumuşak engellerin arasına yerleştirilmeli ve arazinin yapısı pürüzlü ve engebeli olmaması şartı sağlanmalıdır. Bu koşullara dikkat edilmediğinde sert, pürüzlü ve engebeli bir arazi düzenli olmayan tünel etkisine neden olacaktır ve bu da daha fazla türbülansa sebep olan etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Oluşan türbülans, türbinde yıpranma ve yorulma gibi hasarlara neden olacağından türbin ömrüne ve enerji üretimine olumsuz etkileri olacaktır [40,41].

1.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Teknolojinin her geçen gün gelişmesiyle birlikte rüzgâr türbin teknolojileri de değişime uğramış ve önemli gelişmeler göstermiştir. Türbinlerin geçmişten bugüne yaşamış olduğu gelişmelerden dolayı ortaya farklı yapılarda rüzgâr türbin tipleri çıktığını ve ihtiyaca göre çeşitli boyutlarda rüzgâr türbinleri üretildiği görülebilmektedir.

Rüzgâr türbinlerini; çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkün olsa da en sık tercih edilen ve karşılaşılan sınıflandırma çeşidi rotor eksenine (dönme eksenine) göre sınıflandırmadır [42,43]. Rotor eksenine göre sınıflandırılan rüzgâr türbinleri; rotorun dönme hızlarına, pervane çapı ve kurulu güçlerine, pervane ve kanat sayılarına, şebekeye bağlantı durumlarına göre alt sınıflara ayrılabilir. Bu sınıflandırmaya göre rüzgâr türbinleri; yatay, dikey ve eğik eksenli olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [44,45].

1.5.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatları ise rüzgâr yönüne dik açı oluşturacak şekilde tasarlanmaktadır. Ticari amaçlı kullanılan türbinler incelendiğinde, çoğunluğunun yatay eksenli türbinlerden oluştuğu görülebilmektedir.

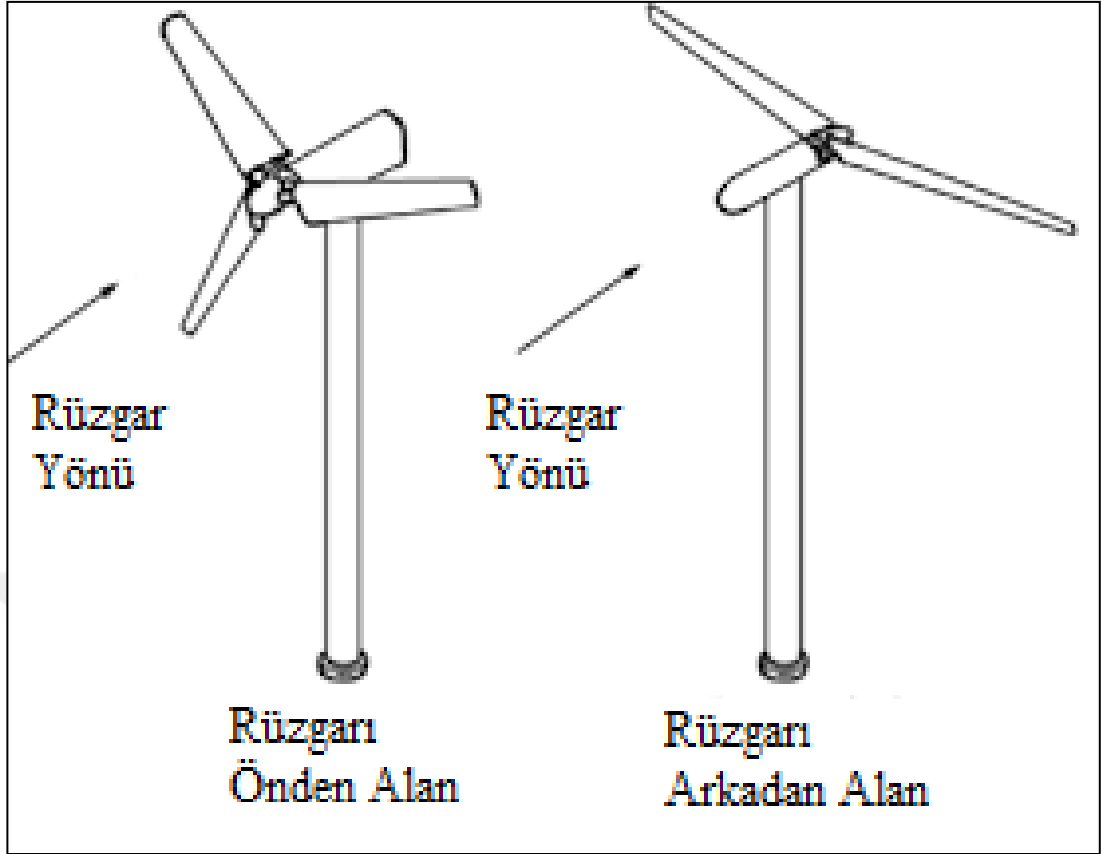
Bu türbinlerde rotor elemanın, rüzgârın en verimli şekilde kullanabilmesi amacıyla, dönel bir tabla üzerine yerleştirildiği görülebilir. Rotor yere paralel bir şekilde çalışmaktadır ve rüzgâr veriminin en iyi şekilde sağlanabilmesi için kanatların rüzgâr akışı yönünde olması gerekmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri kendi içinde de rüzgârı alışı yönüne ve kanat sayısına göre sınıflandırılabilirler [42]. Rüzgâr türbinleri, rüzgârı alışı yönüne göre, rüzgârı önden ve rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinleri olarak ikiye ayrılabilirler. Kullanım alanı çok yaygın olan rüzgârı önden alan rüzgâr türbinlerinin, rotor yüzü rüzgâra doğru yönlendirilmektedir.

Kulenin düz ve yuvarlak bir yapıda olmasına karşın, kanat kule hizasından geçerken türbinin ürettiği güce olumsuz bir etkisi bulunmaktadır. Kuleden kaynaklı oluşacak gölgeleme etkisine çok az maruz kalması bu türbinlerin üstünlüğü olarak kabul edilmektedir [42].

Rüzgârı önden alan rüzgâr türbin modellerinde, rotoru rüzgâr yönüne döndürebilmek için yön bulma mekanizmasına ihtiyaç vardır. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinde, rotorlar kulenin arkasında bulunmaktadır.

Türbinin rüzgârın bulunduğu yöne dönebilmesi için yön bulma mekanizmasına ihtiyaç duymaması, bu sistemin önemli bir artışı olarak göze çarpmaktadır. Nacelle ve rotorun rüzgârı pasif olarak izlemesi sağlanmaktadır. Kanatlar esnek özelliğe sahip olması sistemin ağırlığı ve makinenin güç sistemi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Rotor kanatlarının kule hizasından geçerken oluşturduğu güç dalgalanması bu türbinlerde, rüzgârı önden alan türbinlere oranla, türbine daha çok zarar vermektedir [42]. Şekil 1.18.' de Rüzgârı alışı biçimlerine göre rüzgâr türbinleri görülebilmektedir [33].



Şekil 1.18. Rüzgârı alış biçimlerine göre rüzgâr türbinleri [33].

Rüzgâr türbinleri tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olarak sınıflandırılabilir. Çok kanatlı türbinler, genel olarak yavaş hızlarda çalışırken diğer türbinler yüksek hızlarda çalışabilmektedir.

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin tasarımındaki temel amaç, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olmasından dolayı makine ağırlığını, dolayısıyla rotordaki dönüş momentini azaltmak olmaktadır. İlave yüklerin oluşturduğu balans problemleri ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulabilmesi için bu türbinlerin rotorlarında hub'un tek menteşe ile sabitlenip, karşı ağırlıklarla dengelenmesi gerekmektedir.

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin en büyük dezavantajı, 120 m/s dolayındaki oldukça yüksek kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesi olmaktadır. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre, kanat uç hızı iki kat daha fazladır ve dolayısıyla daha gürültülü çalıştığı söylenebilir [33]. Tek kanatlı bir rüzgâr türbini Şekil 1.19.'da görülebilmektedir.



Şekil 1.19. Tek kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini [46].

Avrupa ve ABD’de yaygın olarak kullanılan çift kanatlı rüzgâr türbinlerinin üretimindeki temel amaç üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre rotor maliyetini azaltmaktır. Çift kanatlı rüzgâr türbinlerinin rotor balansı, tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin rotor balansına göre daha düzgündür. Kanat uç hızları ise üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre daha yüksektir.

İki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik etkilerden dolayı çeşitli ilave ekipmanlara ihtiyaç vardır ve bu da maliyet artışını beraberinde getirmektedir. Kanat uç hızındaki fazlalık çift kanatlı rüzgâr türbinlerinin gürültülü çalışmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu türbinler, düşük rüzgâr hızlarında (3 m/s) devreye girememektedir.

Günümüzde bahsedilen bu dezavantajlarından dolayı çift kanatlı rüzgâr türbinleri tercih edilmemektedir [43].İki kanatlı bir rüzgâr türbini Şekil 1.20.’de görülebilmektedir.



Şekil 1.20. İki kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini [46].

Günümüzde en çok kullanılan türbin modeli olarak üç kanatlı rüzgâr türbinleri gösterilebilir. Dönme momentlerinin diğer türbin modellerine göre daha düzgün olması bu türbinlerin tercih edilmesinin en önemli sebebi olarak gösterilebilir.

Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin, her hızda sabit atalet momentine sahip olmasının sebebini türbin üzerinde depolanan yükler salınım yapan atalet momentine neden olmaması olarak gösterilebilir. Sabit atalet momenti barındıran yapısı sayesinde göbek içinde titreşimi engelleyici pahalı parçalara ihtiyaç duyulmamaktadır [42].

Elektrik üretimi amaçlı üretimlerinden dolayı ticari sınıfta yer alan üç kanatlı rüzgâr türbinleri günümüzde dünyanın her tarafında yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç kanatlı bir rüzgâr türbini Şekil 1.21.'de paylaşılmıştır.



Şekil 1.21. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini [46].

Uzun süre su pompalamada kullanılmış olan ve düşük hızlarda (2-3 m/s) çalışabilen bu türbinler 1870'li yıllarda ABD'de üretilmeye başlanmıştır. Bu türbinler su pompalama işlemi için gerekli olan momenti karşılayabilmesi için çok kanatlı olarak üretilmiştir [43]. Şekil 1.22.' de görüleceği üzere bu türbinlerin bazı modellerinde, kanat genişliklerinin göbek kısmından uçlara gidildikçe arttığı görülmektedir, dişli kutusu kullanılarak devir sayısı arttırılmakta ve kuyruğa yerleştirilen kanat dümen vazifesini görmektedir. Genellikle su pompalama amacıyla tercih edilen bu türbinlerin elektrik üretimi amacıyla kullanımında verimlerinin düşük olduğu görülmektedir [47].



Şekil 1.22. Çok kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini [46].

1.5.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Verimlilikleri yaklaşık olarak %35 seviyesinde olan dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde kule ihtiyacı yoktur ve jeneratör ve dişli kutusu gibi sistemler yer seviyesindedir. Bu sayede bu sistemlerin bakımları daha kolay olmaktadır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde, türbin şaftı yere dik bir şekilde konumlandırılmıştır ve rüzgâra dik bir açıdadır. Rüzgârı her yönden alabilen düşeyde yer alan kanatlar için yön değiştirme ve bunun için gerekli ek yapılara ihtiyaç bulunmamaktadır. Dikey eksenli türbin çeşidi olarak; sürüklenme ve kaldırma kuvveti ile dönen model Darrieus tip, sadece sürüklenme etkisi ile dönen model Savonius tip rüzgâr türbini mevcuttur [45].

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde kule olmadığı için yükseklikleri düşüktür ve düşük rüzgâr hızlarında çalıştıklarından daha az enerji üretmektedirler. Yatay eksenli türbinlere nazaran daha az ekipman ihtiyacı olması ve kule masrafının olmaması ilk yatırım ve bakım maliyetleri tarafından bakıldığında avantajlı görünmektedir. İlk hareket motoruna ihtiyaç duymaları, türbini ayakta tutabilmek için germe telleriyle yere sabitlendikleri için geniş alan kaplamaları ve az enerji üretebilmeleri dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dezavantajları olarak sıralanabilir. Darrieus ve Savonius tipi türbinler dikey eksenli rüzgâr türbin çeşitlerinin en çok bilinen modelleridir.

1.5.3. Darrieus tip rüzgâr türbinleri

Darrieus tip rüzgâr türbini, türbinlerin kanat şeklini bir kablonun döndürülmesi olayına benzeterek tanımlayan Fransız mühendis Georges Jeans Mary Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir [45]. Kuzey Amerika’da 1970-1980’lerde kanat tasarımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kanatların konkav ve konveks yüzeyleri arasındaki çekiş kuvveti farkı dönme hareketini oluşturur. Türbinler genellikle iki ya da üç kanatlı olarak üretilmektedir. İlk harekette tahrik motoruna ihtiyaç duyan bu türbinlerin kanatlarındaki aerodinamik yapı yüksek performans oluşturmaktadır [42].

Ticari amaçlı kullanılan modelleri 250 KW ve üzeri güç üreten modelleridir. Yapılan çalışmalar sonucunda Darrieus tip rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi ile ortaya çıkan H- Darrieus tipi rüzgâr türbinleri ile aerodinamik profilinin düz ve türbin kanatlarına açılabilir kontrol uygulanarak, yüksek rüzgâr hızlarında kanat açısı değişimi ve kanatların sabit hızda tutulmasının sağlandığı daha verimli çalışabilen türbin modeli geliştirilmiştir [33].

Şekil 1.23.'te Darrieus tip dikey eksenli bir rüzgâr türbini paylaşılmıştır.



Şekil 1.23. Darrieus tip dikey eksenli rüzgâr türbini [46].

1.5.3.1. Savonius tip rüzgâr türbinleri

Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından 1925 yılında keşfedilen Savonius tip rüzgâr türbinlerinin rotoru yeryüzüne dikey konumdadır. Merkezleri birbirine göre simetrik olacak şekilde kaydırılan silindirin ortadan ikiye ayrılması sonucu elde edilmiştir. Rotoru çarpan rüzgâr, yarım daire silindirin iç kısmında pozitif moment oluştururken diğer yarım daire silindirin dış kısmında negatif bir moment oluşturur. İç kısımdaki moment kuvvetinin dış kısımdakinden daha büyük olması nedeniyle oluşan farktan dolayı rotorun dönmesi gerçekleşir. Savonius tip rüzgâr türbinlerinde rüzgârın estiği yönün önemi yoktur rüzgâr hangi yönden estiğinden bağımsız olarak dönmeye ve güç üretmeye başlamaktadır [42,48].

Kurulum maliyetinin uygun ve kurulumlarının kolay olması, ilk hareket için tahrik motoruna ihtiyaç duyulmaması, her yönden esen rüzgâra hızlıca uyum sağlaması, düşük rüzgâr hızlarında çalışabilmesi ve sessiz çalışması Savonius tip rüzgâr türbinlerinin avantajları olarak gösterilebilir.

Aerodinamik performansları düşük olmasına karşın bu dezavantajlı yönünü geliştirmek amacıyla çalışmalar devam etmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine kıyasla güç katsayılarının düşük olduğu söylenebilir. Genellikle su pompalama gibi işlemlerde kullanılırlar. Şekil 1.24.'te Dikey eksenli savonius türbin modeli görülmektedir [47,48].



Şekil 1.24. Savonius tip dikey eksenli rüzgâr türbini [46].

1.6 Rüzgâr Enerjisi Eşitliği

Hareket halindeki her cismin bir kinetik enerjiye sahip olduğu bilinmektedir. Rüzgâr da hareket halindeki bir hava kütlesi olduğundan dolayı bir kinetik enerjiye sahiptir.

Rüzgâr gücünün sahip olduğu enerji elektrik enerjisi üretimi için kullanılan kuramsal eşitliği de kinetik enerji eşitliğinden elde edilmektedir [49]. E enerji, m kütle ve v yataydaki rüzgâr hızı olarak verilen Denklem (1.3)'te olduğu gibi ifade edilmektedir;

$$E = \frac{mV^2}{2} \quad (1.3)$$

Rüzgârın düşey bileşeninin yatay bileşenine göre çok küçük olduğu bilindiğinden ihmal edilmektedir.

ρ havanın özgül kütlesi, H havanın hacmi olmak üzere Denklem (1.4)'te verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$m = \rho H \quad (1.4)$$

A rüzgârın esme yönüne dik alan (rüzgâr türbini süpürme alanı), L rüzgâr yönündeki uzunluk olmak üzere Denklem (1.5)'te verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$H = AL \quad (1.5)$$

Yolun hız ve zaman çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, L mesafesi rüzgâr hızına ve zamana bağlı olarak Denklem (1.6)'da yazılmıştır;

$$L = v_t \quad (1.6)$$

L denklemde yerine konularak kütle denklemi Denklem (1.7)'de

$$m = \rho A v_t \quad (1.7)$$

elde edilmektedir.

Enerji denkleminde yerine konulduğunda, birim zamanda, birim alandan elde edilen rüzgâr enerjisi eşitliği Denklem (1.8)'de yazılmıştır;

$$E = \frac{\rho A v^3}{2} \quad (1.8)$$

Yukardaki eşitlikte ρ , deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri $1,223 \text{ kg/m}^3$ 'tür.

1.7 Hava Yoğunluğu Hesabı

Rüzgârdan elde edilecek enerji Denklem (1.8)'den de anlaşılacağı üzere havanın yoğunluğu ile doğrudan orantılıdır. Hava, nitrojen, oksijen, argon ve diğer bazı gazlardan oluşan bir karışımdır.

Nitrojen ve oksijen kuru havanın %99'unu oluşturmaktadır. Yerküreden 80 km yüksekliğe kadar atmosfer bu gazların karışımından oluşmaktadır. Sıcaklık ve basınç değişiminin nasıl etkilediğini anlayabilmek için standart gaz eşitliği kullanılmaktadır.

İdeal bir gaz için gaz eşitliği Denklem (1.9)'da yazılmıştır;

$$Ph = nRT \quad (1.9)$$

Standart koşullarda 0 °C ve 1 atmosfer (atm) basınçta 1kg mol 22,414m³ ve R: 8.314J (kmol K). Dolayısıyla 1atm basınç 0 °C de 101.324kPa = 105N/m² olarak bulunmaktadır. Buradan Denklem (1.10)'daki eşitlik yazılmıştır;

$$\rho = \frac{mP}{nRT} \quad (1.10)$$

Bir kilogram kuru havanın ortalama moleküler kütlesi 28,97'dir. Bu yüzden, 1kg mol kütle kuru havanın ağırlığı 28,97kg olarak bulunmaktadır. Denklem (1.11)'de yerine yazılmıştır.

$$\rho = \frac{mP}{nRT} = \frac{28,978}{8,314T} = 3,484 \frac{P_{kg}}{Tm^3} \quad (1.11)$$

Bu eşitlik, standart koşullarda kuru havanın hava yoğunluğunun 1,2929kg/m³ olduğunu göstermektedir. Herhangi bir yerde P ve T değerleri bu denklemde yerine konularak istenilen yerin hava yoğunluğu bulunabilecektir. Hava yoğunluğunu su buharı ve nem de etkilemektedir.

Havadaki su buharının miktarına göre, hava yoğunluğunun değeri değişebilmektedir. Herhangi bir gazın toplam basıncı, gazı oluşturan karışımdaki gazların her birinin basınçlarının toplamına eşittir.

Suyun moleküler ağırlığı (18g), havanın moleküler ağırlığından (28,97g) daha hafiftir. Buradaki durumda nemli havanın basıncı Denklem (1.12), kuru hava Denklem (1.13) ve su buharı Denklem (1.14) basınçları toplamıdır [49].

$$\rho_m = \frac{m_m P_m}{RT} \quad (\text{nemli hava}) \quad (1.12)$$

$$\rho_d = \frac{m_d P_d}{RT} \quad (\text{kuru hava}) \quad (1.13)$$

$$\rho_w = \frac{m_w P_w}{RT} \quad (\text{su buharı}) \quad (1.14)$$

Nemli hava, kuru hava ve buhar karışımıdır. Denklem (1.15) ve (1.16) kullanılarak;

$$\rho_m = \rho_d + \rho_w \quad (1.15)$$

$$\rho_m = \frac{m_d P_d}{RT} + \frac{m_w P_w}{RT} \quad (1.16)$$

özgül nem (q) ile gösterilir ve Denklem (1.17) ile ifade edilir.

$$q = \frac{m_w}{m_m} \quad (1.17)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde yerine konulduğunda Denklem (1.18) yazılabilmektedir,

$$q = \frac{P_m}{P_w} + \frac{m_w P_w}{m_d P_d + m_w P_w} \quad (1.18)$$

nemli hava için yoğunluk eşitlikten çekildiğinde, Denklem (1.19);

$$\rho_m = \frac{m_d P_m}{RT^*} \quad (1.19)$$

elde edilir. Eşitlikteki T^* , sanal sıcaklıktır.

Rüzgâr türbini tarafından üretilen bu mekanik güç şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v^3 \quad (1.20)$$

Denklem (1.20)' de ifade edildiği gibi, ρ hava yoğunluğunu (genel olarak 1.225 kg / m³), β türbin bıçaklarının derece cinsinden açısını, A türbin bıçaklarının metrekaresi cinsinden süpürdüğü alanı, v rüzgârın m/s cinsinden hızını ve $C_p(\lambda, \beta)$ ise rüzgâr türbininin güç katsayısını ifade etmektedir.

Rüzgâr türbininin güç katsayısı olarak ifade edilen $C_p(\lambda, \beta)$ rüzgâr türbininin güç üretim verimliliğini göstermektedir. Türbin milindeki mevcut mekanik güç ile mevcut rüzgâr gücünün oranı olarak tanımlanmaktadır.

Rüzgâr türbininin karakteristik özelliklerine dayanan genel eşitlik Denklem (1.21)'de şu şekilde tanımlanabilir.

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(116 * \frac{1}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \epsilon^{-21/\lambda_i} + 0.068\lambda \quad (1.21)$$

Denklem (1.21) de kullanılan $(1/\lambda_i)$ ifadesi şu şekilde açılabilir.

$$1/\lambda_i = 1/(\lambda + 0.08\beta) - (0.035/1 + \beta^3) \quad (1.22)$$

Denklem (1.22) de ifade edilmiş olan, C_p kanat uç hız oranı (λ) ile kanat eğim açılarının (β) doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. λ türbin hızı ($\omega_m * R$) ile rüzgâr hızının (v) oranıdır.

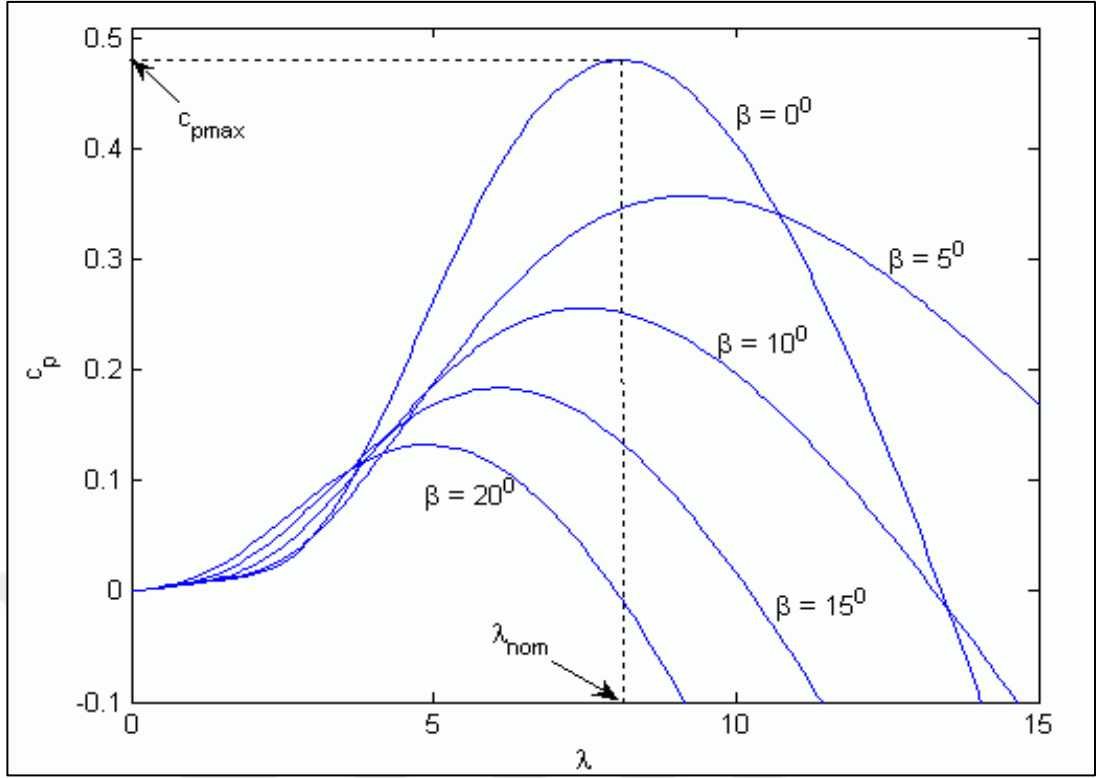
$$\lambda = \frac{\omega_m * R}{v} \quad (1.23)$$

1.8 Mgnt Yöntemi

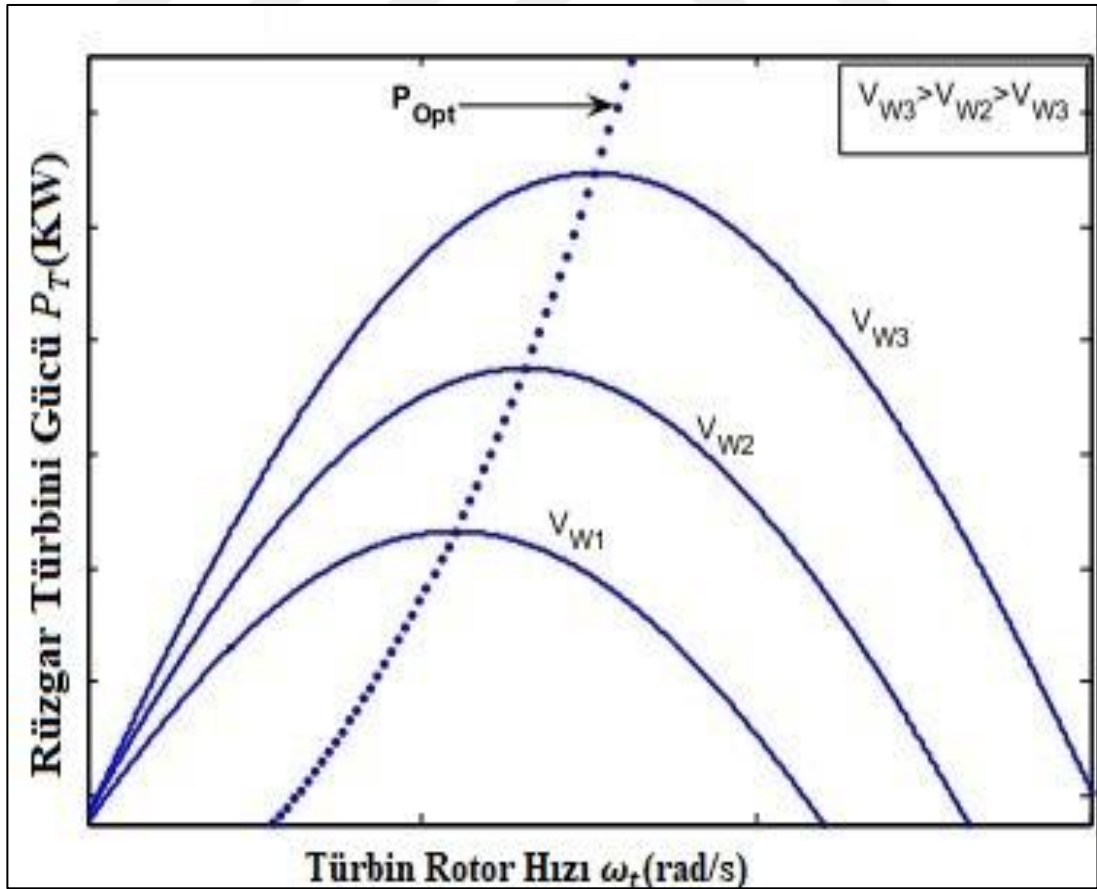
Denklem (1.23)' de ifade edilmiş olan, sırasıyla ω_m rüzgâr türbininin dönme hızı, R ise türbin kanatlarının süpürdüğü alanın yarıçapıdır. Sabit bir β için C_p sadece λ 'nın doğrusal olmayan bir fonksiyonu haline gelir Denklem (1.23)' te görüleceği üzere λ ile ω_m arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu hız optimum C_p ye karşılık gelir (λ_{opt}). Uç hızı oranının değeri tüm maksimum güç noktaları için sabittir. Kısacası değişken rüzgâr hızlarında rüzgâr türbinini maksimum güce çıkartabilmek için rüzgâr türbini anma hızının altındaki her değerde her zaman λ_{opt} 'da çalıştırılmalıdır. Bu durum rüzgâr türbininin dönme hızını optimum dönme hızına getirecektir. Şekil 1.25. te görüleceği üzere C_p değişken rüzgâr hızlarında belirli bir noktada maksimum noktaya ulaşmaktadır [50].

Rüzgâr hızı değiştiğinde, rotor hızı ve rüzgâr türbini tarafından yakalanan güç değişecektir. Denklem (1.20), Denklem (1.21) ve Denklem (1.23) te görüleceği üzere güç belirli bir rüzgâr hızı için rotor hızına (ω) göre değişir ve hız değerine göre değişkenlik gösteren maksimum gücün olduğu belirli bir nokta bulunmaktadır. Şekil 1.26. da, farklı rüzgâr hızlarında rotor hızına bağlı olarak rüzgâr türbininde üretilen güç eğrileri görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere farklı rotor hızlarında maksimum güçler farklı noktalarda elde edilmektedir.

Rüzgâr türbininin miline bağlı generatörün üretmiş olduğu mekanik gücün ω_m nin bir fonksiyonudur. Rüzgâr türbininin bahsi geçen bu optimum hızda çalıştırılmasına Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) denilmektedir. Çalışmada bahsi geçen güç noktalarının takibi çalışması yapılmıştır.



Şekil 1.25. Rüzgâr türbinlerinin C_p - λ karakteristiği [50].



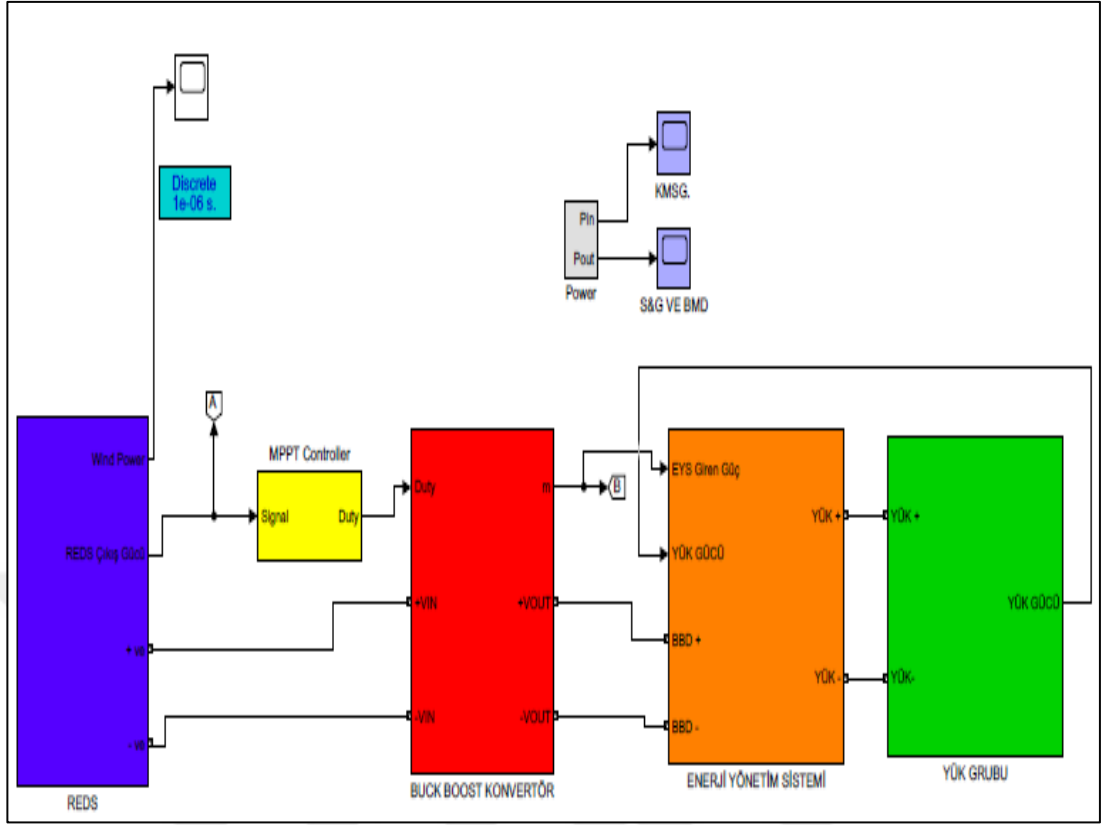
Şekil 1.26. Değişken rüzgâr hızlarında rüzgâr türbininde üretilen güç [50].

2. MALZEME VE YÖNTEM

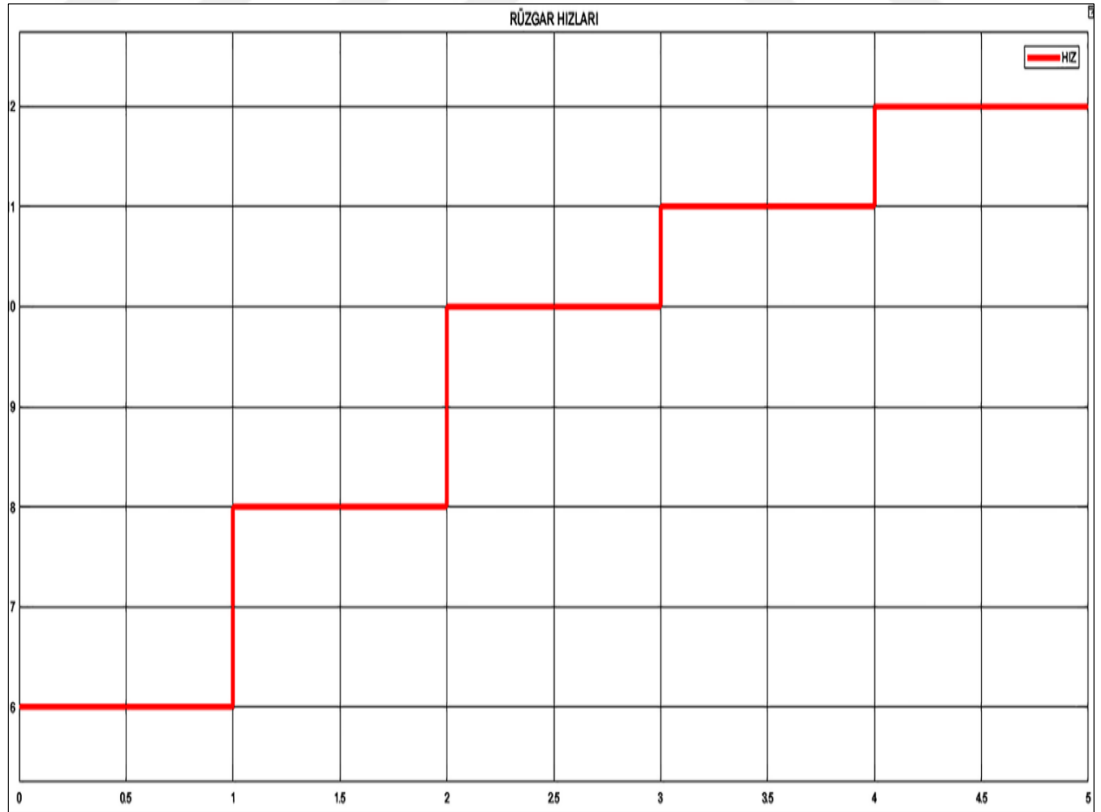
Çalışmada önerilen sistem Şekil 2.1.'de görüldüğü üzere Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG), Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) ile Saptır ve Gözle (S & G) ünitesini barındıran Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) kontrolörü, Buck-Boost dönüştürücü (BBD) ve Batarya Yönetim Sistemi (BYS)'den oluşmaktadır. Çalışmada küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde enerji üretimi aşamasında çok sık tercih edilmesi ve simülasyon ortamından uygulama ortamına geçirilmesi göz önüne alınarak REDS'in enerji dönüşümünü sağlaması amacıyla KMSG tercih edilmiştir. KMSG, kullanım alanlarının sıklığının yanında aynı görevi yapabilecek emsallerine göre maliyeti ve boyutu ile de ön plana çıkmaktadır. KMSG, güvenilirliği, maliyeti ve boyutundan dolayı en çok tercih edilen rüzgâr generatörüdür [51]. Düşük hızlı çok kutuplu KMSG, bakım gerektirmemesi ve farklı iklim koşullarında kullanılabilir olmasından dolayı küçük ölçekli rüzgâr santralleri için en iyi çözümlerden biri olmaktadır [52]. Oluşturulan sistemde değişken rüzgâr hızlarında KMSG çıkışından alınacak gerilim değişikliğini görebilmek ve MGNT algoritmasını gerçekleştirerek doğal ortam şartlarını sağlayabilmek amacıyla KMSG girişine değişken rüzgâr hızları uygulanmıştır. Doğada sabit rüzgâr talebinin karşılanması mümkün olmayan bir durumdur. Doğal ortam şartlarında rüzgâr hızı sürekli değişiklik göstermekte ve bu nedenle türbin çıkışlarında sabit bir güç çıkışının alınması mümkün olmamaktadır. Bu noktada devreye MGNT uygulamaları girmekte ve sabit rüzgâr hızlarının yakalanamadığı durumlarda verimli bir güç üretimi sağlanması gerçekleşmektedir. Tasarımımızda doğal ortam şartları göz önüne alınarak uygulanan değişken rüzgâr hızları sayesinde KMSG' nin devir değişikliği sağlanarak değişken rüzgâr hızlarındaki KMSG davranışları daha sağlıklı izlenebilmiştir. Bu sayede tasarımda karşılaştırılması yapılacak BMD ve S&G algoritmalarının davranışları her bir rüzgâr hızında incelenerek sonuçlar raporlanmıştır.

Çalışmada simülasyon ortamında yapılan modellemede, fiziksel ortamda yapılabilecek çalışmalarda tercih edilmesi ve uygulama imkanları düşünülerek 1000 W gücünde çıkış verebilecek KMSG tercih edilmiştir.

KMSG'ler yapı olarak çıkışlarından AC gerilim üretmektedirler. Bu nedenle KMSG çıkışında elde edilen AC gerilimin MGNT yapılabilmesi ve üretilen enerjinin batarya gruplarında depolanabilmesi amacıyla DC gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla AC gerilimden DC gerilime dönüşümün sağlanması amacıyla diyot köprüsü içeren bir sistem kullanılmıştır. AC gerilimden DC gerilime yapılan doğrultma sonucunda oluşabilecek parazitleri engellemek için; köprü diyot çıkışında kondansatör kullanılması KMSG çıkışından elde edilen AC gerilimin DC gerilime dönüşümü sonrası düzgün bir gerilim elde edilmesini sağlamıştır. Değişken rüzgâr hızlarında KMSG çıkışından MGNT tespitinin yapılabilmesi için rüzgâr enerji sistemlerinde çok sık kullanılan iki algoritma olan BMD ve S & G algoritmaları tercih edilmiştir. Bu algoritmaların sistem çıkışına uygulanabilmesi için bu iki algoritmayı da kendi içinde barındırabilecek MGNT ünitesi sistem çıkışına eklenmiştir. MGNT'nin çıkış olarak üreteceği görev döngüsü sinyali (Duty Cycle), sistemin çıkış gerilimini belirleyecek olan BMD'nin giriş bilgisi olacaktır. Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi sistem girişine uygulanan değişken rüzgâr hızlarında KMSG çıkışından elde edilecek akım ve gerilim değişimleri, MGNT yapılabilmesi için her rüzgâr hızı ayrı ayrı BMD'ye ve S & G'ye aktarılmıştır. BMD ve S & G ünitesi, doğrultucu çıkışındaki akım ve gerilim verilerine dolayısıyla sistemde o an için üretilen güç bilgisine dayanarak sistemin çalışmasını kontrol edecek ve Buck-Boost dönüştürücüde kullanılan Mosfet transistörün görev döngüsünü(d) belirleyecektir. Değişken rüzgâr hızlarında maksimum güç noktasını yakalayabilmek için esnek ve basit bir teknik olması ile birlikte önceden türbin bilgilerine ihtiyaç duyulmaması sebebiyle S & G yöntemi ve BMD ünitesi tercih edilmiştir. BMD ve S&G ünitesi her rüzgâr hızında ayrı ayrı çalıştırılmış ve çıkış değerleri detaylıca analiz edilmiştir. Buck-Boost dönüştürücü çıkışına bağlanan Batarya Yönetim Sistemi (BYS) ile sistemin uygun olmayan rüzgâr hızlarındaki enerji kesintisi sorununun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Sistem tasarlanan enerji yönetim algoritması sayesinde belirli zaman dilimlerinde Batarya gruplarını şarj edecek belirli zaman dilimlerinde ise yükü besleyecektir. Tasarlanan algoritma sistem çıkışına bağlanan yükün günün her saatinde enerjili kalmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu sayede şebeke bağlantısı bulunmayan bölgeler için düşünülmüş olan sistemin sürekli olarak enerjili kalması sağlanacak ve alternatif olarak başka bir yerden enerji bağlantısı olmayan bölgeler için enerji sorununun önüne geçilmiş olacaktır.



Şekil 2.1. MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış önerilen yöntem



Şekil 2.2. Sistem girişine uygulanan değişken rüzgâr hızları

3. KMSG MODELİ

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (KMSM), yüksek tork, yüksek güç, yüksek verimlilik ve düşük gürültü gibi bazı avantajlı özellikleri bünyesinde barındırması sebebiyle, yüksek performansın önemli olduğu uygulamalarda diğer AC motor türlerine göre daha fazla tercih edilmekte olduğu görülmektedir [53].

KMSG modelinde kullanılan gerilim ve akım denklemlerini ifade edecek olursak [1] ;

$$V_q = -r_s \cdot i_q + \frac{d(\lambda_q)}{dt} + \omega_r \cdot \lambda_d \quad (3.1)$$

$$V_d = -r_s \cdot i_d + \frac{d(\lambda_d)}{dt} - \omega_r \cdot \lambda_q \quad (3.2)$$

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + \lambda_m \quad (3.3)$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q \quad (3.4)$$

olarak alınmaktadır. Burada, V_d ve V_q ; d-q eksenli stator gerilimlerini, i_d ve i_q ; d-q eksenli stator akımlarını temsil etmektedir.

L_d ve ; d-q eksenli endüktanslarını ve r_s ; faz başına stator direncini göstermektedir.

λ_m ; mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısını ifade etmektedir. KMSG'nin mekanik enerji eşitliği Denklem (3.5)'de görülmektedir.

$$P_{em} = \omega_{rm} \cdot T_e = \frac{3}{2} \cdot \omega_r \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (3.5)$$

burada, P_{em} ; elektromekanik gücü [ω_r], rotorun mekanik hızını [rad/s] ve T_e ; elektromanyetik momenti ifade etmektedir [Nm].

ω_r ve ω_{rm} arasındaki bağıntı Denklem (3.6)'da görülmektedir.

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_{rm} \quad (3.6)$$

P ; kutup sayısıdır. d-q değişkenlerine göre KMSG için elektromanyetik moment T_e Denklem (3.7)'de verilmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (3.7)$$

Denklem (3.6) ve (3.7) kullanılarak, Denklem (1.30) yeniden düzenlenecek olursa, elektriksel büyüklükler ile tanımlanan elektromanyetik moment eşitliği Denklem (3.8)'deki gibi elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \lambda_m \cdot i_q] \quad (3.8)$$

KMSG'nin mekanik açısal hız (rad/s) eşitliği Denklem (3.9)'deki gibidir:

$$\frac{d(\omega_{rm})}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T_m - T_e) \quad (3.9)$$

T_m ; mekanik momenti [Nm] ve J ; eylemsizlik momentini [kg m²] ifade etmektedir.

Aktif-reaktif-görünür gücü eşitlikleri sırasıyla Denklem (3.10) (3.11) ve (3.12)'te görülmektedir.

f_{abc} gerilim ve akım değişkenleri f_{dq0} eksen takımına göre Denklem (3.13)'daki gibi ifade edilmektedir.

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \quad (3.10)$$

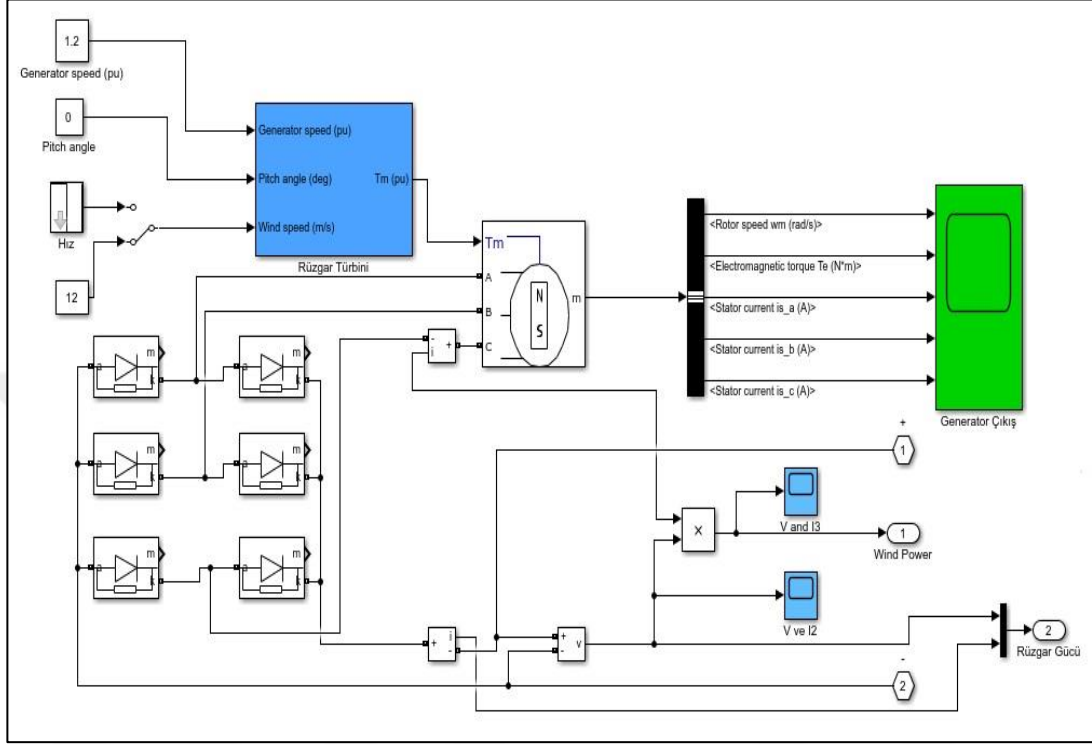
$$Q = \frac{3}{2} \cdot (V_d \cdot i_d - V_q \cdot i_q) \quad (3.11)$$

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Şekil 3.1.'de MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış KMSG içeren REDS modeli görülmektedir.

Tablo 3.1.' de simülasyon tasarımında kullanılan Rüzgâr Türbini ve KMSG'ye ait parametreler görülmektedir. Belirtilen parametrelere göre tasarlanmış model, gerekli algoritmalar çalıştırılarak simüle edilmiştir.



Şekil 3.1. MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış REDS modeli

Tablo 3.1. Tasarımda kullanılan Rüzgâr Türbini ve KMSG Parametreleri

Türbin Parametreleri	
Hava Yoğunluğu	1.225kg/m ³
Pitch Angle	0
Güç Katsayısı (Cp)	0.4412
Rüzgâr Hızı	6m/s-12m/s
Türbin Kanat Yarıçapı	2m
KMSG Parametreleri	
Stator Faz Direnci	14 ohm
Endüktans (d,q)	0.8mH
Flux Linkage	0.175V.s
Eylemsizlik Momenti	0.089J
Kutup Sayısı	10
Anma gücü	1 KW
Nominal Frekans	50Hz
Anma Gerilimi	65V
Anma Akımı	17A

4. TASARIMDA KULLANILAN MPPT MODELLERİ

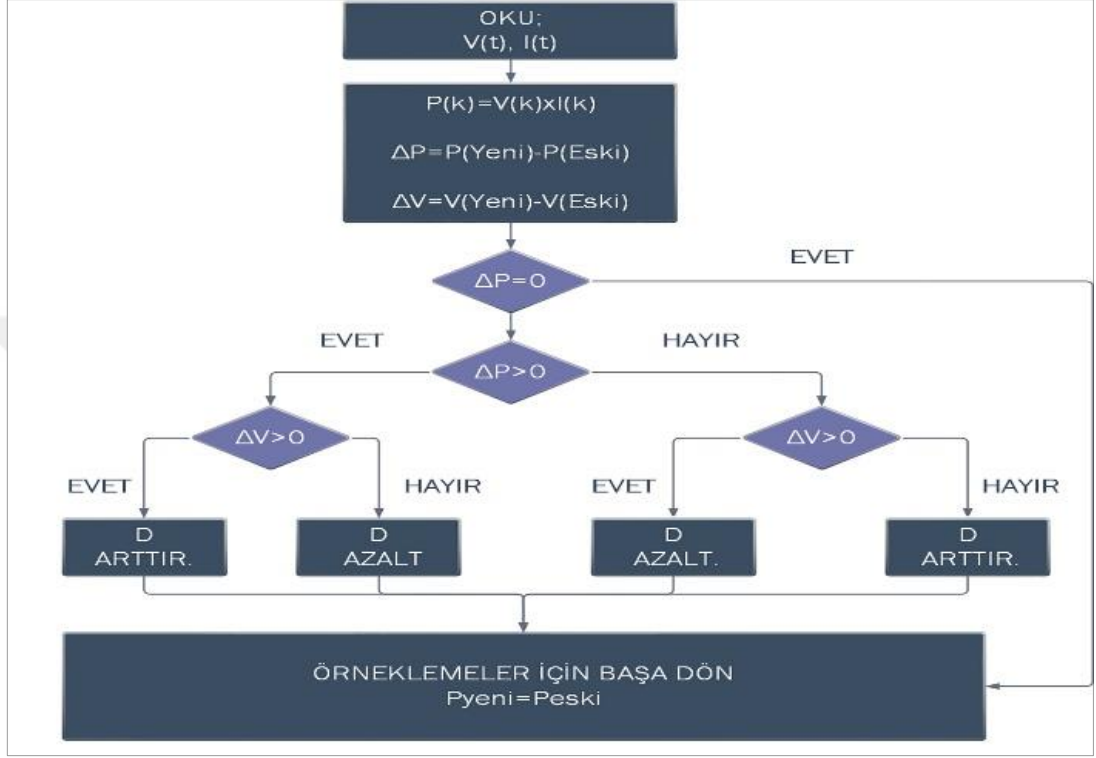
4.1. S&G Modeli

Oluşturulan sistemde S&G ve BMD yöntemi, her bir algoritma için ayrı ayrı uygulanan rüzgâr hızları için maksimum noktayı tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. S&G yönteminde, türbinin hızı artışına oranla ve elektriksel çıkış gücündeki değişim gözlemlenir. S&G yönteminde anlık olarak gücün izlenmesi prensibi hakimdir. Eğer anlık olarak gözlemlenen güç bir önceki güçten daha yüksekse, saptırma yönü pozitifdir ve artışa devam edilmesine izin verilmelidir aksi takdirde saptırma yönü negatifdir ve maksimum güç noktası, dolayısıyla bozulma yönü tersine çevrilmelidir [54]. S&G yönteminde önceden rüzgâr türbinine ait parametrelerin bilinmesine ihtiyaç yoktur. Bağımsız, esnek ve basit bir teknik olmasından dolayı en çok kullanılan algoritmalarından biridir [55].

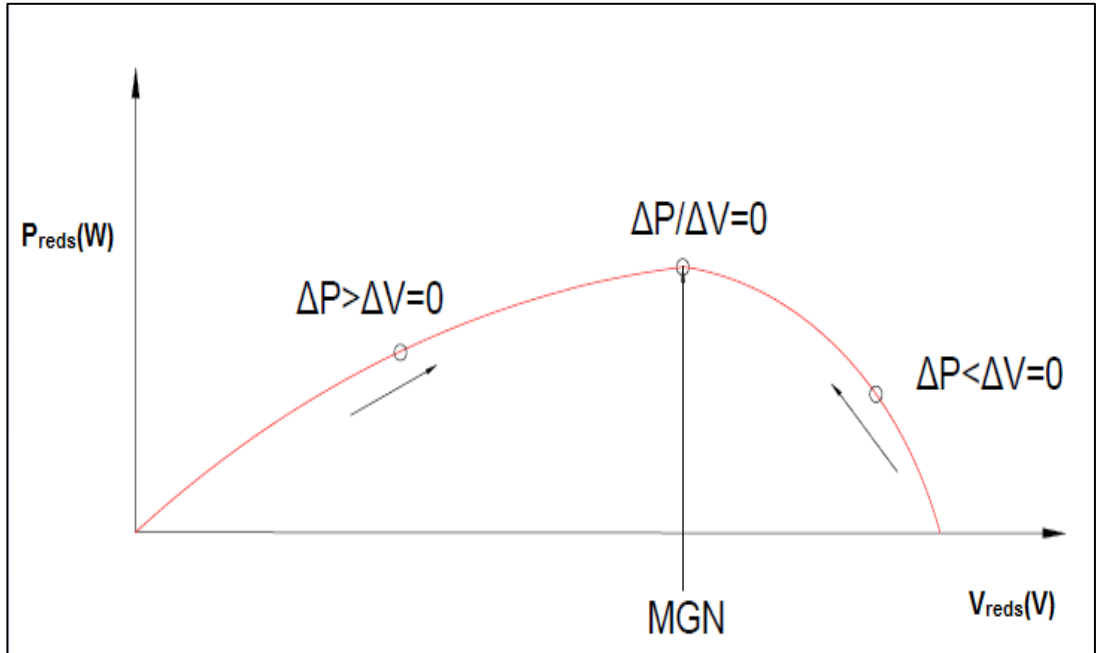
Sistemimizde akım ve gerilim değerleri ölçülerek çıkış gücü değerlerinin hesaplanması sağlanmıştır. Sistemde üretilen gücün değişimine göre referans değeri olan belirlenmiş olan akım ya da gerilim değerleri arttırılıp azaltılarak MGN izlemesi yapılması sağlanabilmektedir. Sistemimizde kullandığımız S&G metodu, maksimum gücü çekecek en uygun çalışma noktasını belirlemek için referans olarak türbinde üretilen çıkış voltajını kullanmaktadır. Tasarlanan algoritma ile sistemde üretilen gücün sürekli olarak izlenmesi sağlanmıştır. Değişken rüzgâr hızlarında, her bir hız değeri için sadece bir noktada maksimum gücün çekilmesi mümkündür. Tespit edilen bu nokta için belirlenecek gerilim değeri sistemin üretmesi gereken gerilim değerini belirleyecektir. Bu noktada devreye BBD sistemi girecektir. Gerilimin BBD ye uygulanacak d katsayısı ile uygun seviyeye getirilmesi gerekmektedir. Çalışmada KMSG çıkış gücü ve yük tarafındaki çıkış gücü akım ve gerilimden yararlanılarak hesaplanır ve karşılaştırılır. Daha sonra çıkış gerilimlerin karşılaştırılması yapılır. Ardından referans olarak belirlediğimiz gerilim değerini belirleyecek olan d katsayısının arttırılıp azaltılması yoluyla MGN araması devam edilir. Maksimum güç noktasına ulaşma süresince sürekli olarak saptır ve gözle işlemi yapılacağından belirli miktarda salınımlar oluşmaktadır [56].

S&G algoritması sistemin her anahtarlama çevriminde bir defa uygulanır. Ancak, S&G yöntemi değişken rüzgâr hızı koşullarında yavaş yanıt verir ve düşük verimliliğe sahiptir. Ayrıca, S&G yönteminde performans büyük ölçüde adım boyutuna bağlıdır, bu durum MGN'nin izlenme süresini belirler ve etkiler. Bu nedenle, S&G yönteminin iyileştirilmesi için takip adımın ayarlanmasını gerekmektedir [57].KMSG' ye ait anlık gerilim ve akım değerleri okunarak, anlık güç değeri hesaplanır. Şekil 4.1.'de verilen akış diyagramında da görüleceği üzere maksimum güç noktası (MGN) bulununcaya kadar işlemler her anahtarlama çevriminde tekrarlanmak zorundadır. Hesaplanan anlık güç değeri bir önceki çevrimde okunan anlık güç değeri ile karşılaştırılarak farkı alınır ve ΔP değeri elde edilir. Aynı işlem referans olarak aldığımız gerilim bilgisi içinde geçerlidir. Gerilim bilgileri bir çevrim boyunca okunur ve bir sonraki çevrimdeki gerilim farkı ΔV değeri elde edilir. Şekilde verildiği gibi standart bir S&G algoritmasında rüzgâr karakteristik eğrisi eğiminin sıfır olduğu $\Delta P/\Delta V=0$ noktası sistemimizin maksimum güç noktası (MGN) olarak belirlenmiştir. Klasik S&G algoritmasında MGN değerine ulaşılması daha yavaştır [58].KMSG çıkışından okunan akım ve gerilim bilgisi sistemin o anki güç bilgisini oluşturmaktadır. Bir sonraki adımda sistemden okunan akım ve gerilim bilgisi sistemin yeni gücü olarak adlandırdığımız P_{yeni} bilgisini bize sunacaktır. Sistem ardışık olarak çalıştığı ve akım ve gerilim bilgileri sürekli olarak sistemde işlendiği için sistemden okunan P_{yeni} değeri bir sonraki adımda sistemin maksimum gücü aramaya devam edebilmesi için sistemin P_{eski} bilgisini oluşturacaktır. Eğer P_{yeni} , örneklemeden alınan ve bir önceki anlık gücü temsil eden P_{eski} olarak adlandırılmış güçten daha büyükse, gerilim değerindeki değişimlere bakılmaktadır. Bu noktada V değerindeki bir önceki duruma göre değişimine göre sistem karar verecek ve sisteme gönderilen d değerinde değişiklik yapılarak sistemin MGN 'yi bulması sağlanacaktır. $\Delta P/\Delta V$ değerinin sıfır olduğu nokta yani güç eğrisi eğiminin sıfır olduğu nokta sistemin maksimum güç noktası olarak adlandırılmıştır. Bu sayede sistem sürekli olarak takip edilerek en uygun noktada maksimum gücü yakalaması sağlanmıştır. S&G tekniğinin rüzgâr enerjisi dönüşümündeki tek dezavantajı, rüzgâr hızının hızlı değişimini takip edememeleri ve böylece genel sistemin verimliliğini ve MGN takip hızını etkilemeleridir. S&G yönteminin akış şeması, Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

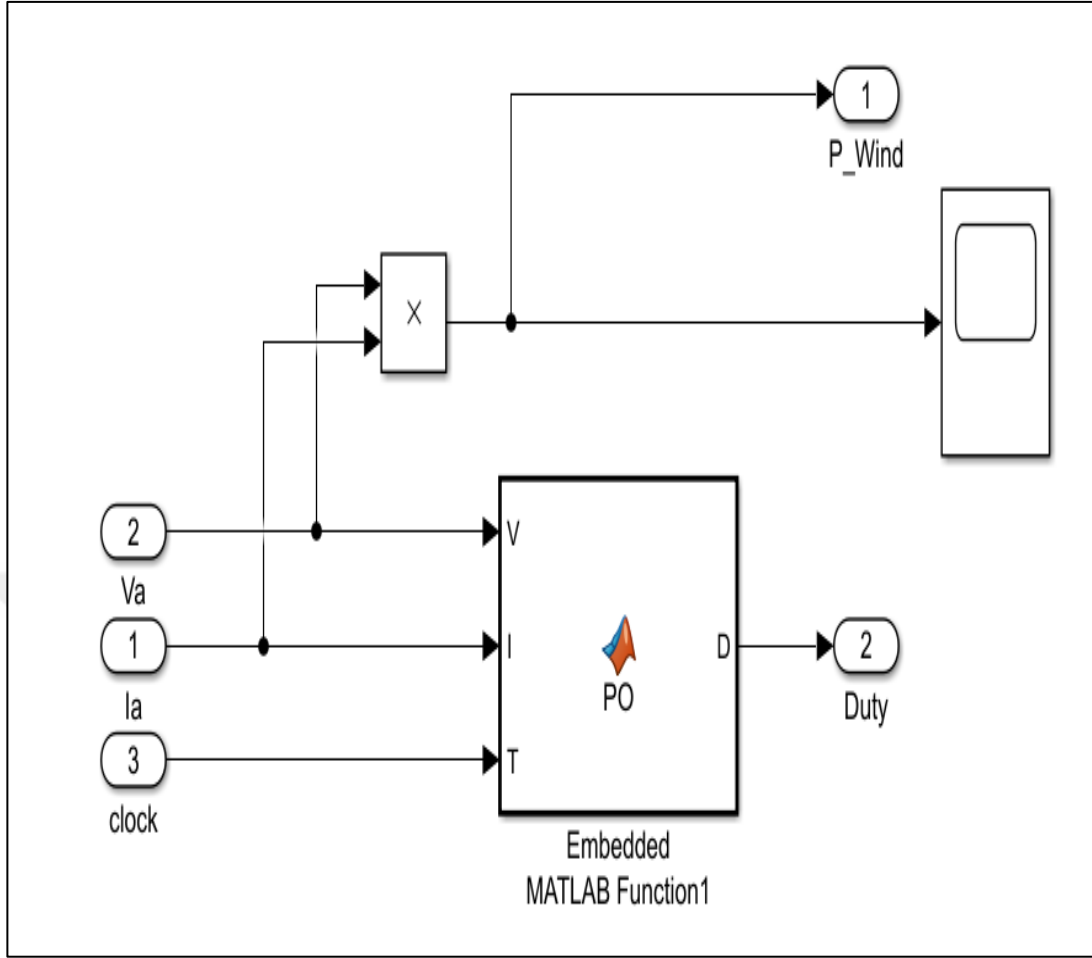
Şekil 4.2.'de S&G prensip şeması görülmektedir. Şekil 4.3. de MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış S&G Yöntemine ait fonksiyon görünmektedir. EK-A'da MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış S&G Yöntemine ait fonksiyona ait kodlar görülmektedir.



Şekil 4.1. S&G yönteminin akış şeması



Şekil 4.2 S&G prensip şeması



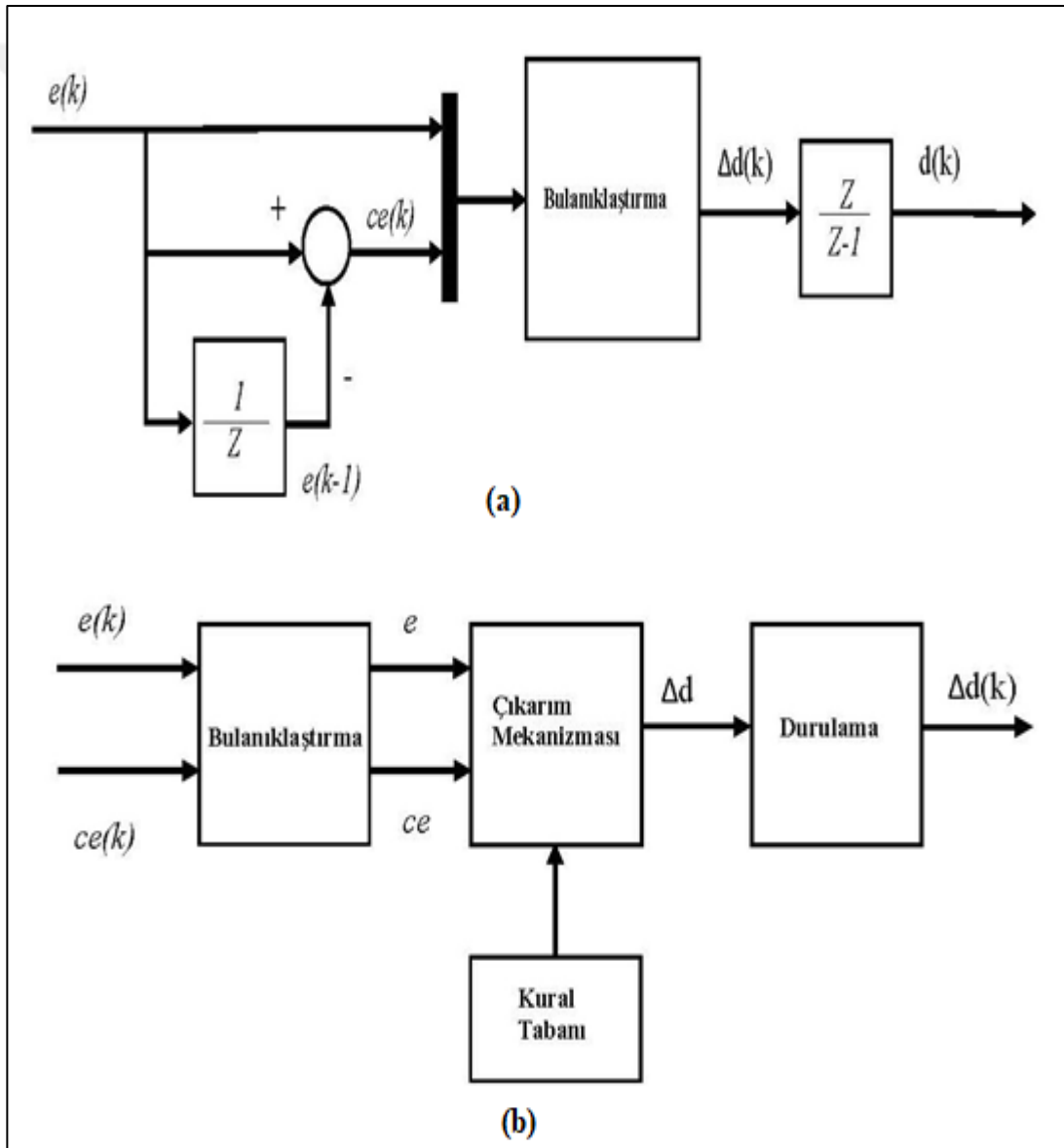
Şekil 4.3 MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış S&G yöntemi

4.2 Bmd Modeli

S&G yönteminin sakıncalarını gidermek, maksimum güç noktasını takibinin daha sorunsuz yapılabilmesi ve görev döngüsünün belirlenebilmesi amacıyla BMD algoritması önerilmiştir. BMD tabanlı bir sistemin kontrol mekanizması, kontrol stratejisine nitel bilgiyi ekleyerek bir operatörün veya saha çalışanının süreçle ilgili deneyimini barındırmaktadır, ancak resmi bir tasarım metodolojisinin olmaması, BMD kontrollü sistemlerin kararlılığını ve zorluklarını tahmin etme zorluğu gibi sınırlamaları nedeniyle eleştirilmektedir [59].

BMD sistemimize maksimum güç noktasının hızlı ve kesin olarak bulunması gibi avantajlar getirmiştir. BMD genel olarak, Bulanıklaştırma, Kural Tabanı ve Durulama olarak üç aşamadan oluşur. Kurallar, sistemin önceki bilgileri temelinde tasarlanır ve BMD kapalı döngüde çalışan yapay zekâ temelli karar verme denetleyicisidir.

Bulanık mantık denetleyicisi güçlü bir denetim özelliğine sahiptir ve doğrusal uygulamalar için daha iyi sonuçlar verir. Sistem hakkında tüm bilgilere ihtiyaç duymaz [60]. Şekil 4.4 a. ve Şekil 4.4 b. de gösterilen BMD kontrolör yapısına bakıldığında, kontrolörün iki giriş değişkeninin olduğu görülmektedir. Bulanık denetleyicilerin girişleri gösterildiği gibi referans olarak verilen güç değeri ile birim zamanda oluşan mevcut güç değerinin farkını oluşturan (e) sinyali ve birim zamanda mevcut güç ile yeni oluşan güç değişimi (ce) sinyalidir. Çıkış sinyali ise, mosfet transistörün görev döngüsü sinyalini temsil eden $\Delta d(k)$, $d(k)$ olarak belirlenmektedir. Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de (e) ve (ce) sinyallerinin hesaplama formülleri görülmektedir [53].



Şekil 4.4. MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış BMD modeli [53].

$$e(k) = P^*(k) - P_w(k) \quad (4.1)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (4.2)$$

Formülde belirtilen $P^*(k)$ referans gücü temsil ederken $P_w(k)$ ise anlık güç değerini temsil etmektedir. BMD bulanıklaştırma, kural tabanı ve durulama olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Sinyaller hesaplandıktan ve dilsel değişkenler elde edildikten sonra, BMD'nin çıkış değişkeni, kullandığımız algoritmaya bağlı olarak sistemimize uygulayacağımız görev döngüsü olmaktadır. BMD'nin verimliliği sadece sistemin önceki bilgilerine ve kural tabanına dayalı tablonun doğru hata hesaplamasına bağlıdır.

Tablo 4.1., BMD'yi modellemek için kullanılan kural tablosunu temsil eder. Kurallar, Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NO), Negatif Küçük (NK), Sıfır (Z), Pozitif Küçük (PK), Pozitif Orta (PO), ve Pozitif Büyük (PB) olmak üzere yedi seviyede çerçevelenir. Sistemimizden elde edilen akım ve gerilim bilgileri kurallar tablosundaki güç değişkenini oluşturmaktadır. Güç verisinde zamana bağlı olarak ortaya çıkacak değişimler gerilim verisinde ortaya çıkan değişimlerle birlikte algoritmada belirtildiği gibi işleme tabi tutulacak ve sonrasında görev döngüsü sinyaline ulaşılacaktır.

Çıkarım mekanizması temel olarak tablodaki kuralların uygunluğunu belirleyen BMD üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanır. Şekiller, BMD kontrol cihazının giriş ve çıkış üyelik fonksiyonunu temsil eder. Durulama yöntemi olarak Centroid Yöntemi kullanılmıştır. Maksimum güç noktasının bulunabilmesi için sisteme gönderilen görev döngüsü sinyalinin belirlenmesi BMD tarafından yapılmaktadır ve daha önce kurallar tablosunda belirlenen kurallara uygun olarak haritalanan çıkarım sisteminin sonucu olarak belirlenmektedir.

BMD çıkış gerilimi ve güç değişimini izler ve bulanıklaştırma işlemi için giriş olarak verilen hata sinyali üretir, burada giriş verileri Mamdani yöntemi kullanılarak uygun bulanık dilsel kümelerle dönüştürülmüştür. Sonrasında bulanık küme, algoritma kuralları kullanılarak uygun bir bulanık çıkışın elde edildiği çıkarım sisteminde işlenmiştir. Ardından elde edilen değerler, bir görev döngüsü olarak net değere dönüştürülmüştür.

Tablo 4.1. BMD'yi modellemek için kullanılan kural tablosu

CE \ E	E	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	S	S	S
NO	NB	NB	NO	NO	NO	S	S	S
NK	NB	NB	NK	NK	NK	PK	PK	PO
S	NB	NO	NK	NK	S	PK	PO	PB
PK	NO	NK	NK	NK	PK	PK	PB	PB
PO	S	S	S	PO	PO	PO	PB	PB
PB	S	S	S	PB	PB	PB	PB	PB

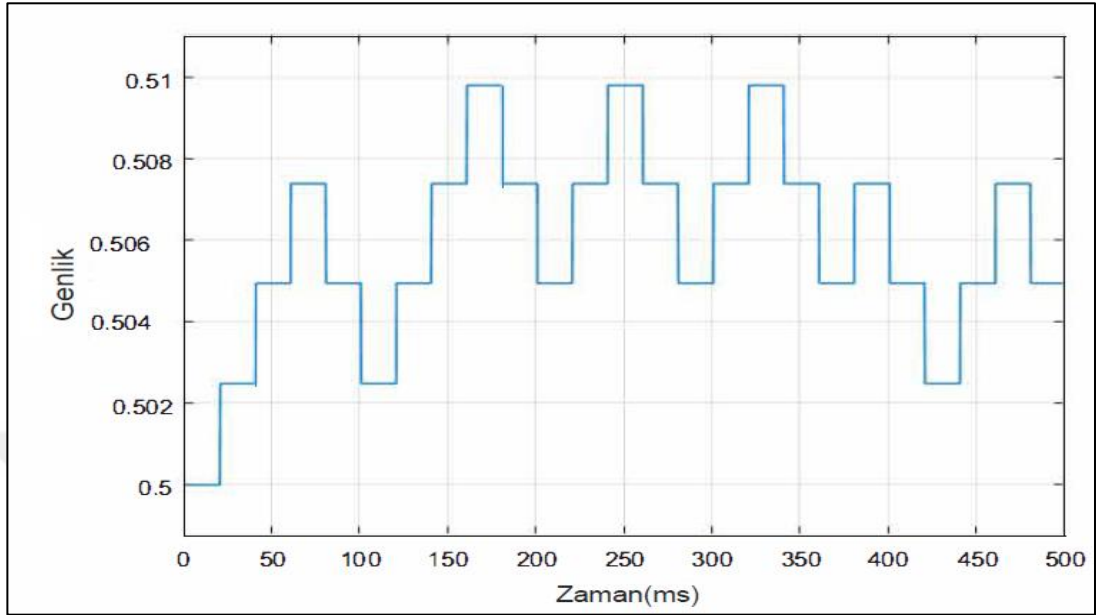
Tablo 4.1.'de giriş güç hatası (e) ve (ce) değişkenine ait üyelik fonksiyonları görülmektedir. Kurallar, Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NO), Negatif Küçük (NK), Sıfır (Z), Pozitif Küçük (PK), Pozitif Orta (PO), ve Pozitif Büyük (PB) olmak üzere yedi seviyede oluşturulmuştur.

Sistemde kullanılan KMSG 1000 Watt gücünde seçildiğinden değişken rüzgâr hızlarında KMSG' nin üreteceği değişken yüklerle uygun seviyelerde üyelik fonksiyonları belirlenmiştir ve kurallar tablosu bu seviyelere uygun olarak oluşturulmuştur. Sistemdeki güç değişimi izlenmiş ve gerilim verilerine uygun olarak görev döngüsüne karar verilmiştir.

Verilen referans değerinden, KMSG' nin o anda ürettiği güç farkı alınarak BMD girişlerine güç hatası (e) olarak girilmiştir. KMSG' nin güç çıkışı 1000 W olduğundan aralık 0 Watt ile 1000 Watt aralığında sınırlandırılmıştır.

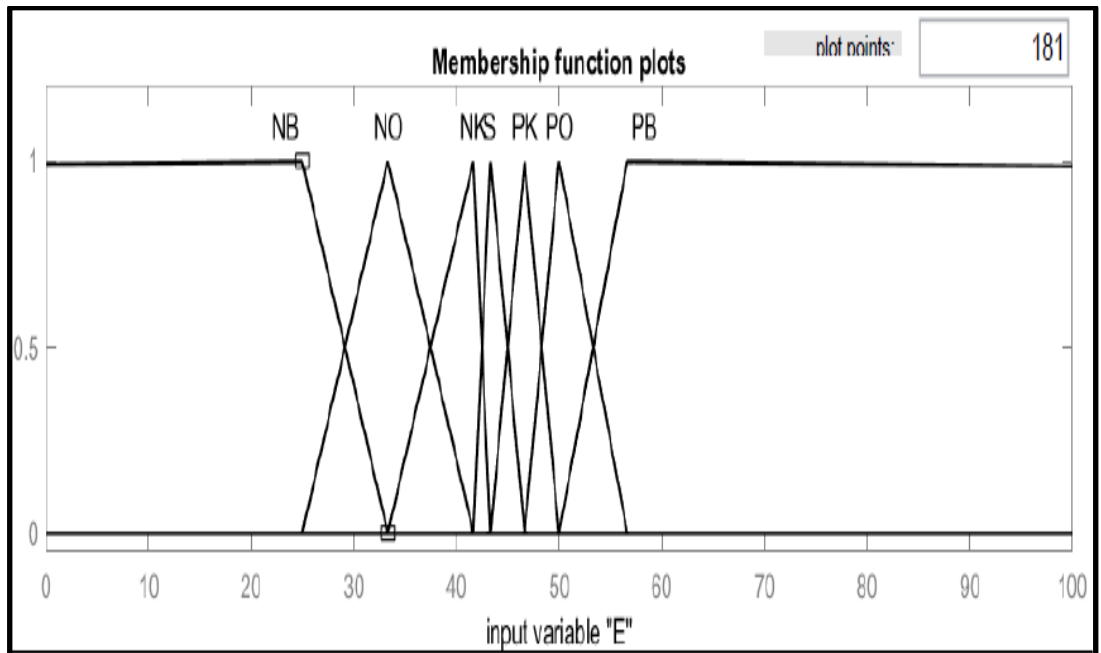
KMSG çıkışından zamana bağlı olarak ölçülen güç değişimleri algoritmaya bağlı olarak işleme tabi tutularak görev döngüsü sinyaline karar verilecektir.

Şekil 4.5.' te KMSG'nin 12m/s lik hız altında çalıştırıldığı durumlara zamana ve BMD algoritmasına bağlı olarak değişen ait görev döngüsü sinyali (d) görülmektedir.



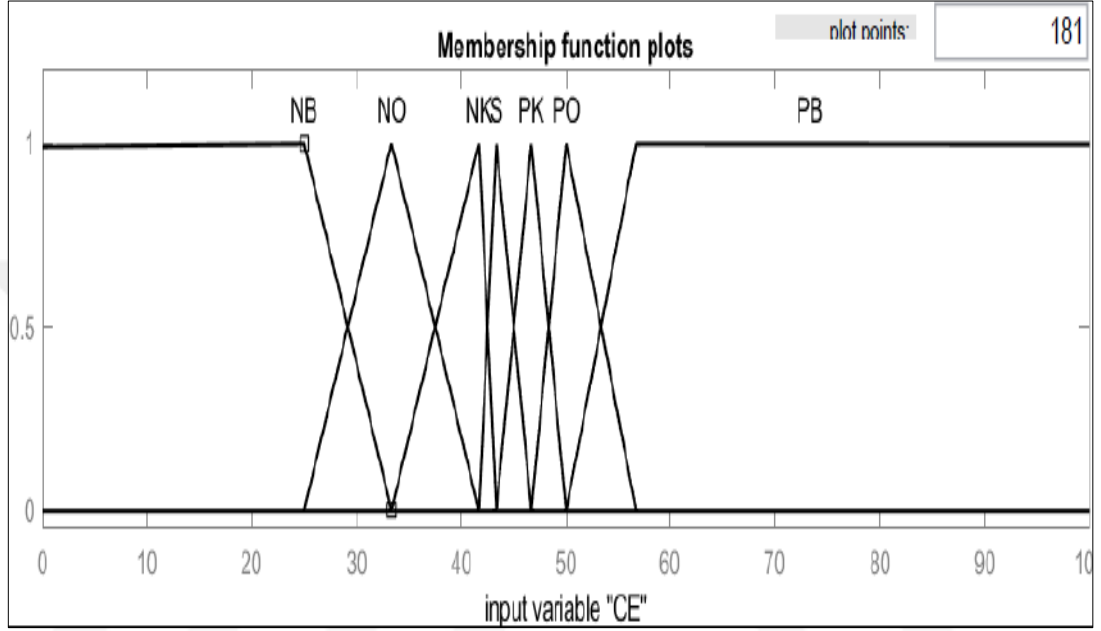
Şekil 4.5. BMD algoritmasına bağlı olarak değişen görev döngüsü sinyali (d)

Şekil 4.6.'da KMSG çıkışından elde edilen gücün zamana bağlı değişimini gösteren, giriş güç hatası (e) değişkenine ait üyelik fonksiyonları görülmektedir. KMSG çıkışından, değişken rüzgâr hızlarında birim zamanda alınan anlık güç değerine ait hata değeri, algoritmada işleme tabi tutulacak güç hatası olan (e) sinyalini vermektedir.



Şekil 4.6 Bulanık denetleyicilerin girişlerinin (e) sinyali

Şekil 4.7.'de KMSG çıkışından elde edilen gücün zamana bağlı değişimini gösteren, giriş güç hatası değişimi (*ce*) değişkenine ait üyelik fonksiyonları görülmektedir. KMSG çıkışından, değişken rüzgâr hızlarında birim zamanda alınan anlık güç değeri ile bir önceki birim zamandaki güç değerinin farkı, algorithmada işleme tabi tutulacak güç hatasındaki değişim (*ce*) sinyalini vermektedir.



Şekil 4.7. Bulanık denetleyicilerin girişlerinin (*ce*) sinyali

Şekil 4.8.'de BMD çıkışından elde edilen görev döngüsü sinyaline (*d*) ait üyelik fonksiyonları görülmektedir. BMD çıkışından elde edilecek görev döngüsü sinyali Mosfet transitörün gate ucuna uygulanacak PWM sinyali olduğundan üyelik fonksiyonları 0 ile 1 arasında hesaplanmıştır.

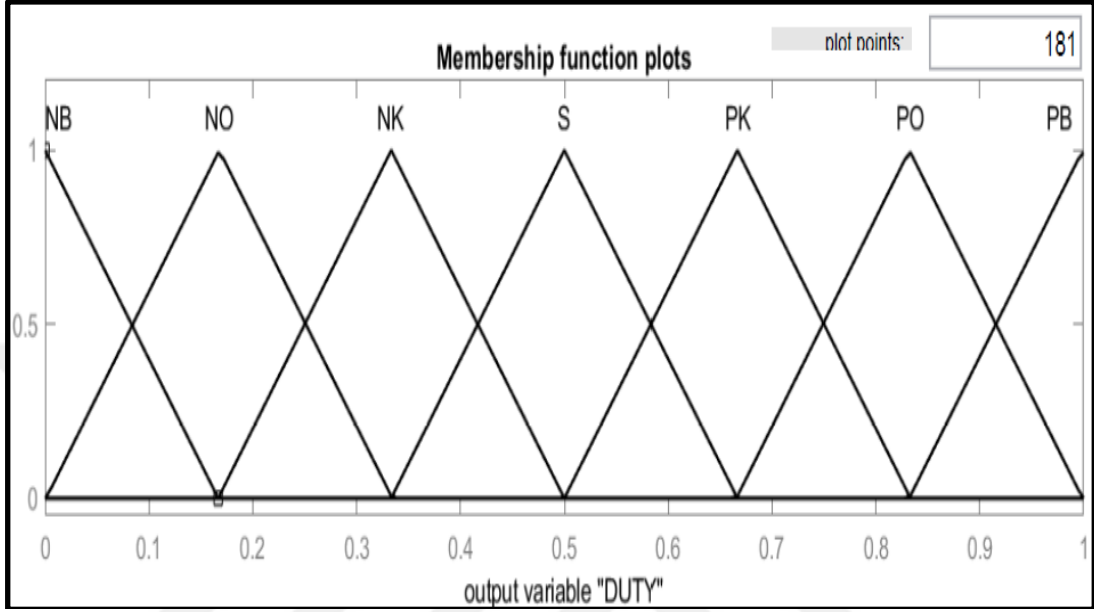
Değişken rüzgâr hızlarında giriş değişkenlerinden gelen verilen kurallar tablosu ve üyelik fonksiyonlarına uygun olarak değerlendirilmiş ve işlem sonucunda uygun bir (*d*) sinyali elde edilmiştir.

Şekil 4.8. 'de gösterildiği gibi, çıkarım mekanizması çıktı Δd , bulanıklaştırma biriminde net bir *d* (*k*) değerine dönüştürülür. Denklem (4.3)' te görüldüğü üzere centroid yöntemi kullanılarak durulama işlemi gerçekleştirilmiştir [53].

$$\Delta d(k) = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta d)_i \mu[(\Delta d)_i]}{\sum_{i=1}^n \mu[(\Delta d)_i]} \quad (4.3)$$

Durulama işlemi sonrasında elde edilecek görev döngüsü sinyali olan d katsayısı Denklem (4.4)'te ifade edildiği gibi elde edilmektedir.

$$d(k) = d(k - 1) + \Delta d(k) \quad (4.4)$$



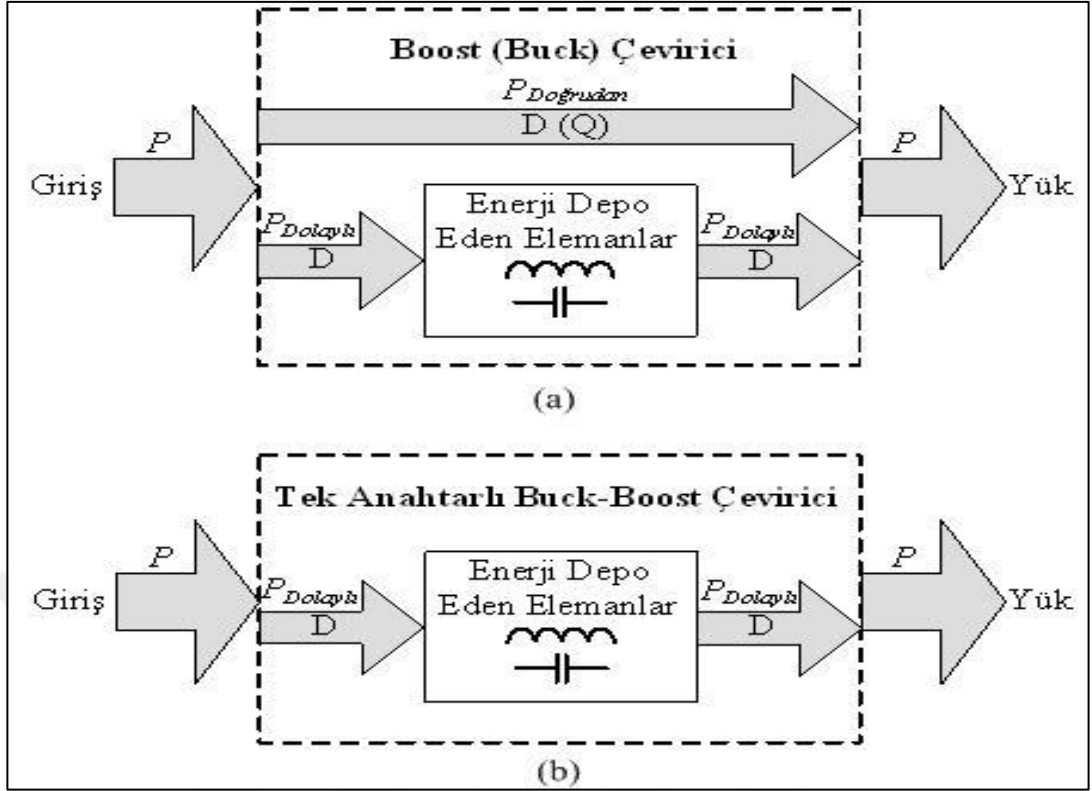
Şekil 4.8. Görev döngüsü sinyaline (d) ait üyelik fonksiyonları

5. BUCK-BOOST DÖNÜŞTÜRÜCÜ

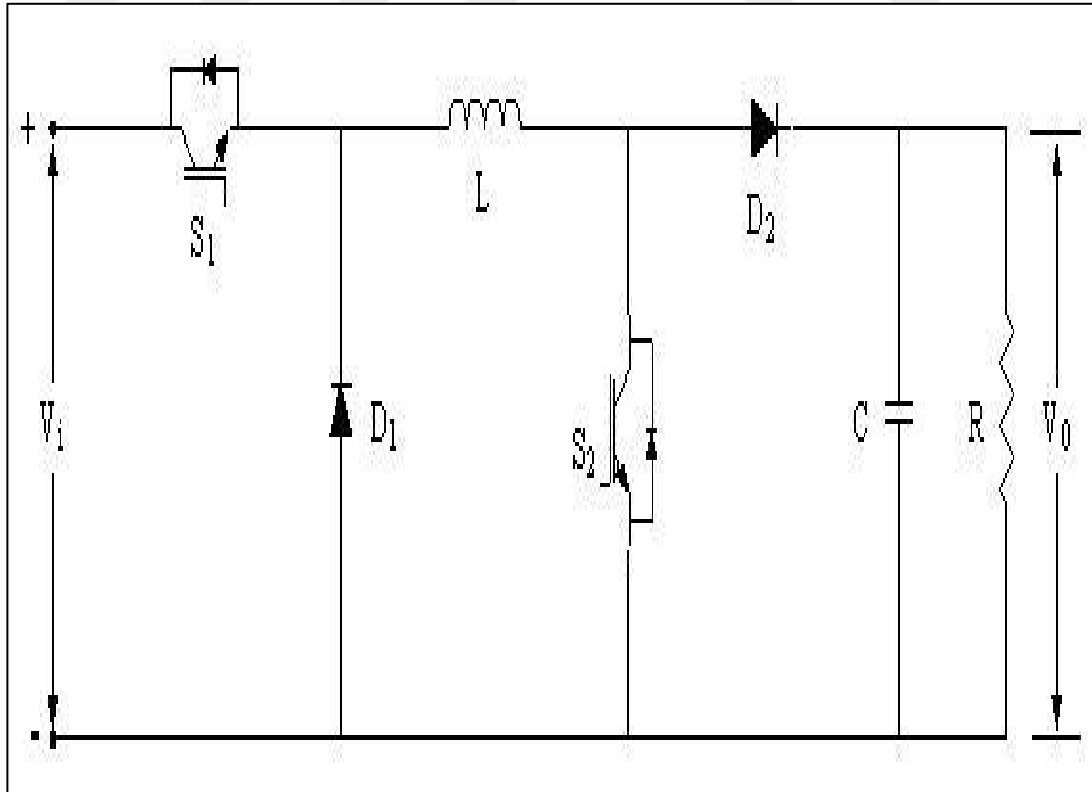
Boost dönüştürücüler back to back dönüştürücülere göre düşük maliyetli ve kolayca kontrol edilebilir olmasından dolayı küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için en yaygın kullanılan dc / dc dönüştürücülerden biridir [61].

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin verimliliğini artırmak için güç elektroniği elemanları kullanılarak MGNT uygulamaları yaygın şekilde kullanılmaktadır. Güç elektroniği dönüştürücülerinde yapılan düzenlemeler rüzgâr türbinlerinde uygulanmaktadır. Büyük ölçekli sistemlerde şebeke bağlantısı için back to back dönüştürücüler yaygın şekilde kullanılmaktadır. 10 kW'dan küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde ise, en çok kullanılan dönüştürücü bir diyot köprü doğrultucu ve bir dc / dc dönüştürücüdür [62]. Çıkış gerilimini gerektiği zaman azaltabilen ya da yükseltebilen buck-boost, sepic, cuk gibi tek anahtarlı çeviriciler, giriş ve çıkış gerilimlerinin genellikle sabit olmadığı akü şarj sistemleri, aktif güç faktörü düzeltme devreleri gibi uygulamalarda sık şekilde kullanılmaktadır [63,64]. Devre elemanları üzerindeki akım ve gerilim stresi ve enerji depo eden elemanların boyutları, tek anahtarlı gerilimi azaltıp yükseltebilen çeviricilerde, buck ve boost çeviricilere göre önemli miktarda yüksektir. Şekil 5.1.'de görüleceği üzere Buck ve boost çeviricilerde yüke aktarılan güç, direkt (P_{direkt}) ve dolaylı ($P_{dolaylı}$) olarak olmak üzere iki bölümden oluşur.

Çevirici veriminin artması ve çevirici elemanlarının gerilim stresi ile enerji depo eden elemanların boyutlarının azalması, çevirici tarafından yüke direk aktarılan gücün toplam güce oranının yükselmesine bağlıdır [65,66]. Gücün tamamının anahtarlama elemanları tarafından işlenerek yüke aktarıldığı Şekil 5.1. (b)'de görülmektedir. Görüldüğü üzere tek anahtarlı buck-boost, sepic ve cuk çeviricilerde yüke aktarılan direkt güç sıfırdır. Elemanların gerilim stresini ve enerji depo eden elemanların boyutlarının artmasına neden olan bu özellik tasarım aşamasında yeni arayışlara neden olmuştur. Buck-boost çeviricilerde de buck veya boost çeviricilerde olduğu gibi güç aktarımı için bir direkt yol oluşturulması bahsedilen durumun önüne geçebilecektir. Bu amaçla tasarlanan buck-boost çevirici Şekil 5.2.'de gösterilmektedir [67].



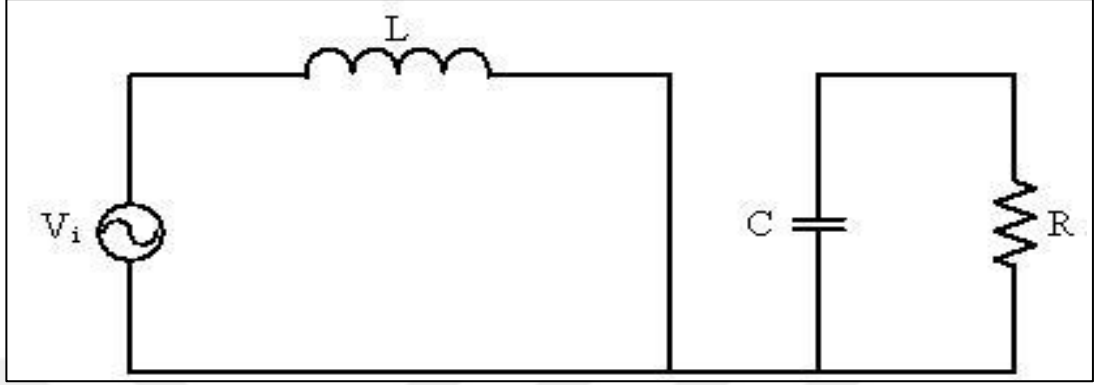
Şekil 5.1. Çeviricilerde yüke güç aktarımı (a) Buck ve boost çeviricilerde (b) Tek anahtarlı buck-boost çeviricilerde [64].



Şekil 5.2. Buck ve boost çeviricinin arka arkaya bağlanması ile elde edilen buck-boost çevirici [64].

5.1. Buck-Boost Çeviricinin Kararlı Durum Analizi

Şekil 5.3.'de anahtarların her ikisinin de iletimde olduğu durum için çift anahtarlı buck-boost çeviricinin eşdeğer devresi gösterilmiştir.



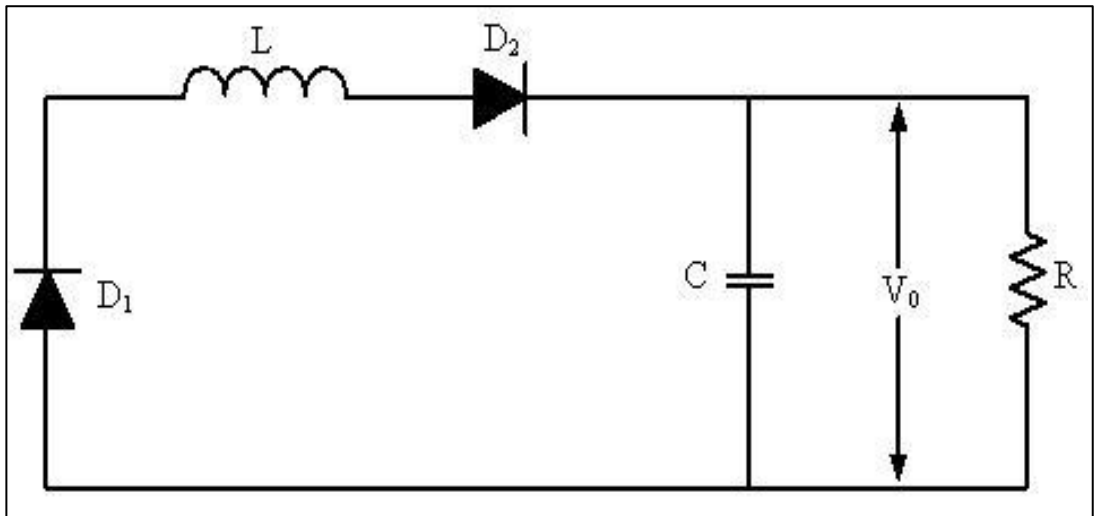
Şekil 5.3 Anahtarlar iletimde iken çevirici eşdeğer devresi [64].

$S1$ ve $S2$ anahtarları iletimde iken bobin üzerinde düşen gerilim ve bobin akımı Denklem (5.1) ve (5.2) ile verilmiştir [63].

$$V_1 = L \frac{di}{dt} = V_i \quad (5.1)$$

$$I_1 = L \frac{vi(t)}{L} dt \quad (5.2)$$

Burada V_1 bobin üzerinde düşen gerilimi, I_1 bobin akımı, dt =değişim, $V(t)$ i giriş geriliminin zamana göre değeri ve L bobinin endüktans değerini göstermektedir.



Şekil 5.4. Anahtarlar kesimde iken çevirici eşdeğer devresi [64].

S1 ve S2 anahtarların ikisinin de kesimde olduğu durum için çift anahtarlı buck-boost çeviricinin eşdeğer devresi ise Şekil 5.4'te gösterilmiştir. S1 ve S2 anahtarları kesimde iken bobin üzerinde düşen gerilim ve bobin akımı Denklem (5.3) ve (5.4) ile bulunabilir.

$$V_L = L \frac{di}{dt} = V_0 \quad (5.3)$$

$$I_L = L \frac{V_0}{L} (1-d)t \quad (5.4)$$

Buradan çift anahtarlı buck-boost çeviricinin dönüştürme oranı Denklem (5.5)'te verilmiştir.

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{d}{1-d} \quad (5.5)$$

Görüldüğü gibi tek anahtarlı buck-boost çeviricilerin çıkış gerilimini tersleme özelliği de ortadan kalkmıştır. Burada V_0 çıkış gerilimi, V_i giriş gerilimi ve d darbeleme oranıdır [63]. Burada d görev periyodu 0-1 aralığında değişir. Farklı d değerleri için farklı çıkış gerilim değerleri elde edilebilir. Çıkış gerilimi; $d < 0.5$ ise buck (düşürücü), $d > 0.5$ olursa boost (yükseltici) olur. Buck-Boost dönüştürücünün çıkışı biraz fazla dalgalı olduğundan akım da kesintilidir [68]. Buck-Boost dönüştürücü, devresinde bulunan Mosfet transistörlerin görev döngüsünün değiştirilmesi prensibi ile sistemin ihtiyacı olan gerilimi sisteme sağlayabilmek için tasarlanmıştır.

Yapı olarak Buck-Boost dönüştürücüler mosfet transistörlere verilen görev döngüsü oranında çıkış geriliminde değişiklik yapabilmektedir. Türbin çıkışından elde edilen gerilim değişken rüzgâr hızları nedeniyle değişken olmaktadır.

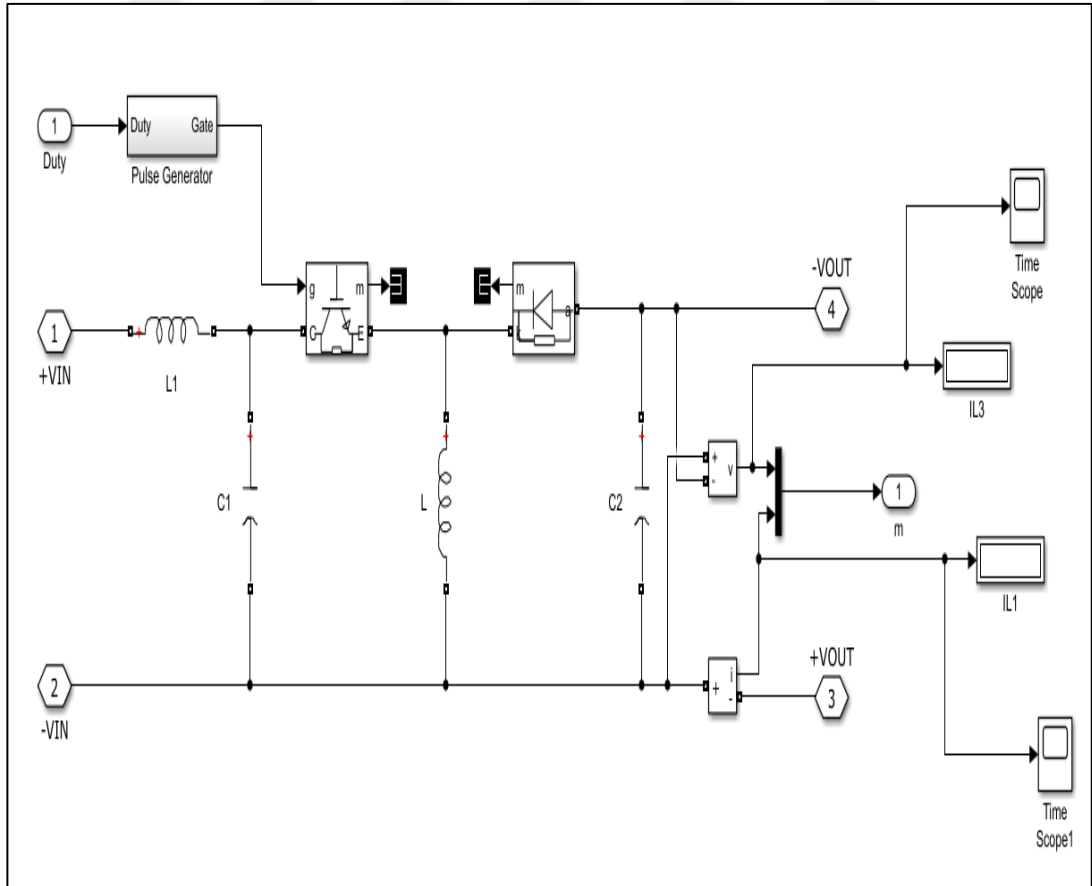
Bu aşamada devreye giren S&G algoritması daha öncede açıklandığı gibi maksimum gücün tespitini yapacaktır. Bu aşamada güç değişimleri olması nedeniyle gerilimde bazı değişiklikler olması kaçınılmazdır. Buck-Boost dönüştürücü bu aşamada gerilimin artırılması ya da azaltılması işlevini üstlenecektir.

Çıkış geriliminin artırılması ya da azaltılmasına sistemimizin karar vericisi olarak tasarlanmış olan S&G veya BMD karar verecek ve Mosfet transistörlerin görev döngüsünü sisteme gönderecektir.

Geleneksel yaklaşımda Hibrid PV-Rüzgâr sistemlerinde birden çok yenilenebilir kaynağın entegrasyonunu sağlamak için her bir kaynak için bir tane olmak üzere ve ortak bir dc baraya bağlı olan tek girişli bir DC/DC dönüştürücü kullanılmaktadır. Ancak, çok sayıda dönüştürücünün sistemde kullanılması ve kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının iklimsel değişimleri sebebiyle sistemin verimini düşük kalmaktadır [69].

Değişken rüzgâr hızlarına sahip olan rüzgâr türbinlerinde sistemin ürettiği gücü kontrol etmek için gerek maliyet gerekse batarya gereksinimleri göz önüne alındığında bir dc-dc buck / boost dönüştürücü kullanılması sistem için oldukça uygundur [70].

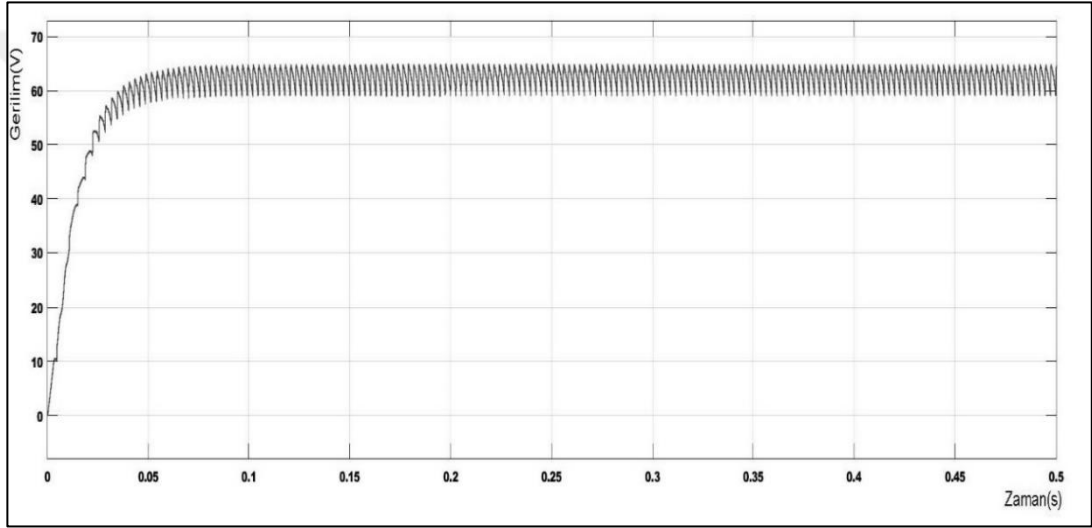
Değişken rüzgâr hızlarındaki maksimum güç noktasını en iyi şekilde tespit edebilmek amacıyla tasarladığımız sistemimizde birden çok DC/DC dönüştürücü kullanmak yerine sistem verimi göz önüne alınarak Buck-Boost dönüştürücü tercih edilmiştir. Şekil 5.5'te önerilen sistem için tasarlanmış olan Buck-Boost dönüştürücüye ait MATLAB/SIMULINK şeması görülmektedir.



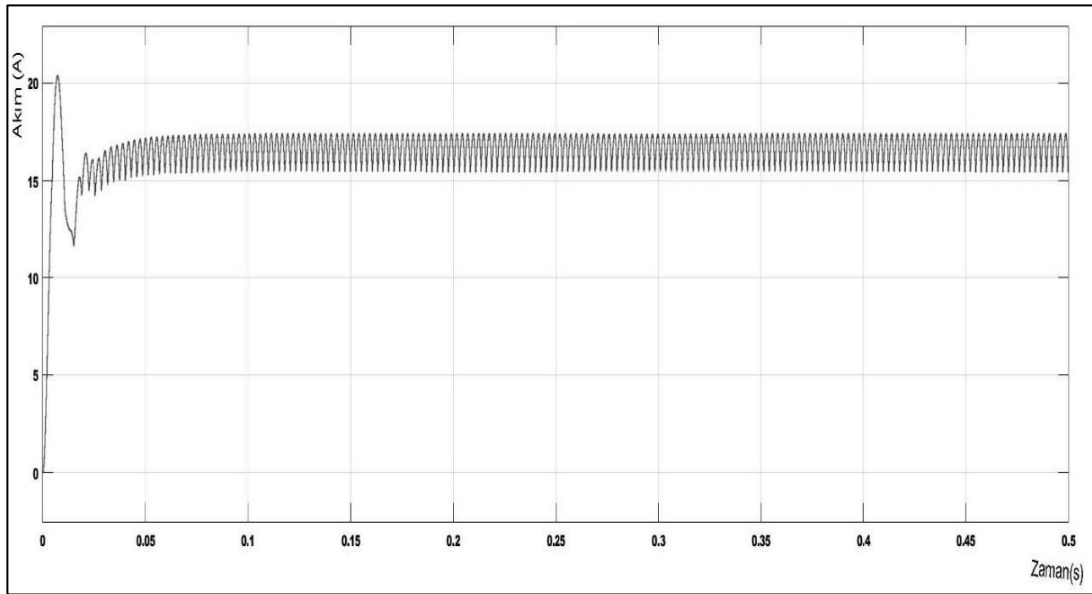
Şekil 5.5 Buck-Boost dönüştürücüye ait MATLAB/SIMULINK şeması

5.2 Bobin ve Kondansatör Hesapları

Tasarladığımız sistemde değişken rüzgâr hızları altında rüzgâr türbini çıkışından elde edilen gücü kontrol ederek MGNT yapılabilmesi ve sisteme dahil edilen batarya gruplarını şarj edebilmek amacıyla, bir buck boost dönüştürücü tasarlanmıştır. REDS sisteminde kullanılan Rüzgâr türbini, simülasyon aşamasında sisteme uygulanan 12 m/s lik hızda 1000W'lık bir nominal güç üretimine sahiptir. Türbinden üretilen gerilim Şekil 5.6.'da görüleceği üzere 0 ile 65V arasında gerilim üretmektedir. Üretilen bu gerilim değerlerine göre, ölçülen akımın Şekil 5.7.'de görüleceği üzere 17A aralığında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6 REDS gerilim çıkışı eğrisi



Şekil 5.7 REDS üretilen akım çıkışı eğrisi

Simülasyon ortamında kullanılan batarya gruplarının gerilim değeri 24V 10 Ah olarak seçilmiştir, dolayısıyla batarya grupları için en uygun şarj voltajının yaklaşık 27.6 V olduğu söylenebilir [71]. Şarj voltajını ve akımı karşılamak için voltajın gerektiğinde düşürülmesi ve yükseltilmesi gerekeceğinden, Buck Boost dönüştürücü sistemin ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir yapı olacaktır.

Buck Boost dönüştürücü tasarımı yapılırken tasarımda kullanılan elemanları hesaplayabilmek amacıyla, bazı parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreler rüzgâr türbininden gelen giriş voltajının en düşük değeri $V_{in} (min)$ ve en yüksek değeri $V_{in} (maks)$ pilleri şarj etmek için gereken çıkış voltajı V_{out} , maksimum çıkış akımı $I_{out} (maks)$ ve kullanılan MOSFET'lerin frekansı (f_s) olarak sıralanabilir. Bu parametreler, Buck Boost dönüştürücü tasarımında kullanılacak bobin ve kondansatörün değerlerini belirleyecektir. Tablo 5.1., Rüzgâr Türbini Giriş ve Çıkış Parametreleri değerlerini göstermektedir.

Tablo 5.1. REDS giriş ve çıkış parametreleri

Rüzgâr Türbini Gücü	1000 W
V_{in}	65 V
I_{in}	17 A
V_{out}	27.6 V
f_s	62.5 kHz
$I_{out} (maks)$	15 A
ΔV_{out}	0.2 V

Denklem (5.6), ihtiyaç duyulan minimum bobin boyutu için yapılan hesaplamaları göstermektedir.

$$L = \frac{V_{out} \times (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L \times f_s \times V_{in}} \quad (5.6)$$

ΔI_L , bobin dalgalanma akımıdır; bobin değeri bilinmediğinden dalgalanma akımı hesaplanabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle Denklem (5.7)'de de görüleceği üzere, bobin dalgalanma akımı için çıkış akımının %20'si ile %40'ı arasında bir değer seçilmesi uygun görülmüştür.

$$\Delta I_L = (0.2 \text{ ila } 0.4) \times I_{out(max)} \quad (5.7)$$

Sistemimizde tasarlanan buck boost konvertörün, anahtarlama işlemlerinden dolayı çıkışında oluşacak dalgalanmayı stabilize etmek amacıyla çıkışa eklenen kondansatörün hesapları Denklem (5.8)'de gösterilmiştir. Denklemde ΔV_{out} değeri $V_{out(max)}$ değerinin %20'si olarak seçilmiştir [72].

$$C_{out} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_s \times \Delta V_{out}} \quad (5.8)$$

Denklem (5.9)'da Rüzgâr türbinine ait veriler yerlerine yazılarak Buck Boost dönüştürücüye ait bobin değeri hesaplanmıştır. Aynı şekilde Denklem (5.10)'de Rüzgâr türbinine ait veriler yerlerine yazılarak Buck Boost dönüştürücüye ait kondansatör değeri hesaplanmıştır.

$$L = \frac{27,6 \times (65 - 27,6)}{(0,3 \times 17) \times 62500 \times 65} = 49 \mu H \quad (5.9)$$

$$C = \frac{0,3 \times 17,6}{8 \times 62500 \times 0,2} = 528 \mu F \quad (5.10)$$

5.3 Doğrultma Diyodu Hesapları

Buck Boost konvertör tasarımında oluşabilecek kayıpları azaltmak amacıyla Schottky diyot tercih edilmiştir. Denklem (5.11) ve Denklem (5.12)'de Schottky diyoda ait akım ve dolayısıyla güç bilgisine temel oluşturacak maksimum görev döngüsü değerine (d) formül görülmektedir. Formüldeki (η) değeri buck boost konvertörün verimidir ve yaklaşık olarak %90 alınmıştır.

$$d = \frac{V_{out}}{V_{in(max)} \times \eta} \quad (5.11)$$

$$d = \frac{27,6}{65 \times 0,90} = 0,47 \quad (5.12)$$

Denklem (5.13) ve Denklem (5.14)' te görüldüğü üzere Schottky diyoda ait akım değeri (I_F), maksimum çıkış akımı ($I_{Out(Max)}$) değerine ve görev döngüsü sinyaline bağlı olacaktır.

$$I_F = (I_{Out(Max)}) \times (1 - d) \quad (5.13)$$

$$I_F = (15 \times (1 - 0,47)) = 7,95 A \quad (5.14)$$

Hesaplanması gereken diğer bir parametre, diyotun güç değeri (P_D) olacaktır. Denklem (5.15) ve Denklem (5.16)'da Schottky diyoda ait güç hesabına ait denklem görüldüğü gibi güç değeri akıma (I_F), ve Schottky diyoda ait gerilim değerine (V_F) bağlıdır.

$$P_D = (I_F) \times (V_F) \quad (5.15)$$

$$P_D = (7,95) \times (27,6) = 219,42 W \quad (5.16)$$

6. ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ

REDS'ten üretilen enerji değişken rüzgâr hızları nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Hava şartlarının değişkenlik gösterdiği sistemlerde güç arzını sürekli tutabilmek için bir enerji yönetim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [73].Sabit bir omik yükü besleyen sistemimizde yükün sürekli olarak beslenmesi prensibi üzerinde durulmuştur. Bu amaç doğrultusunda sistemimize batarya grupları dahil edilmiştir. Bu sayede rüzgârın olmadığı durumlarda batarya sistemi devreye girerek yükün enerjisiz kalması engellenmiştir.

Üretilen enerjinin yükün ihtiyacından fazla olması durumunda batarya gruplarının şarj edilmesi enerji yönetim sistemiyle sağlanmıştır. Bu sayede sistemde enerji kesintisinin önüne geçilerek sistemin sürekli enerjili kalması sağlanmıştır. Üretilen enerjinin besleme yüküne ne oranda yettiği ve batarya gruplarının hangi durumlarda şarj edileceğine tasarlanmış olduğumuz enerji yönetim sistemi karar verecektir.

Sistemde rüzgâr esmemesi ve enerji kesintisi olması durumunda enerji yönetim algoritması rüzgâr türbini çıkışlarından alınan enerji çıkışlarını kapatarak sistemin besleme noktasını batarya gruplarına çevirecektir.

Tam tersi durumda sistemin ihtiyacından fazla üretilen enerji olması durumunda ise enerji yönetim algoritması bataryaların şarj edilmesine karar vererek üretilen fazla enerjinin bataryalarda depolanmasına imkân sağlayacaktır.

REDS ten gelen güç bilgisi, akım ve gerilim seviyelerinin simülasyon tabanında anlık olarak ölçülmesiyle belirlenir. Genel olarak bataryayı sürekli olarak gereğinden az ya da fazla şarj etmek batarya ömrünü olumsuz olarak etkileyecektir.

Rüzgâr hızının değişken olduğu sistemlerde batarya ömrünü uzatmak ve enerji verimliliğini sağlamak amacıyla bataryanın hangi şartlarda şarj edileceğine karar verecek bir sistem tasarımında bulanık mantık uygulamaları klasik kontrol yöntemlerine göre daha verimli olabilmektedir [74].Sabit bir omik yük kullandığımız sistemimizde yükte harcanan güç bilgisinin de sisteme dahil edilmesi gerekmektedir.

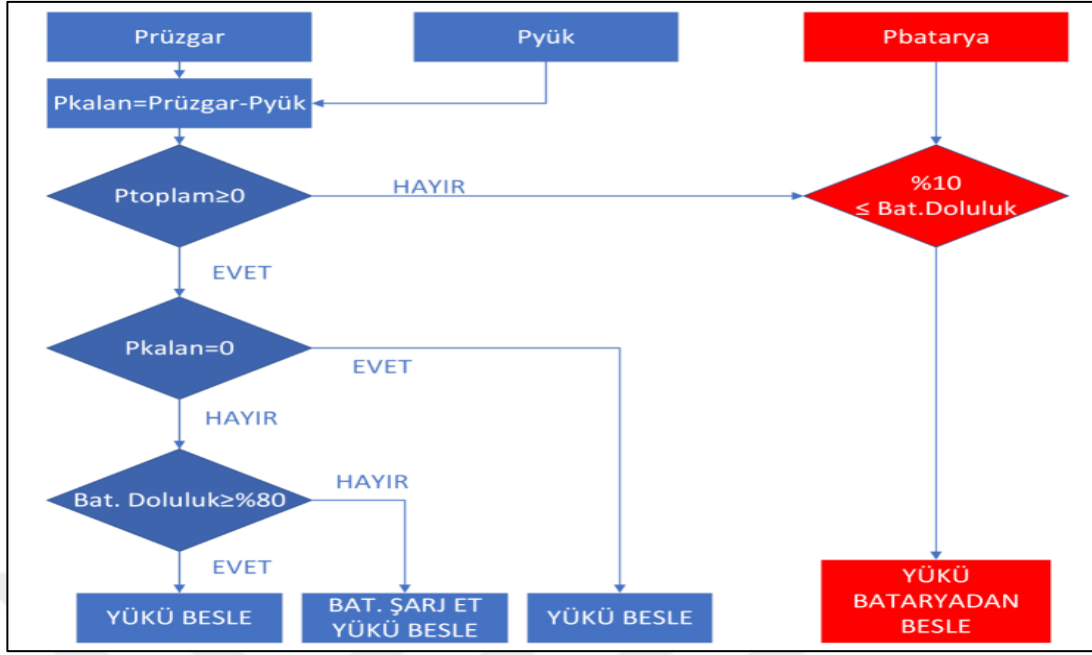
Toplam üretilen gücün çıkış yükümüzde harcanan güçten çıkartılmasıyla P_{kalan} elde edilmiştir. P_{kalan} sıfırdan büyük ve batarya doluluk oranı %80 den büyükse yüke gerilim uygulanır. Eğer şarj seviyesi %80 den küçükse; sisteme bataryaların şarj edilmesi emri verilir ve yük beslenirken aynı zamanda bataryalar şarj edilir. Toplam üretilen gücün çıkış yükümüzde harcanan güçten çıkartılmasıyla P_{kalan} elde edilmiştir. P_{kalan} sıfırdan büyük ve batarya doluluk oranı %80 den büyükse yüke gerilim uygulanır. Eğer şarj seviyesi %80 den küçükse; sisteme bataryaların şarj edilmesi emri verilir ve yük beslenirken aynı zamanda bataryalar şarj edilir.

P_{kalan} 'ın sıfıra eşit olması durumunda yükün doğrudan REDS çıkışından beslenmesi emri sisteme verilir. Sistemde rüzgârın olmadığı durumlar da düşünülerek enerji yönetim algoritması bu yönde şekillendirilmiştir. Sistem çıkışında bulunan yükün enerji yönetim sistemi sayesinde sürekli olarak enerjili kalması sağlanmış ve ortamda rüzgâr olmaması durumunda yükün bataryadan beslenmesi sağlanarak kesintisiz enerji arzı sağlamıştır. Şebeke bağlantısı bulunmayan bölgelerde enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla tercih sebebi olan küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken konulardan biri de tesisin bulunduğu bölgede rüzgâr esmediği durumlarda tesisin enerji ihtiyacının hangi yolla karşılanacağı olmaktadır.

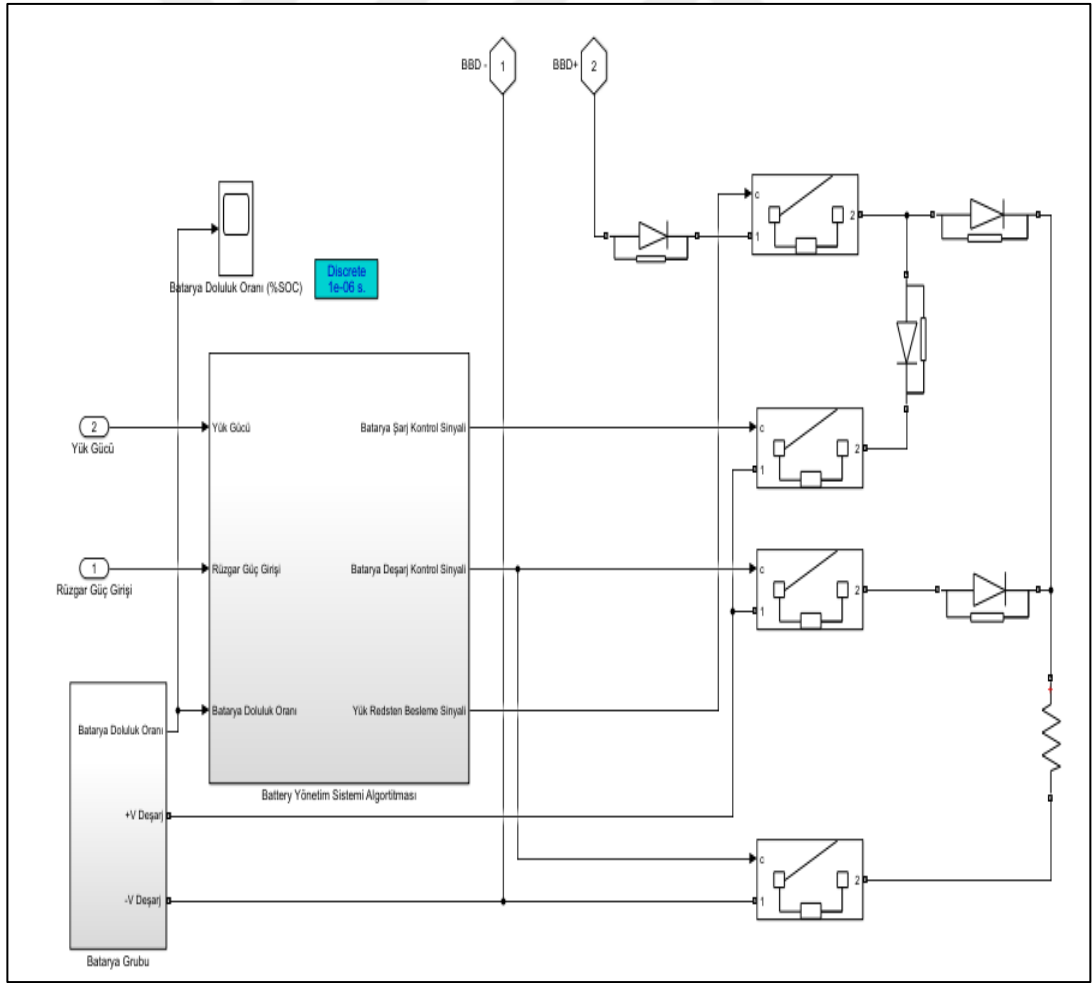
Tasarladığımız EYS ile enerji kesintisinin önüne geçilmesi ve sistemin sürekli enerjili kalması amaçlanmaktadır. MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış simülasyonun üretmiş olduğu verilere dayanarak enerji yönetim sisteminin çıkış yükünün sürekli enerjili kalabilmesi için çıkışlar ürettiği görülebilmektedir.

REDS çıkışlarından, yük üzerinden ve batarya üzerinden alınan akım, gerilim dolayısıyla güç bilgileri sistemin girdilerini oluşturmaktadır. Sistem çalışmaya devam ettikçe oluşan değişikliklere göre enerji yönetim algoritması karar sürecine girmektedir.

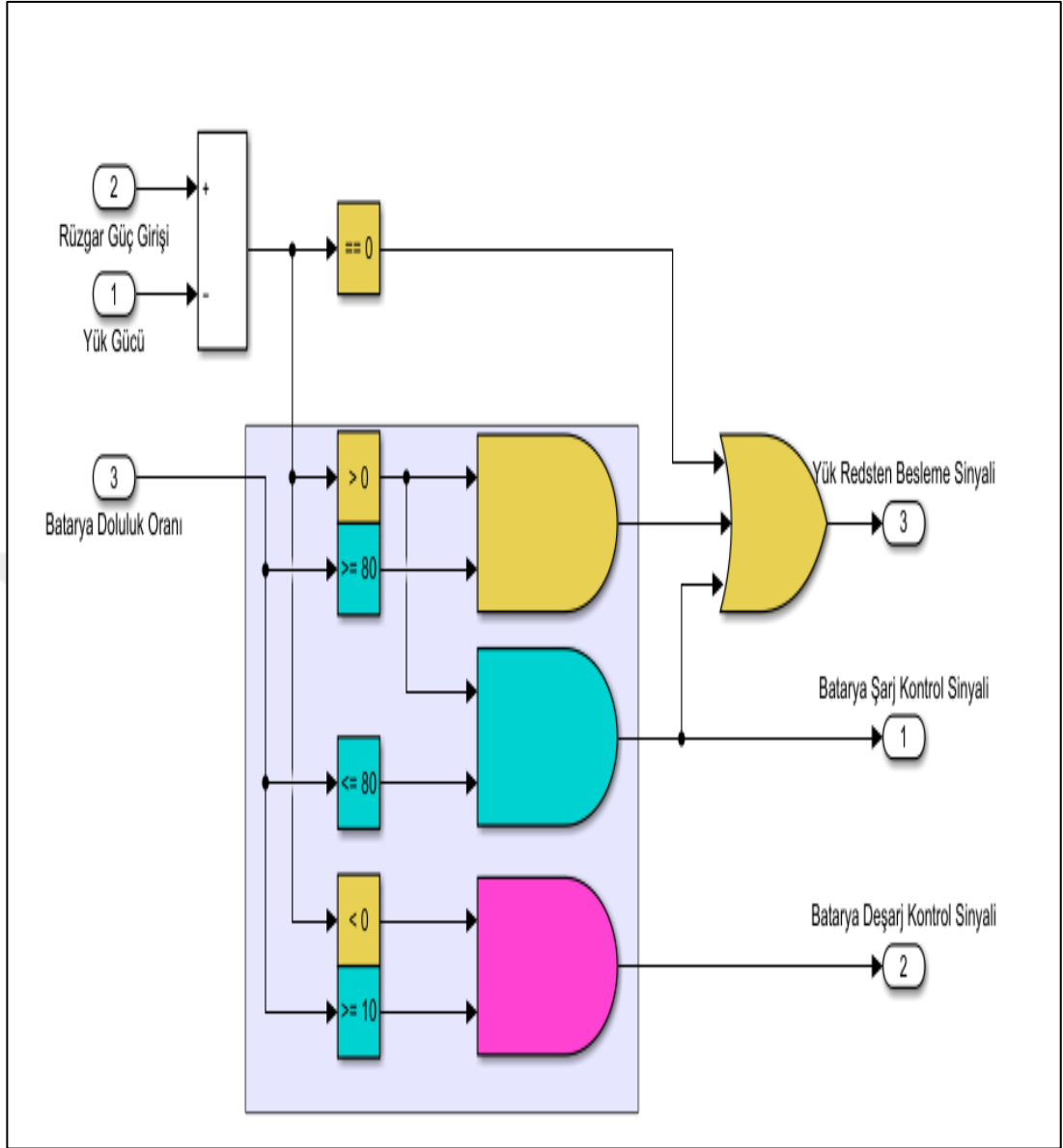
Şekil 6.1.'de enerji yönetim sistemine ait akış şeması görülmektedir. Şekil 6.2.'de ise Enerji Yönetim Sistemine ait MATLAB/SIMULINK Modeli görülmektedir. Enerji yönetim sistemine ait akış şemasının MATLAB/SIMULINK ortamında uygulanmış modeli Şekil 6.3.' te görülmektedir.



Şekil 6.1 Enerji yönetim algoritması



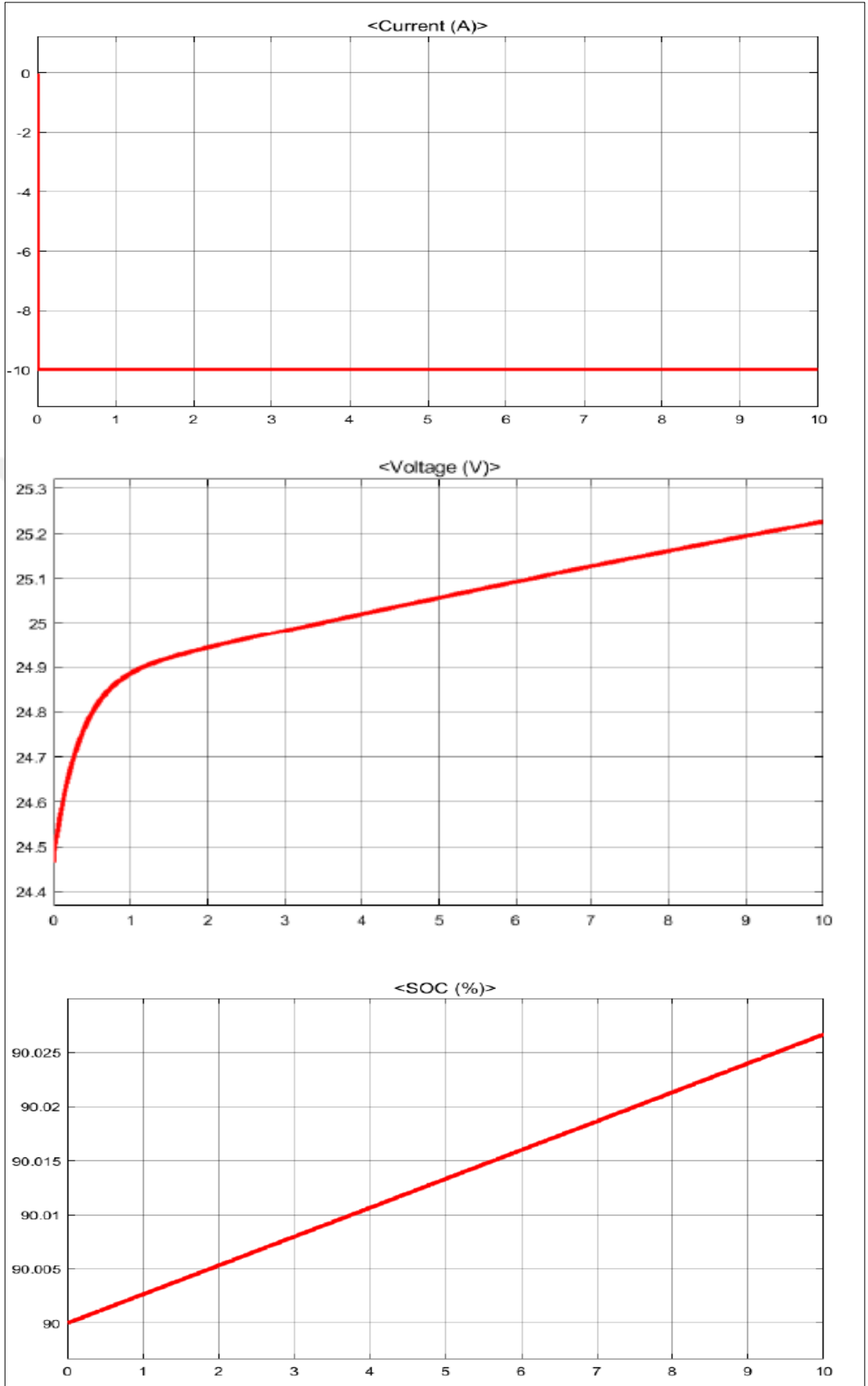
Şekil 6.2 MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış EYS modeli



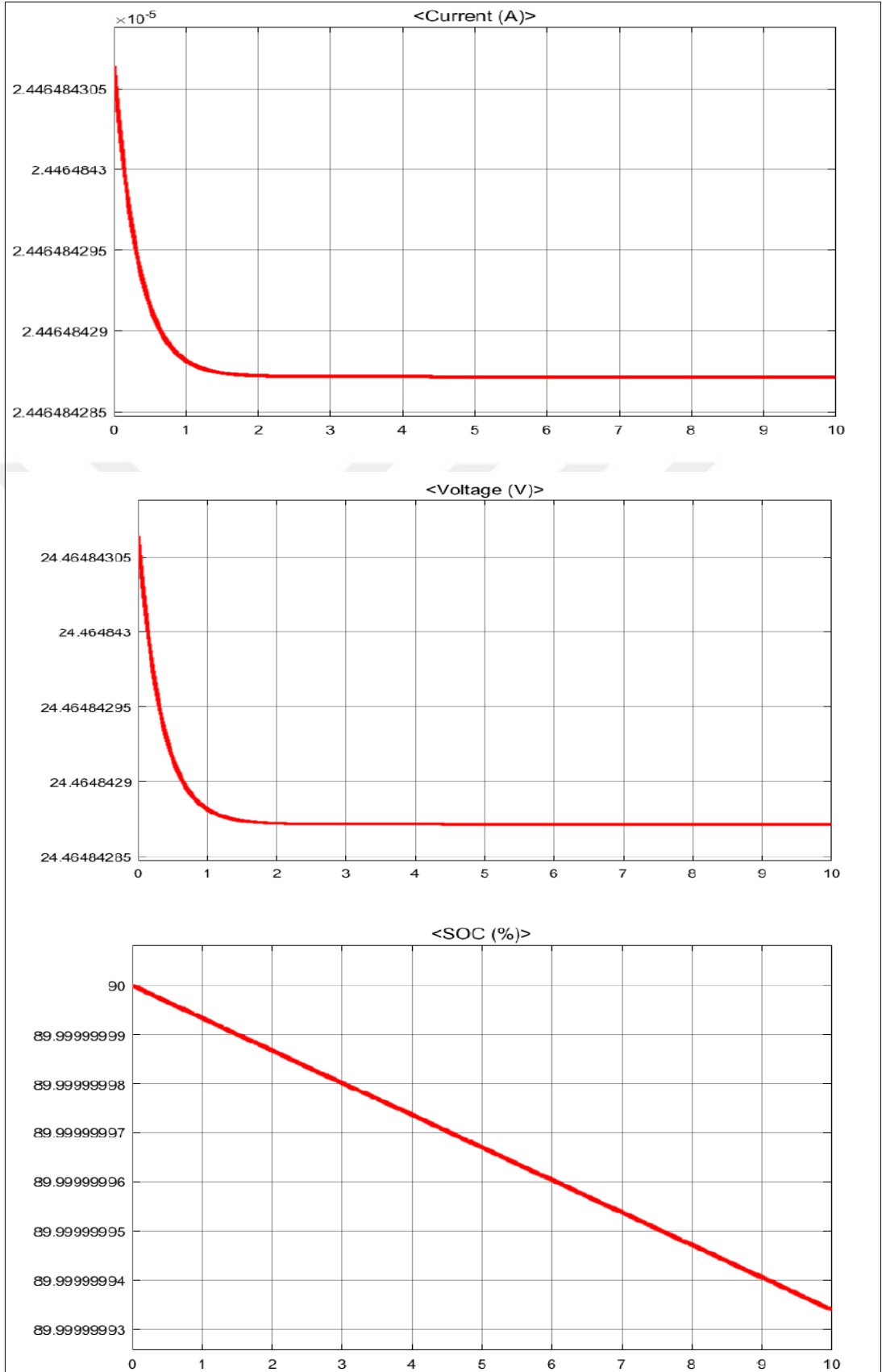
Şekil 6.3. Enerji yönetim algoritması MATLAB/SIMULINK modeli

Sistem çalışmaya devam ettikçe oluşan değişikliklere göre enerji yönetim algoritması karar sürecine girmektedir. Bataryaların hangi aşamada şarj edileceğine ve yükün enerji ihtiyacı olduğunda hangi şartlarda bataryalardan enerji talep edileceğine enerji yönetim algoritması karar vererek bataryaların şarj ya da deşarj durumuna karar verecektir.

Batarya simülasyon aşamasında 24V 10 Ah kurşun asit olarak seçilmiştir. Seçilen bataryanın şarj gerilimi 27.6 V'tur. Şekil 6.4.'te enerji yönetim sistemine bağlı olarak şarj durumunda iken batarya davranışları, Şekil 6.5.'te ise enerji yönetim sistemine bağlı olarak deşarj durumunda iken batarya davranışları görülebilmektedir.



Şekil 6.4 Şarj durumunda batarya davranışları



Şekil 6.5. Deşarj durumunda batarya davranışları

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında; rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişimi, Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisinin durumu incelenmiştir. Rüzgâr hızını etkileyen, yükseklik, pürüzlülük, türbülans, iz etkisi, tünel etkisi detaylı olarak anlatılmıştır. Rüzgâr enerjisi eşitliği, hava yoğunluğu hesabı, rüzgâr türbini modelleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca Saptır ve Gözle (S&G) ile Bulanık Mantık Denetleyicileri (BMD) yapıları detaylıca anlatılarak Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) uygulamaları irdelenmiştir. Sisteme entegre edilmiş olan Enerji Yönetim Sistemi (EYS) sayesinde sistem çıkışına bağlı bulunan sabit omik yükün sürekli olarak enerjili kalması sağlanmıştır. EYS sayesinde sistemin enerjisiz kalması riskine karşı önlem alınmıştır. Batarya doluluk düzeylerine ait grafikler Şekil 6.4.-6.5. te paylaşılarak bataryaların önerilen EYS’ye uyumlu çalıştığı gözlenmiştir. Üretilen gücün rüzgâr hızlarındaki değişime bağlı olarak farklılık gösterecek olmasından dolayı, sistem çıkışındaki yüke bağlı olarak batarya gruplarının şarj edilme oranı değişecektir. Değişken rüzgâr hızlarında KMSG çıkış gücüne göre BMD ve S&G uygulamaları çıkışları karşılaştırılmış ve sonuçları aşağıda detaylıca incelenmiştir. Rüzgâr hızları simülasyon aşamasında sırasıyla 6 m/s,8 m/s,10m/s,11m/s ve 12m/s olarak seçilmiştir. Bu sayede saha koşulları oluşturulmaya çalışılarak, değişken rüzgâr hızları altında benzetimi yapılan Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sisteminin (REDS) her iki algoritma altında davranışları gözlenmiştir. REDS girişinde kullanılan Kalıcı Mıknatıslı Senkron Genaratör (KMSG) gücü 12m/s lik hızda 1000 W’lık güç üretme kapasitesine ve sabit yük altında 65 V 17 A üretecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede sistem çıkışına uygulanan algoritmalar vasıtasıyla değişken rüzgâr hızlarındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları ayrı ayrı gözlenmiş ve her iki algoritmanın karşılaştırılmaları yapılabilmektedir. Yapılan simülasyon çalışmasında sisteme uygulanan değişken hızlarda KMSG çıkışından alınan güç değerleri farklılık göstermesine rağmen sistemin tasarımında kullanılan S&G ve BMD MGNT algoritmalarının maksimum güç noktalarını belirli bir noktada yakalayabildiği görülmektedir. Şekil 7.1.-7.21.’de farklı rüzgâr hızlarındaki KMSG çıkışlarında önerilen algoritmaların davranışları ayrı ayrı görülebilmektedir.

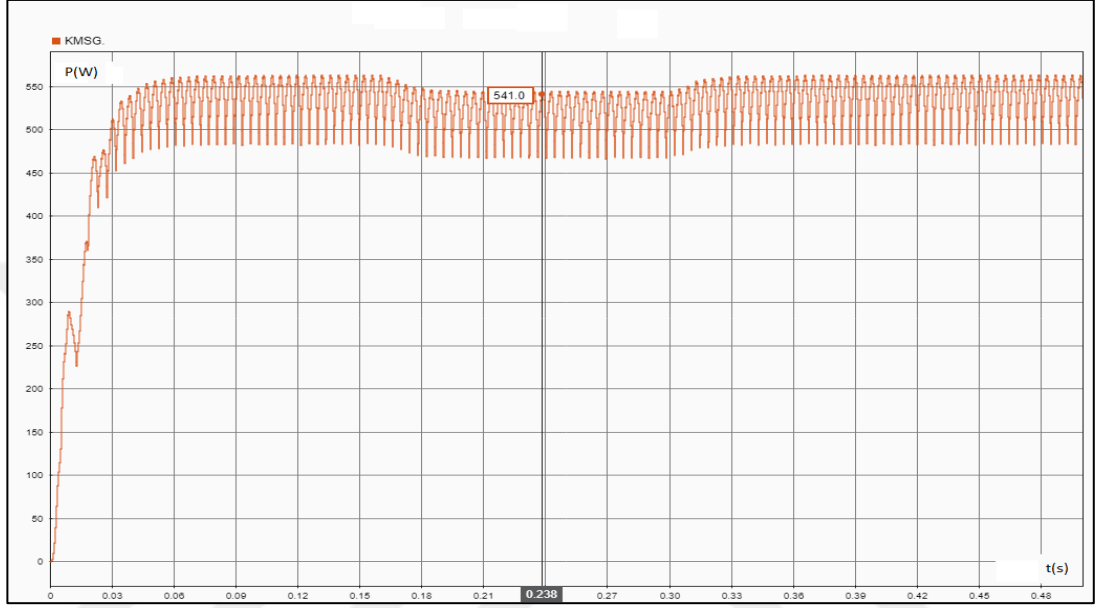
Yapılan simülasyon çalışmasının sonunda, BMD algoritmasının uygulandığı andaki sistemdeki güç çıkışının aynı anda S&G algoritmasının uygulandığı ana göre maksimum gücü daha yüksek bir noktada yakalayabildiği gözlenmektedir. BMD algoritmasının kural tablosuna bağlı olarak algoritmaya tanıtılmış olan kuralları verimli bir şekilde kullandığı ve görece S&G algoritmasından daha verimli bir takip yapabildiği görülmüştür. Şekil 7.1-7.21.'de her hız değeri için ayrı ayrı olmak üzere KMSG gücü, BMD, S&G algoritmalarındaki güç değerleri irdelenmiş ve BMD ve S&G algoritmalarını hangi oranda MGNT yapabildiği gösterilmiştir. Her rüzgâr hızı için yapılan çalışmalar sonrasında, şebekeye uzak bölgelerde kurulması planlanan tesisler için düşünülen yapılarda BMD algoritmalarını içeren MGNT kontrolörlerinin kullanılmasının daha avantajlı olacağı öngörülmektedir. Simülasyon sonuçlarının gösterdiği üzere sisteme verilen her rüzgâr hızında sistem cevap vermekte ancak BMD algoritması daha iyi sonuçlar vermektedir. Sisteme dahil edilen batarya grupları ve EYS sayesinde batarya doluluk oranları anlık olarak izlenerek sistem çıkışına bağlı olan yükün sürekli olarak enerjili kalması sağlanabilmiştir. Önerilen sistem sayesinde verimli ve enerji arzının sürekli olacağı bir sistem simülasyonu yapılmıştır.

7.1. 6 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi

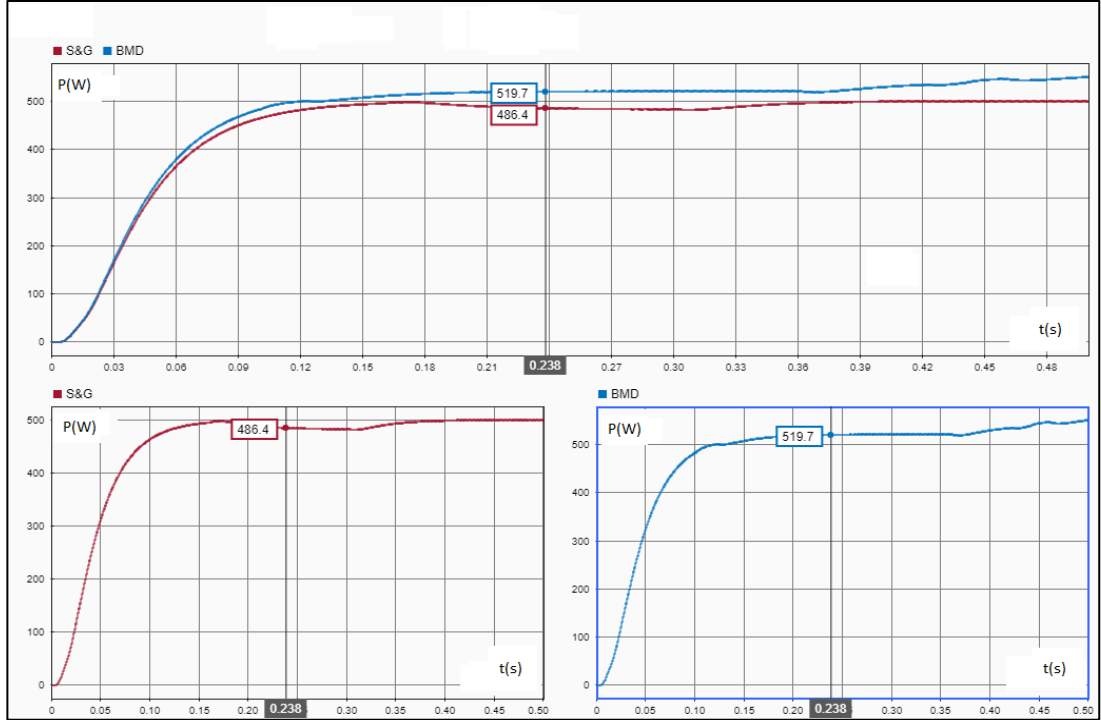
Şekil 7.1' de 6 m/s rüzgâr hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç görülmektedir. Şekildeki verilere bakıldığında anılan rüzgâr hızında KMSG'nin 460-560 W civarında sürekli değişen seviyelerde güç üretebildiği saptanmıştır. Bu aşamada devreye alınan ve MGNT yapması beklenen S&G ve BMD algoritmalarının davranışları Şekil 7.2.'de görülebilmektedir. Şekil 7.3.'de KMSG, S&G ve BMD algoritmalarının davranışları incelendiğinde simülasyonun 0.2'nci saniyesinde KMSG'nin yaklaşık 541 W güç üretmiş olduğu seviyede BMD algoritmasının maksimum güç noktası takibini 519.7 W seviyesinde gerçekleştirirken S&G algoritmasının ise 486.4 W seviyesinde maksimum güç takibi yapabildiği görülebilmektedir. Elde edilen veriler analiz edildiğinde her iki algoritmanın da MGNT işlemini verimli bir şekilde yapabildiği ancak BMD algoritmasının, S&G algoritmasına oranla net bir şekilde daha yüksek seviyede MGNT yapabildiği saptanmıştır.

Tablo 7.1.'de 6 m/s hızı baz alınarak KMSG'nin üretmiş olduğu güç değerleri ve S&G ile BMD algoritmalarının ayrı ayrı sisteme uygulanması sonucu üretilen güçler görülmektedir.

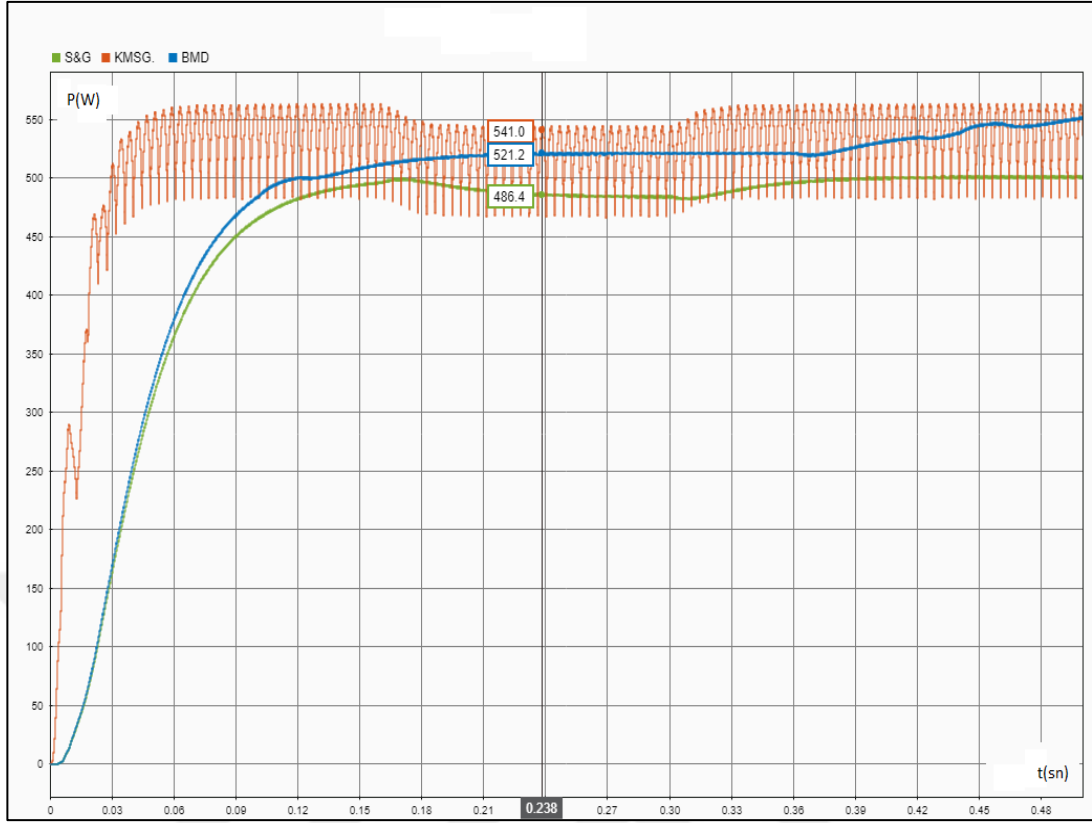
Şekil 7.4.'de KMSG'de üretilen güç ile S&G ile BMD algoritmalarının uygulanması sonucu üretilen güç grafik olarak gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde BMD algoritmasının %7 oranında daha yüksek bir seviyede MGNT yapabildiği görülmüştür. 6 m/s hızı için düşünüldüğünde tasarladığımız sistem için BMD algoritmasının kullanılması MGNT açısından daha verimli görünmektedir.



Şekil 7.1. 6 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç



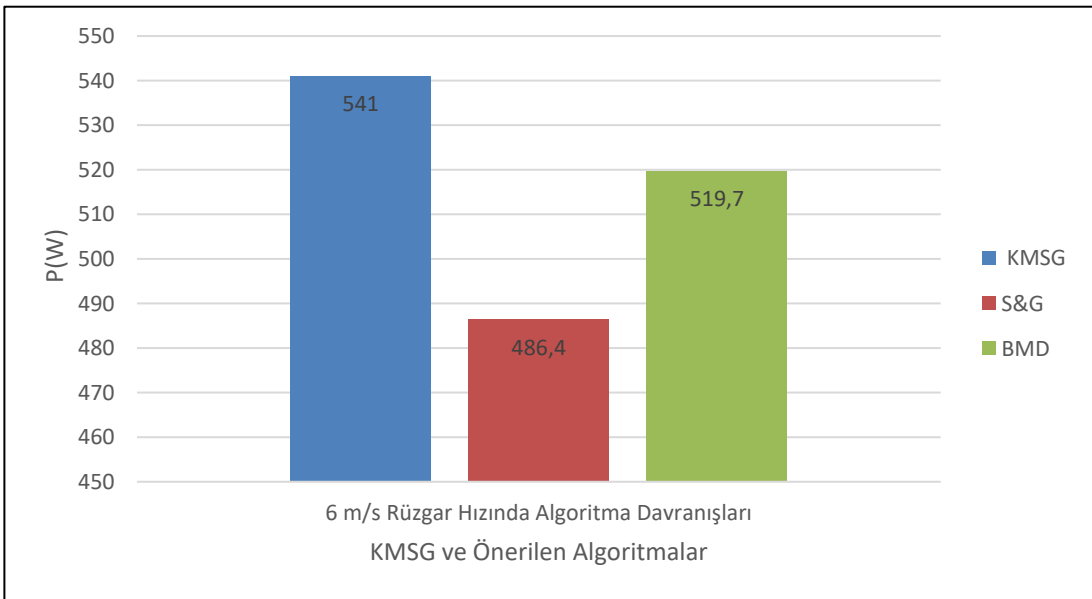
Şekil 7.2. 6 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları



Şekil 7.3. 6 m/s hızındaki KMSG-S&G ve BMD algoritmalarının karşılaştırılması

Tablo 7.1. 6 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları

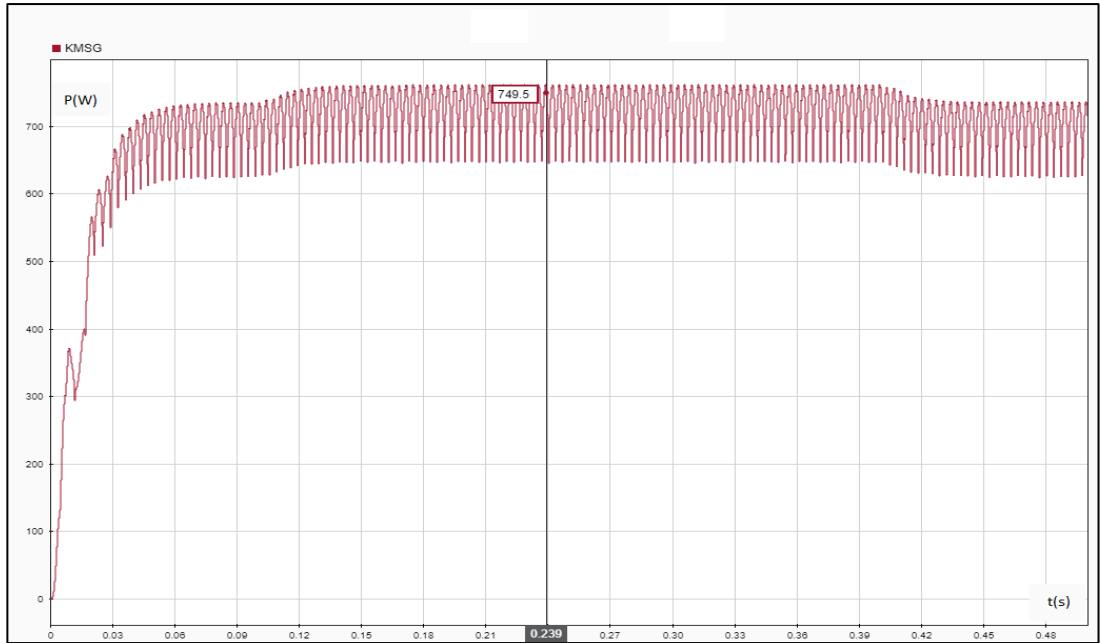
Rüzgâr Hızı	Değişken Rüzgâr Hızında KMSG-S&G-BMD Algoritmalarının Karşılaştırılması		
	KMSG (W)	S&G(W)	BMD(W)
6 m/s	541	486.4	519.7



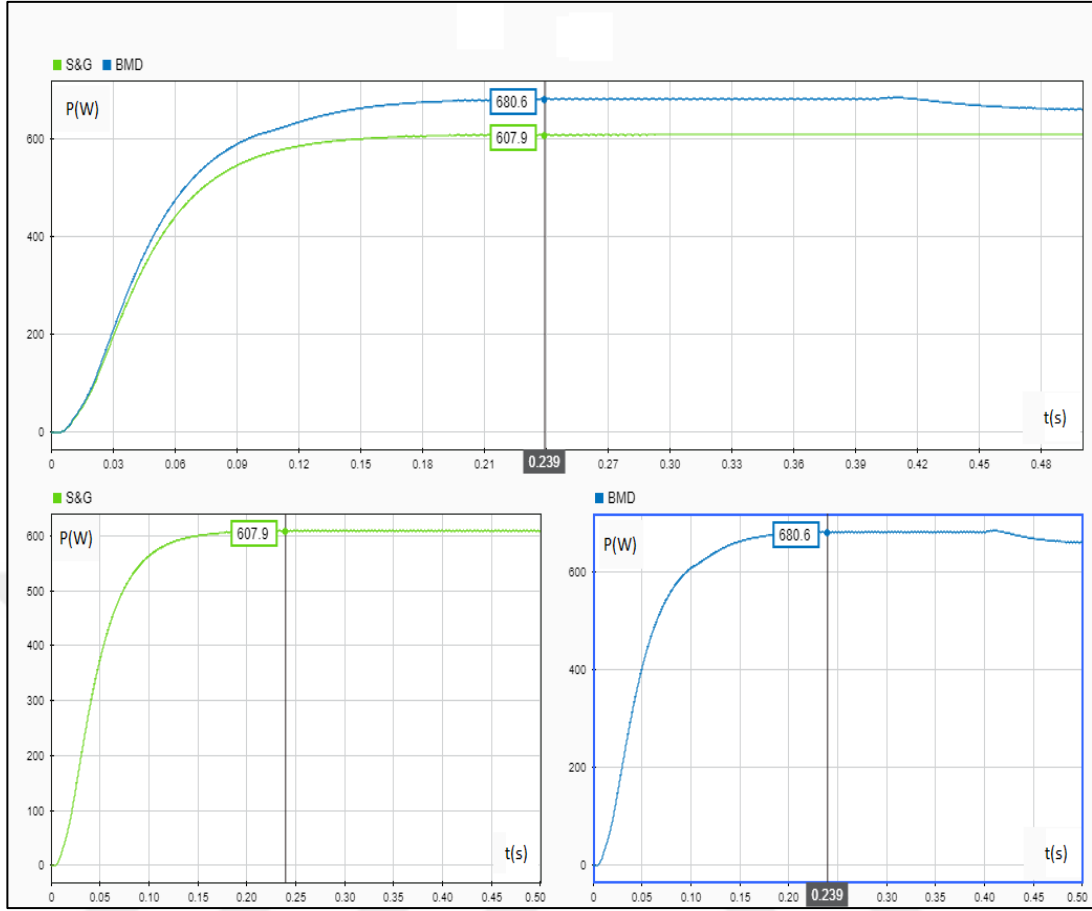
Şekil 7.4. 6 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması

7.2. 8 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi

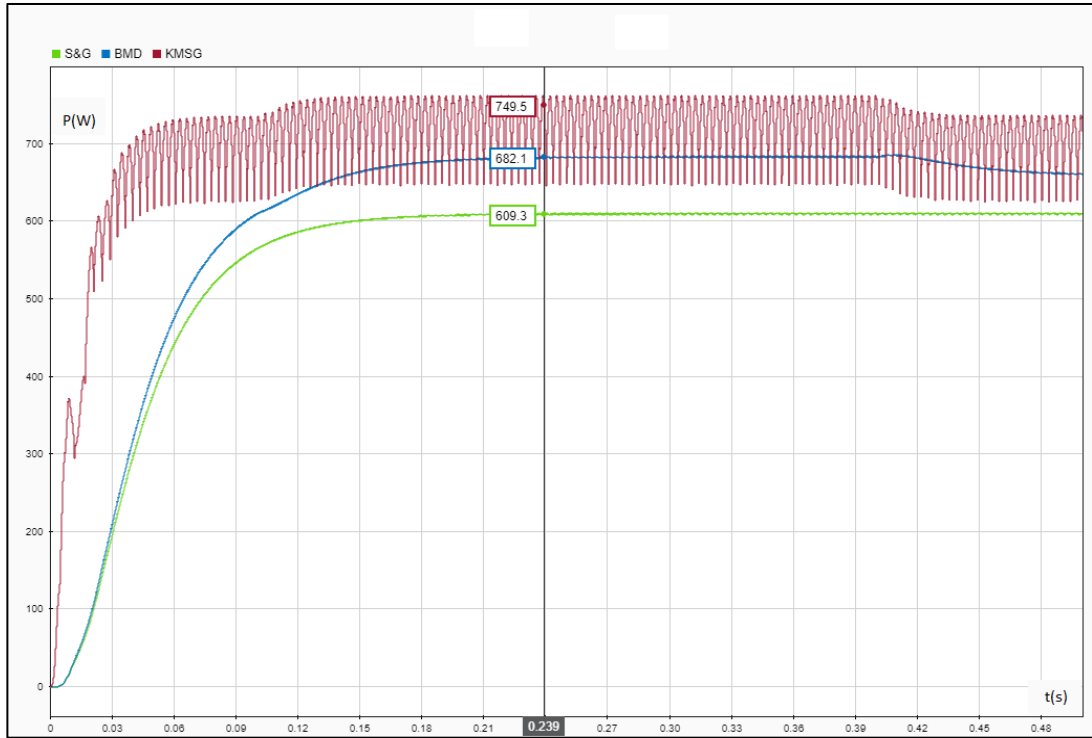
Şekil 7.5.' te 8 m/s rüzgâr hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç görülmektedir. Şekildeki verilere bakıldığında anılan rüzgâr hızında KMSG'nin 650-750 W civarında sürekli değişen seviyelerde güç üretebildiği saptanmıştır. Bu aşamada devreye alınan ve MGNT yapması beklenen S&G ve BMD algoritmalarının davranışları Şekil 7.6.'da görülebilmektedir. Şekil 7.7.'de KMSG, S&G ve BMD algoritmalarının davranışları incelendiğinde simülasyonun 0.2'nci saniyesinde KMSG'nin yaklaşık 749.5 W güç üretmiş olduğu seviyede BMD algoritmasının maksimum güç noktası takibini 682.1 W seviyesinde gerçekleştirirken S&G algoritmasının ise 609.3 W seviyesinde maksimum güç takibi yapabildiği görülebilmektedir. Elde edilen veriler analiz edildiğinde her iki algoritmanın da MGNT işlemini verimli bir şekilde yapabildiği ancak BMD algoritmasının, S&G algoritmasına oranla net bir şekilde daha yüksek seviyede MGNT yapabildiği saptanmıştır. Tablo 7.2.'de 8 m/s hızı baz alınarak KMSG'nin ürettiği güç değerleri ve S&G ile BMD algoritmalarının ayrı ayrı sisteme uygulanması sonucu üretilen güçler görülmektedir. Şekil 7.8'.de KMSG'de üretilen güç ile S&G ile BMD algoritmalarının uygulanması sonucu üretilen güç grafik olarak gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde BMD algoritmasının %10 oranında daha yüksek bir seviyede MGNT yapabildiği görülmüştür. 8 m/s hızı için düşünüldüğünde tasarladığımız sistem için BMD algoritmasının kullanılması MGNT açısından daha verimli görünmektedir.



Şekil 7.5. 8 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç



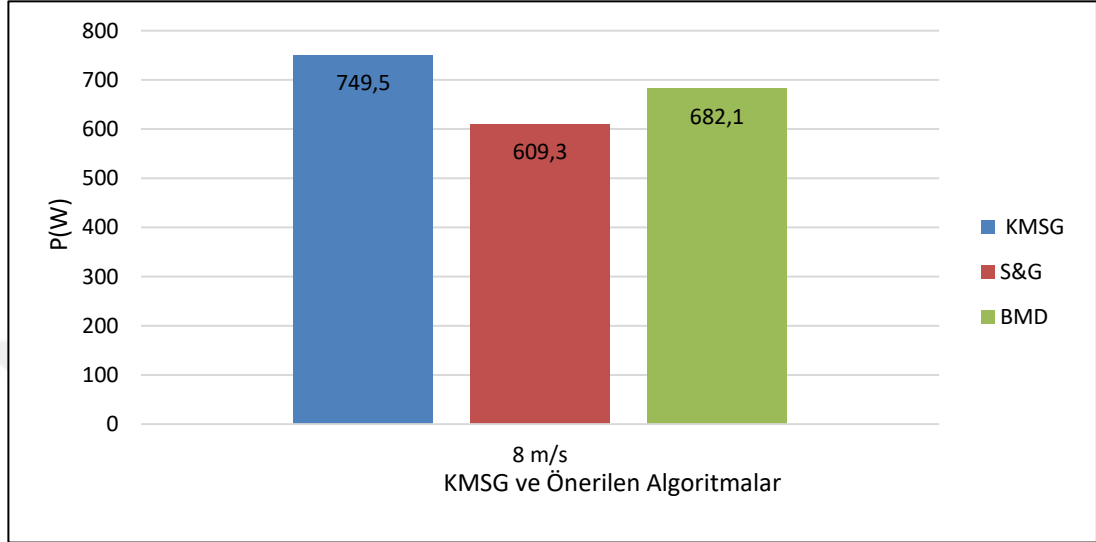
Şekil 7.6. 8 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları



Şekil 7.7. 8 m/s hızındaki KMSG-S&G ve BMD algoritmalarının karşılaştırılması

Tablo 7.2. 8 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları

Rüzgâr Hızı	Değişken Rüzgâr Hızında KMSG-S&G-BMD Algoritmalarının Karşılaştırılması		
	KMSG (W)	S&G(W)	BMD(W)
8 m/s	749.5	609.3	682.1

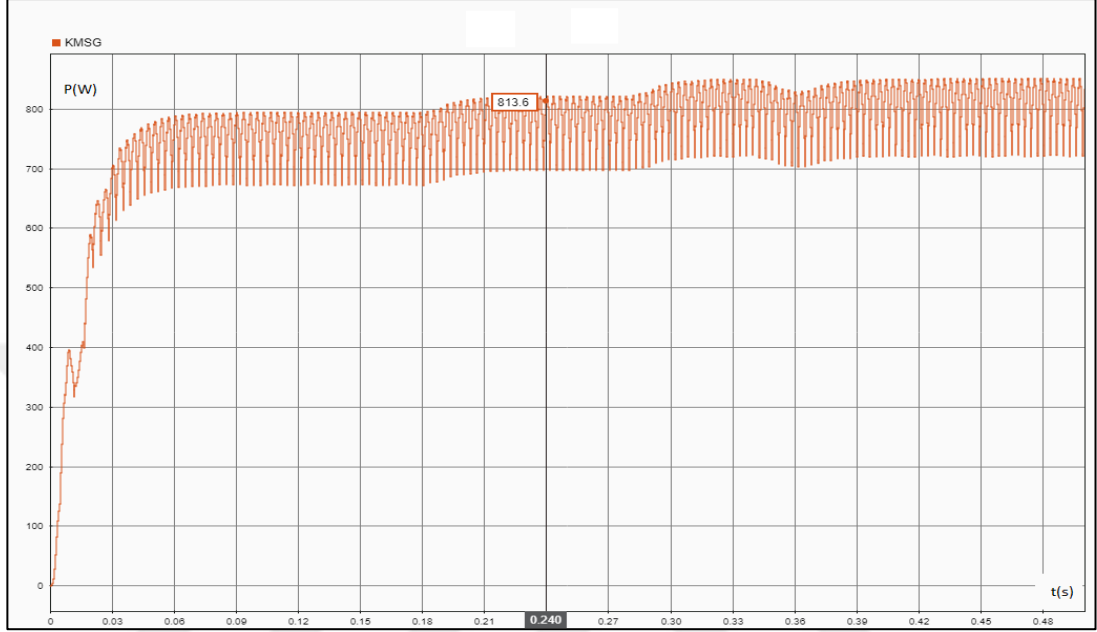


Şekil 7.8. 8 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması

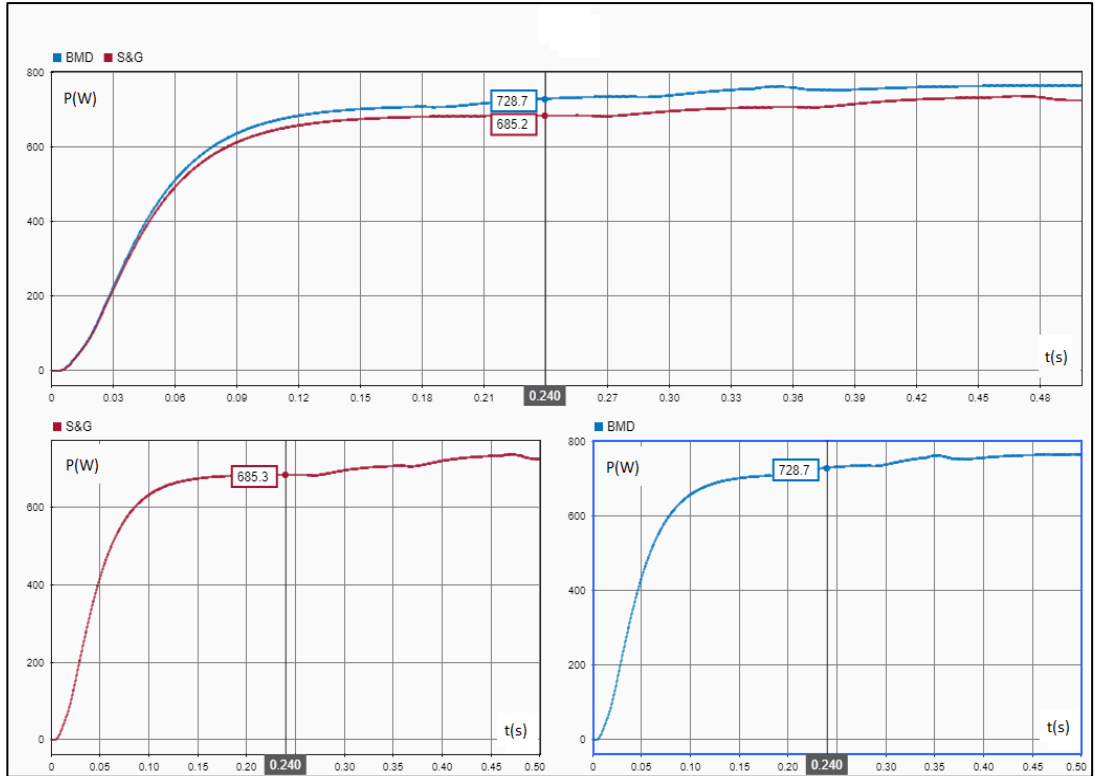
7.3. 10 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi

Şekil 7.9.' da 10 m/s rüzgâr hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç görülmektedir. Şekildeki verilere bakıldığında anılan rüzgâr hızında KMSG'nin 650-850 W civarında sürekli değişen seviyelerde güç üretebildiği saptanmıştır. Bu aşamada devreye alınan ve MGNT yapması beklenen S&G ve BMD algoritmalarının davranışları Şekil 7.10.'da görülebilmektedir. Şekil 7.11.'de KMSG, S&G ve BMD algoritmalarının davranışları incelendiğinde simülasyonun 0.2'nci saniyesinde KMSG'nin yaklaşık 813.6 W güç üretmiş olduğu seviyede BMD algoritmasının maksimum güç noktası takibini 730.2 W seviyesinde gerçekleştirirken S&G algoritmasının ise 684.6 W seviyesinde maksimum güç takibi yapabildiği görülebilmektedir. Elde edilen veriler analiz edildiğinde her iki algoritmanın da MGNT işlemini verimli bir şekilde yapabildiği ancak BMD algoritmasının, S&G algoritmasına oranla net bir şekilde daha yüksek seviyede MGT yapabildiği saptanmıştır. Tablo 7.3.'te 10 m/s hızı baz alınarak KMSG' nin ürettiği güç değerleri ve S&G ile BMD algoritmalarının ayrı ayrı sisteme uygulanması sonucu üretilen güçler görülmektedir. Şekil 7.12.'de KMSG' de üretilen güç ile S&G ile BMD algoritmalarının uygulanması sonucu üretilen güç grafik olarak gösterilmiştir.

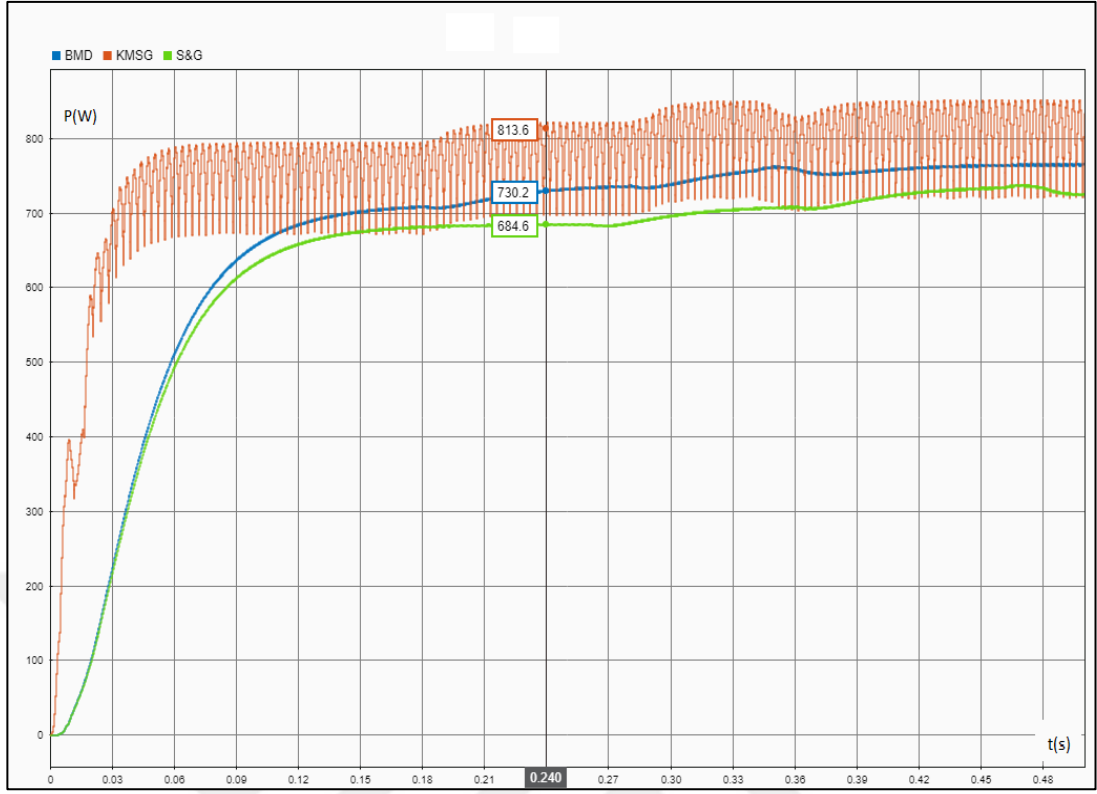
Veriler incelendiğinde BMD algoritmasının %5 oranında daha yüksek bir seviyede MGNT yapabildiği görülmüştür. 10 m/s hızı için düşünüldüğünde tasarladığımız sistem için BMD algoritmasının kullanılması MGNT açısından daha verimli görünmektedir.



Şekil 7.9. 10 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç



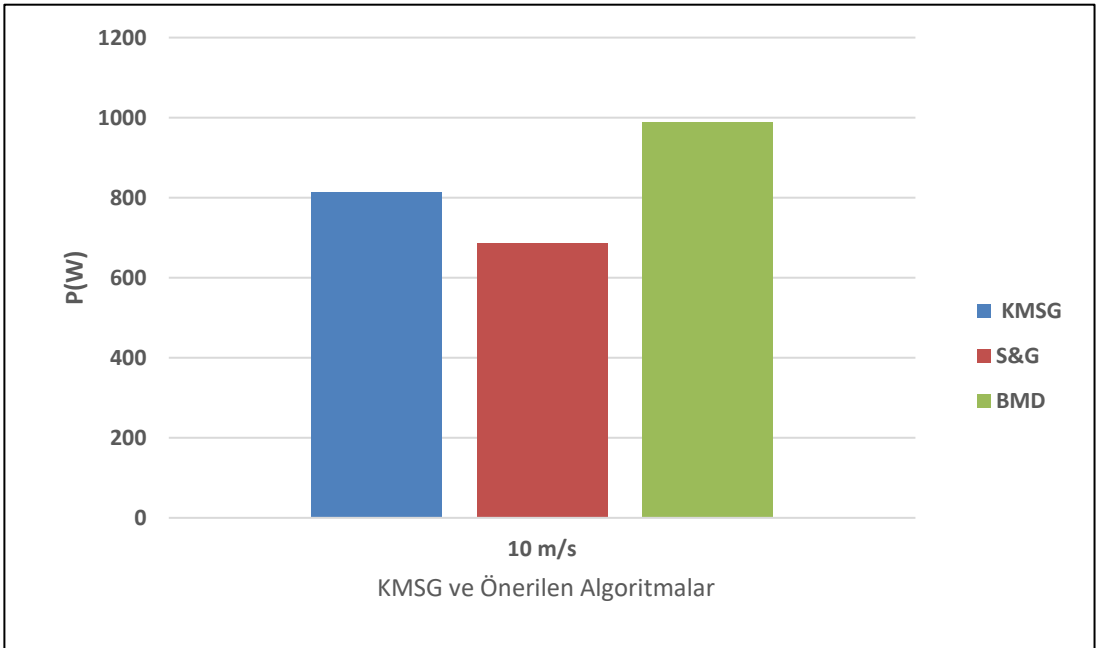
Şekil 7.10. 10 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları



Şekil 7.11. 10 m/s hızındaki KMSG-S&G ve BMD algoritmalarının karşılaştırılması

Tablo 7.3.10 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları

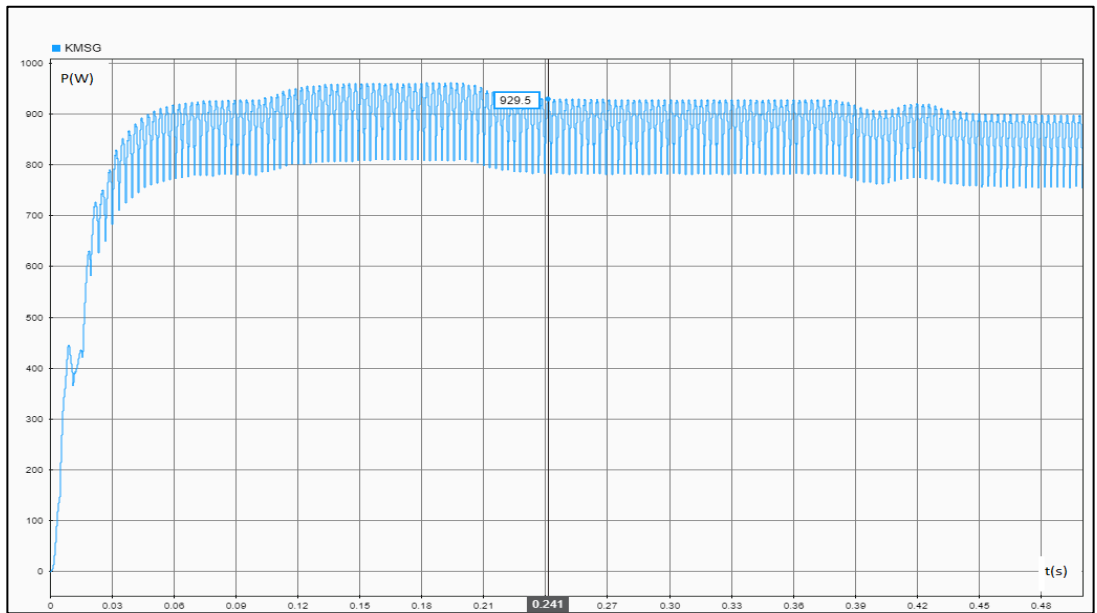
Rüzgâr Hızı	Değişken Rüzgâr Hızında KMSG-S&G-BMD Algoritmalarının Karşılaştırılması		
	KMSG (W)	S&G(W)	BMD(W)
10 m/s	813.6	684.6	730.2



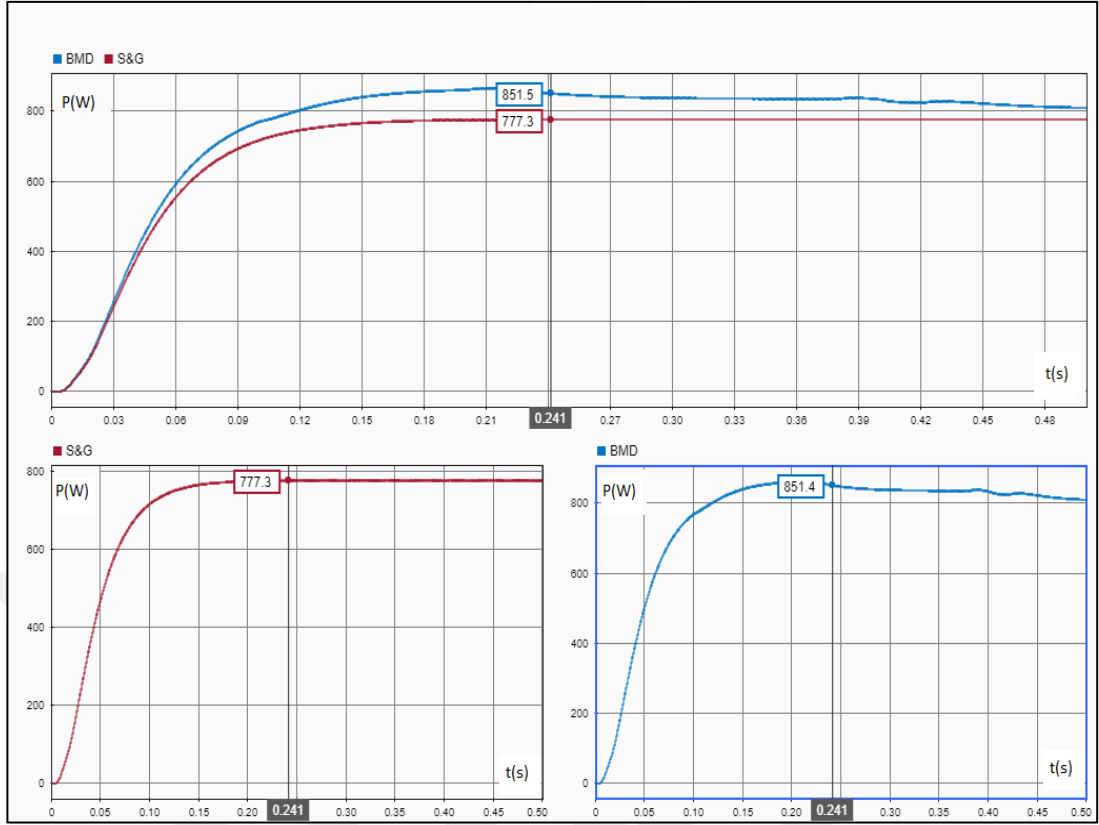
Şekil 7.12. 10 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması

7.4. 11 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi

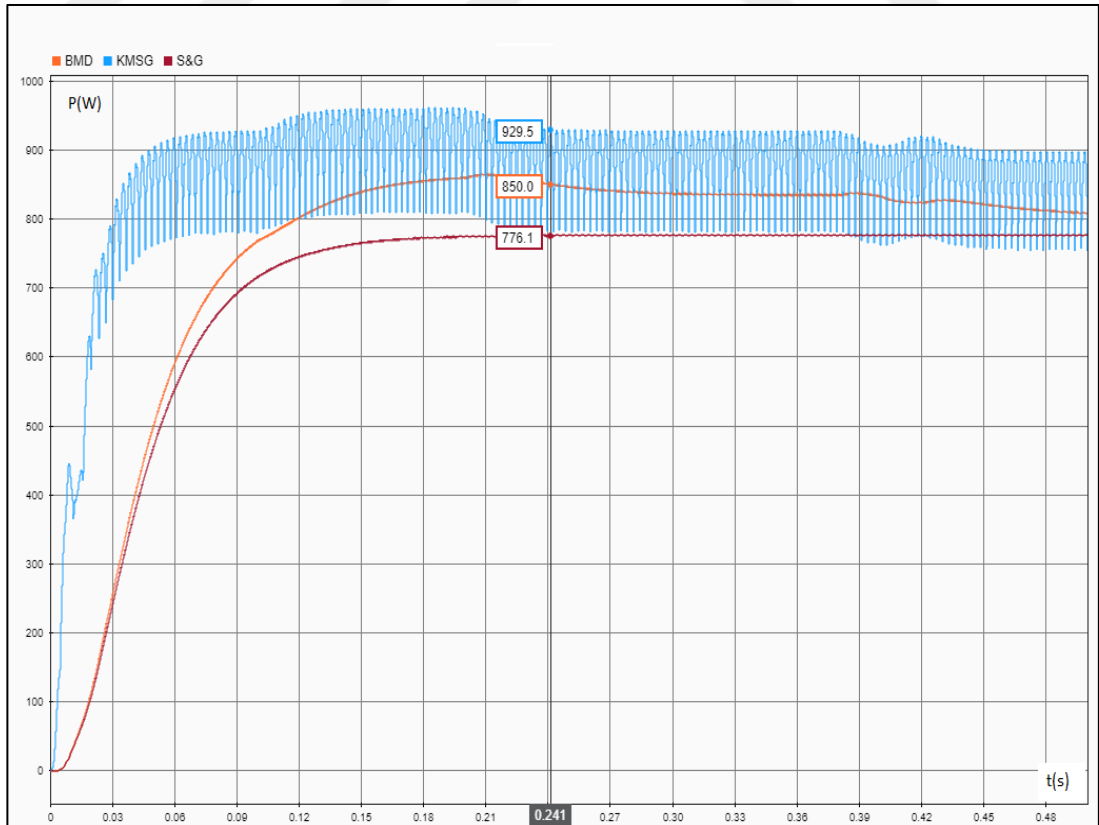
Şekil 7.13' te 11 m/s rüzgâr hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç görülmektedir. Şekildeki verilere bakıldığında anılan rüzgâr hızında KMSG'nin 800-950 W civarında sürekli değişen seviyelerde güç üretebildiği saptanmıştır. Bu aşamada devreye alınan ve MGNT yapması beklenen S&G ve BMD algoritmalarının davranışları Şekil 7.14.'te görülebilmektedir. Şekil 7.15.'te KMSG, S&G ve BMD algoritmalarının davranışları incelendiğinde simülasyonun 0.2'nci saniyesinde KMSG'nin yaklaşık 929.5 W güç üretmiş olduğu seviyede BMD algoritmasının maksimum güç noktası takibini 850 W seviyesinde gerçekleştirirken S&G algoritmasının ise 776.1 W seviyesinde maksimum güç takibi yapabildiği görülebilmektedir. Elde edilen veriler analiz edildiğinde her iki algoritmanın da MGNT işlemini verimli bir şekilde yapabildiği ancak BMD algoritmasının, S&G algoritmasına oranla net bir şekilde daha yüksek seviyede MGNT yapabildiği saptanmıştır. Tablo 7.4. 'de 11 m/s hızı baz alınarak KMSG'nin ürettiği güç değerleri ve S&G ile BMD algoritmalarının ayrı ayrı sisteme uygulanması sonucu üretilen güçler görülmektedir. Şekil 7.16.'da KMSG'de üretilen güç ile S&G ile BMD algoritmalarının uygulanması sonucu üretilen güç grafik olarak gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde BMD algoritmasının %8 oranında daha yüksek bir seviyede MGNT yapabildiği görülmüştür. 11 m/s hızı için düşünüldüğünde tasarladığımız sistem için BMD algoritmasının kullanılması MGNT açısından daha verimli görünmektedir.



Şekil 7.13. 11 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç



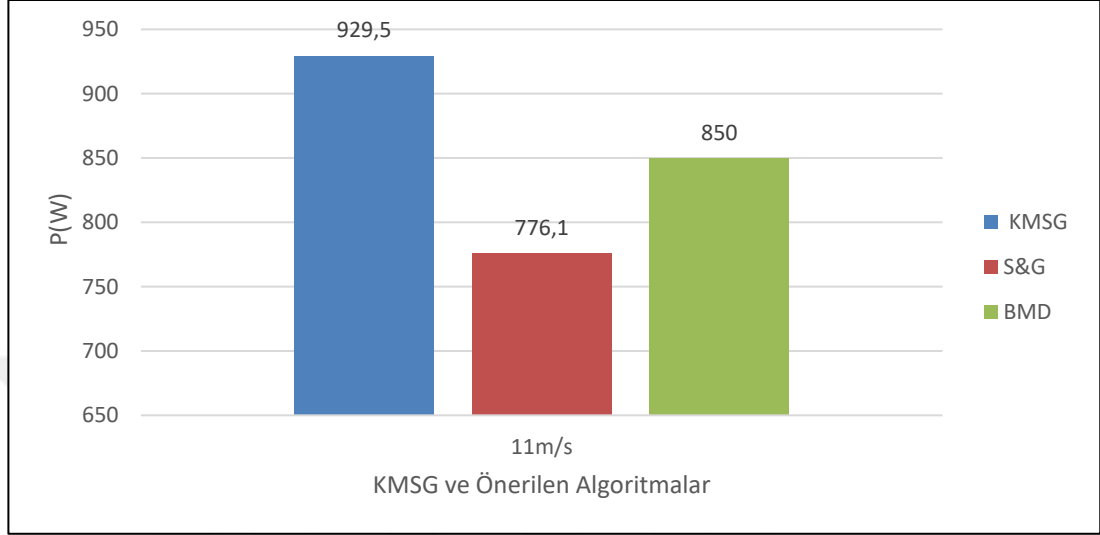
Şekil 7.14. 11 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları



Şekil 7.15. 11 m/s hızındaki KMSG-S&G ve BMD algoritmalarının karşılaştırılması

Tablo 7.4.11 11 m/s için KMSG-Önerilen algoritma çıkışları

Rüzgâr Hızı	Değişken Rüzgâr Hızında KMSG-S&G-BMD Algoritmalarının Karşılaştırılması		
	KMSG (W)	S&G(W)	BMD(W)
11m/s	929.5	776.1	850

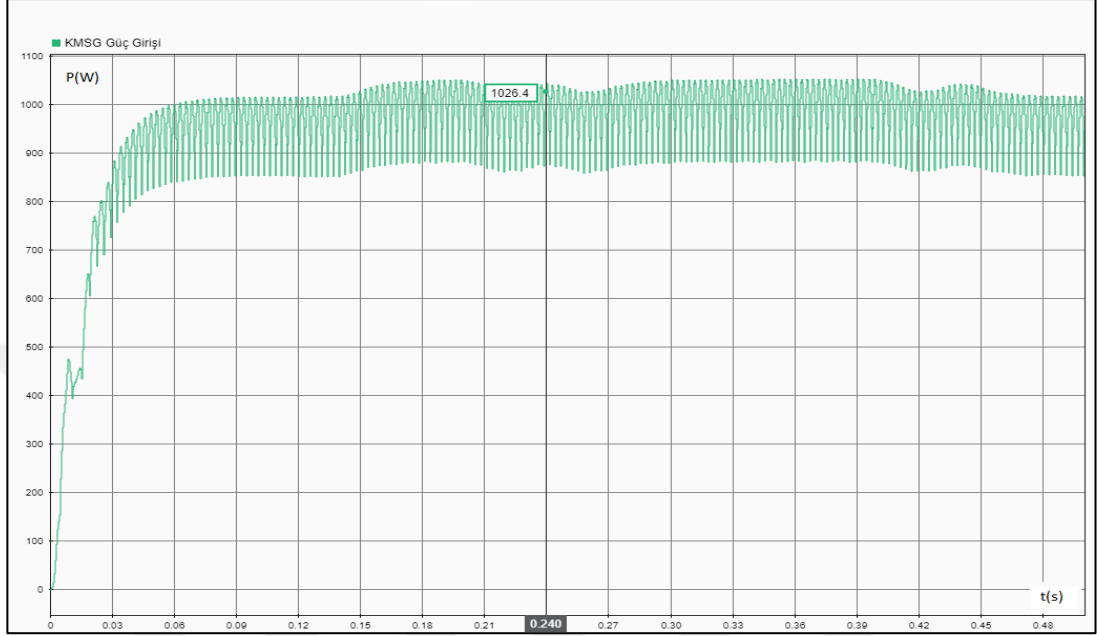


Şekil 7.16. 11 m/s hızında önerilen algoritmaların karşılaştırılması

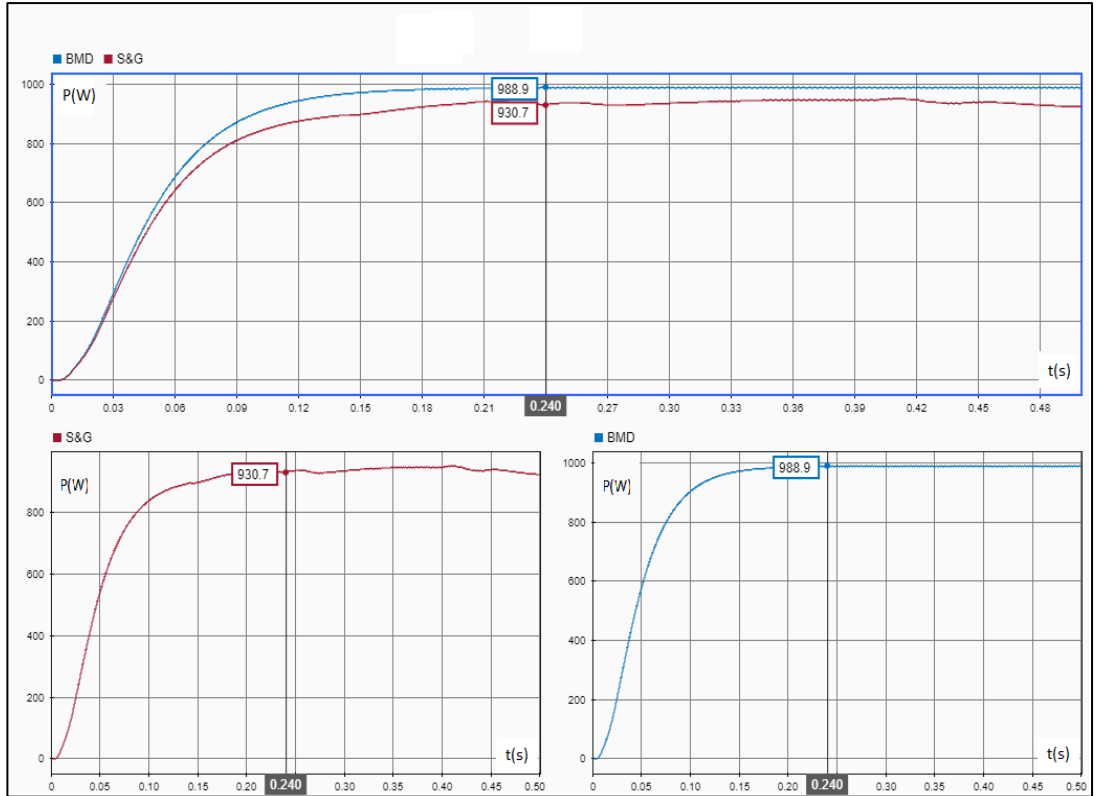
7.5. 12 m/s için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi

Şekil 7.17.'de 12 m/s rüzgâr hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç görülmektedir. Şekildeki verilere bakıldığında anılan rüzgâr hızında KMSG'nin 850-1050 W civarında sürekli değişen seviyelerde güç üretebildiği saptanmıştır. Bu aşamada devreye alınan ve MGNT yapması beklenen S&G ve BMD algoritmalarının davranışları Şekil 7.18.'de görülebilmektedir. Şekil 7.19.'da KMSG, S&G ve BMD algoritmalarının davranışları incelendiğinde simülasyonun 0.2'nci saniyesinde KMSG'nin yaklaşık 1026.4 W güç üretmiş olduğu seviyede BMD algoritmasının maksimum güç noktası takibini 988.1 W seviyesinde gerçekleştirirken S&G algoritmasının ise 932.5 W seviyesinde maksimum güç takibi yapabildiği görülebilmektedir. Elde edilen veriler analiz edildiğinde her iki algoritmanın da MGNT işlemini verimli bir şekilde yapabildiği ancak BMD algoritmasının, S&G algoritmasına oranla net bir şekilde daha yüksek seviyede MGNT yapabildiği saptanmıştır. Tablo 7.5.'te 12 m/s hızı baz alınarak KMSG'nin ürettiği güç değerleri ve S&G ile BMD algoritmalarının ayrı ayrı sisteme uygulanması sonucu üretilen güçler görülmektedir. Şekil 7.20.de KMSG'de üretilen güç ile S&G ile BMD algoritmalarının uygulanması sonucu üretilen güç grafik olarak gösterilmiştir.

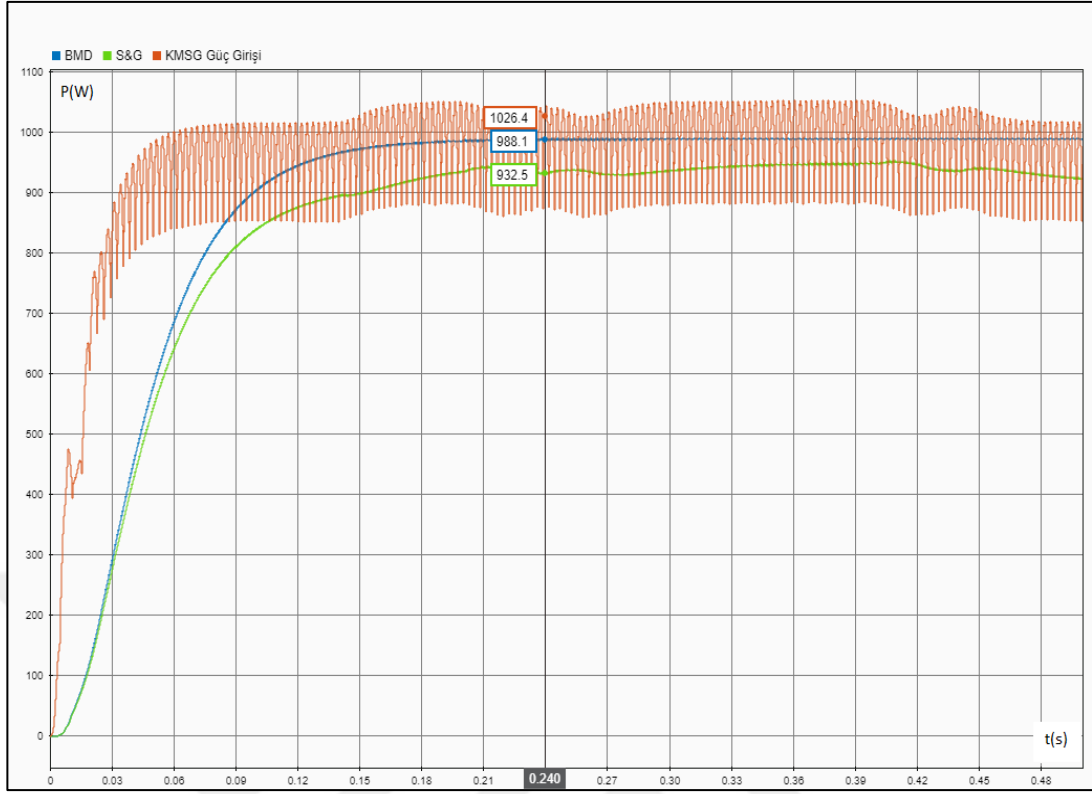
Veriler incelendiğinde BMD algoritmasının %6 oranında daha yüksek bir seviyede MGNT yapabildiği görülmüştür. 12 m/s hızı için düşünüldüğünde tasarladığımız sistem için BMD algoritmasının kullanılması MGNT açısından daha verimli görünmektedir.



Şekil 7.17. 12 m/s hızındaki KMSG çıkışlarında üretilen güç



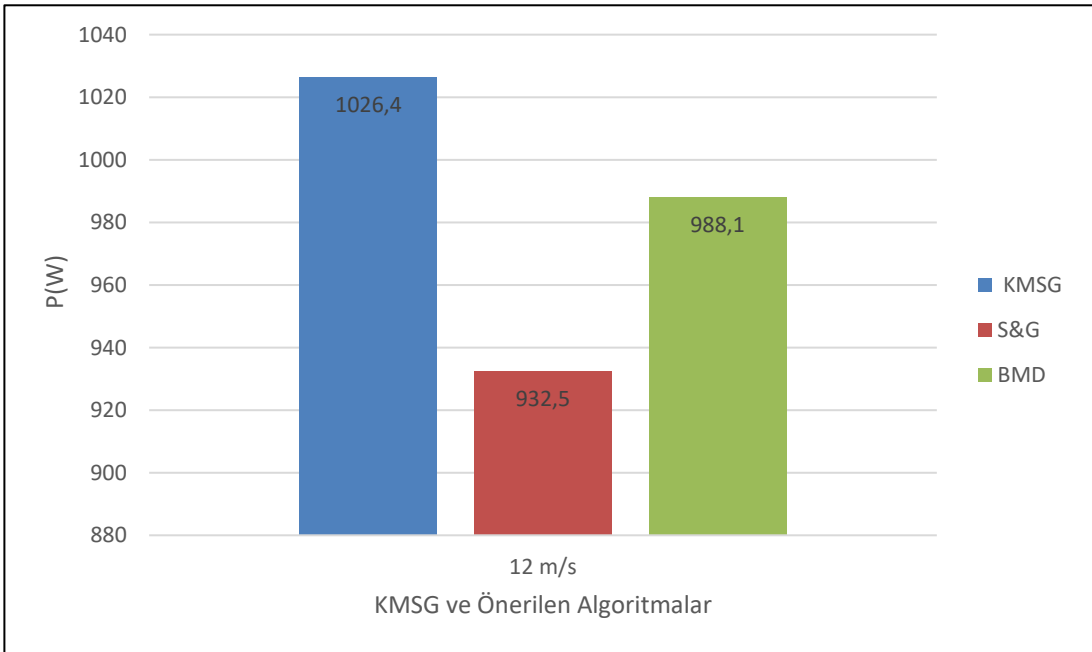
Şekil 7.18. 12 m/s hızındaki BMD ve S&G algoritmalarının davranışları



Şekil 7.19. 12 m/s hızındaki KMSG-S&G ve BMD algoritmalarının karşılaştırılması

Tablo 7.5.12 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları

Rüzgâr Hızı	Değişken Rüzgâr Hızında KMSG-S&G-BMD Algoritmalarının Karşılaştırılması		
	KMSG (W)	S&G(W)	BMD(W)
12 m/s	1026.4	932.5	988.1



Şekil 7.20. 12 m/s için KMSG-önerilen algoritma çıkışları

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

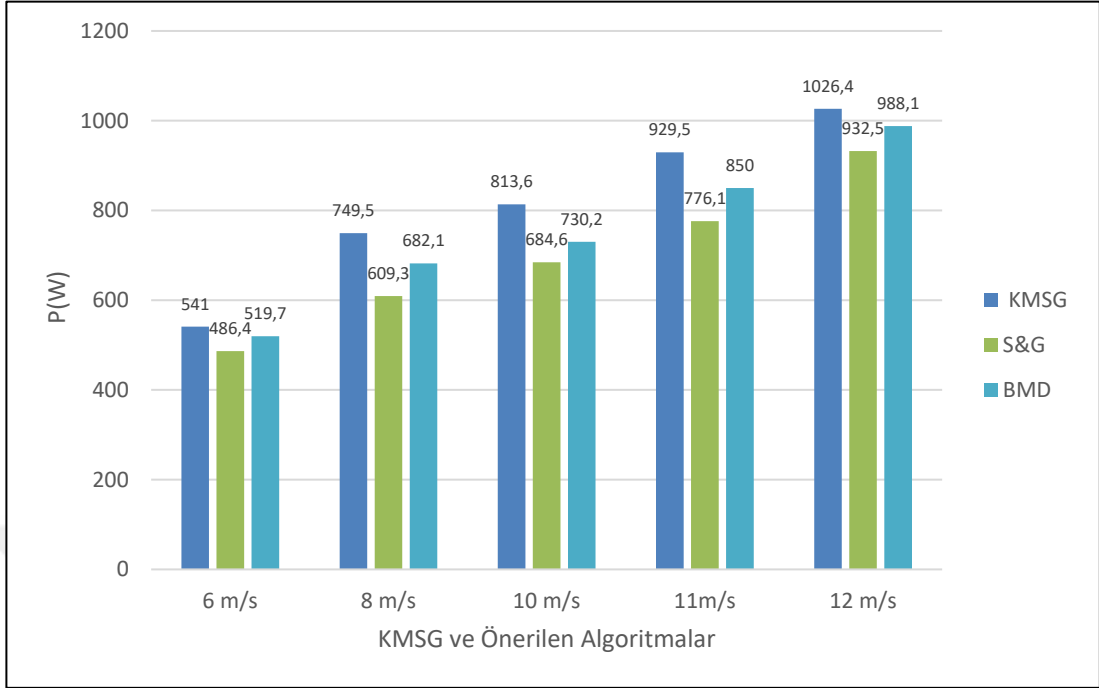
Bu tez çalışmasında; rüzgâr türbinlerinin tarihi gelişimi, Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisinin durumu incelendi. Rüzgâr hızını etkileyen, yükseklik, pürüzlülük, türbülans, iz etkisi, tünel etkisi detaylı anlatıldı. Rüzgâr enerjisi eşitliği, hava yoğunluğu hesabı, rüzgâr türbini modelleri hakkında bilgiler verildi. KMSG modeli ve tasarımında kullanılan MGNT yönetmeleri hakkında bilgiler verildi. Buck-Boost Konvertör tasarımı hakkında detaylı incelemeler yapıldı. Çalışmanın sonucunda ortaya çıkan veriler bulgular ve tartışma bölümünde detaylıca irdelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına ait veriler toplu olarak Tablo 8.1.’de görülmektedir. Şekil 8.1.’de çalışma sonuçlarına ait veriler grafik bazında görülmektedir.

8.1. Değişken Hızlar için KMSG-BMD ve S&G Algoritmalarının Analizi

Tablo 8.1. değişken hızlarda KMSG çıkışları ve S&G ile BMD algoritmalarının güç değerlerini göstermektedir. Her bir hız değerinde KMSG’nin üretmiş olduğu güç ve BMD ile S&G algoritmalarının anılan hız değerinde yakalayabildiği maksimum güç değerine göre üretilen gücü göstermektedir. Şekil 8.1.’de Tablo 8.1. deki verilere göre oluşturulmuş grafik gösterilmiştir.

Tablo 8.1. Değişken hızlar için KMSG-önerilen algoritma çıkışları

Rüzgâr Hızı (m/s)	Değişken Rüzgâr Hızında KMSG-S&G-BMD Algoritmalarının Karşılaştırılması		
	KMSG (W)	S&G(W)	BMD(W)
6 m/s	541	486.4	519.7
8 m/s	749.5	609.3	682.1
10 m/s	813.6	684.6	730.2
11m/s	929.5	776.1	850
12 m/s	1026.4	932.5	988.1



Şekil 8.1. Değişken hızlarda önerilen algoritmaların karşılaştırılması

Çalışmanın temel amacı elektrik şebekesinden uzak noktalarda bulunan ve rüzgâr hızlarının uygun olduğu bölgelerde kurulması planlanan, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinin verimli şekilde değerlendirilmesi prensibi olmuştur. Bahsedilen verimli çalışmaya imkân verecek en uygun Maksimum Güç Noktası Takibi yönteminin belirlenmesi, dolayısıyla enerji ihtiyacının en uygun yöntemle sağlanabilmesi amacı üzerine durulmuştur. Çalışma sonucu elde edilen veriler analiz edildiğinde Maksimum güç noktası takibi aşamasında BMD tabanlı yapılacak uygulamaların S&G tabanlı yapılacak çalışmalara oranla daha verimli olduğu ve daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Tasarlanan Enerji Yönetim Sistemi ile sistem çıkışlarının sürekli enerjili kalması sağlanmıştır. Bu çalışma ile; küçük güçlü rüzgâr enerji santrali kurulumunda planlama aşamasında maksimum güç kontrol ünitesinin seçiminde kullanılacak algoritmanın önemi anlaşılmıştır. Ayrıca şebekeden uzak bölgeler için kullanılması kaçınılmaz olan batarya gruplarının yönetimi ile ilgili bir çözüm önerisi sunulmuştur. Küçük güçlü RES kurulumu planlaması yapanlar için örnek bir çalışma olmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Karakaya A., Karakaş E., Küçük Güçlü Rüzgar Enerji Dönüşüm Sisteminin Benzetimi, Modellemesi ve Uygulaması, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2016, **6**(2), 377-386.
- [2] Eltamaly A. M. E., Farh H. M., Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic, *Electric Power Systems Research*, 2013, **97**, 144-150.
- [3] <https://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2019/05/gsr2020fullreporten.pdf>, (Ziyaret tarihi:5 Kasım 2020).
- [4] Tafticht T., Agbossou K., Cheriti A., DC Bus Control of Variable Speed Wind Turbine, *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que., Canada, 2006.
- [5] Tiwari R., Babu R., Fuzzy Logic Based Mppt For Permanent Magnet Synchronous, *IFAC (International Federation of Automatic Control)*, Sherbrooke, Kanada, 2016.
- [6] Shahi A., Bhattacharjee C., A Study & Analysis of Fuzzy Based P&O MPPT, *IEEE International Conference on Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP-2018)*, Bhubaneswar, India, 2018.
- [7] Koç T., Ayvalık'ta rüzgar enerjisi potansiyeli, *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1998, **1**(2), 1-18.
- [8] Yalçın Y., İstanbul Terkos Bölgesi'nde Kurulması Planlanan Bir Rüzgar Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Potansiyeli, Kurulum Maliyeti Ve Geri Ödeme Süresinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2010, 256492.
- [9] Aydın İ., Balıkesir'de Rüzgâr Enerjisi, *Eastern Geographical Review*, 2013, **18**(29), 29-50.
- [10] Öztürk, Z., Tekirdağ Muratlı bölgesindeki rüzgar akış alan modellemesi, rüzgar enerjisi potansiyeli açısından fizibilite çalışması ve mevcut rüzgar türbinleri ile simülasyon, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, 2007.
- [11] Mangan S. D., Akıllı Binalarda Alt Sistem Değerlendirmesi: İstanbul Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006, 223786.

- [12] Özgener Ö., Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı, *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 2002,4(3),159-173.
- [13] Hayli S., Rüzgâr Enerjisinin Önemi Dünya’da ve Türkiye’deki Durumu, *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2001,11(1), 1-26. [14] Hau E., *Windkraftanlagen*, 6, Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [15] Özdamar A., Dünya ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2000, 6(3),133-145
- [16] Durak M., Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması; Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali,, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000,100907.
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_powerful_wind_turbines, (Ziyaret tarihi: 23 Haziran 2020).
- [18] <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/ruzgar-enerjisinin-gelisimi-ve-tarihi>, (Ziyaret tarihi: 21 Ağustos 2020).
- [19] Özaktürk M., Rüzgar enerjisinin güç kalitesi açısından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007,212220.
- [20] <https://library.wwindea.org/global-statistics-2018-preliminary/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2019).
- [21] Akalın A., Temiz ve yenilenebilir enerji potansiyel ve stratejileri, *Uluslararası Enerji Kongresi*, Ankara, Türkiye,2009.
- [22] Şenel M. C., Koç E., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 2015, 56(663), 47-55.
- [23] <https://library.wwindea.org/global-statistics-2020-preliminary/>, (Ziyaret Tarihi: 12 Kasım 2020).
- [24] <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-uretimi/>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [25] <https://www.enerjiportali.com/turkiye-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucunde-avrupada-6-sirada/>,(Ziyaret Tarihi: 12 Kasım 2020).
- [26] <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>. (Ziyaret Tarihi: 21 Haziran 2020).
- [27] Özgener Ö., Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2002, 4(3),159-173.
- [28] https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistikraporu_temmuz_2019TUREB/,/(Ziyaret Tarihi: 4 Ekim 2020).

- [29] Sathyajith M., Wind Energy Fundamentals, *Resource Analysis and Economics*, Berlin, Germany, 2006.
- [30] Manwell J. F., McGowan J. G. , Rogers A. L., *Wind Energy Explained*, 1st ed., Wiley, New Jersey, USA, 2002.
- [31] Hemami A., *Wind Turbine Technology*, 1st ed., Cengage Learning, Boston, USA, 2012.
- [32] Janardan S. R., Nelson V., *Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power*, Alternative Energy Institute, Texas, USA, 1994.
- [33] Gipe P., *Wind Energy Basics*, Chelsea Green Publishing Company, Vermont, USA, 2003.
- [34] Troen I., Petersen E. L., *European Wind Atlas*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989.
- [35] Lettau H., Note On Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation On The Basis Of Roughness-Element Description, *Journal of Applied Meteorology*, 1969, **8**(5), 828–832.
- [36] Altındaş A., Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Rüzgâr Enerjisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001, 106367.
- [37] <https://community.ieawind.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=11a27d1f-e41c-9e27638e1ec7b611dcb9&forceDialog=0>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019)
- [38] Hahm T., Kroning J., In the Wake of a Wind Turbine, *Fluent News*, 2002, **5**(7).
- [39] Colak I., Ayaz M. S., Boran K., CFD Based Wind Assesment in West of Turkey, *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo, İtalya, 22-25 Kasım, 727-731, 2015.
- [40] Amano R. S., Sundén B., *Aerodynamics of Wind Turbines: Emerging Topics*, 1st ed., WIT Press, Southampton, UK, 2014.
- [41] Tong, W., *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, 1st ed., WIT Press, Southampton, UK, 2010.
- [42] Nurbay N. ve Çınar A., Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim 2005.
- [43] Elibüyük U., Üçgül İ., Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri, *Yekarum e-Dergi*, 2014, **2**(3), 1-14.
- [44] Walker F. J., Jenkins N., *Wind Energy Technology*, 1st ed., Wiley, Canada, 1997.

- [45] Ison V., Wind Energy: Renewable Energy and the Environment, 2nd ed., CRC Press, Florida, 2013.
- [46] Leblebiciođlu E., Ticari Rüzgar Türbinleri Neden 3 Kanatlıdır?, <https://muhendistan.com>, <https://muhendistan.com/ticari-ruzgar-turbinleri-neden-3-kanatlidir/>,(Ziyaret Tarihi:22.8.2019).
- [47] Köse F., Özgören M., Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgâr Türbini, Mühendis ve Makina Dergisi, 2005, 46(551), 20-30.
- [48] http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=128261&tipi=2&sube=, (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2019)
- [49] Durak M., Özer S., Rüzgâr Enerjisi Teori ve Uygulama, 1st ed., Kişisel Yayın, Ankara, 2008.
- [50] Soetedjo A., Lomi A.,W. Mulayanto P., Modeling of Wind Energy System with MPPT, *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Bandung, Indonesia, 17-19 July 2011.
- [51] Bogaraj T., Kanakaraj J. , Chelladurai J., Modeling and simulation of stand-alone hybrid power.Department of Electrical and Electronics Engineering,,*Archives Of Electrical Engineering*,2015,**64**(3), 487-504.
- [52] Oğuz Y., Güney İ., Çalık H., Power Quality Control and Design of Power Converter for Variable-Speed Wind Energy Conversion System with Permanent-Magnet Synchronous Generator, *The Scientific World Journal*,2013, 1-14.
- [53] Karakaya A., Karakas E., Performance Analysis Of Pm Synchronous Motors Using Fuzzy Logic And Self Tuning Fuzzy Pı Speed Controls, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2008, **33**(1B), 53-177.
- [54] Rajin M. L., Damodharan P., Maximum power point tracking method using a modified perturb and observe algorithm for grid connected wind energy conversion systems, *IET Renewable Power Generation Research Article*, 2015,**9**(6), 682-689.
- [55] Jubaer Ahmed Z. S., An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency, *Applied Energy*, 2015,**150**(C), 98-107.
- [56] Tan C. W., Green T. C. ve Hernandez-Aramburo C. A., Analysis of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Applications, *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*,2008, Johor Baharu, Malaysia.
- [57] Ratna I. P. , Pujiantara M, Ardyono P., Maximum power extraction improvement using sensorless controller based on adaptive perturb and observe algorithm for PMSG wind turbine application,, *IET Electric Power Applications Research Article*, 2018,**11**(2) 455-462.

- [58] Azad M. L., Das S., Kumar Sadhu P., Satpati B., Gupta A., P&O Algorithm Based MPPT Technique For Solar PV System Under Different Weather Conditions, *International Conference on circuits Power and Computing Technologies [ICCPCT]*, 2017.
- [59] Hamane B., Benghanem M., Bouzid A., Belabbes A., Bouhamida M., Draou A., Control for Variable Speed Wind Turbine Driving a Doubly Fed Induction Generator using Fuzzy-PI Control, *Energy Procedia*, 2012, **18**(2012), 476-485.
- [60] Kasbi A., Rahali A., A Simple Methodology for Optimal Fuzzy Control of DFIG Based Wind Turbine, *1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 2020, Meknes, Morocco.
- [61] Srivastava B. B., Tripathi E. S., Tracking of Maximum Power from Wind Using Fuzzy Logic Controller Based On PMSG, *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2014.
- [62] Khalil A. G. A., Lee D. C., Seok J. K., Variable Speed Wind Power Generation System, *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004, Aachen, Germany.
- [63] U. T. R. W. Mohan N., *Power Electronics*, John Wiley & Sons Ltd, England, 185-191, 2002.
- [64] Sefa I., Demirtaş M., Garip I., Çolak I., Design and Implementation of Parallel Operation Set of Alternators for Educational Purpose, *Gazi University Faculty of Science Journal*, 2008, **23**(3), 729-739.
- [65] Chen J., Maksimovic D., Erickson R., Buck-Boost PWM Converters Having Two Independently Controlled Switches, *32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2001, 736 – 741.
- [66] El Fadıl H., GIRI F, Robuts Control of Motor Velocity Through DC-DC Buck Power Converter, *IEEE Industrial Electronics, IECON 32nd Annual Conference*, 2006.
- [67] Ghanem M. C., Al-Haddad K., . Roy G., A New Control Scheme to Achieve Sinusoidal Line Current in Cascade Buck-Boost Converter, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 1996, **43**(3), 441-449.
- [68] J. Chen, and Y. J. Bao., Characteristics analysis and comparison of buck boost circuit and Cuk circuit, *Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2013 5th International Conference on. IEEE*, 2013.
- [69] Mangu B., Akshatha S., Suryanarayana D., Fernandes B., Grid-Connected PV-Wind-Battery based Multi-Input Transformer Coupled Bidi-rectional DC-DC Converter for household Applications., *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 1086 – 1095.

- [70] Muyeen S. M., Takahashi R., Toshiaki M., Tamura J., Integration of an Energy Capacitor System With a Variable-Speed Wind Generator, *Ieee Transactions On Energy Conversion*,2009, 740-748.
- [71] https://www.maximintegrated.com/en/design/technical_documents.html (Ziyaret Tarihi: 12 Haziran 2020)
- [72] Assaad M., Arduino Based Hybrid Mppt Controller For Wind And Solar,University Of North Texas,Yüksek Lisans Tezi,2017, Texas,Usa.
- [73] Roumila Z., Djamila R., Rekioua T., Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery, *International Journal of hydrogen energy*, 2017.
- [74] Saranya S. D., Sathyamoorthi S., Gandhiraj R., A Fuzzy Logic Based Energy Management System, *Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences*,2015, **42**(30), 19525-19535.
- [75] <http://www.talentfactory.dk/en/tour.html>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019).
- [76] Putri R., Rifai M., Pujiantara M., Priyadi A. , Purnomo M. Hery, Fuzzy MPPT controller for small scale stand alone PMSG wind turbine, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*,2017, **12**(1), 188-193.
- [77] Venkateshkumar M., Raghavan R., Hybrid Photovoltaic and Wind Power System with Battery Management System Using Fuzzy Logic Controller, *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*,2016, **9**(2),72-78.
- [78] Badreddine L., Smail Z., Bourhaleb M., Elhafyani M. L., Real Time Study Of P&O MPPT Control For Small Wind PMSG, *8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings*, 2016,Turin, Italy.
- [79] <https://www.infineon.com/dgdl/irfz44npbf.pdf>. (Ziyaret Tarihi: 21 Eylül 2020)
- [80] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-v01_00-EN.pdf. (Ziyaret Tarihi: 21 Eylül 2020).
- [81] <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/resources/article/understanding-esr-in-electrolytic-capacitors/>,(Ziyaret Tarihi: 12 Ağustos 2020).
- [82] <https://www.coilcraft.com/getmedia/rfs1317.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 12 Ağustos 2020).
- [83] Duffie J. A., William B. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition, Wiley, New Jersey, USA, 2013.
- [84] <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712>, (Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2020).

- [85] <https://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html>.
(Ziyaret Tarihi: 15 Aralık 2020).
- [86] <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/680>.
(Ziyaret Tarihi: 22 Kasım 2020).
- [87] Karakaya A., Karakaş E., The Speed Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Fuzzy Logic And Self Tuning Fuzzy P1 Controller, *4th International Conference On Electrical And Electronics Engineering*, 2005, Bursa, Turkey.
- [88] <https://www.voltimum.com.tr/haberler/ruzgar-turbinleri-ve-aerodinamik>.
(Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2019).
- [89] Ivanqui J., Voltolini H., Carlson R., Watanabe E. H., Pq Theory Control Applied to Wind Turbine, *IEEE International Electric Machines and Drives*, 2013.



EKLER

EK -A. SAPTIR VE GÖZLE ALGORİTMASI MATLAB KODLARI

```

function D = PO(V, I, T)
persistent Pn Po dP d dd n;

    if isempty(V)
        V=20;
    end
    if isempty(I)
        I=0;
    end
    if isempty(Po)
        Po=0;
    end
    if isempty(Pn)
        Pn=0;
    end
    if isempty(dP)
        dP=0;
    end
    if isempty(d)
        d=1;
    end
    if isempty(dd)
        dd=0;
    end
    if isempty(n)
        n=1;
    end

    if (T>n*0.02)
        n=n+1;
        Po=Pn;
        Pn=V*I;
        dP=Pn-Po;

        end
        else
        if ((dP<1)&&(dP>-1))
        % leave little margin
        dd=0;
        d=d+dd;
        else
        if ((dP/dd)>0)% positive slop
        dd=0.01;
        d=d+dd;
        else% negative and zero slop
        dd=-0.01;
        d=d+dd;
        end
        end
        end
        end

        D=d/(d+1); % calculate duty

        % code to avoid duty less than
        0.1 and more than 0.9
        if (D<0.1)
        D=0.1;
        d=D/(1-D);
        else
        if (D>0.9)
        D=0.9;
        d=D/(1-D);
        else
        end
        end
        end

    if (dd==0)% to avoid dP/dd=inf
        if dP>1
        dd=0.01;
        if (dP<-1)
        dd=-0.01;
        d=d+dd;
        else
        d=d+dd;
        else
        dd=0;
        end
    end

```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Aksoy, B.**, Karakaş, E., Küçük Ölçekli Bir Rüzgâr Türbininde Maksimum Güç Noktası Takibinin Mikrodenetleyici Tabanlı Gerçekleştirilmesi, *International Marmara Sciences Congress IMASCON 2020-Autumn*, Kocaeli,Türkiye,4-5 Aralık 2020.
- [2] **Aksoy, B.**, Karakaş, E., Rüzgâr Enerjisi Güç Sistemi Maksimum Güç Noktası Takibinde Saptır ve Gözle (S & G) ve Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) Yöntemlerinin Sistem Üzerindeki Çalışmalarının Karşılaştırılması, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2020, **3** (2), 196-208.

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Kocaeli’de Kocaeli Endüstri Meslek Lisesi’nde tamamladı. 1999 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümünü kazandı. Lisans eğitimini 2005 yılında tamamladı. 2005 yılında Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş’de ilk işine başladı. 2012 yılında Millî Eğitim Bakanlığı bünyesinde Elektrik-Elektronik Teknolojisi Öğretmeni olarak yeni görevine başladı. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

