

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN EKSERGOEKONOMİK
ANALİZİ**

YUNUS EMRE AKKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
Y.DOÇ. DR. ERCAN İZGİ**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN EKSERGOEKONOMİK
ANALİZİ**

Yunus Emre AKKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 27.05.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Y.Doç. Dr. Ercan İZGİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Y.Doç. Dr. Ercan İZGİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu alışma, TÜBİTAK' ın 107M331 numaralı "Rüzgar-Güneş Hibrit Sistemlerinin Giriş, ıktı, Kayıplarının ve Verimliliklerinin İstanbul şartlarında Alan-Zaman ve Ekserji Yöntemleriyle Genel Bir Modellemesi" projesiyle desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Gelişen teknoloji ve dünya nüfusunun hızla artmasından dolayı enerjiye olan talep azami derecede artmıştır. Dünya ülkeleri, enerji ihtiyacının büyük kısmını fosil tabanlı yakıtlar kullanarak karşılamaktadır. Ancak fosil tabanlı yakıtların hem çevreye zararlı olmaları hem de yakıt kaynaklarının büyük bir kısmının birkaç ülkenin elinde olması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebin hızla artmasını sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara göre, hem çevreye daha az zararlı olmaları hem de tükenmemeleri nedeniyle yakıt problemine iyi bir çözüm olarak düşünülmektedirler.

Tez çalışması kapsamında rüzgar türbinlerinin ve fotovoltaik güneş pillerinin ekserji analizleri yapılmıştır. Böylece var olan kullanılabilir enerjinin ne kadarının gerçek işe dönüştürüldüğü araştırılmıştır. Daha sonra rüzgar türbini ve güneş pilleri için eksergoekonomik analiz yapılmıştır. Ekonomik analiz çerçevesinde, meydana gelen enerji ve ekserji kayıplarının sistemlerinin kurulum maliyetlerine oranı araştırılmıştır.

Böyle bir konuda çalışmamı sağlayan ve bana her konuda rehberlik eden danışman hocalarım Yrd. Doç. Dr. Ercan İZGİ ve Doç. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN'e can-ı gönülden teşekkür ederim.

Analizlerimde kullandığım verilerin elde edilmesi ve kullanılmasında yardımlarını hiç unutmayacağım Yük. Meteoroloji Mühendisi Mustafa Kemal KAYMAK ve Yük. Meteoroloji Mühendisi Bihter YERLİ' ye müteşekkirim.

Eksergoekonomik modelin belirlenmesinde ve uygulanmasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa Tolga BALTA hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Son olarak beni her zaman maddi ve manevi olarak destekleyen anneme, babama ve kardeşlerime çok teşekkür ederim

Mart, 2011

Yunus Emre AKKAYA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	8
KISALTMA LİSTESİ	10
ŞEKİL LİSTESİ.....	11
ÇİZELGE LİSTESİ	14
ÖZET	15
ABSTRACT	16
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
RÜZGAR ENERJİSİ	4
2.1 Rüzgar Enerjisi.....	4
2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi	4
2.3 Dünya ve Avrupa’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı	8
2.4 Türkiye’ nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	20
2.5 Türkiye’ de Rüzgar Enerjisi Kullanımı	23
2.6 Rüzgar Enerjisinin Avantajları	27
2.7 Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları ve Bunlara Yönelik Çözüm Önerileri....	29
2.8 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	31
2.8.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri	32
2.8.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	33
2.8.2.1 Yavaş Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri	35
2.8.2.2 Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri	36
2.8.2.2.1 Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinlerinin Yapısı.....	37
2.9 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi	37

BÖLÜM 3

GÜNEŞ ENERJİSİ	45
3.1 Güneş Enerjisi	45
3.2 Güneş Pillerinin Tarihçesi.....	46
3.3 Türkiye’ de Güneş Enerjisi.....	47
3.4 Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Yöntemleri	50
3.4.1 Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri ile Elektrik Üretimi.....	51
3.4.1.1 Parabolik Oluk Sistemleri	52
3.4.1.2 Parabolik Çanak Sistemleri.....	53
3.4.1.3 Güç Kulesi Sistemleri	54
3.4.2 Güneş Pilleri ile Elektrik üretimi	56
3.4.2.1 Güneş Pillerinin Yapısı	56
3.4.2.2 Birleşme Kesitinde Elektrik Alanın Oluşması.....	58
3.4.2.3 Yüzeyleri Birleştirilmiş Silikonlara Enerji Verilmesi	58
3.4.2.4 Güneş Pili Türleri	59
3.4.2.4.1 Kristal Silisyum	59
3.4.2.4.2 İnce Film Güneş Pilleri.....	60
3.4.2.4.3 Mikrokristal Silisyum.....	60
3.4.2.4.4 Galyum Arsenit	61
3.4.2.5 Güneş Pili Sistemleri.....	61
3.5 Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi	63

BÖLÜM 4

EKSERGOEKONOMİK ANALİZ	69
4.1 Giriş	69
4.2 Rüzgar Ekserji Analizi	74
4.2.1 Akışın Ekserjisi.....	75
4.3 Fotovoltaik Pillerin Ekserji Analizi	77
4.3.1 Fotovoltaik Pillerin Enerji ve Ekserji Verimleri.....	79
4.4 Ekonomik Model	83
4.5 Proje Sistemi	86
4.5.1 Rüzgar Enerji Sistemi ve Özellikleri.....	86
4.5.2 Güneş Enerji Sistemi (PV) ve Özellikleri.....	89
4.5.3 Kurulan Yer Meteoroloji İstasyonu ve Veri Saklama Birimi.....	91
4.6 Eksergoekonomik Analiz Sonuçları	93
4.6.1 Rüzgar Türbin Sisteminin Eksergoekonomik Analizi.....	93
4.6.2 PV Güneş Sisteminin Eksergoekonomik Analizi.....	104
4.6.3 Hibrit Sistemin Verimi.....	119

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR.....	125

EK-A

HAZİRAN AYI EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ	128
A-1 Rüzgar Türbininin Eksergoekonomik Analizi	128
A-2 PV Güneş Sisteminin Eksergoekonomik Analizi	134
A-3 Hibrit Sistemin Eksergoekonomik Analizi	141
ÖZGEÇMİŞ	143

SİMGE LİSTESİ

W_{KE}	Kinetik enerji
m	Havanın Kütlesi
v	Rüzgar hızı
$\dot{m}$	Birim zamanda akan hava kütlesi
P	m kütleli, v hızıyla hareket eden havanın gücü
A	Rotor kanatlarının süpürdüğü alan
ρ	Hava yoğunluğu
D	Rotor çapı
P	Hava basıncı
T	Hava sıcaklığı
R	İdeal gaz sabiti
V	Hacim
MA	Havanın moleküler ağırlığı
P_0	Referans basınç
H	Deniz seviyesinden yükseklik
v_0	Referans yükseklikteki rüzgar hızı
a	Sürtünme katsayısı
H_0	Referans yükseklik
I	PV hüvresinin akımı
I_{sc}	PV hüvresinin kısa devre akımı
I_d	Diyot akımı
V_{OC}	PV hüvresinin açık devre gerilimi
R_p	PV hücrede paralel kaçak direnç
R_s	PV hücrede seri direnç (iç direnci temsil eder)
V_d	PV hücredeki diyot gerilimi
I_p	PV hücredeki paralel direnç üzerinden geçen akım değeri
$V_{modül}$	PV modül gerilimi
Q	Isı enerjisi
H	Entalpi
C_p	Özgül ısı
E_{pot}	Potansiyel enerji
g	Yer çekim ivmesi
k_e	Kinetik enerji

p_e	Potansiyel enerji
h	entalpi
$\dot{Q}$	Birim zamandaki ısı etkileşimi
$\dot{W}$	Birim zamandaki iş etkileşimi
μ_j	Kimyasal kompozisyon
s	Entropi
ex	Ekserji
$\dot{Ex}^w$	İşin ekserjisi
ΔS	Entropi değişimi
T_{at}	Atmosfer sıcaklığı
T_1	Kanat önü rüzgar sıcaklığı
T_2	Kanat arkası rüzgar sıcaklığı
P_1	Kanat önündeki rüzgar basıncı
P_2	Kanat arkasındaki rüzgar basıncı
Q_{loss}	Rüzgar türbinindeki ısı kayıpları
η	Enerji verimi
ψ	Ekserji verimi
$E_{üre}$	Rüzgar türbininde üretilen elektriksel güç değeri
FF	PV hücresinin dolum faktörü
V_{mp}	PV hücresinin üretebileceği maksimum gerilim değeri
I_{mp}	PV hücresinin üretebileceği maksimum akım değeri
ΔH	Entalpi değişimi
$\Delta\mu$	Kimyasal potansiyeller arasındaki fark
T_{cell}	PV hücresinin hücre sıcaklığı
T_{amb}	Çevre sıcaklığı
T_p	Güneşin sıcaklığı
Ex_{phy}	Fiziksel ekserji
q_{sc}	Kısa devre akımında uyarılmış elektron boşalması
q_L	Düşük enerji yoğunluğunda uyarılmış elektron boşalması
η_{pce}	PV hücrelerde dönüşüm verimliliği
S_T	Güneş ışıınımı
Ex_{solir}	Güneş ışıınımının ekserji değeri
T_{sun}	Güneşin sıcaklığı
E	Enerji
L_{ex}	Ekserji kaybı
L_{en}	Enerji kaybı
K	Maliyet
$\dot{R}_{en}$	Enerji kayıp oranının kapital maliyetine oranı
$\dot{R}_{ex}$	Ekserji kayıp oranının kapital maliyetine oranı

KISALTMA LİSTESİ

WECS	Wind Energy Conversion System
PV	Photo Voltaic
NASA	National Aeronautics and Space Administration
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
AB	Avrupa Birliği
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
GaAS	Galyum Arsenit
FF	Fill Factor
EXCEM	Exergy-Cost-Energy-Mass
İ.T.Ü	İstanbul Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Pers uygarlığında kullanılan bir yel değirmeni	5
Şekil 2. 2	Muhtemelen tipinin ilk örneği olan ve Belidor tarafından tasarlanan pervane tipi rüzgar türbini	6
Şekil 2. 3	Putnam rüzgar türbini	6
Şekil 2. 4	1996-2009 yılları arası kümülatif olarak dünya kurulu rüzgar kapasitesi ...	12
Şekil 2. 5	1996-2009 yılları arasında dünya yıllık rüzgar kapasiteleri.....	13
Şekil 2. 6	2003-2009 yılları arası bölgelere göre yıllık kurulan kapasite güçleri.....	13
Şekil 2. 7	2010 yılı sonu itibari ile Avrupa’da kurulu rüzgar güçleri (kümülatif)	18
Şekil 2. 8	Avrupa’da 2010 yılında devreye alınan-devreden çıkarılan santral güçleri.19	
Şekil 2. 9	1995-2010 yılları arasında kurulan santrallerin çeşitleri ve güçleri(MW) ...	20
Şekil 2. 10	Avrupa rüzgar kurulu gücü kapasitesi bakımından ilk 15 ülke.....	21
Şekil 2. 11	Türkiye'nin rüzgar potansiyeli.....	21
Şekil 2. 12	Yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri	31
Şekil 2. 13	Darrieus tipi rüzgar türbini.....	32
Şekil 2. 14	Düz tip bir Darrieus rüzgâr türbini ve Darrieus tipi bir rüzgâr türbini	33
Şekil 2. 15	Yatay eksenli rüzgar türbini	34
Şekil 2. 16	Su pompalamak için kullanılan çok kanatlı bir rüzgar türbini.....	35
Şekil 2. 17	Elektrik üreten üç kanatlı rüzgar türbinleri.....	36
Şekil 2. 18	Bir rüzgâr türbininde bulunan aksamalar	37
Şekil 2. 19	Düşey eksenli rüzgar türbini	39
Şekil 2. 20	Yükseklik ile basınç arasındaki ilişkiyi bulmak amacı ile dikkate alınan hava koridoru.....	41
Şekil 3. 1	Güneş enerjisi potansiyeli atlası	50
Şekil 3. 2	Parabolik oluk yansıtıcı dizisi.....	52
Şekil 3. 3	AndaSol güneş enerjisi elektrik üretim tesisi	53
Şekil 3. 4	Andasol projesinin basitleştirilmiş akış diyagramı	53
Şekil 3. 5	Parabolik çanak sistemi.....	54
Şekil 3. 6	Güç kulesi santralinin şematik diyagramı	55
Şekil 3. 7	İspanya’da kurulan PS10 güç kulesi	56
Şekil 3. 8	Güneş pili yapısı	58
Şekil 3. 9	Elektrik alanın “n tip” in “p tip”i etkileyiş diyagramı	58
Şekil 3. 10	Fotonların silikondaki elektron hareketi oluşturması	59
Şekil 3. 11	Temel güneş enerjisi sistemi.....	61
Şekil 3. 12	PV hücresinin basit elektriksel eşdeğer modeli	63
Şekil 3. 13	PV hücresinin açık devre ve kısa devre eşdeğer modelleri.....	63

Şekil 3. 14	PV hücrenin gölgelenme etkisine maruz kalması	64
Şekil 3. 15	Şönt dirençli eş değer PV devresi.....	64
Şekil 3. 16	Seri dirençli eş değer PV devresi.....	65
Şekil 3. 17	PV hücrenin nihai eş değer devresi	66
Şekil 3. 18	PV hücre, PV modül, PV panel	67
Şekil 3. 19	PV hücrelerinin seri bağlanması.....	67
Şekil 3. 20	PV hücrelerinin paralel bağlanması	68
Şekil 3. 21	Modüllerin farklı bağlantı tipleri	68
Şekil 4. 1	Bir ısıtıcıdaki ısı alış veriş i	69
Şekil 4. 2	m kütleli bir cismin potansiyel enerjisi	71
Şekil 4. 3	Bir pistonla sıkıştırma olayı	71
Şekil 4. 4	Carnot çevrimi.....	72
Şekil 4. 5	Türbini etkileyen değişkenlerin giriş ve çıkışlarının gösterimi	75
Şekil 4. 6	Fotovoltaik sisteme ait güç eğrisi.....	78
Şekil 4. 7	Fotovoltaik sistemlerde enerji farkı oluşumu	81
Şekil 4. 8	EXCEM analiz metodu	84
Şekil 4. 9	Rüzgar türbini için kurulan sistem	88
Şekil 4. 10	Kurulan PV sisteminin akım-voltaj eğrisi.....	89
Şekil 4. 11	Fotovoltaik paneller için kurulan sistem.....	90
Şekil 4. 12	Diffüz ışı nım ölçer.....	91
Şekil 4. 13	Otomatik meteoroloji istasyonu	91
Şekil 4. 14	Ön sıcaklığın zamanla değişimi	93
Şekil 4. 15	Arka sıcaklığın zamanla değişimi.....	93
Şekil 4. 16	Ön rüzgar hızının zamanla değişimi	94
Şekil 4. 17	Arka rüzgar hızının zamanla değişimi.....	94
Şekil 4. 18	Ön basıncın zamanla değişimi.....	94
Şekil 4. 19	Arka basıncın zamanla değişimi	95
Şekil 4. 20	Üretilen elektriğin zamanla değişimi	95
Şekil 4. 21	Entalpinin zamanla değişimi	96
Şekil 4. 22	Entalpinin ön rüzgar sıcaklığına göre değişimi (Nisan)	96
Şekil 4. 23	Entalpinin arka rüzgar sıcaklığına göre değişimi (Nisan).....	97
Şekil 4. 24	Entropinin zamana göre değişimi	97
Şekil 4. 25	Entropinin ön rüzgar sıcaklığı ile değişimi (Nisan)	98
Şekil 4. 26	Entropinin arka rüzgar sıcaklığı ile değişimi (Nisan)	98
Şekil 4. 27	Ekserjinin zamana göre değişimi.....	99
Şekil 4. 28	Enerji kayıp oranının zamana göre değişimi	99
Şekil 4. 29	Ekserji kayıp oranının zamana göre değişimi	100
Şekil 4. 30	Ren değerinin zamana göre değişimi	100
Şekil 4. 31	Rex değerinin zamana göre değişimi	101
Şekil 4. 32	Ren değerinin rotor önü rüzgar hızına göre değişimi (Nisan).....	101
Şekil 4. 33	Rex değerinin rotor önü rüzgar hızına göre değişimi (Nisan)	102
Şekil 4. 34	Rotor önü rüzgar hızı ile enerji verimi arasındaki ilişki	102
Şekil 4. 35	Rotor önü rüzgar hızı ile ekserji verimi arasındaki ilişki.....	103
Şekil 4. 36	Rotor önü rüzgar hızı ile kapasite faktörü arasındaki ilişki (Nisan).....	103
Şekil 4. 37	Nisan ayı ortalama rüzgar hızları ile kapasite faktörü arasındaki ilişki	104
Şekil 4. 38	Rotor önü rüzgar hızı ile kapasite faktörü arasındaki ilişki (Ağustos)	104
Şekil 4. 39	Ağustos ayı ortalama rüzgar hızları ile kapasite faktörü arasındaki ilişki ..	104

Şekil 4. 40	Hücre sıcaklığının zamanla değişimi	105
Şekil 4. 41	Çevre sıcaklığının zamanla değişimi	105
Şekil 4. 42	Güneş ışıınının zamanla değişimi	106
Şekil 4. 43	Sistemin maksimum akımının zamanla değişimi	106
Şekil 4. 44	Sistemin maksimum geriliminin zamanla değişimi	106
Şekil 4. 45	Sistemin kısa devre akımının zamanla değişimi	107
Şekil 4. 46	Sistemin açık devre geriliminin zamanla değişimi	107
Şekil 4. 47	Üretilen elektriksel gücün zamanla değişimi	108
Şekil 4. 48	Üretilen elektriksel güç ile güneş ışıını arasındaki ilişki	108
Şekil 4. 49	Entapi değişiminin zamana göre durumu	109
Şekil 4. 50	Entalpi ile çevre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan).....	110
Şekil 4. 51	Entalpi ile hücre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan)	110
Şekil 4. 52	Entropinin zamanla değişimi.....	111
Şekil 4. 53	Entropi ile çevre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan).....	111
Şekil 4. 54	Entropi ile hücre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan)	111
Şekil 4. 55	Isı kayıplarının zamana göre değişimi	112
Şekil 4. 56	Isı kayıpları ile güneş ışıını arasındaki ilişki	112
Şekil 4. 57	Fiziksel ekserjinin zamana göre değişimi	113
Şekil 4. 58	Kimyasal ekserjinin zamana göre değişimi	113
Şekil 4. 59	Toplam ekserjinin zamana göre değişimi	114
Şekil 4. 60	Toplam ekserji ile güneş ışıını arasındaki ilişki.....	114
Şekil 4. 61	Enerji kayıplarının zamana göre değişimi	115
Şekil 4. 62	Ekserji kayıplarının zamana göre değişimi	115
Şekil 4. 63	Enerji kayıpları ile güneş ışıını arasındaki ilişki (Nisan)	116
Şekil 4. 64	Ekserji kayıpları ile güneş ışıını arasındaki ilişki (Nisan).....	116
Şekil 4. 65	Ren değerinin zamana göre değişimi	117
Şekil 4. 66	Rex değerinin zamana göre değişimi	117
Şekil 4. 67	Enerji veriminin zamana göre değişimi.....	118
Şekil 4. 68	Ekserji veriminin zamana göre değişimi.....	118
Şekil 4. 69	Dönüşüm veriminin zamana göre değişimi	119
Şekil 4. 70	Dolum faktörünün zamana göre değişimi	119
Şekil 4. 71	Hibrit sistemin enerji veriminin zamana göre değişimi	120
Şekil 4. 72	Hibrit sistemin ekserji veriminin zamana göre değişimi	121
Şekil 4. 73	Hibrit sistemin kapasite faktörünün zamana göre değişimi	121
Şekil 4. 74	Hibrit sistemde Ren değerinin zamana göre değişimi	122
Şekil 4. 75	Hibrit sistemde Rex değerinin zamana göre değişimi.....	122

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1	2008/2009 dönemi dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi.....	9
Çizelge 2. 2	Türkiye’de rüzgar enerjisinin geleceğiyle ilgili tahmin değerleri	22
Çizelge 2. 3	Rüzgar enerjisi potansiyelinin Türkiye’nin farklı coğrafi bölgelerine göre dağılımı	22
Çizelge 2. 4	Rüzgar enerjisi açısından en zengin bölgeler	23
Çizelge 2. 5	Türkiye’de kurulu bulunan ve kurulması planlanan rüzgar enerji santralleri	24
Çizelge 2. 6	Bir atm basıncı altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi...	40
Çizelge 2. 7	Hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile olan değişimi	43
Çizelge 2. 8	Farklı yeryüzü topolojileri için α katsayıları.....	44
Çizelge 3. 1	Türkiye’ nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli	48
Çizelge 3. 2	Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı.....	49
Çizelge 4. 1	İTÜ Meteoroloji Parkına kurulan rüzgar türbininin bazı özellikleri	87
Çizelge 4. 2	UE 15’ in farklı rüzgar şiddetlerinde üretim değerleri	87
Çizelge 4. 3	Kullanılan anemetreler ve özellikleri	89
Çizelge 4. 4	Rüzgar türbini ve fotovoltaik panel sistemlerinde kullanılan aletler ve özellikleri.	90
Çizelge 4. 5	DMİ istasyonlarının bilgileri.....	92

RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ

Yunus Emre AKKAYA

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ercan İZGİ

Dünya genelinde enerji tüketiminin artması nedeniyle ülkeler mevcut kurulu elektrik enerjisi güçlerini arttırmak zorunda kalmaktadırlar. Hem küresel ısınma ve hava kirliliği gibi çevre sorunları hem de fosil yakıt kaynaklarının tükenme tehlikesi, kurulan bu yeni santrallerin içinde yenilenebilir enerji kaynaklı olanları daha önemli bir hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji santralleri arasında rüzgar ve güneş enerjisi sistemleri diğerlerine (dalga enerjisi, gelgit enerjisi, bio enerji) oranla daha fazla tercih edilmektedirler.

Bu tez çalışması kapsamında, meteorolojik şartların rüzgar ve güneş enerjisi sistem verimlerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinin enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Daha sonra sistemlerdeki enerji ve ekserji kayıpları hesaplanarak bunların maliyetleri araştırılmış, EXCEM (Ekserji-Maliyet-Enerji-Kütle) yöntemi kullanılarak, böylece eksergoekonomik analiz tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, ekserji, verim, eksergoekonomi

ABSTRACT

EXERGoeconomic ANALYSIS OF WIND AND SOLAR ENERGY SYSTEMS

Yunus Emre AKKAYA

Department of Electical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ercan İZGİ

Because of the increasing energy demand, all over the World, countries have to improve their installed electricity capacity. Both environmental problems, global warming-air pollution, and risk of fossil fuel sources come to an end, makes renewable energy power plants more important than the others. Moreover, wind and solar energy systems are preferred more than the other renewable energy systems like wave energy, biomass energy, tides energy.

In this thesis, effects of meteorological variables on wind and solar system's energy and exergy efficiencies are researched. Energy and exergy efficiencies of wind and solar systems are calculated. After then with calculating energy and exergy destruction of wind and solar systems, destruction cost is searched by using the EXCEM (Exergy-Cost-Energy-Mass) method. So, exergoeconomic analysis of solar and wind systems is completed.

Key words: Energy, exergy, efficiency, exergoeconomy,

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Dünya genelinde enerji tüketiminin artması nedeniyle ülkeler mevcut kurulu elektrik enerjisi santrali güçlerini arttırmak zorunda kalmaktadırlar. Kurulan yeni santraller içinde yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santrallerin payı her geçen gün daha da artmaktadır. Bunun en büyük sebepleri bu santrallerin çevreye nerdeyse hiç zarar vermemeleri ve kullandıkları yakıtların tükenmemeleri olarak gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının içinden rüzgar ve güneş enerjisinin diğerlerine oranla daha çok kullanıldığını söylemek yanlış olmayacaktır. Bu iki enerji türünü kullanarak elektrik enerjisi üreten sistemler teknolojinin yardımıyla hem çeşitlendirilmekte hem de verimleri arttırılmaktadır.

Tez çalışmasının teorik alt yapısının oluşturulmasında (rüzgar enerjisinin tarihçesi, rüzgar enerjisinin Dünyada Avrupa'da ve Türkiye'de kullanım durumu, rüzgar enerjisinin avantajları ve dezavantajları, rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi, rüzgar türbinlerinin çeşitleri, güneş enerjisinin tarihçesi, güneş enerjisinin Türkiye'de kullanımı, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim yöntemleri, güneş pillerinin yapısı ve çeşitleri) [1-28] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır.

Tez çalışmasının analiz kısmında rüzgar türbinlerinin ve güneş pillerinin ekserji analizleri yapılmıştır. Ekserji analizi termodinamiğin ikinci yasasına dayalı olmakla birlikte var olan kullanılabilir enerjinin ne kadarının gerçek işe dönüştürüldüğü bulmaya yardımcı olmaktadır.

Bu amaçla ilk olarak rüzgar türbinlerinde ekserji analizi yapılmış bunun için İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan 1,5 kW'lık bir rüzgar türbininden alınan ölçüm verileri kullanılmıştır.

Rüzgar türbininde ekserji analizi için [38-43] aralığında verilen kaynaklar incelenmiştir. Rüzgar türbinlerinin verimi üstünde sadece rüzgar hızının değil, türbinin içinde bulunduğu atmosferik şartlarında etkili olduğu [38] ve [39] numaralı kaynaklarda belirtilmiştir. Bu nedenle rüzgar türbinleri ya da rüzgar çiftlikleri kurulurken, kurulum yapılacak bölgenin meteorolojik değerlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [40,42]. Ekserji analizi için gerekli olan formüller için [38] numaralı kaynaktan yararlanılmıştır.

Rüzgar türbinlerinin ekserji analizinden sonra güneş pillerinin ekserji analizi için [44] numaralı kaynak kullanılmıştır. Kullanılan kaynak çerçevesinde fotovoltaiik hücrelerin termodinamik karakteristikleri, ekserji perspektifi çerçevesinde araştırılmıştır. PV sistem ve komponentlerine ekserji analizi uygulanarak ekserji akışı, kayıplar ve verimler hesaplanmıştır.

Ekserji ve enerji analizleri sonucunda ekserji ve enerji kayıpları hesaplanmış ve bunların maliyeti araştırılmıştır. Yöntem olarak, sistemin ekserjisi, maliyeti, sisteme giren kütle akışı ve sistemin enerjisi arasında bir ilişki ortaya koyan EXCEM metodu uygulanmıştır. EXCEM metoduyla ilgili formüller ve bağıntılar için [45-48] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinin eksergoekonomik analizini yapmaktır. Bu amaç doğrultusunda her iki sistemin de ayrı ayrı enerji ve ekserji verimleri hesaplanacaktır. Hesaplamalar yapılırken meteorolojik şartların sistemlerin enerji ve ekserji verimleri üstündeki etkileri incelenecektir. Sistemlerde meydana gelen enerji ve ekserji kayıpları bulunarak, EXCEM yöntemi vasıtasıyla bu kayıpların maliyeti araştırılacaktır.

1.3 Hipotez

Enerji üretim sistemlerinin verim hesaplarında enerji verimi kullanılmaktadır. Bu yaklaşım kabul edilebilir olmasına rağmen gerçekçi değildir. Çünkü enerji verimi hesabında sistemin çevre ile olan ilişkisi (çevre faktörleri) göz önünde bulundurulmaz. Oysa sistemin etkileşimde olduğu çevre çalışma şartlarını değiştirmektedir. Ekserji verimi hesabında bahsedilen çevresel faktörlere yer verilir. Bu yüzden enerji üretim sistemlerini verim hesabında ekserji veriminin kullanılması sonucu bir adım daha gerçeğe yaklaştıracaktır.

BÖLÜM 2

RÜZGAR ENERJİSİ

2.1 Rüzgar Enerjisi

Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi özdeş ısıtmamasından oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgarı oluşturur. Rüzgar enerjisi ise; değişime uğramış güneş enerjisi olarak tanımlanabilir. Rüzgar enerjisi, rüzgarı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisidir. Bu enerjinin belli bir bölümü yararlı olan enerjiye (elektrik, pompalama, vs.) dönüştürülebilir.

Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanacak enerjinin miktarı, yine rüzgarın hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise, hızın küpü ile orantılı olarak artar. Sağlayacağı enerji; gücüne ve estiği süreye bağlıdır. Özgül rüzgar gücü, hava debisine dik olarak, birim yüzeye düşen güçtür. Topoğrafik koşullara bağlı olarak, rüzgarın yerden 50 metre yükseklikteki özgül gücü, rüzgarın hızı 3,5 m/s'den küçük iken 50 W/m²'den , 11,5 m/s'den büyük iken 1800 W/m²'den çok olabilir. Dünya yüzeyinin %27'sinde yıllık ortalama rüzgar hızının, yerden 10 m yükseklikte 5,1 m/s'den büyük olduğu saptanmıştır. Bu alan rüzgar enerjisi bakımından zengin olan bölgelerin toplamıdır [8].

2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi

Milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlanılan rüzgar enerjisi, denizlerde yelkenli gemilere, karalarda ise, yel değirmenlerine ve rüzgar millerine ana güç kaynağı

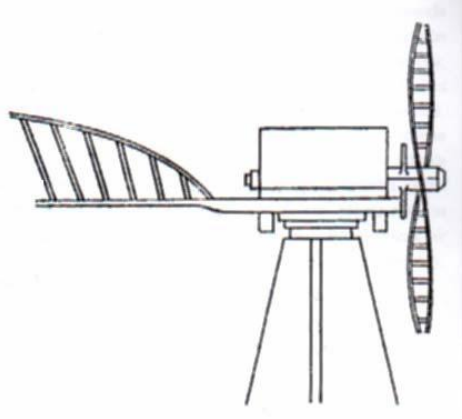
olmuştur. Özellikle buğday, mısır öğütme ve su pompalama gibi gereksinimler uzun yıllar bu yolla çözülmüştür.

Rüzgar enerjisi kullanımı, M.Ö. 2800'lü yıllarda Orta Doğu'da başlamıştır. M.Ö. 17. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Yel değirmenleri ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak haclı seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere'de yel değirmenlerinin kullanılmaya başlaması ise, 12. Yüzyılda olmuştur [8].



Şekil 2.1 Pers uygarlığında kullanılan bir yel değirmeni [9]

Tarımsal ürünleri öğütmek, su pompalamak, hızar çalıştırmak gibi amaçlarla geliştirilen yel değirmenleri; Avrupa'da Endüstri Devrimi'ne kadar hızla yayılmışlardır. 18. yüzyılın sonunda yalnızca Hollanda'da 10.000 yel değirmeni bulunuyordu. Buhar makinesinin yapılması ve odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanması ile, rüzgar enerjisi önemini yitirmeye başlamıştır. Bununla beraber, rüzgar türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler, 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır. Aynı dönemde, bu makinelerin geliştirilmesi için Almanya'da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Rüzgar kuvvet makineleri yerlerini yakıtlı kuvvet makinelerine bırakırken, rüzgar enerjisinin kullanımının sürmesi için yeni bir teknoloji de başlamıştır. Ancak, 19. yüzyılda geliştirilen ilk rüzgar türbinlerinin verimi düşüktü. [8]



Şekil 2.2 Muhtemelen tipinin ilk örneği olan ve Belidor tarafından tasarlanan pervane tipi rüzgar türbini [8]

1918 yılında Danimarka’da başlatılan bir çalışma ile 120 kırsal merkezde elektrik üretimini 20-30 kW’lık rüzgar türbinlerinin kullanımı sağlanmıştı. Rusya’da 1931 yılında 100 kW’lık rüzgar türbini yapılmıştı. 1941 yılında ABD’de Vermont yakınlarında Granpa’s Knop’da kurulan Putnam rüzgar türbini, 1250 kW gücü ile dönemin en büyük rüzgar kuvvet makinesi olmuştur. İki kanatlı rotorun çapı 53 m idi. Putnam türbini, modern rüzgar makinelerinin ilkidir (Şekil 2.3). Toplam ağırlığı 250 ton olan bu rüzgar santraline, bir milyon dolar yatırım yapılmıştı. Ancak titreşim ve malzeme yorgunluğundan dolayı, 26 Mart 1945 sabahı olan bir kazada kanatlarından biri kopmuş, yaklaşık 8 tonluk kanat 230 m uzağa fırlamıştır [8].



Şekil 2.3 Putnam rüzgar türbini [9]

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından 1945'de İngiltere'de başlatılan deneysel çalışmalar sonucunda, Enfeld'da 10 kW gücündeki Andreu makinesi kurulmuştur. Bu rüzgar türbininin rotoru üç kanatlı olup, çapı 15 metreydi. 1947 yılında Danimarka'da başlatılan ve modern yaklaşımlar içeren elektrik üretim amaçlı bir başka çalışmanın son ürünü ise, 1959 yılında işletmeye sokulan 200 kW'lık Gedser türbini olmuştur. Bu makinenin 24 metre çaplı rotoru üç kanatlı idi. Aynı dönemde Fransa'da yapılan makinelerden Noeget Le Roi'deki rüzgar türbini 300 kW gücündedir. Bu yıllardaki ilgi artışının sebepleri şu şekilde sıralanabilir [8].

- Hızla artan elektrik enerjisi talebi karşısında, ekonomik olarak geliştirilebilen hidroelektrik kaynakların yakıt tedarikinin yetersiz kalması
- Hidroelektrik santrallerinin ve buhar türbinlerinin oluşturulmasında, hem ilk yatırım sırasında, hem de enerjinin iletilmesi esnasında hızla artan yüksek maliyetler,
- Savaş sonrasındaki zor ekonomik ve politik koşullar nedeniyle, ülkelerin enerji üretiminde ithal yakıtlar yerine kendi öz kaynaklarına yönelmesi,
- Kömür ve petrol türevli kaynakların yakıt olarak kullanımının yüksek hızla artması ve dolayısıyla rezervlerin azalmaya başlaması,
- Savaş sırasındaki araştırma–geliştirme çalışmalarının sonucunda uçak konstrüksiyonlarında uygulanan aerodinamik bilgi birikiminin büyük bir oranda artması ve bu bilginin büyük rüzgar türbinlerinin konstrüksiyonu yolunda kullanılabilirliği,
- Yaygın enerji ağına farklı kaynaklardan enerji ve güç bağlanabilmesinin avantajlarının değerlendirilmesi,
- Rüzgar türbinleri ile ilgili denemelerin yapılması ve bu tip uygulamaların ekonomik bir tesis olarak başarılı olmamasına karşın, rüzgar enerjisinden faydalanarak elektrik üreten büyük tesislerin pratik olarak iyi bir performansla çalışabileceğinin kanıtlanması [8].

1961 yılında Roma'da Birleşmiş Milletler tarafından düzenlenen Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansı'nda ele alınan üç kaynaktan biri rüzgar enerjisiydi.

Böylece, çok eskiden bu yana tanınan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu. Ucuz petrol döneminde güncellik kazanmayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımları ardından gündeme daha çok girmiştir.

Rüzgar enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık eski tip rüzgar jeneratörleri yerine, modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) kurulmaktadır. Ayrıca rüzgar türbinleriyle beraber dizel motor ve güneş fotovoltaik jeneratörü içeren rüzgar-dizel-PV hibrid sistemler de geliştirilmiştir. Bir tüketiciyi besleyecek tek makine yerine, birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekeleri için üretim yapılır olmuştur. ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkıları sonucunda, deniz üstünde, kıyıdan uzakta rüzgar santralleri kurulmuştur [8].

2.3 Dünya Ve Avrupa'da Rüzgar Enerjisi Kullanımı

Günümüz dünyasının en önemli sorunlarından ikisi, artan enerji ihtiyacının karşılanması ve küresel ısınmadır. Ülkeler, artan enerji ihtiyaçlarına cevap verebilmek; Ancak bunu yaparken de mümkün olduğu kadar az küresel ısınmaya katkı sağlamak istemektedirler. Bu sebeplerden ötürü mümkün olduğu kadar yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanma eğilimindedirler. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisi üretimi, sebep olduğu az karbondioksit salınımıyla küresel ısınmaya katkı sağlamayarak dünyaya faydalı olurken, gelişen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisi üretiminde maliyetlerin düşmesi sayesinde ülke ekonomilerine katkı sağlamaktadır. Dünya genelinde son 15 yıl içinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilimin bir diğer sebebi ise fosil yakıt rezervlerinin ömrünün giderek azalmasıdır. Fosil yakıt rezervlerine tahmini olarak (şu anki rezerv miktarlarına göre) 50 yıl ömür biçilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ise en çok rağbet görenler rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi olmaktadır. Bu iki enerji türü içinden ise rüzgar enerjisi, güneş enerjisine göre bir adım önde ilerlemektedir. Bunun sebebi rüzgar enerjisi ile elektrik üretim santrallerinin kurulum, işletim ve bakım onarım maliyetlerinin güneş enerjisi ile elektrik üreten santrallere göre daha az olmasıdır.

Alternatif bir enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisinin kendini göstermesiyle birlikte, ülkeler kendi rüzgar potansiyellerinin ne kadarının teknik ve ekonomik açıdan kullanıma elverişli olduğunu saptamaya başlamışlardır. Bununla birlikte genel olarak Dünyanın rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesi oldukça zordur. Fakat NASA yaptığı çalışmalarla, dünyanın (50⁰ Kuzey ve Güney enlemleri arasındaki bölgede) rüzgar enerjisi teknik potansiyelini yaklaşık 26.000 TWh/yıl olarak tahmin etmektedir. Bu değer, dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının çok üstündedir. Bu potansiyelin tamamının kullanımı ekonomik, estetik ve fiziksel kısıtlamalar nedeniyle mümkün değildir. Bulunan değer %1'inin kullanılabilir hale getirildiği düşünülse bile, dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %10'u karşılanabilir. Bu şartlar altında bile, dünyadaki rüzgar enerjisi potansiyeli göz ardı edilmeyecek kadar büyüktür.

Daha öncede belirttiğimiz gibi son 15 yıl içinde rüzgar enerjisi kullanımı giderek artmıştır. Çizelgede 2.1' de ise 2008/2009 yılları arasında ülkelerin (MW cinsinden) mevcut kurulu rüzgar santrali kapasiteleri, yeni kurulan rüzgar santrallerinin kapasiteleri, bölgelere/kıtalara göre toplam rüzgar santrali kapasiteleri ve son olarak dünya genelinde toplam kurulu rüzgar santrali kapasite gücü görülmektedir.

Çizelge 2.1 2008/2009 dönemi dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi [10]

2008/2009 Dönemi Dünya Kurulu Rüzgar Gücü Kapasitesi				
AFRİKA/ORTADOĞU		2008 sonu	2009 Yeni kurulan	2009 sonu
	MISIR	365	65	430
	FAS	134	119	253
	İRAN	85	7	91
	TUNUS	20	34	54
	YEŞİL BURUN ADALARI	12	0	12
	GÜNEY AFRİKA	8	0	8
	İSRAİL	8	0	8
	KENYA	0	5	5

Çizelge 2.1 2008/2009 dönemi dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi (devam) [10]

AFRİKA/ORTADOĞU	DİĞERLERİ ¹	4	0	4
	TOPLAM	635	230	865
ASYA	ÇİN	12104	13000	25104
	HİNDİSTAN	9655	1271	10926
	JAPONYA	1180	178	2056
	TAYVAN	358	78	436
	GÜNEY KORE	236	112	348
	FİLİPİNLER	33	0	33
	DİĞERLERİ ²	6	0	6
	TOPLAM	24272	14639	38909
AVRUPA	ALMANYA	23903	1917	25777
	İSPANYA	16689	2459	19149
	İTALYA	3736	1114	4850
	FRANSA	3404	1088	4492
	BİRLEŞİK KRALLIK	2974	1077	4051
	PORTEKİZ	2862	673	3535
	DANİMARKA	3163	334	3465
	HOLLANDA	2225	39	2229
	İSVEÇ	1048	512	1560
	İZLANDA	1027	233	1260

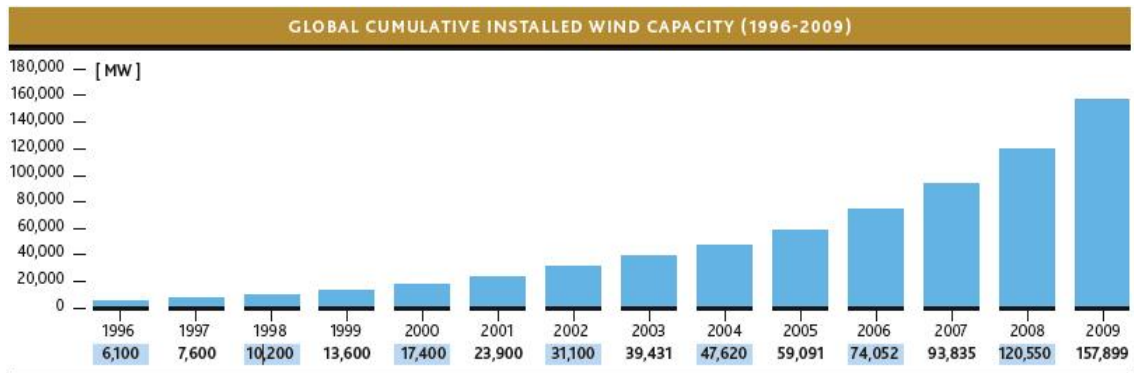
Çizelge 2.1 2008/2009 dönemi dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi (devam) [10]

AVRUPA	YUNANİSTAN	985	102	1087
	AVUSTURYA	995	0	995
	TÜRKİYE	458	343	801
	POLONYA	544	181	725
	BELÇİKA	415	149	563
	DİĞERLERİ ³	1313	304	1614
	TOPLAM	65741	10526	76152
LATİN AMERİKA/KARAYİPLER	BREZİLYA	341	264	606
	MEKSİKA	85	117	202
	ŞİLİ	20	148	168
	COSTARİKA	74	50	123
	NİKARAGUA	0	40	40
	KARAYİPLER	35	0	35
	ARJANTİN	29	2	31
	URUGUAY	20	0	20
	JAMEİKA	22	1	23
	KOLOMBİYA	20	0	20
	DİĞERLERİ ⁴	6	0	6
	TOPLAM	653	622	1274

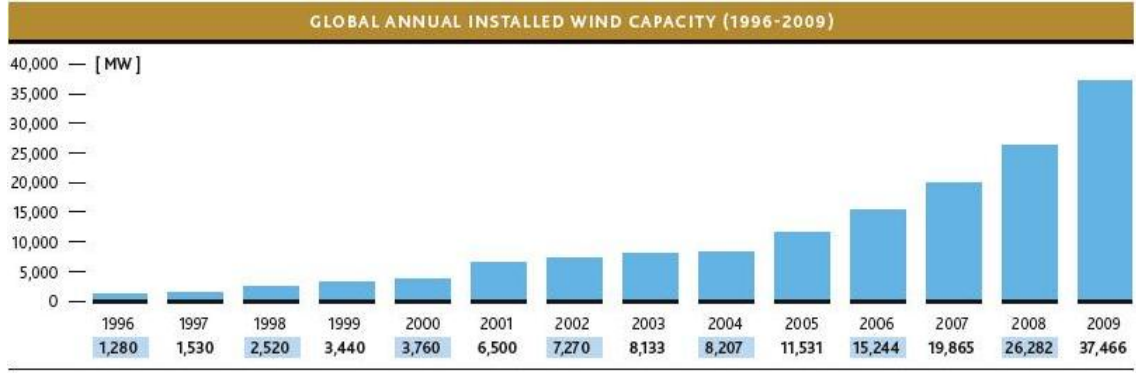
Çizelge 2.1 2008/2009 dönemi dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi (devam) [10]

KUZEY AMERİKA	AMERİKA	25237	9922	35159
	KANADA	2369	950	3319
	TOPLAM	27606	10872	38478
PASİFİK BÖLGESİ	AVUSTURALYA	1306	406	1712
	YENİ ZELLANDA	325	171	497
	PASİFİK ADALARI	12	0	12
	TOPLAM	1643	577	2221
DÜNYA GENELİNDE		120550	37466	157899

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5 bize 2009 yılı itibariyle sırasıyla dünya rüzgar kurulu güçlerini ve yıllara göre kurulan rüzgar santrali güçlerini göstermektedir. Şekil 2.4'e detaylı bir şekilde bakacak olursak 1996 yılında dünya genelinde rüzgar santrali kurulu gücü 6100 MW iken, 2009 yılına geldiğimizde yüzde 2488,5 artarak 157899 MW olmuştur. Bu durum bize geçen 13 yıl içerisinde rüzgar enerjisine verilen önemi göstermektedir.

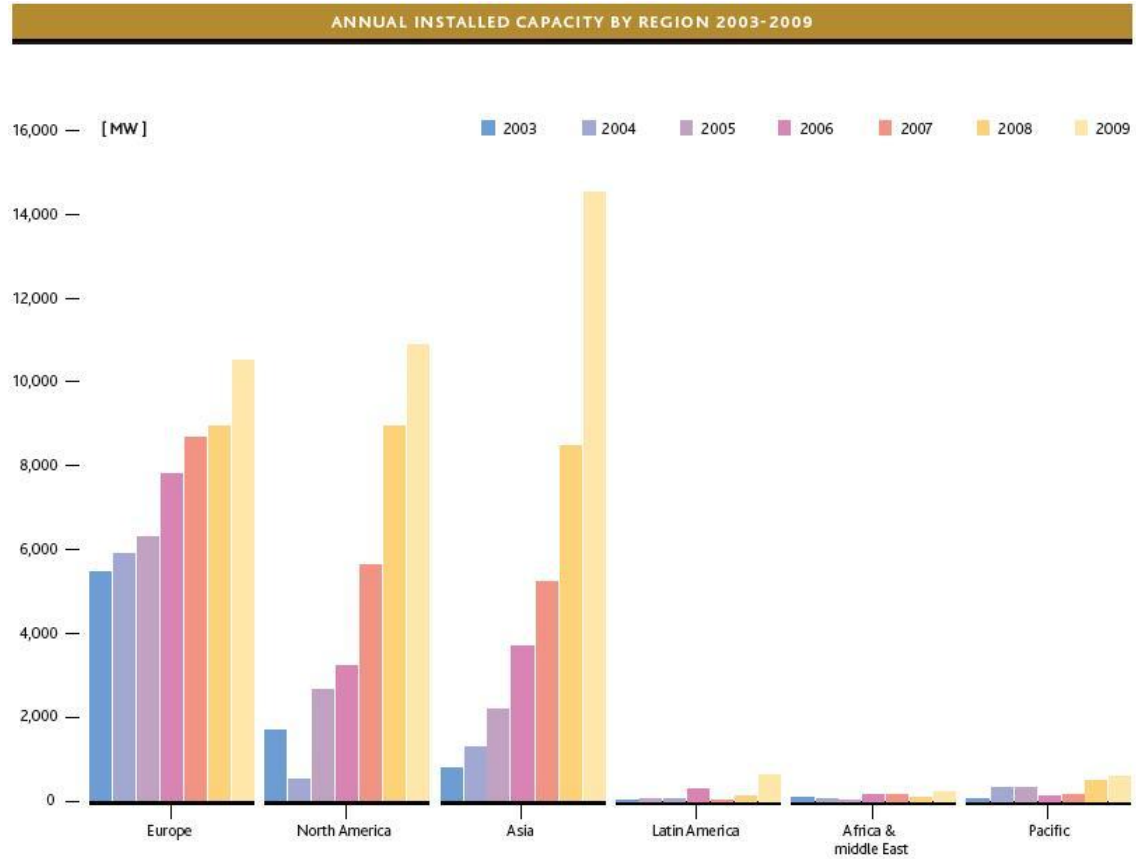


Şekil 2.4 1996-2009 yılları arasında kümülatif olarak dünya kurulu rüzgar kapasitesi [10]



Şekil 2.5 1996-2009 yılları arasında dünya yıllık rüzgar kapasiteleri [10]

Şekil 2.5'e bakacak olursak 1996-2009 yılları arasında yıllara göre kurulan rüzgar santrali güçlerini görmekteyiz. 1996 yılında 1280 MW kapasitede yeni rüzgar santrali kurulurken 2009 yılına doğru geldiğimizde bu değer artarak 37466 MW olmuştur. Şekildeki artış miktarlarına bakacak olursak özellikle 2004 yılından sonra bir sıçrama meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 2.6 2003-2009 yılları arası bölgelere göre yıllık kurulan kapasite güçleri [10]

Şekil 2.6'yı inceleyecek olursak, 2003-2009 yılları arasında bölgelere göre yıllık olarak kurulan rüzgar enerjisi santrallerinin güçleri görülmektedir.

Avrupa kıtasının rüzgar enerjisi konusunda diğer kıta ve bölgelere göre daha erken bilinçlendiği söylenebilir. Çünkü 2003 yılında Avrupa genelinde diğer bölgelere oranla daha yüksek güçte rüzgar enerjisi santrali kurulmuştur. Daha sonra ilerleyen yıllarla beraber Kuzey Amerika ve Asya bölgelerinin de hızlı bir atılım yaparak rüzgar enerjisinden daha çok faydalanmaya başlamışlardır. Son olarak genel bir eğilim olarak dünyada rüzgar enerjisi kullanımının gittikçe arttığı görülmektedir.

Daha önce verilen çizelge ve şekiller de son yıllarda dünya genelinde rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin önemi açıkça gösterilmektedir. Dünya genelinden sonra biraz daha detaylı inceleme için Avrupa genelinde rüzgar enerjisinin geldiği son durum şu şekilde değerlendirilebilir.

Rüzgar enerjisinin önem kazanmasıyla birlikte ülkeler hatta siyasi birlikler, (Avrupa Birliği gibi.) gelecek yıllar için enerji politikalarını ve enerji planlarını belirlerken rüzgar santrallerini göz önünde bulundurmakta ve gelecek yıllar için hedefler belirlemektedirler. Avrupa Birliği rüzgar sanayi gelecek yıllar için hedeflerini şu şekilde belirlemiştir;

AB rüzgar sanayi 2010 hedefleri:

- 75,000 MW kurulu güç, 10,000 MW offshore dahil
- Avrupa elektriğinin % 5.5 ini üretmek
- Yıllık 167 TWh elektrik üretimi
- % 28 toplam yeni üretim kapasitesi
- Avrupa toplam üretim kurulu gücünün % 10.6'sı kadar rüzgar kurulu gücü
- 34 milyon konut ve 86 milyon nüfusun ihtiyacına karşılık gelen rüzgar üretimi
- 49 milyar Euroluk yatırım (2001-2010)
- AB Yenilenebilir Enerji Direktifi hedefinin % 50 sini karşılamak
- AB Kyoto Protokolü yükümlülüğünün % 30 dan fazlasını karşılamak
- 13.2 milyar Euro tutarında toplam yakıt maliyeti tasarrufu
- Yılda 109 milyon ton CO₂ sakınımı

- Yılda 1.8 – 4.6 milyar Euro tutarında dış maliyet sakınımı
- 523 milyon ton toplam CO₂ sakınımı
- Toplam 9.4 – 24 milyar Euro tutarında dış maliyet sakınımı
- 2000 yılındaki rüzgar hedeflerinde % 25 artış sağlamak [11]

AB rüzgar sanayi 2020 hedefleri:

- 180,000 MW Kurulu güç, 70,000 MW offshore dahil
- Avrupa elektriğinin % 12,1 ini üretmek
- Yıllık 425 TWh elektrik üretimi
- % 37 toplam yeni üretim kapasitesi (2010-2020)
- Avrupa toplam üretim kurulu gücünün % 21 i kadar rüzgar kurulu gücü
- 85 milyon konut ve 195 milyon nüfusun ihtiyacına karşılık gelen rüzgar üretimi

Rüzgar enerjisinin konumsal ve teknolojik maliyeti giderek düşmektedir. 2030 yılında rüzgar enerjisi güvenilir ve kWh başına rekabet maliyetli olarak modern ana enerji kaynaklarından biri olacaktır. Rüzgar enerjisi sektörüne şu parametreler yön verecektir:

- İklim değişikliği etkileri;
- Petrol ve gaz tükenmesi;
- Yakıtlarda yüksek maliyetler ve yakıt teminindeki belirsizlikler;
- CO₂ salma fiyatları ve sürdürülebilirlik.

Gelişmeler mevcut kapsam olan dağıtık enerji, karbon azaltma ve küreselleşme içinde olacaktır. Rüzgar enerjisinde üç aşamalı gelişme beklenmektedir:

Aşama 1: Kısa dönem (2020) – Batı Avrupa pazarı büyür, merkezi ve doğu Avrupa gelişir. İşçi maliyeti düşük ülkelerde daha hızlı bir gelişme olur. Büyük ölçekli deniz rüzgar santralleri baslar. Avrupa Kurulu gücü 40 GW deniz rüzgar dahil olmak üzere 180 GW seviyesine ulaşır.

Aşama 2: Orta dönem (2020-2030) – Kara ve deniz rüzgar olmak üzere tüm rüzgar enerjisi uygulamaları büyümeyi sürdürür.

Ana gelişmeler maliyet düşürme ve yüksek üretim teknolojilerinde olur. Endüstriyel ölçekli derin deniz rüzgar teknolojileri gelişir. Avrupa'nın ihracatı büyür. Avrupa Kurulu güç kapasitesi 300 GW ve 7.5 GW mevcut santrallerde türbin

yenileme olmak üzere yıllık kurulum 20 GW seviyesine ulaşır.

Aşama 3: Uzun dönem (2030-2050) – Avrupa'da ana pazarlar deniz rüzgar ve türbin yenileme olur. Avrupa'nın ihracatı artar.

Avrupa endüstrisi küresel pazarın lideri olmaya devam edecektir. Gelecekteki elektrik talebine bağlı olarak, yılda yaklaşık 600 Mt CO₂ azaltma sağlayarak, 300 GW miktara karşılık gelen AB elektrik tüketiminin % 25 kadarı rüzgârdan karşılanacaktır. Bu durum Avrupa'da optimal endüstriyel genişlemeyle desteklenecektir.

Avrupa enerji pazarı iletim ve üretim faaliyetlerinin tam olarak ayrılması, daha büyük inter-konnektörler, bir etkili toptan piyasası ve çok iyi işlevli dengeleme ile daha iyi bir şekilde entegre olacaktır. Bunu gerçekleştirmek için, dört alan tanımlanmıştır: rüzgar durumu, rüzgar türbin teknolojisi, rüzgar enerjisi entegrasyonu ve deniz rüzgar geliştirme ve işletme.

Rüzgar durumu: Herhangi bir rüzgar santralinin (düz arazi, karmaşık arazi veya deniz) coğrafik koordinatları verilerek aşağıdakilere göre % 3 den az bir belirsizlikle ön-hesaplamalar yapılabilecek şekilde mevcut teknikler geliştirilmek durumundadır:

- Yıllık enerji üretimi (kaynak);
- Türbin tasarımını etkileyecek rüzgar durumu;
- Üretim ve rüzgar durumu için bir kısa dönem tahmin yapısı.

Rüzgar güç sistemleri: 2030 yılına kadar, rüzgar enerjisinin pazardaki en maliyet-etkin enerji kaynağı olmasına yönelik araştırmalar öncelikli olacaktır. Bu hedef endüstrinin yüksek maliyet-etkinlikli rüzgar türbinleri üretmesi ile yakalanabilecektir.

Rüzgar entegrasyonu: Büyük-ölçekli rüzgar entegrasyonu üzerinde odaklanılacaktır. Amaç sistem güvenilirliğini (elektrik arz güvenliği) korurken düşük maliyetlerle yüksek rüzgar entegrasyonu olacaktır.

Deniz rüzgar geliştirme ve işletme: Hedef şunları gerçekleştirmektir:

- Avrupa elektrik talebinin % 10 dan fazlasını deniz rüzgar ile karşılamak
- Deniz rüzgar üretim maliyetlerini diğer elektrik üretim kaynakları ile rekabet edebilir hale getirmek
- Kıydan herhangi bir uzaklıkta 50 m su derinliğine kadar sahalarda ticari olarak uygun teknoloji
- Daha derin sahalarda ispatlanmış tam-ölçekli demonstrasyon

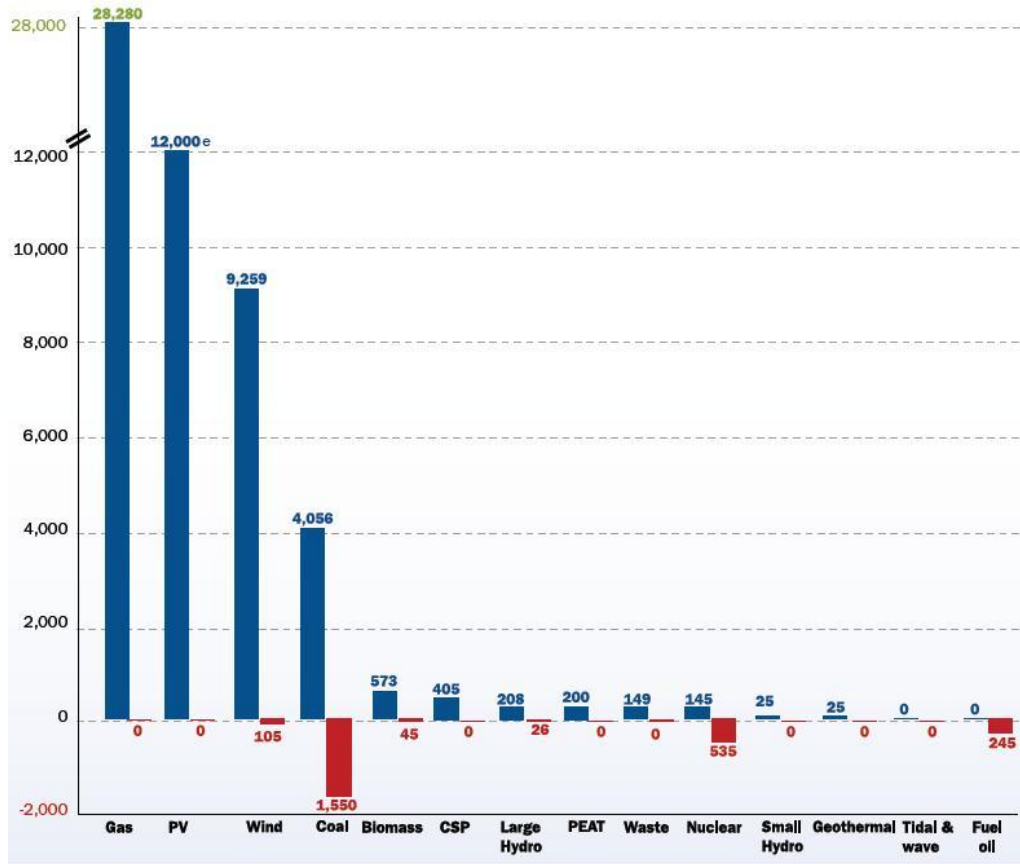
Bu 2030 hedeflerini tutturmak ve büyük-ölçekli rüzgar enerjisi kurmak için kararlı ve iyi tanımlanmış Pazar desteği, politika ve çevre zorunludur. Pazar Geliştirme Stratejisinde şu alanlar dikkate alınmıştır:

- Pazar gelişimini mümkün kılmak
- Maliyet düşürme
- Politikaların uyarlanması
- İdari işlemlerin optimizasyonu [11]

Hedefleri gerçekleştirmek için yapılan çalışmalar sonucunda Avrupa kıtasında bulunan ülkelerin, rüzgar santralleri kurulu güçleri 2010 yılı sonu itibariyle Şekil 2.7’de gösterildiği gibi olmuştur.

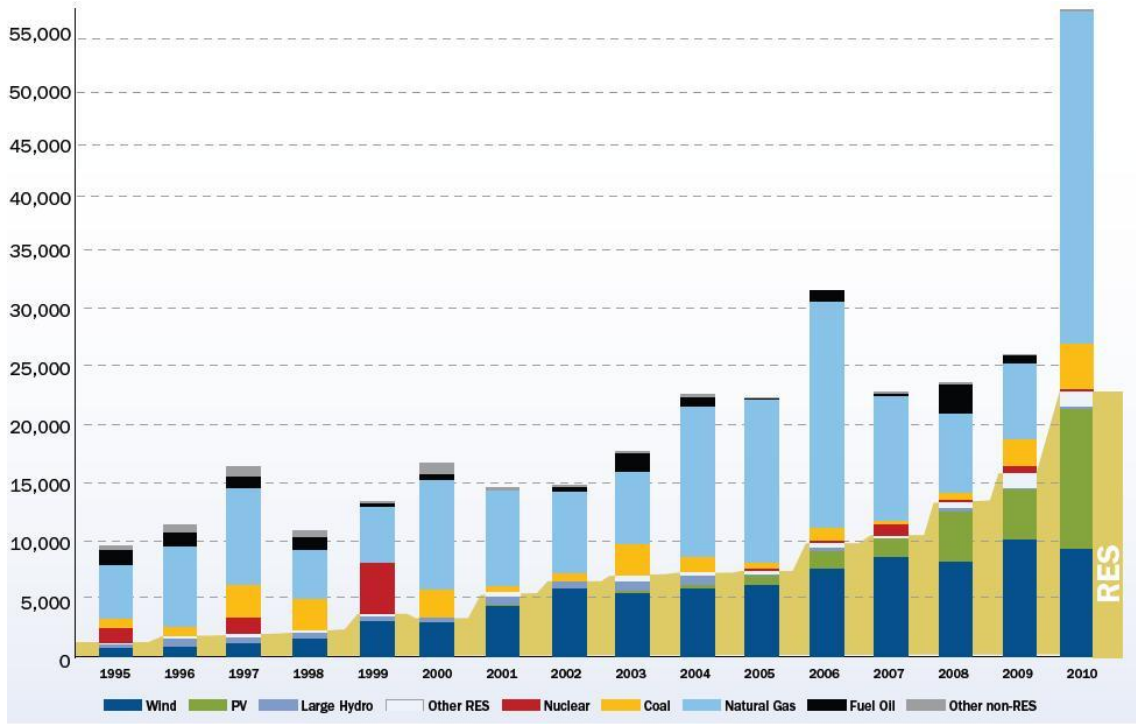


yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santrallere yönelmektedirler. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'u inceleyecek olursak bu durum açıkça görülmektedir.



Şekil 2.8 Avrupa’da 2010 yılında devreye alınan ve devreden çıkarılan santral güçleri [10]

Şekil 2.8’ de 2010 yılında Avrupa’da devreye alınan yeni enerji santrallerinin gücü ve kullandıkları yakıtlar ile devreden çıkarılan enerji santralleri gösterilmektedir. Şekli incelediğimizde kömür, fuel-oil ve nükleer yakıt kaynaklı santrallerin devreden çıkarıldıklarını ve bunların yerine aynı yakıt tabanlı yeni enerji santrallerinin tercih edilmediğini fark ediyoruz. Fosil yakıtlı santraller yerine özellikle rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji tabanlı santraller tercih edilmektedir. 2010 yılı içinde Avrupa’da kurulan 55326 MW’lık yeni güç kapasitesinin, 22645 MW’ını (yani %41’ini) yenilenebilir enerji santralleri oluşturmaktadır.

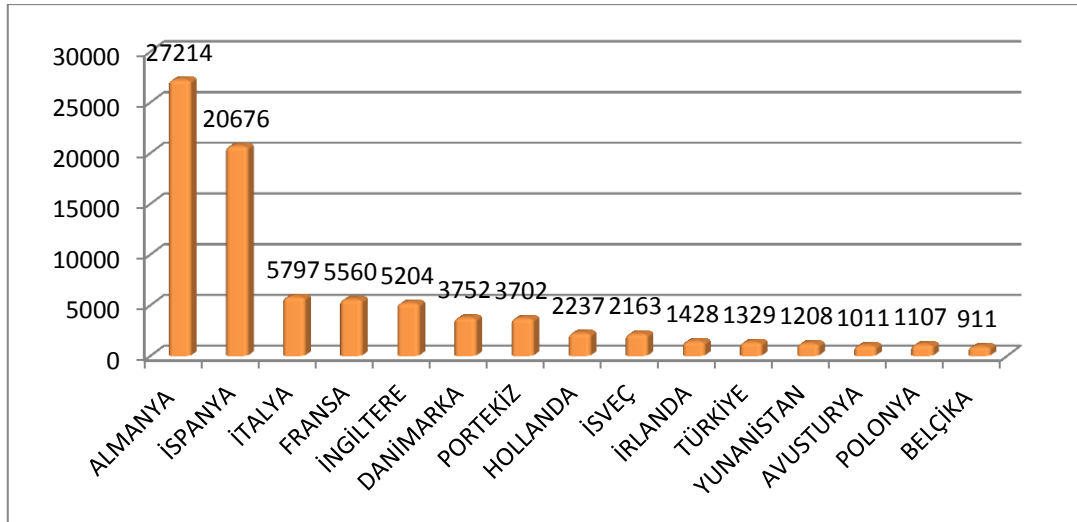


Şekil 2.9 1995-2010 yılları arasında kurulan santrallerin çeşitleri ve güçleri(MW) [10]

Şekil 2.9’da ise 1995-2010 yılları arasında kurulan santrallerin çeşitleri ve güçlerini görmekteyiz. 1995 yılında nükleer, doğal gaz, kömür ve fueloil gibi daha çok fosil yakıt tabanlı enerji santralleri kurulurken günümüze doğru geldiğimizde bu durumun değiştiğini, yenilenebilir (rüzgar, güneş, biokütle, atık, jeotermal) enerji santrallerinin tercih edildiğini görmekteyiz. Bu yenilenebilir enerji santralleri içerisinde ise en yüksek payın rüzgar enerjisine ait olduğu açıkça görülmektedir ki bu durum bize rüzgar enerjisinin ne kadar önemli olduğunu bir kez daha anlatmaktadır.

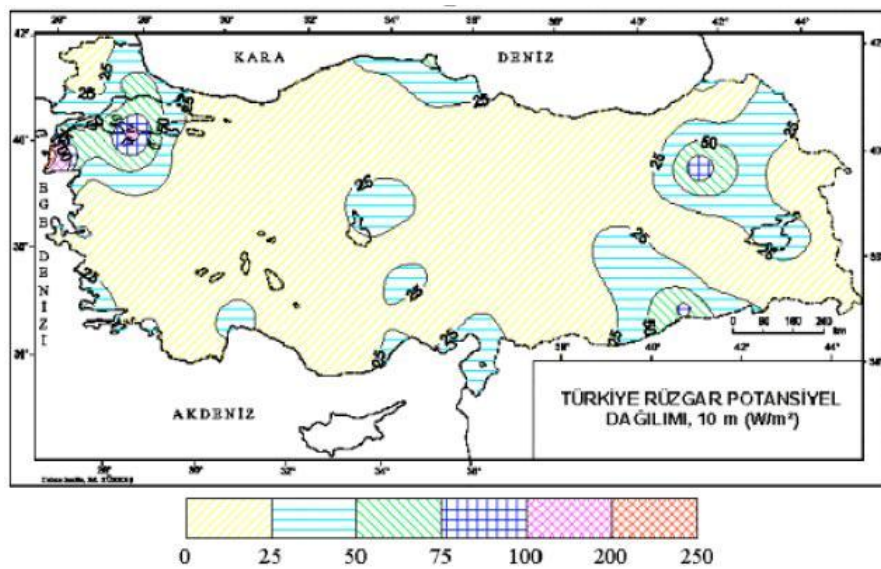
2.4 Türkiye’nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Türkiye, rüzgar potansiyeli bakımından oldukça avantajlı bir ülkedir. Türkiye’de rüzgar enerjisinden elektrik üretimi konusunda ilk sistem 1985 yılında Danimarka’dan ithal edilip İzmir-Çeşme Altın yunus Turistik tesislerinde kurulan 55 kW gücündeki rüzgar türbinidir. Üç kanatlı yatay eksenli bu türbinden üretilen elektrik enerjisi adı geçen tesiste tüketilmektedir [1]. Türkiye, şu an itibarıyla kurulu güç kapasitesi büyüklüğü bakımından Avrupa’nın 12. sırasında yer almaktadır. Şekil 2.10’da Avrupa rüzgar gücü kapasitesi bakımından ilk 15 ülke gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Avrupa rüzgar kurulu gücü kapasitesi bakımından ilk 15 ülke

Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesinin rüzgar gücü yoğunluğu ve ortalama rüzgar hızları verilmiştir. Şekil 2.10' a göre, Marmara Bölgesi rüzgar gücü bakımından en zengin bölgemizdir. Marmara bölgesini, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Ege Bölgesi izler. 10 m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu açısından en yüksek değer 3.29 m/sn ve 51.91 W/m² ile Marmara Bölgesi 'nde saptanmıştır. En düşük değer ise, 2.12 m/sn hız ve 13.19 W/m² güç yoğunluğu ile Doğu Anadolu Bölgesi 'ndedir. Türkiye 'nin %64.5 'inde rüzgar enerjisi güç yoğunluğu 20 W/m² 'yi aşmazken, %16.11 'inde 30-40 W/m² arasında, %5.9 'unda 50 W/m² 'nin ve %0.08 'inde de 100 W/m² 'nin üzerindedir [2].



Şekil 2.11 Türkiye'nin rüzgar potansiyeli [3]

Türkiye 'nin rüzgar potansiyeli tam olarak belirlenememiş olsa da, brüt potansiyelinin yılda 400 milyar kWh, teknik potansiyelinin ise 120 milyar kWh olduğu düşünülmektedir. Söz konusu teknik potansiyel yıllık elektrik üretiminin 1,2 katıdır. Ancak, Türkiye genelinde 10 m yükseklikteki rüzgar yoğunluğunun alansal ve zamansal dağılımı ile teknolojik kısıtlamalar göz önünde tutulduğunda, güvenilir rüzgar enerjisi potansiyeli 12 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmaktadır. [2]

Rüzgar enerjisi potansiyelinin gerçeğe daha yakın olarak tahmin edilebilmesi için, en azından Türkiye coğrafyasında homojen bir dağılım gösteren uygun sayıda rüzgar ölçüm istasyonunun kurulması ve rüzgar atlası istatistiklerinin hesaplanması gerekmektedir. Çizelge 2.3 'te, Türkiye 'de rüzgar enerjisi kullanımının geleceği ile ilgili tahmin değerleri verilmiştir [4].

Çizelge 2.2 Türkiye 'de rüzgar enerjisinin geleceği ile ilgili tahmin değerleri [4]

Yıllar	Kurulu rüzgar enerjisi gücü (MW)	Ortalama rüzgar elektriği üretimi (milyon kWh)	Türkiye elektrik enerjisi tüketimi (milyar kWh)	Tüm elektrik enerjisi tüketimindeki payı (%)
2000	300	675	135	0,5
2005	1359	3058	200	1,53
2010	2979	6703	290	2,31
2015	5142	11570	398	2,91
2020	7849	17660	547	3,23
2023	9733	21900	639	3,43
2025	11200	25200	710	3,55

Çizelge 2.3 Rüzgar enerjisi potansiyelinin Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerine göre dağılımı [8]

Bölge İsmi	Ortalama Rüzgar Enerjisi Yoğunluğu (W/m^2)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Akdeniz	21.36	2.45
İç Anadolu	20.14	2.46
Ege	23.47	2.65
Karadeniz	21.31	2.38
Doğu Anadolu	13.19	2.12
Güney Doğu Anadolu	29.33	2.69
Marmara	51.91	3.29

Çizelge 2.4 Rüzgar enerjisi açısından en zengin bölgeler [8]

İstasyon İsmi	Ortalama Rüzgar Enerjisi Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Bandırma	152.6	5.1
Antakya	108.9	4.5
Kumköy	82	4.1
Mardin	81.4	4.1
Sinop	77.9	4.1
Gökçeada	74.5	4
Çorlu	72.3	4
Çanakkale	71.2	3.9

2.5 Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Kullanımı

Gelişmiş ülkelerde kişi başına düşen yıllık enerji tüketimi 6000 ile 7000 kWh olarak değişmektedir. Türkiye’de bu rakam, yaklaşık 1700 kWh’tir. Bu enerjinin gelişmiş ülkeler seviyesine getirilmesi ve artan gereksinimi karşılayabilecek düzeye gelmesi için, Türkiye’nin yenilenebilir enerjiler konusunda ilgi göstermesi kaçınılmazdır. Türkiye’nin rüzgar enerjisi ile ilgilenmeye başlaması büyük ölçüde 1990’lı yılların ortalarına rastlar. Türkiye’nin enerji darboğazına girebileceği, bunun içinde yenilenebilir enerji kaynaklarına gereksinimi olacağı düşüncesiyle birlikte rüzgar jeneratörlerinin devreye girmesine yönelik çalışmalara başlandı. Bu çerçevede 7. Beş Yıllık Kalkınma Planı Genel Enerji Özel İhtisas Komisyonu raporunda;

1995.....1 MW prototip rüzgar santrali

2000.....10 MW

2005.....20 MW

2010.....50 MW değerleri hedeflenmiştir.

Kısa sürede 19 MW’lık kurulu güce ulaşan Türkiye, önümüzdeki 10 yıl içerisinde elektriğin %5’inin yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi ile sağlanmasını düşünmektedir. Bununla başlangıçta öngörülen %2’lik hedefin 2 katından fazlasına ulaşılmaktadır. Dünyadaki gelişmelere koşut olarak, 2020 yılında Türkiye’de tüketilmesi beklenen elektrik enerjisinin %10’unun rüzgârdan karşılanması hedeflenecek olursa, 54

milyar kWh rüzgar elektriği üretmek gerekecektir. Bunun için gerekli kurulu rüzgâr gücü 20 bin MW olup, Türkiye'nin ekonomik rüzgâr potansiyeline karşılık gelmektedir [19].

Rüzgâr enerjisinin diğer kaynaklara göre daha avantajlı olması, son yıllarda EİE (Elektrik İşleri Etüt İdaresi)'nin ve birçok özel sektör kuruluşunun yapmış olduğu ölçüm çalışmalarıyla ortaya çıkan yararlanma potansiyellerinden anlaşılmaktadır.

Bu durum ve rüzgar enerjisi konusundaki teknolojik gelişmeler, Türkiye'de de rüzgar enerjisinden yararlanmaya yönelik ortamı hazırlamıştır. Bunun sonucu olarak bir çok özel kuruluş çeşitli rüzgar potansiyeli belirleme ve olabilirlik çalışmaları yaparak rüzgar santrali kurup işletmek için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na başvurmuştur.

Bu başvurular sonucunda Türkiye' de kurulu ve kurulmakta olan rüzgar santralleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2.5 Türkiye'de kurulu bulunan ve kurulması planlanan rüzgar enerji santralleri [12]

Şirket	Mevki	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Türbin Adet Ve Kapasitesi
Alize A.S.	İzmir-Cesme	1998	1,50	3 adet 500 Kw
Gucbirliği A.S.	İzmir-Cesme	1998	7,20	12 adet 600 kW
Bores A.S.	Canakkale-Bozcaada	2000	10,20	17 adet 600 kW
Sunjut A.S.	İstanbul-Hadımköy	2003	1,20	2 adet 600 kW
Yapısan A.S.	Balıkesir-Bandırma	I/2006	30,00	20 adet 1.500 KW
Ertürk A.S.	İstanbul-Silivri	II/2006	0,85	1 adet 850 kW
Mare A.S.	İzmir-Çesme	I/2007	39,20	49 adet 800 kW
Deniz A.S.	Manisa-Akhisar	I/2007	10,80	6 adet 1.800 kW
Anemon A.S.	Çanakkale-İntepe	I/2007	30,40	38 adet 800 kW

Çizelge 2.5 Türkiye’de kurulu bulunan ve kurulması planlanan rüzgar enerji santralleri
(devam) [12]

Doğal A.S.	Çanakkale- Gelibolu	II/2007	14,90	13 x 800 kW+ 5 x 900 kW
Deniz A.S.	Hatay- Samandağ	I/2008	30,00	15 adet 2.000 kW
İnnores A.S.	İzmir-Aliaga	I/2008	42,50	17 adet 2.500 kW
Lodos A.S.	İstanbul- Gaziosmanpasa	I/2008	24,00	12 adet 2.000 kW
Erturk A.S.	İstanbul-Catalca	I/2008	60,00	20 adet 3.000 kW
Baki A.S.	Balıkesir-Samlı	II/2008	90,00	
İŞLETMEDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			433,35	
Ayen A.S.	Aydın-Didim	I/2009	31,50	2.100 kW
Ezse Ltd. Sti.	Hatay- Samandağ	II/2009	35,10	900 kW
Ezse Ltd. Sti.	Hatay- Samandağ	II/2009	22,50	2.500 kW
Rotor A.S.	Osmaniye- Bahce	II/2009	135,00	54 adet 2.500 kW
Mazı3 A.S.	İzmir - Çesme	II/2009	22,50	9 adet 2500 kW
Kores A.S.	İzmir - Çesme	II/2009	15,00	2.500 kW
Soma A.S.	Manisa-Soma	II/2009	140,80	176 adet 800 kW
İNŞA HALİNDEKİ KAPASİTE TOPLAMI			402,40	
Alize A.S.	Balıkesir-Susurluk		19,00	17 x 800 kW + 6 x 900 kW
Borasco A.S.	Balıkesir- Bandırma		45,00	15 adet 3000 kW
Alize A.S.	Tekirdağ-Sarkoy		28,80	14 x 2000 kW + 1 x 800 kW

Çizelge 2.5 Türkiye’de kurulu bulunan ve kurulması planlanan rüzgar enerji santralleri
(devam) [12]

Alize A.S.	Balıkesir-Havran		16,00	8 adet 2000 kW
Alize A.S.	Çanakkale-Ezine		20,80	10 x 2000 kW + 1 x 800 kW
Belen A.S.	Hatay-Belen		30,00	10 adet 3000 kW
Alize A.S.	Manisa-Kırkağac		25,60	32 adet 800 kW
Boreas A.S.	Edirne-Enez		15,00	6 adet 2.500 kW
Doruk A.S.	İzmir-Aliğa		30,00	15 adet 2.000 kW
Yapısan A.S.	İzmir-Aliğa		90,00	36 adet 2500 kW
Doğal A.S.	İzmir-Aliğa		30,00	15 adet 2000 kW
Doğal A.S.	İzmir-Foca		30,00	15 adet 2000 kW
Poyraz A.S.	Balıkesir-Kepsut		54,90	61 adet 900 kW
Bilgin A.S.	Manisa-Kırkağac		90,00	36 adet 2500 kW
Bares A.S.	Balıkesir-Kepsut		142,50	57 adet 2500 kW
TÜRBİN TEDARİK SÖZLEŞMESİ İMZALI PROJE TOPLAMI			667,60	
GENEL TOPLAM			1.503,35	

Bu projelerin hayata geçememesindeki en önemli sorunlardan bir tanesi, alt yapı sorunudur. Bu sorun, rüzgar potansiyeli olan yörelerdeki elektrik şebekelerinin, kurulacak bu güçleri taşıyacak kapasiteye henüz erişmemiş olmasıdır. Devletin bu konuda rüzgar enerjisi yatırımlarına paralel olarak, şebeke kapasitelerini attırması gerekmektedir. Bu sorun yeni kurulacak veya kurulmakta olan hidroelektrik ve şebeke

bağlantılı doğalgaz santralleri için de geçerlidir. Elektrik üretim ve dağıtımının özelleştirildiği; elektrik üretiminin yaygınlaştığı ve teşvik gördüğü bu dönemde devlete düşen en büyük görev, mevcut hat kapasitelerinin arttırılması için gerekli önlemlerin zamanında alınmasıdır. Ayrıca 2020 yılında tüketilecek olan elektriğin %10' unun karşılanması için;

- Türkiye'de rüzgar gücü tesisi için uzun vadeli hedefler konmalıdır.
- Halen yenilenebilir enerji kaynakları ve enerjinin etkin kullanımını cezalandıran; kömür, akaryakıt ve doğalgaza sağlanan teşvikler ve sübvansiyonlar kaldırılmalıdır.
- Enerji sektörüne ilişkin kararlar alınırken fosil ve nükleer güç santrallerinin neden olduğu toplumsal maliyetler ekonomik fizibilite çalışmalarında hesaba katılmalıdır.
- Şu anda dünya santrallerinde çalışmakta olan eskimiş ve değiştirilecek türbinlerin, ülkemize getirilip bu konuda bir rüzgar türbini çöplüğü oluşturmak yerine, yeni ve son teknoloji türbinler kullanılmalıdır.

2.6 Rüzgar Enerjisinin Avantajları

Temiz, çevreyi kirletmeyen, yakıt maliyeti olmayan bir enerjidir. İngiltere'de geçen sene 1007 adet türbin kullanılarak elde edilen 557,5 MW'lık güç ile üretilen elektrik enerjisi ile 365.000 adet hanenin enerji ihtiyacı karşılanmış olup bu sayede 1.260.000 ton CO₂, 14.600 ton SO₂, 4400 ton NO_x tasarrufu yapılmıştır. Tüm dünyada 2005 yılında sadece CO₂ tasarrufunun 69 milyon ton olacağı hesaplanmaktadır [13]. Dış maliyet denilen bu maliyet bugün hiçbir biçimde 1-1,25 cent/kWh' ten az değildir.

Rüzgar türbinleri enerji hatlarının ulaşmadığı uzak noktalarda kurularak bu tip yerlerin enerji ihtiyacı karşılanabilir. Rüzgar enerjisinde ham madde ulaştırma masrafı yoktur. Doğadaki rüzgar direkt olarak kullanılabilir.

Rüzgar türbinleri karmaşık makineler değildir. Gayet basit bir şekilde operatöre ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilmektedirler. Tamamen otomatik olarak çalışabilecek şekilde dizayn edilmişlerdir. Ayrıca periyodik bakımlarının yapılması durumunda 20-30 yıla yakın çalışabilmektedirler.

Rüzgar türbinleri, patlama yapmazlar, radyasyon yaymazlar. Ayrıca her hangi bir radyoaktif ışınım tahribatı yapmazlar. Dolayısıyla tehlikeli değildir. Montaj şeması hariç bugüne kadar hiçbir rüzgar santralinde ölümlü kaza olmamıştır. Bakım sürelerinde alınabilecek tedbirler ile herhangi bir ufak kaza oluşması da engellenebilir. Yine de rüzgar türbini kazası sonucu ölüm riski %0,0006 değerlerindedir [13].

- Artan petrol fiyatları veya aniden ortaya çıkan başka maliyetleri olmadığından vergi artırımı olarak vatandaşa yük olmazlar.
- Atmosfere veya yakındaki nehir ve denizlere ısı emisyonları yoktur. Buna ilaveten başka bir atık üretimi de söz konusu değildir.
- Rüzgar yerli bir enerji kaynağıdır. Yerel kaynaklar kullanılarak üretilebilen türbin grupları ile dünya genelinde on binlerce insana iş olanakları sunmuştur. Amerika’da yapılan bir çalışmaya göre, rüzgar enerjisinden üretilen 10 milyon kWh elektrik enerjisinin, yine aynı elektrik miktarını üreten kömür santraline göre %27, doğalgaz santraline göre %66 daha fazla iş imkanı sağlamaktadır [14]
- Rüzgar türbinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişine kadar, üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleştirilmektedir.
- Rüzgar türbinleri modüler olup her hangi bir büyüklükte imal edilebilmektedir. İstenildiğinde kısa bir süre içinde sökülüp başka bir yere sorunsuz olarak parçalar halinde taşınabilir. Ayrıca tek olarak yada gruplar halinde kullanılabilirler.
- Ömrünü tamamlamış rüzgar türbinlerinin söküm maliyetleri yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri söküm maliyetlerini kolayca karşılamaktadır. Bu santrallerin ömürlerini tamamlamasından sonra türbinlerin kullanıldığı alan eski haline kolayca getirilebilmektedir.
- Genellikle Rüzgar Enerjisi santralleri, rüzgarın çokluğu sebebiyle çıplak ve yüksek tepelere veya tepeciklere kurulmaktadır. Bu tepeler ancak küçük ekonomik faaliyetler, hayvancılık, veya tarımsal faaliyetler için kullanılabilen yerlerdir. Genel olarak rüzgar enerjisi santralleri için dikilen türbinlerin her biri en fazla 100 m²’lik bir alan kaplamaktadırlar. Her bir türbinin birbirlerinden uzaklıkları ise kanat çapına ve rüzgar rejimine bağlı olarak 50 ila 200 metre

arasında değişmektedir. Rüzgar türbinleri arasında kalan arazinin ise başka faaliyetler için kullanılmasında hiçbir sakınca yoktur. Nitekim yurt dışında bu alanların tarımsal ve hayvancılık faaliyetleri için sıkça kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca dünya genelinde rüzgar santrallerinin off-shore olarak tabir edilen deniz üstünde kurulan tipleri oldukça yaygınlaşmaktadır. Bu durumda santral inşaatı için alan kaybı söz konusu bile olmamaktadır.

- Rüzgar santralleri, termik, hidrolik vb. santrallerle, ekonomik açıdan rekabet edebilecek düzeye gelmiştir. kWh başına maliyeti 3-6 cent civarındadır. Bununda yakın zamanda düşeceği tahmin edilmektedir [8].

2.7 Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları ve Bunlara Ait Çözüm Önerileri

Rüzgar türbinlerindeki en büyük çevresel sorunu gürültü teşkil etmektedir. Gürültü kanat uçlarından, dişli kutularından, aerodinamik fren mekanizması ve hidrolik motorlardan kaynaklanmaktadır. İngiltere’de bu sorundan dolayı 10 türbinden fazla veya 5 MW’tan büyük güçte olan rüzgar çiftlikleri milli park alanlarında kurulamamaktadır. Oluşan gürültüye rağmen türbin sahasında iki kişi çok rahatlıkla sesini yükseltmeden konuşabilir.

Kanat ucu tasarımı ve diğer ses üreten mekanizmaların seçimine dikkat edilerek ses problemi oldukça azaltılabilir. Bir diğer önlem ise bu tip santrallerin yerleşim alanlarının dışında kurulmasıdır.

Bir başka çevresel dezavantaj ise kuş ölümleri olarak karşımıza çıkar. Kuş ölümleri daha çok toplu göçler sırasında karşılaşılan bir sorundur. Fakat bu sorun yüksek gerilim hatlarının yarattığı tehlikelerden büyük değildir. Danimarka’da Ornis Consult tarafından yapılan bir araştırma ile yerleşik kuşların türbinlere kolayca alışıarak yuva yaptığı görülmüştür. Bir çok göçmen kuş sürüsü de 150 metreden yukarıda uçtuğundan, türbin kanatları bunlar için bir tehlike teşkil etmez. Ama yine de rüzgar tarlalarının kurulduğu alanların göç yolları üzerinde olmaması en iyi çözümdür.

Elektromanyetik girişim, diğer bir sorundur. Yapılan araştırmalarda, elektromanyetik girişim ile TV ve radyo yayınlarının, havacılık ve denizcilik haberleşmelerinin olumsuz etkilendiği ortaya konmaktadır.

Ancak radyo ve televizyon antenlerinin türbin yakınında olmadığı sürece bir çok frekansın etkilenmediği gözlenmiştir. Türbinlerin elektromanyetik girişim etkisi kanat büyüklüğü ve malzemesi ile ilişkili olarak değişmektedir. Metal malzemelerin kullanıldığı türbinlerde gürültü ve elektromanyetik girişim oranı yüksektir. Bu sorun polyester esaslı malzeme kullanılarak en aza indirilebilir.

Çevresel olmayan en büyük dezavantaj, rüzgarın değişken olmasıdır. Yeryüzünde rüzgarın sabit olduğu az yer vardır. Bu yüzden ki, insanoğlu istediği her yere rüzgar santrali kuramaz. Son yıllarda rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin, direkt olarak şehir elektrik şebekesine verilmesi, bu enerjinin depolama sorununa bir ölçüde çözüm getirmiştir.

Bir başka uygulama ise; farklı rüzgar enerjisi potansiyeline sahip noktalara kurulan çok sayıda rüzgar türbininin aynı elektrik şebekesini beslemesi durumunda, her bir türbindeki güç değişiminin birbirini dengeleyeceği ve sabite yakın bir elektrik enerjisi gücü elde edileceğidir.

Ama belki de geleceğin çözümü rüzgar ve güneş enerjisinin birlikte kullanımındır. Bu sayede kış aylarındaki yüksek rüzgar potansiyelinin çevirdiği türbinlerle ve yaz aylarındaki yüksek güneş ışınları enerjisinin dolduracağı güneş pilleri birlikte çalışarak bütün bir yıl için bize enerji sağlarlar.

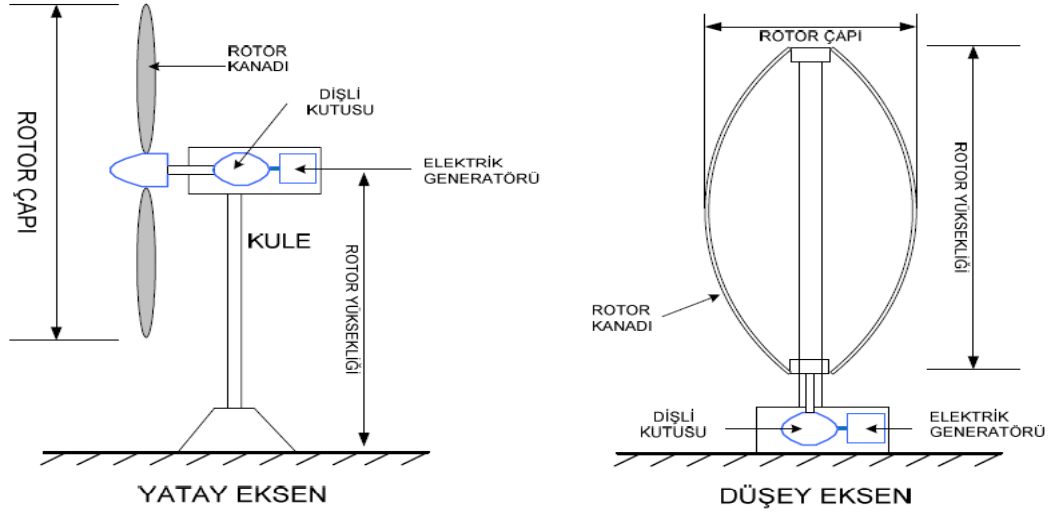
Bir diğer dezavantaj ise türbinlerin maliyetleridir. Birçok türbin teknik olarak başarılı çalışma göstermesine rağmen, çok yeni teknolojiler kullandığından maliyet biraz yüksektir. Bu maliyetlerde gün geçtikçe iyileşme sağlanmaktadır.

Bir başka dezavantaj ise, özellikle yurdumuzda da karşılaşıldığı gibi iyi derecede rüzgar alan bölgelerde arazilerin elde edilmesindeki zorluklar veya sit alanı olarak görülmesinden dolayı yaşanan sorunlardır.

Ülkemiz için bir başka sorun ise bu tip santrali kurmak için gerekli malzemelerin birçoğunun ithal edilmesi ve bu yüzden pahalı olmasıdır. Bu sorun yerli sanayinin kurulması ile büyük ölçüde ortadan kalkacaktır [8].

2.8 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Kullanımdaki rüzgar türbinleri boyut ve tip olarak çok çeşitlilik gösterse de genelde türbinler, dönme eksenine göre sınıflandırılırlar. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

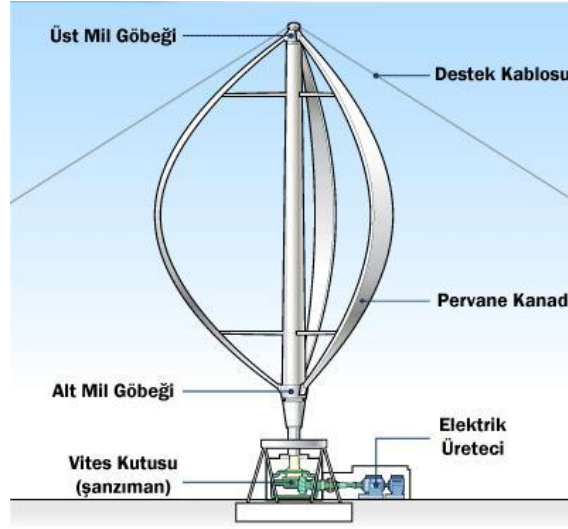


Şekil 2.12 Yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri [5]

Her ne kadar türbinler yatay eksenli ve düşey eksenli türbinler olarak ikiye ayrılırsalar da, her iki tip türbin de aynı aerodinamik prensiplerle çalışırlar. Yararlı aerodinamik kuvvet türü olarak ise, taşıma ya da sürüklenme kuvvetlerini kullanırlar. Genel olarak türbin sistemlerinde kullanılan alt sistemler şunlardır;

- Kanatların, göbeğin ve milin bağlandığı rotor,
- Vites kutusu, fren mekanizması ve jeneratör,
- Kule, denetim ve güvenlik sistemleri,
- Elektrik bağlantıları, hizmet ve destek sistemleri.

2.8.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri



Şekil 2.13 Darrieus tipi rüzgar türbini [6]

Adından da anlaşılacağı gibi, türbin mili düşey ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Savonius tipi, Darrieus tipi gibi çeşitleri vardır. Daha çok deney amaçlı üretilmişlerdir. Ticari kullanımları çok azdır. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki tane kanat vardır (Şekil 2.13). Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Dikey eksenli rüzgar türbinleri her istikametlidirler ve değişen rüzgar yönlerinde dönerler. Böylece rüzgarı her bir yönden kabul ederler.

Bu türbinlerin iyi yönleri şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez. Böylece kule masrafı olmaz.
- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Kötü yönleri ise şöyledir:

- Yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgar hızları düşüktür.

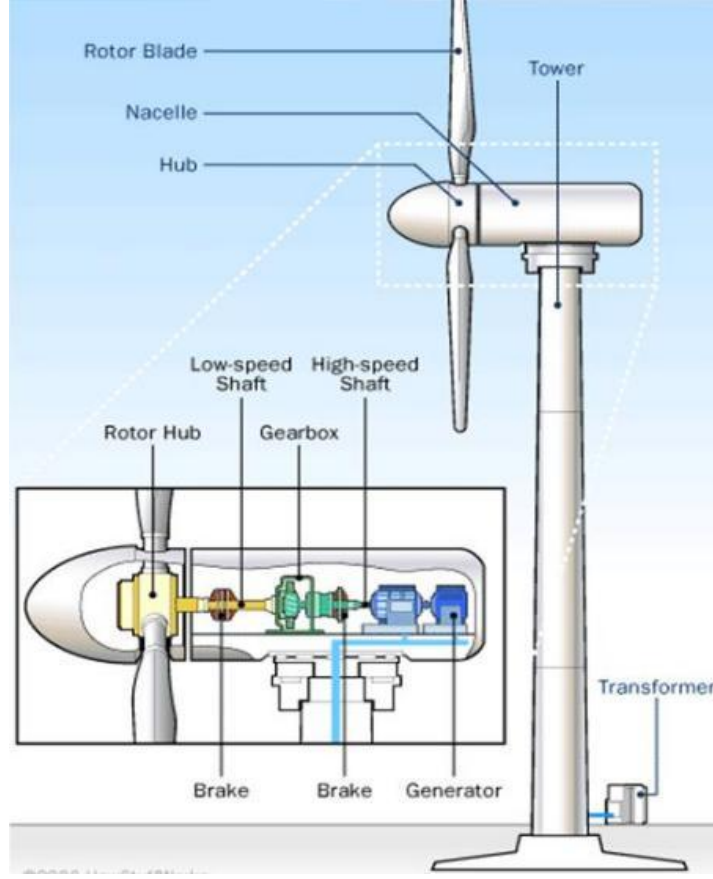
- Verimi düşüktür.
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir. İlk hareket motoruna ihtiyacı vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir



Şekil 2.14 Düz tip bir Darrieus rüzgâr türbini ve Darrieus tipi bir rüzgâr türbini [7]

2.8.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Adında anlaşılacağı gibi, bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanırlar.



Şekil 2.15 Yatay eksenli rüzgar türbini [6]

Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinlerinin ise, yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır.

Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise; eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, dümen sistemine gerek yoktur. Bu nedenle daha hafiftirler. Fakat büyük çaplı türbinlerde rüzgarın arkadan gelmesi tercih edilmez.

Bunun nedeni ise; serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle de toplanması sağlıklı değildir. Fakat küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler [8].

2.8.2.1 Yavaş Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri

İlk olarak 1870’li yıllarda ABD’de çok kanatlı düşük hızlarda çalışan türbinler üretilmeye başlandı. Günümüzde 12 ile 24 adet arasında değişen kanatlar, rotorun ya tüm yüzeyini, ya da hemen hemen tüm yüzeyini kaplar. Yerleştirilen kuyruk kanadı dümen işlevini görür. Genellikle bu tip rüzgar türbinlerinin çapı 5 ile 8 m arasında değişir. Bu tipin en büyük örneği ABD’de inşa edilmiş olup, çapı 15 m’dir. Yavaş çalışan rüzgar türbinleri 2-3 m/s arası rüzgar hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlarlar. Bu türbinlerin özellikleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir [8].

- Genellikle hızları 3-7 m/s arasında değişen rüzgarlarda kullanılırlar.
- Elektrik üretimi için verimleri düşüktür.
- Çap büyüdükçe ağırlık artacağından, bu türbinleri kurmak kolay değildir.
- Bu tipteki türbinler, daha çok su pompalama işi için idealdirler (Şekil 2.16)
Genellikle pistonlu pompalarda kullanılırlar.



Şekil 2.16 Su pompalamak için kullanılan çok kanatlı bir rüzgar türbini [15]

2.8.2.2 Yüksek Hızlarda Çalışan Rüzgar Türbinleri

Yüksek hızlarda çalışan bu tip rüzgar türbinlerinde kanat sayısı 1 ile 4 adet arasındadır. Düşük hızlarda çalışan çok kanatlı rüzgar türbinlerinden çok daha fazla hafiftirler. En çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır (Şekil 2.17)

İki kanatlı türbinler, üç kanatlılara göre %2-3 daha az verimlidir. Tek kanatlı türbinler ise, iki kanatlı türbinlerden %6 daha verimsizdirler. Ayrıca tek kanatlı türbinlerde dengeleyici olarak karşı ağırlık kullanılır. Yüksek rüzgar hızlarında çalışan bu tip türbinlerde kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak 3 kanattan daha fazla sayıda kanat, maliyeti önemli ölçüde arttıracığından tercih edilmez. Bir ve iki kanatlı türbinler daha hızlı döndüklerinden, üç kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yaparlar. Bütün bunların yanında, üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin daha çok tercih edilmesinde önemli bir etkidir [16].

Söz konusu türbinlerin yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinlerine göre avantajları şunlardır;

- Düşük kanat sayısı; bu tipteki türbinlerin fiyatını ve ağırlığını önemli ölçüde azaltır.
- Ani rüzgar patlamalarından kaynaklanan basınç değişimlerinden etkilenmezler.
- Çok yüksek hızlarda çalışan kanat koruyucu sistemleri, bu tip türbinlerde daha ucuzdur.

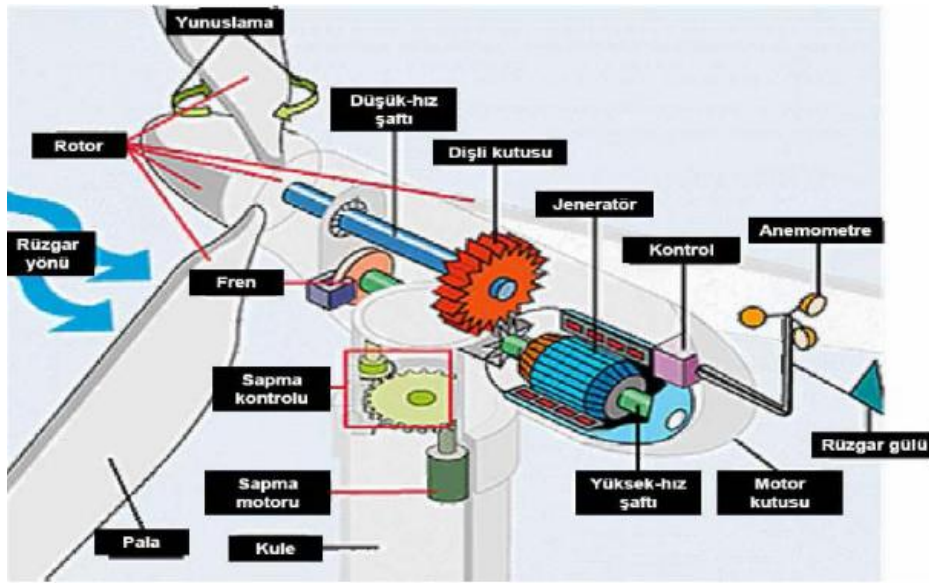
Tek dezavantajı ise güçlülkle çalışmaya başlamasıdır. Yüksek verimleri nedeniyle günümüzde elektrik üretimi amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinin neredeyse tamamı bu tipli türbinlerdir.



Şekil 2.17 Elektrik üreten üç kanatlı rüzgar türbinleri [17]

2.8.2.2.1 Yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinlerinin yapısı

Rüzgar türbinleri, çevredeki engellerin rüzgar hızını değiştirmeyeceği yükseklikteki bir kule üzerine yerleştirilmiş gövde ve rotordan oluşur. Kanatlar ve göbek rotor olarak adlandırılır. Rüzgarın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir ve düşük devirli ana milin dönüş hareketi gövde içerisindeki iletim sistemine, oradan da jeneratöre aktarılır. Jeneratörler, rotorun mekanik gücünü elektrik gücüne çevirerek şebekeye aktarır. Asenkron jeneratörler rüzgar türbinlerinde en fazla kullanılan jeneratör tipidir. Company, 2005 Bir rüzgar türbininde bulunan genel parçalar Şekil 2.18 'de gösterilmektedir [8].



Şekil 2.18 Bir rüzgâr türbininde bulunan aksamalar [1]

2.9 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi

Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji, rüzgar türbinleri vasıtasıyla önce mekanik enerjiye daha sonra da türbin miline bağlı bir generatör ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu bölüm çerçevesinde, bu dönüşümün nasıl meydana geldiğini, atmosferik şartların, deniz seviyesinden yüksekliğin ve topoğrafik etkinin rüzgarın kinetik enerjisini nasıl etkilediği incelenecektir.

“ v ” hızı ile hareket eden “ m ” kütleli havanın kinetik enerjisi SI birim sistemine göre:



$$W_{KE} = \frac{1}{2} * m * V^2 \text{ (joule)} \quad (2.1)$$

Bu şekilde hareket halinde olan hava akışındaki güç, birim zamanda akan kinetik enerji akışı olacağından;

$$P = \frac{dw}{dt} \quad (2.2)$$

$$P = \frac{d}{dt} (0.5 * m * V^2) = 0.5 * \frac{dm}{dt} * V^2 \quad (2.3)$$

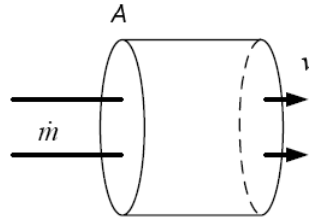
$$P = 0.5 * (\text{birim zamanda akan kütle}) * V^2 \quad (2.4)$$

Burdan: dm/dt = Birim Zamanda Akan Kütle = $\dot{m}$ olarak yazılır ise:

$$P = 0.5 * \dot{m} * V^2 \quad (2.5)$$

olarak hesaplanır.

Şimdi A alanı boyunca V hızı ile hareket eden hava kütesinin gücünü hesaplayalım;



Yoğunluk ile hacmin çarpımı kütle vereceğinden,

$$m = \rho * v \quad (2.6)$$

Hava kütesini bir silindire benzetecek olursak, 2.6 denkleminde hacim yerine $A * l$ yazabiliriz. A hava kütesinin taban alanını, l ise silindirin uzunluğunu temsil etmektedir. Birim zamanda geçen kütle için denklem 2.6' nın her iki tarafının zamana göre türevini alalım,

$$\dot{m} = \rho * A * dl/dt = \rho * A * v \text{ [kg/s]} \quad (2.7)$$

$\dot{m}$ eşitliğini güç ifadesinde yerine yazarsak;

$$P_A = 0,5 * \rho * A * v^3 \text{ [W]} \quad (2.8)$$

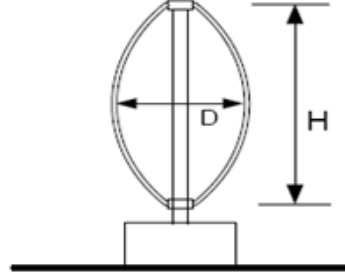
Burada:

ρ : Hava yoğunluğu[kg/m³] (1 atm basıncında (deniz seviyesi) ve 15° C sıcaklıkta, $\rho=1,225\text{kg/m}^3$)

A: Rotor kanatlarının süpürdüğü alan (Rüzgârın geçtiği bölgenin kesit alanı)[m²]

$\rho.A.v$ = Birim zamanda akan havanın kütlesi[kg/s]

Yatay eksenli türbin için rotor süpürme alanı; $A = \frac{\pi}{4}.D^2$ (D: Rotor Çapı) iken dikey eksenli rüzgâr türbininin (rotorun) süpürdüğü alan $A = \frac{2}{3}.D.H'$ dır.



Şekil 2.19 Dikey eksenli rüzgar türbini [49]

Böylelikle rüzgârın kinetik enerjisinden elde edilebilecek elektriksel güç değeri (watt cinsinden) hesaplanmıştır.

Rüzgâr türbinleri açık arazilere kurulduklarından atmosfer olaylarından etkilenirler. Mevsimsel olarak hava sıcaklığının değişmesi, hava yoğunluğunun değişmesine neden olmakta bu durum ise bölgede esen rüzgârın kinetik enerjisini dolayısıyla rüzgârdan elde edebileceğimiz elektrik enerjisini etkilemektedir. Hava sıcaklığı ile hava yoğunluğu arasındaki ilişki şu şekilde bulunabilir;

Rüzgâr güç verileri sunulurken genellikle hava yoğunluğunun 1,225 kg/m³ olduğu, yani hava şartlarının 15° C sıcaklık ve 1 atm basınç altında olduğu kabul edilir. Farklı hava şartları için hava yoğunluğu “ideal gaz kanunundan” hareketle elde edilebilir.

$$P.V = n.R.T \quad (2.9)$$

Burada:

P → Mutlak basınç(1 atm)

V → Hacim(m³)

n → Kütle(mol)

R → İdeal gaz sabiti=8.2056.10⁻⁵

T → Mutlak sıcaklık(K: Kelvin)

$$\text{Kelvin} = K = ^\circ\text{C} + 273,15$$

Eğer gazın moleküler ağırlığını (g/mol) MA ile gösterirsek, hava yoğunluğu

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{P \cdot MA \cdot 10^{-3}}{RT} \quad (2.10)$$

Dolayısıyla bütün bilmemiz gereken havanın moleküler ağırlığıdır. Hava(%100)≈ Nitrojen(%78,8) + Oksijen(%20,95) + Argon(%0,93) + Karbondioksit(%0,035) + Neon(%0,0018). Bu bileşenler kullanılarak hava karışımının moleküler ağırlığı

$$MA_{HAVA} = 0.7808 \times 28,02 + 0.2095 \times 32 + 0.0093 \times 39,95 + 0.00035 \times 44.01 + 0.000018 \times 20.18 = 28.97 \text{ (g/mol)} \quad (2.11)$$

Not: Bileşenlerin moleküler ağırlıkları(g/mol)

$$N_2 = 28.02, O_2 = 32, Ar = 39.95, CO_2 = 44.01, Ne = 20.18$$

Çizelge 2.6' da 1 atm basıncındaki farklı hava sıcaklıklarına karşılık gelen hava yoğunluklarını göstermektedir.

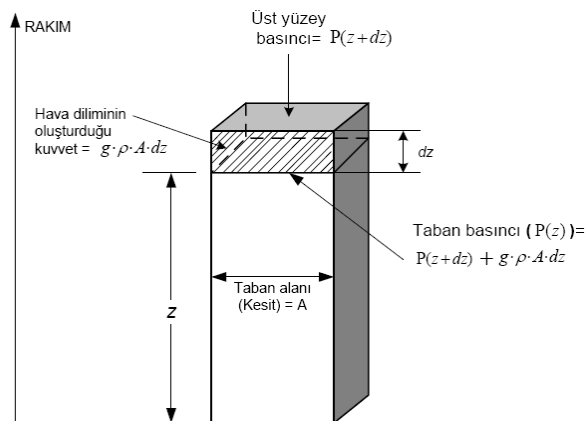
Çizelge 2.6 Bir atm basıncı altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi

Sıcaklık(°C)	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)
-21	1,400
-18	1,384
-15	1,368
-12	1,352
-9	1,337
-6	1,322
-3	1,307
0	1,293
3	1,278
6	1,265
9	1,251

Çizelge 2.6 Bir atm basıncı altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi
(devam)

12	1,238
15	1,225
18	1,213
21	1,200
24	1,188
27	1,176
30	1,165
33	1,153
36	1,142
39	1,131
42	1,120

Denklemler (2.8-2.10) kullanılarak hava sıcaklığının hava yoğunluğu üstündeki etkisi gösterilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi hava yoğunluğunu etkileyen bir diğer parametre ise rakımdır (deniz seviyesinden olan yükseklik). Rakımın hava yoğunluğu üstündeki etkisi incelemeye çalışacak olursak:



Şekil 2.20 Yükseklik ile basınç arasındaki ilişkiyi bulmak amacı ile dikkate alınan hava koridoru

Şekil 2.20' de gösterildiği üzere düşey ekseninde statik bir hava kesitini (A) dikkate alalım. Verilen düşey kolondaki dz kalınlığa sahip ρ yoğunluklu havanın kütlesi $dz.A.\rho$ ile verilir. Üst yüzeyde hava basıncı $P(z + dz)$ olarak verilir ise hava diliminin alt yüzeyindeki $P(z)$ basıncı, $P(z + dz)$ basıncı ile ilgili hava diliminin birim alan ağırlığı toplamına eşittir.

$$P(z) = P(z+dz) + \frac{g.\rho.A.dz}{A} \quad (2.12)$$

$$P(z) = P(z + dz) + g.\rho.dz \quad (2.13)$$

Burada g, yerçekimi sabiti (yerçekimi ivmesi) = $9,806\text{m/s}^2$

Böylece artımsal dP basıncı, dz artımsal değişimi için yazılırsa

$$d = P(z + dz) - P(z) = -g.\rho.dz \quad (2.14)$$

$$dp = -g.\rho.dz = dp/dz = -g.\rho \quad (2.15)$$

ρ hava yoğunluğu verildiği üzere atmosferik basıncın bir fonksiyonudur. Buradan:

$$\frac{dp}{dz} = -\left(\frac{g*P*MA*10^{-3}}{RT}\right) = \frac{dp}{dz} = -\left(\frac{g*P*MA*10^{-3}}{RT}\right)*P \quad (2.16)$$

Burada rakımın sıcaklık üzerindeki etkisini ihmal ediyoruz. Rakımdaki her bir km' lik artış, sıcaklıkta yaklaşık $6,5^\circ\text{C}$ 'lik bir azalma oluşturur. Kabullerimizi basitleştirmek için hava sıcaklığı dikkate alınan koridor boyunca sabit kabul edilebilir. Bu ihmal çok ufak bir hataya neden olur. Yukarıda ki formülde birim; sabit ve birim dönüştürme faktörlerini yerine yazarsak (sıcaklık 15°C sabit kabul edildi)

$$\frac{dp}{dz} = -\left(\frac{9,806\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)*28,97\left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)*10^{-3}(\text{kg/g})}{8,2056*10^{-5}\left(\frac{\text{m}^3.\text{atm}}{\text{K}.\text{mol}}\right)*288,15\text{K}}\right)*\left(\frac{\text{atm}}{101,325\text{Pa}}\right)*\left(\frac{1\text{PA}}{\text{N/m}^2}\right)*\left(\frac{1\text{N}}{\text{kg.m/s}^2}\right)*P \quad (2.17)$$

$$\frac{dp}{dz} = -1,18575 * 10^{-4} * P\left(\frac{1}{\text{m}}\right) \quad (2.18)$$

diferansiyel çözümü yapılırsa ;

$$\int \frac{dp}{dz} = \int -1,18575.10^{-4} dz \quad (2.19)$$

$$\ln p + c = -1,18574.10^{-4}.z \quad (2.20)$$

$$\ln \frac{p}{p_0} = -1,18574.10^{-4}.z \quad (2.21)$$

$$p = p_0.e^{-1,18574.10^{-4}.z} \quad (2.22)$$

$$p = p_0.e^{-1,18574.10^{-4}.H} \quad (2.23)$$

Burada

P_0 = Referans Basınç (1 atm)

H = Deniz Seviyesinden Yükseklik (m)

Çizelge 2.7' de 15 °C sıcaklıkta hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile olan değişimi özetlenmiştir.

Çizelge 2.7 Hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile olan değişimi

Rakım(m)	Basınç(atm)	Hava Yoğunluğu(kg/m ³)	Yükseklik Değişimi İçin Basınç Oranı $r_a = \frac{P(H)}{P(0\text{ metre})}$
0	1,000	1,225	1,000
100	0,988	1,211	0,988
200	0,977	1,197	0,977
300	0,965	1,182	0,965
400	0,954	1,168	0,954
500	0,942	1,155	0,942
600	0,931	1,141	0,931
700	0,920	1,1284	0,920
800	0,910	1,111	0,910
900	0,899	1,1085	0,899
1000	0,888	1,083	0,888
1100	0,878	1,071	0,878

Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Türbini yüksek hızlı rüzgârlara maruz bırakmanın bir yolu da, türbinleri daha uzun kulelere monte etmektir. Yer seviyesinin

ilk birkaç yüz metre yüksekliklerinde, rüzgâr hızı yeryüzü ile olan sürtünme ve etkileşiminden dolayı oldukça fazla etkilenir. Pürüzsüz yüzeyler örneğin; durgun deniz yüzeyi rüzgâra karşı oldukça düşük bir direnç gösterir.

Yüzey pürüzlülük faktörünün rüzgâr hızı üzerindeki etkisi 2.24 denklemi ile karakterize edilebilir:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^a \quad (2.24)$$

Burada

v , H yüksekliğindeki rüzgâr hızı

u_0 , H_0 referans yükseklikteki rüzgâr hızıdır (genelde $H_0=10\text{m}$ alınır).

a , sürtünme katsayısıdır.

α sürtünme katsayısı rüzgâra maruz kalan yer yüzeyinin topolojisine bağlı bir katsayıdır.

Çizelge 2.8’ de farklı yeryüzü topolojileri için α katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.8 Farklı yeryüzü topolojileri için α katsayıları

Yeryüzü Karakteristiği	Sürtünme Katsayısı α
Pürüzsüz sert toprak, durgun su	0,10
Toprak seviyesinde uzun çimenli bölge	0,15
Toprak seviyesinin üzerinde daha uzun mahsul	0,20
Kırsal orman alanları, bir çok ağaç	0,25
Ağaçlık ufak kasabalar	0,30
Uzun binalarla dolu büyük şehirler	0,40

GÜNEŞ ENERJİSİ

3.1 Güneş Enerjisi

Tükenmeyen, çevreyi kirletmeyen, dış alım gerektirmeyen ve bir ölçüde de bedava sayılabilecek kaynak olan güneş enerjisi, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakların başta gelenidir.

Fert başına elektrik enerjisi tüketiminin gelişmişliğin bir göstergesi halini aldığı çağımızda, birincil enerji kaynaklarının sürekli tükenmekte oluşu, ayrıca bu kaynakların enerji üretimi için yakılmaları esnasında ortaya çıkan ekolojik bozulmalar ve hatta klimatolojik denge bozulmaları, bugün enerji konusunda hiç vakit kaybedilmeden çözülmesi gereken bir problem olarak ortaya koymaktadır. Bu problemin çözümlerinden birincisi yeni ve temiz enerji kaynaklarının bulunması, ikincisi ise tüketiminin ekonomik olarak kabul edilebilecek en alt düzeye indirilmesi biçiminde özetlenebilir.

Füzyon enerjisini kullanan nükleer santraller, reaktörlerin yarattığı çevre sağlığı riski ve nükleer atıkların depolanma problemi nedeniyle enerji problemine kalıcı bir çözüm getirmemektedir. Füzyon enerjisinin en büyük kaynağı ise, hem de dünyaya zarar veremeyecek bir mesafede olan güneştir. Nitekim petrol, kömür ve atom enerjisi gibi birincil enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisi çok umut vericidir. Çünkü güneş enerjisinden, örneğin güneş pilleri ile çevreyi kirletmeden ve iklimsel dengeyi bozmadan elde edilen doğru akım elektrik enerjisi evirici ve trafolar aracılığı ile doğrudan şebekeye verildiği gibi, elektroliz yoluyla hidrojen gazına dönüştürülerek

depo edilmekte veya halen doğal gaz naklinde kullanılan boru şebekesi ile kullanılacağı yerlere nakledilebilmektedir.

Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu, atmosferin üzerinde m^2 başına 1.35 kW kadardır. Bu yoğunlukla dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü 178 PW düzeyinde olup, dünyadaki kurulu elektrik santrallerinin toplam gücünün 100 bin katı düzeyindedir. İnsanlığın enerji istemi 8-9 TW güçle karşılanabileceğinden güneşten gelen güç bunun 20 bin katıdır. Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi, 1.22×10^{14} TET ya da 0.814×10^{14} TEP gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi bilinen kömür rezervinin 50 katı ve bilinen petrol rezervinin 800 katı kadardır [23].

3.2 Güneş Pillerinin Tarihçesi

İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1, değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

1970'li yılların başlarına kadar, güneş pillerinin uygulamaları sınırlı kalmıştır. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'ler de başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. Petrol bunalımını" izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif

olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. 1975'ten sonraki ilk 15 yılda özellikle uzay programları için silikon güneş pillerinin üretimi yılda ortalama 100 kW civarındaydı. 1987 yılına doğru tüm dünya içinde yerküre uygulamaları için kullanılan modellerin yıllık siparişi 1986 yılında 28.6 MW' a ulaştı.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuvarında kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek "sosyal maliyet" göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemlerden fosile dayalı sistemlerin daha ekonomik olarak değerlendirilebilir [24].

3.3 Türkiye'de Güneş Enerjisi

Türkiye'deki elektrik enerjisi üretiminin %34'ü fueloil ve motorin tüketilerek küçük kapasitelerde yapılmaktadır. 1MW'dan küçük bu güç üniteleri ile 1500 MW güç üretilmektedir. Ülkemizin dağlık bir yapıya sahip olması ve yerleşim merkezinin birbirinden uzak olması, bu yerleşim merkezlerine elektrik enerjisi iletimini güçleştirmektedir. Üretimin ancak %3'ü bu tip yalıtılmış yerlerde tüketilmektedir. Bu bölgelerin enterkonnekte sisteme bağlanma maliyetlerinin çok yüksek olması ve üretilen enerjinin önemli bölümünün iletim ve dağıtım hattında kaybolduğu göz önüne

alınırsa, bölgesel ve bağımsız olarak çalışacak küçük güneş enerjisi elektrik santrallerinin önemi belirginleşmektedir.

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ilk kez 1970 yılında, bir bilimsel araştırma kapsamında yapılmıştır. Belirlenen olgulara göre Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi 2608.8 saat olup, maksimum değer 361.8 saat ile temmuz ayında ve minimum değer 97.8 saat ile aralık ayında görülmektedir. Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge yılda 3015.8 ile Güneydoğu Anadolu'dur [EİE Ulusal Enerji Tasarrufu merkezi Yayını,1998]. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ısıtım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ısıtım şiddeti 1311 kWh/m² yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise çizelge 3.1' de verilmiştir [25].

Çizelge 3.1 Türkiye' nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli [25]

Aylar	Aylık Toplam Güneş Süresi (kWh/m ² ay)	Güneşlenme Süresi (Saat/ay)
OCAK	51,75	103
ŞUBAT	63,27	115
MART	96,65	165
NİSAN	112,23	197
MAYIS	153,86	273
HAZİRAN	168,75	325
TEMMUZ	175,38	365
AĞUSTOS	158,40	343
EYLÜL	123,28	280
EKİM	89,90	214
KASIM	60,82	157

Çizelge 3.1 Türkiye’ nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli (devam) [25]

ARALIK	46,87	103
TOPLAM	1311	2640
ORTALAMA	3,6 kWh/m ² gün	7,2 saat/gün

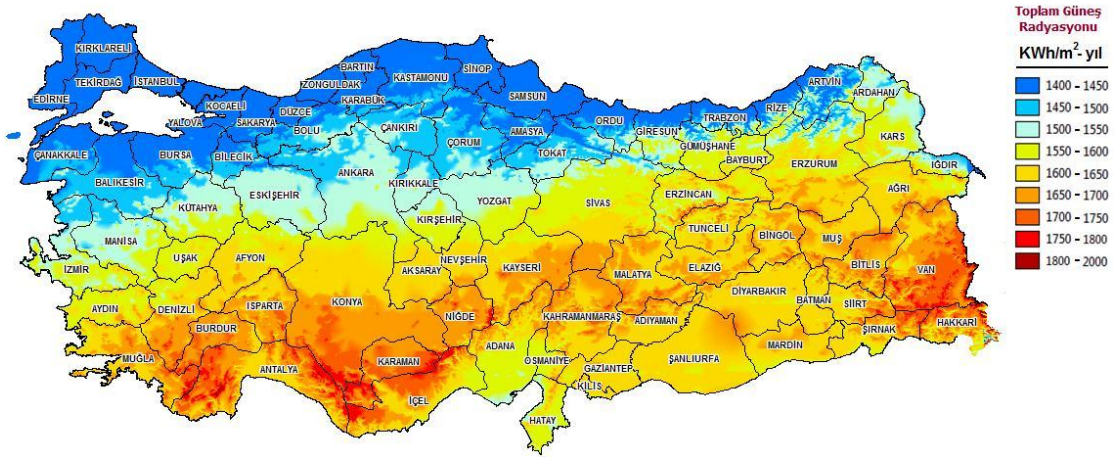
Çizelge 3.2’ye göre Türkiye’nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da çizelge 3.2’de verilmiştir. Ancak, bu değerlerin Türkiye’nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. Bu durumun nedenleri arasında, öncelikle DMI’ nin güneş enerjisi ölçümlerini, enerji amaçlı değil tarımsal klimatoloji amaçlı ölçmüş olması, kullanılan cihazların hassasiyetinin düşük olması ve zamanla istasyonların şehir içinde kalması yer almaktadır [25].

Çizelge 3.2 Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı [25]

Bölge	Toplam Güneş enerjisi (kWh/m ² yıl)	Güneşlenme Süresi (saat/yıl)
G.Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Yine Meteorolojik gözlemlere (aktinograf ölçümlerine) göre Türkiye’de aylara göre günlük ortalama güneş radyasyon yoğunluğu en fazla 21,1 MJ/m²-gün ile Temmuz ayında ve en az 5,5 MJ/m²-gün değeri ile Aralık ayında görülmektedir. Türkiye’nin güneş radyasyonunun yıllık ortalaması 13,2 MJ/m²-gün’dür [26].

Halen ülkemizde kurulu olan kolektör alanı yapılan son tahminlere göre 2,5-3 milyon- m^2 civarındadır. Çoğu Akdeniz ve Ege bölgelerinde kullanılmakta olan sistemler ile yılda 120 000 TEP ısı enerjisi üretilmektedir. Sektörde 100'den fazla üreticinin bulunduğu ve 2000 kişinin istihdam edildiği tahmin edilmektedir. Yıllık üretim hacmi 400 000-500 000 m^2 olup bu üretimin bir miktarı ihraç edilmektedir [27].



Şekil 3.1 Güneş enerjisi potansiyeli atlası [25]

3.4 Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Yöntemleri

Gelişen teknoloji ve nüfus artışından dolayı dünyada elektrik enerjisine olan talep her geçen yıl daha da artmaktadır. Bu talebi karşılamak üzere devletler kurulu güçlerini arttırmak için yeni enerji santralleri kurmaktadır. Ancak küresel ısınma, hava ve su kirliliği, iklim değişikliği gibi çevre felaketleri kurulacak olan yeni elektrik enerjisi santrallerinin türlerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadırlar. Devletler kuracakları yeni santrallerin mümkün olduğunca verimli ve ekonomik olmasının yanı sıra çevreye de olabildiğince az vermesini istemektedirler. Bu yüzden son 10 yıl içinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilim artmıştır.

Güneş enerjisi son yıllarda dünyanın elektrik üretiminde kullandığı yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlileri arasındadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim metotları da çoğalmıştır. Bu bölümde kullanılan bu yöntemlerden bazıları anlatılacaktır.

3.4.1 Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri ile Elektrik Üretimi

Isıl güneş enerjisi sistemleri, çeşitli ayna veya lens konfigürasyonu kullanarak güneş enerjisini yüksek ısıya dönüştürüp bu sayede elektrik enerjisi üreten yapılardır. Isıl güneş enerjisi sistemlerinde (parabolik oluk, parabolik çanak, güç kulesi) ısı, elektrik üretimi için bir türbine veya benzeri bir makineye gönderilir. Isıl tesisler, biri güneş enerjisini toplayıp ısı enerjisine dönüştüren diğeri ise ısı enerjisini elektriğe dönüştüren iki temel alt sistemden oluşur. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemler ise güneş ışığını bir fotovoltaik sistem üzerine düşüren ve bu sayede doğrudan elektrik üreten sistemlerdir. Fotovoltaik sistemlerde ayna, mercek veya ikisi birlikte kullanılabilir. Direkt ışımayı sağlayabilmek için güneşi takip eden yapıların kullanılması gerekir. Parabolik oluk sistemler ışımayı lineer alıcı üzerine düşürmek için tek eksenli takipçiler kullanılır. Çanak ve güç kulesi sistemlerinde ise iki eksenli takipçiler kullanılır. Tüm yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemleri güneş ışınımının direkt ve dik açılı bileşenini kullanırlar. Direkt ve dik açılı ışıma sadece güneşli günlerde elde edilebilir. Direkt ve dik açılı ışımayı yoğunlaştırmak yüksek ısı elde edilmesini veya fotovoltaik sistemlerde ışığı yoğunlaştırarak fotovoltaik hücrelerin veriminin artmasını sağlar. Güneş ışığını toplayarak elde edilen ısıyla, türbin ve generatörleri çalıştırdıkları için oluk ve kule sistemleri 50 MW veya daha yüksek güçteki büyük tesisler için en uygun sistemlerdir. Çanak ve fotovoltaik sistemler ise 10 MW' tan 35 MW' a kadar güçleri tek üniteye üretebilen modüler yapılardır. Bu nedenle çanak ve fotovoltaik sistemler yayık ve uzak üretim uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca bu sistemler birleştirilerek büyük tesisler oluşturulabilir. Oluk ve kule sistemlerinde tesisin büyüklüğündeki artış beraberinde kW başına düşen giderlerde azalmaya sebep olur. Fotovoltaik ve çanak sistemleri ise potansiyel seri üretim avantajına sahiptirler. Oluk ve kule sistemlerinin, çanak ve fotovoltaik sistemlere göre en önemli avantajları, bulutlu havalarda veya akşam saatlerinde, belirli bir zaman aralığı için sahip oldukları ısı deposu veya fosil yakıt üniteleri sayesinde elektrik üretimine devam edebilir olmalarıdır. Bu da tesisin faydalı tepe yük profiline yakın bir çalışma potansiyeli ile çalışmasını sağlar. Günümüzde çanak sistemleri hibrit yakıtlı şekilde ayarlanamamıştır. Fotovoltaik sistemlerde batarya kullanımı mümkündür ama bataryaların tesis maliyetinin yüksekliği şu an için bu sistemin kullanımını pek cazip kılmamaktadır [21].

3.4.1.1 Parabolik Oluk Sistemleri

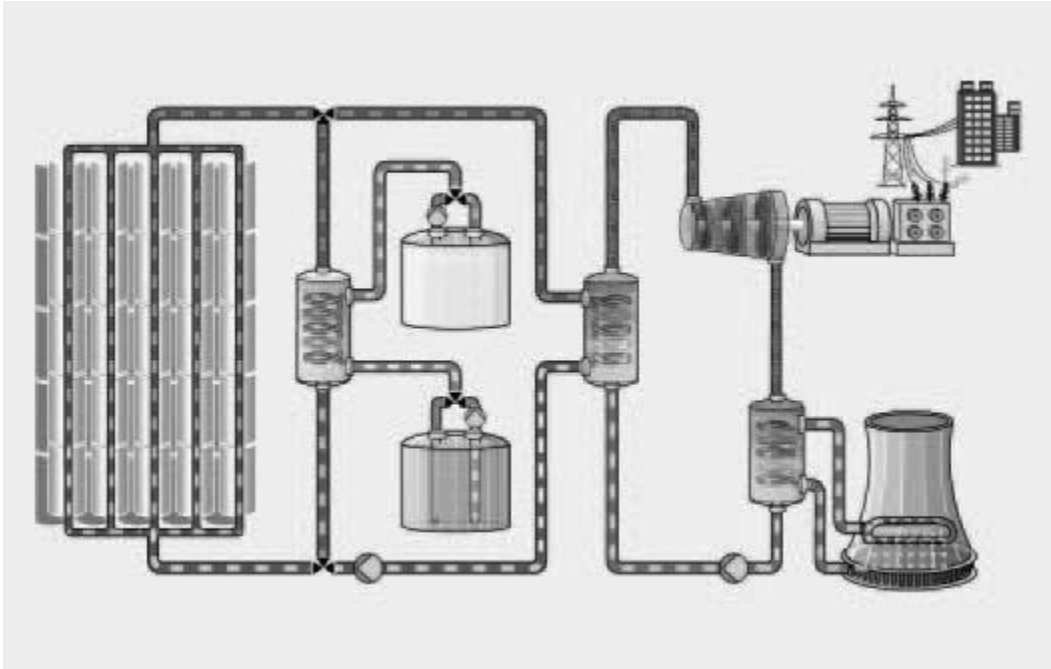
Parabolik oluk sistemleri, güneş ışınımını, parabolik oluk şeklinde bükülmüş yansıtıcıları ile oluğun odak çizgisine yerleştirilmiş alıcı boruya iletirler. Yüksek ısıyı taşıyabilen akıcı bir madde ile bu borudaki ısı enerjisi alınır ve buhar generatöründe buhar üretmekte kullanılır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’ de oluk yansıtıcı dizisi gösterilmiştir. Seriler tipik olarak kuzey – güney eksenine yerleştirilir. Tek eksenli takipçi sayesinde güneşi doğu batı doğrultusunda takip eder [21]. Bu sistemin dünyadaki güzel bir örneği Andalusia-İspanya’da geniş bir vadi olan Marquesado del Zenete bölgesinde kurulu durumdaki AndaSol projesidir [20]. Sistemin basitleştirilmiş akış diyagramı ise Şekil 3.4’de gösterilmektedir. Ayrıca bu tesiste ısı depolama sistemi bulunmaktadır. Isı depolama sistemi sayesinde AndaSol Tesisi güneşin batımından sonra da enerji talebini karşılayabilmektedir. Isı depolama sistemi olmadan yıllık tam yükte 2000 olan çalışma saati ısı depolama sistemiyle 3589 saate çıkmaktadır. Bu artış tesis maliyetlerinin karşılanmasında önemli bir durumdur [22].



Şekil 3.2 Parabolik oluk yansıtıcı dizisi [20]



Şekil 3.3 AndaSol güneş enerjisi elektrik üretim tesisi [20]



Şekil 3.4 Andasol projesinin basitleştirilmiş akış diyagramı [20]

3.4.1.2 Parabolik Çanak Sistemleri

Parabolik çanak sistemler bir güneş yoğunlaştırıcı (parabolik çanak) ve bir adet güç dönüştürücü üniteden oluşur. Yoğunlaştırıcı ünite dik açılı güneş ışınlarını odak noktasına yerleştirilmiş güç dönüştürücü ünitesine yansıtan parabolik çanak şeklinde bir araya getirilmiş yansıtıcı aynalardan oluşur.

Sistem iki eksenli takipçi sayesinde güneşi sürekli olarak izler. Güç dönüştürme ünitesi termal alıcı ve generatörden oluşur. Güneş alıcısında, güneş ışığı kapalı hidrojen çevrimi yardımıyla ısı enerjisine dönüştürülür. Isınmış hidrojen generatör tribünlerinin dönmesini sağlar. Hava soğutmalı oldukları için parabolik oluk ve güç kulesi uygulamalarındaki gibi soğutma suyuna ihtiyaç duyulmaz. Günümüzde bu sistemlerde ısı depolama ünitesi kullanılmamaktadır [21]. Bu sistemler, kurulum ve bakım-onarım kolaylığı açısından tercihen düzgün zemin üzerine inşa edilir. Parabolik çanak sistemler boyutlarına göre 10 MW ile 25 MW arasında değerlere sahiptir. Güç şebekesinden bağımsız çalışabilmeleri nedeniyle uzak uygulamalarda kullanılabilirler. Yüksek verimliliği ve modüler yapısıyla bu sistemlerin maliyetlerinde ileriki zamanlarda ciddi düşüşler beklenmektedir [20].

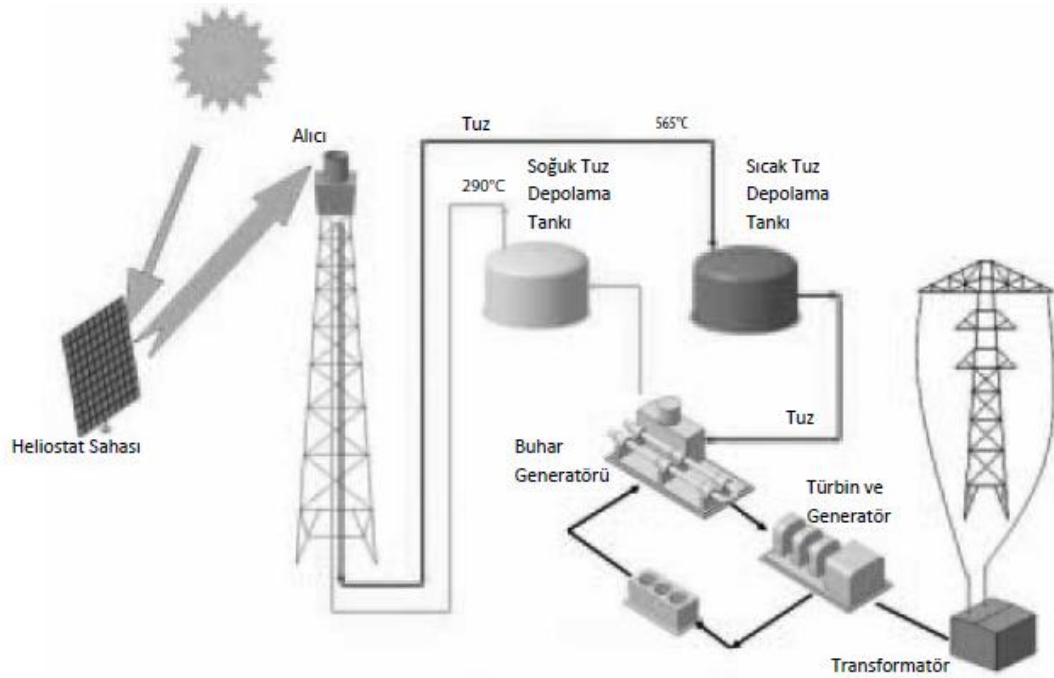


Şekil 3.5 Parabolik çanak sistemi [21]

3.4.1.3 Güç Kulesi Sistemleri

Güç kulesi sistemlerinde kulenin tepesinde bulunan alıcıya dik açılı güneş ışınlarını yansıtan güneşi takip eden, heliostat adı verilen, binlerce ayna kullanılır. Günümüzde mevcut alıcılar içerisinde erimiş nitrat tuzu bulundurulur.

Bu tuz alıcındaki ısıyı alarak generatör türbinini döndürerek elektrik üretimini sağlayacak olan buharı üretmekte kullanılır. Önceleri su buharı direk olarak alıcıda üretilirken günümüzde yüksek ısı iletim ve ısı depolama özellikleri nedeniyle erimiş nitrat tuzu kullanan sistemler kullanılmaktadır. 50 – 200 MW'lık elektrik üretimi için güç kuleleri istenilen ebatlarda inşa edilebilir. Güç kulelerinin önemli bir avantajı erimiş tuzun $565,55^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılabilmesi ve 538°C 'de buhar üretebilmesidir. Bu da yaklaşık 390°C buhar üretebilen oluk sistemlerine nazaran daha yüksek verimde elektrik üretildiği anlamına gelir. Bunun yanında oluk sistemlerinde ısı transferi için yağ kullanıldığından ısının yağdan tuza ve tuzdan tekrar yağa transfer edilmesi sürecindeki enerji kayıpları güç kulelerinde sadece tuz kullanıldığı için ortadan kalkmaktadır [22].



Şekil 3.6 Güç kulesi santralinin şematik diyagramı [20]



Şekil 3.7 İspanya’da kurulan PS10 güç kulesi [20]

3.4.2 Güneş Pilleri ile Elektrik Üretimi

3.4.2.1 Güneş Pillerinin Yapısı

Güneş pili hücreleri yarı iletken malzemelerden yapılır. Silikon en çok kullanılan yarı iletken malzemedir. Işık yarı iletken malzemeye ulaştığında malzeme tarafından emilir. Diğer bir anlatımla ışık enerjisi yarı iletken malzemeye geçer, malzemedeki elektron bağlarını zayıflatır ve bir yerden bir yere gitmesini sağlayarak elektrik akımını oluşturur. Yarı iletkenler üzerine konulan metal kollektörler bu elektrik akımını toplarlar.

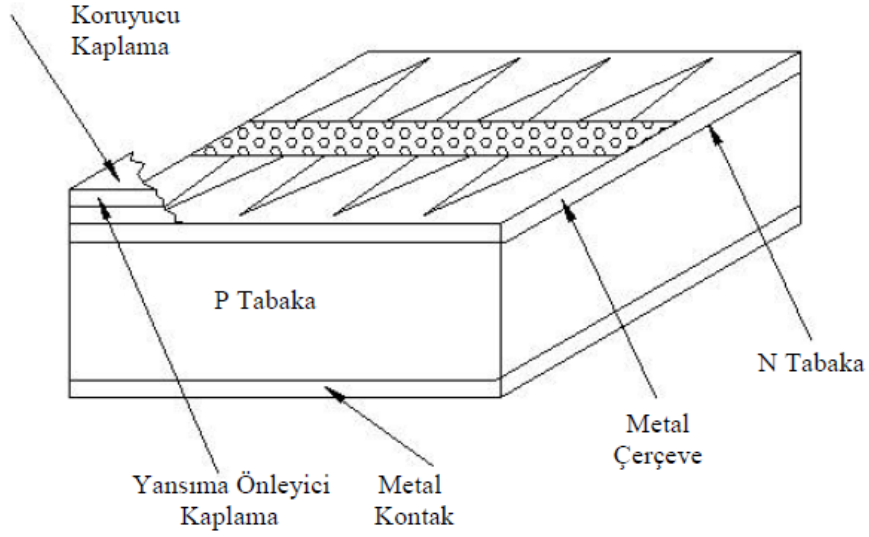
Güneş pillerinin çalışma prensibi kabaca bu biçimde anlatılabilir. Daha detaylı olarak anlatacak olursak silikonun tek kristal halini incelemek gerekir. Silikon kristal halindeyken birçok kimyasal özelliğe sahiptir. Silikon atomunun 14 elektronu vardır. Üç halka şeklinde çekirdeğin etrafında hareket ederler. İlk halkada iki, ikinci halkada sekiz elektron çekirdeğe yakın şekilde hareket ederler. Son halkada 4 elektron vardır.

Silikon son halkadaki 4 elektrona bir başka 4 elektron ekleyip son halkasındaki elektron sayısını 8'e çıkarmaya çalışır. Halkadaki 4 elektron yanı başındaki diğer silikon atomundaki 4 elektrona sanki el tutuşarak bağlanır. Bu bağlantı diğer komşu atomlarla devam eder ve silikon saf kristal yapısına kavuşmuş olur. Bağlanacak elektronu kalmayan kristal silikon atomunun iletkenliği çok zayıflar. Çünkü elektronlar sıkıca birbirine bağlı olduğundan bağlanacak elektron arayışı son bulmuştur.

Saf silikona ısı verilirse, bu ısı enerjisi saf silikondaki bazı elektronların atom yapısından kopmasını sağlar, ancak bu saf silikonda çok azdır. Silikon, yapısında elektronu kopmuş yere başka bir elektron arar. Aynı şekilde yan atomdan kopan elektronu bu boşluğa yerleştirir. Bu boşluktan çıkan elektron da yerine gelen elektronun boşluğuna gider. Bu elektronların yer değiştirmesinden elektrik akımı oluşur. Ancak saf silikonda serbest kalabilen elektron çok azdır. Bunun için saf silikona enerji verildiğinde çok az elektrik akımı oluşur.

Enerji verildiğinde daha fazla elektronun kopup yer değiştirmesi için, saf silikonun içine bir madde ilave edilmelidir. Bu elektronlar yer değiştirirken de elektrik enerjisi üretecektir. Saf silikonun fosforla zenginleştirilmesine "katkılandırma" denir. Her bir milyon silikon atomunun içine, son halkasına 5 elektron olan bir adet fosfor atomu atıldığı düşünülürse, komşu silikon atomlarıyla bağlandığında fosfor atomunun çekirdeği tarafından sadece bir adet elektron tutulur. Bu durumda bir milyon silikon atomu birbirine bağlı ve bu bağ bir fosfor elektronları çok az bir enerjiye yer değiştirebilecek durumdadır. Bu durumdaki silikon yarı iletken haline dönüşmüştür. Fosforun silikonla yapmış olduğu bu bağa negatif tip denir.

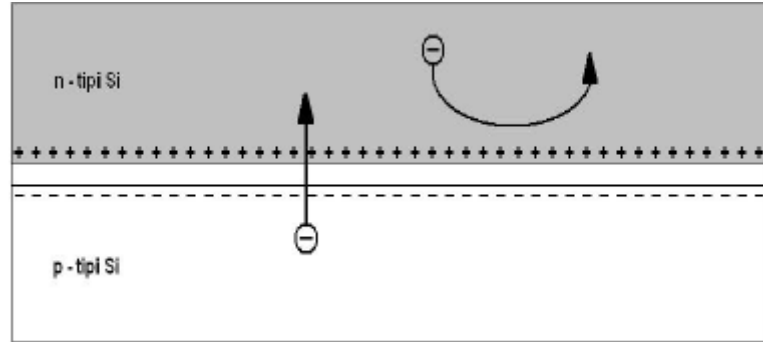
Oluşturulan bu hücre bir yerde dururken, aynı metotla silikon boron'la zenginleştirir. Boron atomunun son halkasında 3 adet elektron vardır. Milyonlarca silikon atomu boron ile zenginleştirildiği zaman, yapıda 1 elektronluk boş bir delik olacaktır. Böylelikle bu yapıda pozitif tip olacaktır.



Şekil 3.8 Güneş pili yapısı [23]

3.4.2.2 Birleşme Kesitinde Elektrik Alanın Oluşması

Ayrı ayrı elektrik alanı olmayan ve kendi halinde doğal olan parçalar birleştirildiğinde, birleşme kesitinde “n tip” silikonun içindeki elektronlar, “p tip” silikonun içindeki pozitif boşlukları dolduracaktır. Bu birleşme o kadar kuvvetli olacak ki elektronlar bu bariyeri bir zaman sonra geçemeyeceklerdir. Yani elektronlar “n tip” silikon, elektronunu “p” tipe gönderdiğinden, birleşme noktasında “+” alan oluşacak, aksi taraftaki “p” tip elektron aldığından “-” alan oluşturacaktır. Serbest kalabilecek elektronların hareket yönleri Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

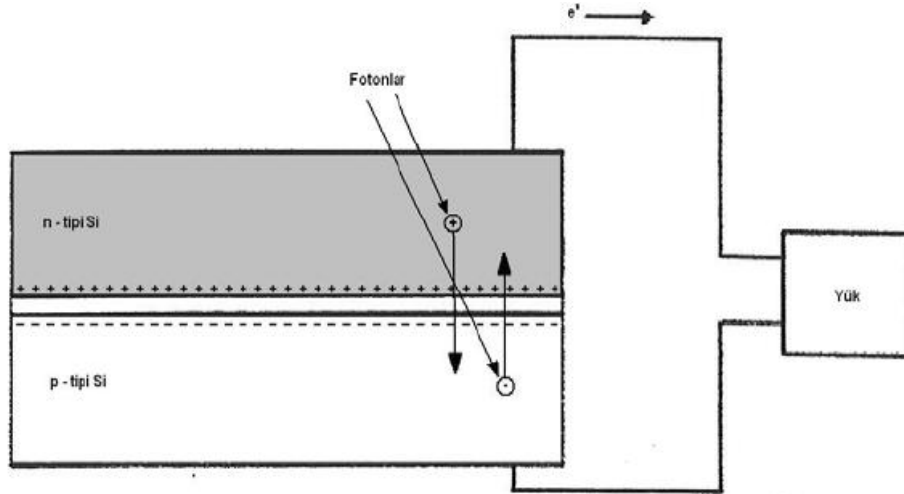


Şekil 3.9 Elektrik alanın “n tip” in “p tipi” etkileyiş diyagramı[24]

3.4.2.3. Yüzeyleri Birleştirilmiş Silikonlara Enerji Verilmesi

Güneş ışığının içindeki foton denilen enerji bu birleşmiş malzemeye yansıdığında, elektronları serbest bırakacaktır. Serbest kalan elektronların yeri de boş kalacaktır. Eğer bu olay birleşme alanı yakınında oluyorsa elektronlar “n” tipe, boşluklarda “p” tipe

gececektir. Eğer bu iki parça bir iletkenle birbirine bağlanırsa, elektronlar tekrar eski yerine, deliklerde eski yerine döneceklerdir. Elektrik enerjisinin temel prensibi olan bu elektron hareketinden dolayı akım, elektrik alanından dolayı da voltaj elde edilir. Bu döngü ışık olduğu sürece devam eder. Şekil 3.10 fotonların silikonda oluşturduğu elektron hareketini göstermektedir.



Şekil 3.10. Fotonların silikondaki elektron hareketi oluşturması[24]

3.4.2.4. Güneş Pili Türleri

Güneş pili yapımında kullanılan malzemelerin verimlilik durumları oldukça önemli değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarı-iletken maddelerden yapılırlar. Yarı-iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, kristal silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir. Güneş pili yapım için şu anda kullanılmakta olan ondan fazla maddenin yanı sıra, yüzlerce maddenin de üzerinde çalışılmaktadır. Aşağıda pratikte kullanılan bazı güneş pili türleri kısaca açıklanmıştır.

3.4.2.4.1 Kristal Silisyum

Kristal silisyum kullanılarak üretilen güneş pillerinin Tek kristalli ve Çok kristalli gibi çeşitleri bulunmaktadır. Tek-kristal silisyum malzeme, güneş pili üretiminde yüksek verim için kullanılan malzemelerden biri olmakla birlikte, üretim maliyeti yüksektir.

Tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pilleri laboratuvar şartlarında %24, ticari modüllerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Çok kristalli malzemelerde ise verim, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır.

3.4.2.4.2. İnce Film Güneş Pilleri

Yapılan ARGE çalışmaları ile yarı-iletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması yöntemi çekici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalar, güneş pilleri üretiminde kullanılabilecek birçok yarı-iletken malzemenin düşük maliyetlerde cam, metal ya da plastik folyo gibi tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir.

Verimlilikleri %18'lere kadar çıkmış olan ince film güneş pillerinin uzun dönem kararlılıklarının istenilen düzeylere ulaşmamış olması, üretici firmaların kararlılıklarını etkilemektedir.

İnce film güneş pilleri arasında üç büyük aday öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf silisyum, kadmiyum ve tellür elementlerinden meydana gelen birleşik yarı-iletken kadmiyum tellür ve bakır, iridyum, selenyum elementlerinin bir aralığı olan bakır iridyum-diselenid bileşik yarıiletkendir.

Kristal yapı özelliği göstermeyen Amorf silisyum pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesinde. Çok kristal yapıda bir malzeme olan Kadmiyum Tellür (CdTe) ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir. Laboratuvar şartlarındaki küçük alan Bakır indiyum diselenid (CuInSe_2) pillerin verimliliği %18'e ulaşırken, 900cm^2 yüzey alana sahip modüllerin verimi ancak %15 dolayındadır.

3.4.2.4.3. Mikrokrystal Silisyum

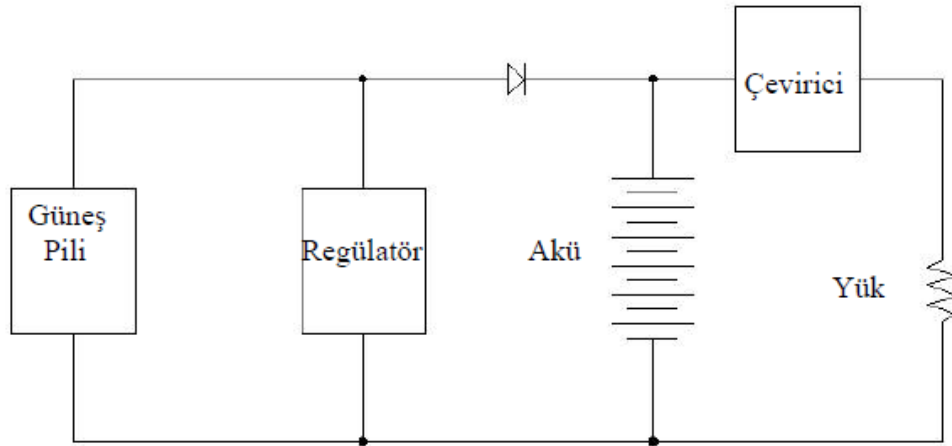
Mikrokrystal silisyum ince film malzemeler ekonomik bir şekilde ileri teknoloji prosesleri ile üretilen, çevreye zarar vermeyen, yenilenebilir enerji üreten güneş pillerinin aktif malzemesi olarak kullanılmaktadır. Üretimi günümüzde kullanılan tek kristal silisyum güneş pillerine göre çok daha ucuza olmaktadır.

3.4.2.4.4. Galyum Arsenit

Bu malzemeyle laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcı) verim elde edilmektedir. Diğer yarı iletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemlı GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır.

3.4.2.5. Güneş Pili Sistemleri

Güneş pili, elektrik enerjisinin gerekli olduğu birçok uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağılı olarak akümülatörler, inverterler, akümülatör şarj cihazları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bu güneş pili sistemi (Fotovoltaik Sistem) oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yerlerde, jeneratöre yakıt taşıması zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç kaynakları ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür. Şekil 3.11’de temel sistem görölmektedir. Aşağıdaki blokların tanıtımı yapılmıştır.



Şekil 3.11 Temel güneş enerjisi sistemi [23]

1) Güneş pili grubu: Yük ve akü grubuna doğru gerilim sağlar. Pil grubu, bir çok güneş pillerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Seri-paralel bağlama yoluyla istenilen çıkış özelliklerine ulaşılabilir. Seri bağlama ile gerilim yükseltilirken pil elemanlarının izolasyonları 600 V’ un üzerine çıkılmasına izin vermezler. Akım ise daha çok iletken kalınlıkları ve diğer devre elemanlarına bağlıdır.

Güneş pili grubunun çıkış gerilimi, akü grubunun şarj edilebilmesine uygun bir değerde olmalıdır, bu değer özellikle 12, 24, 48 veya 120 V olarak seçilir.

2) Regülatör: Temel işlevi akü grubunu aşırı gerilimden korumaktır. Aşırı gerilim, akü elektrolitinde kaynamaya neden olur ve aküye zarar verir hatta parlatabilir.

3) Blokaj diyotu: Bu diyot, bir güneş pili sisteminin temel yapı taşlarından biridir. Piller, karanlıkta sızıntı akımları çok yüksek olan bir diyot gibi davranarak gece boyunca aküleri boşaltırlar. Blokaj diyotu bu istenmeyen yöndeki akımın akışına engel olmak amacıyla devreye seri olarak iletim yönünde bağlanır. Hesaplamalarda blokaj diyotu üzerindeki 0.5-0.7 V' luk gerilim düşümü göz önüne alınmalıdır.

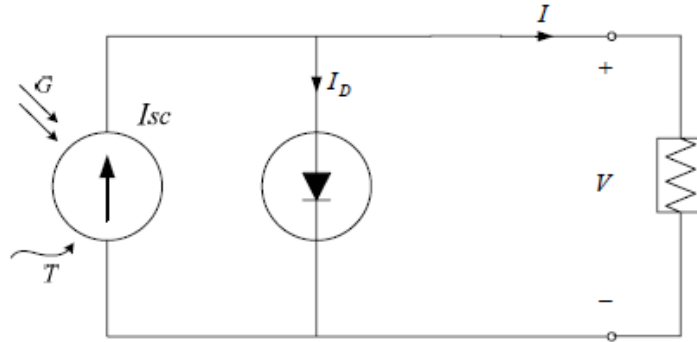
4) Akü grubu: Sistemde bir akü grubunun kullanılmasının iki temel amacı vardır. Birincisi seviyeli enerjiyi depolayarak gereğinde sisteme kısa süreler için yüksek miktarda enerji verebilmek, ikincisi ise güneş pilinin yetersiz kaldığı zamanlarda (geceleri, bulutlu veya yağmurlu günler, sis vb) yükü beslemektir. Güvenilir bir güneş enerjisi sisteminde kullanılan aküler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- Yüksek şarj ve deşarj verimi
- Düşük su kaybı
- Aşırı deşarjdan zarar görmeme
- Düşük kendi kendine deşarj oranı
- Az bakım gerektirme.

Güneş pilleri elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak akümülatörler, inverterler, akü şarj kontrol cihazları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (PV sistem) oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılır. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür.

3.5 Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi

Daha önce anlatılmış olunan Bölüm 3.3.2' de güneş pillerinin yapısı ve güneş enerjisini nasıl elektrik enerjisine çevirdikleri belirtilmiştir. Bu bölüm kapsamında ise güneş pilinin elektriksel eş değer devresi verilecek olup, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde gerekli olan formüller anlatılacaktır. Bir PV hücrenin basit elektriksel eşdeğer modeli Şekil 3.12' deki gibidir.

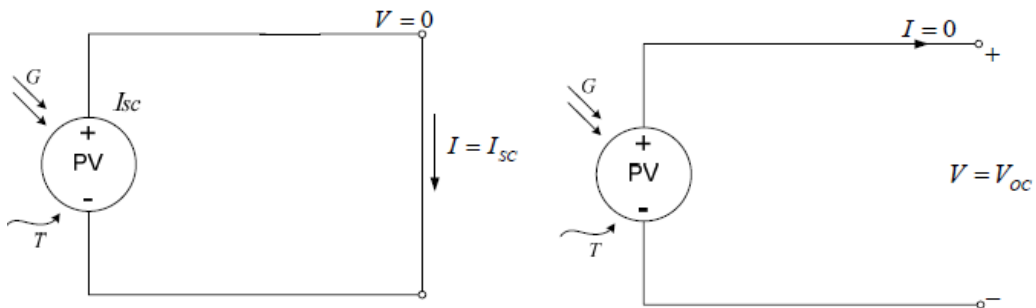


Şekil 3.12 PV hücrenin basit elektriksel eşdeğer modeli [5]

Devredeki ideal akım kaynağı maruz kaldığı güneş akısı ile doğru orantılı olarak akım verir. Gerçek bir PV hücresinde temel olarak iki özellik ile ilgilenilir:

- I. Kısa devre akımı (I_{sc})
- II. Açık devre gerilimi (V_{oc})

Kısa devre akımını ve açık devre gerilimini gösteren devreler Şekil 3.13 de verilmiştir.



Şekil 3.13 PV hücrenin açık devre ve kısa devre eşdeğer modelleri[5]

Şekil 3.12' deki eşdeğer devreye göz önüne alınacak olursa I akımı şu şekilde hesaplanır.

$$I = I_{sc} - I_d \quad (3.1)$$

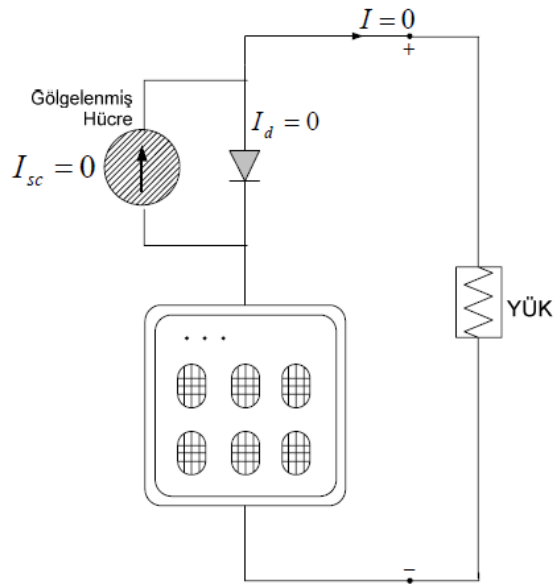
$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q*V_d}{k*T}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{38.9*V} - 1) \quad [25^\circ\text{C için}] \quad (3.3)$$

$$V_{oc} = \frac{k*T}{q} * \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{açık devre gerilimi}) \quad [I = 0 \text{ için}] \quad (3.4)$$

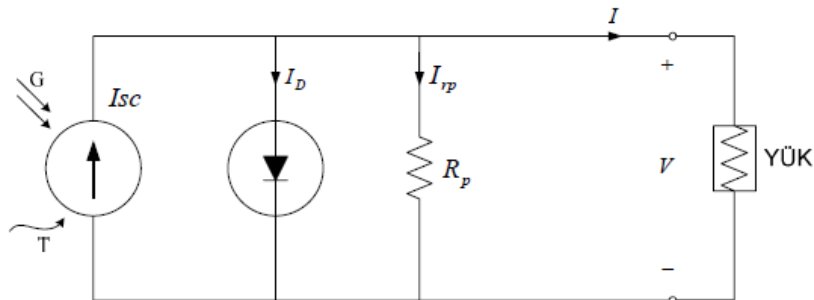
$$V_{oc} = 0,0257 * \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad [25^\circ\text{C için}] \quad (3.5)$$

Daha kompleks bir eşdeğer devre için aynı kol üzerinde seri bağlı hücrelerden birinin gölgelenme etkisine maruz kaldığını düşünelim (gölgelenmiş hücre $I=0$ A üretir).



Şekil 3.14 PV hücrenin gölgelenme etkisine maruz kalması [5]

Bu basitleştirilmiş modele göre yük üzerinden akacak akım $I=0'$ dır. Çünkü diyotlar doyma akımı dışında akım geçirmeyeceğinden yük akımı sıfır olur. Hâlbuki bu gerçekte doğru değildir. Bu nedenle daha doğru bir modele ihtiyacımız vardır. Bu durumda PV hücre modeline paralel bir kaçak direnci (şönt kaçak direnci) ilave edilmiştir.



Şekil 3.15 Şönt dirençli eş değer PV devresi [5]

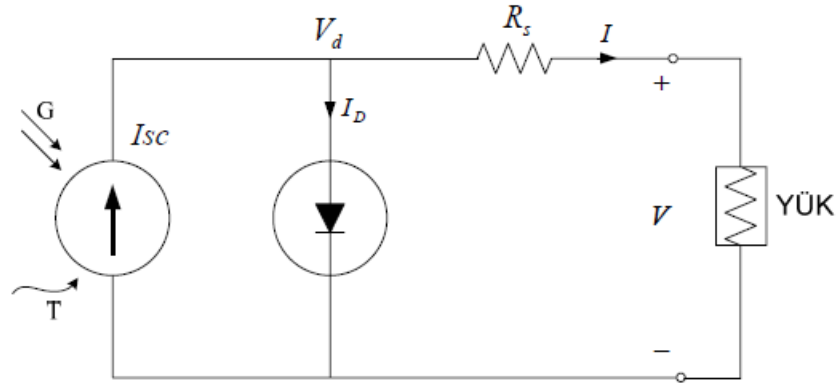
Bu durumda PV'nin vereceği akım:

$$I = (I_{sc} - I_d) - \frac{V}{R_p} \quad (3.6)$$

Bir PV hücrede paralel kaçak direnci dolayısıyla oluşacak kayıpların küçük olması için; $R_p \gg (V_{oc}/I_{sc})$ olmalıdır.

Dikkat edilirse paralel direnç eklenmesi ile hücrenin sağlayacağı akım basit model akımından V/R_p kadar daha azdır.

Basit modele yarı iletken iç direnci kontak ve bağlantı dirençlerini temsilen seri bir R_s direnci bağlayalım. Bu durumda basit model Şekil 3.16' da gösterildiği gibi olur.



Şekil 3.16 Seri dirençli eş değer PV devresi [5]

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right) \text{ idi,}$$

Modelden;

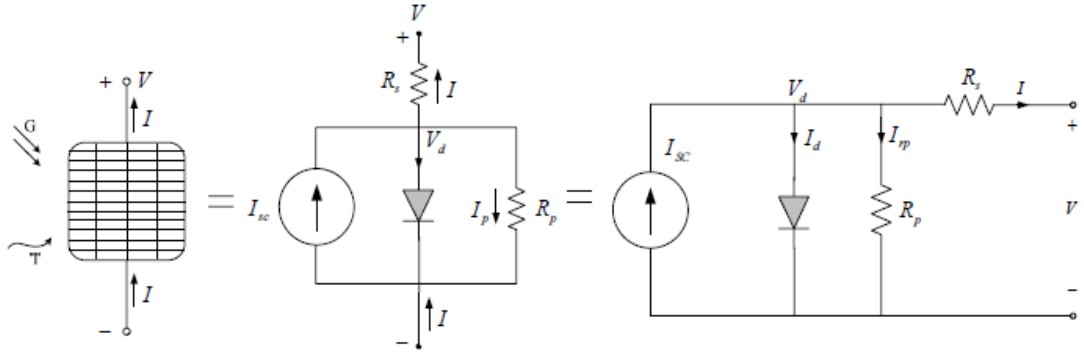
$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (3.7)$$

olarak yazılır. Bu durumda PV hücresinin vereceği akım:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

olacaktır.

Yine kayıpların küçük olması için $R_s \ll (V_{oc}/I_{sc})$ olmalıdır. En son olarak seri ve paralel bağlı dirençler tek bir model üzerinde birleştirilir ise;



Şekil 3.17 PV hücresinin nihai eş değer devresi [5]

Bu durumda akım gerilim arasındaki matematiksel ilişki;

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I R_s)}{k T}} - 1 \right) - \left(\frac{V+I R_s}{R_p} \right) \quad (3.9)$$

şeklinde olacaktır. Hücre sıcaklığının 25 °C kabul edildiği standart kabuller altında ise;

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{38.9(V+I R_s)} - 1 \right) - \frac{1}{R_p} (V + I * R_s) \quad (3.10)$$

olacaktır. Görüleceği üzere bu denklemin nonlineer yapısı vardır ve I, V çözümleri için genel olarak bir hesaplama cetveli oluşturulmalı tavsiye edilir. Bu çözüm yaklaşımına göre V_d değeri için I ve V değerleri kolaylıkla hesaplanır. Örneğin modeli Kirchoff' un akım yasasına uygulanırsa,

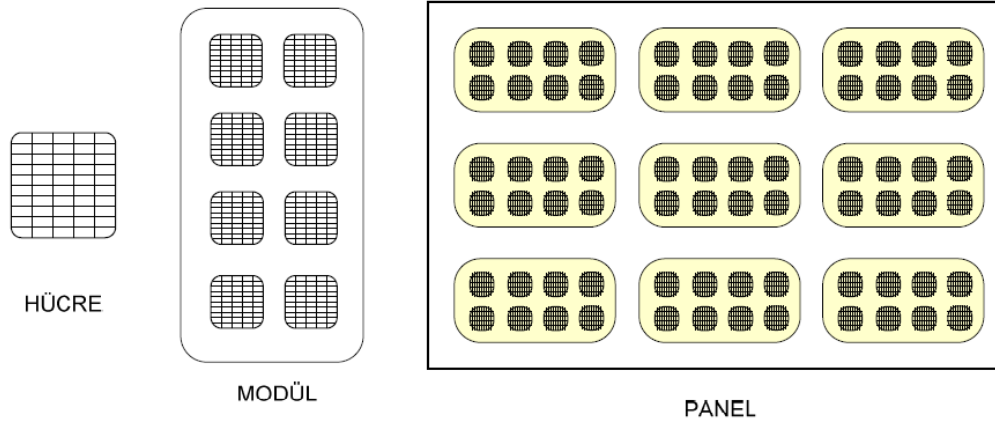
$$I_{sc} = I + I_d + I_p \quad (3.11)$$

Shockley diyot denklemi denklemden yerine yazılırsa ve I çekilirse,

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{38.9 V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p} \quad (3.12)$$

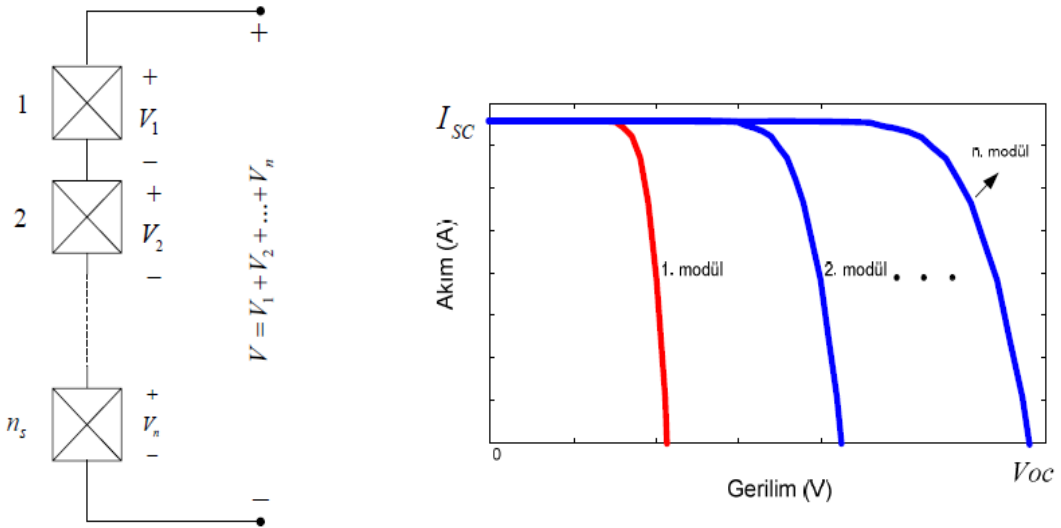
Görüleceği üzere belirli bir V_d diyot gerilimi için I akımı kolaylıkla hesaplanabilir. Hesaplanan I akımı kullanılarak $V = V_d - I * R_s$ 'den V gerilimi hesaplanabilir.

Tipik olarak bir PV hücre 25-30 cm² lik kare bir alana sahip olup, yaklaşık 1W'lık güç üretir. Yüksek güçler elde edebilmek için birçok PV hücre seri ve paralel olarak bağlanır ve büyük bir alana sahip bir modül elde edilir. Bir PV güneş paneli ise ihtiyaç olan akım ve gerilimi üretecek şekilde modüllerin seri-paralel kombinasyonlarını içerir.



Şekil 3.18 PV hücre, PV modül, PV panel [5]

Bir fotovoltaiik sistemden isteğimiz gerilim değerini alabilmek için hücreleri seri bağlamamız gerekmektedir. Hücrelerin seri bağlanması modül gerilimini arttıracaktır.



Şekil 3.19 PV hücrelerinin seri bağlanması [5]

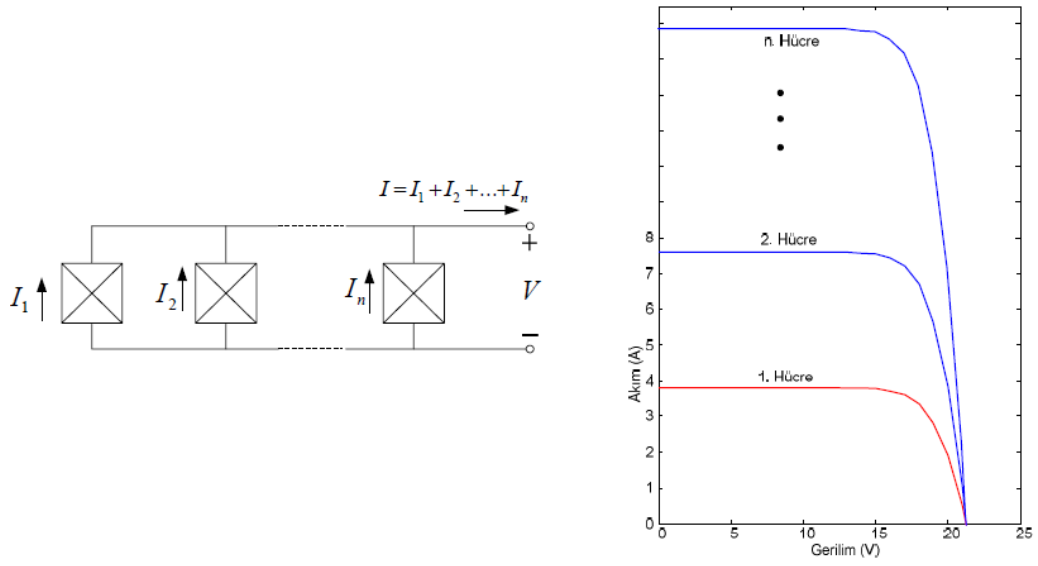
Hücrelerin seri bağlanması ile elde edilecek modül gerilimi:

$$V_{modül} = n * V \quad (3.13)$$

$$V_{modül} = n * (V_d - I * R_s) \quad (3.14)$$

olacaktır.

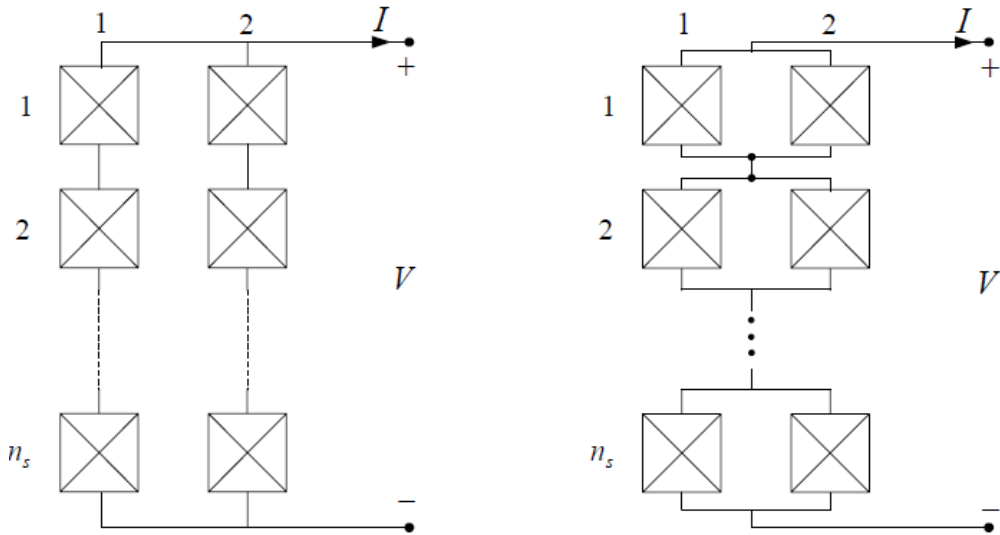
Hücrelerin paralel bağlanması ile de modülün sağlayacağı akım değeri arttırılabilir. Böylece sistemden istenen akım değeri karşılanabilir.



Şekil 3.20 PV hücrelerinin paralel bağlanması [5]

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n \quad (3.15)$$

Hücrelerin farklı şekillerde seri ve paralel bağlanması ile modüllerden, modüllerin farklı şekillerde seri ve paralel bağlanması ile de panellerden arzu edilen elektriksel güç değeri karşılanabilir. Modüllerin farklı şekillerde bağlanmasına ilişkin örnekler şekil 3.21’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.21 Modüllerin farklı bağlantı tipleri [5]

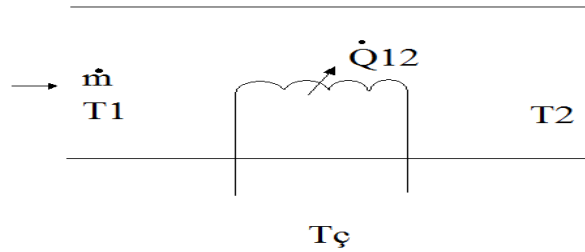
EKSERGOEKONOMİK ANALİZ**4.1. Giriş**

Bu bölümde sırasıyla rüzgar ve güneş sistemleri için ekserji analizi yapılacaktır. Daha sonra, EXCEM ekonomik modelinin uygulanması ile birlikte her iki sistem için eksergoekonomik analizi tamamlanacaktır. Böylelikle yenilenebilir enerji kaynaklarındaki ekserji değerlerinin sistemin maliyetini nasıl etkilediğini görme fırsatı elde edilecektir.

Hesaplamalara başlamadan önce, formüller içinde yer alan termodinamik terimlerini kısaca anlatacak olursak.

- **Ekserji**

Ekserji enerjinin yararlanılabilir kısmıdır. Enerjinin diğer kısmı ise anerjidir ve bu kısımdan yararlanılamaz. Bu hususu örneklerle açıklamaya çalışalım.



Şekil 4.1 Bir ısıtıcıdaki ısı alış verşi [29]

İlk örnek olarak bir ısıtıcıdaki ekserji ve anerji değerleri gösterilmeye çalışılacaktır. Şekil 4.1' de görüleceği üzere $\dot{m}$ kütle debisine sahip T_1 sıcaklığında bir akışkana elektriksel

yoldan Q_{12} ısı akımı verilmektedir. Q_{12} içindeki ekserji tespit edilmek istenmektedir. $T_{\text{ç}}$ ise çevre sıcaklığıdır.

$$\dot{Q}_{12} = \dot{H}(T_2) - \dot{H}(T_1) \quad (4.1)$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} \overline{c_p} (T_2 - T_1) \quad (4.2)$$

veya sıvılar için

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} c (T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

eşitlikleri verilir. Buradan:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} c (T_2 - T_1 + T_{\text{ç}} - T_{\text{ç}}) \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} c (T_2 - T_{\text{ç}}) + \dot{m} c (T_{\text{ç}} - T_1) \quad (4.5)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim ekserjiyi gösterirken ikinci terim ise anerjiyi göstermektedir. Denklem 4.5' ten görüleceği üzere $T_{\text{ç}} = T_1$ olması durumunda anerji sıfır olmaktadır. Bu durumda $\dot{Q}_{12}$ ' nin tümü ekserji dolayısıyla tamamiyle işe çevrilebilir olmaktadır.

Bir başka örnek olarak potansiyel enerji ile ekserji ve anerji arasındaki ilişkiyi inceleyelim. $H = H_1 + H_2$ yüksekliğinde bulunan bir m kütlesinin yere göre mutlak potansiyel enerjisi:

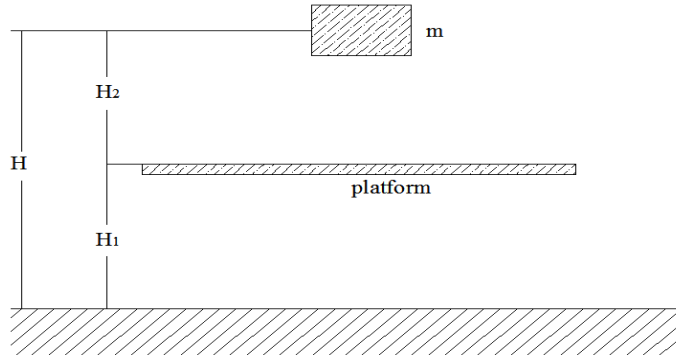
$$E_{\text{POT}} = m \cdot g \cdot H \quad (4.6)$$

dır. Yer ile kütle arasına H_1 yüksekliğine bir platform getirilirse bu enerji:

$$E_{\text{POT}} = m \cdot g \cdot (H_2 + H_1) \quad (4.7)$$

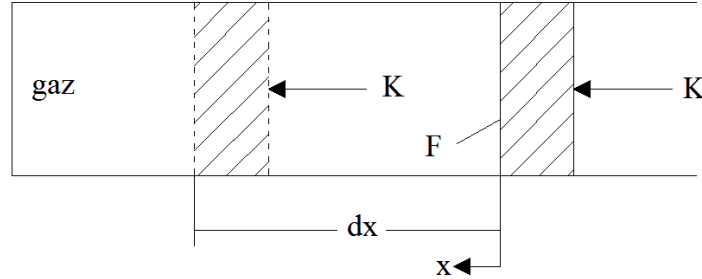
$$E_{\text{POT}} = m \cdot g \cdot H_2 + m \cdot g \cdot H_1 \quad (4.8)$$

şeklini alacaktır. 4.8 denkleminin sağ tarafındaki ilk terim ekserjiyi ifade ederken ikinci terim ise anerjiyi ifade etmektedir. $H_1 = 0$ olması durumunda potansiyel enerjinin tümü ekserji olur.



Şekil 4.2 m kütleli bir cismin potansiyel enerjisi [29]

- **Entalpi:**



Şekil 4.3 Bir pistonla sıkıştırma olayı [29]

Şekil 4.3' te belirtilen sıkıştırma olayında sistemin adyabatik olduğu (dışarı ile ısı alış verişi yok) uygulanan iş, gaz kütleğinde belli bir sıcaklık artışına sebep olacaktır. Dolayısıyla bu sıkıştırma işlemi sonucunda gazın iç enerjisinde bir artış sağlanacaktır. Her maddenin içinde bulunduğu ısı durumuna göre basınç, hacim, sıcaklık v.s. ile belirli bir iç enerjisi vardır. İç enerjisinin yükselmesi maddenin molekül ya da atomlarındaki enerjinin artışı demektir. İç enerji genellikle U ile gösterilir. Bir gazın basıncının hacim ile çarpımına hacim enerjisi denilmektedir. Bu enerji iç enerji (U) ile toplanırsa entalpi (H) denilen termodinamik büyüklük elde edilir.

$$H = U + P.V \quad (4.9)$$

- **Entropi:**

Entropi, bir sistemin *mekanik işe* çevrilemeyecek termal enerjisini temsil eden termodinamik terimidir. Çoğunlukla bir sistemdeki rastgelelik ve düzensizlik olarak

tanımlanır ve sembolü “s” dir. Sistemlerdeki düzensizlik arttıkça, entropi de artar ve bu durum da faydalı (iş yapabilir) enerji miktarını azaltır. Eğer bir sistem tamamı ile düzenli ise entropisi sıfır olabilir. Entropi, enerji gibi korunan bir özellik değildir. Bütün enerji değişimlerinde çevre ile sistemin entropi değişimlerinin toplamı daima pozitifdir. Bu da evrendeki toplam entropinin sürekli artmasına sebep olur. Termodinamiğin ikinci yasasına göre entropi ile ilgili olarak şu bağıntı verilmiştir.

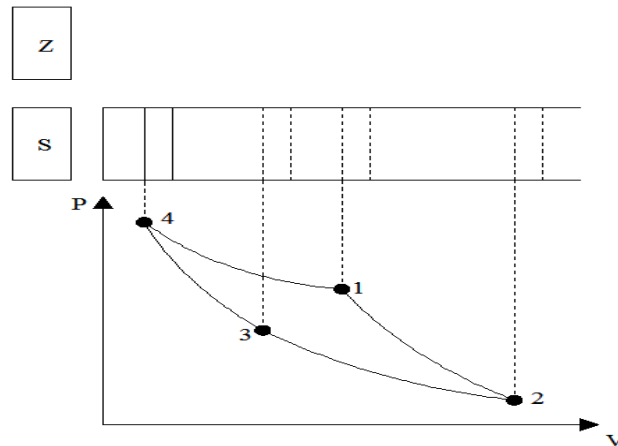
$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (4.10)$$

Dolayısıyla tersinir durumlarda entropi 0'a eşitken tersinmez durumlarda entropi 0'dan büyüktür. Bundan başka $s < 0$ olma durumu imkânsızdır. Termodinamiğin ikinci yasasının değişik (ama eşdeğer) ifadelerinden birinde, kapalı bir sistemin entropisinin hiç bir zaman azalamayacağı belirtilir.

- **Tersinirlik ve Tersinmezlik**

Geriye hiçbir etki bırakmaksızın ters çevrilebilen işlemlere tersinir işlem denir. Tersinir bir işlemi gerçekleştirmek için özel düzenekler ve sürtünme gibi kayıpların ihmal gerekmektedir. Termodinamikte bütün olaylarda sürtünme ve diğer kayıplar söz konusu olduğundan işlemlerin hemen hepsi tersinmezdir. Tersinemez işlemlerde geriye etki bırakmadan başlangıç koşullarına gelmek mümkün değildir. Sabit sıcaklıklarda meydana gelen değişimler tersinir proseslerdir. Örneğin katılaşma, ergime, buharlaşma..

- **Carnot Çevrimi**



Şekil 4.4 Carnot çevrimi [30]

Şekil 4.4' te silindir içinde sürtünmesiz hareket edebilen bir piston görülmektedir. Silindirin içindeki iş akışkanı hava olsun. Sonsuz ısı kaynağı olan S silindire yaklaştırılınca ısı, silindirin içindeki havaya geçecek ve bir süre sonunda ısıl denge sağlanacaktır. Denge haline geldiği zaman silindir içindeki havanın sıcaklığı sonsuz kaynak olan S' in sıcaklığı ile aynı olup t_1 olacaktır. Şekil 4.4' te bu konum 1 noktası ile gösterilmektedir. Sistemin çalışması şu şekildedir:

- a) ısıl dengenin sonunda S silindirden uzaklaştırılır ve herhangi bir ısı alış verişi olmaksızın piston 1 konumunda 2 konumuna doğru yavaş yavaş hareket eder. Pistonun bu hareketi sırasında basınç ve sıcaklık düşecektir. Düşen sıcaklık ısı çukuru olan Z' nin sıcaklığına (t_2) geldiğinde piston duracaktır.
- b) 2 durumunda ısı çukuru silindire yaklaştırılır ve piston ters yönde hareket verilir. ısı çukuru sonsuz büyük kabul edildiğinden buraya verilecek olan sıcaklık ısı çukurunun sıcaklığında bir değişikliğe neden olmaz. Pistonun hareketinin yavaş olmasından dolayı pistonun itilmesi sonucu oluşan ısı silindirdeki havanın sıcaklığının artmasına meydan vermeksizin ısı çukuruna akacaktır ve bu suretle piston 3 konumuna gelecektir. Çukura akan ısıdan dolayı sıkıştırma esnasında belli bir basınçtaki hacim ve sıcaklık genişleme eğrisi üzerinde aynı basınçtaki hacim ve sıcaklıktan düşüktür.
- c) Piston 3 konumunu aldıktan sonra Z silindirden uzaklaştırılır ve piston hareketine devam ederek herhangi bir ısı alış verişi olmaksızın silindir içindeki havanın sıcaklığı yeniden t_1 oluncaya kadar havayı sıkıştırır. Sıcaklığın t_1 olduğu 4 konumunda bir an için piston durdurulur.
- d) Bu durumda S tekrar silindire yaklaştırılır. Piston yavaş yavaş soldan sağa doğru hareketine devam ederken düşen sıcaklık miktarı kaynaktan çekilen ısı ile bertaraf edilir ve sıcaklığın t_1 de sabit kalması sağlanır. Böylece sistem başlangıç koşulu olan 1 e geri döner.

Carnot makinasının çalışması bu dört durum değiştirmeden meydana gelen çevrimle sağlanmış olur. Bu çevrimler, aynı şartlara uygun olarak tekrar edildiği sürece makine çalışmaya devam eder. Çevrimi üreten dört durumu değiştirmeden yalnız ikisinde ısı alış verişi olmaktadır. Böylece bir çevrim iki adyabatı birleştiren iki izotermden oluşmaktadır. Carnot çevriminin verimi şu şekilde hesaplanır:

$$Q = \int PdV \quad (4.11)$$

$$Q_{4-1} = \int_4^1 \frac{m.R.T_1}{V} . dV \quad (4.12)$$

$$Q_{4-1} = m . R . T_1 . \ln \frac{V_1}{V_4} \quad (4.13)$$

$$Q_{2-3} = m . R . T_2 . \ln \frac{V_2}{V_3} \quad (4.14)$$

$$\eta = \frac{Q_{4-1} - Q_{2-3}}{Q_{4-1}} \quad (4.15)$$

$$\eta = \frac{m.R.T_1.\ln\frac{V_1}{V_4} - m.R.T_2.\ln\frac{V_2}{V_3}}{m.R.T_1.\ln\frac{V_1}{V_4}} \quad (4.16)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2.\ln\frac{V_2}{V_3}}{T_1.\ln\frac{V_1}{V_4}} \quad (4.17)$$

Adyabatik 1-2 genişlemesinden:

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.18)$$

$$\left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.19)$$

4.18 ve 4.19 denklemlerinden;

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2} \quad (4.20)$$

4.17 ve 4.20 denklemlerinden;

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4.21)$$

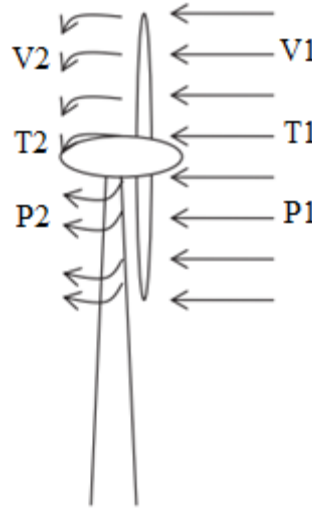
4.2. Rüzgar Ekserji Analizi

Rüzgardan enerji üretmesi neticesinde ekserji tüketimi de tersinir haline bağlı olduğundan üretilen entropi ile orantılıdır. Entalpisi h olarak belirlenen, kinetik ve potansiyel enerjileri sırasıyla ke , pe , birim zamandaki ısı ve iş etkileşimleri $\dot{Q}$ ve $\dot{W}$ olan birim kütleli, $\dot{m}$, bir sistemdeki akışın enerji ve ekserji eşitliği Denklem (4.22)'deki gibi ifade edilir [38].

$$\sum_{in} (h + ke + pe)_{in} \dot{m}_{in} - \sum_{ex} (h + ke + pe)_{ex} \dot{m}_{ex} + \sum_r \dot{Q}_r - \dot{W} = 0$$

$$\sum_{in} ex_{in} \dot{m}_{in} - \sum_{ex} ex_{ex} \dot{m}_{ex} + \sum_r Ex^q - Ex^w - I = 0 \quad (4.22)$$

4.2.1. Akışın Ekserjisi



Şekil 4.5 Türbini etkileyen değişkenlerin giriş ve çıkışlarının gösterimi

Yapacağımız hesaplarda kullanacağımız (1) ve (2) şartları rüzgarın türbin kanatlarına girmeden önceki ve girip çıktıktan sonraki akışın özelliklerini belirtmektedir (Şekil 4.5). Örneğin T_1 durumu akışın kanatlardan önceki sıcaklığıyken T_2 durumu ise kanatlardan çıkan akışın sıcaklığını temsil etmektedir.

Sıcaklığı T , basıncı P , kimyasal kompozisyonu μ_j , kütlesi m , belirlenen entalpisi h , belirlenen entropisi s olan hareketli bir maddenin, ekserjisi denklem 4.23 de olduğu gibi ifade edilir [38]

$$ex = [ke + pe + (h - h_0) - T_0(s - s_0)] + \left[\sum_j (\mu_{j0} - \mu_{j00}) x_j \right] \quad (4.23)$$

Bu formülasyonu rüzgara uyumlu hale getirmek için potansiyel enerji ve kimyasal bileşenleri çıkarmamız gerekecektir. Bu halde rüzgârın ekserjisi denklem 4.24' deki gibi ifade edilebilir.

$$ex = [ke + (h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (4.24)$$

Rüzgar ekserjisinde kimyasal değişken ihmal edilebildiğinden, rüzgar ekserjisi iş terimi 4.25' de olduğu gibi ifade edilir [38].

$$\dot{E}x^w = \dot{W} \quad (4.25)$$

Tersinmezlikler sürecinde ekserji üretimi ise denklem 4.26 ile ifade edilir.

$$\dot{I} = T_0 * \dot{S}_{gen} \quad (4.26)$$

Rüzgar enerjisindeki entropi üretimi ise denklem 4.27' de gösterildiği gibidir

$$\Delta S = \dot{m}T_{at}(C_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \frac{\dot{Q}_{loss}}{T_{at}}) \quad (4.27)$$

$$\dot{Q}_{loss} = \dot{m}C_p(T_1 - T_2) \quad (4.28)$$

Rüzgar türbinlerindeki enerji ve ekserji verimlilikleri ise şu şekilde olacaktır.

η = enerji üretimi/toplam enerji girişi

ψ = ekserji üretimi/toplam ekserji girişi olarak kabul edildiğinde

- Ekserji verimi, kayıpları, tersinmezlikleri içine alır, böylece sistemin sorunları ayrıntılı olarak görülebilir ve verimini arttırma yönünde gerekli iyileştirmeler yapılabilir. Çoğu durumda içsel tersinmezlikler çok büyük önem taşırlar.
- Fakat enerji verimi hesaplamalarında sadece sistemin girdileri ve çıktıları ile ilgilenildiğinden sistemin ayrıntısına girilmez.

Rüzgar enerjisinde ekserji analizi yapılırken; üretilen elektrik enerjisi, rüzgarın kinetik enerjisi, entalpi, üretilen entopi ve sistemin ısı kayıpları ele alınması gereken değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bilindiği üzere ısı kayıpları sıcaktan soğuğa doğru olacaktır. Rüzgar türbini elektrik üretimi gerçekleştirdiği durumda birim zamandaki entalpi değişimi denklem 4.29' deki gibi olacaktır.

$$\Delta H = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) \quad (4.29)$$

Burada,

T_2 = Kanat arkasındaki rüzgarın sıcaklığını

T_1 = Kanat önündeki rüzgarın sıcaklığını göstermektedir.

Rüzgar enerjisinin ekserjisi ise denklem 4.30' deki hesaplanır. Elde edilen formülün verimlilik denkleminde yerine yazılması ile birlikte rüzgar enerjisinin ekserji verimi ise denklem 4.31' de gösterilmektedir. [38]

$$\Delta Ex = E_{\text{üretilen}} + \dot{m}C_p(T_2 - T_1) - \dot{m}T_{at}(C_p \ln(\frac{T_2}{T_1}) - R \ln(\frac{P_2}{P_1}) - \frac{Q_{loss}}{T_{at}}) \quad (4.30)$$

$$\psi = \frac{E_{\text{üretilen}} + \dot{m}C_p(T_2 - T_1) - \dot{m}T_{at}(C_p \ln(\frac{T_2}{T_1}) - R \ln(\frac{P_2}{P_1}) - \frac{Q_{loss}}{T_{at}})}{E_{\text{potansiyel}}} \times 100 \quad (4.31)$$

Geliştirilen bu modelin detaylarına ve yapılan uygulama çalışmasına [38] numaralı kaynaktan ulaşılabilir. Şahin ve diğ. [38]' de yaptıkları çalışmada türbin kanatlarının arkasındaki rüzgar, sıcaklık ve basınç değerleri için bazı yaklaşımlarda bulunulmuştur. Bu yaklaşımlar ölçüme dayanmadığı için sorun oluşturabiliyordu. Ancak bu çalışmada sistemdeki bütün bileşenler kabullerden ziyade ölçümlere dayanmaktadır.

4.3 Fotovoltaik Pillerin Ekserji Analizi

Günümüzde güneş pillerinin yapımında genelde silikon kullanılmaktadır. Güneşten gelen foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren her bir maddenin belirli bir bandgap kabiliyeti vardır. Bandgap kabiliyeti foton enerjisinin belirli bir dalga boyunda olan kısmının elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi demektir. Silikonun bandgap değeri 1.1 eV'tur yani silikon 1.2 μm (cut off) ve daha küçük dalga boylarındaki ışınımı elektriğe dönüştürebilmektedir. Eğer gelen ışınımın dalga boyu bu değerin üstünde ise ışınım elektrik enerjisine değil de ısı enerjisine dönüştürülür.

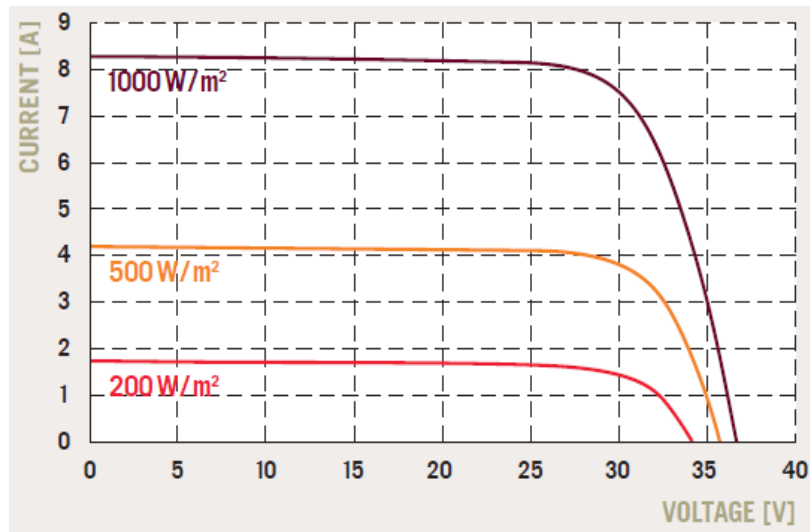
Dolayısıyla 1.2 μm 'den yüksek ışınımlarda büyük kayıplar oluşmaktadır. PV' lerde elektrik üretiminde etkili olan temel parametreler şunlardır:

1. Gelen güneş ışınımının yoğunluğu
2. Güneşlenme süresi
3. Güneşin geliş açısı
4. En uygun verimlilik sıcaklığı
5. Kullanılan malzemenin yapısı.

Fotovoltaik pillerin verimliliği toplam üretilen elektrik ile o alana gelen global güneş radyasyon miktarının oranıdır. Bu tanımlamada sadece fotovoltaik piller tarafından üretilen elektrik hesaba katılmaktadır. Fotovoltaik pilleri etkileyen diğer bileşenlerden olan hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve hücrenin kimyasal bileşenleri hesaba doğrudan katılmamaktadır.

Fotovoltaik pillerde üretilen güç, pil çıkışında ölçülen akım ve gerilim değerlerinin çarpılması ile ölçülür. Üretilen her fotovoltaik pilin kendine özgü bir I-V eğrisi bulunmakta, bu eğrinin farklılaşmasını sağlayan temel etken ise pilin yapımında kullanılan hammaddedir. Bilindiği üzere fotovoltaik piller güneşten gelen radyoaktif enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür; Ancak bu dönüşüm verimi, sabit güneş ışınımı şartlarında bile sabit olmayabilmektedir.

Maksimum güç çıkışı “fill factor” ile sınırlandırılmış olup fotovoltaik sistemdeki maksimum güç dönüşüm verimini vermektedir.



Şekil 4.6: Fotovoltaik sisteme ait güç eğrisi. Bu güç eğrisi standart toplam güneş ışınımı (1000 W/m^2 , 25°C sıcaklık şartlarında geçerlidir.)

Dolum çarpanı (fill factor, FF): Belirli bir ışınlam altındaki akım-gerilim eğrisinde, denklem 4.32' de ifade edildiği gibi fotovoltaik pilin üretebileceği maksimum akım – gerilim değerlerinin çarpımının, pilin kısa devre akımı ile açık devre gerilimi çarpımına bölünmesiyle hesaplanır ($V_{mp} \times I_{mp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ ye oranı).

$$FF = (V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (4.32)$$

Güneş pilinin çıkış gücü, $P_{\text{çıkış}}$, bu değişkenler cinsinden,

$$P_{\text{çıkış}} = V_{mp} \times I_{mp} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (4.33)$$

şeklinde verilebilir.

Bir güneş pilinin üretim verimliliği, η , fotovoltaik gözenin üzerine düşen güneş ışınlam gücünün, gözeden alınabilecek güce oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = (P_{\text{çıkış}} \times I_{mp}) / (V_{\text{giriş}} \times I_{sc}) = (V_{oc} \times I_{sc} \times FF) \quad (4.34)$$

Fotovoltaik pillerin verimlilikleri standart test koşulları altında ölçülür. Bu koşullar: Pil 25 °C' de, atmosferik kütlenin 1.5 güneş spektrumuna sahip 1000W/m² güneş ışınlamına sahip olması durumudur. Bulutsuz ve güneşli bir günde 1200 W/m² ye varabilen bu değer, bulutlu günlerde 200-800W/m² arasında değişmektedir.

4.3.1 Fotovoltaik Pillerin Enerji ve Ekserji Verimleri

η = Enerji üretimi/Toplam enerji girişi = enerji verimi

ψ = Ekserji üretimi/Toplam ekserji girişi olarak kabul edelim = ekserji verimi

Daha önce (4.22) denkleminde bahsettiğimiz enerji dengesini düşünecek olursak eğer fotovoltaik pillerde, rüzgar türbinlerinde olduğu gibi kinetik enerjinin aksine entalpi, entropi ve kimyasal bileşenler etkili olacaktır.

$$ex = [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] + \left[\sum_j (\mu_{j0} - \mu_{j00})x_j \right] \quad (4.35)$$

Fotovoltaik pillerde ekserji hesabında fiziksel ve kimyasal ekserjiyi ayrı ayrı düşünülecek olursa, pildeki entalpi değişimi denklem 4.36' da gösterildiği gibi olacaktır.

$$\Delta H = c_{ps}(T_{cell} - T_{amb}) \quad (4.36)$$

Burada:

ΔH = entalpi değişimi (J/kg)

T_{amb} = çevre sıcaklığını (K)

T_{cell} = fotovoltaiik hücre sıcaklığını (K) ifade etmektedir.

Entropi üretimi ise denklem 4.37 ile ifade edilir:

$$\Delta S = c_{ps} \ln\left(\frac{T_{cell}}{T_{amb}}\right) - \frac{Q_{loss}}{T_{cell}} \quad (4.37)$$

Burda, ΔS entropi üretimi olup, Q_{loss} ise fotovoltaiik pilde meydana gelen ısı kayıplarını göstermektedir. Isı kaybı ise denklem 4.38' de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_{loss} = c_p (T_{cell} - T_{amb}) \quad (4.38)$$

c_p silikonun özgül ısı değeridir (700 kJ/kgK).

Bu durumda, fotovoltaiik pilin toplam fiziksel ekserjisi; üretilen elektriksel güç, entalpi ve entropi değerlerinin toplamı şeklinde ifade edilebilir ve denklem 4.39' da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Ex_{physical} = E_{GH} + c_{ps} (T_{cell} - T_{amb}) - T_{amb} \left(c_{ps} \ln\left(\frac{T_{cell}}{T_{amb}}\right) - \frac{Q_{loss}}{T_{cell}} \right) \quad (4.39)$$

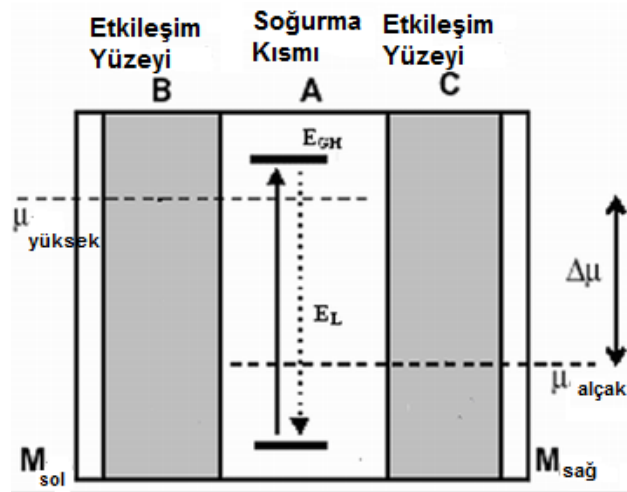
Böylece fotovoltaiik pillerde ekserji hesabının ilk aşaması olan fiziksel ekserji denklem 4.39 kullanılarak hesaplanmış oldu. Şimdi ekserji hesabının ikinci aşaması olan kimyasal ekserji hesaplamalarına başlayalım.

Fotovoltaiik pillerde enerji dönüşümü iki aşamada gerçekleşmektedir.

1. Elektronik yük oluşumu için elektronun ışık tarafından uyarılması.
2. Elektron yüklerinin ayrışması

Fotovoltaiik pil üzerine güneş ışığının düşmesiyle birlikte, iki seviyeli bir sistemde elektron sıçraması meydana gelecek ve düşük enerji seviyesinde (E_L) bulunan elektronlar yüksek enerji seviyesine (E_H) sıçrayacaktır. Elektronların tekrar eski seviyesine dönmesiyle birlikte ani olarak E_L seviyesinde düşük enerjili elektron oluşturulacak ve enerji değerleri arasında $\Delta\mu$ miktarı kadar bir farklılık görülecektir.

Sistemdeki termal eşitliğin bozulmasıyla birlikte şekilde görüldüğü gibi kimyasal potansiyeller arasında farklılık oluşacaktır. Bu durum Şekil 4.7’ de nispeten anlatılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.7: Fotovoltaik sistemlerde enerji farkı oluşumu [44]

$$\Delta\mu = \mu_H - \mu_L \quad (4.40)$$

Termodinamik açıdan bu seviyeler arasındaki fark Carnot çevrimine bağlı olarak sınırlandırılacaktır. Bu durumda Carnot çevrimi, açık-devre voltajında üst seviye kimyasal potansiyeli aşağıdaki denkleme dayalı olarak verecektir.

$$\Delta\mu = \left(1 - \frac{T_{cell}}{T_p}\right) [(E_{GH} - E_L)] \quad (4.41)$$

Burada

T_{cell} fotovoltaik pilin sıcaklığını

T_p , güneşin sıcaklığını

E_{GH} , elektronun yüksek enerji seviyesinde enerji içeriğini

E_L ise elektronun daha düşük seviyelerdeki enerji içeriğini belirtmektedir.

Maksimum güç kısa devre akımı, I_{sc} ve açık devre voltajı, V_{oc} değerlerine bağlı olmaktadır. Carnot çevrimine göre düşündüğümüzde E_{GH} 'ı eğrisel bir alan yerine dikdörtgen alanı olarak düşünebiliriz. Bu durumda kimyasal enerji farkları denklemi

$$\Delta\mu = (1 - \frac{T_{cell}}{T_p}) [V_{oc} I_{sc} - V_m I_m] t \quad (4.42)$$

şeklinde yazılabilir. Burada “t” zamanı belirtmektedir.

Denklem 4.42 fotovoltaiik pillerin kimyasal ekserjisini vermektedir. Daha öncede belirtildiği gibi verimlilikte maksimum güç PV sistemlerinde yaklaşık olarak V_{oc} ve I_{sc} civarında elde edilebilmektedir. Fakat termodinamik perspektifte hesaba katılmayan bütün bileşenler (I-V) eğrilerinde hesaba dâhil edilmelidir.

Sonuç olarak fotovoltaiik pillerin toplam ekserjisi, 4.43 denkleminde olduğu gibi hesaplanacaktır.

$$Ex = Ex_{physical} - (q_{sc} V_{oc} - q_L V_L) \frac{T_{cell}}{T_p} \quad (4.43)$$

Fotovoltaiik pilin güç dönüşüm verimliliği ise η_{pce} , E_L ve S_T ’ nin fonksiyonu olarak aşağıdaki 4.44 denklemindeki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_{pce} = \frac{E_L / t}{S_T} = \frac{V_m I_m}{S_T} \quad (4.44)$$

Burada S_T saatlik ölçülen toplam güneş ışınlamını ifade etmektedir. Güneş pilinin güç dönüşüm verimliliği “fill factor” (FF) ifadesine göre denklem 4.45 ile ifade edilebilir.

$$\eta_{pce} = \frac{FF \times V_{oc} I_{sc}}{S_T} \quad (4.45)$$

Güneş pillerinin ekserji verimlerinin hesaplanabilmesi için güneş ışınlamının ekserji değerinin hesaplanması gerekir. Güneş ışınlamının ekserji değeri ise Carnot sınırlamasına göre şu şekilde olmaktadır.

$$E_{xsolar} = S_T (1 - \frac{T_{amb.}}{T_{sun}}) \quad (4.46)$$

Buradan ekserji verimliliği,

$$\psi = \frac{E_x / t}{E_{xsolar}} \quad (4.47)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Daha önce de bahsedildiği gibi PV'lerin enerji verimlilikleri, η sadece üretilen elektriğe, E_{gen} ve yüzeye gelen toplam güneş ışınımı miktarı olan S_T 'ye bağlı idi. Bu durumda enerji verimliliği 4.48 ile ifade edilir

$$\eta = \frac{E_{GH} / t}{S_T} \quad (4.48)$$

PV ve güneş ışınımının ekserji terimlerinin yerlerine yerleştirilmesiyle ekserji verimliliği,

$$\psi = \frac{Ex_{physical} - (q_{sc} V_{oc} - q_L V_L) \frac{T_{cell}}{T_p}}{t S_T (1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}})} \quad (4.49)$$

(4.49) şeklinde ifade edilebilir ve (4.39) denklemindeki fiziksel ekserji terimlerinin de denklemden yerine yerleştirilmesiyle fotovoltaik pillerin ekserji verimliliği 4.50' deki gibi hesaplanır.

$$\psi = \frac{\left[E_{GH} + c_{ps} (T_{cell} - T_{amb}) - T_{amb} (c_{ps} \ln(\frac{T_{cell}}{T_{amb}}) - \frac{Q_{loss}}{T_{cell}}) \right] - \left[(q_{sc} V_{oc} - q_L V_L) \frac{T_{cell}}{T_p} \right]}{t S_T (1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}})} \quad (4.50)$$

Denklemin 4.50'de görüldüğü gibi ekserji verimliliği sistemin performansını anlama bakımından enerji verimliliğinden daha detaylı ve sistemi anlamaya yönelik sonuçlar verecektir

Ekserji verimliliğinde bütün dış kayıplar ve içsel tersinmezlikler görülmekte ve bunun sonucunda da sistemde verim artırma yoluna gidilebilmektedir. Burada olduğu gibi çoğu zaman içsel tersinmezlikleri ifade etmek dış kayıpları belirlemekten çok daha zor olmaktadır.

4.4 Ekonomik Model

Tez çalışması kapsamında Bölüm 4.1 ve 4.2' de rüzgar ve güneş sistemlerinin ekserji analizleri anlatılmıştır. Ekserji analizi, sistemi sadece termodinamik açıdan değerlendirmektedir.

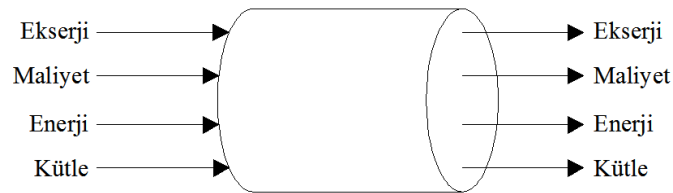
Ancak elde edilen sonuçların maliyet faktörünün de göz önüne alınması gerekir. Bu analiz yöntemine eksergoekonomik analiz denmektedir.

Tez çalışması kapsamında ekonomik analiz yöntemi olarak EXCEM (Exergy-Cost-Energy-Mass) yöntemi uygulanacaktır.

EXCEM yöntemine katkıda bulunan birçok alt disiplinin farklı tarihsel gelişimleri vardır. Ekserji analizinin gelişimi ve tarihi süreciyle ilgili yayınlar [32-36] kaynaklarında sunulmaktadır. Birçok alt disiplini, EXCEM analiz yöntemi altında birleştirmeye yönelik ilk basit konsept 1982 yılında MEAD [mass (kütle), energy (enerji), availability (kullanılabilirlik), dollars (dolar)] ismiyle tasarlanmıştır. MEAD yönteminde “kullanılabilirlik” ekserji anlamında kullanılırken, “dolar” ise maliyet anlamında kullanılmıştır. MEAD zaman içinde EXCEM’e dönüşmüştür. MEAD ilk olarak MEDE [maas (kütle), energy (enerji), dollars (dolar), ve exergy (ekserji)]’ye dönüşmüştür. Dünya genelinde, olası karışıklıklara neden olmaması için “availability” yerine ekserji kullanılması uygun görülmüştür. Daha sonra, MEDE yönteminde enerji ve ekserjinin aynı sembole, “E”, sahip olmasından dolayı yöntemin ismi MEDEX olarak değiştirilmiştir [37]. Böylece hesaplamalarda sembolen kaynaklanacak karışıklıkların önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Son olarak belirli bir para birimi yerine (dolar) genel olarak bir maliyetten bahsetmenin daha uygun olacağı düşünüldüğü için yöntemin ismi EXCEM [exergy (ekserji), cost (maliyet), energy (enerji), mass (kütle)] olarak değiştirilmiştir [37].

Yöntem genel anlamda sisteme giren, sistemden çıkan ve sistem tarafından üretilen ya da tüketilen ekserji, kütle, enerji, ve maliyet arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8 EXCEM analiz metodu

Yöntemde kullandığımız genel denge denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$Giren + Üretilen - Çıkan - Tüketilen = Birikim \quad (4.51)$$

Bu genel denklem integral ve diferansiyel formlarda da yazılabilir. İntegral formunda yazıldığında 4.51 denkleminde verilen terimler miktar halini alırlar.

$$\text{Giren miktar} + \text{Üretilen miktar} - \text{Çıkan miktar} - \text{Tüketilen miktar} = \text{Biriken miktar} \quad (4.52)$$

Genel denklemi diferansiyel formda yazacak olursak terimler oran haline gelecektir.

$$\text{Giren oran} + \text{Üretilen oran} - \text{Çıkan oran} - \text{Tüketilen oran} = \text{Biriken oran} \quad (4.53)$$

Kararlı halde çalışan sistemlerde, diferansiyel denge denkleminde (4.53) bulunan “biriken oran” terimi sıfır olarak alınır.

İntegral denge denklemi verilen iki zaman aralığında sistemde ne olduğunu ifade etmek için kullanılırken, diferansiyel denge denklemi verilen bir anlık zamanda sistemde ne olduğunu ifade eder. Bu genel denklemi sistemdeki değişkenlerimize uygulayacak olursak. Kütle ve enerji korunum yasasına uydukları için ne üretilebilir ne de tüketilebilirler.

Dolayısıyla kütle ve enerji eşitlikleri şu şekilde olmaktadır.

$$\text{Kütle Girişi} - \text{Kütle Çıkışı} = \text{Kütle Birikimi}$$

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_a \quad (4.54)$$

$$\text{Enerji Girişi} - \text{Enerji Çıkışı} = \text{Enerji Birikimi}$$

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_a \quad (4.55)$$

Tersinmezliklere bağlı olarak sistemde, ekserji tüketilir ve ekserji tüketimi entropi üretimi ile orantılıdır.

$$\text{Ekserji Girişi} - \text{Ekserji Çıkışı} - \text{Ekserji Kaybı} = \text{Ekserji Birikimi}$$

$$\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - \dot{L}_{ex} = \dot{E}x_a \quad (4.56)$$

Denklemler 4.53 ve 4.54 enerji ve ekserji arasındaki ana farkı ortaya koymaktadır: sistemin enerjisi korunurken, ekserjisi, iş yapabilme kabiliyeti, tüketilebilmektedir. Maliyet ise artan bir terimdir. Maliyet için genel denge denklemi şu şekildedir.

$$\text{Maliyet Girdisi} + \text{Maliyet Üretimi} - \text{Maliyet Çıktısı} = \text{Maliyet Birikimi}$$

$$K_{in} + K_{gen} - K_{out} = K_a \quad (4.57)$$

Burada K_{in} , K_{out} ve K_a sırasıyla sisteme girenlerin, çıkanların ve birikimin maliyetini göstermektedir. K_{gen} ise kullanılan malzeme, sistemin oluşturulması ve sistemin bakımına karşılık gelen maliyeti göstermektedir.

Sürekli kararlı hal ve sürekli sabit akış konumunda çalıştırılan bir termal sistemde ($\dot{m}_a$, $\dot{E}_a$, $\dot{E}_{x_a}$ ve $K_a = 0$) birikim terimleri sıfır olarak alınır. Dolayısıyla bu durumda enerji ve ekserji kayıp oranları şu şekilde hesaplanır.

$$\dot{L}_{en} = \sum_{in} \text{Enerji akış oranı} - \sum_p \text{Enerji akış oranı} \quad (4.58)$$

$$\dot{L}_{ex} = \sum_{in} \text{Ekserji akış oranı} - \sum_p \text{Ekserji akış oranı} \quad (4.59)$$

R; Termodinamik kayıp oranının, “L”, kapital maliyetine “K” oranı olarak tanımlanır ve şu şekilde verilir.

$$\dot{R} = \frac{\dot{L}}{K} \quad (4.60)$$

$$\dot{R}_{en} = \frac{\dot{L}_{en}}{K} \quad (4.61)$$

$$\dot{R}_{ex} = \frac{\dot{L}_{ex}}{K} \quad (4.62)$$

Şeklinde kayıp oranlarının maliyeti rahatlıkla hesaplanabilir.

4.5 Proje Sistemi

Tezde yapılan hesaplamaların temelinde TÜBİTAK 107M331 numaralı projeye dayalı olarak kurulan sistem yatmaktadır. Bu ölçüm düzeneğinde 1 rüzgar türbin sistemi, 1 fotovoltaik sistem ve yer meteoroloji istasyonu bulunmaktadır. Sistem hakkındaki detaylı bilgi aşağıda verilmektedir.

4.5.1 Rüzgar Enerji Sistemi ve Özellikleri

Sözü geçen bu proje kapsamında, yerden 17 metre yükseklikte Unitron marka rüzgar türbini kurulmuştur ve modeli ise UE15’tir. Bu türbine ait özellikler Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1 İTÜ Meteoroloji Parkına kurulan rüzgar türbininin bazı özellikleri

Açıklama	Özellik
Nominal Güç	1500W
Nominal Güce Ulaşma Hızı m/s / mph	10.5 / 25
Pik Üretim	1750W
Devreye Girme Hızı m/s / mph	2.7/ 6
Kutuplar RPM - 50hz RPM - 60hz	10 / 600 / 720
Rotor Çapı	3.20m ./ 11 ft
Kanat Sayısı	3
Kanat Malzemesi	Karbon Fiber Bileşim
Taranan Alan	9.2 / 95 Sq.m / sq.feet
Devreden Çıkış Hızı	27mph
Devreden Çıkış	Elektro Dinamik Anahtar
Birim Ağırlık	34 Kg
Jeneratör	PM 3 fazlı alternatör
Ulaşılan Voltaj	12 – 240 HV/LV
Garanti	2 yıl
Kullanım Süresi	20 yıl
Maksimum Rüzgar	55 m/s

Bunun yanında rüzgar türbinleri için büyük öneme sahip olan rüzgar şiddeti-güç değerleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2 UE 15’ in farklı rüzgar şiddetlerinde üretim değerleri

Rüzgar Şiddeti (m/s)	UE 15 Güç Üretimi (W)
2.2	16
2.7	37
3.1	64
3.6	98
4.0	142
4.5	178
4.9	239
5.4	288
5.8	338
6.3	396
6.7	456
7.1	496
7.6	538
8.0	574
8.5	654
9.0	785

Çizelge 4.2 UE 15' in farklı rüzgar şiddetlerinde üretim değerleri (devam)

9.4	905
9.8	1040
10.2	1146
10.7	1198
11.2	1435
11.6	1566
12.0	1756

Bu çalışmanın önemli bir adımı rüzgar türbinlerinden kaynaklanan gerek akış gerekse mekanik kayıpların bulunmasıdır. Bu kayıpların sahada tespiti için rüzgar türbini farklı bir şekilde dizayn edilmiştir. Rüzgar türbini rotor alanının önüne ve arkasına meteorolojik değişkenleri ve değişimleri incelemek üzere çeşitli aletler yerleştirilmiştir.

- Anemometre (Rotor alanı önü ve arkası, 2 adet)
- Sıcaklık ölçer (Rotor alanı önü ve arkası, 2 adet)
- Bağıl nem (Rotor alanı önü ve arkası, 2 adet)
- Rotor alanı önü ve arkası basınç farkları (1 adet)

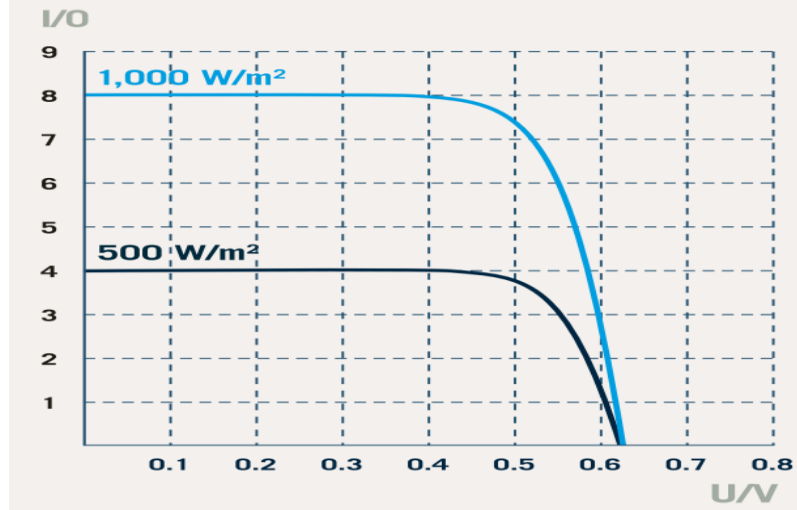
Bu değişkenlerin yanında türbin jeneratör bölgesinin iç sıcaklığını ölçmek üzere 1 adet sıcaklık ölçer yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9 Rüzgar türbini için kurulan sistem

4.5.2 Güneş Enerji Sistemi (PV) ve Özellikleri

Enerji ve ekserji çalışmalarının yapıldığı diğer bir sistem ise fotovoltaik panellerdir. Bu paneller 6 adet 125 W' lık Qcell firmasına ait fotovoltaik pillerden oluşmaktadır. Bu PV' lere ait güç eğrisi Şekil 4.10' da verilmiştir.



Şekil 4.10 Kurulan PV sisteminin akım-voltaj eğrisi

Anemometre olarak sistemde türbinin önünde ve arkasında rüzgar ölçümü yapıldığından bahsedilmişti. Kullanılan anemometreler NRG markasının #40C modeli olup özellikleri Çizelge 4.3' te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Kullanılan anemometreler ve özellikleri

Sensör Tipi	3 kepçeli
Ölçüm Aralığı	1 m/s – 96 m/s
Ölçüm Hassasiyeti	5-25 m/s aralığında 0,1 m/s
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-5 ⁰ C ile 60 ⁰ C arası

Fotovoltaik sistemde güneş yörüngeli izleme sistemi yerleştirilmiştir. Güneş' in yükseklik açısına göre konumunu da değiştirmektedir. Bununla birlikte aynı yörüngeyi izlemesi için PV panellerinin tepesine 1 adet pyranometre yerleştirilmiştir. Bu yerleştirme sayesinde panellerin yörünge hareketleri esnasında ne miktarda güneş ışınımına maruz kaldıkları kolaylıkla ölçülebilmektedir. Bunlara ilave olarak PV panellerinin hücre sıcaklıklarını ölçmek maksadıyla kızılötesi termometre sistemi yerleştirilmiş ve yörüngesel değişimlerde sürekli olarak hücre sıcaklık değerleri

ölçülmüştür (Şekil 4.11). Bu sistemde kullanılan aletlerin özellikleri Çizelge 4.4’ te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Rüzgar türbini ve fotovoltaik panel sistemlerinde kullanılan aletler ve özellikleri

Alet	Özellik
Datalogger:	Comet System’in 16 kanallı MS5D modeli kullanılmıştır
Basınç Farkı Ölçümü:	DeltaOHM firmasının HD408T modeli kullanılmıştır.
Direkt Güneş Işınımı Ölçümü:	Direk ışınımı ölçmek için DeltaOHM firmasının LP PYRA 02, diffüz ışınımı ölçmek için ise LP PYRA 12 modeli kullanılmıştır.
Diffüz Güneş Işınımı Ölçümü	
Sıcaklık Ölçümü:	Comet System’in T1110 modeli kullanılmıştır.
Nem Ölçümü:	
Sıcaklık ve Nem Siperleri:	Young firmasının 41003 modeli kullanıldı.
Takip Sistemi:	Lorentz firmasının Etatrack active 400 modeli kullanıldı.
Solar Regülatör:	Morningstar firmasının prostar-30 modeli kullanıldı.
İnverter:	Arttonic firmasının ART Power 3000 modeli kullanıldı.



Şekil 4.11 Fotovoltaik paneller için kurulan sistem

Bilindiği üzere güneş ışınlmında direkt ve diffüz bileşen bulunmaktadır. Bu alışma çerçevesinde gelen diffüz ışınlmını ölçmek üzere izelge 4.4'te özellikleri verilen diffüz ışınlmı ölçen pyranometre yerleştirilmiştir (şekil 4.12).



şekil 4.12 Diffüz ışınlm ölçer

4.5.3 Kurulan Yer Meteoroloji İstasyonu ve Veri Saklama Birimi

Bunlara ilave olarak neredeyse bütün meteorolojik değişkenleri ölçen seyyar sayılabilecek küçük otomatik bir meteoroloji istasyonu da kurulmuştur. Bu istasyon özellikler eksik veri tamamlanmasında işe yaramaktadır (şekil 4.13).



şekil 4.13 Otomatik meteoroloji istasyonu

İTÜ Meteoroloji Gözlem Parkında kurulan rüzgar-güneş hibrit sisteminin bütün parametre ve bileşenlerinin (meteorolojik ve elektriksel) okunabileceği ve üretilen elektriğin depolanması gereken bir toplam sisteme ihtiyaç vardır. Bunun için rüzgar ve güneş sistemlerinin ürettikleri elektriğin akım ve gerilim değerlerinin okunduğu bir ekran yerleştirilmiştir. Bu ekranda aynı zamanda türbin ön rüzgar ve arka rüzgar değerleri, güneş paneline gelen ışınlam, hücre sıcaklığı vb. parametreler okunabilmektedir. Bu sistem oluşturulurken rüzgardan üretilen AC elektriği DC elektriğe çeviren converter, aynı zamanda akülerdeki DC elektriği AC'ye çeviren inverter bulunmaktadır. Bunun yanında güneş panellerinde üretilen düşük verimli DC elektriği daha yüksek gerilimli DC' ye çeviren şarj regülatörü de bulunmaktadır. Kurulan sistemde akülerin toplam saklama kapasitesi 4,8 kW' tır. Bu sistemde toplamda 17 farklı değişken ölçümü yapılmıştır. Bütün bunların yanında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMI) gözlem istasyonlarının verilerinden faydalanılmıştır. Bu istasyonların detayı Çizelge 4.5' te verilmiştir.

Çizelge 4.5 DMI istasyonlarının bilgileri

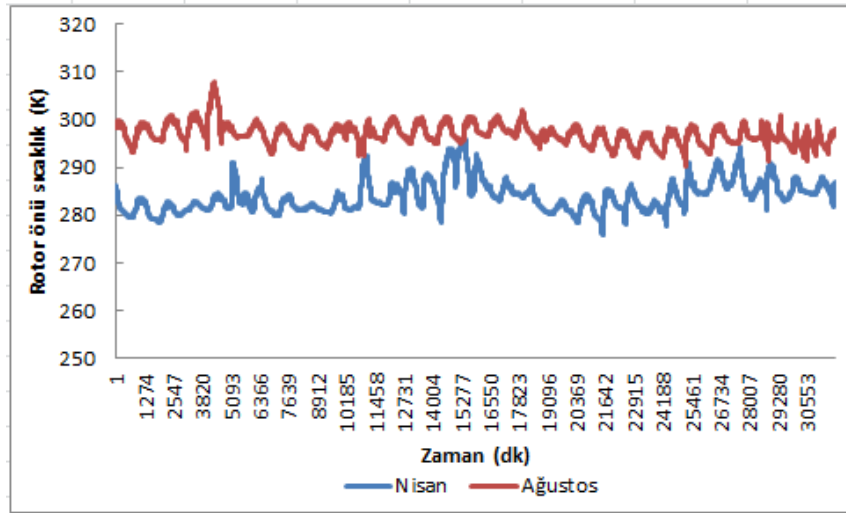
İstasyon Numarası	İstasyon Adı	Enlem (Kuzey)	Boylam (Doğu)	Yükseklik (m)
17610	Şile	4110	2936	83
17059	Kumköy	4115	2902	38
17636	Florya	4059	2847	37
17063	Sabiha G.	4053	2918	99
17060	Atatürk M.	4058	2849	32
17061	Kireçburnu	4109	2903	58
17051	Çorlu	4108	2755	160
17122	Yalova M.	4041	2923	13

4.6 Eksergoekonomik Analiz Sonuçları

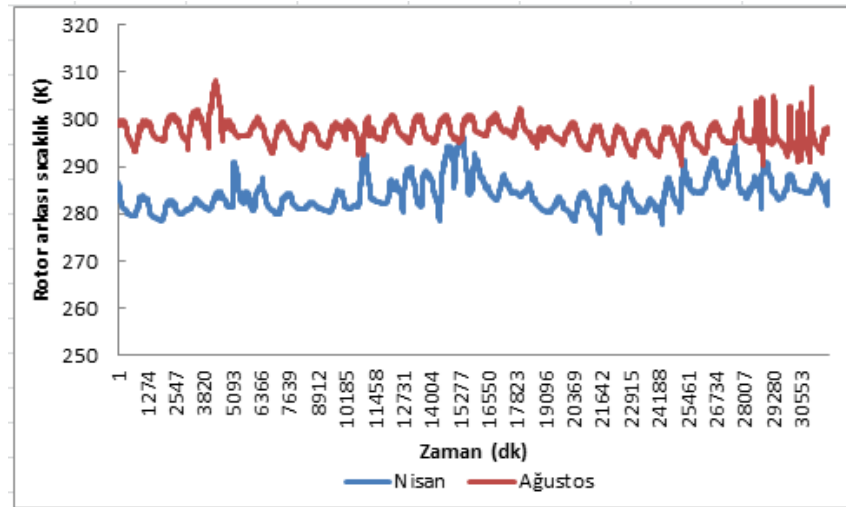
Daha önce Bölüm 4.2, 4.3 ve 4.4’ te bahsedilen eksergoekonomik analiz kapsamında kullanılacak formüller verilmiştir. Bu bölüm çerçevesinde, İTÜ’de kurulan 1,5 kW’ lık rüzgar ve 750 W’ lık güneş hibrit sisteminden alınan ölçüm verilerine göre yapılan hesaplamalar neticesinden elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilecektir.

4.6.1 Rüzgar Türbin Sisteminin Eksergoekonomik Analizi

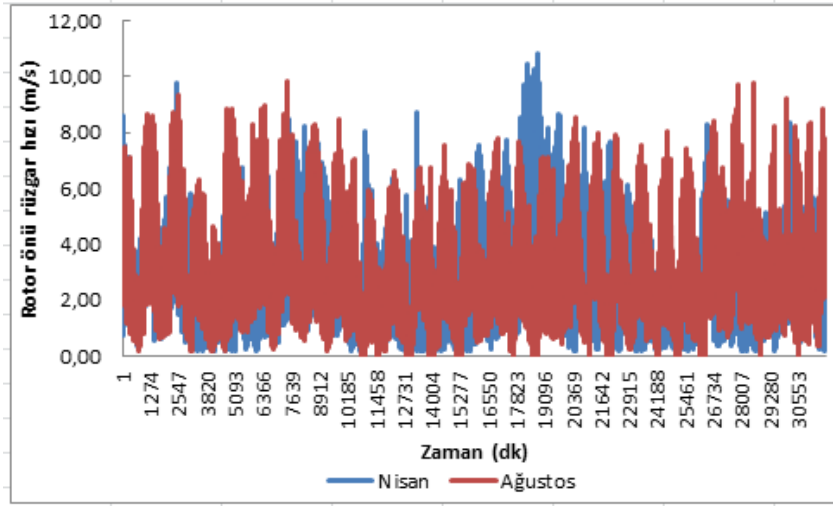
Rüzgar türbininde ekserji analizi için Bölüm 4.2 kapsamında belirtilen formüller kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ön sıcaklık, arka sıcaklık, ön rüzgar hızı, arka rüzgar hızı, ön basınç ve arka basınç verileri ise Şekil 4.14-4.19’ da gösterilmektedir.



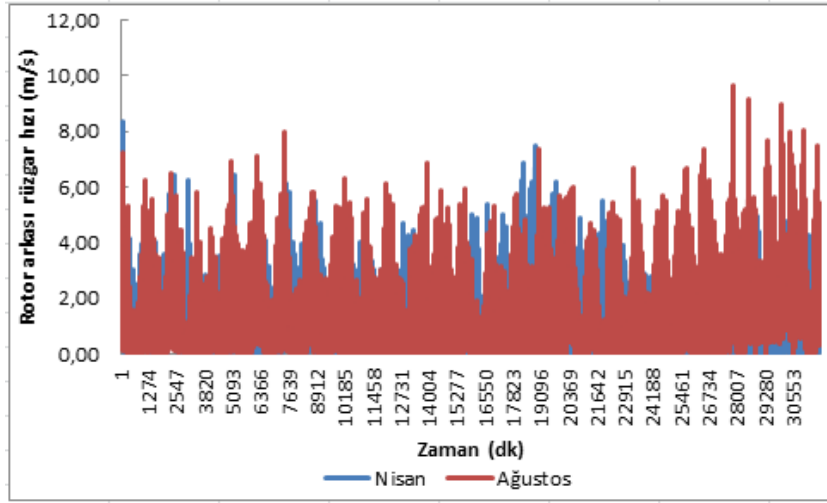
Şekil 4.14 Ön sıcaklığın zamanla değişimi



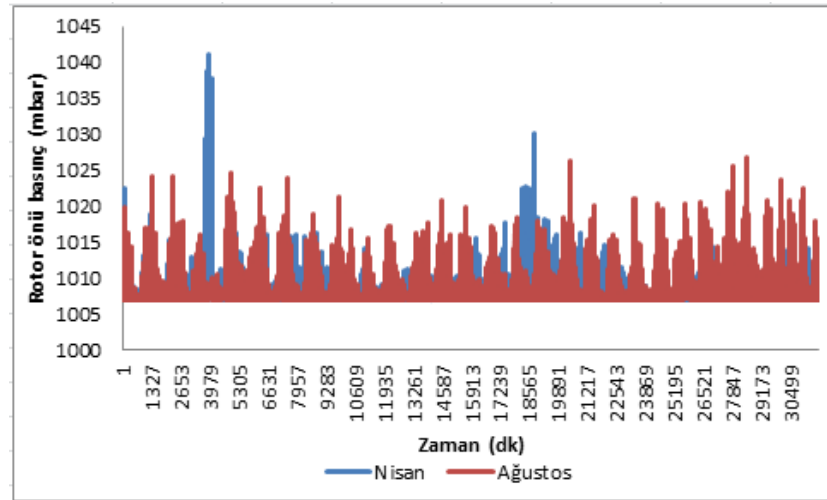
Şekil 4.15 Arka sıcaklığın zamanla değişimi



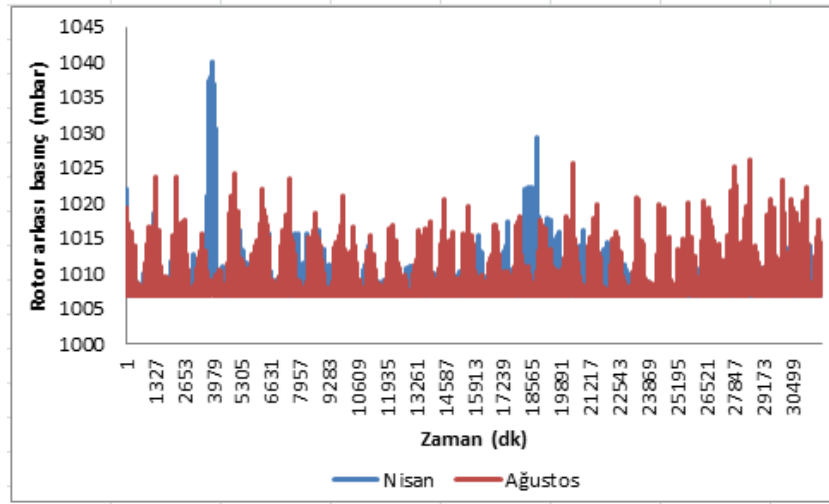
Şekil 4.16 Ön rüzgar hızının zamanla değişimi



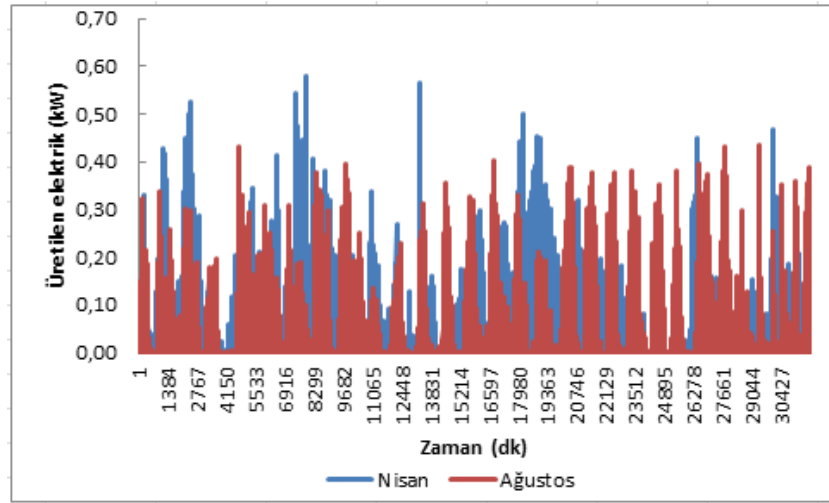
Şekil 4.17 Arka rüzgar hızının zamanla değişimi



Şekil 4.18 Ön basıncın zamanla değişimi



Şekil 4.19 Arka basıncın zamanla değişimi

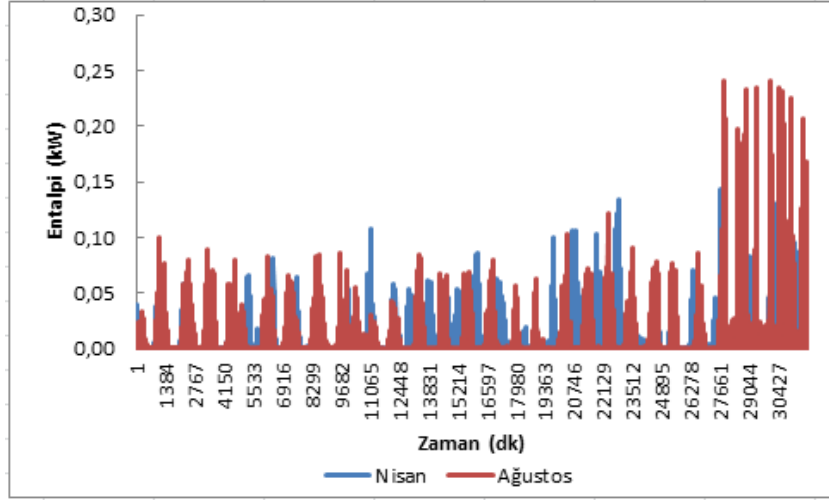


Şekil 4.20 Üretilen elektriğin zamanla değişimi

Denklem 4.30' da verilen rüzgar türbini ekserji formülünde üç bileşen bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla üretilen elektrik, entalpi ve entropi değerleridir. Üretilen elektriğin zamanla değişimi Şekil 4.20' de verildiği gibidir.

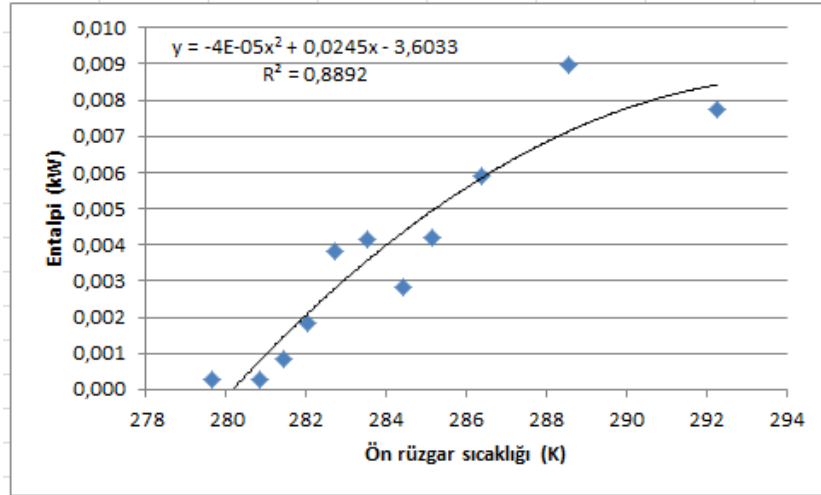
Şekil 4.20' yi inceleyecek olursak "x" eksenı dakika cinsinden geçen zamanı göstermektedir ve bu eksenıe toplam 31808 veri bulunmaktadır. "y" eksenı ise üretilen elektrıksel güç değeriıni kW cinsinden göstermektedir. Belirtilen zaman aralığında rüzgar türbininin maksimum 0,6 kW (600 watt) elektrıksel güç üretebildiği görülmektedir.

Rüzgar türbininde meydana gelen entalpi değışiminin zamana göre durumu ise Şekil 4.21' de gösterilmektedir.

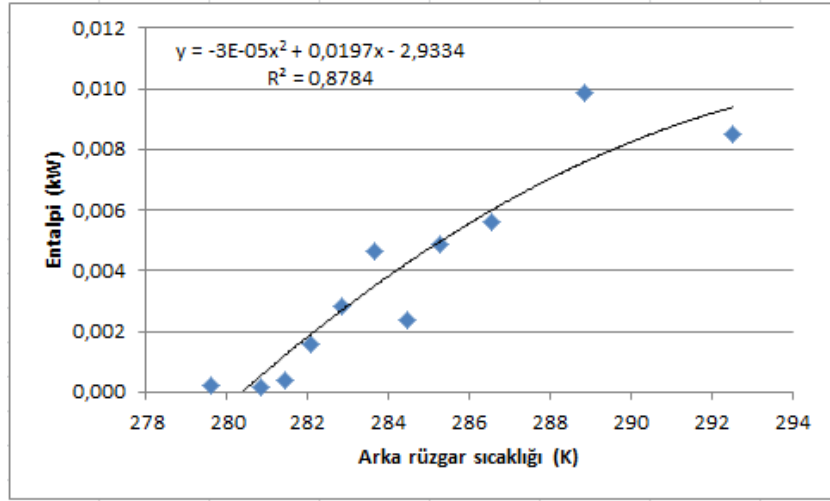


Şekil 4.21 Entalpinin zamanla değişimi

Şekil 4.21’ de gösterildiği gibi rüzgar türbininde meydana gelen maksimum entalpi değişimi yaklaşık olarak 0,25 kW olarak görülmektedir. Denklem 4.29’ a bakıldığında entalpi değişiminde etkili olan iki parametre olarak rotor önünde ve arkasındaki rüzgar sıcaklıkları görülmektedir. Entalpinin rotor ön ve arkasındaki rüzgar sıcaklıklarına göre değişimi Şekiller 4.22 ve 4.23’ de gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde, entalpi değişiminin ön ve arka rüzgar sıcaklıklarıyla nispeten orantılı olarak arttığı görülmektedir.



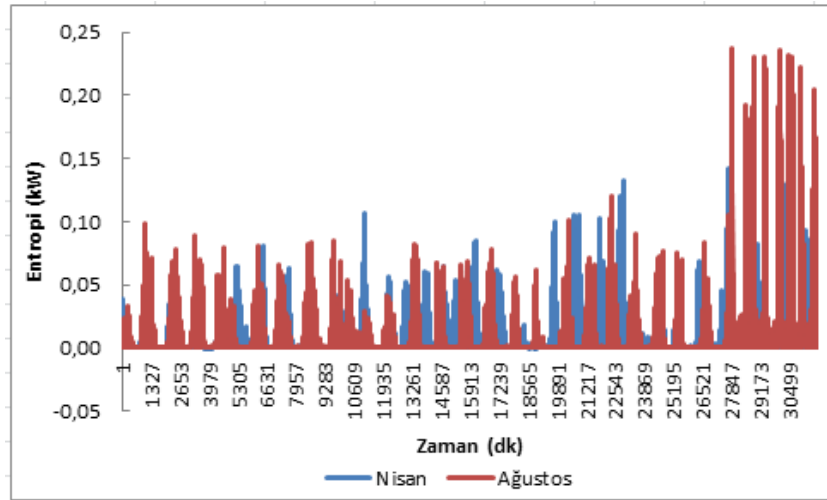
Şekil 4.22 Entalpinin ön rüzgar sıcaklığına göre değişimi (Nisan)



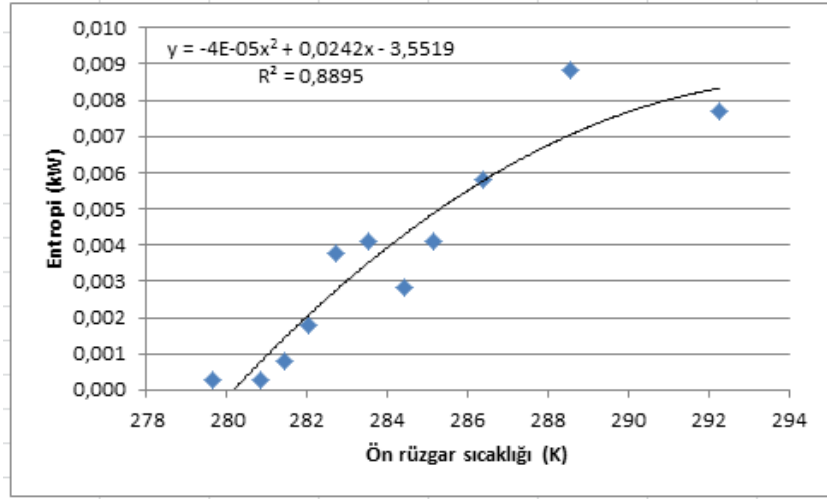
Şekil 4.23 Entalpinin arka rüzgar sıcaklığına göre değişimi (Nisan)

Rüzgar türbinlerinde ekserjiyi etkileyen bir diğer faktör ise üretilen entropi değeridir. Analizi yapılan rüzgar türbini tarafından üretilen entropinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.24’ de gösterildiği gibidir. Şekil incelendiğinde entropi üretiminin zamanla çok farklı değerler aldığı ve maksimum 0,25 kW değerine ulaştığı görülmektedir.

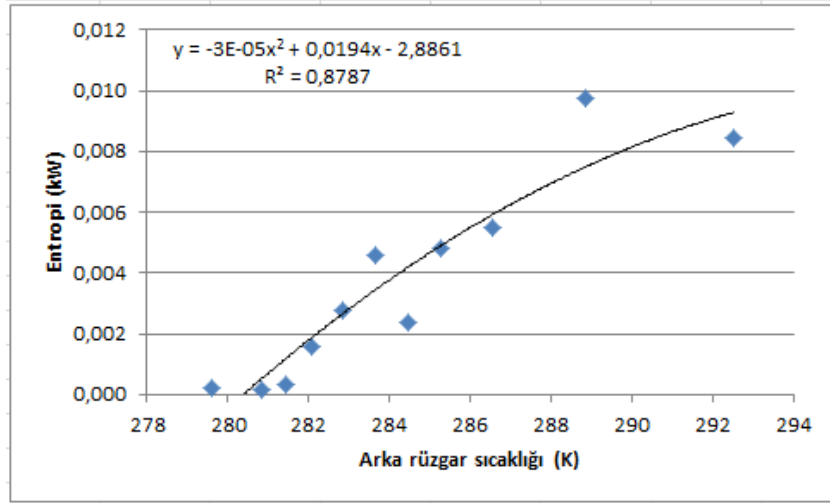
Entropi değişimi, rüzgar ön ve arka sıcaklıklarından, ön ve arka rüzgar basıncından ve türbinde kaybedilen ısı değerinden (Q_{loss}) etkilenmektedir. Rotor önü ve arkasındaki rüzgar sıcaklığı ile entropi arasındaki ilişki Şekil 4.25 ve 4.26’ da gösterilmektedir.



Şekil 4.24 Entropinin zamana göre değişimi



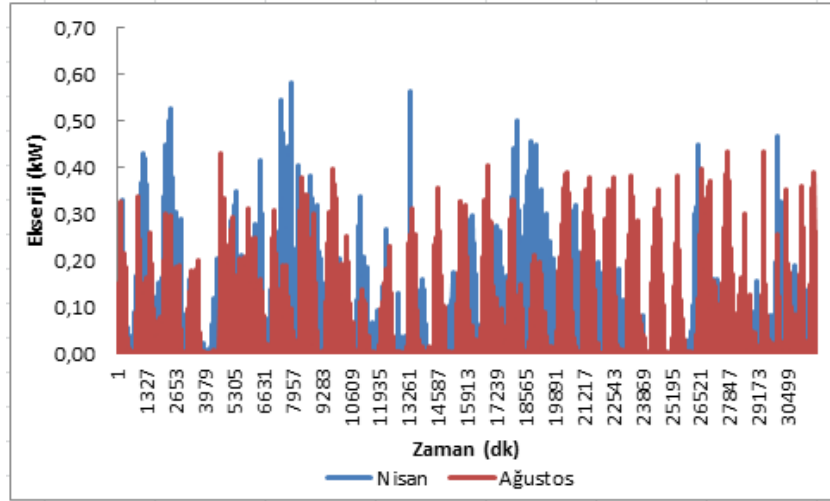
Şekil 4.25 Entropinin ön rüzgar sıcaklığı ile değişimi (Nisan)



Şekil 4.26 Entropinin arka rüzgar sıcaklığı ile değişimi (Nisan)

Şekil 4.24 ve Şekil 4.26' da görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça rüzgar türbinine ait entropi üretiminin artması sistemdeki kayıpların önemli bir kısmının bu değişkene bağlı olduğunu göstermektedir.

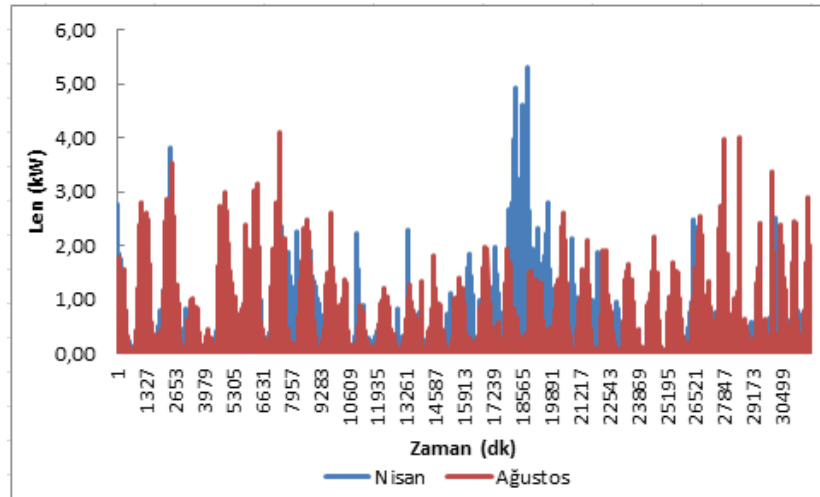
Rüzgar türbinlerinde ekserjiyi etkileyen temel parametrelerin değişimleri Şekil 4.20-4.26 arasında verilmiş oldu. Bu parametrelerin ekserji formülünde yerlerine yazılmaları ile birlikte elde edilecek ekserji değerinin zamana göre değişimi Şekil 4.27' de gösterilmektedir.



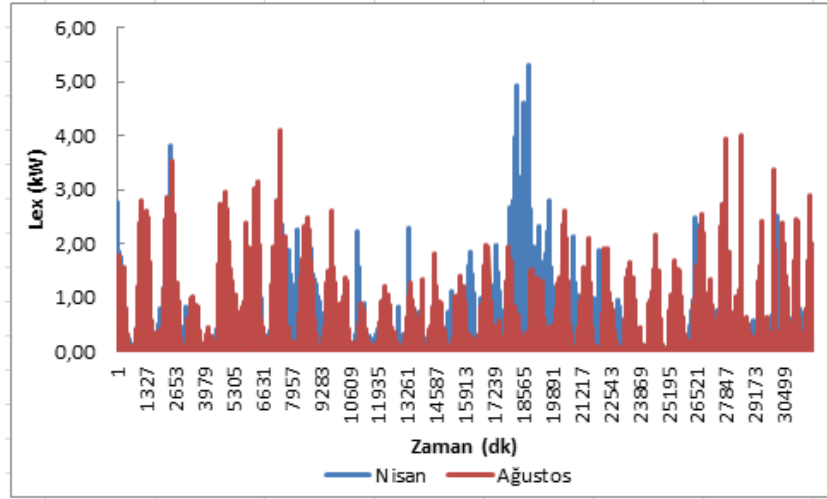
Şekil 4.27 Ekserjinin zamana göre değişimi

Şekil 4.27 incelendiğinde ekserjinin zaman içinde sürekli değiştiğini ve maksimum olarak 0,6 kW değerine ulaştığını görülmektedir.

Eksergoekonomik analiz kapsamında önemli olan diğer iki parametre ise enerji kaybı ($\dot{L}_{en}$) ve ekserji kaybı ($\dot{L}_{ex}$) oranlarıdır. Denklem 4.58 ve 4.59 kullanılarak enerji ve ekserji kayıp oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.28 ve 4.29’ da gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde enerji ve ekserji kayıp oranlarının birbirine yakın olduğu görülecektir. Her iki kayıp oranı da zamana göre farklı değerler almakla birlikte ulaştıkları toplam maksimum değer yaklaşık 5.5 kW olmaktadır.

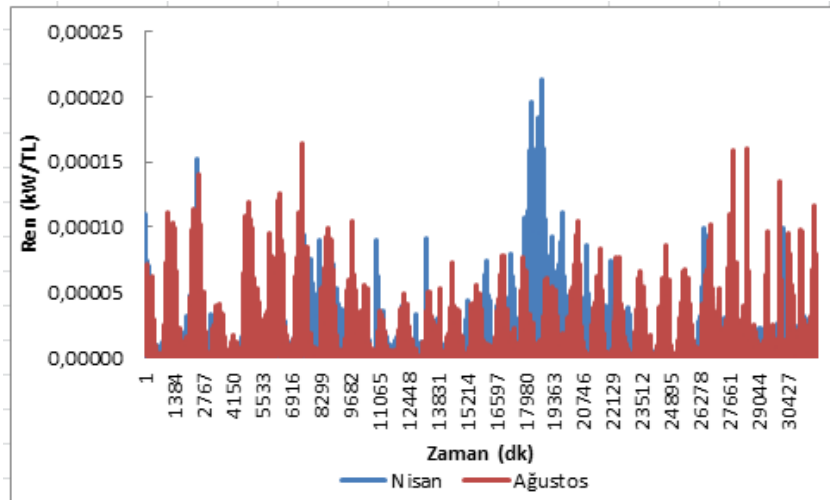


Şekil 4.28 Enerji kayıp oranının zamana göre değişimi

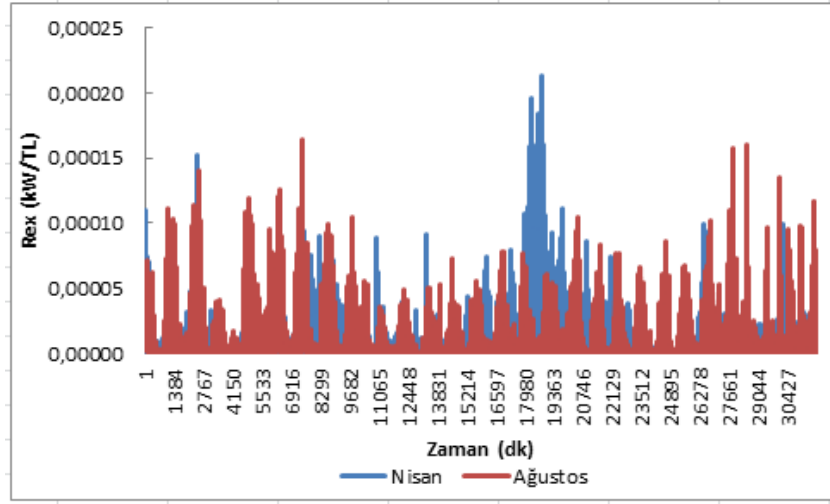


Şekil 4.29 Ekserji kayıp oranının zamana göre değişimi

Enerji ve ekserji kayıp oranlarının rüzgar türbini sisteminin kapital maliyetine bölünmesiyle $\dot{R}$ değeri denklem 4.60'da gösterildiği gibi hesaplanmış olacaktır. Böylece sistemin kurulumu için harcanan birim maliyet başına kaybedilen enerji ve ekserji watt ya da kilowatt cinsinden bulunmaktadır. Ren değerleri nisan ayında maksimum 0,213 W/TL, ortalama 0,006 W/TL olurken ağustos ayında maksimum 0,164 W/TL, ortalama 0,0085 W/TL olmaktadır. Rex değerlerini inceleyecek olursak nisan ayında maksimum 0,213 W/TL, ortalama 0,0058 W/TL ağustos ayında maksimum 0,163 W/TL, ortalama 0,0085 W/TL olduğu görülecektir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Şekil 4.30 ve 4.31' de gösterilmektedir.

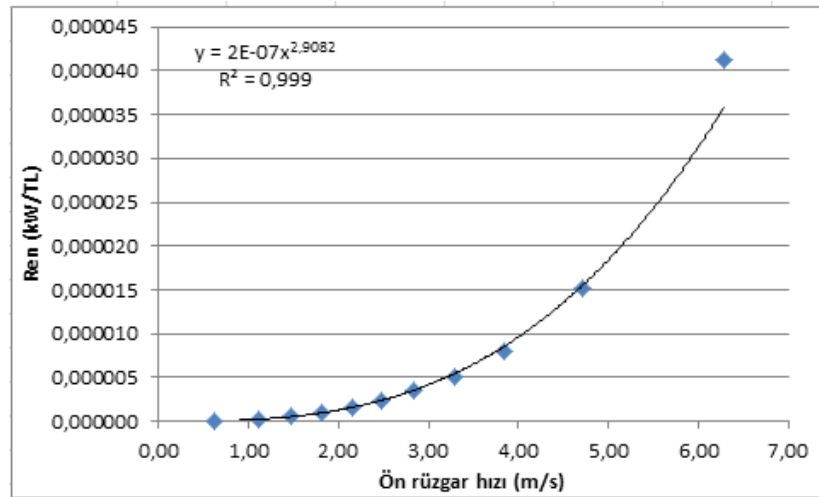


Şekil 4.30 Ren değerinin zamana göre değişimi

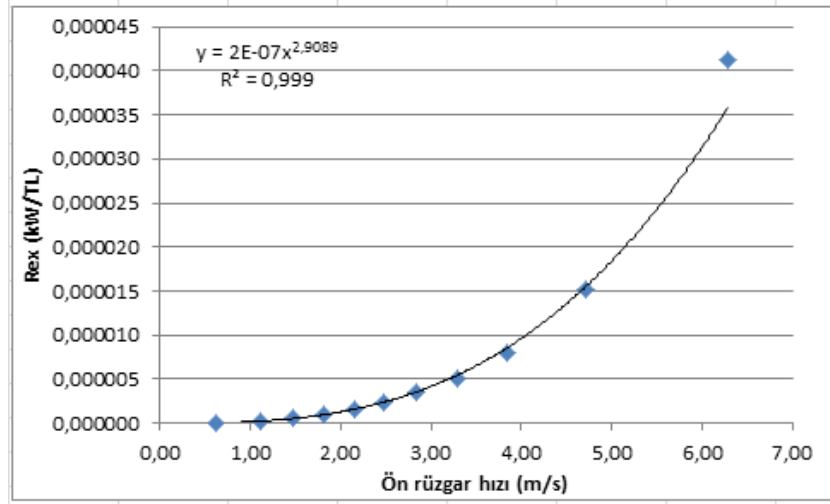


Şekil 4.31 Rex değerinin zamana göre değişimi

R_{en} ve R_{ex} değerlerinin farklı rüzgar hızlarına göre değişimi Şekil 4.32 ve 4.33’ de gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde artan rüzgar hızları için R_{en} ve R_{ex} değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. “R” değeri denklem 4.60’ da gösterildiği gibi enerji ve ekserji kayıp oranlarının sistemin kapital maliyetine oranlanması ile hesaplanır. Artan rüzgar hızlarında, termodinamik kayıp oranının yükselmesi bu rüzgar hızları için enerji ve ekserji kayıp oranlarının arttığını göstermektedir. Çünkü formülün paydasında bulunan kapital maliyeti rüzgar hızlarından bağımsız olarak sabit kalmaktadır.

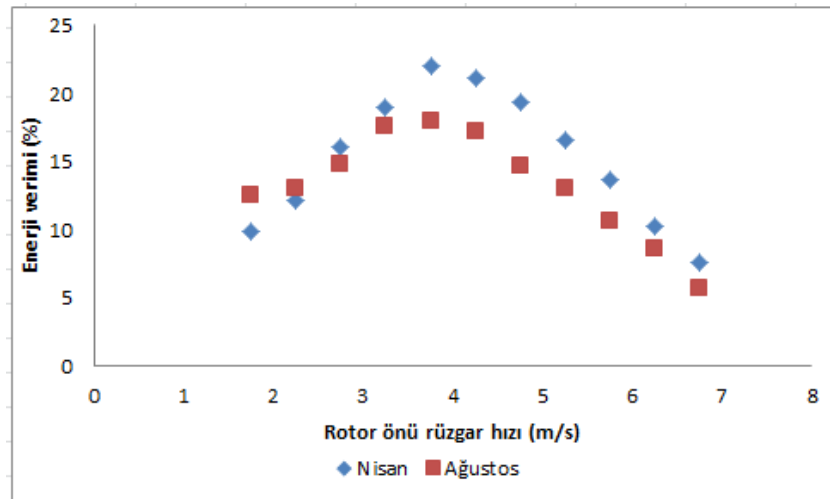


Şekil 4.32 R_{en} değerinin rotor önü rüzgar hızına göre değişimi (Nisan)

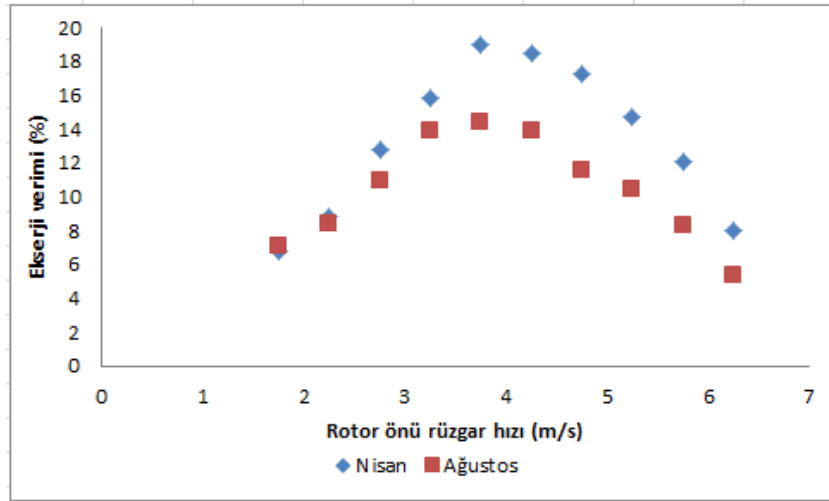


Şekil 4.33 Rex değerinin rotor önü rüzgar hızına göre değişimi (Nisan)

Rüzgar türbininin nisan ve ağustos aylarındaki enerji ve ekserji verimleri ise Şekil 4.34 ve Şekil 4.35' de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde görüldüğü üzere rüzgar türbini maksimum enerji ve ekserji verimine 4 m/s rüzgar hızlarında erişmektedir. Rüzgar hızının 4 m/s' yi geçmesi durumunda türbinin verim değerleri azalmaya başlamaktadır. Bu nedeni rüzgar türbininin düşük rüzgar hızlarında çalışmak üzere tasarlanmış olmasıdır. Dönemsel olarak inceleme yapıldığında nisan ayındaki verim değerlerinin ağustos ayı verim değerlerinden daha yüksek olduğu görülecektir. Enerji veriminin ulaştığı maksimum değer %23 iken ekserji veriminin ulaştığı maksimum değer %19 olmaktadır.

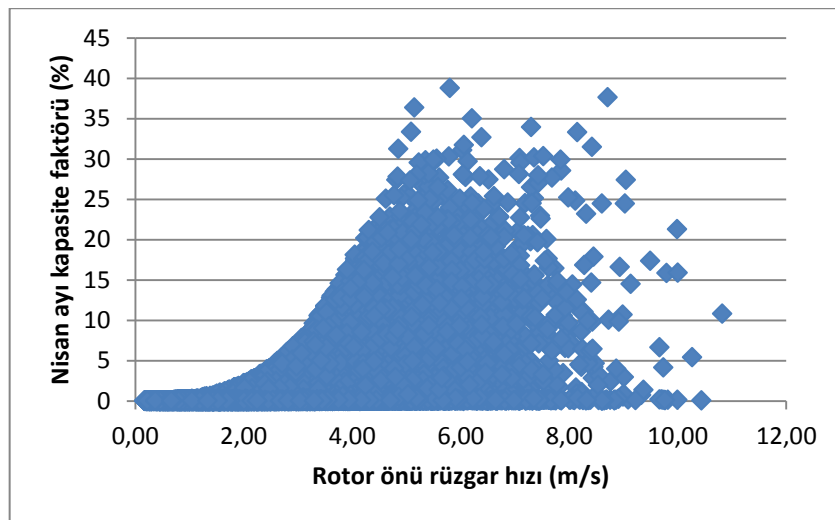


Şekil 4.34 Rotor önü rüzgar hızı ile enerji verimi arasındaki ilişki

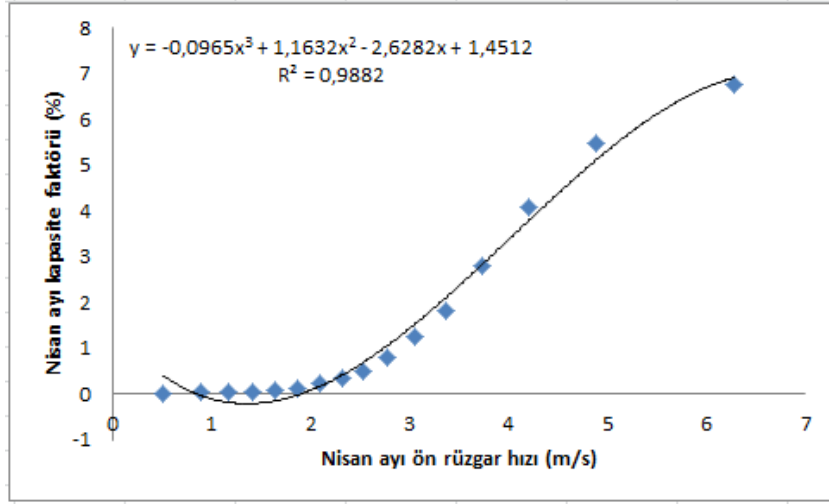


Şekil 4.35 Rotor önü rüzgar hızı ile ekserji verimi arasındaki ilişki

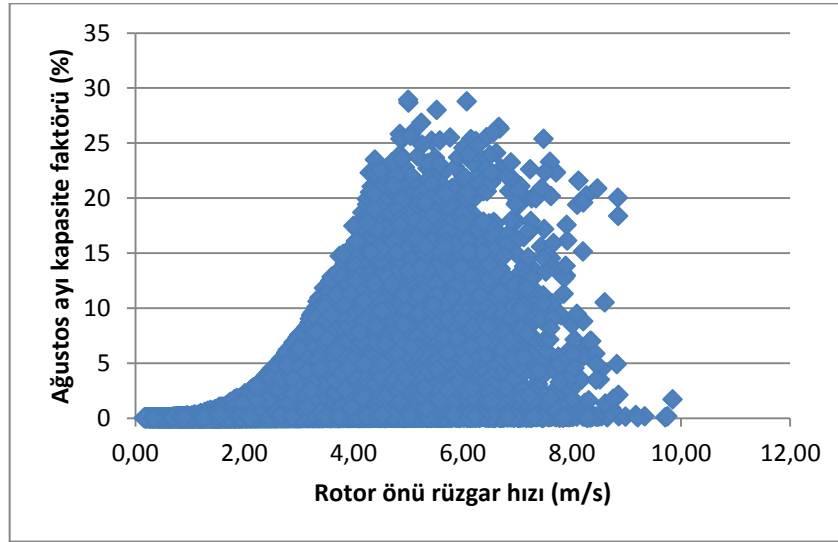
Rüzgar türbininin kapasite faktörü değerleri nisan ayı için Şekil 4.36’ da ağustos ayı için Şekil 4.38’ de gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde maksimum kapasite faktörü değerlerine enerji ve ekserji veriminde olduğu gibi düşük rüzgar hızlarında ulaşıldığı görülecektir. Yine enerji ve ekserji veriminde olduğu gibi nisan ayı kapasite faktörü değerleri ağustos ayı değerlerinden fazla çıkmaktadır. Nisan ayı maksimum kapasite faktörü değeri %40 iken ağustos ayının maksimum değeri %30’ dur. Şekiller 4.37 ve 4.39’ da kapasite faktörleri için alınan ortalamalar nisan ve ağustos aylarına göre gösterilmektedir. Nisan ve ağustos aylarında esen rüzgar hızlarına karşılık gelen türbin kapasite faktörü değerlerinin ortalaması alınmıştır. Uydurulan eğriler sayesinde rüzgar türbinine gelen rüzgar hızı değerinden yararlanılarak, rüzgar türbininin ortalama kapasite faktörü değeri hesaplanabilir.



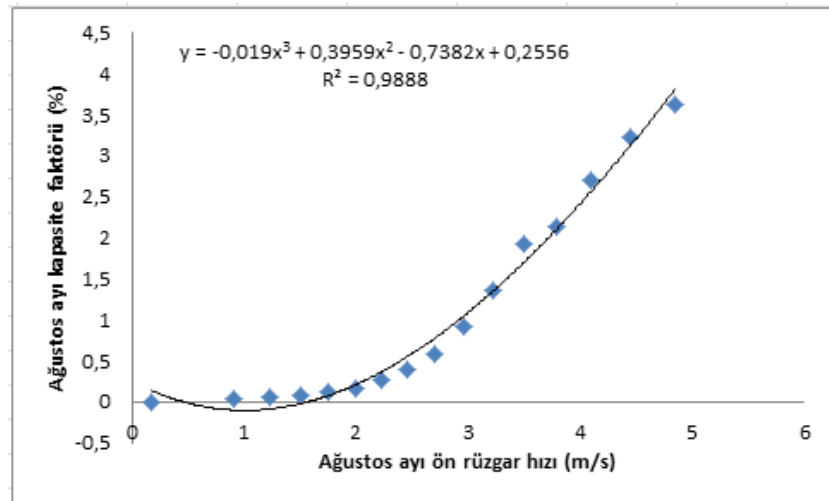
Şekil 4.36 Rotor önü rüzgar hızı ile kapasite faktörü arasındaki ilişki (Nisan)



Şekil 4.37 Nisan ayı ortalama rüzgar hızları ile kapasite faktörü arasındaki ilişki



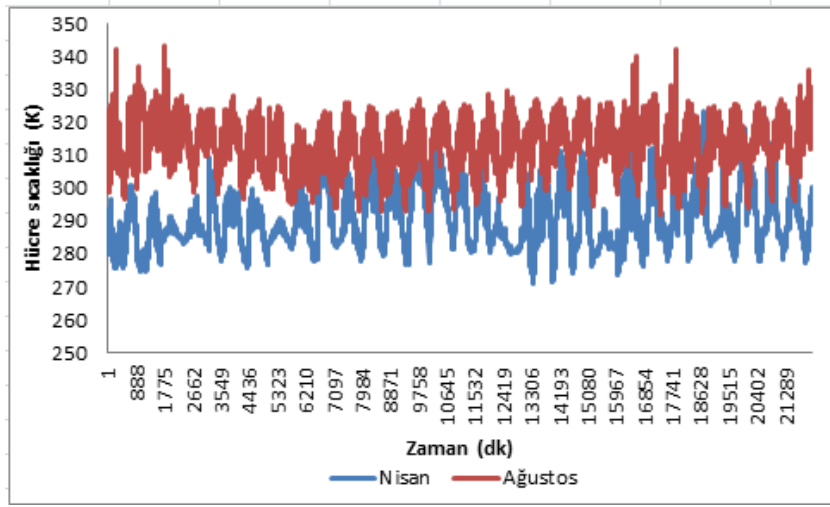
Şekil 4.38 Rotor önü rüzgar hızı ile kapasite faktörü arasındaki ilişki (Ağustos)



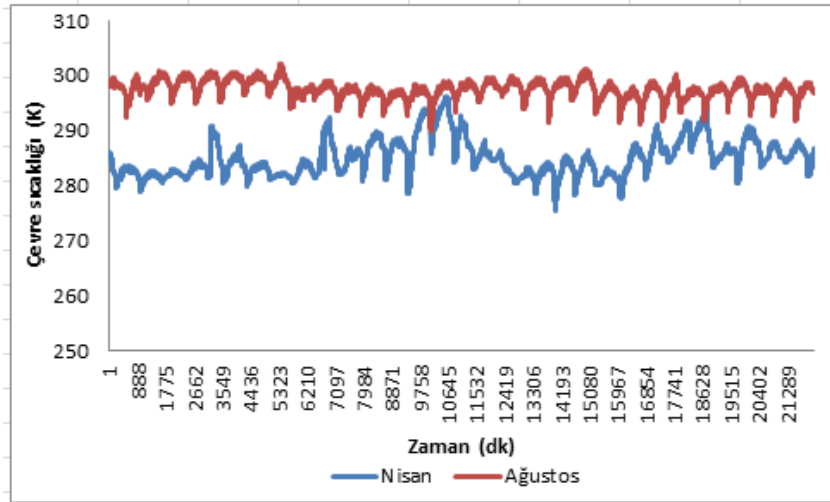
Şekil 4.39 Ağustos ayı ortalama rüzgar hızları ile kapasite faktörü arasındaki ilişki

4.6.2 PV Güneş Sisteminin Eksergoekonomik Analizi

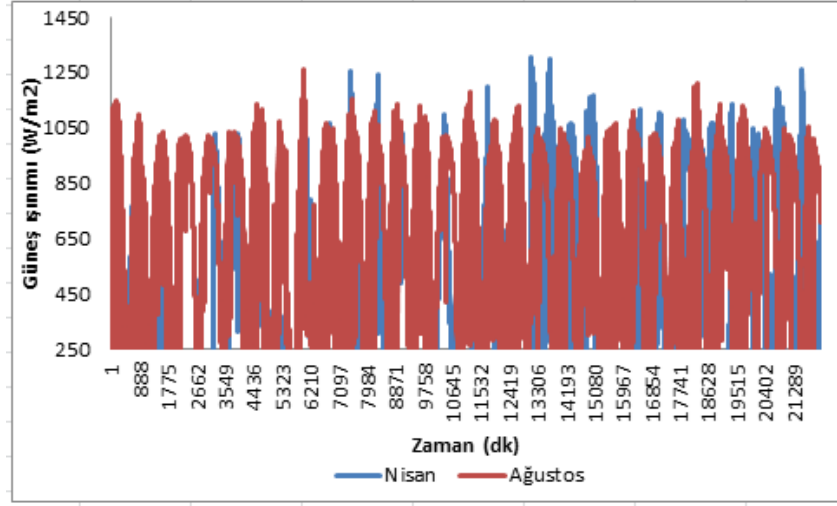
Fotovoltaik hücrelerde ekserji analizi için Bölüm 4.3 kapsamında belirtilen formüller kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan çevre sıcaklığı, hücre sıcaklığı, güneş ışınlı değeri, fotovoltaik sistemden alınan akım ve gerilim değeri ile fotovoltaik hücrelerin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi Şekil 4.40-4.46' da gösterilmektedir. Fotovoltaik sistem, her biri 125 W olan altı adet güneş panelinin birleşmesiyle oluşmuş olup maksimum gücü 750 W' dır. Altı panel birbirine paralel olarak bağlanmıştır.



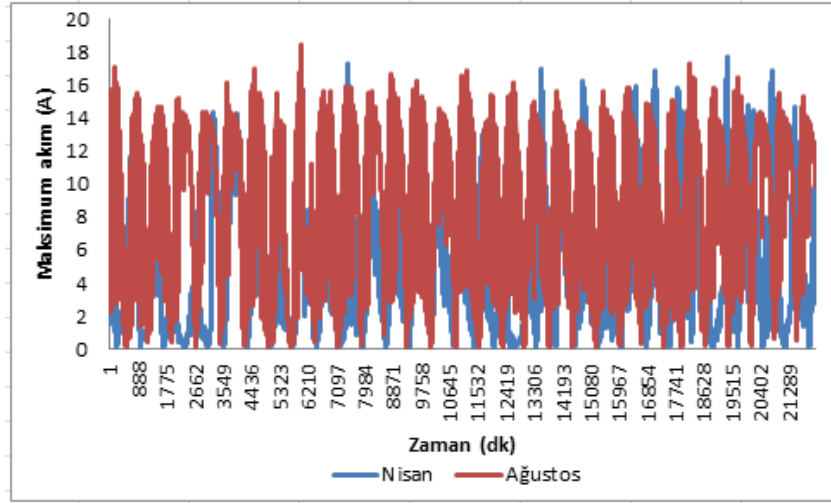
Şekil 4.40 Hücre sıcaklığının zamanla değişimi



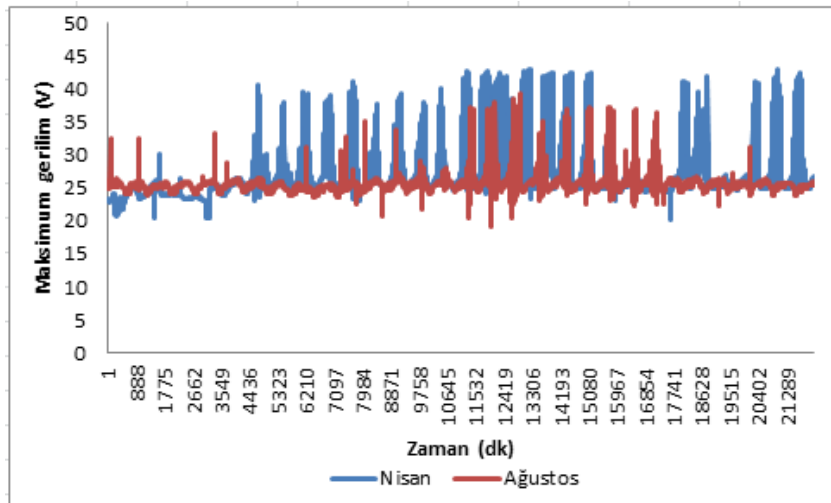
Şekil 4.41 Çevre sıcaklığının zamanla değişimi



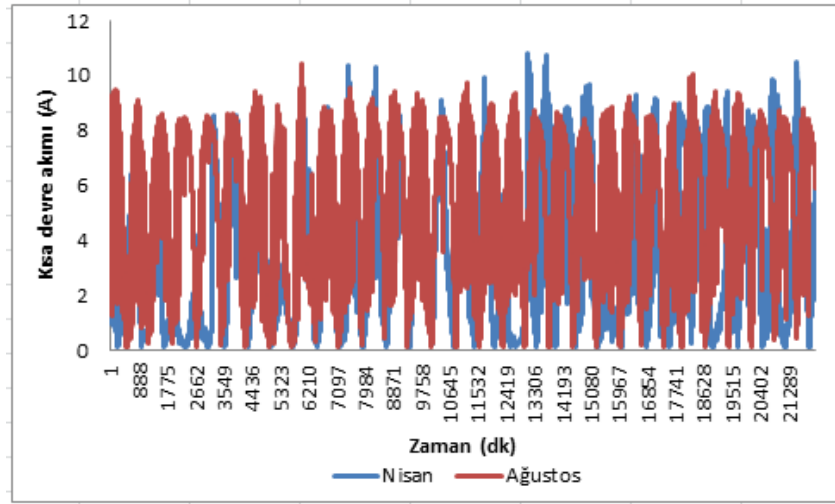
Şekil 4.42 Güneş ışımasının zamanla değişimi



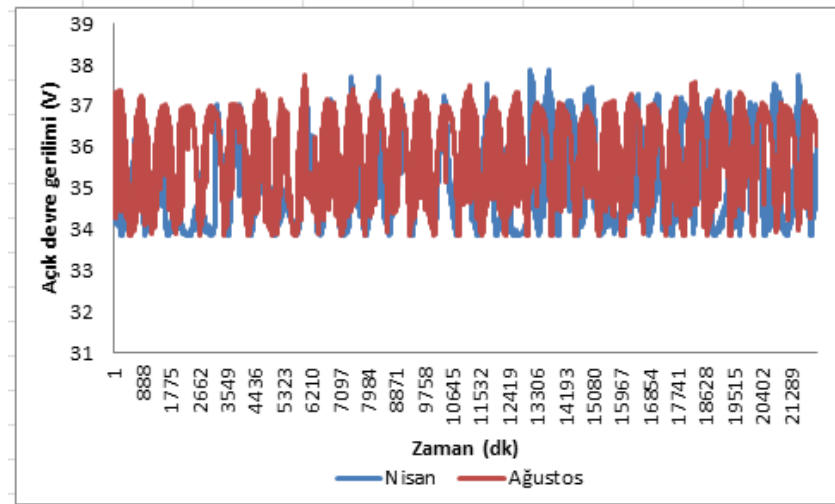
Şekil 4.43 Sistemin maksimum akımının zamanla değişimi



Şekil 4.44 Sistemin maksimum geriliminin zamanla değişimi

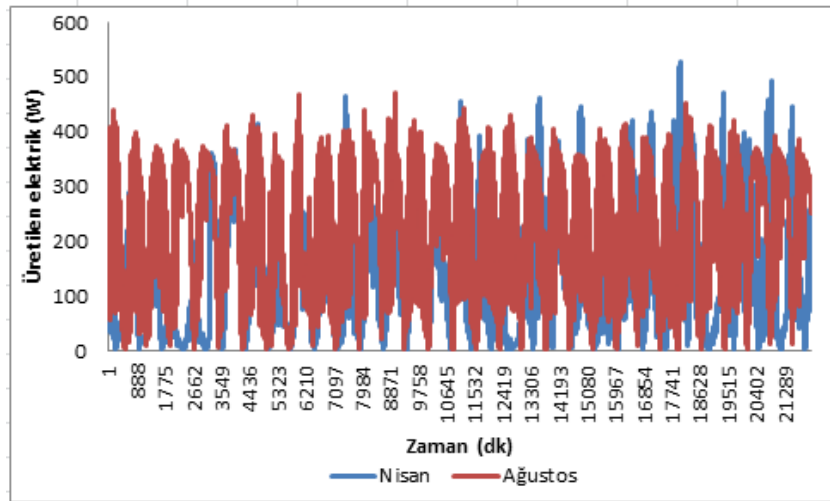


Şekil 4.45 Sistemin kısa devre akımının zamanla değişimi



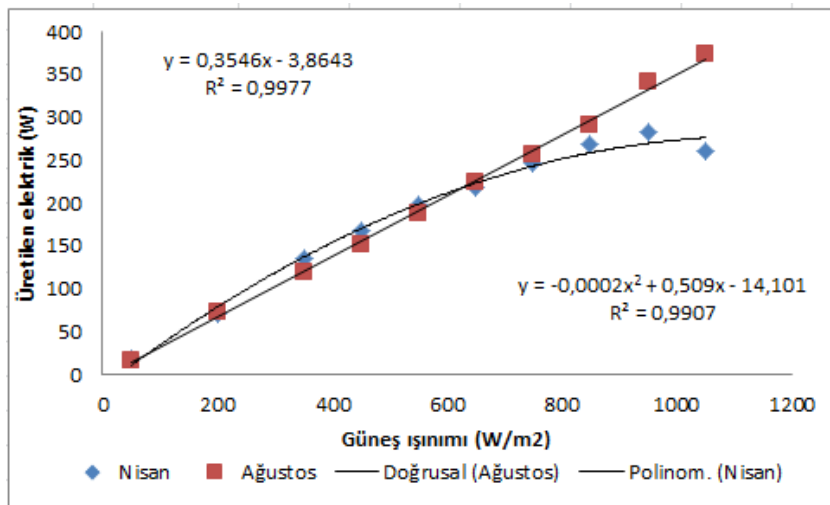
Şekil 4.46 Sistemin açık devre geriliminin zamanla değişimi

Ekserji analizi uygulanan fotovoltaik sistem, Şekil 4.40-4.42 arasında verilen ortam şartlarına 21153 dakika maruz kalması sonucunda Şekil 4.43-4.44' de verilen akım ve gerilim değerlerini üretmiştir. Bu akım ve gerilim değerlerinin birbiri ile çarpılması sonucunda sistemden elde edilen elektriksel güç değeri grafiksel olarak Şekil 4.47' de gösterilmektedir.



Şekil 4.47 Üretilen elektriksel gücün zamanla değişimi

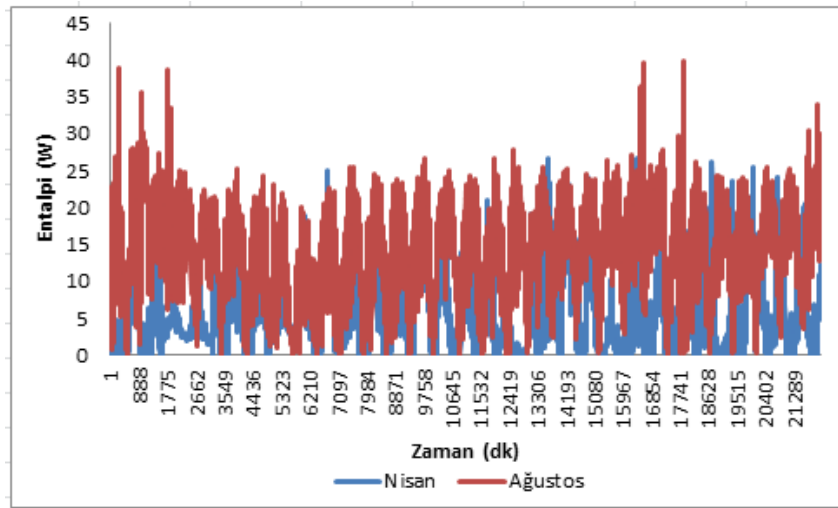
Şekil 4.47 incelendiğinde fotovoltaiik sistemden elde edilen elektriksel gücün zamanla değişiklik gösterdiği görülmektedir. Fotovoltaiik sistem maksimum 550 W civarında elektriksel güç üretmiştir. Nisan ayında üretilen elektriksel güç değeri ortalama olarak 132.5 W iken ağustos ayı ortalaması 225.47 W' tır.



Şekil 4.48 Üretilen elektriksel güç ile güneş ışınlmı arasındaki ilişki

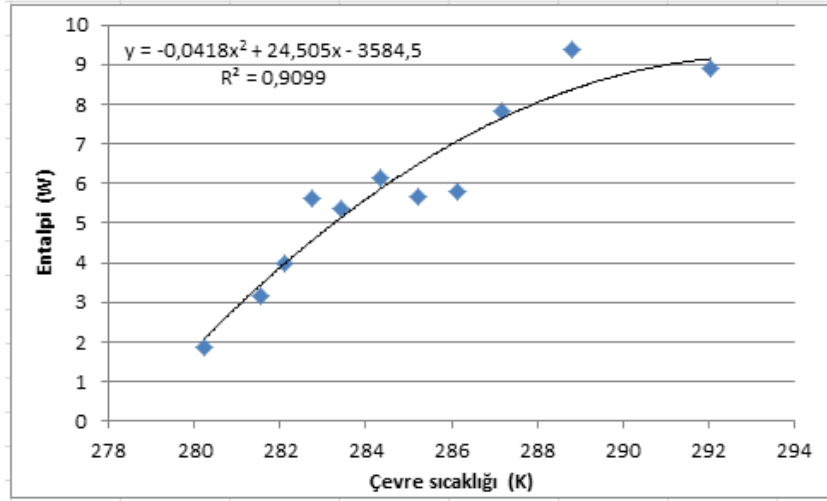
Fotovoltaiik güneş hücrelerinde elektrik üretimi hücreye gelen güneş ışınlmına göre değişmektedir. Şekil 4.48' da gelen güneş ışınlmına bağlı olarak nisan ve ağustos aylarında üretilen elektriksel güç değerleri görülmektedir. Nisan ayı için şekli inceleyecek olursak, ışınlm değeri 0'dan 1000 w/m² değerine doğru artarken elektriksel güç değeri de 280 W değerine kadar artmaktadır. Ancak ışınlm değerinin 1000 w/m² değerini aşmasıyla birlikte üretilen elektriksel güç değeri azalmaktadır. Ağustos ayı için

aynı inceleme yapılacak olursa, güneş ışınımının artan değerleri için elektriksel güç üretiminin de arttığı ve maksimum 375 W değerine ulaştığı görülür. 1000 W/m² civarı güneş ışınımında nisan ayında meydana gelen elektriksel güç üretimindeki azalma ağustos ayında meydana gelmemektedir. Bölüm 4.3’ te detaylı olarak anlatıldığı gibi fotovoltaiik sistemin ekserji analizinde temel olarak iki bileşen bulunmaktadır. Bunlar fiziksel ekserji ve kimyasal ekserjidir. Fiziksel ekserji ise kendi içinde üretilen elektrik, entalpi ve entropi olmak üzere üç bileşenden meydana gelmektedir. İlk bileşen olan üretilen elektrik Şekil 4.47’ de gösterilmektedir. İkinci bileşen olan entalpi değişimi ise Şekil 4.49’ da verilmektedir.

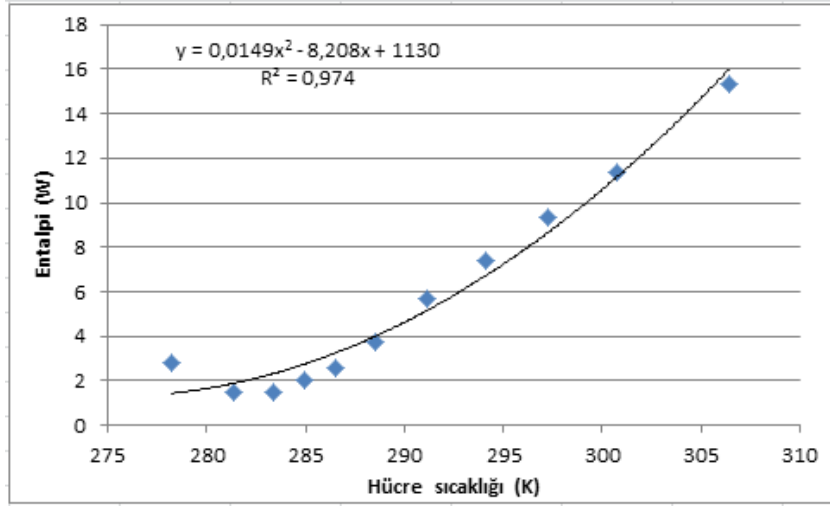


Şekil 4.49 Entalpi değişiminin zamana göre durumu

Şekil 4.49 incelendiğinde entalpi değişiminin zamanla farklılıklar gösterdiği görülmektedir ve maksimum 35-40 W arasında bir değer almaktadır. Entalpi değişimine neden olan iki parametre olarak çevre ve hücre sıcaklıkları söylenebilir. Entalpi değişimi ile çevre ve hücre sıcaklıkları arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.50 ve 4.51’ de gösterilmektedir.

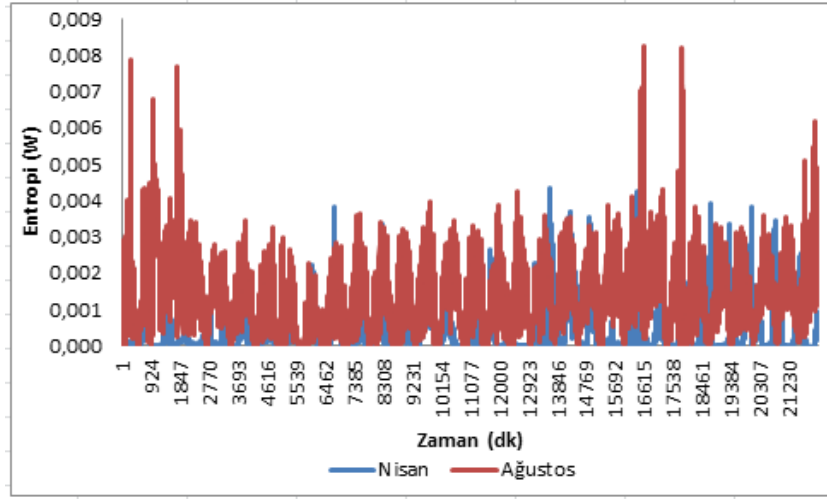


Şekil 4.50 Entalpi ile çevre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan)

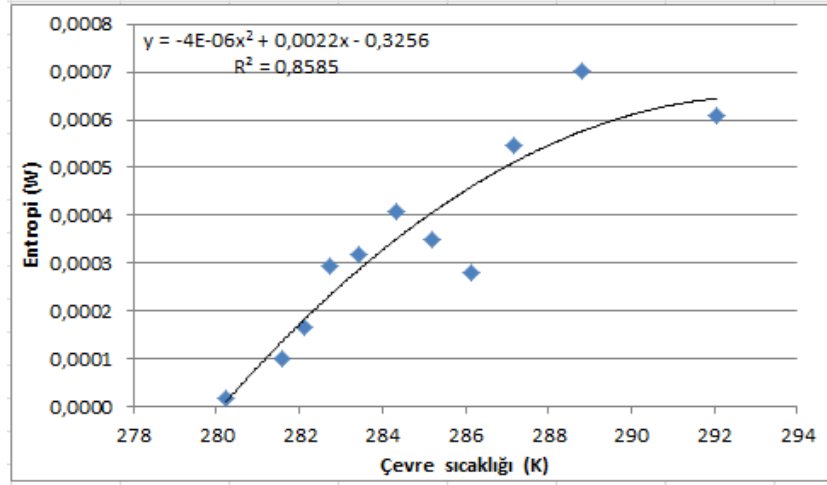


Şekil 4.51 Entalpi ile hücre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan)

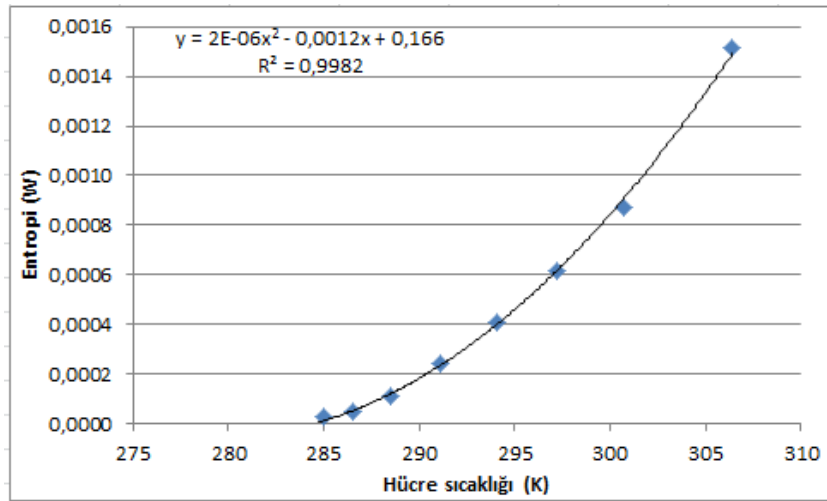
Şekil 4.50 ve 4.51 incelendiğinde, ortak bir özellik olarak hem çevre sıcaklığında hem de hücre sıcaklığında meydana gelen artışın entalpi değişimini arttırdığı söylenebilir. Çevre sıcaklığı maksimum 294 °K civarına kadar ulaşırken hücre sıcaklığının 307 °K civarına kadar ulaştığı görülmektedir. Fiziksel ekserjinin üçüncü bileşeni ise sistemin ürettiği entropidir. Fotovoltaik hücrelerde entropi üretimi denklem 4.37 ve 4.38 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilende değerler Şekil 4.52’ de gösterilmektedir.



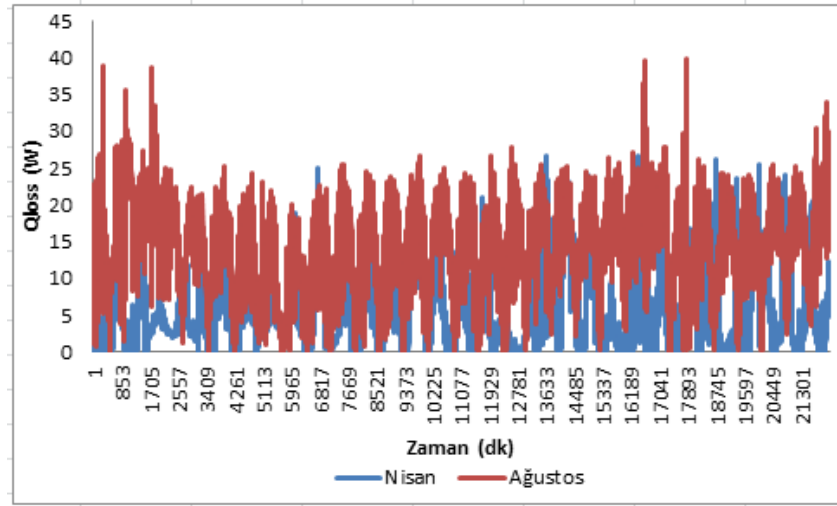
Şekil 4.52 Entropinin zamanla değişimi



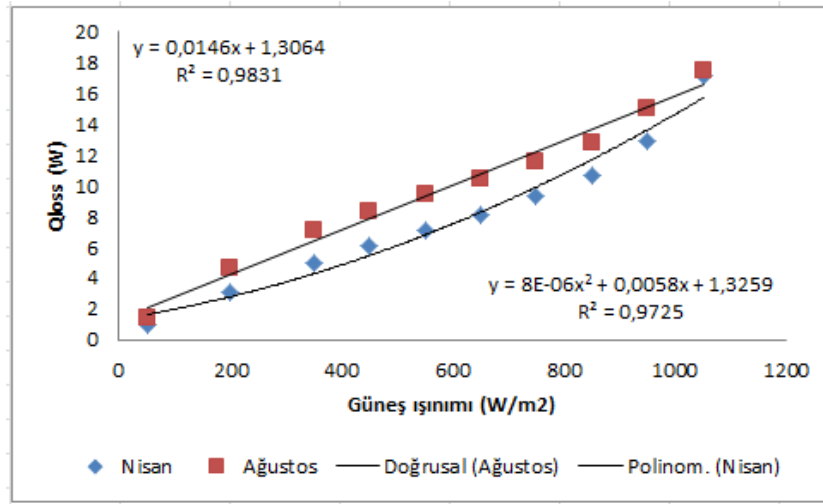
Şekil 4.53 Entropi ile çevre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan)



Şekil 4.54 Entropi ile hücre sıcaklığı arasındaki ilişki (Nisan)



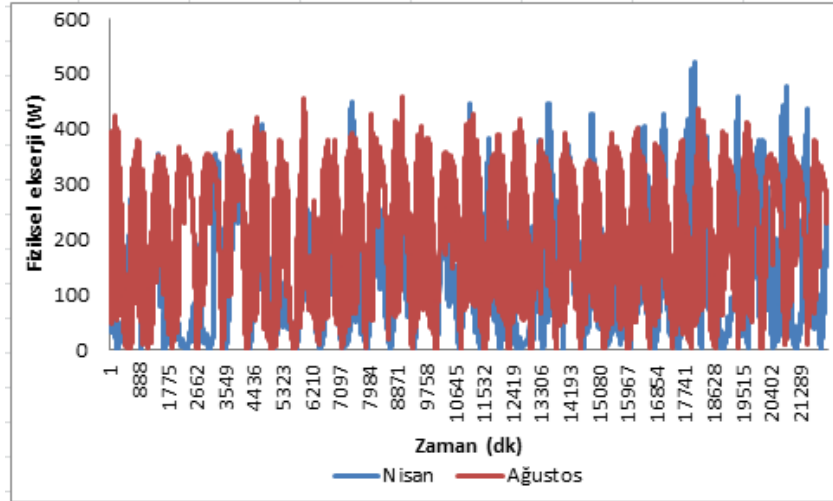
Şekil 4.55 Isı kayıplarının zamana göre değişimi



Şekil 4.56 Isı kayıpları ile güneş ışınımı arasındaki ilişki

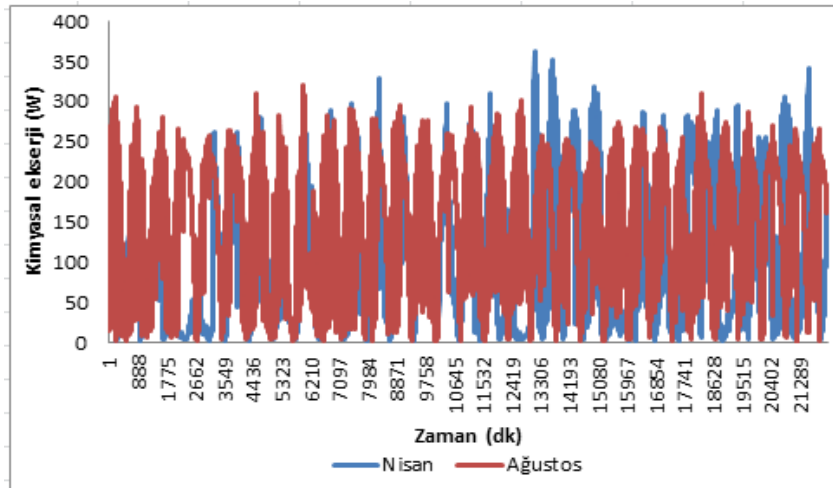
Şekil 4.53 ve Şekil 4.54' de çevre ve hücre sıcaklığının entropi üstündeki etkisi görülmektedir. Çevre ve hücre sıcaklıklarının entropi üstündeki etkileri ile entalpi üstündeki etkileri birbirine benzemektedir. Hem çevre hem de hücre sıcaklığından meydana gelen artışlar sistemin ürettiği entropinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 4.55' te ise fotovoltaik güneş sisteminde meydana gelen ısı kayıpları görülmektedir. Isı kayıpları zamana göre farklılık gösterirken maksimum 40 W değerini almaktadır. Isı kayıplarının sıfır olduğu zamanlarda ise hücre ve çevre sıcaklıklarının birbirine eşit oldukları anlaşılmaktadır. Şekil 4.56' da ise güneş ışınımının ısı kayıpları üstündeki etkisi nisan ve ağustos aylarına göre gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde ağustos ayındaki ısı kayıplarının nisan ayındakilere göre daha yüksek olduğu ve genel olarak güneş ışınımında meydana gelen artışın ısı kayıplarını da arttırdığı söylenebilir.

Fotovoltaik hücrelerde fiziksel ekserjiyi meydana getiren bileşenler (elektrik üretimi, entalpi ve entropi) Şekil 4.38-4.46 arasında grafiksel olarak verilmiştir. Bu bileşenlerin denklem 4.39’ da yerlerine yazılmaları ile birlikte fiziksel ekserjinin zaman göre değişimi elde edilir ve Şekil 4.57’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.57 Fiziksel ekserjinin zamana göre değişimi

Şekil 4.57’ de görüldüğü gibi fotovoltaik hücrenin fiziksel ekserjisi maksimum 520 W değerini almaktadır. Fotovoltaik hücrelerde ekserjiyi meydana getiren bir diğer bileşen ise kimyasal ekserjidir. Denklem 4.42’ deki işlemin gerçekleştirilmesi ile elde edilen kimyasal ekserji değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.58’ de gösterilmektedir.

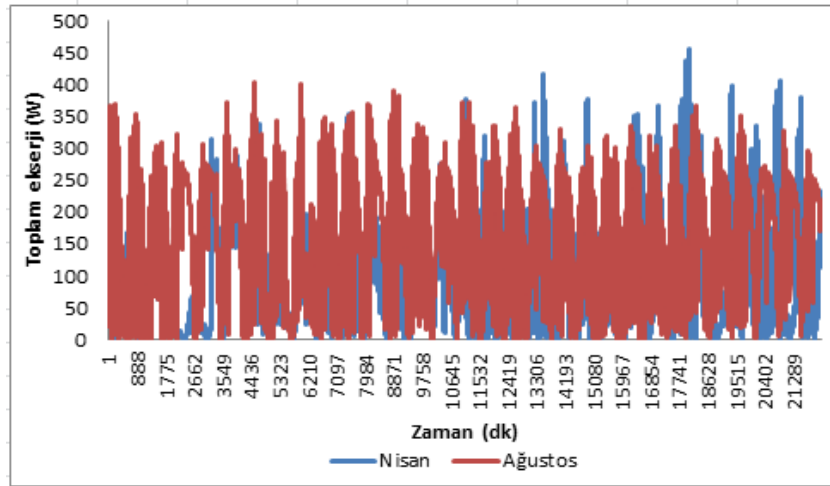


Şekil 4.58 Kimyasal ekserjinin zamana göre değişimi

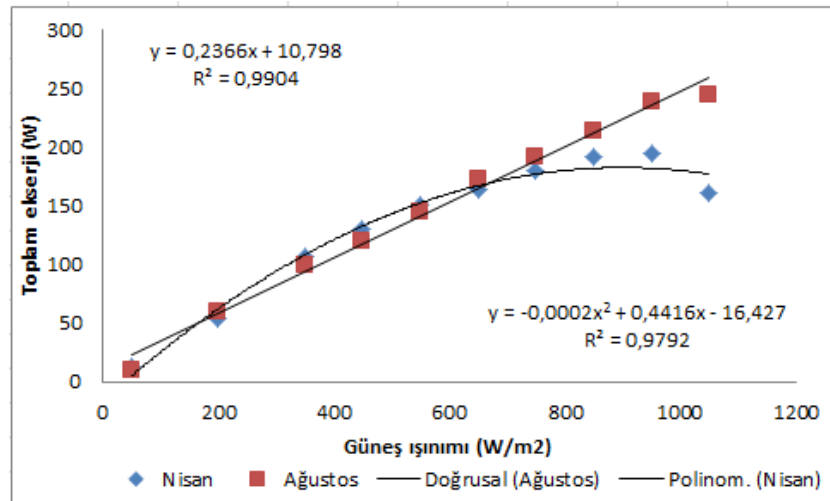
Şekil 4.57 ve Şekil 4.58 incelendiğinde, görüldüğü üzere kimyasal ekserji genel olarak fiziksel ekserjiden daha düşük değerlere sahiptir.

Kimyasal ekserjinin aldığı maksimum değer 350 W civarındadır. Yapılan hesaplamalarda 22153 dakikada sonunda fiziksel ekserji ve kimyasal ekserjinin ortalama değerleri nisan ayı için sırasıyla 127 W ve 97 W iken ağustos ayı için 213 W ve 158 W olmaktadır.

Fotovoltaik güneş pillerinin toplam ekserji değeri denklem 4.43' de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.59' da zamana bağlı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.59 Toplam ekserjinin zamana göre değişimi

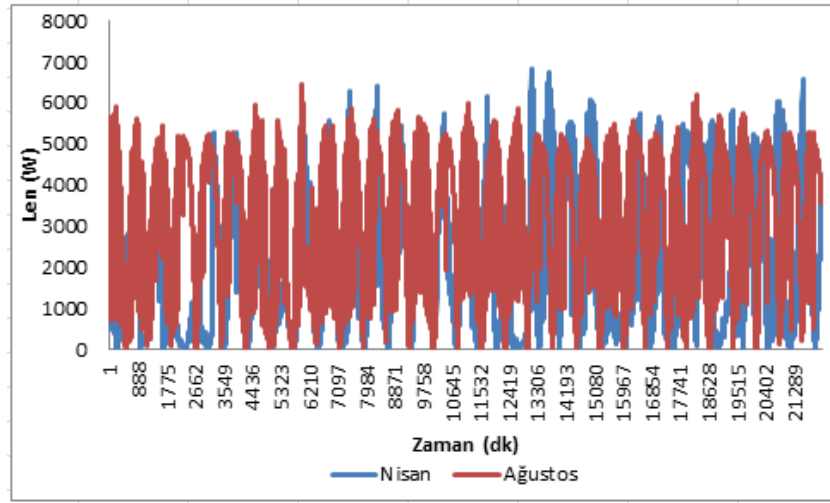


Şekil 4.60 Toplam ekserji ile güneş ışınlamı arasındaki ilişki

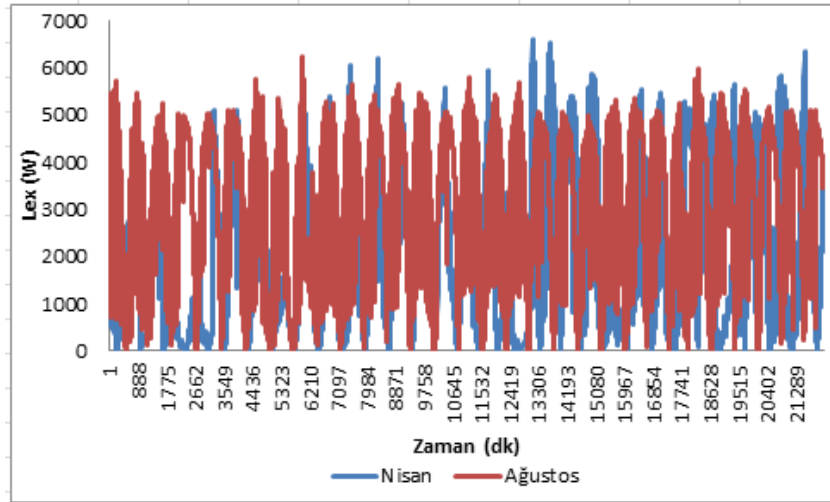
Şekil 4.59' da PV hücresinin toplam ekserji değeri, Şekil 4.60' da ise toplam ekserji değerinin güneş ışınlamı ile değişimi görülmektedir. Toplam ekserji değeri maksimum 450 W değerini almaktadır. Nisan ayı için toplam ekserji değeri 900 W/m² güneş ışınlamına kadar sürekli artarken bu değeri aşan ışınlam miktarlarında azalma göstermektedir.

Ağustos ayı için toplam ekserji değerine bakıldığında 1000 W/m^2 değerine kadar toplam ekserjinin sürekli arttığı bu değerden sonra artışında bir azalma meydana geldiği görülecektir.

Eksergoekonomik analiz kapsamında önemli olan diğer iki parametre ise enerji kaybı ($\dot{L}_{en}$) ve ekserji kaybı ($\dot{L}_{ex}$) oranlarıdır. Denklem 4.58 ve 4.59 kullanılarak enerji ve ekserji kayıp oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak şekil 4.61 ve 4.62’ de gösterilmektedir.



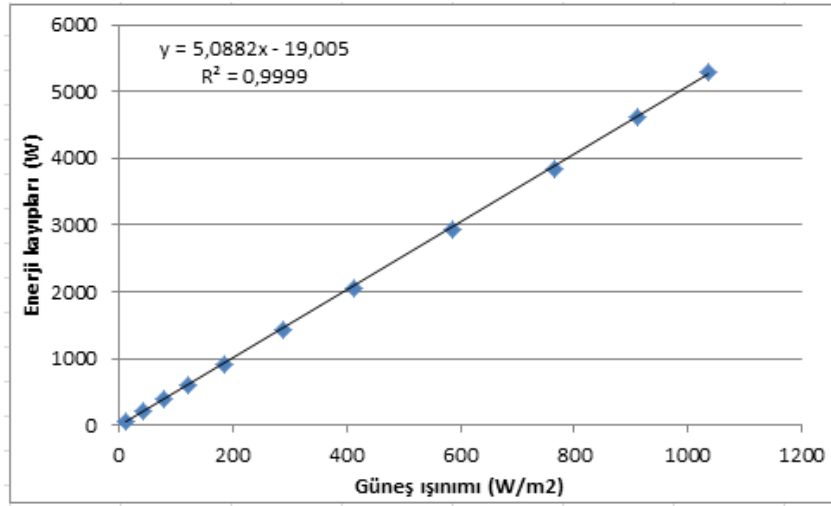
Şekil 4.61 Enerji kayıplarının zamana göre değişimi



Şekil 4.62 Ekserji kayıplarının zamana göre değişimi

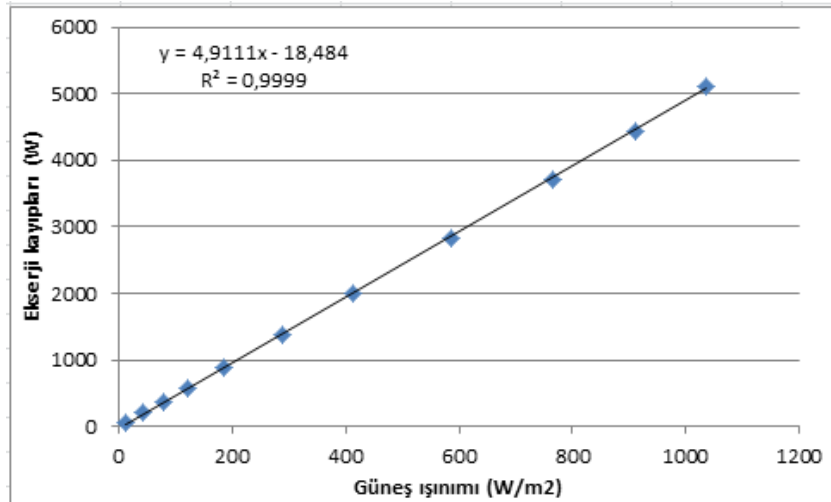
Şekil 4.61 ve 4.62 incelendiğinde enerji ve ekserji kayıp oranlarının birbirine yakın olduğu görülecektir. Her iki kayıp oranı da zamana göre farklı değerler almakla birlikte enerji kayıplarının maksimum değeri 7000 W iken ekserji kayıplarının maksimum değeri

6500 W' dır. Ayrıca 22153 dakika sonunda alınan ortalama ile enerji ve ekserji kayıplarının ortalama değeri nisan ayın için sırasıyla 2054 W ve 1983 W iken ağustos ayı için 3397 W ve 3276 W olmaktadır.



Şekil 4.63 Enerji kayıpları ile güneş ışınlamı arasındaki ilişki (Nisan)

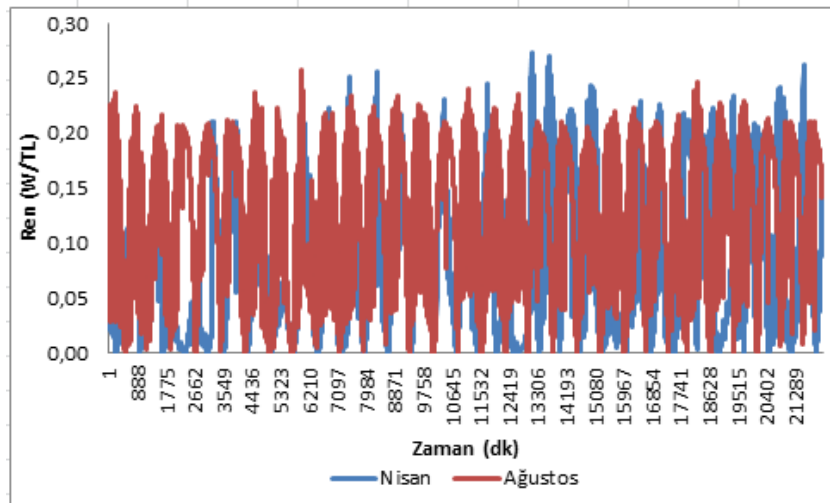
Şekil 4.63 ve Şekil 4.64' de güneş ışınlamı ile enerji ve ekserji kayıpları arasındaki ilişki verilmektedir. Şekiller incelendiğinde güneş ışınlamında meydana gelen artışın hem enerji kayıplarını hem de ekserji kayıplarını arttırdığı görülmektedir. Güneş ışınlamı ve kayıplar arasında doğru orantı bulunmaktadır.



Şekil 4.64 Ekserji kayıpları ile güneş ışınlamı arasındaki ilişki (Nisan)

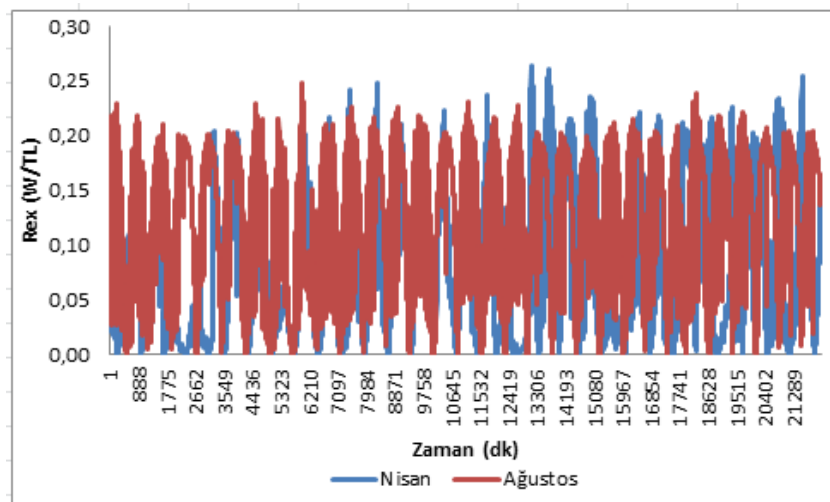
Enerji ve ekserji kayıp oranlarının hesaplanmasıyla birlikte PV güneş sisteminin termodinamik analizi tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra enerji ve ekserji kayıp oranlarının PV güneş sisteminin kapital maliyetine bölünmesiyle $\dot{R}$ değeri denklem

4.60’da gösterildiği gibi hesaplanmış olacaktır. Hesaplamalar sonucunda elde değerler Şekil 4.65 ve 4.66’ da gösterilmektedir.



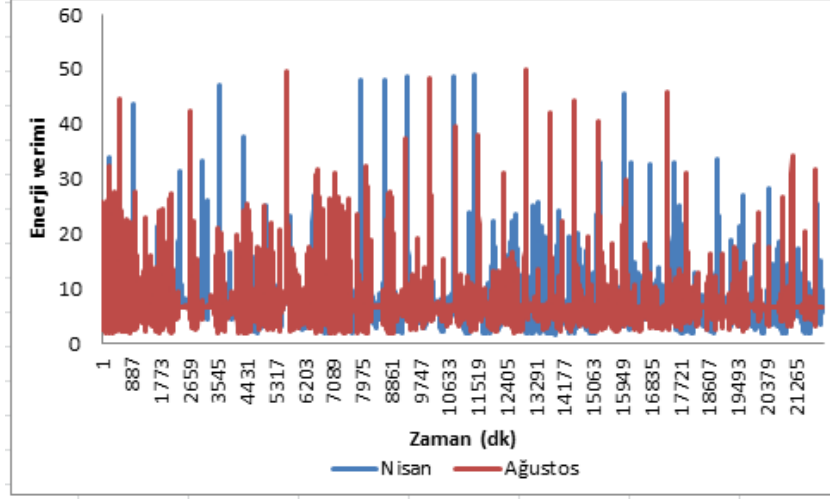
Şekil 4.65 Ren değerinin zamana göre değişimi

Şekil 4.65 ve 4.66’ da PV güneş sisteminden elde edilen enerji ve ekserji termodinamik kayıp oranlarının, sistem kurulum maliyetine oranının zamanla değişimi görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Ren ve Rex değerlerinin zamanla değişimlerinin birbirine benzediği görülmektedir. Ancak PV güneş sistemindeki enerji kayıplarının ekserji kayıplarından daha fazla olması nedeniyle Ren değerleri Rex değerlerinden daha yüksek çıkmaktadır. 22153 dakika sonunda, nisan ayı için Ren ve Rex değerlerinin ortalaması sırasıyla 0,082 W/TL ve 0,079 W/TL olurken, ağustos ayı için sırasıyla 0,1358 W/TL ve 0,131 W/TL olmaktadır.

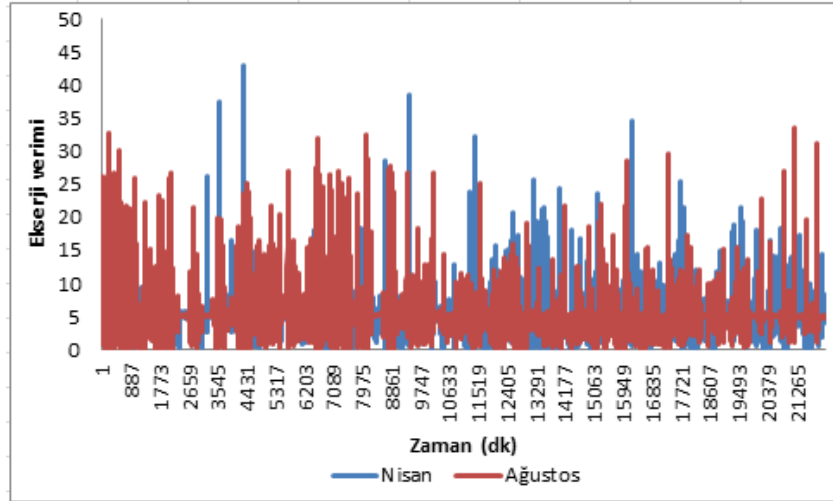


Şekil 4.66 Rex değerinin zamana göre değişimi

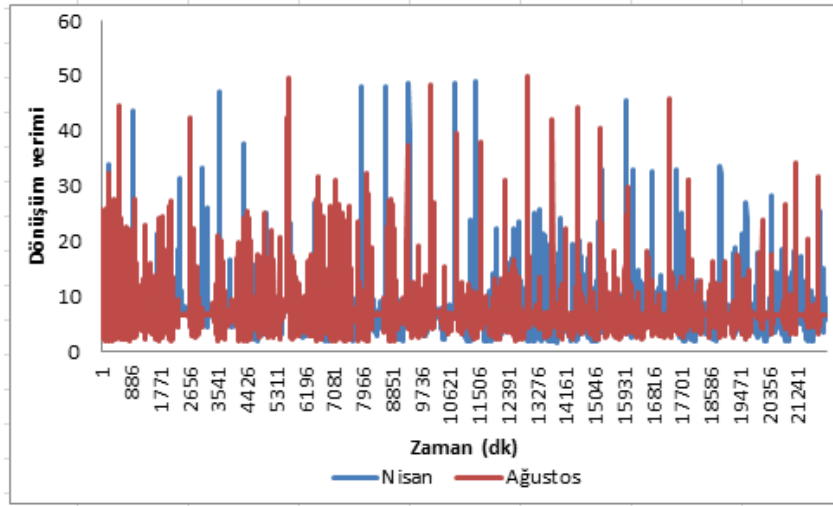
PV güneş sisteminden alınan veriler, denklem 4.32, 4.45, 4.47 ve 4.48' de yerlerine yazılarak yapılan hesaplamalar sonucunda sisteme ait enerji verimi, ekserji verimi, dolum faktörü ve dönüşüm verimi Şekil 4.67-4.70 arasında gösterilmektedir.



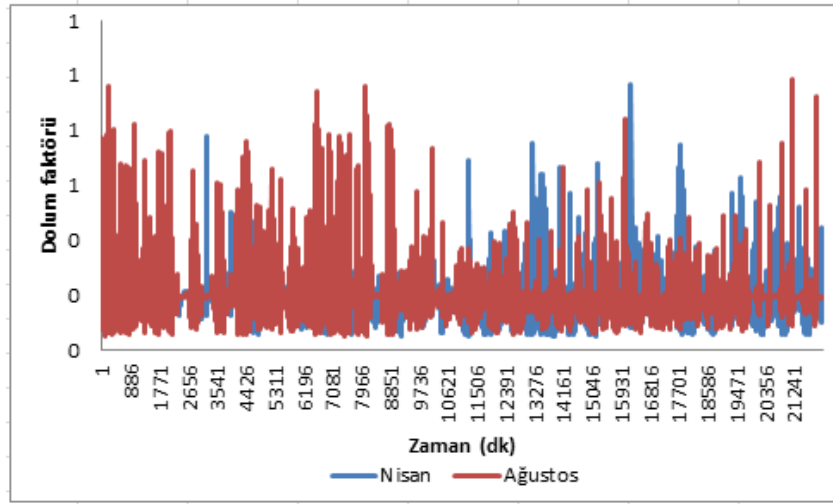
Şekil 4.67 Enerji veriminin zamana göre değişimi



Şekil 4.68 Ekserji veriminin zamana göre değişimi



Şekil 4.69 Dönüşüm veriminin zamana göre değişimi

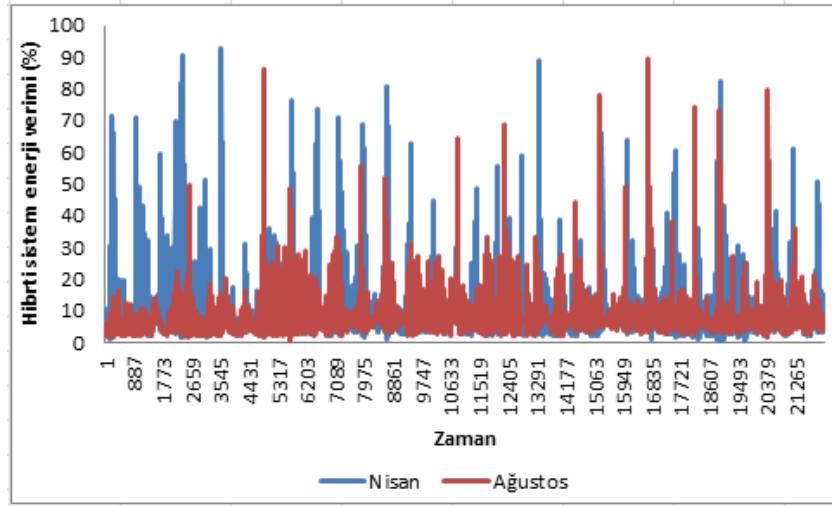


Şekil 4.70 Dolum faktörünün zamana göre değişimi

PV güneş sisteminin verim değerleri Şekil 4.65-4.68 arasında gösterilmektedir. Şekiller incelenecek olursa PV güneş sisteminde enerji veriminin ekserji veriminden daha yüksek olduğu görülecektir. 22125 dakika sonunda alınan ortalamalar sonucundan nisan ayı için enerji verimi %7,35 ve ekserji verimi %5,37 olurken, ağustos ayı için sırasıyla %6,67 ve %4,84 olmaktadır. Enerji verimi maksimum %50 değerine ulaşırken ekserji verimi ise maksimum %43 değerine ulaşmaktadır. Dönüşüm verimi ile enerji verimi aynı değerleri almakla birlikte, dönüşüm veriminin de ortalaması nisan ayı için %7,35, ağustos ayı için %6,67 olmaktadır. Dolum faktörü ise bazı anlar yükselmesine rağmen genelde düşük değerlerde olup zamansal ortalaması nisan ayı için %19,1 ağustos ayı için %18,9 olmaktadır.

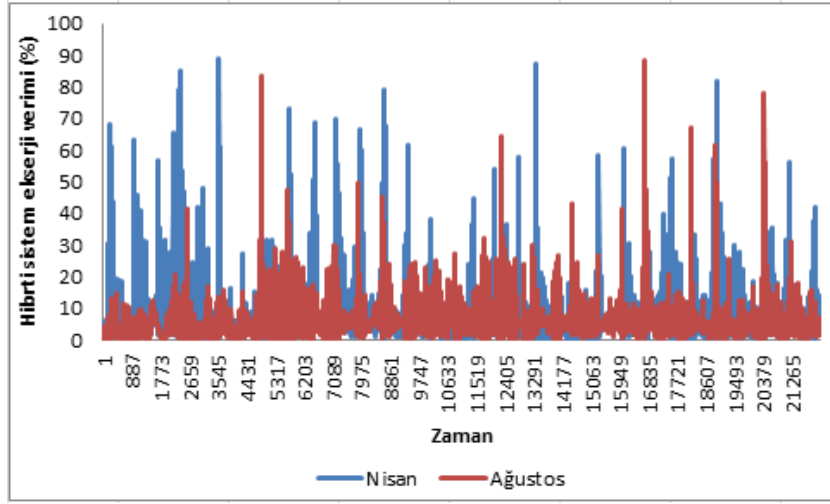
4.6.3 Hibrit Sistemin Verimi

Rüzgar-güneş hibrit sisteminin eksergoekonomik analizi Bölüm 4.6.1 ve 4.6.2’ de anlatılmıştır. Eksergoekonomik analiz sonucunda her bir sistemin ayrı ayrı verim eğrileri çıkarılmış, grafiksel olarak gösterilmiş ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölüm kapsamında ise sistem bir bütün olarak düşünülmüş ve sistemin toplam verim değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.71’ de hibrit sistemin enerji verimi nisan ve ağustos aylarına göre zamansal olarak gösterilmektedir. Hibrit sistemin verimi bazı anlarda yükselerek %90 seviyesine çıkmasına rağmen genel olarak baktığımızda %30 seviyelerinde kalmaktadır. 22153 dakika sonunda alınan ortalamada enerji verimi değeri nisan ayı için %9,15, ağustos ayı için %7,61 çıkmaktadır.



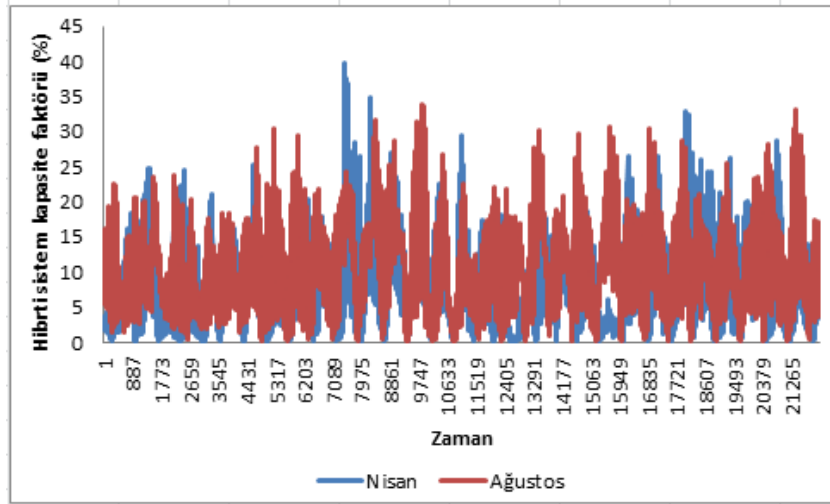
Şekil 4.71 Hibrit sistemin enerji veriminin zamana göre değişimi

Şekil 4.72’ de hibrit sistemin ekserji verimi görülmektedir. Enerji veriminde olduğu gibi ekserji veriminde de anlık yükselmeler meydana gelerek verim değeri %90 seviyesine kadar çıkmıştır. Ancak sistemin genel verimine bakılacak olursa verim, %25 mertebesinde dir. Dönemsel olarak şekli incelendiğinde nisan ayı ekserji verimi değerlerinin ağustos ayı veriminden daha yüksek olduğu görülür. Nisan ayı ekserji verimi ortalaması %7,05 iken ağustos ayı ekserji verimi ortalaması %5,4’ tür. Şekil 4.71 ve 4.72 birlikte incelenecek olursa enerji verimi değerlerinin ekserji verimi değerlerinden daha yüksek olduğu fark edilecektir.

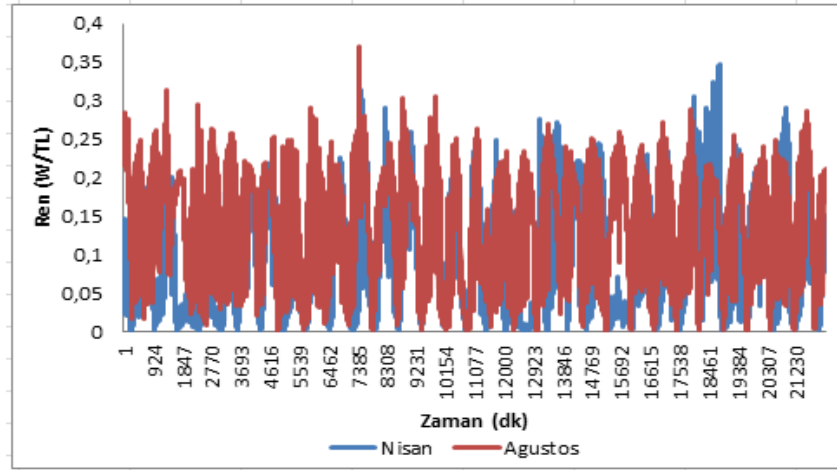


Şekil 4.72 Hibrit sistemin ekserji veriminin zamana göre değişimi

Şekil 4.73' de hibrit sistemin nisan ve ağustos aylarındaki kapasite faktörü zamansal olarak gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde kapasite faktörünün maksimum %40 değerine ulaştığı görülmektedir. Enerji ve ekserji verimlerinde nisan ayı değerleri daha yüksek çıkmasına rağmen kapasite faktörü açısından incelendiğinde ağustos ayı değerleri nisan değerlerinden daha yüksektir. Nisan ayı için alınan ortalamada kapasite faktörü %7,11 değerini alırken, ağustos ayı ortalamasında %10,82 değerini almaktadır.

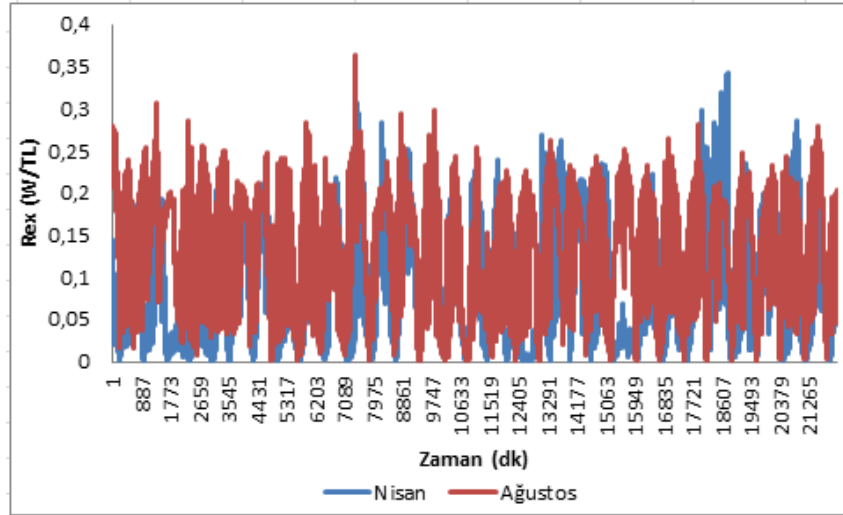


Şekil 4.73 Hibrit sistemin kapasite faktörünün zamana göre değişimi



Şekil 4.74 Ren değerinin zamana göre değişimi

Şekil 4.74 ve 4.75' te hibrit sistemden elde edilen enerji ve ekserji termodinamik kayıp oranlarının, sistem kurulum maliyetine oranının zamanla değişimi görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Ren ve Rex değerlerinin zamanla değişimlerinin birbirine benzediği görülmektedir. Ancak hibrit sistemdeki enerji kayıplarının ekserji kayıplarından daha fazla olması nedeniyle Ren değerleri Rex değerlerinden daha yüksek çıkmaktadır. Ren ve Rex değerleri maksimum yaklaşık 0,37 W/TL değerine ulaşmaktadırlar. Bu ifade, sistemin kurulumu için harcanan birim liraya karşılık kaybedilen enerjinin/ekserjinin 0, 37 W olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.75 Rex değerinin zamana göre değişimi

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında 107M331 no' lu "Rüzgar-Güneş Hibrit Sistemlerinin Giriş, Çıktı, Kayıplarının ve Verimliliklerinin İstanbul Şartlarında Alan-Zaman ve Ekserji Yöntemleriyle Genel Bir Modellemesi" başlıklı Tübitak projesi çerçevesinde İTÜ Meteoroloji gözlem parkında kurulan rüzgar-güneş hibrit sisteminin ölçüm parametreleri ele alınmış ve bu parametrelere göre rüzgar-güneş hibrit sisteminin eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Eksorgoekonomik analiz rüzgar ve güneş sistemlerine ayrı ayrı uygulanmış olup, analizin sonuçları şu şekilde sıralanabilir.

- Öncelikle her bir termodinamiksel terimin zamanla değişimi gösterilmiş ve sürekli değişken değerler elde edilmiştir.
- Eksergoekonomik analiz yapılırken sistemlerin maruz kaldıkları meteorolojik şartlar göz ardı edilmemiştir. Sistemlerin davranış karakteristikleri mevsimlere göre değerlendirilmiş olup ilkbahar ayını temsilen "Nisan", yaz ayını temsilen "Ağustos" aylarında elde edilen veriler kullanılmıştır.
- Rüzgâr türbini sisteminin ekserji ve enerji verimlerini etkileyen rotor önü ve arkasındaki rüzgar hızı, sıcaklığı ve basıncı verileri Şekil 4.14-4.19 arasında nisan ile ağustos ayları için ayrı ayrı verilip aralarındaki ilişki gösterilmiştir.
- PV güneş sisteminin ekserji ve enerji verimlerini etkileyen güneş ışıınımı, hücre sıcaklığı ve atmosfer sıcaklığı verileri Şekil 4.38-4.40 arasında nisan ile ağustos ayları için ayrı ayrı verilip aralarındaki ilişki gösterilmiştir.
- Rüzgar türbini ve PV güneş sisteminin ürettiği elektriksel güç değerleri hesaplanmış ve mevsimlere göre gösterdikleri değişimler sırasıyla Şekil 4.20 ve

4.45' de gösterilmiştir. PV güneş sisteminde üretilen elektriksel güç değeri ile sistemin maruz kaldığı güneş ışıını arasındaki ilişki “en küçük kareler yöntemi” ile bulunan bir denklem (Nisan: $R^2=0,9907$, Ağustos: $R^2=0,9977$) vasıtasıyla Şekil 4.46' da açıklanmıştır.

- Rüzgar-güneş hibrit sisteminde meydana gelen entalpi değişimi her iki sistem için de ayrı ayrı hesaplanmıştır. Entalpi değerlerindeki değişiklik mevsimsel olarak gösterilmiştir.
- Rüzgar sistemindeki entalpi değişimini etkileyen rotor önü ve arkasındaki rüzgar sıcaklığı ile entalpi değişimi arasındaki ilişki Şekil 4.22-4.23' de gösterilmiş olup ayrıca bir denklem (sırasıyla $R^2=0,8892$, $R^2=0,8784$) ile açıklanmaya çalışılmıştır.
- PV sistemde entalpi değişimini etkileyen çevre ve hücre sıcaklıkları ile entalpi değişimi arasındaki ilişki Şekil 4.48 ve 4.49' da gösterilmiş olup ayrıca bir denklem (sırasıyla $R^2=0,9099$, $R^2=0,974$) ile açıklanmaya çalışılmıştır.
- Sistemlerin ürettiği entropi değerlerinin zamana göre değişimleri mevsimsel olarak Şekil 4.24 ve Şekil 4.50' de verilmiştir. Entalpi değişiminde olduğu gibi entropi değişiminin de rotor önü ve arkasındaki rüzgar sıcaklığı ile arasındaki ilişki denklemler ile açıklanmaya çalışılmıştır (sırasıyla: $R^2=0,8895$, $R^2=0,8787$). Entropi değişiminin çevre sıcaklığı ve PV hücre sıcaklığı arasındaki ilişki denklemler ile açıklanmaya çalışılmıştır (sırasıyla: $R^2=0,8585$, $R^2=0,9982$) Elde edilen sonuçlar Şekil 4.25-4.26 ve Şekil 4.51-4.52' de gösterilmektedir.
- Rüzgar-güneş hibrit sisteminin ekserji değerleri hesaplanmış ve nisan ile ağustos aylarındaki zamana göre değişimleri gösterilmiştir (Şekil 4.27, Şekil 4.57).
- PV güneş sisteminde toplam ekserji ile güneş ışıını arasındaki ilişki eğri uydurma yöntemiyle bulunan bir denklem ile ortaya konmuş ve Şekil 5,58' de verilmiştir. Nisan ayında PV güneş hücresinin 950 W/m^2 den fazla güneş ışıınına maruz kalması halinde toplam ekserjisi düşerken, ağustos ayında artmaya devam edip 1100 W/m^2 den sonra azalmaya başlamaktadır.
- Ekserji hesaplarından sonra rüzgar-güneş hibrit sistemindeki enerji ve ekserji kayıpları EXCEM yöntemi vasıtasıyla hesaplanmış ve mevsimsel olarak değişimleri zamana göre çizdirilerek grafiklerle gösterilmiştir.

- Eksergoekonomik analiz kapsamında hesaplanan enerji ve ekserji kayıp oranları, sistemin kurulum maliyeti bölünerek “R” değerleri W/TL cinsinden hesaplanmıştır.
- Rüzgar türbini sisteminin enerji verimi, ekserji verimi ve kapasite faktörü hesaplanmış ve sırasıyla 4.34-4.36 arasında aylara göre zamanla değişimleri gösterilmiştir. Enerji verimi % 6-23 arasında değişirken ekserji verimi % 5-19 arasında değişmektedir. Kapasite faktörünün nisan ayında maksimum değeri % 39 olurken ağustos ayında maksimum % 29 olmaktadır. Nisan ayı için alınan ortalamalarda enerji ve ekserji verimi sırasıyla %14,98 ve %11,95 olarak hesaplanırken, ağustos ayı için alınan ortalamalarda sırasıyla %16,42 ve %12,52 olarak hesaplanmıştır.
- Rüzgar türbini sisteminin enerji ve ekserji verimleri 1,5 m/s rüzgar hızından 4 m/s rüzgar hızına kadar düzenli olarak artarken, 4 m/s’ den yüksek rüzgar hızlarında düşmektedir. Bu durum rüzgar türbinin düşük hızlarda çalışmak üzere tasarlandığını göstermektedir.
- Dönemsel bir kıyaslama yapıldığında nisan ayındaki rüzgar türbini verimlerinin ağustos ayı verimlerinden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 4.34-4.37).
- PV güneş sisteminin enerji verimi, ekserji verimi, dönüşüm verimi ve dolum faktörü değerleri nisan ve ağustos ayları için çizdirilerek karşılaştırılmıştır. Enerji verimi ekserji verimine göre daha yüksek değerler alırken, dönüşüm verimi ile aynı değerleri almaktadır. 22125 dakika sonunda alınan ortalamalar sonucundan nisan ayı için enerji verimi %7,35 ve ekserji verimi %5,37 olurken, ağustos ayı için sırasıyla %6,67 ve %4,84 olmaktadır. Enerji verimi maksimum %50 değerine ulaşırken ekserji verimi ise maksimum %43 değerine ulaşmaktadır. Dönüşüm verimi ile enerji verimi aynı değerleri almakla birlikte, dönüşüm veriminin de ortalaması nisan ayı için %7,35, ağustos ayı için %6,67 olmaktadır. Dolum faktörü ise bazı anlar yükselmesine rağmen genelde düşük değerlerde olup zamansal ortalaması nisan ayı için %19,1 ağustos ayı için %18,9 olmaktadır.
- Rüzgar ve PV güneş sisteminin hibrit olarak çalıştığı düşünülerek toplam enerji verimi, ekserji verimi ve kapasite faktörü nisan ve ağustos ayları için hesaplanmıştır.

22153 dakika sonunda alınan ortalama enerji verimi değeri nisan ayı için %9,15, ağustos ayı için %7,61 çıkmaktadır. Aynı şekilde nisan ayı ekserji verimi ortalaması %7,05 iken ağustos ayı ekserji verimi ortalaması %5,4' tür.

Enerji ve ekserji verimi nisan ayında daha yüksek değerlerde olmasına rağmen kapasite faktörü ağustos ayında daha yüksek değerler almaktadır. Nisan ayı için alınan ortalama kapasite faktörü %7.11 değerini alırken, ağustos ayı ortalamasında %10,82 değerini almaktadır

Tez çalışmasının sonunda görüldüğü gibi PV güneş, rüzgar türbini ve hibrit sisteminin enerji verimleri ekserji verimlerinden daha yüksek çıkmaktadır. Bu yüzden bu tür enerji sistemlerinin kurulum aşamasında verim ve fizibilite hesaplamaları yapılırken ekserji veriminin göz önünde bulundurulması daha gerçekçi bir modelleme yapılmasına olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Özaktürk, M., (2007). Rüzgar Enerjisinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [2] Tavman, İ.H. ve Önder, T.K., (2001). "Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımı", Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 316-323, İzmir.
- [3] T.C. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, www.meteor.gov.tr, 04 Mart 2011.
- [4] Özdamar, A. ve Çolak, M., (2000). "İzmir 'de Yapılan Dört Yıllık Rüzgar Ölçümlerine Dayanan Bir Enerji Değerlendirmesi", III.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 309-321, İstanbul.
- [5] Tanrıöven, M., (2010) "Rüzgar ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri", Yıldız Teknik Üniversitesi, Ders Notları, İstanbul.
- [6] Bostaş Enerji, Rüzgar Enerjisi Üretim Skalası, www.bostas.com.tr/index.php/tr/teknik-destek/ruezgar-enerjisi-uretim-skala, 12 Kasım 2010.
- [7] Wikipedia, http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgâr_türbini, 12 Ocak 2011.
- [8] Şen, Ç., (2003). Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [9] Newton public schools, www.newton.mec.edu, 23 Kasım 2010
- [10] European Wind Energy Association, www.ewea.org, 25 Ekim 2010.
- [11] T.C.Enerji Ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, www.enerji.gov.tr, 13 Şubat 2011.
- [12] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, www.epdk.gov.tr, 5 Ocak 2011.
- [13] British Wind Energy Association, www.bwea.com, 16 Aralık 2010.
- [14] American Wind Energy Association, www.awea.org, 5 Aralık 2010.
- [15] Pinnacle Technology Inc, www.pinnaclet.com, 28 Ekim 2010.
- [16] Alternative Energy Institute, www.windenergy.org, 25 Mart 2011.
- [17] Collaborative Offshore Wind Research Into The Environment www.offshorewindfarms.co.uk, 03 Mart 2011.

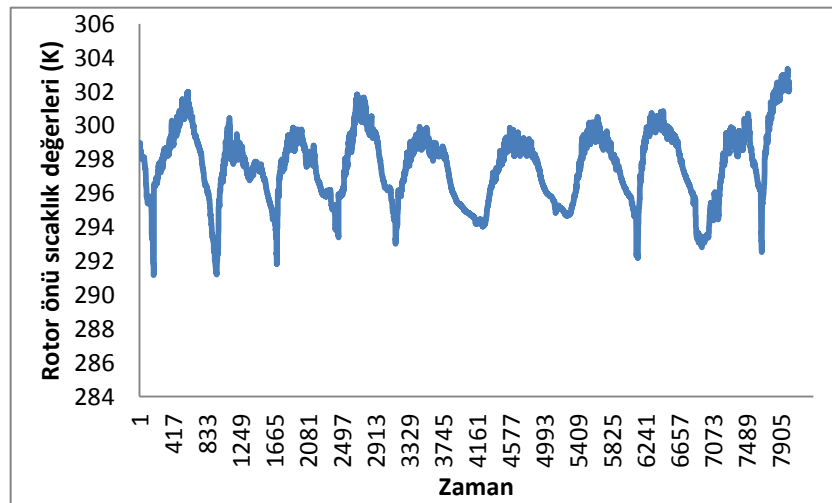
- [18] Akhmatov, V., Induction Generators for Wind Power, www.multi-science.co.uk/wind-power.htm, 21 Mart 2011.
- [19] Ntvmsnbc, www.ntvmsnbc.com, 15 Ocak 2011.
- [20] Global Solar Thermal Energy Council, Concentrating Solar Power From Research To Implementation, www.solarthermalworld.org, 01 Aralık 2010.
- [21] Stoddard, L., Abiecunas, J., ve O'Connel, R., Economic, Energy, and Environmental Benefits of Concentrating Solar Power in California, www.nrel.gov/csp/pdfs/39291.pdf, 05 Kasım 2010.
- [22] Erdoğan, N.H., Gümüő, B., Efe, S.B. ve Kutlu, C., (2009). "Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Santralleri Ve Ilisu HES'e Alternatif Olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Uygulanabilirliği", V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Diyarbakır.
- [23] Kutlu, S., (2002). " Güneş Tarlası İle Elektrik Enerjisi Üretimi Ve SDÜ Kampüs Alanında Bir Uygulama Analizi", Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- [24] Özgöçmen, A., (2007). Güneş Pilleri Kullanarak Elektrik Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [25] T.C. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, www.eie.gov.tr, 14 Ocak 2011.
- [26] Çevre Bakanlığı, (2004). Çevre Dostu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Güneş Enerjisi Alt Grup Raporu, Ankara.
- [27] Keçel, S., (2007). Türkiye'nin Değişik Bölgelerinde Evsel Elektrik İhtiyacının Güneş Panelleri İle Karşılanmasına Yönelik Model Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [28] Demircan, N. ve Alakavuk, Z., (2008). "Fotovoltaik Prensipleri Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul.
- [29] Telli, Z.K., (1984). Termodinamik, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Yayınları, Sayı No:19, Isparta.
- [30] Balsöz, A.M., (1969). Termodinamik, Teknik Okulu Yayınları, Sayı No:95, İstanbul Devlet Mühendislik Ve Mimarlık Akademisi, İstanbul.
- [31] Rosen, M.A. ve Dinçer, İ., (2003). "Exergy-Cost-Energy-Mass Analysis of Thermal Systems and Processes", Energy Conversion and Management, 44:1633-1651.
- [32] Bejan, A., (1982). Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow, John Wiley & Sons Inc., Toronto.
- [33] Evans, R.B., (1969). A Proof That the Exergy is the Only Consistent Measure of Potential Work, Doktora Tezi, Thayer School Of Engineering, Dartmouth College, New Hampshire, ABD.
- [34] Haywood, R.W., (1974) "A Critical Review of the Theorems of Thermodynamic Availability with Concise Formulations", Journal of Mechanical Engineering Science ,16(3):160-73 ve 258-67.

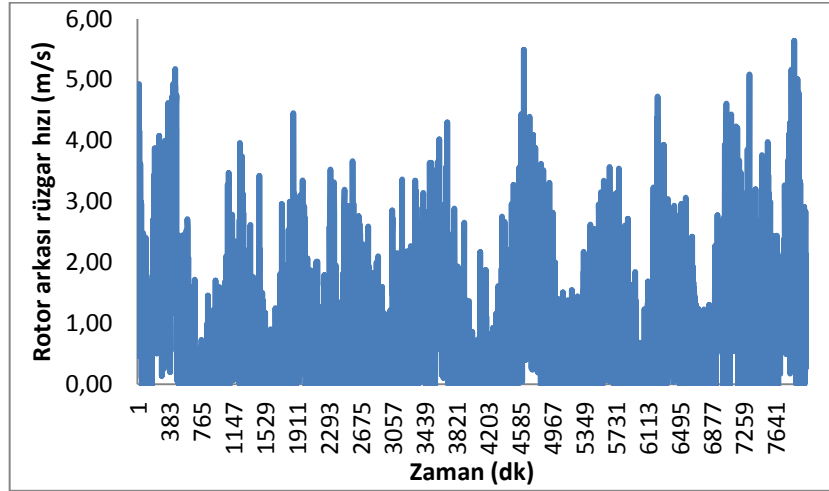
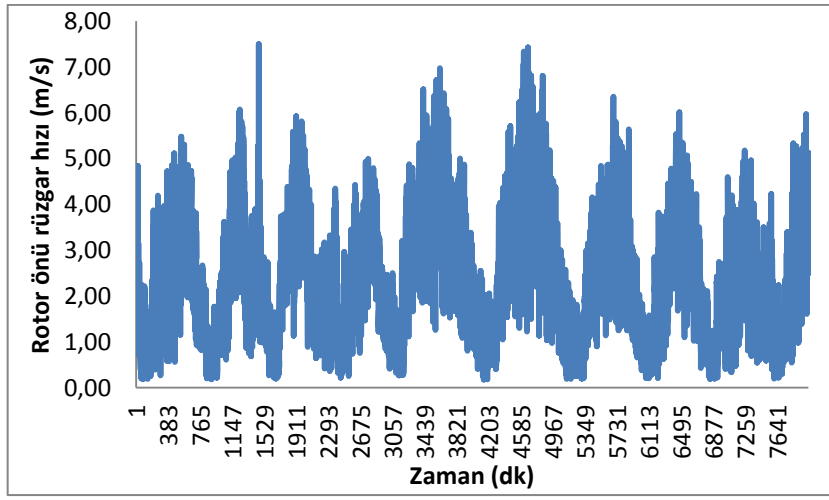
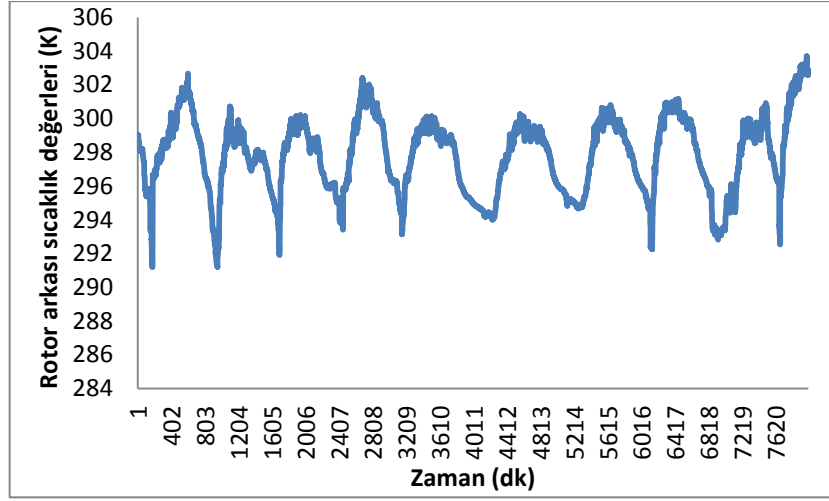
- [35] Reistad, G.M., (1970). Availability: Concepts and Applications, Doktora Tezi, University Of Wisconsin, Madison, ABD.
- [36] Webfer, W.J., (1979). Applications of the Second Law to the Analysis of the Energy Systems, Doktora Tezi, University Of Wisconsin, Madison, ABD.
- [37] Rosen, M.A., (1986). The Development and Application of a Process Analysis Methodology and Code Based on Exergy, Cost, Energy and Mass, Doktora Tezi, University Of Toronto, Toronto, ABD.
- [38] Şahin, A.D., Dinçer, İ. ve Rosen, M.A., (2005). "Thermodynamic Analysis of Wind Energy", International Journal of Energy Research, 30:553-566.
- [39] Baskut, Ö., Özgener, Ö. ve Özgener, L., (2010), "Effects of Meteorological Variables on Exergetic Efficiency of Wind Turbine Power Plants", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9):3237-3241.
- [40] Özgener, Ö., (2005), "A Small Wind Turbine System Application and Its Performance Analysis", Energy Conversion and Management, 47:1326-1337.
- [41] Koroneos, C., Spachos, T. ve Moussiopoluos, N., (2001), "Exergy Analysis of Renewable Energy Sources", Renewable Energy, 28:295-310.
- [42] Koroneos, C., Xydis, G. ve Loizidou, M., (2009), "Exergy Analysis in a Wind Speed Prognostic Model as a Wind Farm Sitting Selection Tool: A Case Study in Southern Greece", Applied Energy, 86:2411-2420.
- [43] Özgener, Ö. ve Özgener, L., (2006), "Exergy and Reliability Analysis of Wind Turbine System: A Case Study", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:1811-1826.
- [44] Şahin, A.D., Dinçer, İ. ve Rosen, M.A., (2006), "Thermodynamic Analysis of Solar Photovoltaic Cell Systems", Solar Energy Materials and Solar Cells, 91:153-159.
- [45] Balta, M.T., Dinçer, İ. ve Hepbaşlı A., (2011), "Exergoeconomic analysis of a hybrid copper chlorine cycle driven by geothermal energy for hydrogen production".
- [46] Güngör, A., Erbay, Z. ve Hepbaşlı, A., (2011), "Exergoeconomic Analysis of a Gas Engine Driven Heat Pump Drier and Food Drying Process", Applied Energy, 88:2677-2684.
- [47] Özgerner, Ö., Özgener, L. ve Dinçer, İ., (2009), "Analysis of Some Exergoeconomic Parameters of Small Wind Turbine System", International Journal of Green Energy, 6:42-56.
- [48] Hepbaşlı, A., (2010), "A Review on Energetic, Exergetic and Exergoeconomic Aspects of Geothermal District Heating System", Energy Conversion and Management, 51:2041-2061.
- [49] Akkaya, Y.E., (2010). Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Maliyet Analizlerinin Karşılaştırılması, Lisans Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [50] Kaymak, M.K., (2010). İstanbul İklim Şartlarında Rüzgar ve Güneş Sistemlerinin Modellenmesi ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

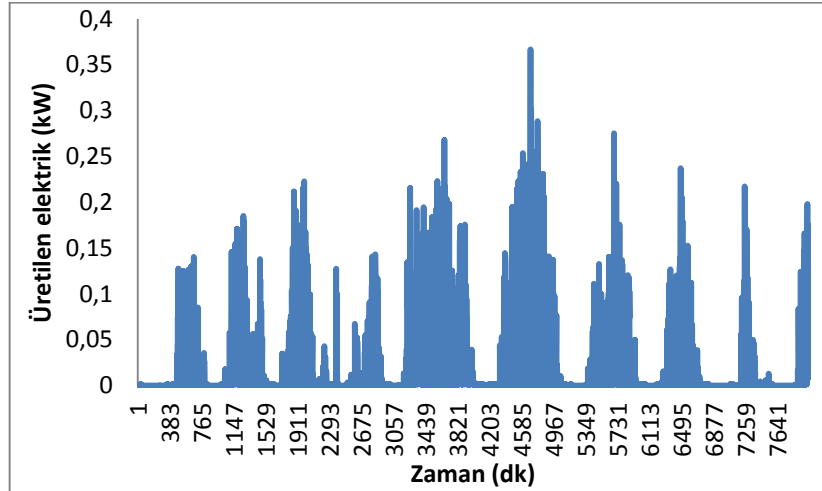
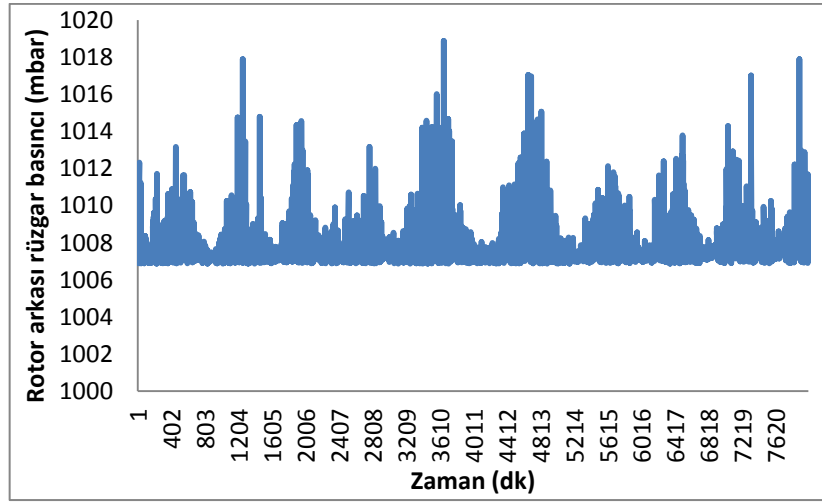
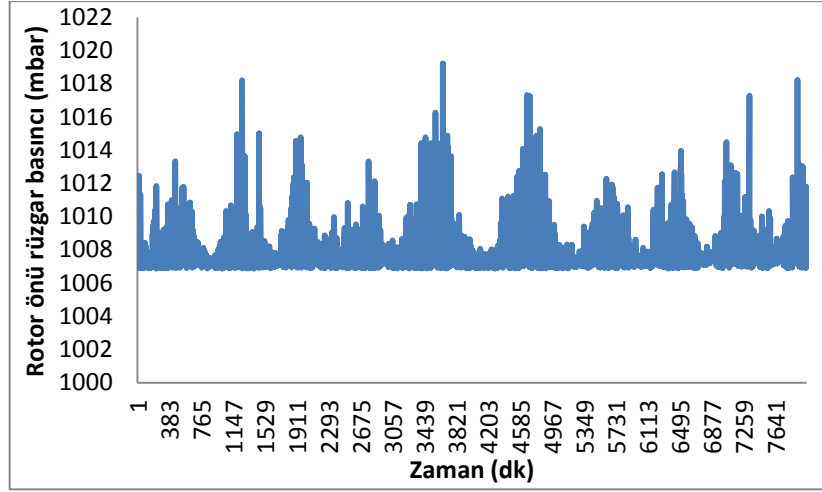
HAZİRAN AYI EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ

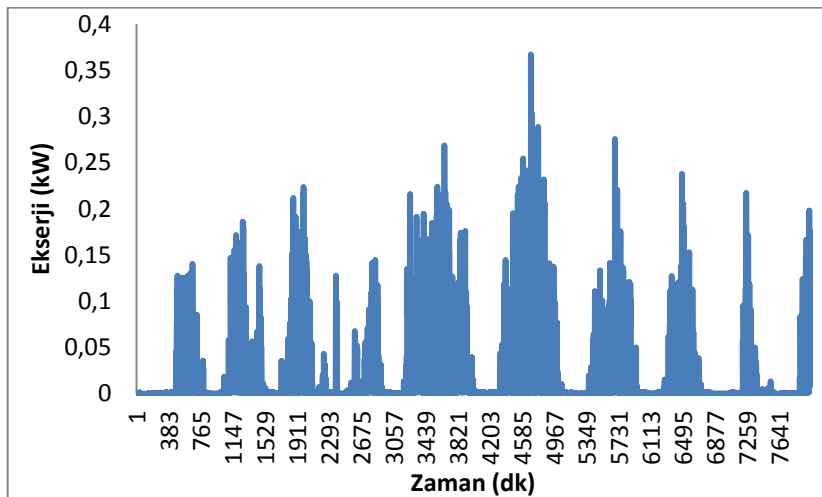
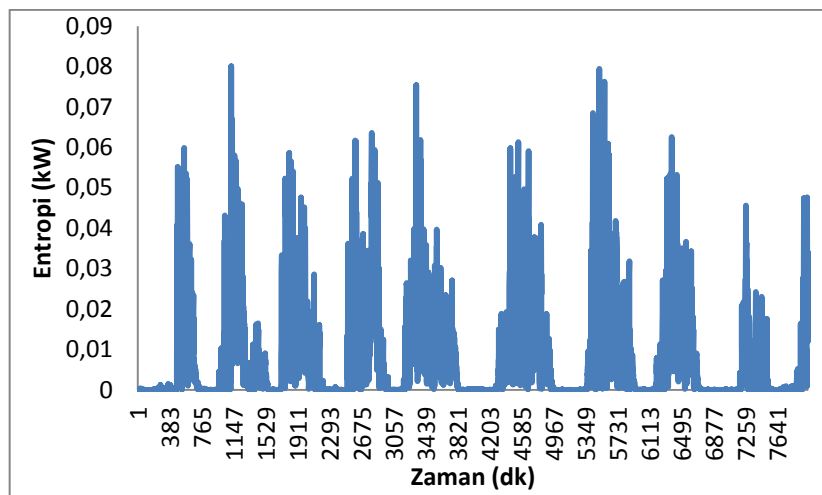
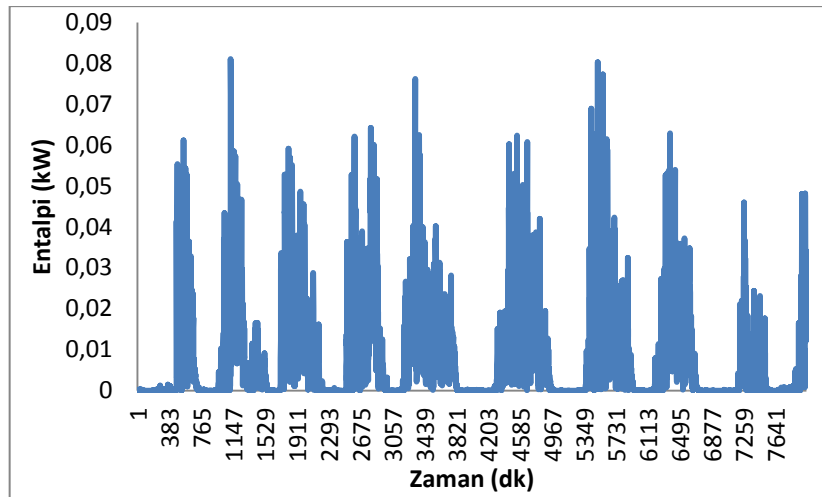
Tez çalışması kapsamında İ.T.Ü' de kurulan 1,5 kW' lık rüzgar türbini ve 750 W' lık PV güneş hibrit sisteminin eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Analiz kapsamında sistemin farklı mevsimlerde (farklı meteorolojik şartlarda) nasıl davrandığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle ilkbahar ve yaz ayları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. İlkbahar mevsimini temsilen nisan, yaz mevsimini temsilen ağustos ayı verileri kullanılmıştır. Ancak haziran ayı verilerinin de hali hazırda bulunmasından ötürü bu ay için de eksergoekonomik analiz yapılmış ve ek olarak sunulmuştur. Tez içeriği kapsamında nisan ve ağustos ayı verilerinden alınan sonuçlar detaylı bir şekilde anlatıldığı için bu bölümde sonuçlar grafiksel olarak şekillerle gösterilecektir.

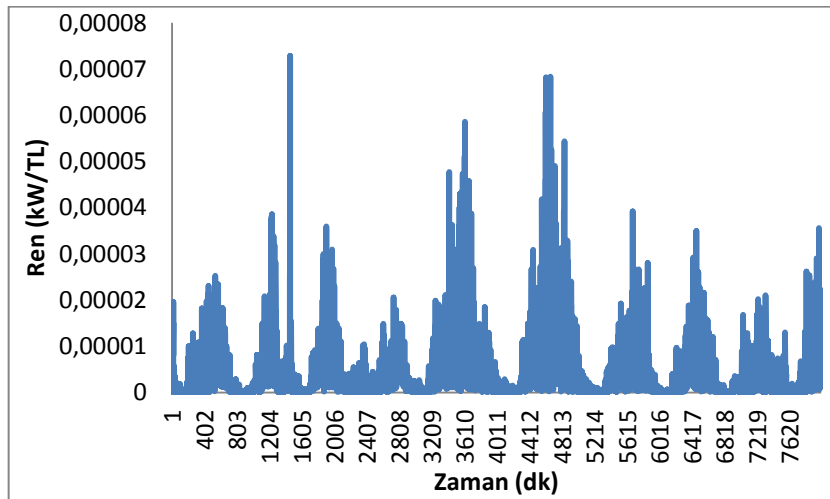
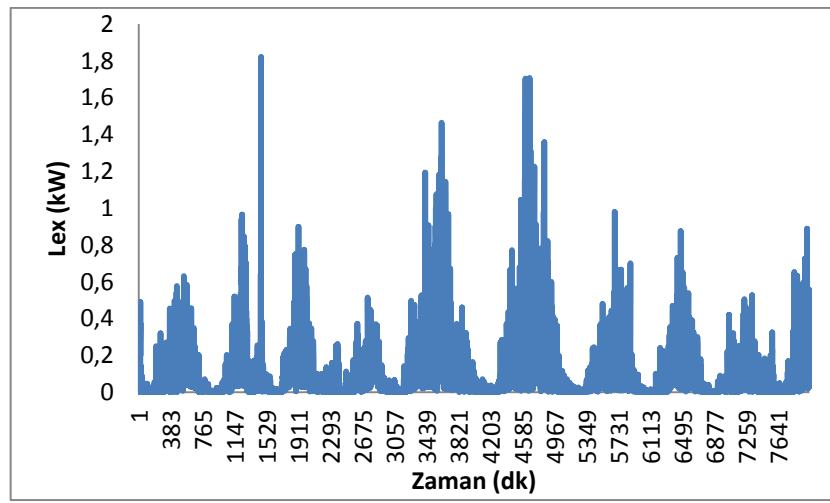
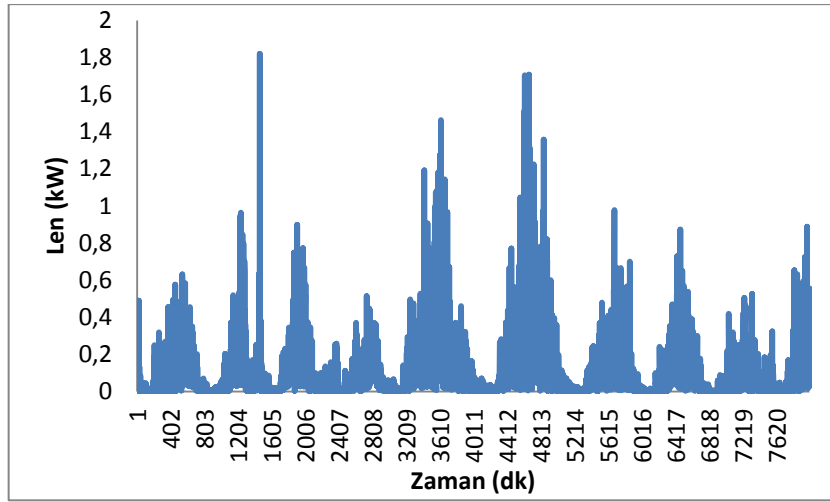
A-1 Rüzgar Türbininin Eksergoekonomik Analizi

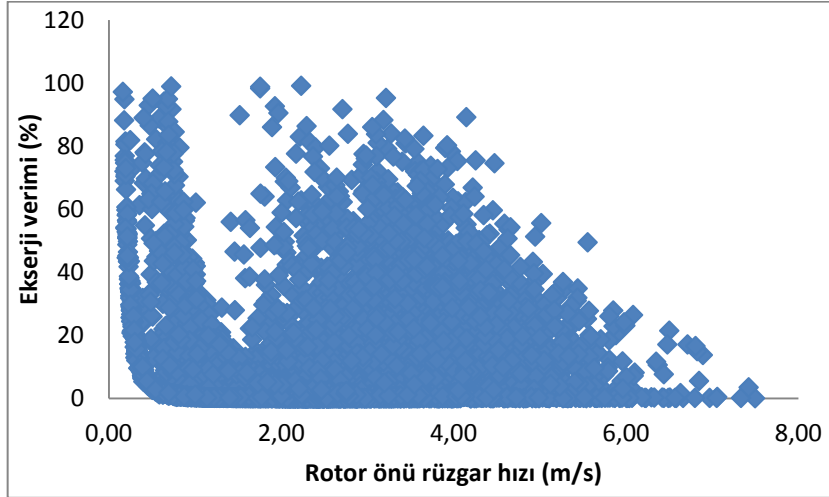
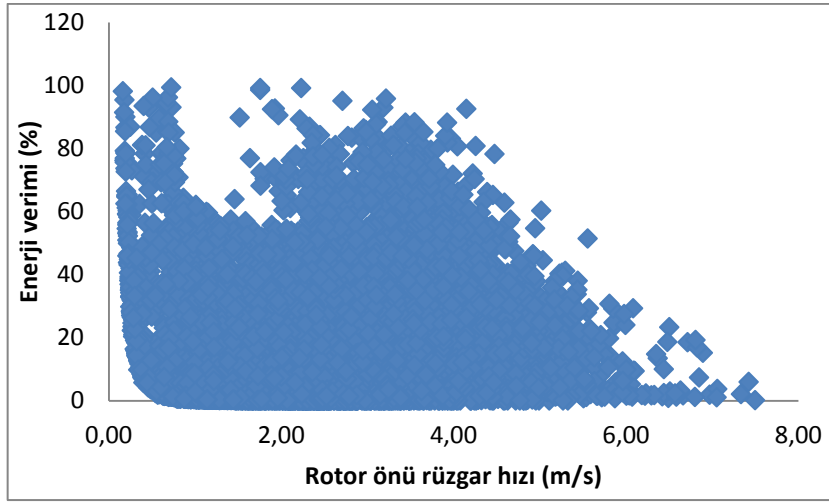
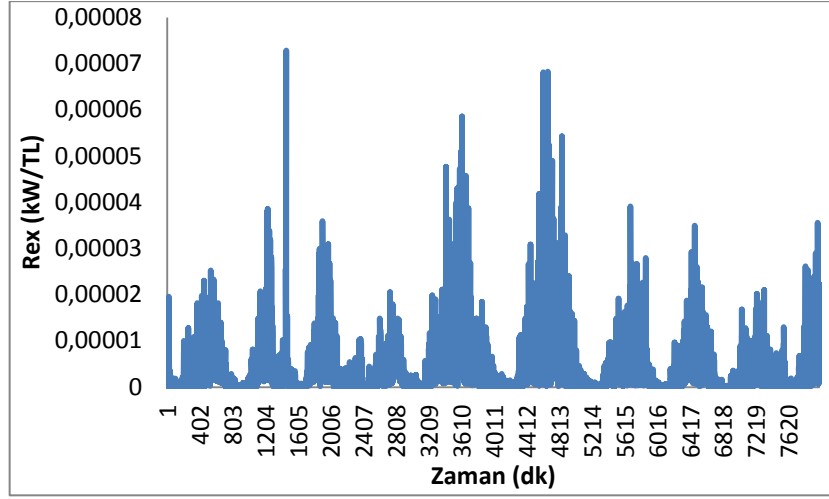


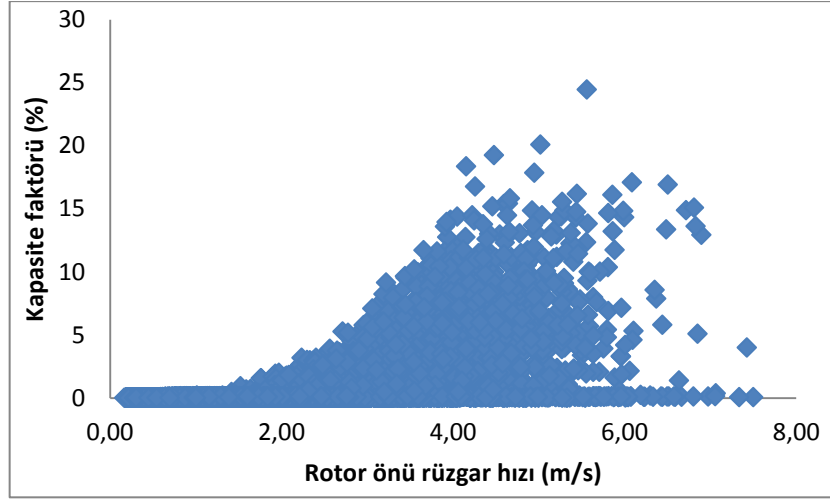




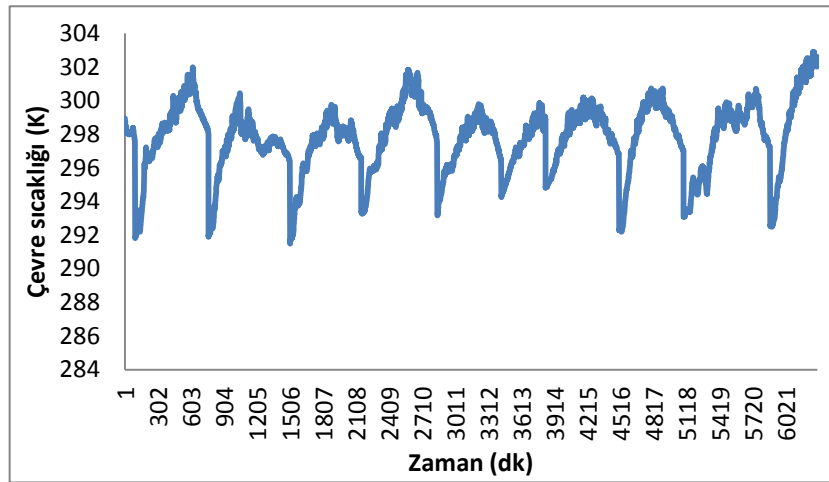
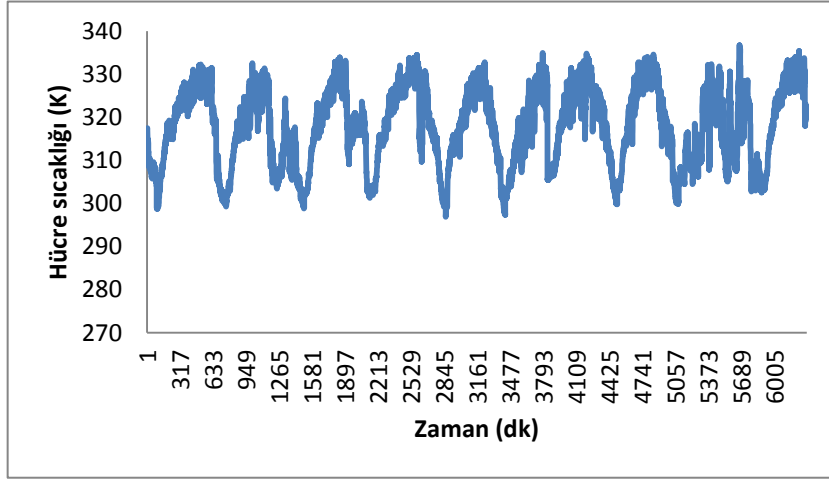


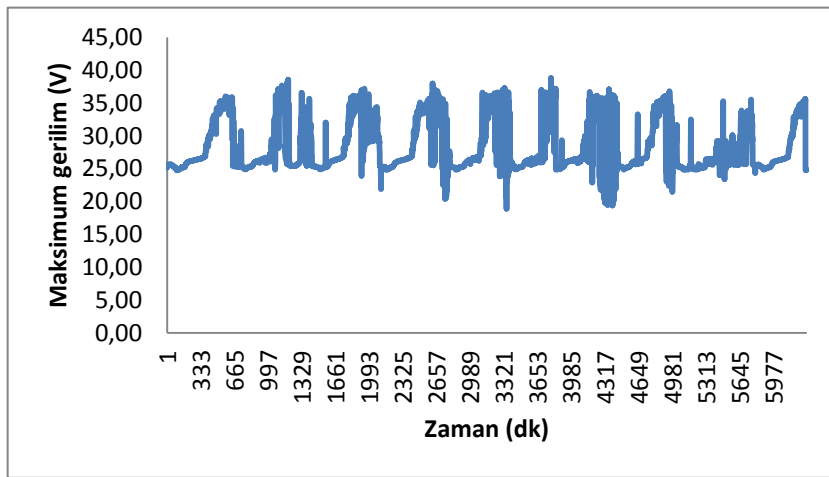
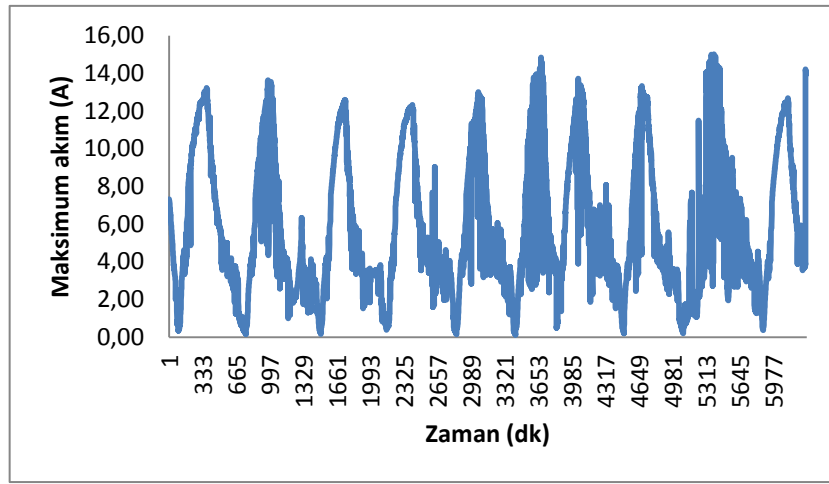
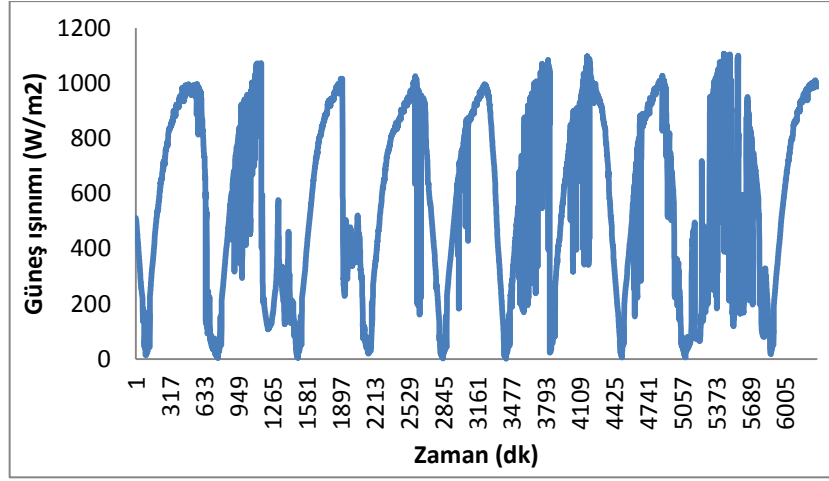


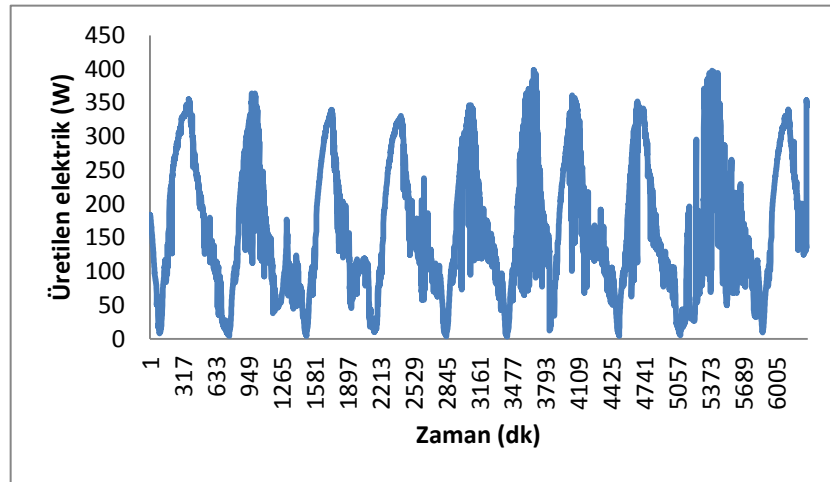
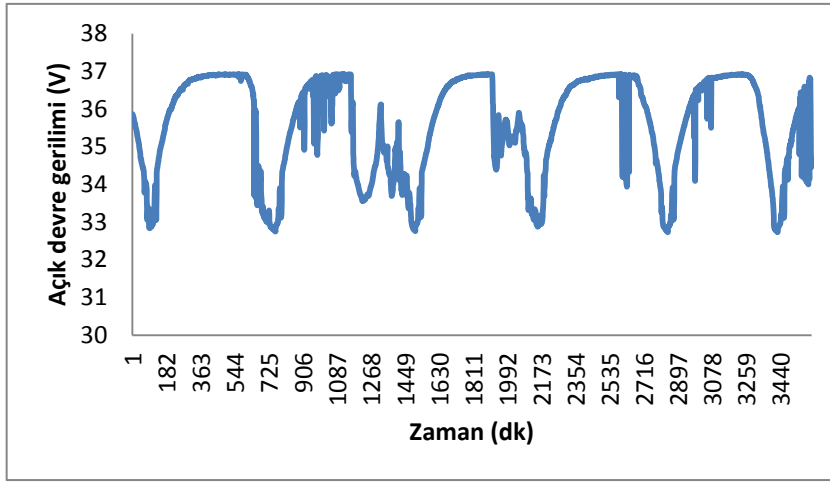
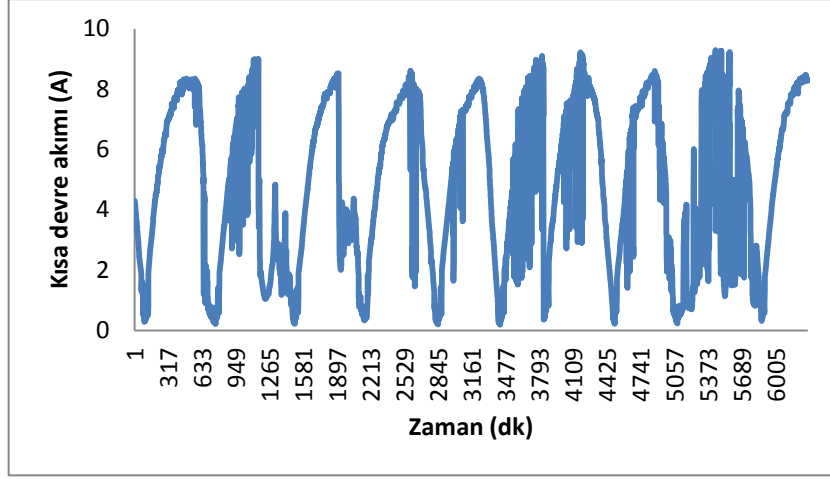


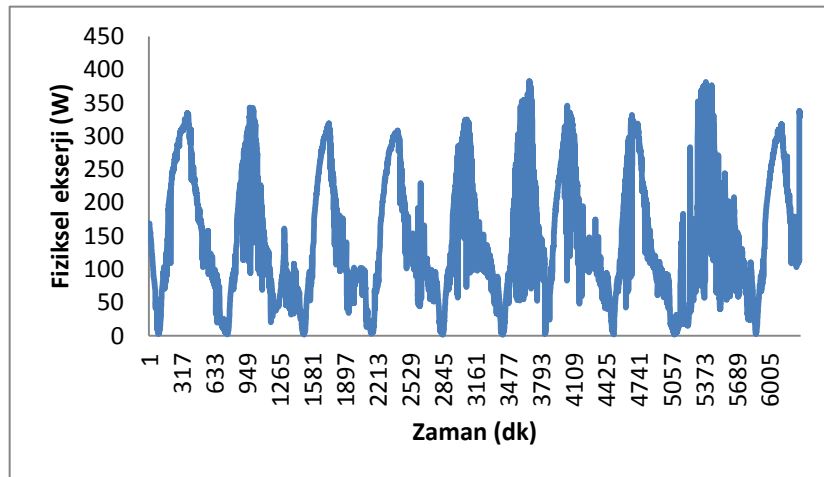
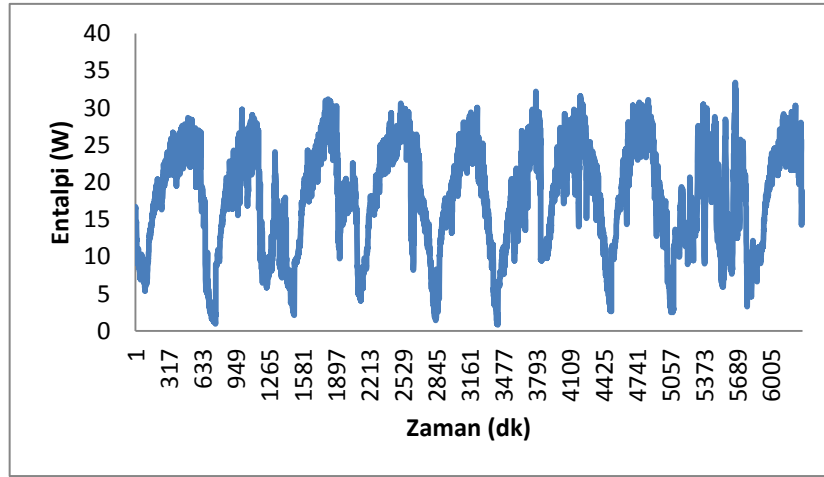
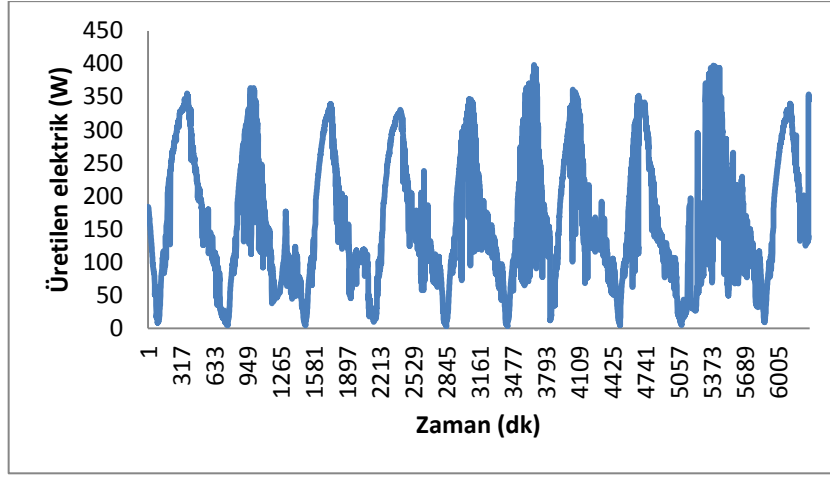


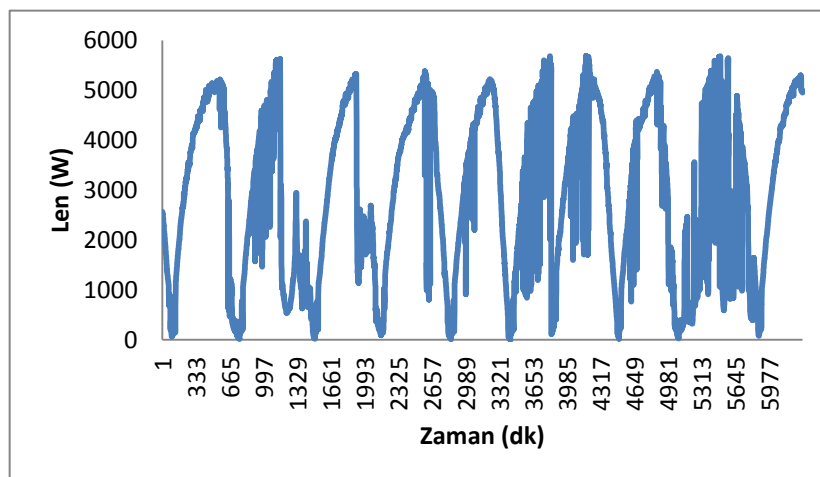
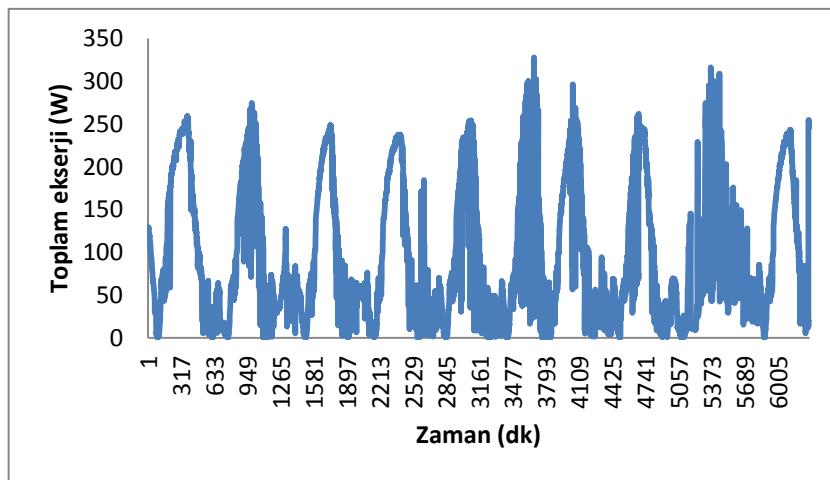
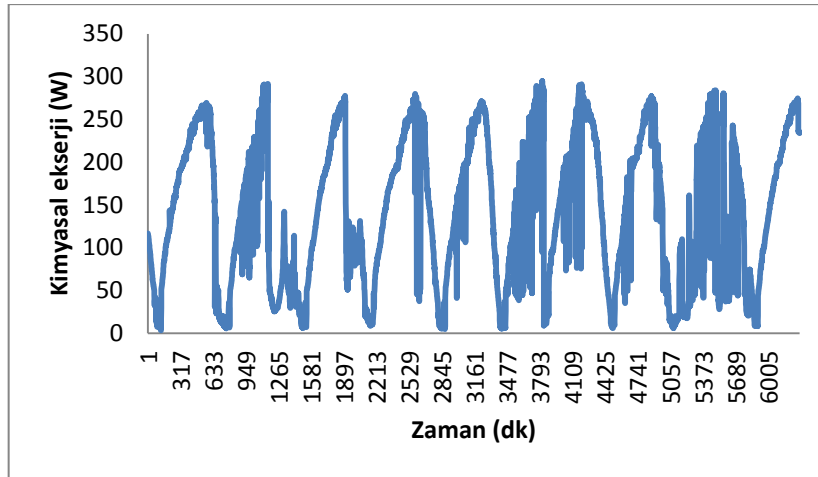
A-2 PV Güneş Sisteminin Eksergoekonomik Analizi

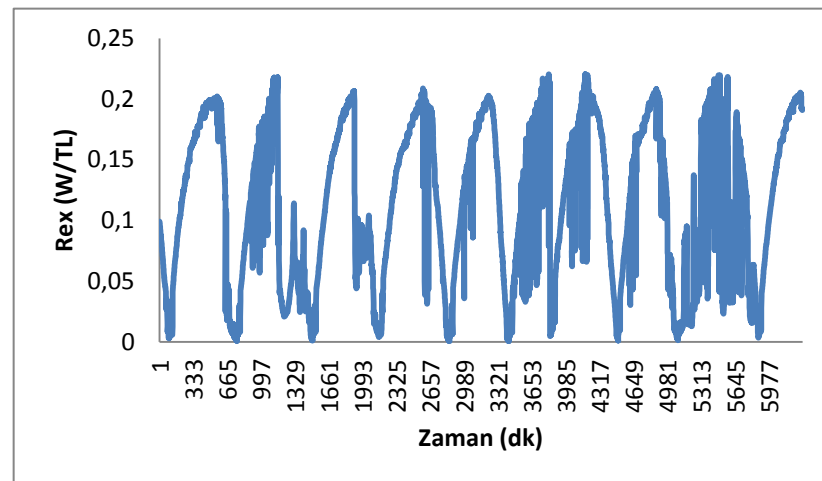
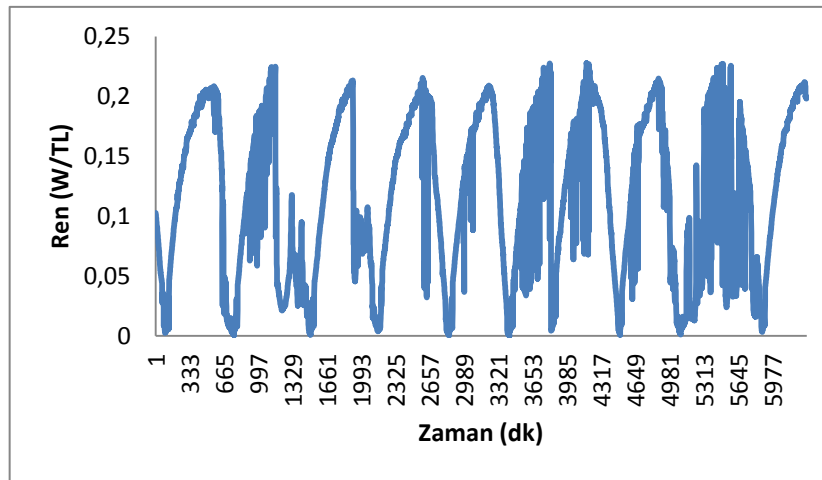
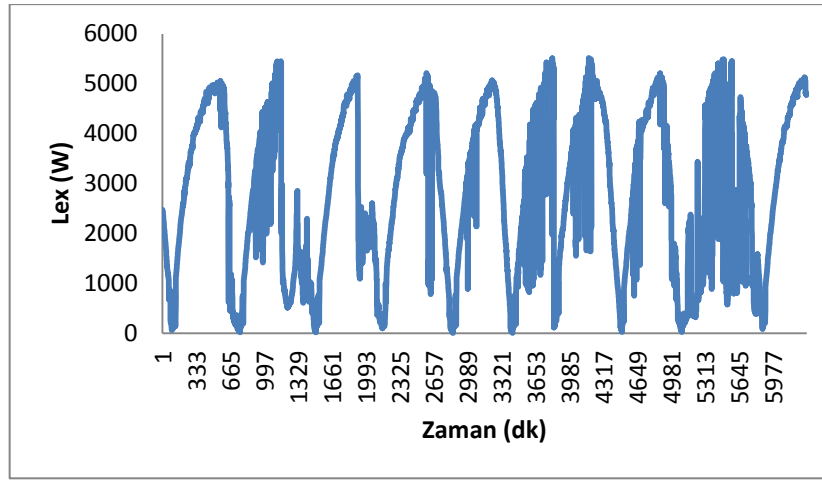


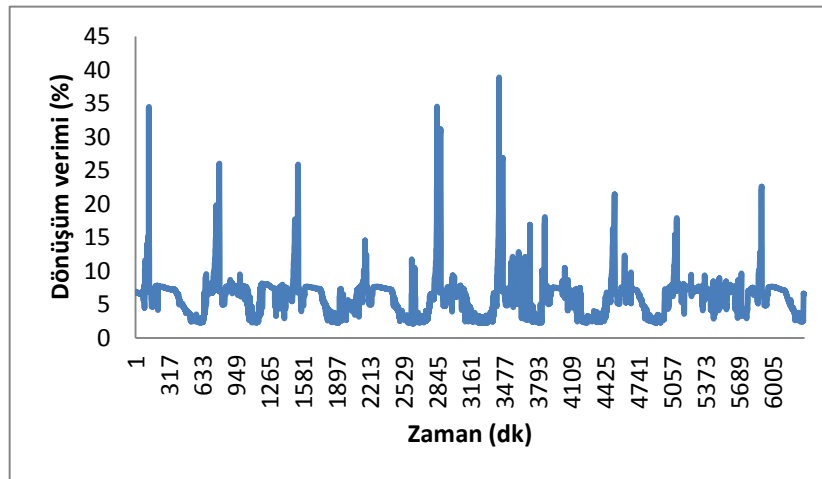
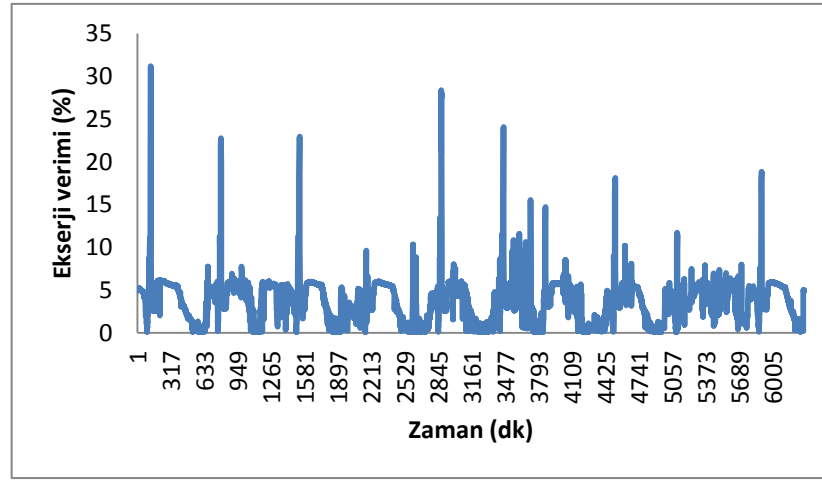
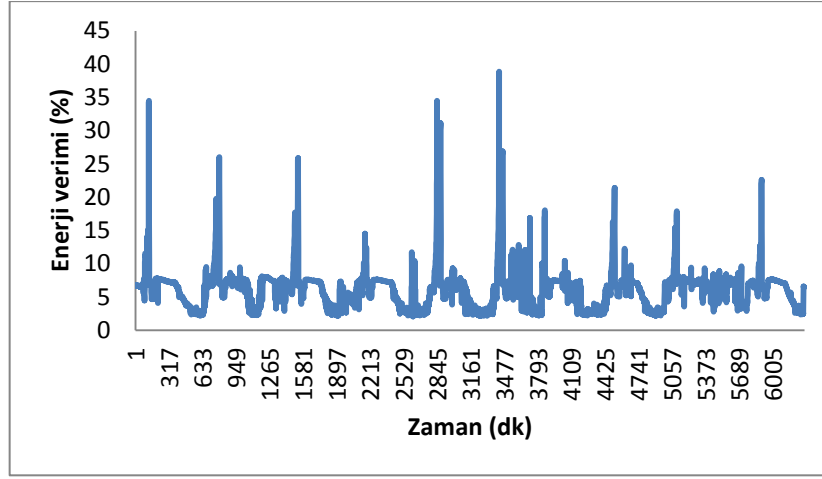


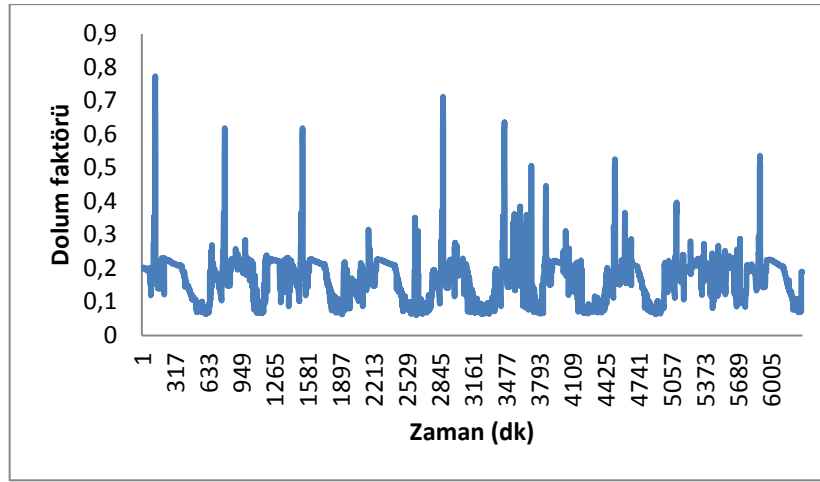




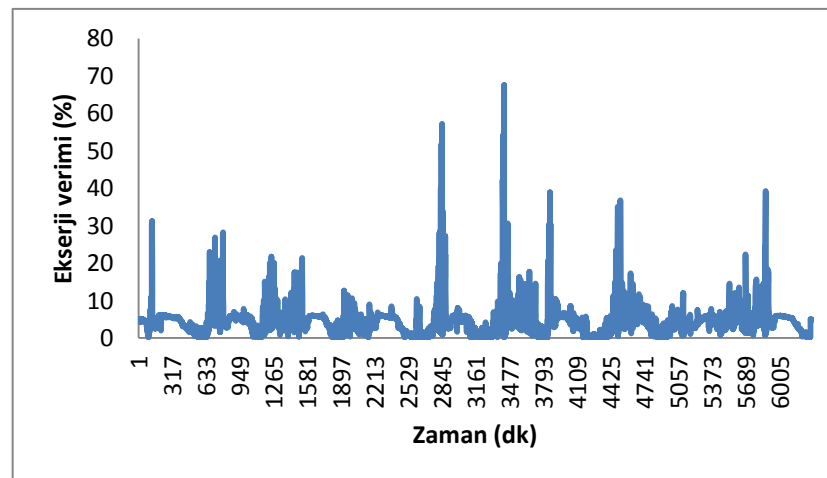
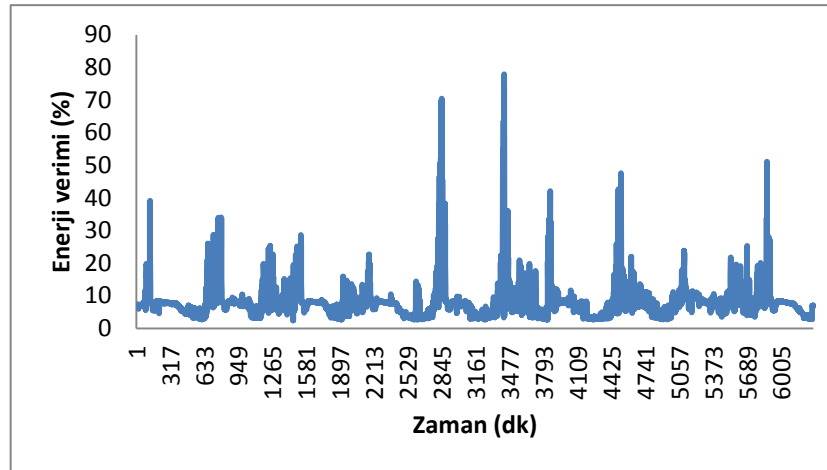


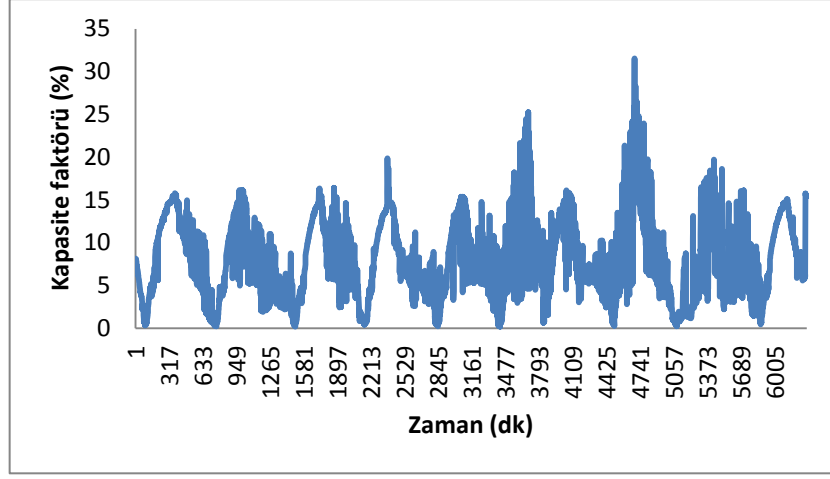






A-3 Hibrit Sisteminin Eksergoekonomik Analizi





ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Yunus Emre AKKAYA
Doğum Tarihi ve Yeri :14.09.1985 K.Maraş
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :yunusemreakkaya@gmail.com, akkayaxx@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Tek Üniv.	2011
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Tek. Üniv.	2009
Lise	Fen B.	Opet Anadolu Lisesi	2003