

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE
RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ
MELEZ SİSTEMLERİ

KURTULUŞ DEĞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2013

**POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE
RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ
MELEZ SİSTEMLERİ**

**HYBRID SYSTEMS OF PUMPED STORAGE
HYDROPOWER PLANTS AND
WIND TURBINE PLANTS**

KURTULUŞ DEĞER

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2013

“Pompajlı Hidroelektrik Santraller ve Rüzgâr Enerjisi Santralleri Melez Sistemleri” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 29/01/2013 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan-Danışman :
Prof. Dr. Birol KILKIŞ

2. Danışman :
Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Levent ÇOLAK

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Özgür EROL

Üye :
Öğr. Gör. Dr. Volkan ÇEÇEN

ONAY

..../02/2013

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZ

POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ MELEZ SİSTEMLERİ

Kurtuluş DEĞER

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez çalışması kapsamında pompajlı hidroelektrik santraller ve rüzgâr enerjisi santralleri incelenmiş olup bu ikisinden oluşan hipotetik bir melez sistem modeli parametrik olarak analiz edilmiştir. Sistemin birinci amacı rüzgâr enerjisi santralinde üretilen gücün depolama yolu ile puant talep zaman aralıklarına kaydırılması ve böylelikle şebekeye dâhil olabilme düzeyinde artış sağlanmasıdır. İkinci amaç değişken güç çıkışına sahip rüzgâr santralinden, daha kararlı güç çıkışı elde edilmesidir. Melez sistemin bu iki amaç çerçevesinde, puant yük stratejisi altında 1 yıllık işletme benzetimi yapılmıştır. Rüzgâr santralinin 1 yıllık güç çıkış değerleri hesaplanmış ve benzetimde bu veriler kullanılmıştır. Döngü süresi 1 saat olarak seçilmiştir. Ayrıca aynı güç çıkışı verileri ve talep stratejisi ile sadece rüzgâr santrali işletmesi benzetimi de yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sadece rüzgâr santrali olması durumunda yıllık 6.350,30 MWh elektrik enerjisi şebekeye verilmekte, melez sistem için bu değer 7.656,00 MWh olmakta ve bu ise yaklaşık %17,05 oranında artış sağlandığını ve sistemin birinci amaç için teknik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Talebin karşılanma durumunu gösteren yıllık kararlı güç çıkışı oranı, sadece rüzgâr enerjisi santrali için yaklaşık %72,49 olurken, melez sistem için yaklaşık %87,40 olmakta ve bu ise %14,91 oranında artış sağlandığını ve ikinci amaç için sistemin teknik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Pompajlı hidroelektrik santraller, rüzgâr enerjisi santralleri, melez sistemler.

Danışman: Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

Eş Danışman: Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

HYBRID SYSTEMS OF PUMPED STORAGE HYDROPOWER PLANTS AND WIND TURBINE PLANTS

Kurtuluş DEĞER

Başkent University Institute of Science

Graduate Program of Energy Engineering

In this thesis, pumped storage type of hydropower plants and wind turbine plants were studied and a hypothetical hybrid system model that consists a combination of these two systems was parametrically analysed. The first aim of the system is to time-shift the power output of the wind turbine plant to peak demand periods by means of storage and thus realizing increase in the penetration level to the grid. Second aim is to obtain more stable power output from the wind turbine plant that has variable power output. A one-year operation simulation of the hybrid system was carried out under peak tariff strategy within the scope of the two aims. One-year power output values of the wind turbine plant was calculated and this data was employed in the simulation. Interval time was selected to be one hour. An operation simulation was also made covering only the wind turbine plant with same power output data and same demand strategy and the results were compared. Without storage wind turbine plant feeds 6.350,30 MWh of electrical energy to the grid, this value increases to 7.656,00 MWh for the hybrid system, this means that there is 17,05% increase and the system is technically applicable for the first aim. Annual stable power output ratio that shows the fulfilment of demand is approximately 72,49% for wind turbine plant without storage and this value is approximately 87,40% for the hybrid system. This means that there is 14,91% increase and the system is technically applicable for the second aim.

KEYWORDS: Pumped storage hydropower plants, wind turbine plants, hybrid systems.

Advisor: Prof. Dr. Birol KILKIŞ, Başkent University, Department of Mechanical Engineering.

Co-Advisor: Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent University, Department of Mechanical Engineering.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1 GİRİŞ	1
2 DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ	3
2.1 Dünyada Hidroelektrik Santraller	3
2.2 Dünyada Rüzgâr Enerjisi Santralleri	6
2.3 Türkiye'de Hidroelektrik Santraller	8
2.4 Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Santralleri	9
3 HİDROELEKTRİK ENERJİ VE HİDROELEKTRİK SANTRALLER	12
3.1 Hidroelektrik Enerji	12
3.2 Hidroelektrik Santrallerin Avantajları ve Dezavantajları	12
3.2.1 Hidroelektrik santrallerin avantajları	12
3.2.1.1 Çevresel etkiler	12
3.2.1.2 Devreye girme, devreden çıkma süresi ve güç çıkışı özellikleri	13
3.2.1.3 İşletme maliyetleri	13
3.2.2 Hidroelektrik santrallerin dezavantajları	13
3.2.2.1 İlk yatırım maliyeti, inşaa süresi ve inşaa etkileri	13
3.2.2.2 Meteorolojik koşulların enerji üretimine etkisi	14
3.3 Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması	14
3.3.1 Depolama özelliklerine göre sınıflandırma	14
3.3.1.1 Nehir tipi hidroelektrik santraller	14
3.3.1.2 Barajlı (Depolamalı) hidroelektrik santraller	14
3.3.2 Düşü miktarına göre sınıflandırma	15
3.3.3 İşletme türüne göre sınıflandırma	15
3.3.3.1 Taban yük santralleri	15
3.3.3.2 Puant yük santralleri	15

3.3.4	Kurulu güç ölçeğine göre sınıflandırma.....	16
3.4	Pompajlı Hidroelektrik Santraller	16
3.4.1	Pompajlı hidroelektrik santrallerin kullanım alanları	18
3.4.1.1	<u>Yük seviyelemesi ve arbitraj</u>	18
3.4.1.2	<u>Elektrik şebekesi için yan hizmetler sağlanması</u>	19
3.4.2	Pompajlı hidroelektrik santrallerin kısımları ve kurulum sahaları	19
3.4.2.1	<u>Alt rezervuar</u>	19
3.4.2.2	<u>Üst rezervuar</u>	20
3.4.2.3	<u>Kuvvet tüneli</u>	20
3.4.2.4	<u>Cebri boru veya shaft</u>	20
3.4.2.5	<u>Denge bacası</u>	21
3.4.2.6	<u>Kuyruk suyu tüneli</u>	21
3.4.2.7	<u>Santral binası</u>	21
3.4.2.8	<u>Pompalar ve türbinler</u>	22
4	RÜZGÂR ENERJİSİ VE RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ	23
4.1	Rüzgâr Enerjisi	23
4.2	Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Avantajları ve Dezavantajları	25
4.2.1	Rüzgâr enerjisi santrallerinin avantajları	25
4.2.1.1	<u>İnşa süresi ve kurulu güç kapasite artırımı</u>	25
4.2.1.2	<u>Yakıt ve su ihtiyacı</u>	26
4.2.1.3	<u>Kurulum ve işletme maliyetleri</u>	26
4.2.2	Rüzgâr enerjisi santrallerinin dezavantajları	26
4.2.2.1	<u>Enerji üretiminin değişkenliği</u>	26
4.2.2.2	<u>Elektrik şebekesi üzerinde etki ve güç kalitesi</u>	27
4.2.2.3	<u>Uygulama sahası özel gereklilikleri</u>	27
4.3	Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	27
4.3.1	Dönme eksen tipine göre sınıflandırma	28
4.3.1.1	<u>Yatay eksenli rüzgâr türbinleri</u>	28
4.3.1.2	<u>Düşey eksenli rüzgâr türbinleri</u>	28
4.3.2	Kanat sayısına göre sınıflandırma	29
4.3.2.1	<u>Tek kanatlı rüzgâr türbinleri</u>	29
4.3.2.2	<u>İki kanatlı rüzgâr türbinleri</u>	29
4.3.2.3	<u>Üç kanatlı rüzgâr türbinleri</u>	30

4.3.3	Güç düzeltim sistemine göre sınıflandırma	30
4.3.3.1	<u>Pasif durdurma denetimli rüzgâr türbinleri</u>	30
4.3.3.2	<u>Aktif durdurma denetimli rüzgâr türbinleri</u>	30
4.3.3.3	<u>Kanat eğimi denetimli rüzgâr türbinleri</u>	31
4.3.4	Jeneratör tipine göre sınıflandırma	31
4.3.4.1	<u>Doğru akım jeneratörlü rüzgâr türbinleri</u>	31
4.3.4.2	<u>Senkron jeneratörlü rüzgâr türbinleri</u>	31
4.3.4.3	<u>Asenkron jeneratörlü rüzgâr türbinleri</u>	31
4.3.5	Sabit hızlı veya değişken hızlı olmalarına göre sınıflandırma	32
4.3.5.1	<u>Sabit hızlı rüzgâr türbinleri</u>	32
4.3.5.2	<u>Değişken hızlı rüzgâr türbinleri</u>	32
4.3.6	Güç kapasitelerine göre sınıflandırma	32
4.4	Rüzgâr Türbinlerinin Bileşenleri.....	33
4.5	Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Kurulumu	35
4.5.1	Rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulum sahaları	35
4.5.1.1	<u>Sahaya ait rüzgâr ölçüm verileri</u>	36
4.5.1.2	<u>Şebeke bağlantısı uyumu ve enerji nakil hatlarına mesafe</u>	36
4.5.1.3	<u>Topografya, zemin koşulları ve ulaşım</u>	36
4.5.2	Rüzgâr türbinlerinin yerleşimi.....	37
4.5.3	Rüzgâr enerjisi santrallerinin çevresel etkileri	38
4.5.3.1	<u>Gürültü etkisi</u>	38
4.5.3.2	<u>Görsel etki</u>	39
4.5.3.3	<u>Elektromanyetik alana olan etki</u>	39
4.5.3.4	<u>Kuşlar üzerinde etki</u>	40
5	ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ	41
5.1	Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması	41
5.2	Enerji Depolama Sistemlerinin Kurulum Amaçları ve Faydaları.....	42
5.3	Enerji Depolama Sistemi Teknolojileri	42
5.3.1	Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri	42
5.3.2	Bataryalar	43
5.3.2.1	<u>Kurşun-asit bataryalar</u>	43
5.3.2.2	<u>Nikel-kadmiyum bataryalar</u>	44
5.3.2.3	<u>Nikel-metal hidrür bataryalar</u>	44

5.3.2.4	<u>Lityum-iyon bataryalar</u>	45
5.3.2.5	<u>Sodyum-sülfür bataryalar</u>	45
5.3.3	Akışlı bataryalar	45
5.3.4	Volanlı enerji depolama sistemleri	46
5.3.5	Yakıt pilleri	46
5.3.6	Ultra kapasitörler	47
5.3.7	Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri	47
5.4	Melez Sistem Modeli Kapsamında Enerji Depolama Sistemi Teknolojisi Seçimi	48
6	POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE RÜZGÂR ENERJİSİ	
	SANTRALLERİ MELEZ SİSTEMLERİ	53
6.1	Melez Sistem Kurulum Amaçları	53
6.1.1	Rüzgâr enerjisi santralinin fazla enerjisinin değerlendirilmesi ve şebekeye dâhil olabilme düzeyinde artış sağlanması	53
6.1.2	Rüzgâr enerjisi santralinden kararlı güç çıkışı sağlanması	53
6.2	Melez Sistem Modeli Tasarımı	54
6.2.1	Pompajlı hidroelektrik santral işletme dönemi	54
6.2.2	Pompajlı hidroelektrik santral cebri boru adedi	54
6.2.3	Pompajlı hidroelektrik santral için çift işlevli pompa-türbin ve değişken hızlı jeneratör-motor seçimi	55
6.2.4	Pompaj işlemi için şebekeden enerji kullanımı	55
6.2.5	Şebeke elektrik enerjisi talebi	56
6.2.6	Stokastik model yaklaşımı ve değişkenleri	57
6.2.6.1	<u>Rüzgâr enerjisi santrali güç çıkışı değerleri</u>	57
6.2.6.2	<u>Piyasa elektrik enerjisi birim fiyatları</u>	58
6.3	Melez Sistem Modeli Teknik Özellikleri ve İşletme Benzetimi	58
6.3.1	Rüzgâr enerjisi santrali modeli teknik özellikleri	58
6.3.2	Pompajlı hidroelektrik santral modeli teknik özellikleri	60
6.3.3	Melez sistem modeli teknik özellikleri ve işletme benzetimi stratejisi	60
6.3.4	Melez sistem modeli işletme benzetimi sayısal modeli	63
6.3.5	Sadece rüzgâr enerjisi santrali için işletme benzetimi sayısal modeli	70
7	SONUÇLAR	72

7.1 İşletme Benzetimlerinin Sayısal Sonuçları.....	72
7.2 Duyarlılık Analizi Sayısal Sonuçları	75
KAYNAKLAR LİSTESİ	80
EKLER	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	2009 yılı dünya toplam birincil enerji kaynakları oranları ([2]'den değiştirilerek)	3
Şekil 2.2	2009 yılı dünya elektrik enerjisi üretiminde oranlar, PHES'ler hariç ([2]'den değiştirilerek)	4
Şekil 2.3	1996-2011 yılları arasında RES'lerin küresel birikmiş kurulu güç kapasiteleri ([4]'ten değiştirilerek)	7
Şekil 2.4	2000-2011 yılları arasında Türkiye'de HES'lerin kurulu güç bakımından yıllara göre birikmiş dağılımı ([8]'den değiştirilerek)	9
Şekil 2.5	2000-2011 yılları arasında Türkiye'de RES'lerin kurulu güç bakımından yıllara göre birikmiş dağılımı ([10]'dan değiştirilerek)	10
Şekil 2.6	Türkiye'de işletmede olan RES'lerin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı ([10]'dan değiştirilerek)	11
Şekil 3.1	PHES şematik gösterimi ([13]'ten değiştirilerek)	16
Şekil 3.2	Günlük elektrik enerjisi talep eğrisinde PHES ile yük seviyelemesinin gösterimi ([14]'ten değiştirilerek)	18
Şekil 4.1	Weibull ve Rayleigh olasılık dağılımları ([19]'dan değiştirilerek)	24
Şekil 4.2	Örnek bir rüzgâr türbini güç eğrisi	25
Şekil 5.1	Enerji depolama formuna göre E.D.S. teknolojilerini gösteren şema	41
Şekil 5.2	E.D.S. çevrim ömrü-verim grafiği ([39]'dan değiştirilerek)	49
Şekil 5.3	E.D.S. teknolojileri nominal güç-deşarj süresi grafiği, kurulu sistemler, 2008 ([40]'tan değiştirilerek)	51
Şekil 5.4	E.D.S. teknolojileri güç-depolanan enerji miktarı-deşarj süresi grafiği ([32]'den değiştirilerek)	52
Şekil 6.1	M.S. modeli temsili şeması	63
Şekil 7.1	$E^{\max} - E_h^a$ grafiği	75
Şekil 7.2	$E^{\max} - E_p^a$ grafiği	76
Şekil 7.3	$E^{\max} - E_{ex}^a$ grafiği	76
Şekil 7.4	$E^{\max} - E_{def}^a$ grafiği	77
Şekil 7.5	$E^{\max} - E_{dg}^a$ grafiği	77
Şekil 7.6	$E^{\max} - \overline{P_{hs}}$ grafiği	78

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	2008 yılı dünya genelinde HES kurulu güç kapasiteleri, PHES dâhil ([2]'den değiştirilerek)	4
Çizelge 2.2	2009 yılı dünya genelinde hidroelektrik kaynaklı elektrik enerjisi üretim miktarları, PHES dâhil ([2]'den değiştirilerek)	5
Çizelge 2.3	2011 yılı (Aralık ayı) dünya genelinde RES birikmiş kurulu güç kapasiteleri ([4]'ten değiştirilerek)	6
Çizelge 2.4	2010 yılı dünya genelinde ülkelerin rüzgâr kaynaklı elektrik enerjisi üretim miktarları ([5]'ten değiştirilerek)	7
Çizelge 2.5	2012 yılı itibari ile Türkiye'de kurulu güç ölçeğine göre (işletmede) ilk 10 HES ([9]'dan değiştirilerek)	9
Çizelge 2.6	2011 yılı itibari ile Türkiye'de kurulu güç ölçeğine göre ilk 10 RES ([10]'dan değiştirilerek)	10
Çizelge 3.1	HES'lerin düşü miktarına göre sınıflandırılması ([11]'den değiştirilerek)	15
Çizelge 3.2	Kurulu güç ölçeğine göre HES'lerin sınıflandırılması ([12]'den değiştirilerek)	16
Çizelge 4.1	Rüzgâr türbini rotor çapı ve güç çıkışı değerine göre sınıflandırma ([23]'ten değiştirilerek)	33
Çizelge 4.2	Çeşitli kaynakların gürültü seviyeleri ([22]'den değiştirilerek)	39
Çizelge 5.1	Dünya genelinde elektrik E.D.S. teknolojisine göre toplam kurulu güç değerleri ([38]'den değiştirilerek)	48
Çizelge 5.2	E.D.S.'lerin çeşitli özelliklere göre karşılaştırılması ([30]'dan değiştirilerek)	51
Çizelge 6.1	Rüzgâr hızı değerleri için rüzgâr türbini güç çıkışı değerleri ([49]'dan değiştirilerek)	59
Çizelge 6.2	RES modeli için teknik özellikler özeti	59
Çizelge 6.3	PHES modeli için teknik özellikler özeti	60
Çizelge 6.4	M.S. modeli için teknik özellikler özeti	62
Çizelge 7.1	M.S. ve sadece RES için yıllık enerji değerleri karşılaştırması	73
Çizelge 7.2	M.S. ve sadece RES için yıllık kararlı güç çıkışı oranları karşılaştırması	74

Çizelge 7.3	$E^{\max}$ değişkeni için yapılan duyarlılık analizi değerleri	79
-------------	--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_T	rüzgâr türbini kanat süpürme alanı (m^2)
c	ölçek parametresi (m/s)
C_p	güç katsayısı
$E(t)$	t süresinde rezervuarda depolanmış enerji miktarı (MWh)
$E(t + 1)$	$(t + 1)$ süresinde rezervuarda depolanmış enerji miktarı (MWh)
$E^{\max}$	üst rezervuar maksimum enerji kapasitesi (MWh)
$E^{\min}$	üst rezervuar minimum enerji kapasitesi (MWh)
E_d^a	şebeke elektrik enerjisi talebi (yıllık) (MWh)
E_{def}^a	elektrik enerjisi talebinin karşılanamayan kısmı (yıllık) (MWh)
E_{dg}^a	şebekeye verilen toplam elektrik enerjisi (yıllık) (MWh)
E_{ex}^a	kullanılamayan elektrik enerjisi (yıllık) (MWh)
E_h^a	PHES'te üretilen elektrik enerjisi (yıllık) (MWh)
E_p^a	PHES pompalarının tükettiği elektrik enerjisi (yıllık) (MWh)
E_v^a	RES'te üretilen elektrik enerjisi (yıllık) (MWh)
E_w^a	şebekeye verilen RES'te üretilen elektrik enerjisi (yıllık) (MWh)
E_1^{in}	üst rezervuar başlangıç depolanmış enerji miktarı (MWh)
$f(v)$	Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu
g	yer çekimi ivmesi (m/s^2)
h_{he}	HES net düşüsü (m)
h_1	v_1 hızının ölçüldüğü yükseklik (m)
h_2	v_2 hızının belirlenmek istendiği yükseklik (m)
k	şekil parametresi
$P_d(t)$	Δt aralığındaki şebeke güç talebi (MW)
$P_{def}(t)$	Δt aralığındaki güç talebinin karşılanamayan kısmı (MW)
$P_{dg}(t)$	Δt aralığındaki şebekeye verilen toplam güç (MW)
$P_{ex}(t)$	Δt aralığındaki kullanılamayan güç (MW)
$P_h(t)$	Δt aralığındaki PHES türbinleri gücü (MW)
$P_h^{\max}$	PHES türbinleri maksimum gücü (MW)
$P_h^{\min}$	PHES türbinleri minimum gücü (MW)
P_{he}	HES gücü (W)

$P_p(t)$	Δt aralığındaki PHES pompaları gücü (MW)
$P_p^{\max}$	PHES pompaları maksimum gücü (MW)
$P_p^{\min}$	PHES pompaları minimum gücü (MW)
$P_v(t)$	Δt aralığındaki RES türbinleri gücü (MW)
$P_v^{\max}$	RES türbinleri maksimum gücü (MW)
$P_v^{\min}$	RES türbinleri minimum gücü (MW)
$P_w(t)$	Δt aralığındaki şebekeye verilen RES gücü (MW)
P_{wt}	rüzgâr türbini gücü (MW)
$\overline{P_{hs}}$	M.S. kararlı güç çıkışı oranı (yıllık) (%)
$\overline{P_{ow}}$	RES kararlı güç çıkışı oranı (yıllık) (%)
Q_{he}	HES debisi (m ³ /s)
t	süre indisi
v	rüzgâr hızı (m/s)
v_m	ortalama rüzgâr hızı (m/s)
v_1	h_1 için ölçülmüş rüzgâr hızı (m/s)
v_2	h_2 için belirlenmek istenen rüzgâr hızı (m/s)
α	Hellman katsayısı
Δt	döngü süresi (saat)
η_c	M.S. izantropik şarj verimi
η_d	M.S. izantropik deşarj verimi
η_{gb}	rüzgâr türbini dişli kutusu verimi
η_{gen}	rüzgâr türbini jeneratör verimi
η_{he}	HES toplam verimi
η_t	M.S. izantropik çevrim verimi
ρ_a	hava yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_w	su yoğunluğu (kg/m ³)

Ç.K E.K.	Çift Katmanlı Elektrokimyasal Kapasitör
E.D.S.	Enerji Depolama Sistemi
HES	Hidroelektrik Santral
M.S.	Melez Sistem
PHES	Pompajlı Hidroelektrik Santral
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali

S.H.E.D.S.	Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemi
S.İ.M.E.D.S.	Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sistemi
V.E.D.S.	Volanlı Enerji Depolama Sistemi
V.R.A.B.	Vanadyum Redoks Akışlı Batarya

1. GİRİŞ

Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi, uygulama alanının iklimi, topografik yapısı gibi özel durumlardan etkilenmekte ve sonuçta üretilen enerji miktarı zaman içinde değişken bir yapı göstermektedir.

Rüzgâr enerjisi santrali (RES); meteorolojik ve iklimsel koşullar sonucu değişebilen rüzgâr hızı ve hava yoğunluğu sebebi ile sürekli olarak aynı miktarda güç çıkışı sağlayamaz ve nihayetinde enerji üretim miktarı zamana bağlı olarak değişir, bu bakımdan talep düzeyi ile uyum sağlayamayan enerji değerlendirilemez; üretilen enerji o zaman dilimindeki talepten düşük ise talep tam olarak karşılanamaz; eğer üretilen enerji talepten fazla ise bu kez değerlendirilemeyen enerji fazlası oluşur. RES'te üretilen enerjinin talep zaman dilimlerine uyum sağlayacak şekilde kaydırılması için enerji depolama sistemi (E.D.S.) çözüm olabilir. Tez kapsamında tasarlanan melez sistem (M.S.) modeli için birinci amaç RES'in fazla enerjisinin değerlendirilmesi ve şebekeye dâhil olabilme düzeyinde artış sağlanmasıdır.

RES'lerde güç çıkışının değişken olması uygun tasarıma sahip olmayan elektrik şebekelerinde sorunlara yol açabilir. Bu bakımdan E.D.S.'ler kararlı güç çıkışı elde edilmesi için çözüm olabilir. Tez kapsamında tasarlanan M.S. modeli için ikinci amaç RES'lerden kararlı güç çıkışı sağlanmasıdır.

E.D.S.'ler; güç çıkış kapasiteleri, çevrim ömürleri, enerji depolama kapasiteleri gibi çeşitli faktörlere göre değerlendirilebilirler. Günümüzde çeşitli olgun E.D.S. teknolojileri mevcuttur; bununla birlikte geliştirilme aşamasında olan E.D.S. teknolojileri de bulunmaktadır.

Bir E.D.S. teknolojisi olan pompalı hidroelektrik santral (PHES) çevrim ömrünün uzun olması, enerji depolama kapasitesinin yüksek seviyede olması, güç çıkış kapasitesinin yüksek seviyede olması, elektrik enerjisi türünde girdi ve çıktıya sahip olması, deşarj süresinin uzun olması gibi sebeplerle RES'ler ile değinilmiş olan amaçlar çerçevesinde M.S. olarak tasarlanabilir.

Tez çalışmasında ikinci bölümde RES'lerin ve hidroelektrik santrallerin (HES) dünyadaki ve Türkiye'deki güncel durumları verilmiştir. Üçüncü bölümde HES'ler; dördüncü bölümde ise RES'ler detaylı olarak incelenmiştir. Beşinci bölümde ise güncel E.D.S. teknolojileri incelenmiş olup, tez çalışmasında seçilen E.D.S. teknolojisi olan PHES'in seçilme gerekçeleri karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır. Altıncı bölümde M.S. modeli kurulum amaçları üzerinde durulmuş, model özellikleri ve işletme benzetimi sayısal modeli detaylı olarak verilmiştir, sistemin teknik olarak, belirlenmiş amaçlar çerçevesinde uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Yedinci bölümde benzetimin sayısal sonuçları ve üst rezervuar maksimum enerji kapasitesi değişkeni ile ilgili duyarlılık analizi sonuçları yer almaktadır. Ekler bölümünde ise benzetime ait akış diyagramı ve yedinci bölümde M.S. için yıllık toplam olarak verilmiş sayısal sonuçların her aya ait saatlik ölçekteki grafikleri verilmiştir.

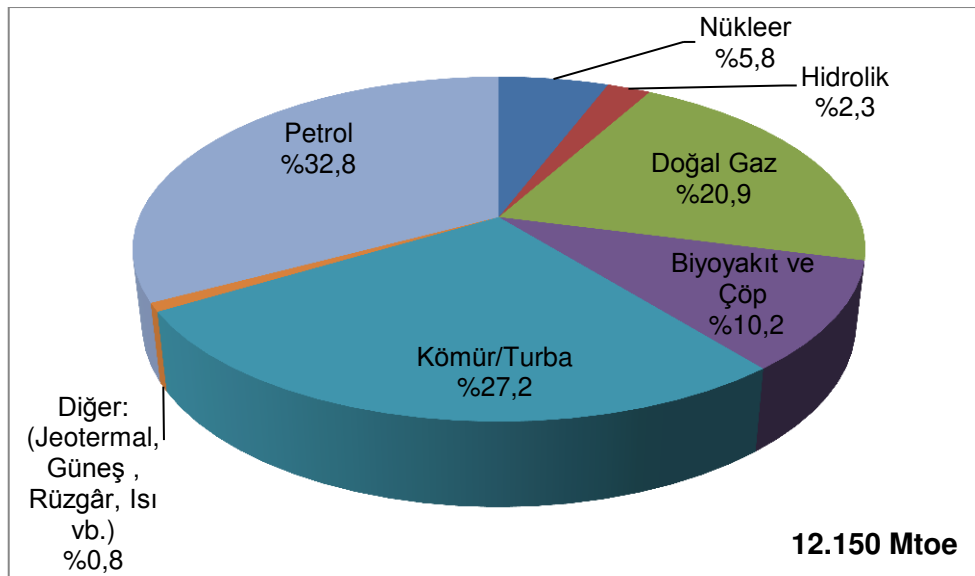
2. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ

2.1 Dünyada Hidroelektrik Santraller

Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik enerjisi üreten sistemler arasında hidrolik kaynaklı santraller yani hidroelektrik; yüksek kapasitede güç çıkışı sağlayabilmesi, olgun olması, depolama özelliği ve güvenilir olması ile günümüzde en yaygın uygulama alanı olan teknolojidir.

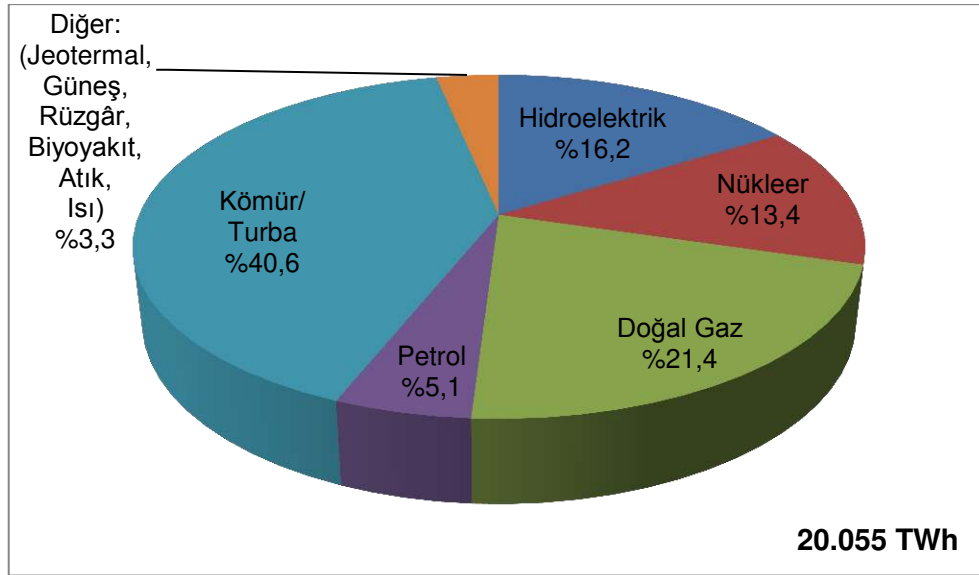
Dünya genelinde hidroelektrik enerji potansiyeli 35.000 TWh/yıl olmakla beraber bunun 14.370 TWh/yıllık bölümü teknik potansiyel, 8.082 TWh/yıllık bölümü teknik ve ekonomik yapılabilir potansiyel olarak değerlendirilmektedir; dünya hidroelektrik enerji potansiyelinin yaklaşık olarak yarısı Asya Kıtası'nda bulunmaktadır [1].

Dünya toplam enerji kaynaklarında 2009 yılı itibari ile hidrolik kaynaklı enerji %2,3 oranında bir paya sahiptir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 2009 yılı dünya toplam birincil enerji kaynakları oranları ([2]'den değiştirilerek).

Dünya toplam elektrik enerjisi kaynaklarında ise 2009 yılı itibari ile hidrolik kaynaklı enerji %16,2 oranında bir paya sahiptir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 2009 yılı dünya elektrik enerjisi üretiminde oranlar, PHES'ler hariç ([2]'den değiştirilerek).

2008 yılı için ülkelerin HES kurulu güç kapasiteleri incelendiğinde Çin, ABD, Brezilya, Kanada, Japonya ve Rusya (Japonya ve Rusya verileri eşittir) ilk 5 sırayı almaktadır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 2008 yılı dünya genelinde HES kurulu güç kapasiteleri, PHES dâhil ([2]'den değiştirilerek).

Ülke	Kurulu Güç (GW)
Çin	168
ABD	100
Brezilya	78
Kanada	75
Japonya	47
Rusya	47
Hindistan	37
Norveç	30
Fransa	25
İtalya	21
Diğer	324
Dünya Toplamı	952

2009 yılı için ülkelerin hidroelektrik kaynaklı enerji üretim miktarlarına bakıldığında Çin, Brezilya, Kanada, ABD ve Rusya ilk 5 sırayı almaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 2009 yılı dünya genelinde hidroelektrik kaynaklı elektrik enerjisi üretim miktarları, PHES dâhil ([2]'den değiştirilerek).

Ülke	Üretim (TWh)
Çin	616
Brezilya	391
Kanada	364
ABD	298
Rusya	176
Norveç	127
Hindistan	107
Venezüella	90
Japonya	82
İsveç	66
Diğer	1.012
Dünya Toplamı	3.329

2011 yılında gerçekleşen yeni kapasite 25 GW olmakla birlikte küresel kapasitenin %2,7 oranında arttığı ve 970 GW olduğu tahmin edilmektedir [3].

PHES'ler için verilere bakıldığında, dünya genelinde 130-140 GW kurulu güçte PHES işletmede olup 2012 yılında bu miktara tahminen 2-3 GW kapasite eklenmiştir, bu kapasitenin önemli bir kısmı Avrupa'da olup 2011 yılı başlarında 45 GW (170 Santral) kurulu güç bulunmaktadır ve tahminen 5,6 GW kapasite 1990-2011 yılları arasında gerçekleştirilmiştir [3].

Bir tahmine göre Avrupa Birliği genelinde 2020 yılında 60 PHES'in (27 GW civarında) faaliyete geçmesi beklenmektedir [3].

2.2 Dünyada Rüzgâr Enerjisi Santralleri

2011 yılı için ülkelerin RES kurulu güç kapasitelerine bakıldığında Çin, ABD, Almanya, İspanya ve Hindistan ilk 5 sırayı almaktadır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3 2011 yılı (Aralık ayı) dünya genelinde RES birikmiş kurulu güç kapasiteleri ([4]'ten değiştirilerek).

Ülke	Kurulu Kapasite (MW)
Çin	62.364
ABD	46.919
Almanya	29.060
İspanya	21.674
Hindistan	16.084
Fransa	6.800 (geçici veri)
İtalya	6.737
İngiltere	6.540
Kanada	5.265
Portekiz	4.083
Diğer Ülkeler	32.143
Dünya Toplamı	237.669

2011 yılında küresel ölçekte tahminen 40 GW rüzgâr gücü kapasitesi işletmeye alınmış ve bir önceki yıla göre %20 artışla 238 GW değerine ulaşmıştır [3].

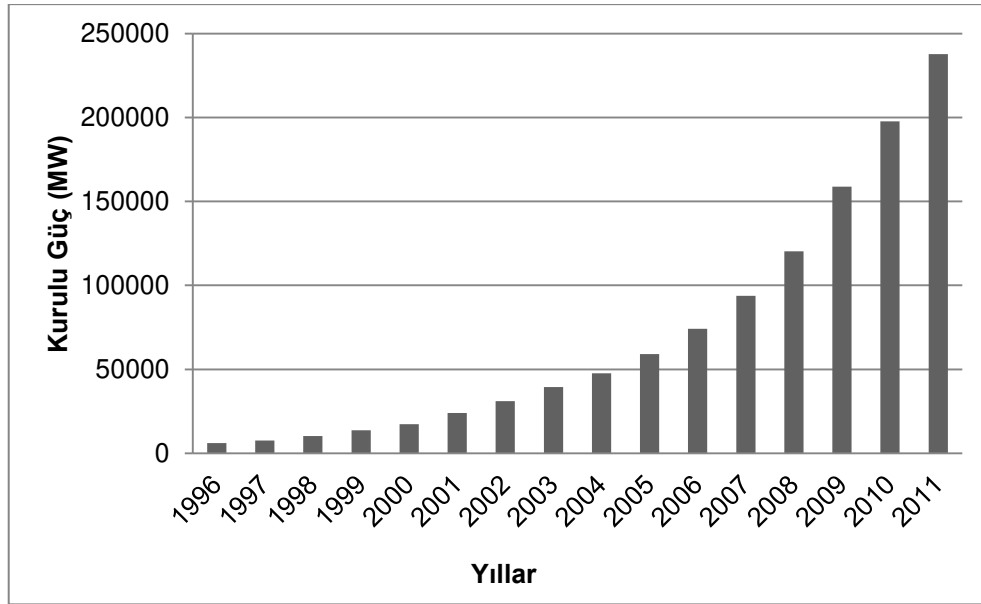
50 kadar ülke 2011 yılında kapasite artışı yapmıştır, en az 68 ülkenin kapasitesi 10 MW seviyesinin üzerinde olup; bunlardan 22 tanesi 1 GW seviyesinin üzerindedir ve ilk 10 ülkenin kapasitesinin toplamı; toplam genel kapasitenin yaklaşık %87'si oranında olmaktadır [3].

2010 yılı için ülkelerin RES enerji üretimi incelendiğinde ABD, Çin, İspanya, Almanya ve Hindistan ilk 5 sırayı almaktadır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 2010 yılı dünya genelinde ülkelerin rüzgâr kaynaklı elektrik enerjisi üretim miktarları ([5]'ten değiştirilerek).

Ülke	Üretim (TWh)
ABD	94,65
Çin	44,62
İspanya	44,17
Almanya	37,79
Hindistan	19,91
İngiltere	10,18
Fransa	9,97
Kanada	9,55
Portekiz	9,18
İtalya	9,13
Diğer Ülkeler	52,38
Dünya Toplamı	341,53

Dünya genelinde 1996-2011 yılları arasında RES kurulu güç miktarları incelendiğinde 1996 yılında 50.000 MW düzeyinin altında olan kurulu güç, 2011 yılı itibari ile 250.000 MW düzeyine yaklaşmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 1996-2011 yılları arasında RES'lerin küresel birikmiş kurulu güç kapasiteleri ([4]'ten değiştirilerek).

Dünya genelinde 2011 yılı sonu itibari ile kurulu tüm rüzgâr türbinleri potansiyel olarak yıllık 500 TWh elektrik enerjisi üretimi sağlayacak olup bu değer küresel elektrik enerjisi tüketiminin %3'üne tekabül etmektedir [6].

2011 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde 9.616 MW ölçeğinde kurulum gerçekleştirilmiştir; kurulu güç oranı %10,5 değerine yükselmiş (93.957 MW), yenilenebilir için toplam kurulu güç oranı ise %31,1 değerine ulaşmıştır [7].

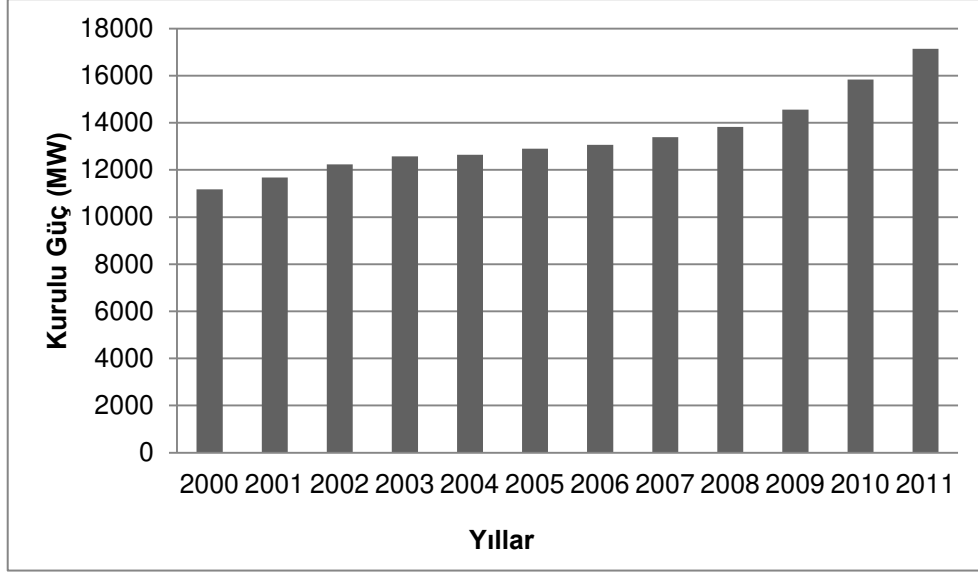
Dünya genelinde hâlihazırda, 2011 yılı sonu itibari ile küresel elektrik enerjisi tüketiminin %2-3 düzeyinde bir oranını karşılayacak ölçekte rüzgâr enerjisi kapasitesi mevcuttur, çeşitli ülkelerin rüzgâr enerjisinden faydalanma durumlarına bakıldığında 2011 yılı itibari ile elektrik enerjisi taleplerinin; Danimarka yaklaşık %26'sını, İspanya %15,9'unu Portekiz %15,6'sını, İrlanda %12'sini, Almanya %7,6'sını, Güney Avustralya %20'sini, ABD %2,9'unu rüzgâr enerjisinden karşılamaktadır [3].

2.3 Türkiye'de Hidroelektrik Santraller

Türkiye'nin brüt hidrolik potansiyeli 430 milyar kWh/yıl, teknik potansiyeli 215 milyar kWh/yıl ve ekonomik olarak kullanılabilir potansiyeli ise 125 milyar kWh/yıl olarak verilmekte olup, 2010 yılı itibari ile işletmede olan 172 HES ortalama 48.000 GWh/yıl üretim potansiyeline sahiptir [1].

Türkiye'nin teorik hidroelektrik potansiyeli dünya potansiyeli içinde %1, ekonomik potansiyeli ise Avrupa potansiyeli içinde %16 mertebesinde. 2000 yılında Türkiye'de işletmedeki HES kurulu gücü 11.000 MW civarında iken 2011 yılında bu değer 17.000 MW değerinin üstüne çıkmıştır (Şekil 2.4).

Atatürk HES 2.400 MW, Karakaya HES 1.800 MW, Keban HES ise 1.330 MW kurulu güç değerleri ile Türkiye'nin sahip olduğu; kurulu güç kapasitesi en yüksek ilk üç HES'tir. Türkiye'deki en büyük 10 HES Çizelge 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4 2000-2011 yılları arasında Türkiye’de HES’lerin kurulu güç bakımından yıllara göre birikmiş dağılımı ([8]’den değiştirilerek).

Çizelge 2.5 2012 yılı itibari ile Türkiye’de kurulu güç ölçeğine göre (işletmede) ilk 10 HES ([9]’den değiştirilerek).

HES Adı	Kurulu Güç (MW)
Atatürk	2.400
Karakaya	1.800
Keban	1.330
Altınkaya	700
Birecik	672
Oymapınar	540
Berke	510
Hasan Uğurlu	500
Sır	283,50
Gökçekaya	278,40

2.4 Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Santralleri

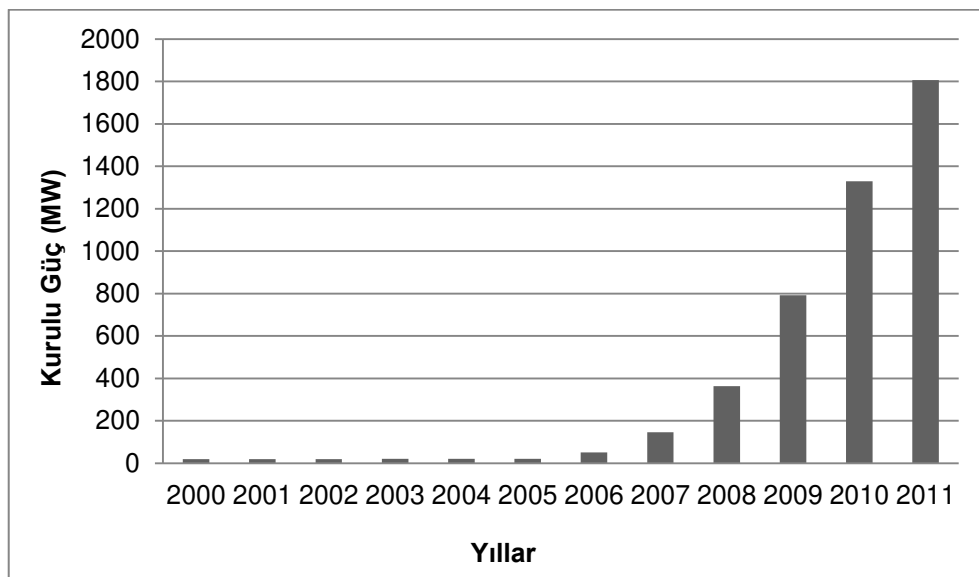
2010 yılı itibari ile birincil kaynak rezervi verilerine göre Türkiye için rüzgâr enerjisi potansiyeli yaklaşık 48.000 MW olmaktadır. 2011 yılı itibari ile Türkiye genelinde işletmede olan RES kurulu güç kapasitesi 1.805,85 MW olup RES kurulu güç değerleri 0,85 MW ve 140,10 MW aralığında değişmektedir, inşa halindeki RES

kapasitesi ise 517,55 MW olmaktadır, bununla birlikte lisanslı RES kurulu gücü ise 5.499,20 MW mertebesinde [10]. Kurulu güç kapasitesine göre ilk 10 RES Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6 2011 yılı itibari ile Türkiye’de kurulu güç ölçeğine göre ilk 10 RES ([10]’dan değiştirilerek).

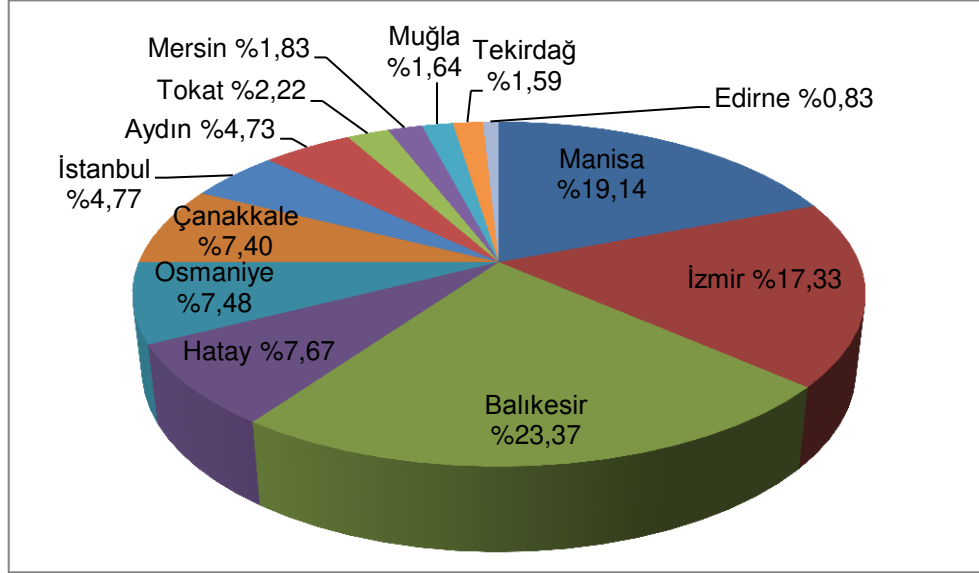
RES Adı	Kurulu Güç (MW)
Soma	140,10
Gökçedağ	135
Şamlı	113,40
Şah	93
Aliağa	90
Soma	90
Bandırma	60
Çatalca	60
Yuntdağ	57,50
Ziyaret	57,50

2000 yılında yaklaşık 19 MW kurulu güç mevcutken, 2011 yılında ise kurulu güç 1.800 MW değeri civarındadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 2000-2011 yılları arasında Türkiye’de RES’lerin kurulu güç bakımından yıllara göre birikmiş dağılımı ([10]’dan değiştirilerek).

2012 yılı itibari ile işletmede olan RES'lerin bölgelere göre dağılımı incelendiğinde Ege Bölgesi 773,70 MW ile %42,84, Marmara Bölgesi 685,65 MW ile %37,97, Akdeniz Bölgesi 306,50 MW ile %16,97 ve Karadeniz Bölgesi 40 MW ile %2,22 oranında kurulu güce sahiptir [10], Şekil 2.6'da illere göre yüzdelik oranlar verilmiştir.



Şekil 2.6 Türkiye’de işletmede olan RES’lerin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı ([10]’dan değiştirilerek).

3. HİDROELEKTRİK ENERJİ VE HİDROELEKTRİK SANTRALLER

3.1 Hidroelektrik Enerji

Yeryüzünde su sürekli bir çevrim halindedir ve bu olay hidrolojik döngü olarak adlandırılır. Hidrolojik döngü temel olarak güneş kaynaklı ısı enerjisi etkisi ile oluşmaktadır. Hidrolojik döngünün özel bir başlama noktası yoktur, yedi ana döngü noktası ile özetlenebilir. Bunlar; buharlaşma, yoğunlaşma, yağış, doğal su depolanması, sızma olayı, yer altı suyu akışı ve yüzey akışı olmaktadır. Hidrolojik döngü suyun yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilmesinin sebebidir. Hidrolojik döngü sonucunda yeryüzündeki su miktarı yaklaşık olarak sabit kalır; bu da hidroelektrik kaynaklı enerji elde edilmesinde ana faktör olan suyun kayba uğramayan bir kaynak olduğunu gösterir.

HES'te güç çıkışı için suyun hareket halinde olması gerekir. Suyun potansiyel enerjisi önce kinetik enerjiye sonra türbinde mekanik enerjiye ardından jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülür. HES'lerde güç çıkışı eşitliği aşağıda verilmiştir (3.1), (P_{he} : HES gücü, η_{he} : HES toplam verimi, ρ_w : su yoğunluğu, g : yer çekimi ivmesi, h_{he} : HES net düşüşü, Q_{he} : HES debisi).

$$P_{he} = \eta_{he} \cdot \rho_w \cdot g \cdot h_{he} \cdot Q_{he} \quad (3.1)$$

3.2 Hidroelektrik Santrallerin Avantajları ve Dezavantajları

3.2.1 Hidroelektrik santrallerin avantajları

3.2.1.1 Çevresel etkiler

Yenilenebilir enerji türü olması sebebi ile enerji üretimi sonucunda meydana gelen çevre kirliliği miktarı düşük seviyededir. Fosil yakıt kullanılmadığından sera gazı salımına sebep olmaz. Gürültü problemi yoktur.

HES rezervuarında depolanan su; sulama, taşkın önleme ve balıkçılık amaçlı kullanılabilir; HES çevresi ise eğlence-dinlenme alanı olarak değerlendirilebilir. Santral 20-40 yıl ekonomik ömre sahiptir ve bu süre 100 yıla kadar ulaşabilir.

HES gövdesinin balık göçü üzerine etkisi olsa da, bu durum balık geçitleri bırakılması ile çözümlenmektedir ayrıca can suyu (ekolojik su ihtiyacı) bırakılması ile akarsuda doğal hayatın devamlılığı sağlanmaktadır.

3.2.1.2 Devreye girme, devreden çıkma süresi ve güç çıkışı özellikleri

Devreye girme ve devreden çıkma süreleri termik santraller ve nükleer santrallere göre kısadır, puant yükün karşılanmasında bu durum fayda sağlar. Depolama olması şartı ile güç çıkışında süreklilik vardır. Günümüzde HES'lerde kullanılan türbinler ile enerji ortalama %90 verimle elektrik enerjisine çevrilir, termik santraller için bu oran daha düşük olup %50 seviyesindedir.

3.2.1.3 İşletme maliyetleri

Yıllık işletme maliyetleri kurulum maliyetinin %1,5-2,5 oranı civarında olmaktadır. HES'lerde fosil yakıt kullanılmaz; böylece petrol, doğalgaz gibi uluslararası piyasa koşullarının etkili olduğu yakıt maliyetleri ve bu yakıtların nakliyesi sebebi ile oluşacak ek maliyetler santralde üretilecek enerji maliyetini etkilemez. Sonuç olarak HES işletme maliyetleri yakıt kullanılan santrallere göre daha düşüktür.

3.2.2 Hidroelektrik santrallerin dezavantajları

3.2.2.1 İlk yatırım maliyeti, inşaat süresi ve inşaat etkileri

HES'lerin ilk yatırım maliyeti yüksektir. Büyük ölçekli bir HES'in inşaatı 5-10 yıl sürebilir. HES'ler genellikle yerleşim alanlarından uzakta inşaat edilirler bu bakımdan daha uzun enerji nakil hatlarına ihtiyaç duyulur ve bu da fazladan enerji kaybına sebep olur. Baraj tipi HES'lerin membaında proje uygulaması sonrasında su altında kalan tarımsal alanlar olabilir.

3.2.2.2 Meteorolojik koşulların enerji üretimine etkisi

Kurak dönemler HES'lerde üretilen enerji miktarını etkiler. Yağış miktarında azalmaya bağlı olarak rezervuarda tutulan su miktarında düşüş meydana gelebilir, bu durum ise üretilen enerji miktarını etkileyebilir.

3.3 Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması

HES'ler; depolama özelliklerine göre, düşü miktarlarına göre, işletme türlerine göre ve kurulu güç ölçeğine göre sınıflandırılabilir.

3.3.1 Depolama özelliklerine göre sınıflandırma

HES'ler depolama özelliklerine göre üç tipte incelenebilir. Nehir tipi HES'ler ve barajlı (depolamalı) HES'ler bu kısımda incelenmiş olup PHES'ler 3.4 kısmında incelenmiştir.

3.3.1.1 Nehir tipi hidroelektrik santraller

Nehirler veya kanallar üzerine kurulurlar. Bu tip HES'lerde depolama yapılmaz; depolama yapılıyorsa depolama kapasitesi çok düşük seviyededir ve bu rezerv aynı gün veya hafta içinde kullanılır. Taban yük santrali olarak tasarlanan nehir tipi HES'ler bu şekilde puant yükü karşılamak için de elverişli olur. Nehir tipi HES'lerin üreteceği enerji miktarı akarsuyun debisine bağlıdır.

3.3.1.2 Barajlı (Depolamalı) hidroelektrik santraller

Baraj yapısı ile akarsuyun getirdiği su rezervuarda depolanır. Böylece su rejiminin depolama için yeterli olduğu bir zamanda depolanan su; su rejiminin yetersiz olduğu bir dönemde de enerji üretme amaçlı kullanılabilir.

Barajlı HES'ler depolama imkânı sayesinde hem taban yük santrali hem de puant yük santrali olarak işletilebilir.

3.3.2 Düşü miktarına göre sınıflandırma

Düşü miktarı HES'lerde güç çıkışı miktarını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca HES için seçilecek türbin tipi için yine düşü miktarı dikkate alınmaktadır. Yüksek düşü için Pelton tipi türbin tercih edilirken orta ve alçak düşüler için Francis veya Kaplan tipi türbin seçilmektedir. Düşü miktarına göre bir HES sınıflandırması Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 HES'lerin düşü miktarına göre sınıflandırılması ([11]'den değiştirilerek).

Düşü Adlandırması	Düşü Miktarı (m)
Alçak Düşülü	<50
Orta Düşülü	50-300
Yüksek Düşülü	≥300

3.3.3 İşletme türüne göre sınıflandırma

3.3.3.1 Taban yük santralleri

Taban yük, elektrik şebekesinde süreklilik arz eden minimum talep olarak tarif edilebilir; yani sürekli karşılanması gerekir. Taban yük santrallerinde süreklilik arz edecek şekilde enerji üretimi yapılır, güç çıkışı ise beyan edilen miktara göre ayarlanır. Barajlı HES'ler taban yük santrali olarak işletilirler, nehir tipi HES'ler de bu grupta değerlendirilebilir ancak nehir tipi HES'lerde güvenilir enerji üretimi akarsuyun debisinin zaman içindeki durumuna bağlıdır.

3.3.3.2 Puant yük santralleri

Puant yük belirli bir zaman aralığında şebekede oluşan en yüksek seviyedeki talebe denir. Puant yük santralleri şebeke puant taleplerini karşılarlar. Santralin depolama olanağı ve devreye girme süresi puant yüke karşılık vermede iki önemli faktördür. Bu bakımdan PHES'ler puant yük santrali olarak işletilirler. Barajlı HES'ler, havuza sahip nehir tipi HES'ler ise ihtiyaca bağlı olarak puant yük santrali olarak işletilebilirler.

3.3.4 Kurulu güç ölçeğine göre sınıflandırma

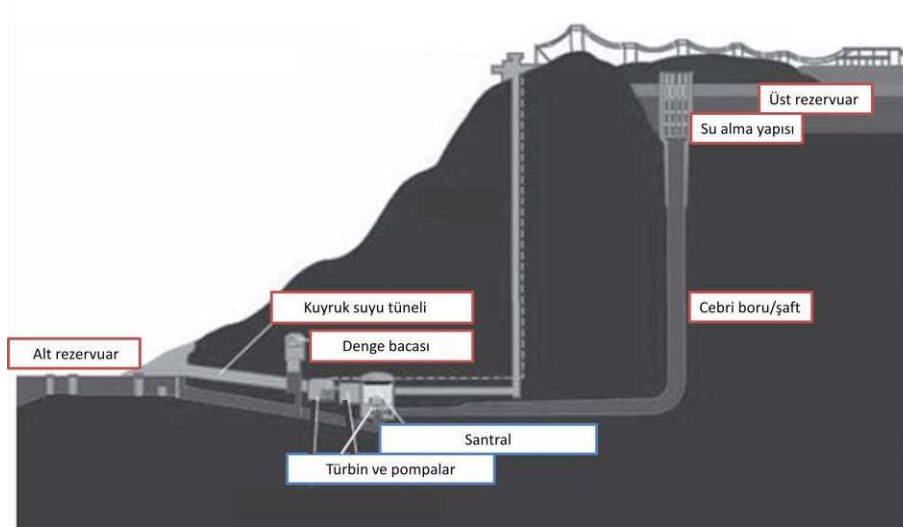
HES'lerin kurulu güç ölçeğine göre sınıflandırılması ülkelere ya da araştırmacılara göre değişmektedir ve sonuç olarak birbirinden farklı sınıflandırmalar bulunmaktadır, örnek bir sınıflandırma Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Kurulu güç ölçeğine göre HES'lerin sınıflandırılması ([12]'den değiştirilerek).

Kapasite Sınıfı	Kurulu Güç (MW)
Mikro Ölçek	$\leq 0,1$
Küçük Ölçek	0,1-30
Büyük Ölçek	>30

3.4 Pompajlı Hidroelektrik Santraller

Günümüzde E.D.S. teknolojileri içinde en yüksek ölçekte enerji depolama olanağına sahip sistem PHES'lerdir. Puant saatler dışında, şebekedeki üretim fazlası elektrik enerjisi kullanılarak alt rezervuardaki su üst rezervuara pompalanır, daha sonra puant talep saatlerinde bu su alt rezervuara bırakılır, kuvvet tüneli ve cebri borudan geçen su santralde türbinlere gelir, türbinler jeneratörleri döndürür ve elektrik enerjisi üretimi gerçekleşir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 PHES şematik gösterimi ([13]'ten değiştirilerek).

Şebeke talebinin düşük olduğu dönemlerde, yüksek kurulu güce sahip nükleer santralleri veya termik santralleri durdurmak ya da bu santrallerin güç çıkışını azaltmak verimli olmamaktadır, PHES'ler bu santrallerde üretilen ancak kullanılmayan enerjinin depolanmasına imkân sağlar.

Barajlı HES'lerde de PHES'ler gibi depolama yapılır. Bu noktada PHES'in barajlı HES'ten farkı; barajlı HES'ler tamamen akarsuyun doğal rejimine bağlı olarak depolama yapar, ancak PHES'ler takvime bağlı işletme olanağı sunar. Rezervuarın doldurulması ve depolanmış suyun kullanımının zamanlanması santral operatörü tarafından planlanır.

Barajlı HES şebekeden enerji kullanamadığı için yük seviyeleme amaçlı kullanılamaz. Barajlı HES'ler çok daha yüksek enerji depolama hacmine ihtiyaç duyar ancak PHES'lerde depolama ve kullanma döngüsü saatlik düzeye kadar ayarlanabildiğinden daha düşük hacimsel kapasiteler yeterli olur, bu durum sistem maliyeti ve çevresel etkiler bakımından olumlu etki sağlar. PHES'ler gerçekte elektrik enerjisi tüketicisidir. PHES bir enerji üretim santralinden ziyade enerji depolama santralidir. PHES'ler 3 tipe ayrılır; bunlar tam PHES, birleşik PHES, yeraltı PHES'idir.

- Tam PHES: Elektrik enerjisi alt rezervuardan pompalanan suyun daha sonra serbest bırakılması ile elde edilir. Burada su kapalı bir döngü içinde hareket eder.
- Birleşik PHES: Elektrik enerjisi hem doğal akarsu akımından; hem de alt rezervuardan pompalanan suyun daha sonra serbest bırakılmasından elde edilir. Üst rezervuar harici kaynaktan beslendiğinden pompaj işlemi olmaksızın konvansiyonel HES'ler gibi enerji üretebilirler.
- Yeraltı PHES: Alt rezervuar zemin kotunun altında inşa edilir, böylece birleşik HES ya da tam PHES'in gerektirdiği özel topografya koşulları aranmaz ve bu bakımdan avantajlıdır, geniş bir uygulama alanı bulmamıştır.

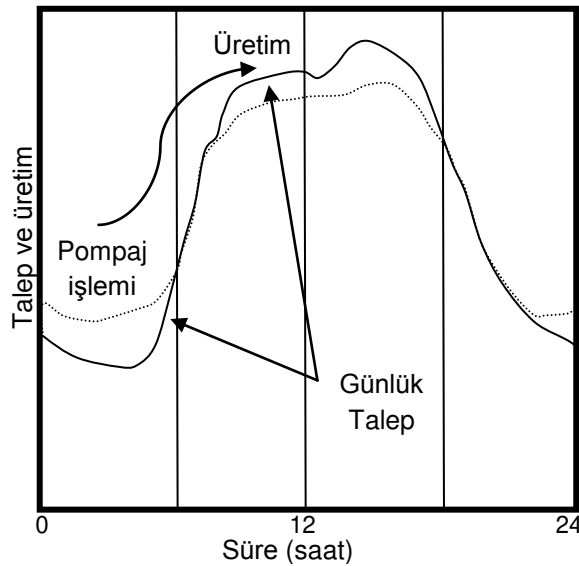
Ayrıca PHES'ler; günlük, aylık ve sezonluk depolama yapılmasına göre de sınıflandırılabilirler.

3.4.1 Pompajlı hidroelektrik santrallerin kullanım alanları

PHES kullanım alanları dört başlıkta incelenebilir. Bu kısımda yük seviyeleme, arbitraj ve elektrik şebekesi için yan hizmetler sağlanması konuları incelenmiş olup; RES'lerin fazla enerjisinin değerlendirilmesi ve şebekeye dâhil olabilme düzeyinde artış sağlanması, RES'lerden kararlı güç çıkışı sağlanması konuları altıncı bölümde verilmiştir.

3.4.1.1 Yük seviyeleme ve arbitraj

Şebeke elektrik enerjisi talebi kısa süreli, saatlik, günlük, haftalık veya sezonluk olarak değişiklik gösterir. Günlük talepte, genellikle 17.00-20.00 saatleri arasında bir puant seviye oluşur, 05.00-06.00 saatleri arasında ise talep azalır, bu aralıklar günlere, haftalara ve mevsimlere göre değişebilir. Arz ve talep dengesinin sürekli korunması önem taşır. PHES'lerde talebin düşük, enerjinin ucuz olduğu saatlerde elektrik enerjisi satın alınır, puant talep saatlerinde ise enerji üretilir (Şekil 3.2), elektrik enerjisi daha yüksek fiyatla satılır, bu işlem arbitraj olarak adlandırılır.



Şekil 3.2 Günlük elektrik enerjisi talep eğrisinde PHES ile yük seviyeleme gösterimi ([14]'ten değiştirilerek).

Dünya genelinde, PHES'ler esas olarak yük seviyelemesi amacı ile kurulur. Puant talebin karşılanabilmesi için santral devreye girme süresinin kısa olması gerekmektedir. PHES soğuk başlatma süresi 1-4 dakika aralığında değişir, pompaj işleminden elektrik enerjisi üretimine geçilmesi 5-30 dakika aralığında değişir, santral başlatma güvenilirlik oranı %99'un üzerindedir [15].

Başlatma ve tam kapasiteye ulaşma süresinin doğal gaz santralleri için ortalama 3 saat, kömürle çalışan termik santraller için ortalama 4 saat ve nükleer santraller için ortalama 5 gün olduğu dikkate alındığında, puant yüke iştirak bakımından PHES'lerin avantajı açıkça görülmektedir.

3.4.1.2 Elektrik şebekesi için yan hizmetler sağlanması

Yan hizmetler, elektrik şebekesinin güvenli biçimde çalışmasının sağlanması için üretim üniteleri ve çeşitli iletim ekipmanları tarafından gerçekleştirilen ek hizmetlere denmektedir. Yan hizmetlerin ekonomik getirisi vardır. Frekans kontrolü, voltaj kontrolü ve reaktif güç kontrolü PHES'ler tarafından sağlanan başlıca yan hizmetlerdir.

3.4.2 Pompajlı hidroelektrik santrallerin kısımları ve kurulum sahaları

3.4.2.1 Alt rezervuar

Alt rezervuar, büyük bir nehir, doğal göl ya da baraj gölü olarak seçilebilir. Alt rezervuar kapasitesi; üst rezervuarın dolum işlemini sağlayabilecek ölçekte olmalıdır.

Denizler alt rezervuar için ikincil bir tercih olarak değerlendirilebilir. Ancak deniz suyunda çözünmüş tuz sebebi ile PHES ekipmanında korozyon meydana gelebilir. Bu sebeple tuz arıtma birimi kurulmalıdır veya suyla temas eden ekipmanlarda korozyona dayanıklı malzeme kullanılmalıdır. Ayrıca üst rezervuarda sızmaya karşı da ek önlemler alınması gerekir ancak bu durum fazladan bir maliyet oluşturur. Japonya'da Okinawa Adası'nda alt rezervuar olarak denizin tercih

edildiği Yanbaru PHES bulunmaktadır; korozyon ve adezyondan (yapışma) korunma amaçlı özel uygulamalara sahip bir tasarımıdır [16].

3.4.2.2 Üst rezervuar

Alt rezervuardan daha yüksek bir kotta inşa edilir. Üst rezervuar topografik olarak uygun bir alanda konumlandırılmalıdır, alt rezervuara göre yeterli üst kotta bulunmak koşulu ile mevcut bir çukurluğun kullanılması, bir vadinin bentle kapatılması ya da düz bir alan kullanılacaksa o alana havuz inşa edilmesi ile oluşturulur. Ani su alçalmasının şev dengesini etkilememesi için geniş yüzeyli ve sığ olarak inşa edilirler. Seçilen alan için önemli olan iki faktör; üretilecek enerjiyi etkilemesi sebebi ile düşü miktarı ve borularda sürtünme sonucu oluşan kayıpları etkilemesi sebebi ile türbin ve jeneratörleri bulunduran santral binasına olan yatay mesafedir. Düşü miktarı için ideal değerler 100 m alt sınırından başlamakla birlikte ortalama 300-600 m aralığı veya daha üstü olmaktadır.

Üst rezervuar kapasitesi PHES optimizasyonu için önemli olmaktadır. PHES'in puant yüke iştirak süresine göre bu hacim seçilir ve diğer yapı kısımlarının boyutlandırılması bu noktadan hareketle ele alınır. PHES için şarj süresi 6-20 saat aralığında seçilmektedir.

3.4.2.3 Kuvvet tüneli

Üst rezervuar ve cebri boru arasında konumlandırılır ve su alma yapısından aldığı suyu cebri boruya iletir. Betonarme olarak imal edilirler. Yüksek basınçlı tünellerde sürtünme kayıplarını önlemek üzere iç yüzey çelik kaplama olarak tasarlanabilir. Üst rezervuar ve santral binası arası tüm mesafeyi yüksek basınçlı çelik cebri borularla geçmek maliyetli olacağından kısmen kuvvet tünelleri kullanılır ve cebri boru uzunluğu en düşük seviyede tutulmuş olur.

3.4.2.4 Cebri boru veya şaft

Cebri borular, kuvvet tüneli ve santral binası arasına konumlandırılan basınçlı borulardır. Yüksek basınçlı olan cebri borular çelik olarak imal edilir. Cebri borular

tasarlanırken zemin altında ya da açıkta konumlandırılabilir. Yersel yük kayıplarının azaltılması için kavis, daralma ve genişleme gibi öğelerden kaçınılır, cebri boru boyu en kısa olacak şekilde tasarım yapılır. Cebri boru boyutlandırılmasında hız, debi, iç basınç, dış basınç ve su darbesi faktörleri dikkate alınır. Su birden çok türbine iletilecekse santral binası girişinde, ünite sayısına göre cebri boru branşmanlara ayrılır.

3.4.2.5 Denge bacası

Denge bacaları, türbinlerin ani kapanması sebebi ile oluşan su darbesinin (su koçu) olumsuz etkisinin önlenmesi için tasarlanan, genelde tek hazneli kule ya da kuyu şeklinde betonarme yapılardır, bununla birlikte orifisli, diferensiyel ve çok hazneli tipleri de bulunmaktadır. Denge bacasının diğer bir işlevi türbin ayarlamasını sağlamaktır.

Denge bacalarının üst kısmı açık ve atmosferle temastadır, denge bacaları üst rezervuar ve alt rezervuar arasında santral binasına en yakın şekilde konumlandırılırlar. Denge bacası zorunlu bir kısım olmayıp PHES tasarım koşullarına bağlı olarak bu kısmın kurulmasına karar verilir.

3.4.2.6 Kuyruk suyu tüneli

Türbinden geçmiş suyun alt rezervuara iletilmesini sağlar. PHES'lerde, alt rezervuardan su alma işlemi için de kullanılır. Betonarme olarak imal edilirler.

3.4.2.7 Santral binası

Pompa-türbinler ve motor-jeneratörler santral binasında yer alır, pompaj işlemi ve enerji üretimi bu binada yapılır. Şalt sahası ve transformatörler santral binasına yakın konumlandırılırlar. Genellikle yer altında inşa edilirler. PHES'lerde üst rezervuar ve alt rezervuar arasında konumlandırılır ve her ikisinden daha düşük kotta inşa edilirler.

3.4.2.8 Pompalar ve türbinler

PHES'lerde ayrı pompalar ve türbinler ya da çift işlevli (reversible) pompa-türbinler tercih edilebilir. Günümüzde PHES'lerde çoğunlukla düşey, çift işlevli, tek kademeli Francis türbinler tercih edilmekle beraber; alçak ve orta düşüler için eksenel akışlı bulb ve diyagonal akışlı Deriaz pompa-türbinler, çok yüksek düşüler için ise çok kademeli pompa ve Pelton türbinleri seçilebilmektedir [17].

Çift işlevli pompa-türbinlerin, pompaj işlemi esnasında aktif güç kontrolüne imkân sağlanması, üretim işleminde kısmi yük altında verim artışı sağlanması, reaktif güç kontrolü sayesinde şebeke dengelemesinde iyileşme sağlanması gibi faydaları vardır [18].

4. RÜZGÂR ENERJİSİ VE RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ

Rüzgâr akımından mekanik enerji, ısı enerjisi ve elektrik enerjisi türlerinde enerji elde edilebilir. Tez çalışmasında, M.S. bileşeni olan RES elektrik enerjisi üretmektedir. Bu bölümde rüzgâr enerjisi ve RES'ler incelenmiştir.

4.1 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi kaynağını güneş enerjisinden alır, güneşten dünya yüzeyindeki karalara veya su kaynaklarına ulaşan enerjinin %1-2 kadar orandaki miktarı atmosfere iletilir ve rüzgâr enerjisine dönüşür.

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji, rüzgâr türbini ile elektrik enerjisine çevrilir. Hareket eden hava molekülleri kinetik enerjiye sahiptir, belirli bir zaman aralığında belirli bir alan içinden geçen moleküllerin miktarı gücü ifade eder [19]. Rüzgâr akımı kanatlardan geçer, döndürücü bir kuvvet uygular, kabin içindeki şaftı döndürür; dişli kutusu içinde dönüş hızı artırılır ve jeneratör için yeterli seviyeye getirilir, mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilir. Rüzgâr türbini gücü için eşitlik aşağıda verilmiştir (4.1), (P_{wt} : rüzgâr türbini gücü, C_p : güç katsayısı, η_{gen} : rüzgâr türbini jeneratör verimi, η_{gb} : rüzgâr türbini dişli kutusu verimi, ρ_a : hava yoğunluğu, A_T : rüzgâr türbini kanat süpürme alanı, v : rüzgâr hızı).

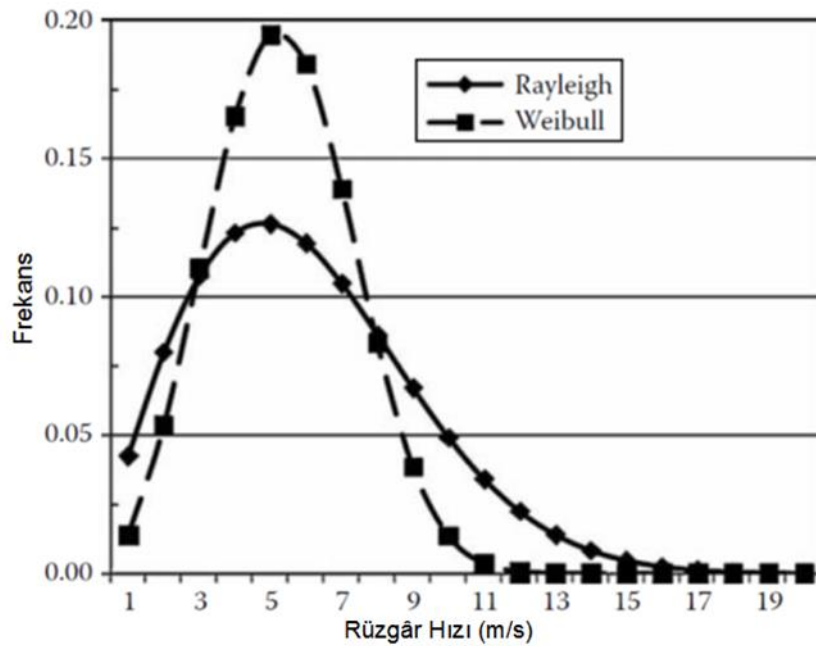
$$P_{wt} = (C_p \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{gb}) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_T \cdot v^3 \cdot 10^{-6} \quad (4.1)$$

Türbinde rüzgâr akımının enerjisinin tümü kullanılamaz, türbin güç çıkışının rüzgâr akımının güç değerine oranı güç katsayısı olarak tanımlanır. Rüzgâr akımındaki kinetik gücün en çok yaklaşık %59,26 kadarı mekanik güce çevrilebilir. Bu değere Betz Limiti denir. Uygulamada rüzgâr türbinleri için $C_p = 0,25$ değerinden başlamakla birlikte, $C_p = 0,4$ üzerindeki değerler iyi sayılır ve bu değer $C_p = 0,5$ değerine kadar ulaşabilir.

Sahaya ait rüzgâr ölçümü verileri yetersizse rüzgârdan elde edilecek enerjinin hesaplamasında istatistiksel dağılımlardan yararlanılır. Belirli bir sahada rüzgâr hızı sürekli sabit değildir; ortalama rüzgâr hızlarına sıklıkla rastlanırken daha yüksek hızlara ise nadiren rastlanır. Rüzgâr hızı frekans dağılımı, sahadan sahaya farklılık göstermekle birlikte bir olasılık dağılımı olan Weibull dağılımı ile örtüşür. Bir rüzgâr frekans dağılımında belirli bir hız değerinin frekansı Weibull dağılım fonksiyonu ile verilir, bu fonksiyon c ve k olmak üzere iki adet ampirik parametreye sahiptir (4.2), $f(v)$: Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu, c : ölçek parametresi, k : şekil parametresi).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} \quad (4.2)$$

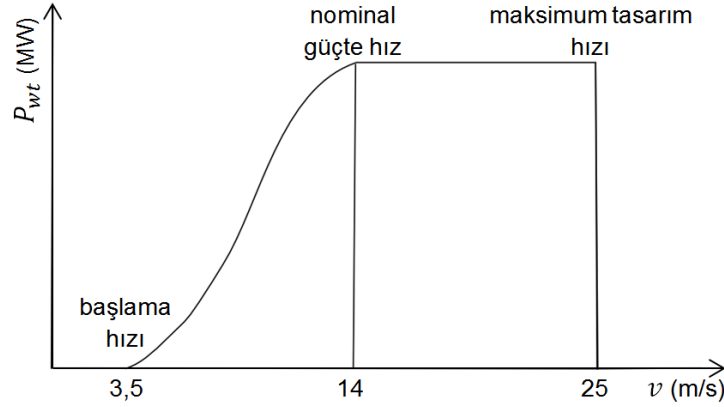
Weibull dağılımında $k = 2$ için oluşan özel dağılıma Rayleigh dağılımı denmektedir (Şekil 4.1), Avrupa ve ABD için sahalarda şekil parametresi değeri 1,8 ve 2,4 aralığında değişmektedir [19].



Şekil 4.1 Weibull ve Rayleigh olasılık dağılımları ([19]'dan değiştirilerek).

Üretilen rüzgâr kaynaklı enerjinin miktarı rüzgâr türbininin karakteristikleri ile de ilgilidir. Rüzgâr türbininin başlama hızı ve maksimum tasarım hızları önemlidir; sonuç olarak seçilen rüzgâr türbini site karakteristiklerine uygun olmalıdır. Rüzgâr

türbini güç eğrisinden (Şekil 4.2) güç çıkışı miktarı belirli bir hız için yaklaşık olarak hesaplanabilir.



Şekil 4.2 Örnek bir rüzgâr türbini güç eğrisi.

Yükseklik değişimi ile oluşacak rüzgâr hızı değişimi rüzgâr türbininden elde edilecek enerjinin miktarının tahmini bakımından önem arz eder. Uygulamada rüzgâr hızı ölçümleri 10-50 m aralığında yapılır; bu değer aralığından daha fazla hub yüksekliğine sahip türbinler için rüzgâr hızlarının hesaplanabilmesi için iki yaklaşım yaygın olarak kullanılır. Bunlar logaritmik profil ve güç profili yaklaşımlarıdır. Güç profili yaklaşımı daha çok tercih edilmektedir (4.3) (v_2 : h_2 için belirlenmek istenen rüzgâr hızı, v_1 : h_1 için ölçülmüş rüzgâr hızı, h_1 : v_1 hızının ölçüldüğü yükseklik, h_2 : v_2 hızının belirlenmek istendiği yükseklik, α : Hellman katsayısı).

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (4.3)$$

4.2 Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Avantajları ve Dezavantajları

4.2.1 Rüzgâr enerjisi santrallerinin avantajları

4.2.1.1 İnşa süresi ve kurulu güç kapasite artırımı

RES'ler çok kısa sürelerde inşa edilebilir ve talebe göre kapasite artırımı kolayca yapılabilir. 10 MW kurulu güçteki bir santral 1-2 ay içinde inşa edilebilir. Genellikle

RES'ler kuruldukları alanların en fazla %2 kadar oranını fiilen kullanır; kalan alanlar tarımsal faaliyetler veya endüstriyel kullanım için uygundur.

4.2.1.2 Yakıt ve su ihtiyacı

RES'ler konvansiyonel enerji santralleri gibi yakıt kullanmaz, enerji kaynağının bulunduğu yere kurulurlar; böylece fosil yakıt hammaddelerinin çıkarılması ve nakliyesi nedeni ile oluşan fazladan maliyetler ve ayrıca bu yakıtların uzun vadedeki fiyat belirsizlikleri gibi sorunlar RES'ler için söz konusu olmamaktadır.

RES'lerde fosil yakıt kullanılmadığından RES'ler, karbondioksit (CO₂), kükürt dioksit (SO₂) gibi sera gazları emisyonları ile çevreye olumsuz etki etmez. RES'lerin çevresel etkileri ile ilgili detay bilgiler 4.5.3 kısmında verilmiştir. Fosil yakıt kullanan enerji santralleri ve nükleer enerji santralleri soğutma işlemi için önemli ölçekte su tüketir, RES'ler ise su tüketimi yapmaz.

4.2.1.3 Kurulum ve işletme maliyetleri

Rüzgâr enerjisinden faydalanma, diğer yenilenebilir enerji türlerine göre daha az maliyetlidir. RES'ler için kurulu güç o santral için ne kadar yüksekse yatırım maliyeti daha düşük olmaktadır [20]. Yakıt kullanımı olmadığından işletme maliyetleri de diğer enerji santrallerine kıyasla düşüktür. Yıllık işletme maliyeti kurulum maliyetinin %2-3 oranı civarında olmaktadır [20].

4.2.2 Rüzgâr enerjisi santrallerinin dezavantajları

4.2.2.1 Enerji üretiminin değişkenliği

Enerji üretimi için önemli olan rüzgâr hızı değişkendir yani zaman içinde sabit değerde bir seyir izlemez, bu bakımdan enerji üretiminde dalgalanmalar oluşur. Bu değişim saniye ve dakika düzeyinde olabildiği gibi günden güne, mevsimden mevsime, yıldan yıla da oluşmaktadır. Sonuç olarak RES'lerin enerji üretim miktarı, yakıtla çalışan konvansiyonel santraller gibi önceden kesin olarak tahmin

edilemez ve kesin verilerle takvime bağlanamaz. Bu bakımdan RES'ler taban yük santrali gibi işletilemez ve talebe bağlı olarak devreye alınma esnekliği sağlamaz.

4.2.2.2 Elektrik şebekesi üzerinde etki ve güç kalitesi

Rüzgâr hızının değişken olmasına bağlı olarak RES güç çıkışı değişken yapıdadır. Bu durum RES'lerin şebeke bağlantı noktalarında bozucu etki yapabilmektedir. Şebeke üzerinde etki, rüzgâr kaynaklı enerjinin şebekeye dâhil olabilme düzeyinin artması ile artabilmektedir. Rüzgâr gücünün zaman içindeki değişken yapısı, kısa süreli frekans sapmalarından uzun süreli dengeleme problemlerine kadar elektrik şebekesi işletmesi üzerinde sorunlara sebep olur ve sonuçta ek kısıtlar ortaya çıkar [21].

Güç kalitesi bakımından; rüzgâr türbinlerinin yerleşimi ve rüzgârın değişken doğası, uzun süreli voltaj değişimleri (düşme, kesinti ve yükselme gibi), geçici voltaj değişimleri (kırpışma), harmonikler, frekans değişimleri ve çeşitli diğer problemlere yol açabilir [21].

4.2.2.3 Uygulama sahası özel gereklilikleri

RES'lerin rüzgâr koşullarının uygun olduğu sahalarda kurulması gerekir bu bakımdan seçilecek saha doğrudan doğal koşullara bağlıdır. Konvansiyonel santrallerde; yakıt kurulum sahasına taşınabilir yani yakıta yakın kurulum gerekmemektedir, ancak RES'ler rüzgâr koşullarının uygun olduğu yerde kurulmak zorundadır.

4.3 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri; dönme eksen tipine göre, kanat sayısına göre, güç düzeltim sistemine göre, jeneratör tipine göre, sabit hızlı ve değişken hızlı olmasına göre ve güç kapasitesine göre altı ana kapsamda sınıflandırılabilir.

Yukarda sayılanlar dışında rüzgâr türbinleri izole konumda olmaları ya da şebekeye bağlı çalışmalarına göre, karada ya da deniz aşırı kurulmalarına göre de ayrıca sınıflandırılabilir.

Rüzgâr türbinleri genel olarak 3-5 m/s rüzgâr hızı aralığında çalışmaya başlar, 11-16 m/s hızlarda nominal kapasiteye ulaşır elektrik enerjisi üretir ve 25-30 m/s rüzgâr hızı civarında çalışmayı durdurur.

4.3.1 Dönme eksen tipine göre sınıflandırma

4.3.1.1 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenli rüzgâr yönüne paraleldir. Kule yüksekliği sayesinde yüksek kesimlerdeki güçlü rüzgâr akımından yararlanma olanağı sağlanır. Jeneratör ve şaft gibi ana parçalar kulenin tepe kısmında bulunur. Türbin verimi yüksektir. Dezavantajları ise tasarım zorluğu, rüzgâra ön taraftan temas eden türbin tipi için yön kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulması ve parçalarının nakliyesinin zor olmasıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgâr alış yönlerine göre ikiye ayrılırlar. Birinci tipte; rotor kulenin ön tarafında rüzgâr akımı yönüne dönüktür, rüzgâr akımı kuleden önce kanatlara temas eder. Rüzgâra türbin arka tarafından temas eden tasarıma göre daha yaygın kullanım alanı bulmuştur. Yönün korunması için yön kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulur. İkinci tipte; rotor kulenin arka tarafında, rüzgâr akımı arkasında kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Yön kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmaması ve rotorun kulenin ön kısmında yer almasından dolayı kanatların türbine çarpması tehlikesinden korunması avantajlarıdır. Dezavantajı ise kanatların her dönüşte kule gölge etkisi sebebi ile türbülans meydana gelen kısımdan geçmesi ile kanatlarda oluşabilecek yorulma ve gürültü problemidir.

4.3.1.2 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri düşey olup kanatlar düşey bir şafta bağlanmıştır. Savonius ve Darrieus ve H-Rotor tipleri vardır. Darrieus tipi diğerlerine göre daha yaygındır. Rüzgârı her yönden alabilmeleri yani tüm yönlü tasarım; dişli kutusu, rotor gibi

bileşenlerin zemine yakın konumlandırılabilmesi ve bu bileşenleri taşıyıcı özellikte bir kuleye ihtiyaç duyulmaması avantajlarıdır. Dezavantajları ise, düşük kanat uç hızı, Darrieus tipinde türbin hareketinin kendiliğinden başlayamaması ve ek mekanizma gerektirmesi, sistem toplam veriminin yatay eksenli türbinlere göre düşük olmasıdır. Günümüzde yaygın bir kullanım alanı bulunmamaktadır.

4.3.2 Kanat sayısına göre sınıflandırma

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kanat sayısındaki artış, torku artırırken, rotor dönüş hızını düşürür. RES'lerde enerji çıktısı elektrik enerjisi olduğundan dönüş hızının yüksek olması gerekmektedir. Bir veya iki kanada sahip türbinler denge problemlerine neden olduğundan günümüzde en çok üç kanatlı tasarımlar tercih edilmektedir.

Üç adetten daha fazla kanat genellikle geçmişte rüzgâr değirmenlerinde kullanılmıştır, fazla kanat adedi daha yüksek başlatma torku ve düşük hızda çalışma anlamına gelmektedir [22]. Bahsedilen rüzgâr değirmenleri tez konusu kapsamı dışındadır.

4.3.2.1 Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Kanat sayısı nedeni ile ağırlık bakımından avantajlı olarak algılansa da, tek kanatın karşı ağırlıkla dengelenmesi gerekir. Kanat uç hızı yüksek olduğundan gürültü seviyesi yüksektir. Üç kanatlı rüzgâr türbinine kıyasla %15 daha az güç çıkışına sahiptir [20].

4.3.2.2 İki kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı modellerle aynı miktarda enerji üretimi için daha çok sayıda dönüş yapması gerekir. Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi kanat uç hızı yüksek olduğundan gürültü seviyesi yüksektir. Üç kanatlı rüzgâr türbinine kıyasla %5 daha az güç çıkışına sahiptir [20].

4.3.2.3 Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Danimarka konsepti olarak da adlandırılır. Bu model rüzgârı türbin ön tarafından alır, asenkron jeneratöre sahiptir. Günümüzde en fazla oranda uygulama sahası bulan bu rüzgâr türbini endüstri standardı haline gelmiştir. İki kanatlı rüzgâr türbinine kıyasla daha düzgün güç çıkışına ve dengeli jirooskopik kuvvete sahiptir [22].

4.3.3 Güç düzeltim sistemine göre sınıflandırma

Rüzgâr türbinleri belirlenmiş bir rüzgâr hızı aralığında çalışacak şekilde tasarlanırlar, çok yüksek hızlardaki rüzgâr akımı ile nadiren karşılaşılır bu bakımdan bu hızlar için yapılacak tasarımlar; yüksek maliyetli olduğundan tercih edilmemektedir. Rüzgâr hızı, jeneratör maksimum tasarım hızını aşarsa, türbinin bundan olumsuz etkilenmemesi için kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulur. Bu sistemler güç düzeltim sistemleri olarak adlandırılır.

4.3.3.1 Pasif durdurma denetimli rüzgâr türbinleri

Pasif durdurma denetimli sistemde, rüzgâr hızı nominal değeri aştığında kanat profili tasarım özelliği sayesinde kanadın rüzgârla temas etmeyen yüzeyinde türbülans oluşur ve kaldırma kuvvetinin etkisi azalır; böylece türbin güç çıkışı sınırlandırılmış olur. Sistemin avantajları karmaşık bir kontrol mekanizmasına gerek olmaması ve rotor içinde sisteme özel oynar parçalara ihtiyaç duyulmamasıdır. Ayrıca rüzgâr hızındaki ani artışlarda, kanat eğimi denetimli sistemlerden daha hızlı devreye girerler.

4.3.3.2 Aktif durdurma denetimli rüzgâr türbinleri

Aktif durdurma denetimli sistemde; pasif sistemdeki rüzgâr hızı, nominal değeri aştığında gerçekleşen durdurma durumuna ek olarak kanatların kanat eğimi denetim mekanizması ile hücum açısı artırılarak türbin güç çıkışı üzerinde daha fazla kontrol olanağı sağlanır. Pasif durdurma denetimli sistemler yerini aktif denetimli sistemlere bırakmaktadır.

4.3.3.3 Kanat eğimi denetimli rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbini güç çıkışı düzeltimi için en yaygın kullanılan sistemdir. Kanatların boylam eksenini çevresinde döndürülmesi ve hücum açısının ayarlanması prensibi ile çalışır. Rüzgâr hızı, anma hız değerini aştığında kanatlar boylam eksenini çevresinde döndürülerek rüzgârdan elde edilen güç azaltılır, devreden çıkma rüzgâr hızında ise kanatlar rüzgârdan etkilenmeyecek konuma getirilir. Geçmişte kanatları beraberce kontrol eden sistemler kullanılırken, günümüzde her kanadın ayrı ayrı kontrol edildiği sistemler mevcuttur.

4.3.4 Jeneratör tipine göre sınıflandırma

Rüzgâr türbinlerinde doğru akım, senkron ve asenkron jeneratör tipleri kullanılmaktadır. Günümüzde rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak 50 Hz ve 60 Hz frekansa sahip alternatif akım jeneratörleri kullanılmaktadır.

4.3.4.1 Doğru akım jeneratörlü rüzgâr türbinleri

İzole ve küçük ölçekli sistemlerde kullanım alanı bulmaktadır; batarya şarjı gibi işlemler veya tek bir konutun ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. Bakım masrafları yüksektir. Şebeke ölçekli sistemlerde kullanılmamaktadır.

4.3.4.2 Senkron jeneratörlü rüzgâr türbinleri

Şebekeye bağlı veya bağımsız çalışabilirler. Sabit frekanslı ve sabit hızlı olarak tasarlanırlar. Üç fazlı sargılardan oluşan bir stator ve ayrıca bir rotordan oluşur. Alternatif akım üretirler. Rotoru sargılı ve sürekli mıknatıslı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Avantajı reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duyulmamasıdır.

4.3.4.3 Asenkron jeneratörlü rüzgâr türbinleri

Şebekeye bağlı olarak çalışırlar, bağımsız çalışması için ek ekipmana ihtiyaç duyulur. Günümüzde RES'lerde yaygın tercih edilen jeneratörlerdir. Sincap kafesli ve rotoru sargılı (bilezikli) olmak üzere iki tipi vardır. Alternatif akım üretirler.

Şebekeye doğrudan bağlanabilir, başlatması kolaydır, ani rüzgâr hızı değişimlerine hızlı tepki verirler. Dezavantajı ise reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duyulmasıdır.

4.3.5 Sabit hızlı veya değişken hızlı olmalarına göre sınıflandırma

4.3.5.1 Sabit hızlı rüzgâr türbinleri

Jeneratör şebekeye doğrudan bağlanabilir. Maksimum verim belirli sabit bir hızda elde edilir. Maliyetinin düşük olması avantajıdır. Reaktif güç tüketimi ve güç kalitesinin kontrol zorluğu, güç dalgalanmaları ve şebekede voltaj dalgalanmaları dezavantajlarıdır.

4.3.5.2 Değişken hızlı rüzgâr türbinleri

Jeneratör şebekeye doğrudan bağlı değildir ve güç çeviricisi aracılığı ile bağlanır. Değişen rüzgâr hızına göre rotor hızı kontrolü yapılabilmesine imkân sağlar yani rotor değişen rüzgâr hızında optimum enerji üretimini sağlayacak şekilde değişik hızlarda çalışabilir, enerji elde etme oranı %5-10 aralığında artar. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri ile reaktif güç kontrolü sağlanabilir, güç dalgalanmaları azalır ve güç kalitesinde artış sağlanır. Çalışma esnasında düşük rüzgâr hızlarında rotor hızı da düştüğünden sabit hızlı sistemlere göre daha az akustik gürültü ortaya çıkar. Mekanik yüklerde azalma sağlanır. Dezavantajı maliyetinin yüksek olmasıdır.

4.3.6 Güç kapasitelerine göre sınıflandırma

Rüzgâr türbinleri izole yerleşim birimlerinin ihtiyacını karşılayan 1-50 kW kapasiteli sistemlerden şebeke ölçekli sistemlere kadar çeşitli kapasitelerde tasarlanmaktadır.

Çeşitli kuruluşlar ve araştırmacılar güç çıkışını dikkate alan sınıflandırmalar yapmıştır. Çizelge 4.1'de rotor çapı ve nominal çıkış gücüne göre yapılmış bir sınıflandırma verilmiştir.

Çizelge 4.1 Rüzgâr türbini rotor çapı ve güç çıkışı değerine göre sınıflandırma ([23]'ten değiştirilerek).

Ölçek	Rotor Çapı (m)	Nominal Güç (kW)
Küçük	<12	<40
Orta	12- 45	40-999
Büyük	≥ 46	≥1.000

4.4 Rüzgâr Türbinlerinin Bileşenleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri kabin, rotor, düşük hız şaftı, dişli kutusu, yüksek hız şaftı, jeneratör, transformatör, yön mekanizması, rüzgâr fırıldağı, elektronik kontrol ünitesi, ısıtma ve soğutma sistemleri, kule, anemometre ve fren sistemi bileşenlerinden oluşur.

- Kabin: Dişli kutusu, jeneratör, düşük hız şaftı, yüksek hız şaftı ve fren gibi ana parçaları içerisinde bulundurulur. Genellikle cam elyafı malzemeden imal edilirler. Çevresel etkilere karşı bahsi geçen parçaların korunmasını sağlar. Hacimsel kapasite bakımından teknik personelin çalışmasına elverişli olacak kadar geniş tasarlanabilir. Üretimi fabrikada; montajı ise sahada yapılır.
- Rotor: Rotor kanatları ve hubdan oluşan kısım rotor olarak adlandırılır. Kanatlarda uygulamada kompozit malzeme olan cam elyafı takviyeli malzeme tercih edilmekte olup, günümüzde karbon fiber malzeme ile de üretim yapılmaktadır. Kanatlar rüzgâr akımından elde edilen enerjiyi hub'a transfer eder. Hub düşük hız şaftı tarafında yer alır, kanatların bağlandığı elemandır. Hubda malzeme olarak sünek dökme demir kullanılır. Hub önünde, hubu çevresel etkilerden koruma işlevi gören ve rotor önünde türbülans oluşumunu engelleme görevi de olan burun konisi yer alır.
- Düşük hız şaftı: Tüm rüzgâr türbinlerinde bulunan bir parça olup, ana şaft olarak da adlandırılır. Rotorun dişli kutusuna olan bağlantısını sağlar.

- Dişli kutusu: Düşük hız şaftını yüksek hız şaftına bağlar ve dönüş hızını yükseltir; tork değeri düşerken hız değeri yükselmiş olur. Yüksek dönüş hızı verimli elektrik enerjisi üretimi için gerekli olmaktadır. Güç kayıplarını azaltmak ve yer kazancı sağlamak bakımından planet dişli sistemi tercih edilmektedir. Günümüzde dişli kutusuna sahip olmayan sistemler de geliştirilmiştir ve uygulanmaktadır.
- Yüksek hız şaftı: Jeneratörü döndüren bileşendir. Aerodinamik frenlerin kullanılamadığı durumda ya da bakım sırasında kullanılmak üzere acil durum mekanik frenine sahiptir. Çelik veya kompozit malzemeden üretilmektedir.
- Jeneratör: Şaftın sağladığı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir.
- Transformatör: Üretilen düşük voltajı şebeke ile uyumlu olacak şekilde yüksek voltaja çevirir.
- Yön mekanizması: Rotorun rüzgâr akımı doğrultusu ile uygun konumda tutulmasını sağlayan mekanizmadır. Geçmişte hidrolik sistemler kullanılmış olmakla birlikte günümüzde motorlu sistemler kullanılmaktadır.
- Rüzgâr fırılacağı: Rüzgâr yönünü tayin için kullanılır. Yön kontrol mekanizması, rüzgâr fırılacağının pozisyonunu denetleyen sistem tarafından kontrol edilir.
- Elektronik kontrol ünitesi: Bu ünite sayesinde türbin üzerinde sürekli bir kontrol sağlanır. Sensörler ile türbin başlatma hızında türbini çalıştırır ve kapatma değerinde durdurma işlevine sahiptir. Rüzgâr hızı ve rotor hızı durumunun izlenmesi, titreşim seviyelerinin, sıcaklık değerlerinin, yağ seviyelerinin, yön mekanizmasının kontrolünde ve üretilen elektrik enerjisinin izlenmesinde kullanılır.

- Isıtma ve soğutma sistemleri: Isıtma sistemi, özellikle kış mevsiminde düşük sıcaklık değerlerinde olan dişli kutusundaki yağın ısıtılması için kullanılır. Soğutma sistemi ise jeneratör ve dişli kutusunda açığa çıkan fazla ısı nedeni ile yükselen sıcaklık değerinin düşürülmesi için gereklidir; uygulamada hava soğutmalı ya da su soğutmalı sistemler kullanılmaktadır.
- Kule: Bu bileşen rotor ve kabini taşır. Kule gövdesi; çelik kafes, üç ayaklı ya da konik tüp biçiminde inşa edilir. Betonarme malzeme diğer bir seçenek olmakla birlikte, çelik halat gergili sistemler düşük güç çıkışına sahip türbinler için uygulanmaktadır. Kuleler ağaçlar ve binaların sebep olduğu türbülansdan korunmak ve maksimum güç üretimi için 25-30 m ve üzerinde yüksekliklerde tasarlanırlar. Yapı dinamiği analizi tasarımda önemlidir, özellikle türbülanslı ortamda rüzgâr hızı değişimleri sebebi ile oluşan kule titreşimleri, öz frekans değerleri ve netice yorulma döngüsü tasarımda dikkate alınır. Kule yükseklikleri geçmişten itibaren artmakta olup günümüzde yükseklikler 100 m değerini aşmıştır, bu durum yeni inşa yöntemlerini de beraberinde getirmiştir.
- Anemometre: Rüzgâr hızını ölçmek için kullanılır. Ölçüm değerlerini elektronik kontrol ünitesine iletir.
- Fren sistemi: Rüzgâr türbinlerinde aerodinamik fren ve mekanik fren sistemleri bulunmaktadır. Asıl fren sistemi aerodinamik fren sistemidir. Mekanik fren sistemi bakım gibi durumlar için park freni olarak görev yapar. Mekanik fren sistemi aerodinamik frenlerin çalışmadığı acil durumlarda da devreye sokulabilir.

4.5 Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Kurulumu

4.5.1 Rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulum sahaları

RES yerleşimi belirlenirken amaç o sahada maksimum enerji üretiminin sağlanmasıdır. RES'ler karada veya açık denizde inşa edilirler. Tez konusu M.S. bileşeni olan RES, karada kurulan RES'tir ve bu kapsamda karada kurulan

RES'lerin özellikleri incelenmiştir. Kurulum sahası seçiminde dikkate alınan başlıca faktörler sahaya ait rüzgâr ölçüm verileri, şebeke bağlantısı uyumu ve enerji nakil hatlarına uzaklık, topografya, zemin koşulları ve ulaşım olmaktadır. Çevresel etkiler bu değerlendirmede dikkate alınması gereken bir diğer faktördür ve 4.5.3 kısmında detaylı olarak incelenmiştir.

4.5.1.1 Sahaya ait rüzgâr ölçüm verileri

RES kurulum sahasına ait rüzgâr verilerinin değerlendirilmesi santral uygulanabilirliğinin analizi bakımından ana faktördür. Öncelikli başvuru kaynağı rüzgâr atlasları olup potansiyel sahalar bu atlaslar ile belirlenir. Meteoroloji istasyonları rüzgâr ölçümleri diğer bir kaynaktır. Potansiyel saha belirlendikten sonra daha hassas değerler için anemometre yani rüzgâr hız sensörleri ile sahada; planlanan hub yüksekliği veya gerekli diğer yükseklikler için rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, basınç, nem ve sıcaklık değerleri ölçümü yapılır.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin asıl amacı sahaya ait rüzgâr karakteristiklerinin elde edilmesidir. Bunların başlıcaları haftalık, aylık ve yıllık ortalama rüzgâr hızı değerleri, rüzgâr hızı frekans dağılımı ve rüzgâr gülüdür. Rüzgâr hızı dönemsel değişiklikler gösterdiğinden beş yıldan daha az süreli veriler sahadan elde edilecek enerjinin tahmininde hataya neden olabilir.

4.5.1.2 Şebeke bağlantısı uyumu ve enerji nakil hatlarına mesafe

RES bağlantısı yapılacak şebekenin durumu araştırılmalıdır. Şebekenin bağlantı yapılacak kısmı yeni bir bağlantıya uyum sağlayacak yeterlilikte değilse başka bir bağlantı noktası seçilmeli ya da şebekenin güçlendirilmesi sağlanmalıdır. RES'lerin enerji nakil hatlarına kısa mesafede konumlandırılması tercih edilmektedir.

4.5.1.3 Topografya, zemin koşulları ve ulaşım

Ağaç, bina gibi fiziksel engeller rüzgâr hızını düşürür ayrıca engelin arka tarafında türbülans oluşumuna sebebiyet verebilir. Rüzgâr türbinlerinin sahaya

konumlandırılması tasarlanırken hâkim rüzgâr yönünde ve türbinlerin ön tarafında yer alan engellerden kaçınılır.

Kompleks arazilerde rüzgâr verilerinin elde edilebilmesi için yerinde detaylı ölçüm gerekir. Bu tip sahalarda vadi iç kesimlerinde rüzgâr hızı çevresine göre yüksek olacaktır. Bu etkiye tünel etkisi denir. Eğer türbülans oluşumu yoksa türbin yerleşimi için bu kısımlar uygun olarak tespit edilebilir. Ayrıca tepe etkisi ve yüzey pürüzlülüğü tasarımda dikkate alınan diğer faktörlerdir.

Türbin yerleşim alanında zemin koşulları türbin temel inşası için uygun olmalıdır. Seçilecek RES uygulama sahası, türbin parçaları ve inşaat malzemelerinin taşınabilmesi için ulaşım elverişli olmalı, inşa edilecek yollar taşınacak ağır türbin parçalarını nakledebilecek güvenilirlikte olmalıdır.

4.5.2 Rüzgâr türbinlerinin yerleşimi

Saha seçimi yapıldıktan sonraki aşama olan saha için rüzgâr türbinlerinin seçimi, sayısının belirlenmesi ve yerleşiminin tasarlanması prosedürü micro-siting olarak adlandırılmaktadır.

Türbin seçiminde iki şekilde değerlendirme yapılır; önce rüzgâr türbininin güç eğrisi, yıllık kapasite faktörü ve yıllık kapasite kullanım faktörü kullanılarak yıllık enerji hesabı yapılır ve ikinci olarak, Weibull parametreleri kullanılarak optimum rüzgâr türbininin seçilmesi için birkaç yıllık rüzgâr verisine dayalı güç yoğunluğu hesaplanır, bu iki değerlendirmenin kıyaslanması ile nihai sonuca varılır [24]. Türbinlerin sahada yerleşimi ve bir birine göre konumu üretilen enerji miktarını etkilemektedir.

Türbinler sahada aynı hat üzerine yerleştirilir, birden fazla paralel hat olabilir ancak bu yerleşimde arazinin topografik yapısı da dikkate alınır. Rüzgâr akımı, türbinden geçerken türbülans oluşur bununla birlikte arka arkaya dizilmiş rüzgâr türbinlerinden önde yer alanı, rüzgârdaki enerjinin bir kısmını absorbe etmiş olacağından arkadaki türbine hızı ve enerji seviyesi düşük rüzgâr akımı ulaşır. Bu etkiye kuyruk yeli etkisi denir, kuyruk yeli etkisini azaltmak için türbinler birbirine

uygun mesafede yerleştirilmelidir. Türbin aralıkları ne kadar fazla olursa kuyruk yeli etkisi o ölçüde az olur ancak bu sefer de kablolama için malzeme kullanım miktarı gibi alt yapı ihtiyaçları artar ki bu tercih edilmeyen bir durumdur.

Kuyruk yeli etkisinin miktarı rotorun büyüklüğüne bağlı olup yerleşim aralıkları rotor çapı cinsinden verilir, temel bir kurala göre türbinler rüzgâr akımına dik yönde 5 rotor çapında aralıkla aynı hat üzerine yerleştirilir, eğer birden fazla hat varsa hat aralıkları 7 rotor çapında seçilir [25]. Rüzgâr türbini yerleşiminde minimum aralık değerleri türbin üreticisi tarafından belirlenir, optimum aralık değerlerinin belirlenmesinde ise ayrıca arazinin özellikleri de dikkate alınır.

4.5.3 Rüzgâr enerjisi santrallerinin çevresel etkileri

RES'lerin çevresel etkileri karada veya açık denizde kurulmalarına göre farklılıklar gösterir. Burada karada kurulan RES'lerin çevresel etkilerine değinilmiştir. RES'ler başlıca iki şekilde ekosistemi etkileyebilirler; birincisi doğrudan münferit organizmalar üzerinde etki oluşturmaları iken ikincisi ise habitatın yapısı ve işleyişi üzerinde oluşturacakları etkidir [26]. Gürültü etkisi, görsel etki, elektromanyetik alana olan etki ve kuşlar üzerinde etki olmak üzere dört konu kapsamında RES'lerin çevresel etkilerine değinilmiştir.

4.5.3.1 Gürültü etkisi

Rüzgâr türbinleri temel olarak iki nedenle gürültüye neden olur. Birinci ve asıl neden kanatların hareketi sebebi ile oluşan aerodinamik gürültüdür, diğeri ise dişli kutusu ve jeneratör gibi aksamın hareketleri neticesinde oluşan mekanik gürültüdür. Mekanik gürültü problemine yalıtım malzemelerinin kullanımı ile çözüm sağlanmaktadır. Günümüzde üretilen türbinlerin aerodinamik gürültü seviyeleri ise kanat tasarımında meydana gelen gelişmelerle ve daha düşük rotor dönüş hızına sahip tasarımlarla azaltılmıştır.

Tipik bir 600 kW gücündeki türbin, 50 m mesafede 55 dBA seviyesinde, 250 m mesafede ise 40 dBA seviyesinde gürültü üretir [22]. Çizelge 4.2'de bazı gürültü kaynakları için gürültü seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Çeşitli kaynakların gürültü seviyeleri ([22]'den değiştirilerek).

Gürültü Kaynağı	Gürültü Seviyesi (dBA)
Asma demiryolu (tren)	100
Gürültülü fabrika	90
Cadde (Ortalama)	70
Fabrika (Ortalama)	60
İşyeri (Ortalama)	50
Düşük sesli diyalog	30

Çizelge 4.2'de yer aldığı üzere bir rüzgâr türbini 50 m mesafede, bir fabrikadan daha fazla gürültü üretmez, ancak bu sabit durumdaki gürültü seviyesidir, türbin yön değiştirme esnasında daha yüksek bir seviyede gürültü üretir [22].

4.5.3.2 Görsel etki

Rüzgâr türbinlerinin oluşturduğu görsel etki, RES'in çevresinden görünürlüğünü ifade eder, bu durum nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerin yakınında veya doğal güzelliklere sahip alanlarda kurulacak RES'ler için sorun teşkil edebilir. Kurulum alanının topografik yapısına bağlı olan bu durumun araştırılması için görsel etki zonu değerlendirmesi yapan bilgisayar programları geliştirilmiştir.

RES tasarımında aynı kurulu güç için daha yüksek güce sahip türbin seçmek yolu ile türbin sayısının azaltılması, eş değer türbin seçimi, türbinler için uygun renklerin seçilmesi ve türbinlerin yerleşim noktalarının ara mesafelerinin eşit olması estetik kaygıların giderilmesi için çözüm sağlayabilmektedir.

4.5.3.3 Elektromanyetik alana olan etki

RES'ler; televizyon, radyo yayını ve mobil iletişim sistemlerine ait elektromanyetik dalgaları etkileyebilir. Rüzgâr türbinlerinin kule ve kanat bileşenleri elektromanyetik dalgaları engelleme, yansıtma, dağıtma şeklinde etki edebilir. Türbine ait jeneratör bileşeni ise ürettiği elektromanyetik dalgalar sebebiyle elektromanyetik alana etki edebilir. RES'in alıcı ve verici ünitelere göre konumu, kanatlarda kullanılan malzeme ve elektromanyetik dalgaların atmosferde yayılım özellikleri

elektromanyetik girişim durumu üzerinde etkili olan faktörlerdir. Modern türbin tasarımlarında kanatlarda metal malzeme yerini cam elyafı türü malzemeye bırakmaktadır ve böylece kanatların elektromanyetik alana olan etkisi ortadan kalkmıştır.

4.5.3.4 Kuşlar üzerinde etki

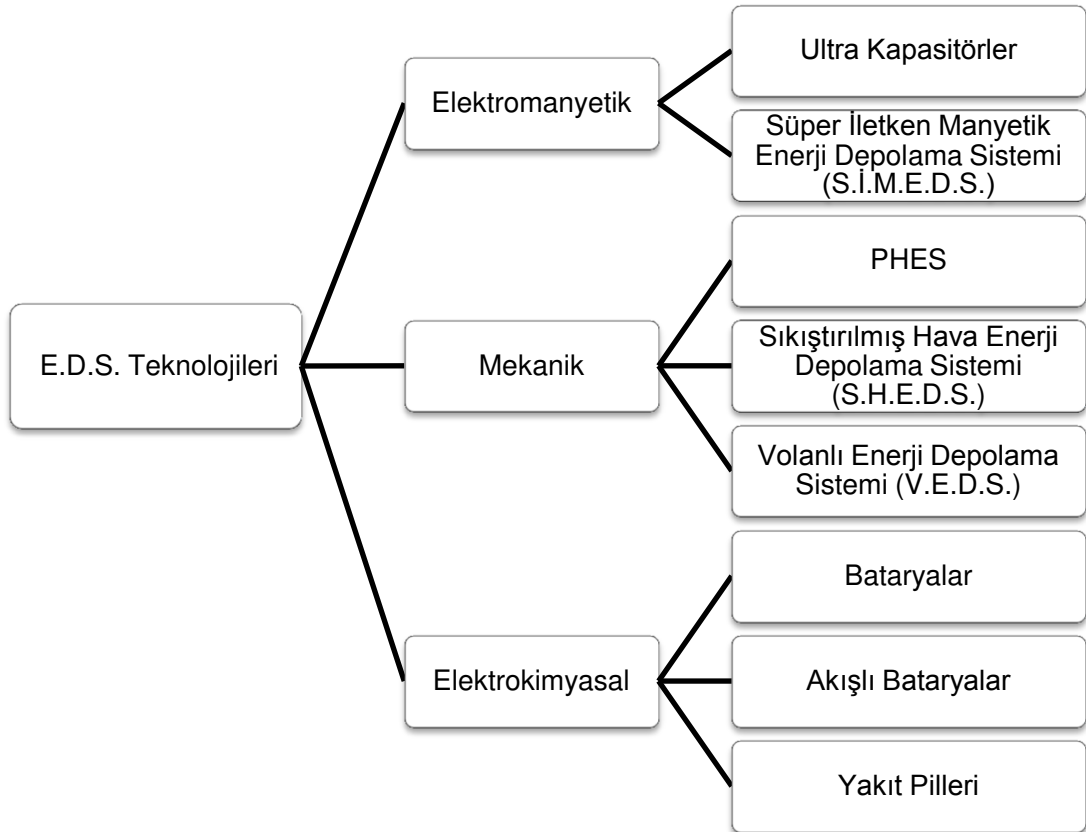
RES'lerin kuşlar üzerinde etkisi; kuşların kuleye ya da türbin kanatlarına çarpması veya kuşların göç güzergâhları üzerinde kurulan RES'lerin habitatı etkilemesi ile olmaktadır. Modern türbinlerin rotor dönüş hızları önceki tasarımlara göre daha düşüktür, bu durum kanatların yakın mesafede görünürlüğü artırır ve kuşların çarpma tehlikesini azaltır. Göçmen kuşların göç güzergâhlarının RES projelendirme aşamasında dikkate alınması ile de kuşlar üzerinde oluşacak etkininin en düşük seviyede tutulması sağlanır.

5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

5.1 Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması

E.D.S.'ler çok farklı teknolojileri bünyesinde barındıran geniş bir sahadır. Tez çalışması kapsamında yer alan RES'te üretilen enerji elektrik enerjisidir, bu bakımdan çıktısı elektrik enerjisi olan E.D.S. teknolojileri incelenmiştir, PHES'ler üçüncü bölümde incelenmiş olup bu bölümde ayrıca karşılaştırma bakımından diğer E.D.S teknolojileri ele alınmıştır.

Elektrik enerjisi; elektromanyetik, mekanik (kinetik, potansiyel) ve elektrokimyasal formlarda depolanabilir. Elektrik enerjisi olarak çıktı özelliğine sahip olmayan ısı ve termokimyasal E.D.S.'ler tez kapsamında incelenmemiştir. Enerji depolama formuna göre sınıflandırmayı gösteren teknolojiler Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Enerji depolama formuna göre E.D.S. teknolojilerini gösteren şema.

5.2 Enerji Depolama Sistemlerinin Kurulum Amaçları ve Faydaları

E.D.S.'lerin kurulumunda belirleyici olan çeşitli faktörler vardır; enerji depolama kapasitesi, güç çıkışı kapasitesi, deşarj süresi, güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, bunlardan bazılarıdır. E.D.S.'lerin kurulumunda bu sayılanlardan bir tanesi belirleyici olabildiği gibi birden çok faktör de belirleyici olabilir. Enerjinin bir sistemde elektrik enerjisi olarak girdisi ve çıktısı; elektrik enerjisinin mekanik enerji ve ısı enerjisi gibi diğer enerji türlerine çevriminin yüksek verimle sağlanabilmesi, iletiminin kolaylığı ve yaygınlığı sebepleri ile tercih edilmektedir.

Tez çalışmasında, M.S. bileşenlerinden olan RES'in çıktısı elektrik enerjisidir bu bakımdan tez çalışması kapsamında elektrik enerjisi girdisi ve çıktısına sahip olan depolama sistemleri incelenmiştir. E.D.S.'lerin çeşitli kurulum amaçları ve faydaları aşağıda verilmiştir [27]:

- Elektrik enerjisi arzının zaman dilimleri arasında kaydırılması.
- Elektrik enerjisi arz kapasitesinin yükseltilmesi.
- Yan hizmetler.
- Elektrik enerjisi ile ilgili hizmetlerin güvenilirliğinin sağlanması ve güç kalitesine katkı sağlanması.
- Yenilenebilir kaynaklı enerji arzının zaman dilimleri arasında kaydırılması.
- Yenilenebilir kaynaklı enerjiden firm enerji sağlanması.
- RES'lerin elektrik şebekesine entegrasyonu.

5.3 Enerji Depolama Sistemi Teknolojileri

5.3.1 Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri

S.H.E.D.S.'lerde; çevredeki serbest hava, şebeke talebinin düşük olduğu veya elektrik enerjisi fiyatının ucuz olduğu saatlerde, yüksek basınçla yer altında tuz yataklarında çözme sureti ile oluşan boşluklarda veya tükenmiş maden yatakları gibi doğal oluşumların uygun hale getirilmesi ile bunların içinde ya da zemin üzerine yerleştirilmiş tanklarda sıkıştırılarak depolanır.

Çevre sıcaklığındaki hava; çeşitli aşamalarda soğutulur ve böylece sıkıştırma verimi arttırılmış olur [28]. Enerji üretimi esnasında bu sıkıştırılmış hava serbest bırakılarak gaz türbinlerinde kullanılır. S.H.E.D.S.'ler temel olarak kompresör, motor/jeneratör, gaz türbini ve depolama birimi olmak üzere dört bileşenden oluşur. Bir gaz türbininde üretilen enerjinin ortalama 2/3'ü, yanma için gereken havayı sıkıştırmak için kompresörlerde kullanılır [29]. S.H.E.D.S.'te yüksek basınçla sıkıştırılmış olan hava kullanılan enerjide tasarruf sağlar. S.H.E.D.S.'ler, PHES'lerden sonra yüksek ölçekli kurulu güç olanağına sahip ikinci E.D.S. teknolojisi olmaktadır. Dünya genelinde ilk S.H.E.D.S. 1978 yılında Almanya Hundorf'ta kurulmuş olup 290 MW kurulu güçtedir, bir diğer S.H.E.D.S. ise 110 MW kurulu güce sahip olup 1991 yılında ABD, McIntosh Alabama'da kurulmuştur. S.H.E.D.S. 10 dakika içinde maksimum güç çıkışı değerine ulaşabilir. Orta yük ve puant yük santrali olarak işletilirler. Uzun zaman dilimlerinde enerji üretimi yapılabilir (10 saat üzeri) [28].

5.3.2 Bataryalar

Bataryalar elektrik enerjisini elektrokimyasal olarak depolarlar. Primer ve sekonder bataryalar olmak üzere iki ana sınıfa ayrılırlar. Primer bataryada kimyasal enerji elektrik enerjisine çevrilir, deşarj bir kez gerçekleşir ve batarya bir daha kullanılamaz. Sekonder bataryalar ise şarj edilebilir; enerji şarj sırasında elektrik enerjisinden kimyasal enerjiye çevrilirken deşarj sırasında bunun tersi gerçekleşir.

Bataryalar; pozitif ve negatif iki adet elektrottan ve elektrolitten oluşur. Batarya için başlıca önemli faktörler; deşarj derinliği, sıcaklık, serideki hücre sayısı, deşarj-şarj kontrolü ve periyodik bakımdır. Tez kapsamında M.S. bileşeni olan E.D.S. için şarj edilebilme koşulu olduğundan sekonder bataryalar uygundur ve en yaygın olan sekonder batarya teknolojilerine değinilmiştir.

5.3.2.1 Kurşun-asit bataryalar

Geçmiş 19. yüzyıla kadar giden [30] ve günümüzde en yaygın kullanım alanı bulan sekonder batarya teknolojisidir. Pozitif elektrotta kurşun oksit, negatif elektrotta kurşun bulunur, elektrolit olarak ise sülfürik asit içerir. Avantajları;

göreceli olarak düşük maliyetli olması, üretiminin kolay olması, kontrollü koşullar altında çevrim ömrünün yüksek olmasıdır [31]. Dezavantajları ise göreceli olarak ağır olması, deşarj süresinin uzun olmamasıdır. Güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu düşüktür.

Batarya içeriğinde bulunan sülfürik asit ve ağır metal olan kurşun çevreye olumsuz etki edebilecek maddelerdir. Motorlu ulaşım araçlarında motoru ilk çalıştırma işlemi (marş), aydınlatma gibi ihtiyaçlar için kullanılmakla birlikte; hibrit ve elektrik enerjisi ile çalışan araçlar diğer kullanım alanlarıdır. Ayrıca kesintisiz güç kaynağı olarak da kullanım alanına sahiptir. Orta-yüksek kapasite aralığında depolama yapma imkânına sahiptir [31].

5.3.2.2 Nikel-kadmiyum bataryalar

Bu bataryalarda pozitif elektrot kadmiyum, negatif elektrot ise nikel hidroksitten oluşur. Elektrolit olarak potasyum hidroksit çözeltisinde bulunurlar. Avantajı sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenmesi, dezavantajları ise hafıza etkisi olması, göreceli olarak enerji yoğunluğunun düşük olması ve çevreye olumsuz etki etme ihtimali olan ağır metal kadmiyum içermesidir. Nikel-kadmiyum bataryalar; taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılmakla birlikte günümüzde yerini diğer sekonder bataryalara bırakmaktadır.

5.3.2.3 Nikel-metal hidrür bataryalar

Bu bataryalar nikel-kadmiyum batarya teknolojisine benzemekle birlikte elektrotlardan birinde kadmiyum yerine metal hidrür bulunur. Avantajları; kadmiyum yerine metal hidrür kullanılması sayesinde çevreye olabilecek olumsuz etkisinin düşük olması, hafıza etkisinin ihmal edilebilecek ölçüde düşük olması ve enerji yoğunluğunun nikel-kadmiyum bataryaya göre yüksek olmasıdır. Dezavantajları ise nikel-kadmiyum bataryalara göre maliyetinin yüksek olması ve yine nikel-kadmiyum bataryaya göre daha yüksek kendiliğinden deşarj oranı olmasıdır. Nikel-metal hidrür bataryalar taşınabilir elektronik cihazlarda ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılır.

5.3.2.4 Lityum-iyon bataryalar

Pozitif elektrotta lityumun hafif bir metal olması sebebi ile kobalt ya da manganez bileşigi, negatif elektrotta ise grafit bulunan batarya teknolojisidir, ayrıca elektrolit olarak ise organik kimyasal içinde çözülmüş lityum tuzları bulunur. Avantajları; hafıza etkisinin bulunmaması, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmesi ve enerji yoğunluğunun yüksek olmasıdır. Dezavantajları ise; fazla şarj edildiğinde oluşabilecek kapasite kaybı ve maliyetinin yüksek olmasıdır. Lityum-iyon bataryalar taşınabilir elektronik cihazlarda kullanılmaktadır.

5.3.2.5 Sodyum-sülfür bataryalar

Pozitif elektrotta sıvı sülfür, negatif elektrotta ise sıvı sodyum bulunur, elektrolit olarak beta alumina seramik kullanılır. İşletme sıcaklığı 300-350 °C aralığındadır [31]. Avantajları enerji yoğunluğunun ve güç yoğunluğunun yüksek olması, maliyetinin düşük olmasıdır. Sodyum-sülfür bataryalar ile yüksek ölçekli depolama yapılabilir, uzay araçlarında uygulama alanı bulmaktadır ve kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılmaktadır.

5.3.3 Akışlı bataryalar

Akışlı bataryalarda, elektrolit klasik bataryalardan farklı olarak harici iki tankta bulundurulur ve buradan reaktör hücrelerine pompalanır, hücrede elektrolitleri ayıran membrandan iyon geçişi ile akım oluşur. Güç çıkışı hücrelerinin ölçeğine; depolanan enerji miktarı ise kullanılan elektrolit miktarına dolayısı ile tank kapasitesine bağlıdır. Başlıca, brom elementinin; çinko (ZnBr), vanadyum, (VBr) ve sodyum (NaBr) bileşikleri ve sodyum polisülfat elektrolit olarak kullanılır [32]. Elektrolit değişimi ile uzun süreli kullanım olanağı sağlanır, devreye girme süresi kısadır, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir, yüksek verimlidir, emisyon yaratmaz. Bunların yanında dezavantajı ise enerji yoğunluğunun düşük olmasıdır.

Akışlı bataryalar ile şebeke ölçeğinde enerji üretimi ve güç çıkışı sağlanabilir, kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılabilir, elektrikli araçlar da kullanıldığı diğer bir sahadır. Günümüzde ticari kullanımı henüz kısıtlıdır.

5.3.4 Volanlı enerji depolama sistemleri

V.E.D.S.'de elektrik enerjisi ile sistem motoru çalıştırılır, motordan aktarılan güçle dönen volan rotorunda kinetik enerji formunda enerji depolanır daha sonra talep halinde bu depolanmış enerji jeneratörde tekrar elektrik enerjisine çevrilir. Şarj sırasında volan hızı artar, deşarj sırasında ise azalır. Depolanabilecek enerji miktarını volanın atalet momenti ve açısal hızı belirler. V.E.D.S.'de depolanabilecek enerji miktarını arttırmak için atalet momenti yerine hızı attırmak; depo edilecek enerji miktarı hızın karesi ile değiştiğinden daha önceliklidir. Bu bakımdan yüksek hıza mukavemet sağlayacak malzemenin kullanılması önemli olmakta ve bu yönde araştırmalar sürdürülmektedir. V.E.D.S.'ler daha önceleri titanyum veya çelik gibi metal malzeme ile imal edilirlerken günümüzde kevlar veya karbon fiber gibi kompozit malzemeden imal edilmektedir ve böylece yüksek devir sayılarına ulaşmaya imkân sağlanmaktadır. Sürtünme kayıplarını azaltmak amacı ile volan rotoru vakum ortamda çalıştırılmaktadır [33], günümüzde mekanik yatakların yerine manyetik yataklar tercih edilmektedir. V.E.D.S.; rotor, motor-jeneratör, yatak, muhafaza ve güç elektroniği sistemi ünitelerinden oluşur. V.E.D.S.'nin karakteristiği yüksek düzeyde güç çıkışı sağlamasıdır. Yüke tepki hızı kısadır, çevrim ömrü, güç yoğunluğu ve sistem verimi yüksektir, çevresel olumsuz etkisi azdır. V.E.D.S.'lerin uygulama alanları raylı ulaşım araçları, karayolu ulaşımı araçları ve güç kaynaklarıdır, uzay araçlarında ve uydularda kullanım için de araştırmalar sürdürülmektedir [34].

5.3.5 Yakıt pilleri

Hidrojen ekonomisinin önemli bir ögesi olan yakıt pilleri kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine çevrildiği elektrokimyasal sistemlerdir. Sistem iki elektrottan ve elektrolitten oluşur. Genellikle yakıt olarak hidrojen kullanılır, bununla birlikte hidrojen çıktısı verebilen bir kimyasal bileşik de kullanılabilir. Elektrotlardan birinde yakıt olan hidrojen ya da bileşiği ile diğerinde ise; oksijen veya hava ile besleme yapılır. Hidrojen, elektrolizin de dâhil olduğu çeşitli metotlarla elde edilir. Elektroliz işlemi de dikkate alınacak olursa en iyi durumda elektrolizör için %70 ve yakıt pili için %50 verim ile nihai verim %35 olmaktadır [32].

Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyici olduğu sürece enerji üretir. Çeşitli yakıt pili teknolojilerine; alkali, polimer elektrolit membranlı, doğrudan metanol, fosforik asit, katı oksitli, erimiş karbonat yakıt pilleri örnek verilebilir, bunlar arasındaki temel farklar kullanılan elektrolit, çalışma sıcaklığı ve uygulama sahalarıdır [32]. Yakıt pillerinin çevreye olumsuz etkisi düşüktür. Taşınabilir ve sabit güç kaynakları, taşınabilir elektronik cihazlar ve ayrıca ulaşım araçları kullanım sahalarıdır.

5.3.6 Ultra kapasitörler

Ultra kapasitörler, süper kapasitör olarak da adlandırılırlar ve esas olarak çift katmanlı elektrokimyasal kapasitörlerdir (Ç.K.E.K.). Klasik kapasitör ters yüklenmiş iki iletken arasında enerji depolar, iletkenler arasında yalıtkan malzeme bulunur. Ultra kapasitörlerde ise iki levha arasında angstrom ölçeğinde ince bir elektrolit tabaka bulunur [35]. Yüksek güç çıkış kapasitesine sahiptirler. Çok kısa (milisaniye) zaman aralığında şarj ve deşarj imkânına sahiptirler, uzun ömürlüdürler ancak yüksek ölçekte enerji depolayamazlar.

5.3.7 Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri

S.İ.M.E.D.S.'lerde DC akımın çok düşük sıcaklıkta çalışan (-270 °C) NbTi filamentlerden mamul sıfır dirence yakın süper iletken kablolardan oluşan sargıdan geçirilmesi ile elektrik enerjisi depolanır [32]. Doğrudan elektrik E.D.S.'leridir. Sistem verimi %95-98 aralığında değişir [36]. Çok kısa zaman aralığında (milisaniye) çok yüksek güç çıkışı sağlayabilirler. Dezavantajı ise oluşan yüksek sıcaklık seviyesidir; kullanılan malzemenin süper iletken durumunun sürebilmesi için düşük sıcaklık gerekir ve bu nedenle sıvı helyum veya nitrojen kullanılan soğutma sistemleri gerekmektedir.

Büyük ölçekli S.İ.M.E.D.S. kurulumamasının ana nedeni güçlü manyetik alan ve yüksek akım sebebi ile oluşan çok yüksek ölçekli elektromanyetik kuvvettir [37]. S.İ.M.E.D.S.'ler günümüzde güç kalitesinin artırılması alanında kullanılmakta olup S.İ.M.E.D.S.'lerin geliştirilmesine devam edilmektedir.

5.4 Melez Sistem Modeli Kapsamında Enerji Depolama Sistemi Teknolojisi Seçimi

Tez çalışması kapsamında belirlenmiş amaçlara uygun E.D.S. aşağıda verilmiş olan özelliklere sahip olmalıdır.

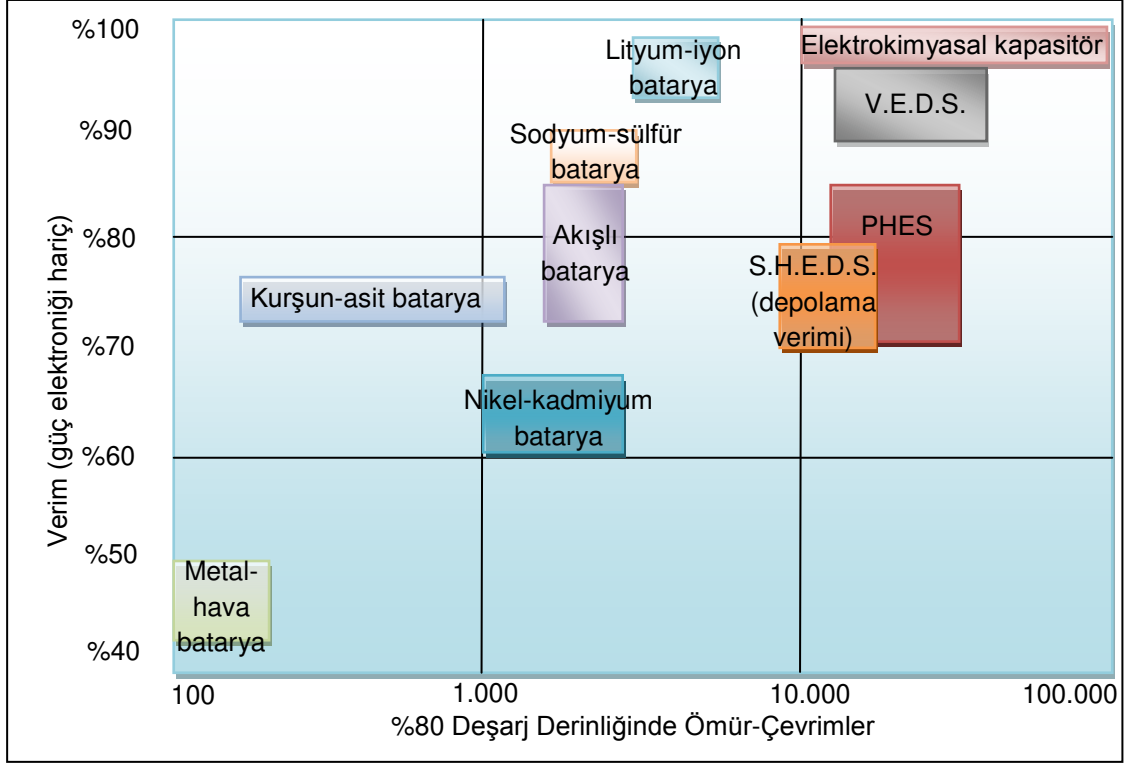
- Olgun, uygulanabilir bir teknoloji olmalıdır.
- Çevrim ömrü uzun olmalıdır.
- Verimi yüksek olmalıdır.
- Enerji depolama kapasitesi yüksek seviyede olmalıdır.
- Güç çıkışı kapasitesi yüksek seviyede olmalıdır.
- Elektrik enerjisi türünde girdi ve çıktıya sahip olmalıdır.
- Deşarj süresi uzun olmalıdır.
- Çevresel olumsuz etkisi en düşük düzeyde olmalıdır.
- Yenilenebilir enerji konseptine uygun olmalıdır.

Dünya genelinde en yüksek kurulu kapasiteye sahip E.D.S. teknolojisi; PHES teknolojisi daha sonrasında S.H.E.D.S. teknolojisi olmaktadır (Çizelge 5.1). Bu durum PHES'in olgun bir teknoloji olması ile ilgilidir. Diğer E.D.S. teknolojileri ise toplamda önemli ölçekte bir kapasiteye sahip değildir (Bkz. Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Dünya genelinde elektrik E.D.S. teknolojisine göre toplam kurulu güç değerleri ([38]'den değiştirilerek).

E.D.S. Teknolojisi	Kurulu Kapasite (MW)
PHES	127.000
S.H.E.D.S.	440
Sodyum-sülfür batarya	316
Kurşun-asit batarya	~35
Nikel-kadmiyum batarya	27
V.E.D.S.	<25
Lityum-iyon batarya	~20
Redoks-Akışlı batarya	<3

Çevrim ömrü dikkate alındığında PHES'ler, S.H.E.D.S.'ler, V.E.D.S.'ler ve elektrokimyasal kapasitörlerin diğer E.D.S.'lere göre önde olduğu aynı durumun verim bakımından da geçerli olduğu görülmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 E.D.S. çevrim ömrü-verim grafiği ([39]'dan değiştirilerek).

S.H.E.D.S.'ler deşarj sürelerinin uzun olması (Şekil 5.3), güç çıkışı kapasitesi ve enerji depolama kapasitelerinin yüksek olması (Şekil 5.4) ile M.S. için aranan bazı özellikleri sağlasa da, termik bileşeni sebebi ile yenilenebilir enerji konseptine uymamaktadır, olgun bir teknoloji olmasına rağmen yaygın uygulama alanı bulmamıştır (Bkz. Çizelge 5.1) ve S.H.E.D.S.'ler tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

Bataryaların deşarj süresi orta seviyededir (Bkz. Şekil 5.3). Enerji depolama kapasiteleri ve güç çıkışı kapasiteleri de orta seviyede olup (Bkz. Şekil 5.4) çevrim ömürleri genel olarak diğer E.D.S.'lere göre daha kısadır, bazı batarya türlerinin çevreye olumsuz etkileri olabilir, yenilenebilir enerji konseptine uymamaktadır ve bataryalar tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

Akışlı bataryalarda enerji depolama ölçeği elektrolit miktarına bağlıdır ve şebeke ölçekli depolama için yüksek miktarda elektrolite ihtiyaç duyulur, olgun bir teknoloji değildir, geliştirilme aşamasında olup ticari kullanımı henüz kısıtlıdır ve akışlı bataryalar tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

V.E.D.S.'lerin deşarj süresi kısadır (Bkz. Şekil 5.3), enerji depolama kapasiteleri ve güç çıkışı kapasiteleri de orta seviyede olup (Bkz. Şekil 5.4) olgun bir teknoloji değildir ve V.E.D.S.'ler tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

Yakıt pillerinin verimi düşüktür, olgun bir teknoloji değildir yaygın kullanımı için ayrıca altyapı gerektirmektedir ve yakıt pilleri tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

Ultra kapasitörlerin deşarj süreleri kısadır (Bkz. Şekil 5.3), enerji depolama kapasiteleri düşüktür, güç çıkış kapasiteleri düşüktür (Bkz. Şekil 5.4), olgun bir teknoloji değildir ve ultra kapasitörler tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

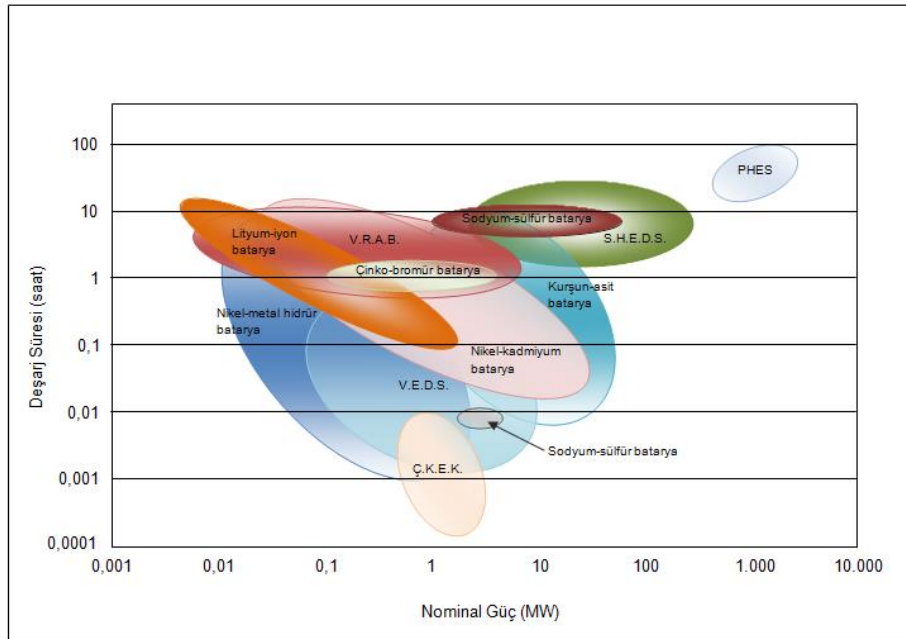
S.İ.M.E.D.S.'lerin enerji depolama kapasiteleri düşüktür (Bkz. Şekil 5.4), olgun bir teknoloji değildir ve S.İ.M.E.D.S.'ler tez kapsamındaki M.S. için uygun bir bileşen olmamaktadır.

PHES'ler olgun ve uygulanabilir bir teknolojidir (Bkz. Çizelge 5.1), çevrim ömrü yüksektir (Bkz. Şekil 5.2), çevrim verimi yüksektir (Çizelge 5.2), enerji depolama kapasitesi yüksektir (Bkz. Şekil 5.4), güç çıkışı kapasitesi yüksektir (Bkz. Şekil 5.4), elektrik enerjisi formunda girdi ve çıktıya sahiptir, deşarj süresi uzundur (Bkz. Şekil 5.3), çevresel olumsuz etkisi düşüktür ve yenilenebilir enerji konseptine uygundur.

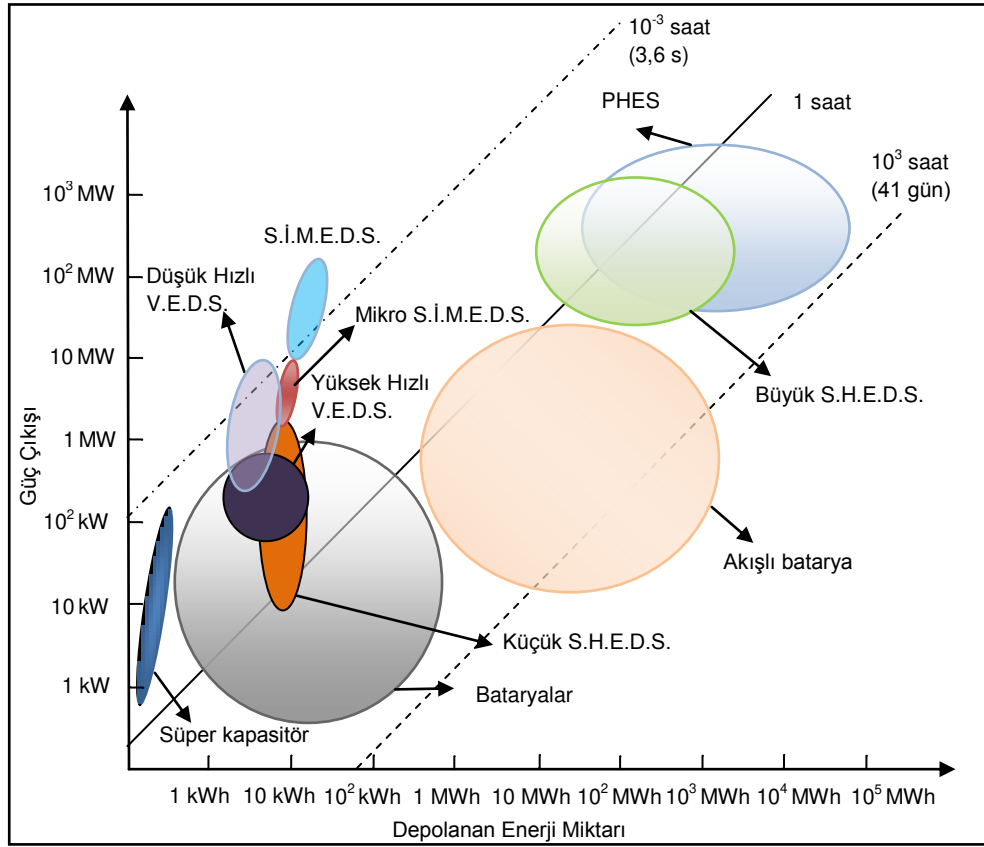
Tez çalışması kapsamında RES asıl enerji üretim kaynağı olmakla birlikte M.S.'nin depolama bileşenini oluşturan E.D.S. teknolojisi böylece PHES olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.2 E.D.S.'lerin çeşitli özelliklere göre karşılaştırılması ([30]'dan değiştirilerek).

E.D.S. Teknolojisi	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Çevrim Ömrü (Ç. Sayısı)
Kurşun-asit batarya	70-80	20-35	25	200-2.000
Nikel-kadmiyum batarya	60-90	40-60	140-180	500-2.000
Lityum-iyon batarya	70-85	100-200	360	500-2.000
Sodyum-sülfür batarya	70	120	120	2.000
Vanadyum Redoks Akışlı Batarya (V.R.A.B.)	80	25	80-150	>16.000
Ç.K.E.K.	95	<50	4.000	>50.000
PHES	65-80	0,3	-	>20 yıl
S.H.E.D.S.	40-50	10-30	-	>20 yıl
V.E.D.S. (Kompozit)	95	>50	5.000	>20.000



Şekil 5.3 E.D.S. teknolojileri nominal güç-deşarj süresi grafiği, kurulu sistemler, 2008 ([40]'tan değiştirilerek).



Şekil 5.4 E.D.S. teknolojileri güç-depolanan enerji miktarı-deşarj süresi grafiği ([32]'den değiştirilerek).

6. POMPAJLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER VE RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALLERİ MELEZ SİSTEMLERİ

6.1 Melez Sistem Kurulum Amaçları

PHES ve RES'lerin M.S. olarak işletilmesinde kurulum amaçları sistem tasarımını doğrudan etkiler. Tez kapsamında tasarlanan M.S. modelinin kurulum amaçları aşağıdaki kısımlarda verilmiştir.

6.1.1 Rüzgâr enerjisi santralinin fazla enerjisinin değerlendirilmesi ve şebekeye dâhil olabilme düzeyinde artış sağlanması

Yenilenebilir enerji santrali olan RES'te üretilen enerji, rüzgârın değişken hızlı olan doğası sebebi ile belirli bir zaman aralığında elektrik iletim sistemi operatörüne beyan edilmiş üretim miktarı ile uyum sağlamayabilir. Genel olarak rüzgâr hızı gece yüksektir fakat aynı saatlerde talep düşük seviyede seyreder. RES'te üretilebilecek enerji o anda, elektrik iletim sistemi operatörüne beyan edilmiş miktardan fazla ise fark enerji kullanılamaz, eğer az ise bu kez beyan edilmiş miktarın altında kaldığından sistem taahhüdü yerine getirilemez ve üretici açısından ekonomik zarar oluşması gibi sonuçlara sebep olur. Şebeke tarafından geri çevrilen RES'te üretilen enerji PHES sayesinde depolanabilir.

RES ve PHES'ten oluşan M.S.'lerin izole bir şebeke için optimizasyonunun araştırıldığı bir çalışmada [41] PHES sayesinde rüzgâr enerjisinin şebekeye dâhil olabilme düzeyinde artış olduğu tespit edilmiştir.

RES'te üretilen ancak belirli bir aralıkta kullanılamayan fazla enerjinin PHES vasıtası ile depolanması ve sonrasında değerlendirilmesi tez kapsamında tasarlanan modelin birinci amacıdır.

6.1.2 Rüzgâr enerjisi santralinden kararlı güç çıkışı sağlanması

Meteorolojik ve iklimsel koşullar rüzgâr hızını ve hava yoğunluğunu etkiler; sonuçta RES güç çıkışı zamana bağlı olarak değişkenlik gösterir. Eğer elektrik

şebekesi sistemi bu gibi bir durum için tasarıma sahip değilse RES'te üretilen elektrik enerjisi elektrik şebekesinde sorunlara yol açma ihtimaline sahiptir.

RES'te üretilen enerjinin şebekeye dâhil olabilme düzeyinin yüksek seviyede olduğu durumlarda aktif güçteki değişimler (rüzgâr hızı değişimi sebebi ile) güç çıkışı ve sistem talebi arasında dengesizlik meydana getirmektedir; sonuçta frekans ve voltaj değişimleri tehlikeli işletme koşullarına neden olabilir [42].

Uygun bir M.S. işletme stratejisi ile RES güç çıkışı PHES'te depolanmış enerji ile dengelenebilir ve kararlı güç çıkışı sağlanabilir; tezde tasarlanan modelin ikinci amacı budur.

Tez kapsamında tasarlanan hipotetik modelde; M.S.'nin sadece RES bileşeninin şebekeye elektrik enerjisi verdiği halde, bu durumun şebekede düzensizliğe sebep olmayıp şebeke güvenliğini etkilemediği kabul edilmiştir, rüzgâr enerjisinin şebekeye dâhil olabilme düzeyi ile ilgili kısıtlar model dışında bırakılmıştır.

6.2 Melez Sistem Modeli Tasarımı

6.2.1 Pompajlı hidroelektrik santral işletme dönemi

Genel olarak PHES'ler üç tip işletme yaklaşımından birisine göre tasarlanır. Günlük işletme yaklaşımında puant saatlerde enerji üretilir, boşaltılan PHES üst rezervuarı aynı gün talebin düşük olduğu saatlerde doldurulur. Haftalık işletmede hafta içi günlerde enerji üretilir, boşaltılan PHES üst rezervuarı hafta sonu talebin düşük olduğu saatlerde doldurulur. Bu ikisine ek olarak bir de sezonluk işletme vardır; sezonluk işletmede PHES, enerji üretiminin yanı sıra farklı amaçlara yönelik de kullanılır. Bu tez çalışmasındaki modelde PHES için günlük işletme yaklaşımı tercih edilmiştir.

6.2.2 Pompajlı hidroelektrik santral cebri boru adedi

PHES tasarımlarında bir adet ya da birden fazla sayıda cebri boru bulunabilir. Birden fazla cebri boru kullanılması eş zamanlı olarak pompaj işlemi ve depolama

işlemine olanak sağlar. Çift cebri boru olması durumunda su üst rezervuara bir cebri boru ile pompalanırken aynı anda diğer cebri borudan su serbest bırakılarak türbinler ve jeneratörlerle enerji üretilebilir. Bunun yanında birden fazla cebri boru tercihi devreye girme süresinde esneklik de sağlar. Bazı durumlarda M.S. pompa ve türbinlerinin aynı anda işlemde olmasına ihtiyaç duyulabilir. PHES türbinleri çalışırken RES'te üretilen fazla enerji varsa bu enerji fazlasının depolanması sağlanır. Bütün bunların yanında fazladan cebri boru inşası; cebri borunun maliyeti yüksek bir yapı kısmı olması nedeni ile fazladan ekonomik yük getirir.

Tez çalışmasında yer alan PHES modeli bir adet cebri boruya sahiptir. Böylece belirli bir zaman aralığında PHES'te sadece enerji üretimi ya da pompaj işlemi yani enerji depolanması gerçekleştirilebilir.

6.2.3 Pompajlı hidroelektrik santral için çift işlevli pompa-türbin ve değişken hızlı motor-jeneratör seçimi

Literatürde pompa ve türbin ünitelerinin ayrı olarak yer aldığı RES ve PHES'ten oluşan M.S.'lerin araştırıldığı; teknik ve ekonomik analizlerinin yapıldığı çalışmalar mevcuttur [43]; [42]. Bununla birlikte çift işlevli pompa-türbin ve değişken hızlı motor-jeneratör seçimi de bir seçenek olarak değerlendirilebilir. İzole şebekeler için değişken hızlı teknik aksamaya sahip PHES ve RES entegrasyonunun araştırıldığı bir çalışmada [44], sistem kontrol edilebilirliği sayesinde pompaj işlemi ve elektrik enerjisi üretimi aşamalarında RES elektriksel güç çıkışındaki dalgalanmaların dengelenebileceğine vurgu yapılmış olup bu tasarımın şebekenin genel işleyişini de iyileştirebildiği tespit edilmiştir. Tez kapsamındaki M.S. modelinde bir adet cebri boru seçimi ile birlikte pompa ve türbin işlevi gören çift işlevli pompa-türbinlerin ve değişken hızlı motor-jeneratörlerin kullanımı tasarlanmıştır.

6.2.4 Pompaj işlemi için şebekeden enerji kullanımı

PHES'lerde genellikle pompaj işlemi için şebekeden enerji; üçüncü bölümde değinildiği üzere, şebeke talebinin düşük olduğu saatlerde kullanılmakta ve puant talep saatlerinde depolanan enerji şebekeye verilmektedir.

Elektrik iletim sistemi operatörüne taahhüt edilen enerji miktarının M.S. tarafından sağlanabilecek enerji yetersizken de sağlanabilmesi ve rezervuarların yüksek hacimlerde boyutlandırılmasının önüne geçilmesi için şebekeden enerji kullanımı bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

Tez çalışması kapsamında M.S. ve sadece RES olması durumu teknik faydaları aynı koşullar altında karşılaştırılmaktadır, bunun sağlanabilmesi için M.S. modelinde PHES pompaj işlemi için sadece RES'te üretilen enerji fazlasından yararlanılmaktadır ve sonuçta pompaj işlemi için şebekeden enerji kullanılmamaktadır.

6.2.5 Şebeke elektrik enerjisi talebi

Enerji santralleri taban yüke, orta yüke ve puant yüke iştirak etmelerine göre değerlendirilebilirler.

RES ve E.D.S.'den oluşan M.S.'nin değerlendirildiği bir çalışmada [45] taban yük, orta yük ve puant yük stratejileri incelenmiştir, taban yük stratejisinde santral 24 saat, orta yük stratejisinde gündüz 12 saat, puant yük stratejisinde ise 6 saat işletilmektedir. Çalışma sonucunda, depolamada sadece RES'te üretilen enerjinin kullanılması yaklaşımı ile taban yük stratejisi talebe karşılık vermede sürekli ancak düşük ölçekte etki ederken, puant yük stratejisinde rüzgâr gücünün yüksek düzeyde olması halinde talep yüksek oranda karşılanmaktadır, orta yük stratejisinde ise yük üzerinde daha fazla düzeltici etki meydana gelmektedir; yükün talep seviyesi yüksekken daha uzun süre ile karşılandığı ve talep düşüken yükün kendi seviyesinde tutulduğu sonucuna varılmıştır [45].

Literatürde RES ve PHES M.S.'leri daha çok izole şebekeler için araştırılmıştır [42; 44]. Bu araştırmalarda M.S. ile izole şebeke yükünün bir kısmı karşılanmakta olup M.S. elektrik enerjisi üretiminde şebeke yük değerleri dikkate alınmıştır.

M.S. devreye girme ve devreden çıkma süreleri teknik ve ekonomik yönden sistem için önem taşımaktadır. Enerji santrallerinin istenen güce ulaşması için gerekli olan süre özellikle puant yüke iştirak edecek santraller için önemlidir. Ayrıca devreye

girme ve devreden çıkma işlemi mekanik aksamın fiziksel ömrünü kısaltır, bu işlemler santral işletmesine fazladan ekonomik maliyet getirir.

Bir RES tek başına puant santral olarak işletilmeye uygun değildir, RES'lerin PHES'ler ile birlikte M.S. olarak tasarlanması puant yüke iştirak etmelerini sağlayabilir.

Tasarımı söz konusu olan M.S. belirlenmiş saatlerde güç çıkışı sağlar; işletme yaklaşımı bu sürenin 6 saatle sınırlanması bakımından puant yük stratejisi olarak değerlendirilebilir.

6.2.6 Stokastik model yaklaşımı ve değişkenleri

RES güç çıkışı değerleri ve kimi piyasalarda enerji birim fiyatları zamana bağlı olarak değişir, bu değişkenler stokastik modeller çerçevesinde değerlendirilebilir. Bu tez çalışması kapsamında stokastik değerlendirme yapılmamıştır ancak stokastik değişkenler ile yapılan değerlendirmeler işletme benzetimini etkilediğinden ve ayrıca bu yöndeki çalışmalara literatürde yer verildiğinden stokastik değerlendirme yaklaşımına değinilmiştir.

6.2.6.1 Rüzgâr enerjisi santrali güç çıkışı değerleri

Rüzgâr hızı ve yoğunluğuna bağlı olan RES güç çıkışı değerleri; zamana bağlı olarak değişir ve stokastik model için bir değişken olarak değerlendirilebilir. RES ve M.S. için gelecek zamana ait enerji üretimi planlaması bu stokastik model temelinde oluşturulabilir.

Literatürde çeşitli çalışmalarda [46; 47; 48] RES güç çıkışı değerleri stokastik model için değişken olarak ele alınmıştır. Literatürde gelecekteki rüzgâr gücü değerleri tahminleri için, sayısal hava tahmin metotları ve tamamlayıcı olarak otoregresif filtre ve yapay zeka gibi metotlar kullanılmaktadır [47].

6.2.6.2 Piyasa elektrik enerjisi birim fiyatları

Spot piyasa koşullarının etkin olduğu piyasalarda üretilecek elektrik enerjisinin gelecekteki satış birim fiyatı ve pompaj işlemi için şebekeden enerji kullanılacaksa gelecekteki elektrik enerjisi alış birim fiyatı enerji santralinin ekonomik getirisi bakımından önemlidir ve sonuçta enerji fiyatları stokastik model için değişken olarak değerlendirilebilir. Literatürde çeşitli çalışmalarda [47; 48] piyasa enerji fiyatları stokastik model için değişken olarak ele alınmıştır.

6.3 Melez Sistem Modeli Teknik Özellikleri ve İşletme Benzetimi

İşletme benzetimi yapılan M.S. hipotetik bir modeldir. RES ve PHES için gerekli olan uygulama sahaları özel gereklilikleri bu tez çalışmasının kapsamı dışındadır. M.S. bileşenleri RES, PHES ve sistem operatöründen oluşur, M.S. tarafından taahhüt edilen elektrik enerjisi üretim miktarı elektrik iletim sistemi operatörüne bildirilir, elektrik iletim sistemi operatörü talep tarafındaki dış bileşen olarak sistemde yer almaktadır.

- RES; rüzgâr türbinlerinden oluşur.
- PHES; üst rezervuar, alt rezervuar, 1 adet cebri boru, şaft, çift işlevli pompa- türbin ve değişken hızlı motor-jeneratör kısımlarına sahiptir.
- Sistem operatörü.
- Elektrik iletim sistemi operatörü.

6.3.1 Rüzgâr enerjisi santrali modeli teknik özellikleri

RES türbinlerinin özdeş olduğu ve rüzgâr koşullarının türbinler için aynı olduğu kabul edilmiş olup değişken hızlı bir rüzgâr türbini seçilmiştir. Çizelge 6.1’de rüzgâr hızı değerleri için türbin güç çıkışı değerleri verilmiştir. Rüzgâr hızı değerleri Weibull parametrelerinin seçilen değerlerine uygun olarak hesaplanmaktadır. Değerler 1 saatlik ara ile 1 yıllık olup 8760 veri vardır. Böylece 1 saatlik döngü süresi M.S. modeli döngü süresi olan 1 saat ile uyumaktadır. 10 m için olan rüzgâr hızı değerleri; güç profili yaklaşımı ile seçilen rüzgâr türbini hub yüksekliği için hesaplanmaktadır.

Çizelge 6.1 Rüzgâr hızı değerleri için rüzgâr türbini güç çıkışı değerleri ([49]'dan değiştirilerek).

v (m/s)	P_{wt} (MW)
0-3	0
4	0,029
5	0,071
6	0,138
7	0,238
8	0,361
9	0,507
10	0,673
11	0,860
12-21,99	1,001
22	0

Çizelge 6.2'de RES modeli için teknik özellikler özeti verilmiştir (v_m : ortalama rüzgâr hızı, $P_v^{\max}$: RES türbinleri maksimum gücü, $P_v^{\min}$: RES türbinleri minimum gücü).

Çizelge 6.2 RES modeli için teknik özellikler özeti.

Model Özellikleri	Açıklama/Seçim
k	1,73
c (m/s)	8,11
α	0,14
ρ_a (kg/m ³)	1,225
v_m (m/s)	7,23
Rüzgâr ölçüm yüksekliği (m)	10
Ölçüm zaman aralığı (saat)	1
Rüzgâr türbini hub yüksekliği (m)	70
Rüzgâr türbini adedi	10
$P_v^{\max}$ (MW)	10,01
$P_v^{\min}$ (MW)	0,00

6.3.2 Pompajlı hidroelektrik santral modeli teknik özellikleri

PHES modeli teknik özellikleri özet olarak Çizelge 6.3'te verilmiştir (E_1^{in} : üst rezervuar başlangıç depolanmış enerji miktarı, E^{max} : üst rezervuar maksimum enerji kapasitesi, E^{min} : üst rezervuar minimum enerji kapasitesi, P_h^{max} : PHES türbinleri maksimum gücü, P_h^{min} : PHES türbinleri minimum gücü, P_p^{max} : PHES pompaları maksimum gücü, P_p^{min} : PHES pompaları minimum gücü).

Çizelge 6.3 PHES modeli için teknik özellikler özeti.

Model Özellikleri	Açıklama/Seçim
Tipi	Tam PHES
İşletme dönemi	Günlük
Cebri boru adedi	1
Pompaj için enerji kaynağı	RES
E_1^{in} (MWh)	1,00
E^{max} (MWh)	7,00
E^{min} (MWh)	1,00
P_h^{max} (MW)	7,00
P_h^{min} (MW)	1,00
P_p^{max} (MW)	7,00
P_p^{min} (MW)	1,00

6.3.3 Melez sistem modeli teknik özellikleri ve işletme benzetimi stratejisi

M.S. modeli işletme benzetimi stratejisi aşağıda açıklanmıştır.

- PHES türbinlerinin işletilmesi: PHES üst rezervuarında depolanmış olan potansiyel enerji çift işlevli pompa-türbinler ve değişken hızlı motor-jeneratörlerin türbin-jeneratör modunda çalıştırılması ile elektrik enerjisine çevrilir. Değişken hızlı motor-jeneratörler ile minimum ve maksimum sınırlar arasında güç değerleri ayarlanabilir. Bu işletme adımı rüzgâr enerjisinden hiç yararlanılamayan koşulda geçerlidir.

- PHES pompalarının işletilmesi: RES'te üretilen enerji pompaj işlemi ile üst rezervuarda potansiyel enerji olarak depolanır. Değişken hızlı motor-jeneratörler, motor-pompa modunda minimum ve maksimum güç değerleri arasında çalıştırılır yani pompaj işlemi için güç değeri ayarlanabilir. Daha önce de değinildiği üzere pompaj işlemi için şebekeden enerji kullanılmamaktadır. Bu işletme adımı yeterli rüzgâr enerjisi olması, şebeke enerji talebi olmaması ve üst rezervuarda yeterli boş hacim olması koşullarında geçerlidir.
- RES türbinlerinin işletilmesi: Değişken hızlı rüzgâr türbini seçimi ile minimum ve maksimum değerler arasında elektriksel güç çıkışı elde edilir ve güç çıkışı değerleri rüzgâr hızı değerlerine göre değişir. RES'te üretilen elektrik enerjisi öncelikli olarak şebekeye verilir.

M.S. modeli işletmesinde ayrıca aşağıda verilen ek durumlar da olanaklıdır.

- PHES türbinleri ve RES türbinlerinin birlikte çalıştırılması durumu: Şebeke elektrik enerjisi talebi PHES ve RES'in birlikte devreye girmesi ile karşılanır. Bu durum RES'teki elektriksel güç çıkışının şebeke talebinin altında kalması ve üst rezervuarda depolanmış yeterli potansiyel enerji olması koşulu ile geçerlidir.
- PHES pompaları ve RES türbinlerinin birlikte çalıştırılması durumu: RES'te üretilen enerjinin yeterli miktarda olması ve aynı zamanda üst rezervuarda boş hacim olması şartı ile RES gücü şebeke talebinin karşılanması için kullanılırken PHES pompalarının çalıştırılması için de kullanılır ve üst rezervuarda enerji depolanır.

M.S. modeli işletmesi ile ilgili diğer konular aşağıda verilmiştir.

- Şebeke güç talebi: $P_d(t)$ ($P_d(t): \Delta t$ aralığındaki şebeke güç talebi, t : süre indisi) gün içinde 6 saat süre ile sabit 4 MW olarak alınmıştır. Modelde

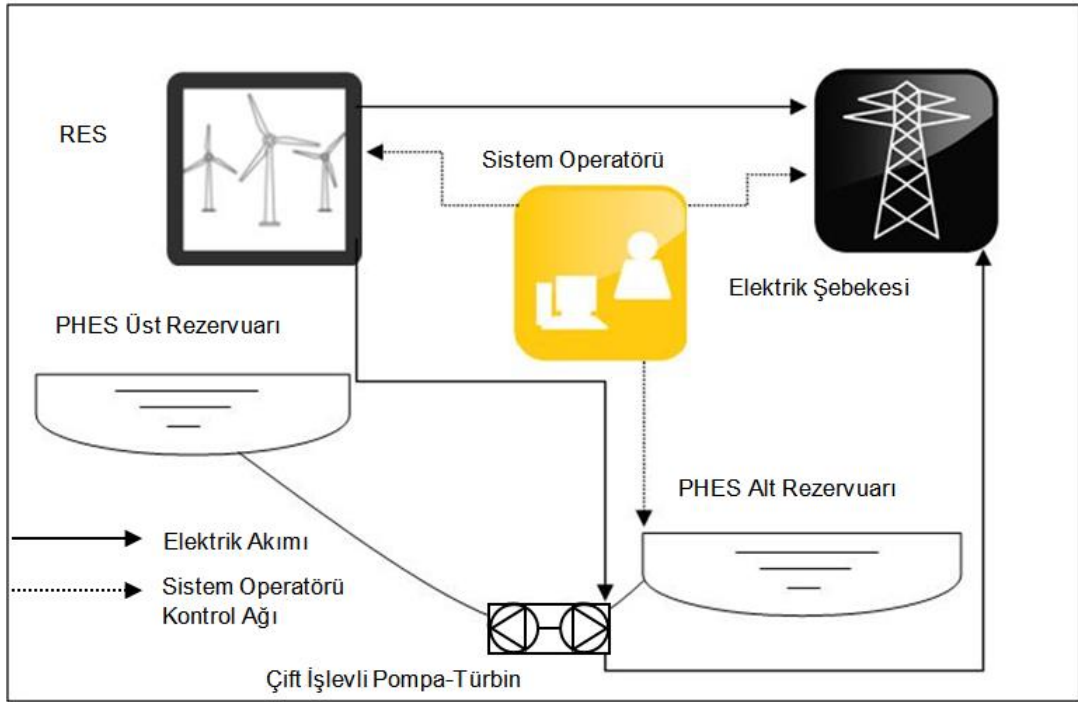
şebeke elektriksel güç talebi aynı zamanda M.S. tarafından elektrik iletim sistemi operatörüne taahhüt edilen miktar olmaktadır.

- Döngü süresi: Benzetim için M.S. bileşenlerinin devreye girme ve devreden çıkma süreleri de dikkate alınarak $\Delta t=1$ saat (Δt : döngü süresi) olarak seçilmiştir.
- Benzetim süresi: Benzetim için süre 1 yıl olarak seçilmiştir. M.S. modeli için güç ve enerji değişkenleri değerleri 1 yıldaki her saat için yani 8760 saat için elde edilmektedir. Bu yaklaşım sadece RES olması durumu için de geçerli olup değerler hesaplanmaktadır.

M.S. modeli temsili şeması Şekil 6.1’de, M.S. modeli için teknik özellikler özeti Çizelge 6.4’te verilmiştir. Burada η_c pompa, motor, transformatör ve borulardaki kayıpların dikkate alındığı verim değeri; η_d ise türbin, jeneratör, transformatör ve borulardaki kayıpların dikkate alındığı verim değeri olmaktadır. Literatürde η_c için yaklaşık 0,86-0,90 aralığındaki değerler; η_d içinse yaklaşık 0,87-0,89 aralığındaki değerler verilmektedir [50; 28] (η_c : M.S. izantropik şarj verimi, η_d : M.S. izantropik deşarj verimi, η_t : M.S. izantropik çevrim verimi).

Çizelge 6.4 M.S. modeli için teknik özellikler özeti.

Model Özellikleri	Açıklama/Seçim
Santral tipi	Puant yük santrali
M.S. günlük güç çıkışı süresi (saat)	Maksimum 6
$P_d(t)$ (MW)	4
Δt (saat)	1
η_c	0,86
η_d	0,88
η_t	0,76



Şekil 6.1 M.S. modeli temsili şeması.

6.3.4 Melez sistem modeli işletme benzetimi sayısal modeli

M.S. modeli işletme benzetimi sayısal modelinde güç ve enerji birimleri kullanılmış olup model teknik faydaların değerlendirilmesi temel alınarak oluşturulmuştur. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda [51; 52] RES ve PHES M.S.'leri için ekonomik fayda temelli modeller tasarlanmış olup amaç fonksiyon maksimum ekonomik faydanın hesaplanması için türetilmiş ve lineer yaklaşımla optimizasyon yapılmıştır. Bu çalışmalarda [51; 52] gelecek zamana ait rüzgâr kaynaklı güç veya enerji talebi gibi değişkenlerin değerleri tahmin metotları ile elde edilmiştir. Ancak bu tez çalışması kapsamında ekonomik fayda temelli benzetim yapılmadığından elektrik enerjisi fiyatları benzetimde yer almamakta olup, rüzgâr hızı ve talep değişkenleri için gelecek tahmin metotları sonucu elde edilen veriler değil, önceden belirlenmiş olan yani mevcut veriler kullanılmıştır. Tez çalışmasında, RES türbinleri, PHES çift fonksiyonlu pompa-türbinleri güç kısıtları, rezervuar enerji kapasitesi kısıtları için söz konusu çalışmalardaki yaklaşım [51; 52] tercih edilmiştir. Ancak işletme benzetimi yaklaşımı için genel sayısal model tez kapsamında oluşturulmuştur. M.S. işletme benzetimi sayısal modeli için sistem bileşenlerine ait seçimler ve kısıtlar aşağıda verilmiştir.

M.S. sayısal modeli MS Excel programı kullanılarak hazırlanmıştır. EK-1’de benzetime ait akış diyagramı verilmiştir.

RES türbinleri güç değeri, türbinlerin minimum ve maksimum güç değerleri ile sınırlıdır (6.1), ($P_v(t)$: Δt aralığındaki RES türbinleri gücü).

$$P_v^{\min} \leq P_v(t) \leq P_v^{\max} \quad (6.1)$$

PHES türbinleri güç değeri, türbinlerin minimum ve maksimum güç değerleri ve üst rezervuarda depolanmış enerji miktarı ile sınırlıdır (6.2), ($P_h(t)$: Δt aralığındaki PHES türbinleri gücü, $E(t)$: t süresinde rezervuarda depolanmış enerji miktarı).

$$P_h^{\min} \leq P_h(t) \leq \min \left\{ \left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d, P_h^{\max} \right\} \quad (6.2)$$

PHES pompaları güç değeri, minimum ve maksimum güç değerleri ve üst rezervuarda depolanabilecek enerji miktarı ile sınırlıdır (6.3), ($P_p(t)$: Δt aralığındaki PHES pompaları gücü).

$$P_p^{\min} \leq P_p(t) \leq \min \left\{ \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c}, P_p^{\max} \right\} \quad (6.3)$$

PHES pompa ve türbinleri maksimum güç değerleri eşit alınmıştır (6.4). PHES pompa ve türbinleri minimum güç değerleri de eşit alınmıştır (6.5).

$$P_h^{\max} = P_p^{\max} \quad (6.4)$$

$$P_h^{\min} = P_p^{\min} \quad (6.5)$$

PHES üst rezervuarı bir başlangıç depolanmış enerji değerine sahiptir, bu aynı zamanda rezervuar minimum enerji kapasitesine eşit seçilmiştir (6.6).

$$E_1^{\text{in}} = E^{\min} \quad (6.6)$$

PHES üst rezervuar enerji kapasitesi değeri alt ve üst sınırlara sahiptir (6.7), (6.8), (6.9).

$$E(t) - \Delta t \cdot \frac{P_h(t)}{\eta_d} \geq E^{\min} \quad (6.7)$$

$$E(t) + \Delta t \cdot \eta_c \cdot P_p(t) \leq E^{\max} \quad (6.8)$$

$$E^{\min} \leq E(t) \leq E^{\max} \quad (6.9)$$

M.S. işletme stratejisi adımlarının belirlenmesinde $P_v(t)$ ve $P_d(t)$ karşılaştırılması sonucunda iki durum oluşur. Bu iki durum aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

1. durum:

Sistem operatörü tarafından $P_v(t)$ ve $P_d(t)$ kontrolü yapılır. Eğer Δt aralığındaki RES türbinleri gücü, şebeke güç talebine eşit veya talepten fazla ise (6.10) bu durumda öncelikle RES türbinleri gücü ile şebeke talebi karşılanır (6.11), bu aynı zamanda $P_{dg}(t)$ olmaktadır (6.12), ($P_w(t)$: Δt aralığındaki şebekeye verilen RES gücü, $P_{dg}(t)$: Δt aralığındaki şebekeye verilen toplam güç).

$$P_v(t) \geq P_d(t) \quad (6.10)$$

$$P_w(t) = P_d(t) \quad (6.11)$$

$$P_w(t) = P_{dg}(t) \quad (6.12)$$

Eğer Δt aralığındaki RES türbinleri gücü, şebeke güç talebinden fazla ise, şebekeye verilen rüzgâr kaynaklı güçten kalan fark güç ($P_v(t) - P_d(t)$) için PHES pompaları minimum ve maksimum güç değerlerine bağlı olarak üç alt durum oluşur.

a. Eğer fark güç PHES pompalarının çalışması için gerekli güç minimum değeri altında ise (6.13), pompalar çalıştırılmaz (6.14) ve $P_{ex}(t)$ oluşur (6.15), ($P_{ex}(t)$: Δt aralığındaki kullanılmayan güç).

$$P_v(t) - P_d(t) < P_p^{\min} \quad (6.13)$$

$$P_p(t) = 0 \quad (6.14)$$

$$P_{ex}(t) = P_v(t) - P_d(t) - P_p(t) \quad (6.15)$$

b. Eğer fark güç PHES pompalarının çalışması için gerekli minimum güç değerine eşit veya ondan fazla ve maksimum güç değerinin de altında ise pompalar çalıştırılabilir (6.16).

Bu durumda üst rezervuarda yeterli boş hacim olması gerekir, üst rezervuar kontrol edilir, eğer depolanabilir enerji miktarı Δt aralığında fark güç ile sağlanacak enerjiden fazla ise (6.17) fark güç ile pompalar çalıştırılır ve üst rezervuarda enerji depolanır (6.18).

$$P_p^{\min} \leq P_v(t) - P_d(t) < P_p^{\max} \quad (6.16)$$

$$P_v(t) - P_d(t) < \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (6.17)$$

$$P_p(t) = P_v(t) - P_d(t) \quad (6.18)$$

Eğer Δt aralığında fark güç ile sağlanacak enerji üst rezervuar depolanabilir enerji miktarından fazla veya ona eşit ise (6.19) üst rezervuar depolanabilir enerji miktarının pompaların minimum gücü ile sağlanabilecek enerji miktarının altında olmaması kaydıyla (6.20) pompalar sadece üst rezervuar boşluğunu dolduracak kadar çalıştırılabilir (6.21) ve $P_{ex}(t)$ oluşur.

$$P_v(t) - P_d(t) \geq \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (6.19)$$

$$\left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \geq P_p^{\min} \quad (6.20)$$

$$P_p(t) = \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (6.21)$$

c. Eğer fark güç pompaların maksimum güç değerine eşit veya ondan fazla ise (6.22) pompalar maksimum güçte çalıştırılabilir.

Eğer Δt aralığında fark güç ile sağlanabilecek enerji rezervuarda depolanabilecek enerji miktarından az ise (6.23) pompalar maksimum güçte çalıştırılır, üst rezervuarda enerji depolanır (6.24) ve kullanılmayan fark güç $P_{ex}(t)$ oluşur.

$$P_v(t) - P_d(t) \geq P_p^{\max} \quad (6.22)$$

$$P_v(t) - P_d(t) < \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (6.23)$$

$$P_p(t) = P_p^{\max} \quad (6.24)$$

Eğer Δt aralığında fark güç ile sağlanabilecek enerji rezervuarda depolanabilecek enerji miktarına eşit veya ondan fazla ise (6.25) pompaların maksimum güç değerine bağlı olarak iki alt durum daha oluşur.

Birinci alt durumda (6.26) eğer Δt aralığında rezervuarda depolanabilecek enerji miktarı pompaların maksimum gücü ile sağlanabilecek enerji miktarına eşit veya ondan fazla ise pompalar maksimum güçte çalıştırılır (6.27), üst rezervuarda enerji depolanır ve kullanılmayan fark güç $P_{ex}(t)$ oluşur.

İkinci alt durumda ise eğer Δt aralığında üst rezervuar depolanabilir enerji miktarı pompaların maksimum gücü ile sağlanabilecek enerji miktarının altında ise (6.28), üst rezervuar depolanabilir enerji miktarının pompaların minimum gücü ile sağlanabilecek enerji miktarının altında olmaması kaydıyla (6.29), pompalar sadece üst rezervuar boşluğunu dolduracak kadar çalıştırılabilir (6.30).

$$P_v(t) - P_d(t) \geq \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (6.25)$$

$$\left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \geq P_p^{\max} \quad (6.26)$$

$$P_p(t) = P_p^{\max} \quad (6.27)$$

$$\left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} < P_p^{\max} \quad (6.28)$$

$$\left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \geq P_p^{\min} \quad (6.29)$$

$$P_p(t) = \left(\frac{E^{\max} - E(t)}{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (6.30)$$

Üst rezervuarda pompaj işlemi ile enerji depolanması ile ilgili rezervuar enerji durumunu temsil eden eşitlik aşağıda verilmiştir (6.31), $(E(t + 1): (t + 1)$ süresinde rezervuarda depolanmış enerji miktarı).

$$E(t + 1) = E(t) + \Delta t \cdot \eta_c \cdot P_p(t) \quad (6.31)$$

2. durum:

Sistem operatörü tarafından $P_v(t)$ ve $P_d(t)$ kontrolü yapılır. Eğer Δt aralığındaki RES türbinleri gücü, şebeke güç talebinden az ise (6.32), bu durumda üst rezervuarda depolanmış enerji miktarı kontrol edilir; üst rezervuarda depolanmış enerji mevcutsa PHES türbinleri minimum ve maksimum güç değerlerine bağlı olarak üç alt durum oluşur.

a. Eğer Δt aralığında rezervuarda depolanmış enerji ile sağlanabilecek güç miktarı, türbinlerin minimum güç değerlerinin altında ise (6.33) türbinler çalıştırılmaz (6.34). Üst rezervuarda depolanmış enerjiden sağlanabilecek güç ve RES gücü toplamı (6.35) talebi karşılayamaz (6.36) ve $P_{def}(t)$ oluşur (6.37) ($P_{def}(t)$: Δt aralığındaki güç talebinin karşılanamayan kısmı).

$$P_v(t) < P_d(t) \quad (6.32)$$

$$\left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d < P_h^{\min} \quad (6.33)$$

$$P_h(t) = 0 \quad (6.34)$$

$$P_{dg}(t) = P_w(t) + P_h(t) \quad (6.35)$$

$$P_{dg}(t) < P_d(t) \quad (6.36)$$

$$P_{def}(t) = P_d(t) - P_{dg}(t) \quad (6.37)$$

b. Eğer Δt aralığında rezervuarda depolanmış enerji ile sağlanabilecek güç türbinlerin çalışabileceği minimum güç değerine eşit veya ondan fazla ve maksimum güç değerinin de altında ise (6.38) türbinler çalıştırılabilir.

$$P_h^{\min} \leq \left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d < P_h^{\max} \quad (6.38)$$

Bu durumda eğer Δt aralığında rezervuarda depolanmış enerji ile sağlanabilecek güç karşılanamayan fark güç değerinin ($P_d(t) - P_v(t)$) altında ise (6.39) türbinler rezervuardaki enerji miktarı kadar çalıştırılır (6.40) ve $P_{def}(t)$ oluşur.

$$\left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d < P_d(t) - P_v(t) \quad (6.39)$$

$$P_h(t) = \left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d \quad (6.40)$$

Eğer Δt aralığında rezervuardaki enerji miktarı ile sağlanabilecek güç, karşılanamayan fark güç değerine eşit veya ondan fazla ise (6.41), fark güç miktarının türbinlerin minimum güç değerinin altında olmaması koşulu ile (6.42) türbinler fark güç miktarı kadar çalıştırılır (6.43).

$$\left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d \geq P_d(t) - P_v(t) \quad (6.41)$$

$$P_d(t) - P_v(t) \geq P_h^{\min} \quad (6.42)$$

$$P_h(t) = P_d(t) - P_v(t) \quad (6.43)$$

c. Eğer Δt aralığında rezervuarda depolanmış enerji ile sağlanabilecek güç türbinlerin çalışabileceği maksimum güç değerine eşit veya ondan fazla ise (6.44) türbinler çalıştırılabilir.

$$\left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t} \right) \cdot \eta_d \geq P_h^{\max} \quad (6.44)$$

Bu durumda eğer Δt aralığında rezervuarda depolanmış enerji ile sağlanabilecek güç karşılanamayan fark güç değerinin altında ise (6.45) türbinler maksimum güç değerinde çalıştırılır (6.46) ve $P_{def}(t)$ oluşur.

$$\left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t}\right) \cdot \eta_d < P_d(t) - P_v(t) \quad (6.45)$$

$$P_h(t) = P_h^{\max} \quad (6.46)$$

Eğer Δt aralığında rezervuardaki enerji miktarı ile sağlanabilecek güç, karşılanamayan fark güç değerine eşit veya ondan fazla ise (6.47), fark güç miktarının türbinlerin minimum güç değerinin altında olmaması koşulu ile (6.48) türbinler maksimum güç değerinde çalıştırılır (6.49).

$$\left(\frac{E(t) - E^{\min}}{\Delta t}\right) \cdot \eta_d \geq P_d(t) - P_v(t) \quad (6.47)$$

$$P_d(t) - P_v(t) \geq P_h^{\min} \quad (6.48)$$

$$P_h(t) = P_h^{\max} \quad (6.49)$$

Üst rezervuarda PHES türbinleri ile depolanmış enerjinin kullanımı ile ilgili rezervuar enerji durumunu temsil eden eşitlik aşağıda verilmiştir (6.50).

$$E(t + 1) = E(t) - \Delta t \cdot \frac{P_h(t)}{\eta_d} \quad (6.50)$$

6.3.5 Sadece rüzgâr enerjisi santrali için işletme benzetimi sayısal modeli

M.S. modeli ile karşılaştırılabilmesi ve E.D.S.'nin faydasının değerlendirilebilmesi için diğer koşullar aynı olmak üzere, E.D.S. olmadan sadece RES için ayrıca bir benzetim yapılmıştır. $P_v(t)$ ve $P_d(t)$ kontrolü sonucunda oluşabilecek iki durum aşağıda verilmiştir.

1. durum:

Sistem operatörü tarafından $P_v(t)$ ve $P_d(t)$ kontrolü yapılır. Eğer Δt aralığındaki RES türbinleri gücü, şebeke güç talebine eşit veya talepten fazla ise (6.51) bu durumda öncelikle RES türbinleri gücü ile şebeke talebi karşılanır (6.52) ve güç fazlası olması durumunda kullanılamayan fark güç oluşur (6.53).

$$P_v(t) \geq P_d(t) \quad (6.51)$$

$$P_w(t) = P_d(t) \quad (6.52)$$

$$P_{ex}(t) = P_v(t) - P_d(t) \quad (6.53)$$

2. durum:

Sistem operatörü tarafından $P_v(t)$ ve $P_d(t)$ kontrolü yapılır. Eğer Δt aralığındaki RES türbinleri gücü şebeke güç talebinden az ise (6.54) bu oranda talep karşılanır (6.55) ve $P_{def}(t)$ oluşur (6.56).

$$P_v(t) < P_d(t) \quad (6.54)$$

$$P_w(t) = P_v(t) \quad (6.55)$$

$$P_{def}(t) = P_d(t) - P_v(t) \quad (6.56)$$

7. SONUÇLAR

7.1 İşletme Benzetimlerinin Sayısal Sonuçları

Sistem birinci amacı bakımından sonuçlar değerlendirildiğinde; şebeke yıllık toplam elektrik enerjisi talebi 8.760,00 MWh olup yıllık RES elektrik enerjisi üretimi 41.800,09 MWh olmaktadır. Bu iki veri RES ve PHES'ten oluşan M.S. ve sadece RES için; aynı koşullar altında karşılaştırma yapıldığından aynı değerlere sahiptir.

Sonuçlara göre sadece RES olması durumunda yıllık 6.350,30 MWh elektrik enerjisi şebekeye verilmekte, M.S. durumunda bu değer 7.656,00 MWh olmakta ve bu ise sadece RES olması durumuna göre yaklaşık %17,05 oranında artış sağlandığı anlamına gelmektedir.

Sadece RES olması durumunda yıllık kullanılamayan elektrik enerjisi miktarı 35.449,79 MWh iken M.S. durumunda bu değer 34.103,47 MWh olmakta, bu ise sadece RES olması durumuna göre yaklaşık %3,80 oranında azalma sağlandığı anlamına gelmektedir.

Sadece RES olması durumunda yıllık elektrik enerjisi talebinin karşılanamayan kısmı 2.409,70 MWh iken M.S. durumunda bu değer 1.104,00 MWh olmakta bu ise sadece RES olması durumuna göre yaklaşık %54,19 oranında azalma sağlandığı anlamına gelmektedir.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde M.S. modelinin birinci amaç için teknik olarak uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Bu sonuçlara ait aylık grafikler EK-2'de verilmiştir. Benzetimin M.S. birinci amacı bakımından yıllık ölçekte enerji değerlerine ait sonuçlar (7.1), (7.2), (7.3), (7.4), (7.5), (7.6), (7.7), (7.8), Çizelge 7.1'de özet olarak verilmiştir (E_d^a : şebeke elektrik enerjisi talebi (yıllık), E_v^a : RES'te üretilen elektrik enerjisi (yıllık), E_w^a : şebekeye verilen RES'te üretilen elektrik enerjisi (yıllık), E_h^a : PHES'te üretilen elektrik enerjisi (yıllık), E_{ag}^a : şebekeye verilen toplam elektrik enerjisi (yıllık), E_p^a : PHES

pompalarının tükettiği elektrik enerjisi (yıllık), E_{ex}^a : kullanılamayan elektrik enerjisi (yıllık), E_{def}^a : elektrik enerjisi talebinin karşılanamayan kısmı (yıllık)).

$$\sum_{t=1}^{8760} P_d(t) \cdot \Delta t = E_d^a \quad (7.1)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_v(t) \cdot \Delta t = E_v^a \quad (7.2)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_w(t) \cdot \Delta t = E_w^a \quad (7.3)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_h(t) \cdot \Delta t = E_h^a \quad (7.4)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_{dg}(t) \cdot \Delta t = E_{dg}^a \quad (7.5)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_p(t) \cdot \Delta t = E_p^a \quad (7.6)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_{ex}(t) \cdot \Delta t = E_{ex}^a \quad (7.7)$$

$$\sum_{t=1}^{8760} P_{def}(t) \cdot \Delta t = E_{def}^a \quad (7.8)$$

Çizelge 7.1 M.S. ve sadece RES için yıllık enerji değerleri karşılaştırması.

Sonuç Değerler	M.S.	Sadece RES
E_d^a (MWh)	8.760,00	
E_v^a (MWh)	41.800,09	
E_w^a (MWh)	6.350,30	
E_h^a (MWh)	1.305,70	—
E_{dg}^a (MWh)	7.656,00	6.350,30
E_p^a (MWh)	1.346,32	—
E_{ex}^a (MWh)	34.103,47	35.449,79
E_{def}^a (MWh)	1.104,00	2.409,70

Sistem ikinci amacı olan kararlı güç çıkışı sağlanmasının değerlendirilmesi için analizde kararlı güç çıkışı oranlarına bakılır. M.S. olması durumunda talebin ne oranda karşılanabildiğini gösteren $\overline{P}_{hs}$ ve sadece RES olması durumunda aynı durumun değerlendirilmesi için $\overline{P}_{ow}$ tanımlanmıştır (7.9), (7.10), ($\overline{P}_{hs}$: M.S. kararlı güç çıkışı oranı (yıllık), $\overline{P}_{ow}$: RES kararlı güç çıkışı oranı (yıllık)).

$$\overline{P}_{hs} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_{dg}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_d(t)} \cdot 100 \quad (7.9)$$

$$\overline{P}_{ow} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_w(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_d(t)} \cdot 100 \quad (7.10)$$

Sonuçlara göre yıllık kararlı güç çıkışı oranı, M.S. için yaklaşık %87,40 olurken sadece RES için yaklaşık %72,49 olmakta ve bu ise %14,91 oranında artış sağlandığı anlamına gelmektedir (Çizelge 7.2).

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde M.S. modelinin ikinci amaç için teknik olarak uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Çizelge 7.2 M.S. ve sadece RES için yıllık kararlı güç çıkışı oranları karşılaştırması.

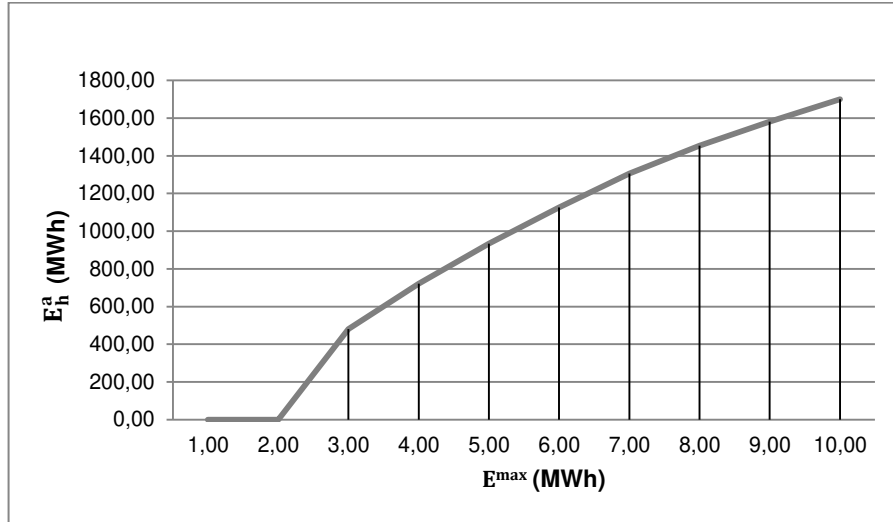
Sonuç Değer	$\overline{P}_{hs}$ (%)	$\overline{P}_{ow}$ (%)
Kararlı güç çıkışı oranı	87,40	72,49

Sonuçlara göre M.S. olması durumunda, sadece RES olması durumuna kıyasla yıllık 1305,70 MWh elektrik enerjisi kazancı sağlanmaktadır. Bu değer, 2012 yılı Ekim ayı, no 2, tek terimli tarife, sanayi, toplam elektrik tarifesine puant birim fiyatı olan 34,979 kr/kWh [53] üzerinden 456.720,80 TL ekonomik kazanç anlamına gelmektedir.

7.2 Duyarlılık Analizi Sayısal Sonuçları

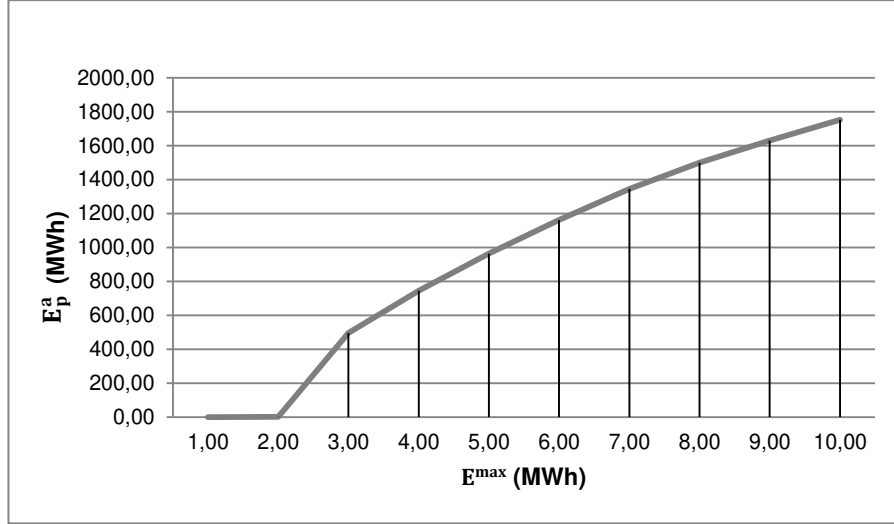
M.S. için duyarlılık analizi; $E^{\max}$ değişkeninin 1,00-10,00 MWh aralığında, 1,00 MWh artımla 10 değeri için yapılmış olup, M.S. için diğer değişkenler benzetimin ilk durumdaki değerleri olarak alınmıştır.

Sonuçlara göre artan üst rezervuar enerji kapasitesi ile PHES'te üretilen yıllık elektrik enerjisi 0,00 değerinden 1.700,17 MWh değerine yükselmiştir. $E^{\max} - E_h^a$ grafiği incelendiğinde E_h^a değeri, $E^{\max}$ değişkeninin 2,00-10,00 MWh değerleri aralığında sürekli bir artış sergilemiştir. Bu durum üst rezervuar enerji kapasitesindeki artışın şebekeye verilen toplam elektrik enerjisinde artış sağlanması bakımından fayda sağladığını göstermektedir (Şekil 7.1).



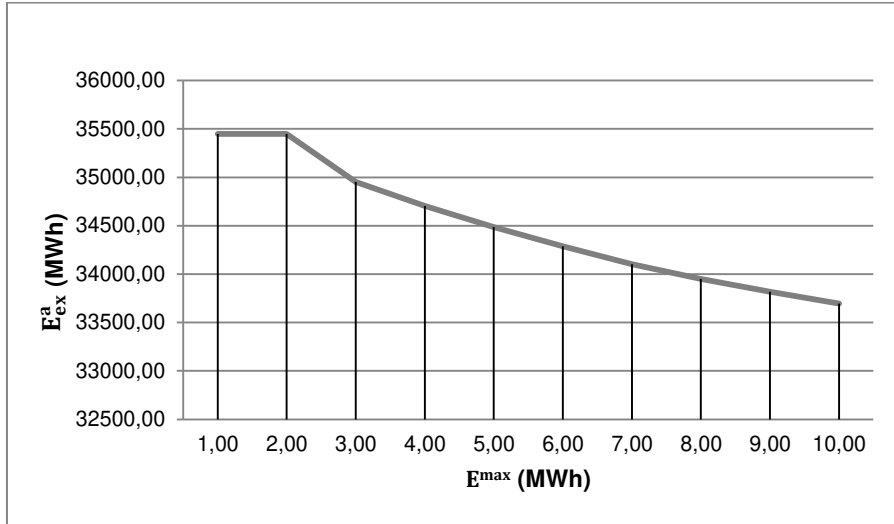
Şekil 7.1 $E^{\max} - E_h^a$ grafiği.

PHES pompalarının tükettiği yıllık elektrik enerjisi 0,00 değerinden 1.753,71 MWh değerine yükselmiştir. $E^{\max} - E_p^a$ grafiği incelendiğinde E_p^a değeri, $E^{\max}$ değişkeninin 2,00-10,00 MWh değerleri aralığında sürekli bir artış sergilemiştir. Bu durum üst rezervuar enerji kapasitesindeki artışın RES'te üretilen elektrik enerjisinin değerlendirilme oranını yükselttiğini ve dolayısı ile bunun şebekeye verilen toplam elektrik enerjisinde artış sağlanması bakımından fayda sağladığını göstermektedir (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 $E^{\max} - E_p^a$ grafiği.

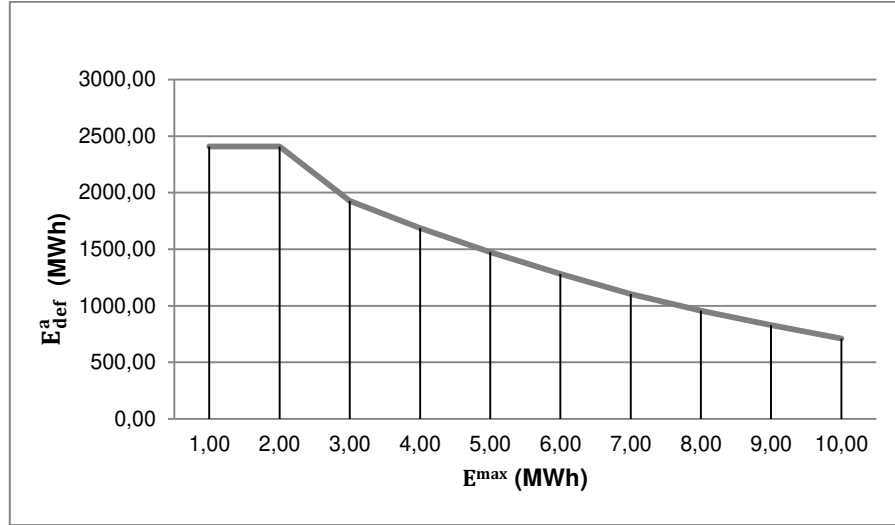
Kullanılamayan yıllık elektrik enerjisi, 35.449,79 MWh değerinden 33.696,08 MWh değerine düşmüştür. $E^{\max} - E_{ex}^a$ grafiği incelendiğinde analizin yapıldığı aralıkta E_{ex}^a değeri sürekli bir azalma sergilemiştir. Bu durum üst rezervuar enerji kapasitesindeki artışın RES'te üretilen elektrik enerjisinin değerlendirilme oranını yükselttiğini ve dolayısı ile şebekeye verilen toplam elektrik enerjisinde artış sağlanması bakımından fayda sağladığını göstermektedir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3 $E^{\max} - E_{ex}^a$ grafiği.

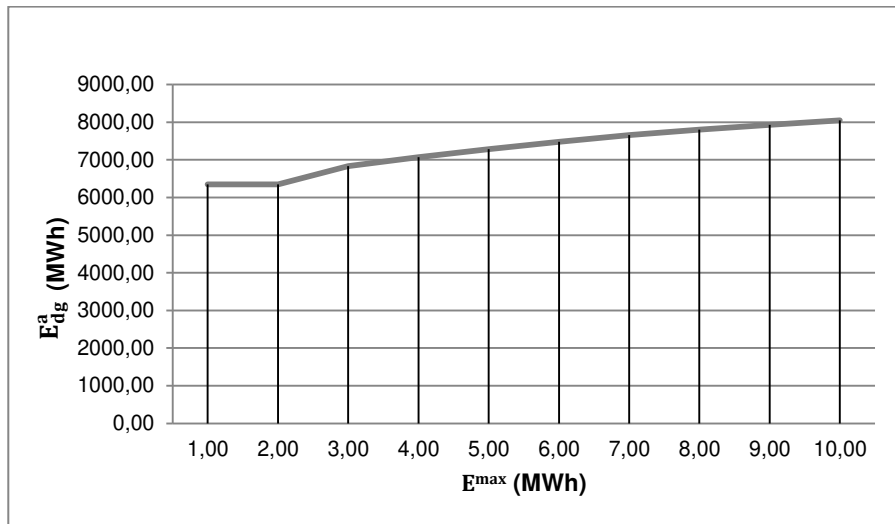
Elektrik enerjisi talebinin yıllık karşılanamayan kısmı, 2.409,70 MWh değerinden 709,53 MWh değerine düşmüştür. $E^{\max} - E_{def}^a$ grafiği incelendiğinde E_{def}^a değeri, $E^{\max}$ değişkeninin 2,00-10,00 MWh değerleri aralığında sürekli bir azalma

sergilemiştir. Bu durum üst rezervuar enerji kapasitesindeki artışın talep zaman dilimlerinde yüke karşılık vermede yeterlilik bakımından fayda sağladığını göstermektedir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4 $E^{\max} - E^a_{def}$ grafiği.

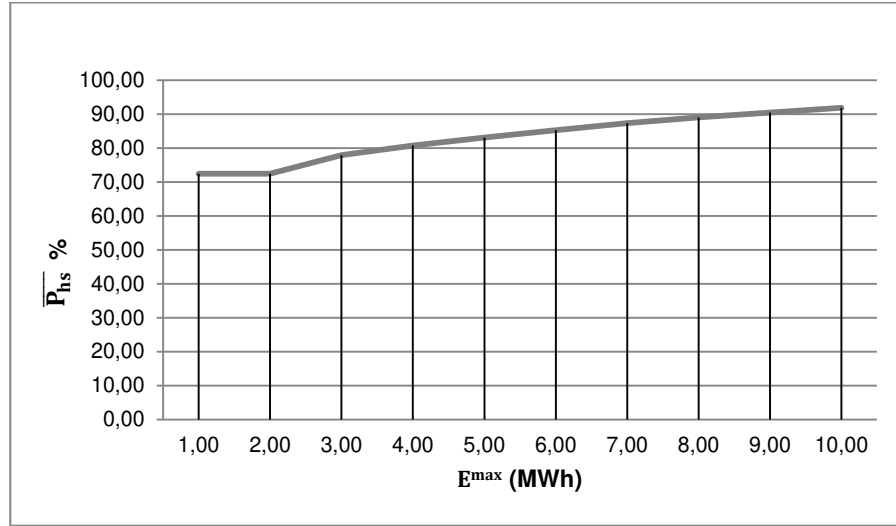
Şebekeye verilen yıllık elektrik enerjisi 6.350,30 MWh değerinden 8.050,47 MWh değerine yükselmiştir. $E^{\max} - E^a_{dg}$ grafiği incelendiğinde E^a_{dg} değeri, $E^{\max}$ değişkeninin 2,00-10,00 MWh değerleri aralığında sürekli bir artış sergilemiştir. Bu durum üst rezervuar enerji kapasitesindeki artışla birlikte PHES'te üretilen yıllık elektrik enerjisinin artması ile ilgilidir (Şekil 7.5).



Şekil 7.5 $E^{\max} - E^a_{dg}$ grafiği.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, M.S. modelinin üst rezervuar enerji kapasitesindeki artış teknik olarak sistem birinci amacı bakımından fayda sağlamaktadır.

Yıllık M.S. kararlı güç çıkışı oranı yaklaşık %72,49 değerinden yaklaşık %91,90 değerine yükselmiştir. $E^{\max} - \overline{P}_{hs}$ grafiği incelendiğinde $\overline{P}_{hs}$ değeri, $E^{\max}$ değişkeninin 2,00-10,00 MWh değerleri aralığında sürekli bir artış sergilemiştir. Bu durum üst rezervuar enerji kapasitesindeki artışın şebekeye verilen toplam elektrik enerjisinde artış sağladığını böylece talebin karşılanma oranının yükseldiğini göstermektedir (Şekil 7.6).



Şekil 7.6 $E^{\max} - \overline{P}_{hs}$ grafiği.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, M.S. modelinin üst rezervuar enerji kapasitesindeki artış teknik olarak sistem ikinci amacı bakımından fayda sağlamaktadır.

$E^{\max}$ değişkeni için duyarlılık analizi sonucu elde edilen ve Şekil 7.1'de, Şekil 7.2'de, Şekil 7.3'te, Şekil 7.4'te, Şekil 7.5'te ve Şekil 7.6'da grafikleri verilmiş olan sayısal değerler Çizelge 7.3'te özet olarak verilmiştir.

Çizelge 7.3 $E^{\max}$ değişkeni için yapılan duyarlılık analizi değerleri.

$E^{\max}$ (MWh)	E_h^a (MWh)	E_p^a (MWh)	E_{ex}^a (MWh)	E_{def}^a (MWh)	E_{dg}^a (MWh)	$\overline{P}_{hs}$ (%)
1,00	0,00	0,00	35.449,79	2.409,70	6.350,30	72,49
2,00	0,00	2,00	35.447,79	2.409,70	6.350,30	72,49
3,00	481,06	496,28	34.953,51	1.928,64	6.831,36	77,98
4,00	722,27	744,53	34.705,26	1.687,43	7.072,57	80,74
5,00	934,17	964,12	34.485,67	1.475,53	7.284,47	83,16
6,00	1.126,37	1.161,80	34.287,99	1.283,33	7.476,67	85,35
7,00	1.305,70	1.346,32	34.103,47	1.104,00	7.656,00	87,40
8,00	1.454,52	1.499,65	33.950,14	955,18	7.804,82	89,10
9,00	1.580,98	1.630,72	33.819,07	828,72	7.931,28	90,54
10,00	1.700,17	1.753,71	33.696,08	709,53	8.050,47	91,90

Bu tez çalışmasında RES ve PHES'ten oluşan M.S.'ler incelenmiş olup ileride yapılacak çalışmalarda RES'lerin diğer E.D.S. teknolojileri ile oluşturulan M.S.'leri incelenebilir. Enerji üretim sistemi olarak güneş enerjisi santrali seçilerek yine çeşitli E.D.S. teknolojileri ile M.S.'leri araştırılabilir. Stokastik model yaklaşımı ile model oluşturulması ve benzetim çalışması yapılması diğer bir araştırma konusudur. M.S. için benzetimdeki değişkenleri kapsayan bir optimizasyon yine daha sonraki çalışmalarda yapılabilir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Enerji Raporu 2010, 174s, 2010.
- [2] International Energy Agency, Key World Energy Statistics 2011, 82s, 2011.
- [3] REN21, Renewables 2012, Global Status Report, 172s, 2012.
- [4] Global Wind Energy Council, Global Wind Report Annual Market Update 2011, 68s, 2011.
- [5] International Energy Statistics 2010, <http://www.eia.gov/countries/data.cfm>, erişim 2012.
- [6] The World Wind Energy Association, 2011 Report, 23s, 2012.
- [7] EWEA, Wind in power 2011 European statistics, 11s, 2012.
- [8] Türkiye Kurulu Gücünün Yıllar İtibariyle Gelişimi (1913-2011), [http://www.teias.gov.tr/TürkiyeElektrikİstatistikleri/istatistik2011/kguc\(1-12\)/1.xls](http://www.teias.gov.tr/TürkiyeElektrikİstatistikleri/istatistik2011/kguc(1-12)/1.xls), erişim 2012.
- [9] HES Projeleri Listesi, <http://www2.dsi.gov.tr/skatablo/Tablo1.htm>, erişim 2012.
- [10] TÜREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu Şubat 2012, 36s, 2012.
- [11] P. Novak, A.I.B. Moffat, C. Nalluri, R. Narayanan, Hydraulic Structures, 4th Edition, Taylor&Francis Group, 725s, 2007.
- [12] Vaughn Nelson, Introduction to Renewable Energy, CRC Press, 408s, 2011.
- [13] <http://www.tva.gov/heritage/mountaintop/index.htm>, erişim 2012.
- [14] Hiroshi Tanaka, An Introduction to Pumped Storage Power Generation <http://www.hydropower.org/psd/articles/introduction.html>, erişim 2012.
- [15] Dale T. Bradshaw, pumped hydroelectric storage (PHS) and compressed air energy storage (CAES), IEEE PES meeting on energy storage, 12s, 2000.

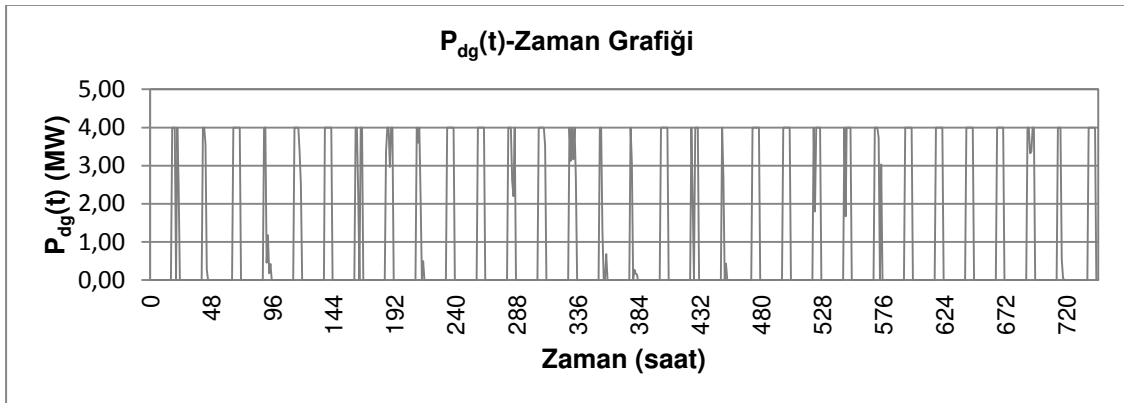
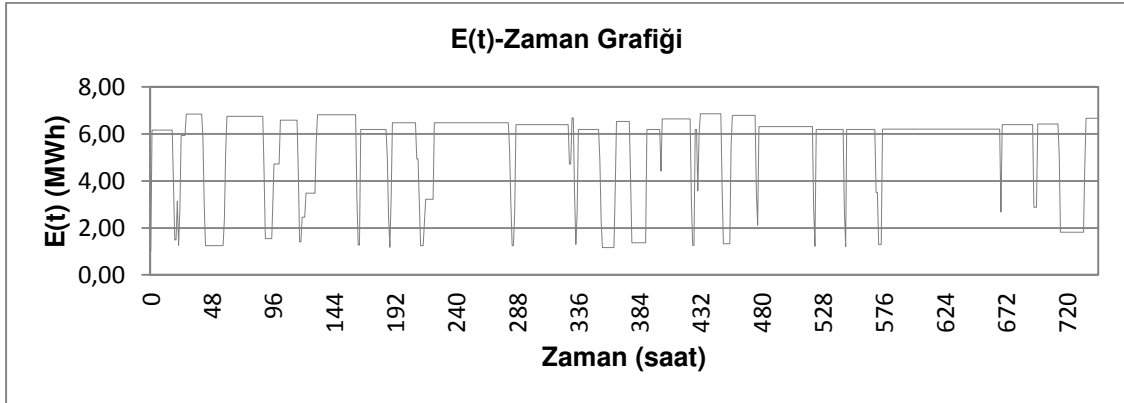
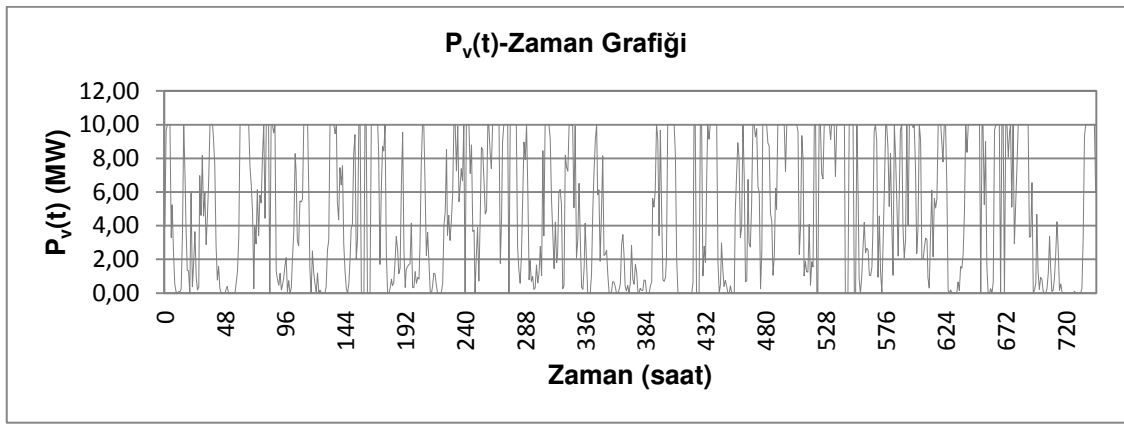
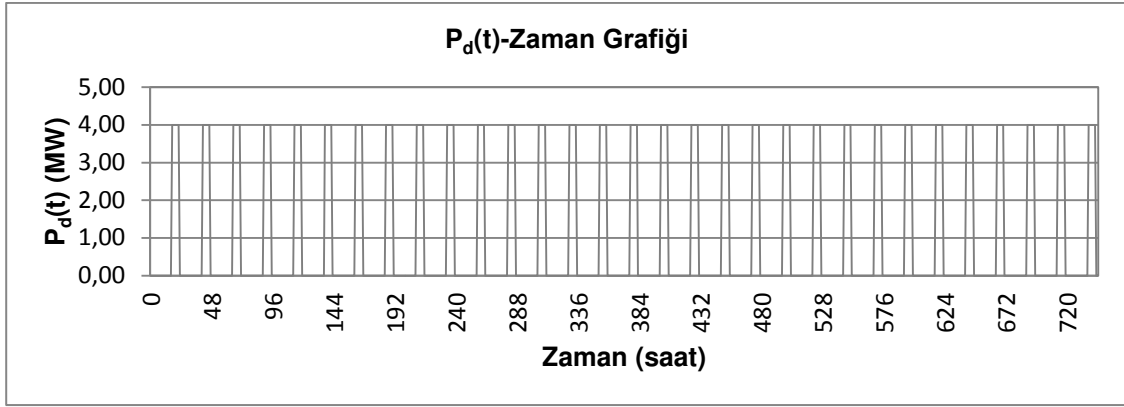
- [16] Tetsuo Fujihara, Haruo Imano, Katsuhiro Oshima, Development of Pump Turbine for Seawater Pumped-Storage Power Plant, Hitachi Review, vol.47, no.5, s.199-202, 1998.
- [17] HDR Engineering, Hydroelectric Pumped Storage for Enabling Variable Energy Resources within the Federal Columbia River Power System, Appendix A, s.1-8, 2010.
- [18] C. Nicolet, Y. Pannatier, B. Kawkabani, A. Schwery, F. Avellan, J.-J. Simond, Benefits of Variable Speed Pumped Storage Units in Mixed Islanded Power Network during Transient Operation, 16th annual HYDRO Conference, 18s, 2009.
- [19] Vaughn Nelson, Wind Energy: Renewable Energy and the Environment, CRC Press, 328s, 2009.
- [20] Tushar K. Ghosh, Mark A. Prelas, Energy Resources and Systems: Volume 2: Renewable Resources, Springer, 727s, 2011.
- [21] H. Ibrahim, M. Ghandour, M. Dimitrova, A. Ilinca, J. Perron, Integration of Wind Energy into Electricity Systems: Technical Challenges and Actual Solutions, Energy Procedia, vol.6, s.815-824, 2011.
- [22] Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 368s, 1999.
- [23] David A. Spera, Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, 2nd edition, Asme Press, 832s, 2009.
- [24] D.P Kothari, K.C Singal, Rakesh Rancan, Renewable Energy Sources and Emerging Technologies, 2nd printing, PHI Learning, 360s, 2009.
- [25] Earnest, Joshua, Wizelius, Tore, Wind Power Plants and Project Development, PHI Learning, 496s, 2011.
- [26] National Research Council, Environmental Impacts of Wind-Energy Projects, The National Academies Press, 394s, 2007.

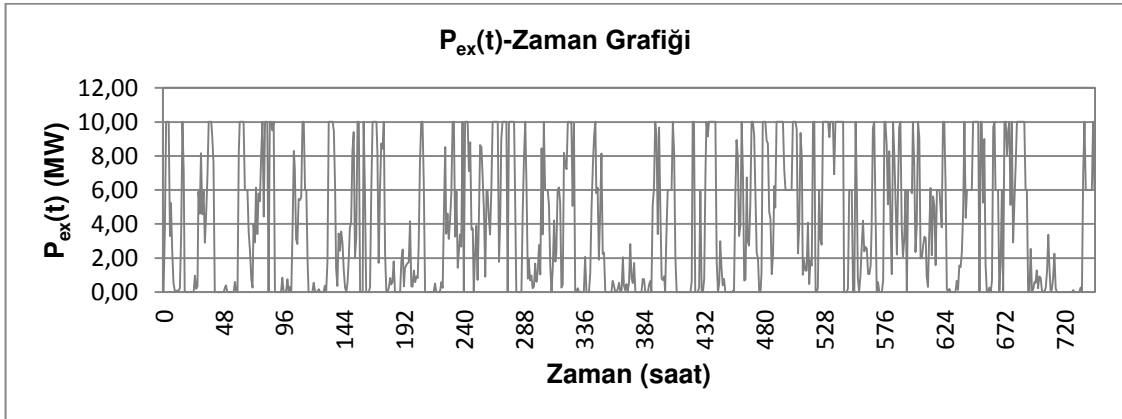
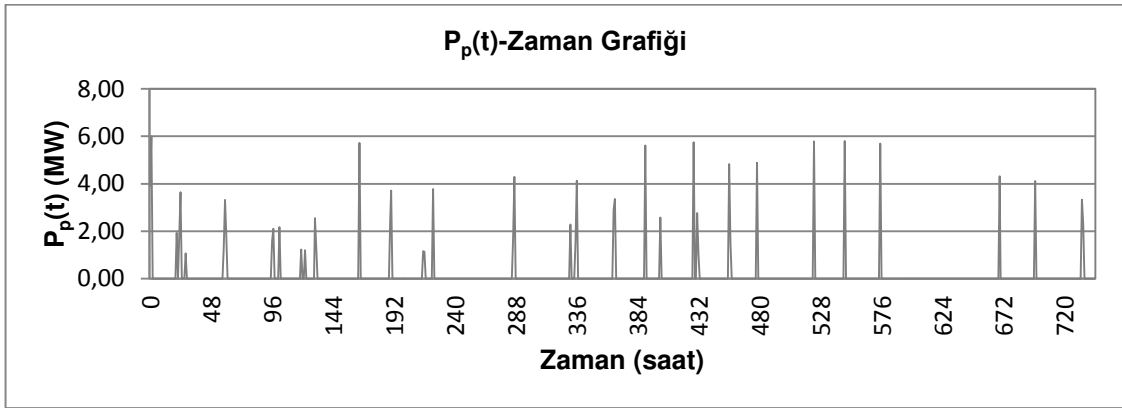
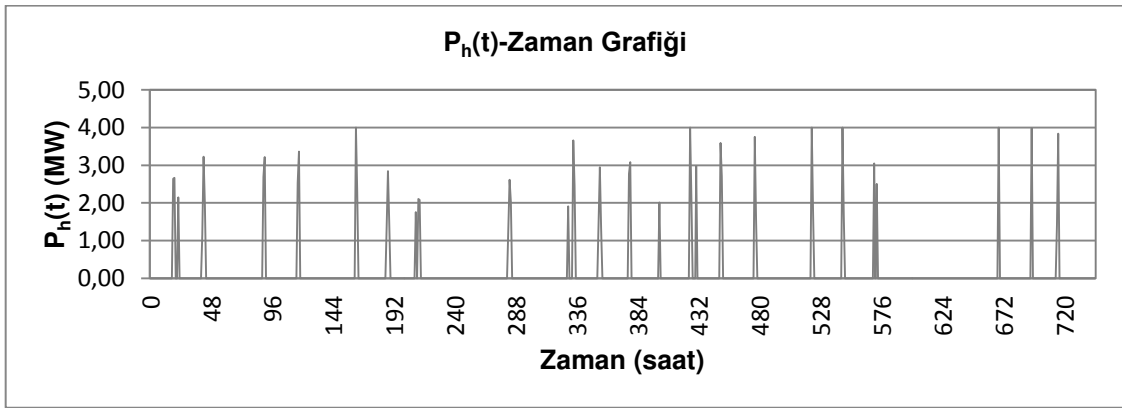
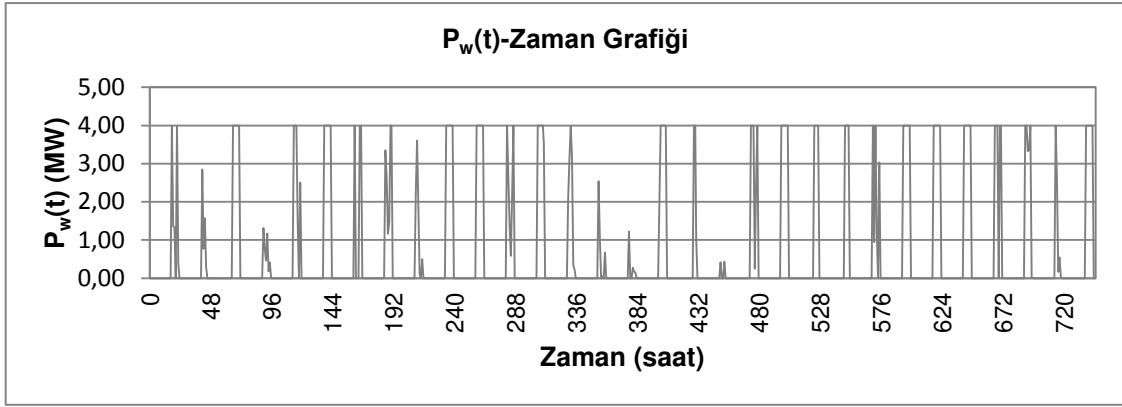
- [27] Jim Eyer, Garth Corey, Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide, Unlimited Release, 232s, 2010.
- [28] Frank S. Barnes, Jonah G. Levine, Large Energy Storage Systems Handbook, CRC Press, 260s, 2011.
- [29] R.B. Schainker, M. Nakhamkin, Compressed-Air Energy Storage (CAES): Overview, Performance and Cost Data for 25 MW to 220 MW Plants, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems vol. PAS-104, no.4, s.791-795, 1985.
- [30] Sergio Vazquez, Srdjan M. Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco, Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.57, no.12, s.3881-3895, 2010.
- [31] Robert A. Huggins, Energy Storage, Springer, 400s, 2010.
- [32] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, Energy storage systems-Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.12, iss.5, s.1221-1250, 2008.
- [33] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, vol.19, iss.3, s.291-312, 2009.
- [34] Haichang Liu, Jihai Jiang, Flywheel energy storage-An upswing technology for energy sustainability, Energy and Buildings, vol.39, iss.5, s.599-604, 2007.
- [35] D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Energy Conversion, CRC Press, 936s, 2007.
- [36] Steven C. Smith, P.K. Sen, Benjamin Kroposki, Advancement of Energy Storage Devices and Applications in Electrical Power System, Power and Energy Society, IEEE General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, s.1-8, 2008.

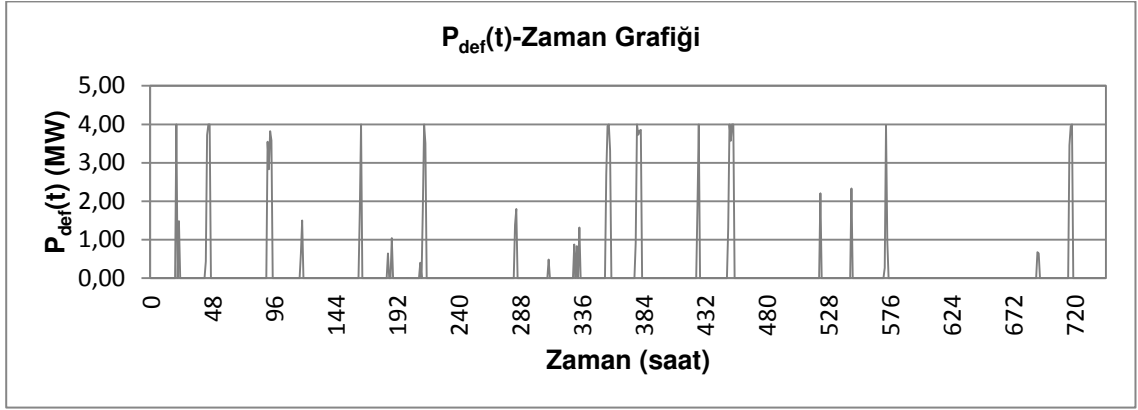
- [37] Shinichi Nomura, Naruaki Watanabe, Chisato Suzuki, Hiroki Ajikawa, Michio Uyama, Shinya Kajita, Yoshihiro Ohata, Hiroaki Tsutsui, Shunji Tsuji-lio, Ryuichi Shimada, Advanced configuration of superconducting magnetic energy storage, *Energy*, vol.30, iss.11-12, s.2115-2127, 2005.
- [38] EPRI, Electricity Energy Storage Technology Options, A White Paper on Applications, Costs, and Benefits, Technical Update, 170s, 2010.
- [39] http://www.electricitystorage.org/images/uploads/static_content/technology/technology_resources/life-efficiency_large.gif, erişim 2012.
- [40] http://www.electricitystorage.org/images/uploads/static_content/technology/technology_resources/ratings_large.gif, erişim 2012.
- [41] Paul D. Brown, J.A. Peças Lopes, Manuel A. Matos, Optimization of Pumped Storage Capacity in an Isolated Power System with Large Renewable Penetration, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.23, no.2, s.523-531, 2008.
- [42] C. Bueno, J.A. Carta, Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol.10, iss.4, s.312-340, 2006.
- [43] C. Bueno, J.A. Carta, Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems. Part I: model development, *Solar Energy*, vol.78, iss.3, s.382-395, 2005.
- [44] Jon Are Suul, Kjetil Uhlen, Tore Undeland, Wind Power Integration in Isolated Grids enabled by Variable Speed Pumped Storage Hydropower Plant, *IEEE ICSET 2008*, s.309-404, 2008.
- [45] C. Feeley, A.G. Bryans, B. Nyamdash, E. Denny, M.O' Malley, The Viability of Balancing Wind Generation With Storage, *IEEE PES General Meeting 2008*, s.1-8, 2008.

- [46] E.D. Castronuovo, J.A. Peças Lopes, Bounding Active Power Generation of a Wind-Hydro Power Plant, 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, s.705-710, 2004.
- [47] Javier García-González, Rocío Moraga Ruiz de la Muela, Luz Matres Santos, Alicia Mateo González, Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market, IEEE Transactions on Power Systems, s.460-468, vol.23, no.2, 2008.
- [48] Feng Gao, Arne Hallam, Chien-Ning Yu, Wind Generation Scheduling with Pump Storage Unit By Collocation Method, IEEE PES General Meeting 2009, s.1-8, 2009.
- [49] http://www.inl.gov/wind/software/powercurves/pc_aaer.xls, erişim 2012.
- [50] W. Bogenrieder, Renewable Energy, Landolt-Börnstein-Group VIII Advanced Materials and Technologies, vol.3C, s.165-196, 2006.
- [51] Edgardo.D. Castronuovo, João A. Peças Lopes, Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant, Electrical Power and Energy Systems, vol.26, iss.10, s.771-778, 2004.
- [52] Phuc Diem NGUYEN NGOC, Thi Thu Ha PHAM, Seddik BACHA, Daniel ROYE, Optimal operation for a wind-hydro power plant to participate to ancillary services, IEEE ICIT 2009, s.1-5, 2009.
- [53] <http://www.tedas.gov.tr/BilgiBankasi/Sayfalar/ElektrikTarifeleri.aspx>, erişim 2013.

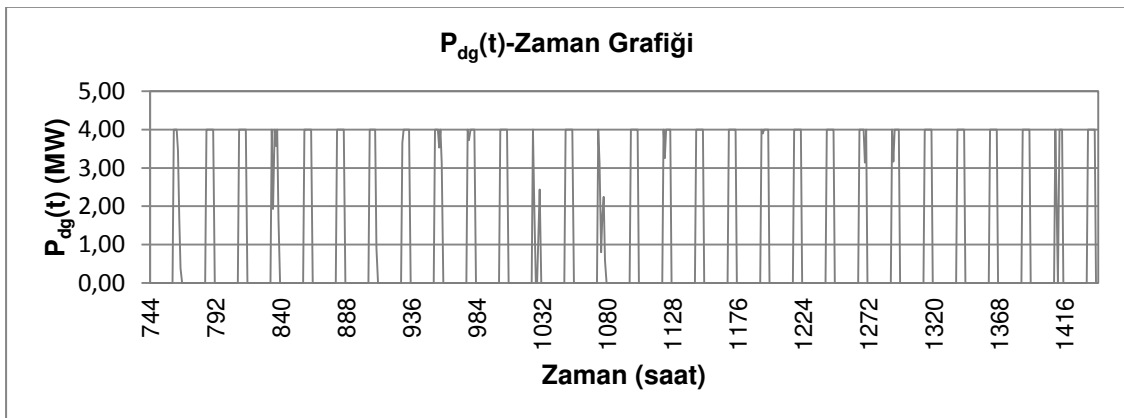
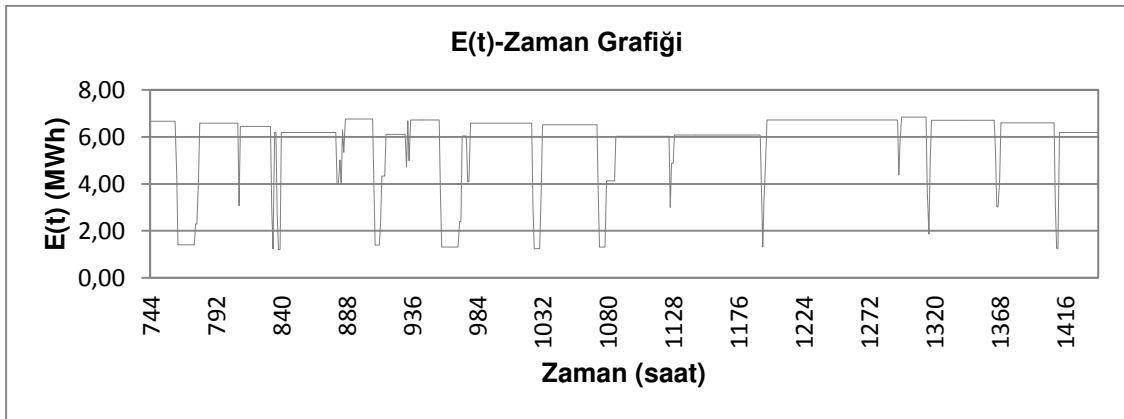
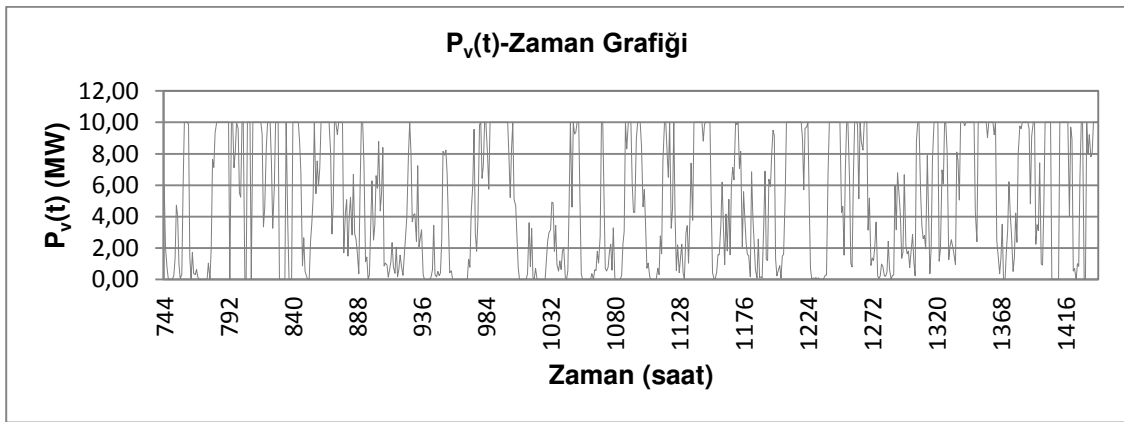
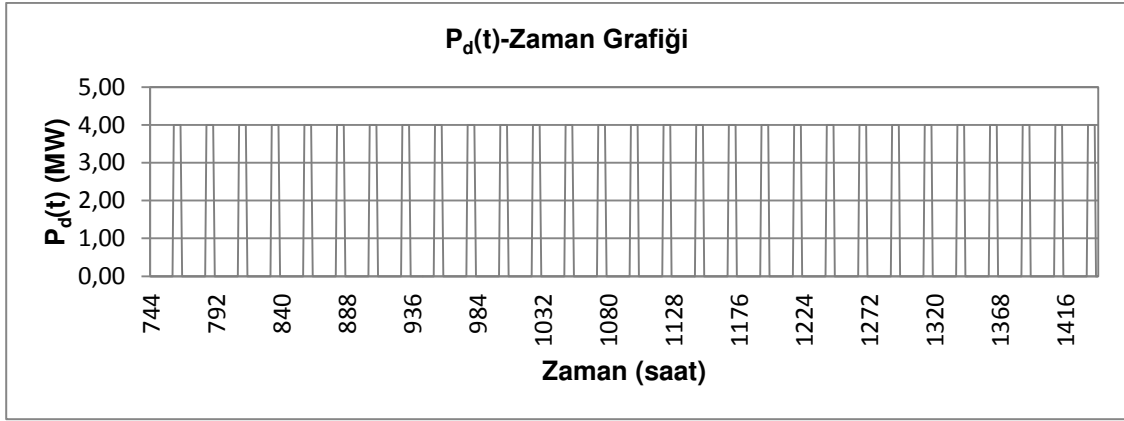
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-OCAK AYI

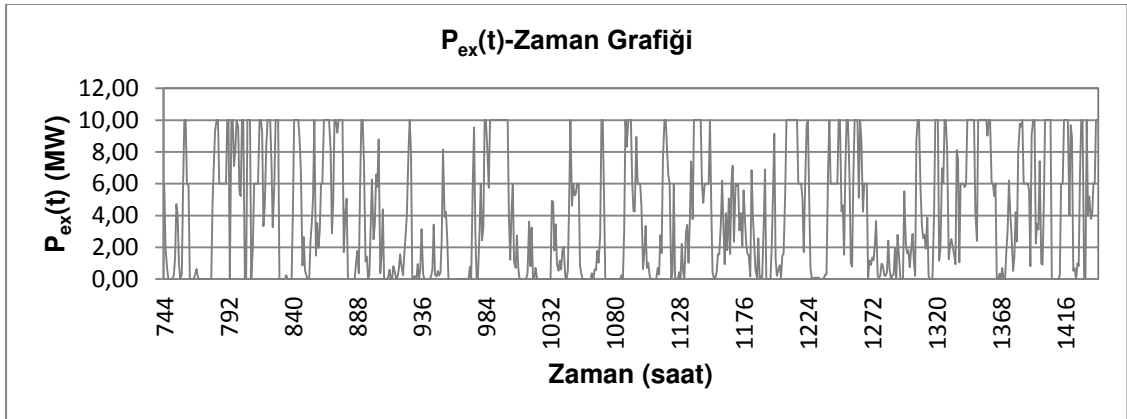
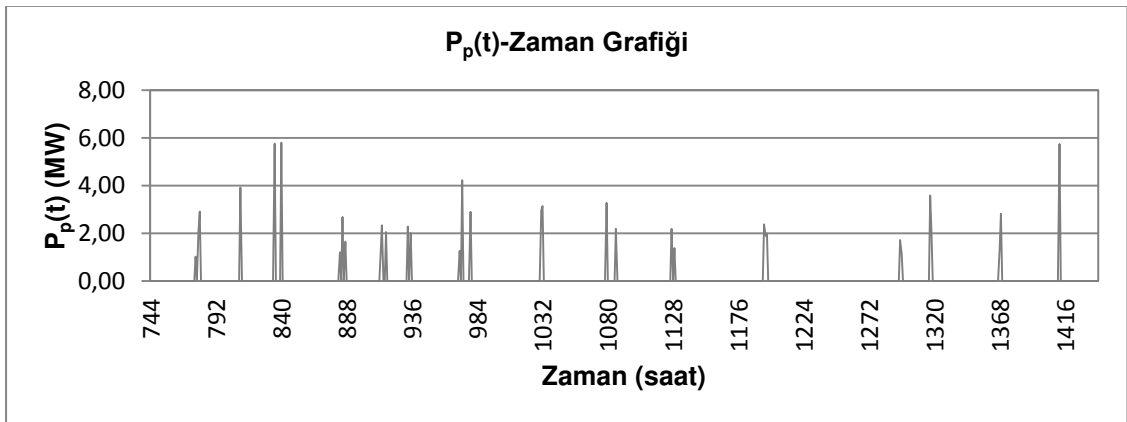
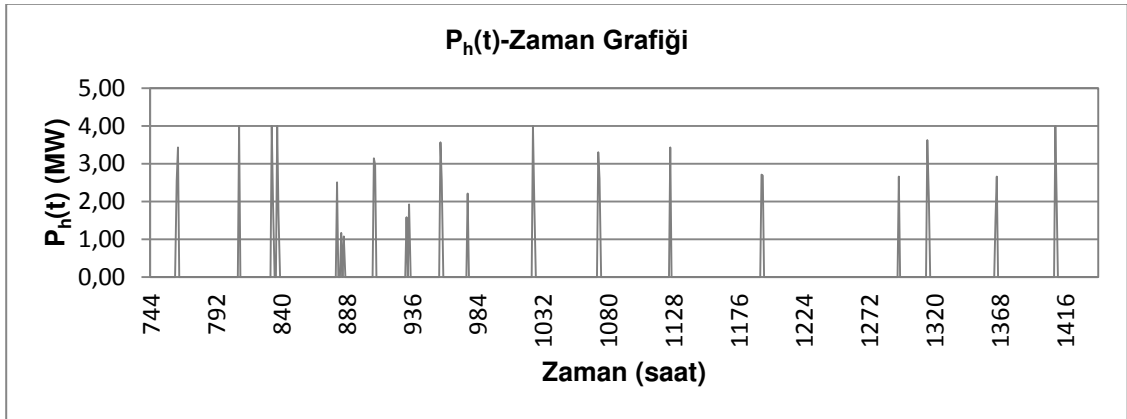
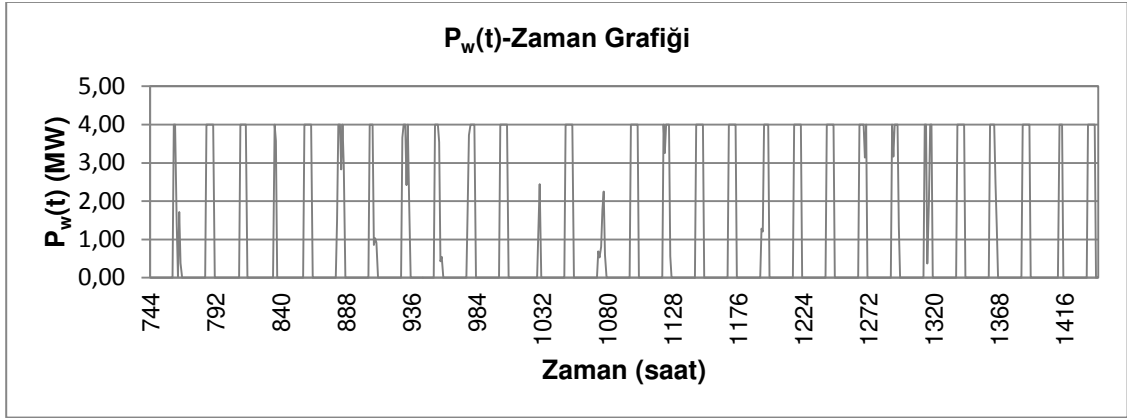


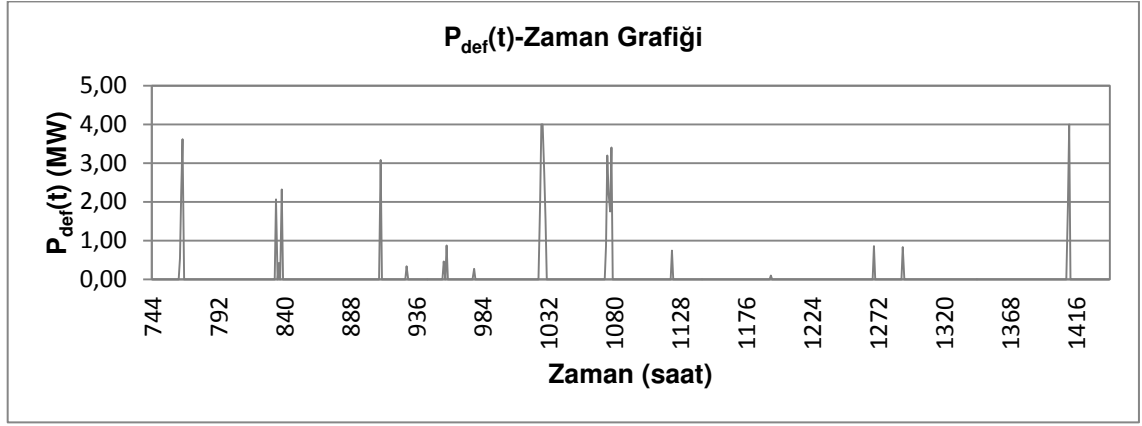




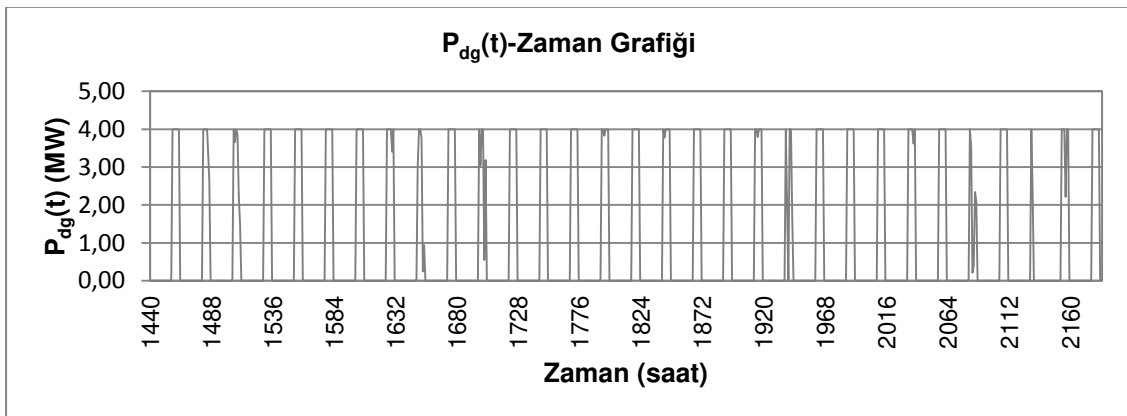
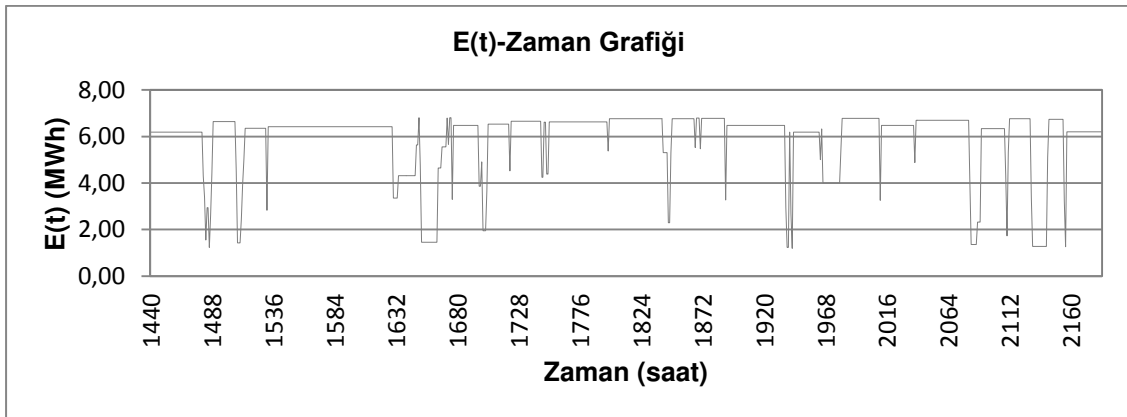
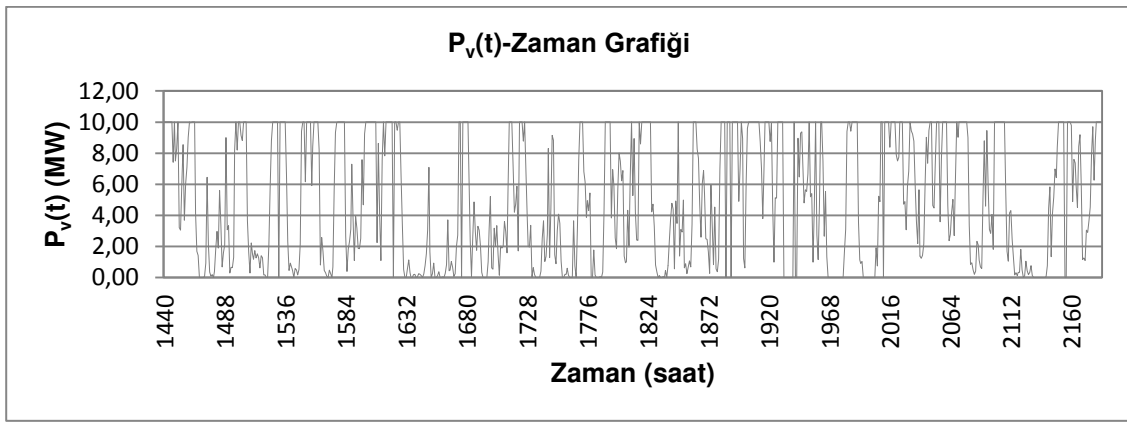
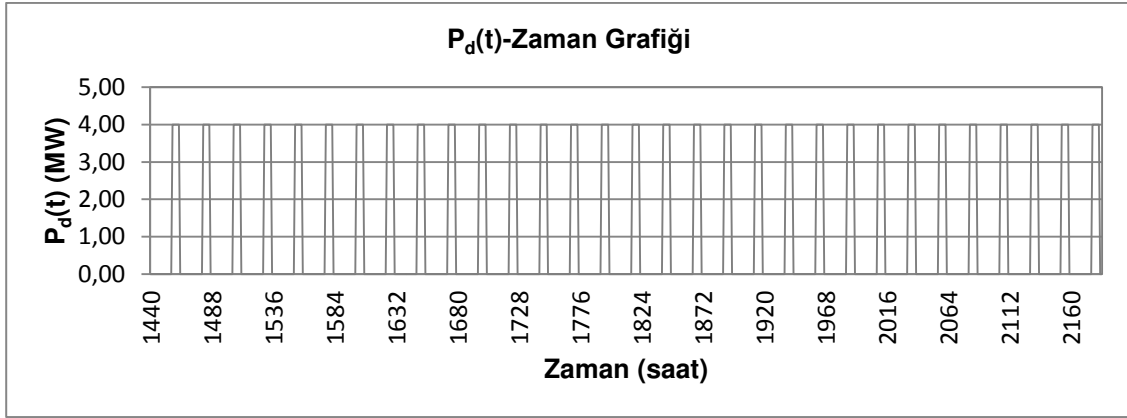
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-ŞUBAT AYI

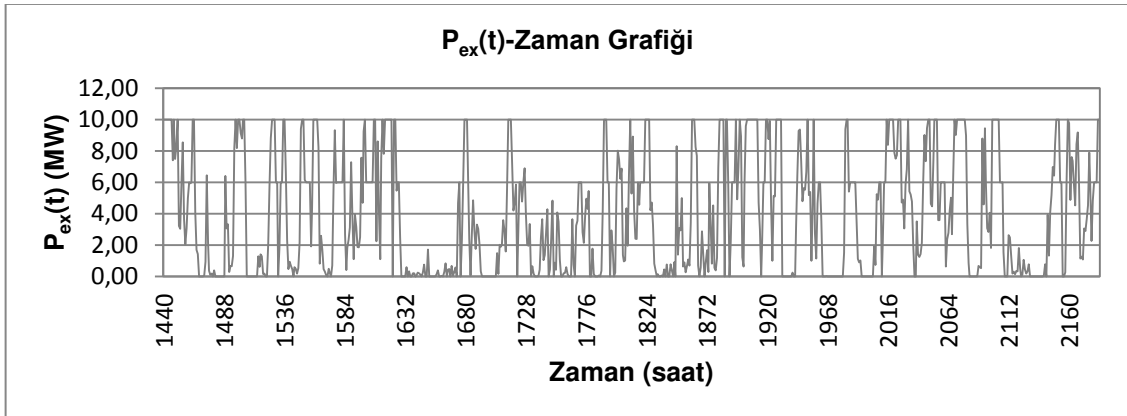
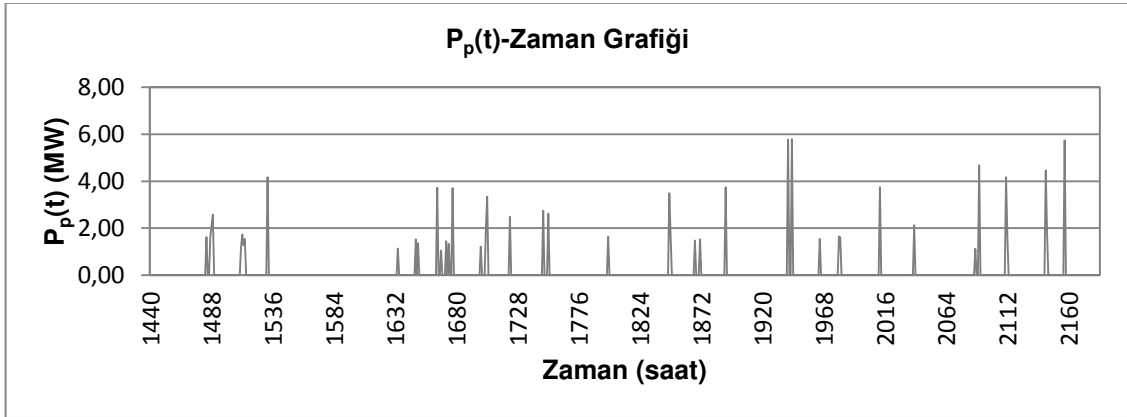
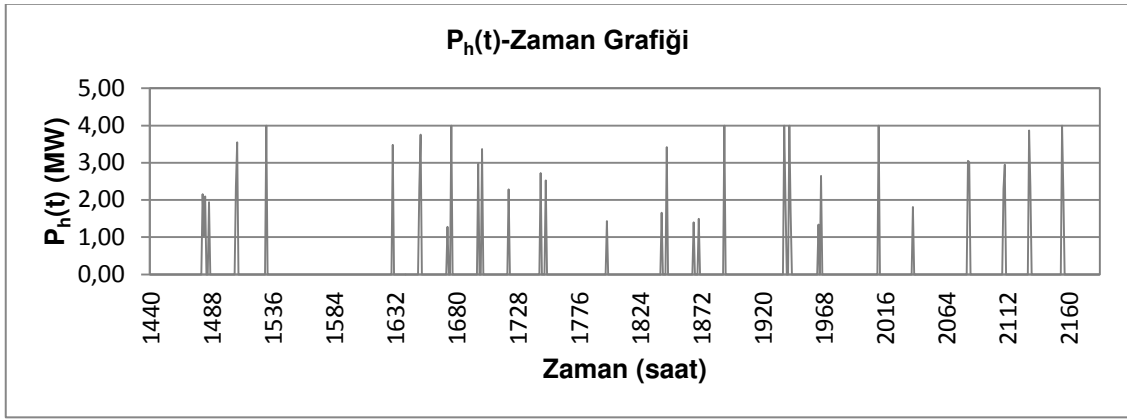
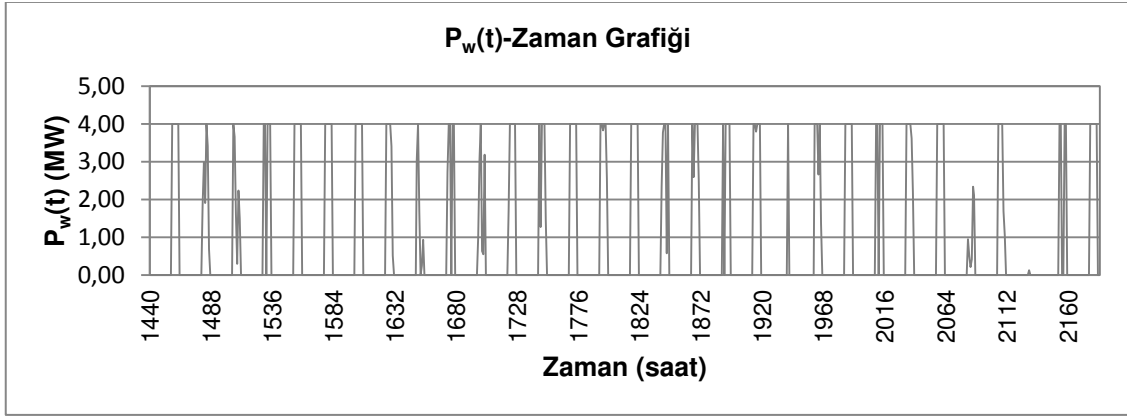


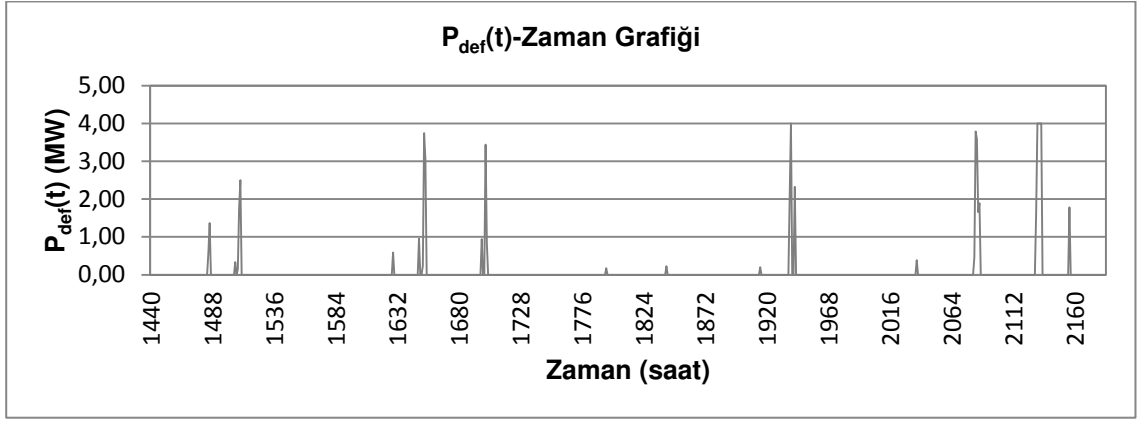




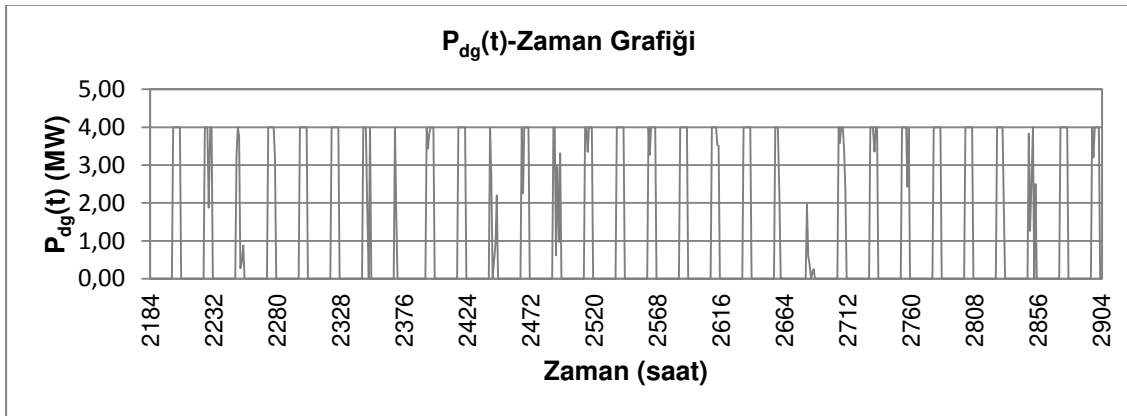
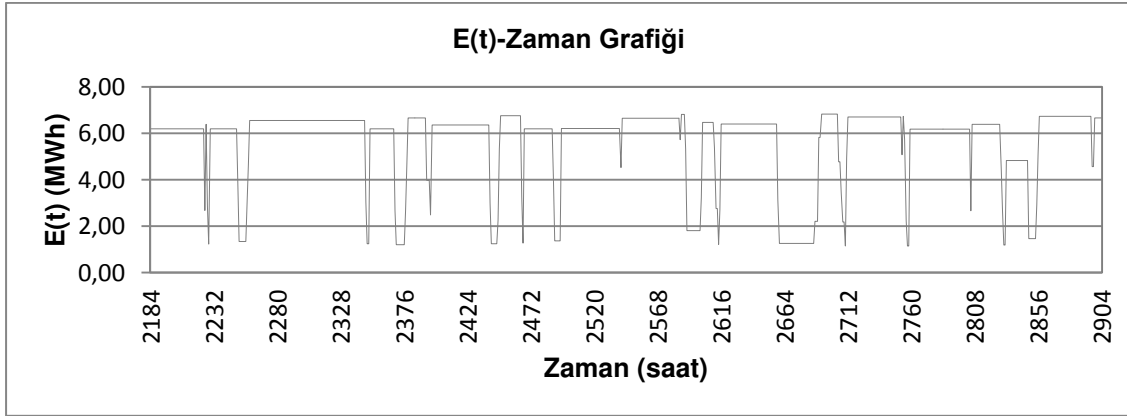
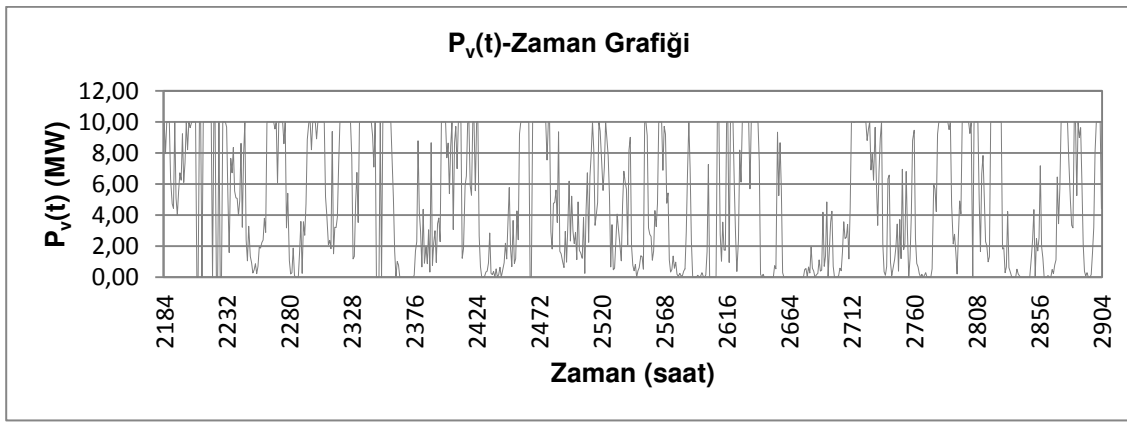
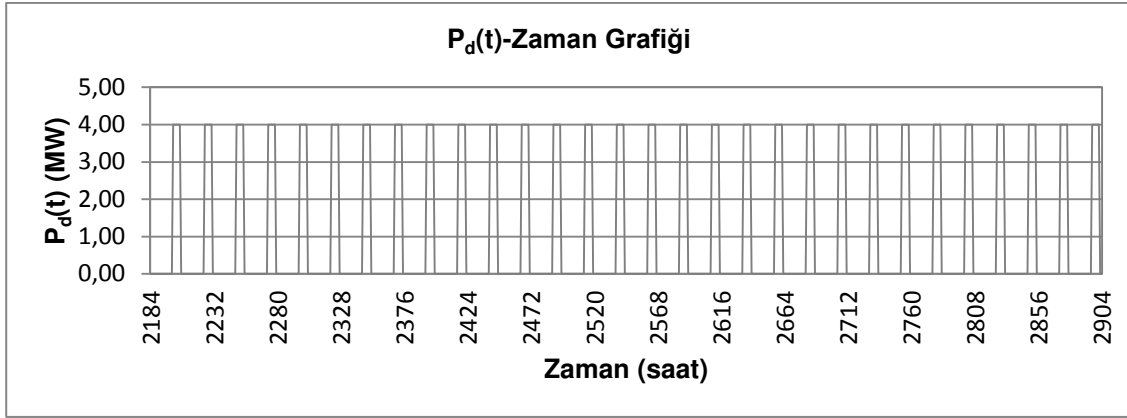
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-MART AYI

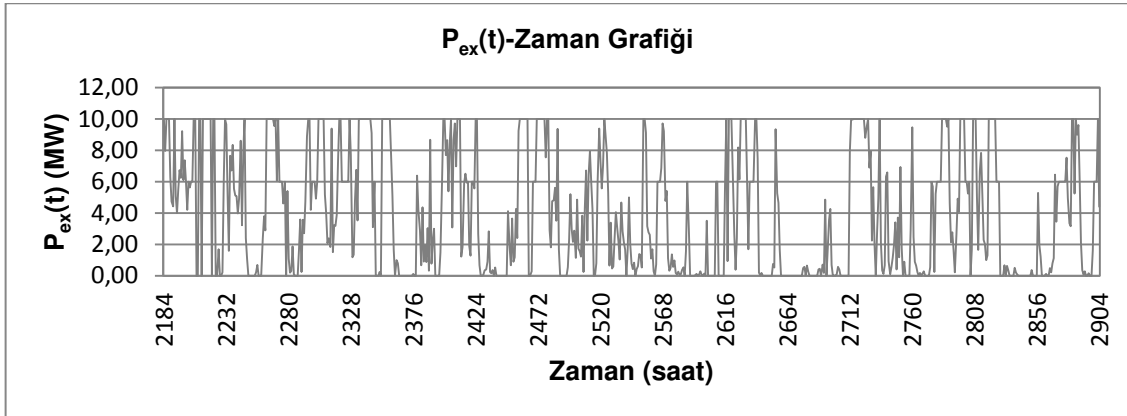
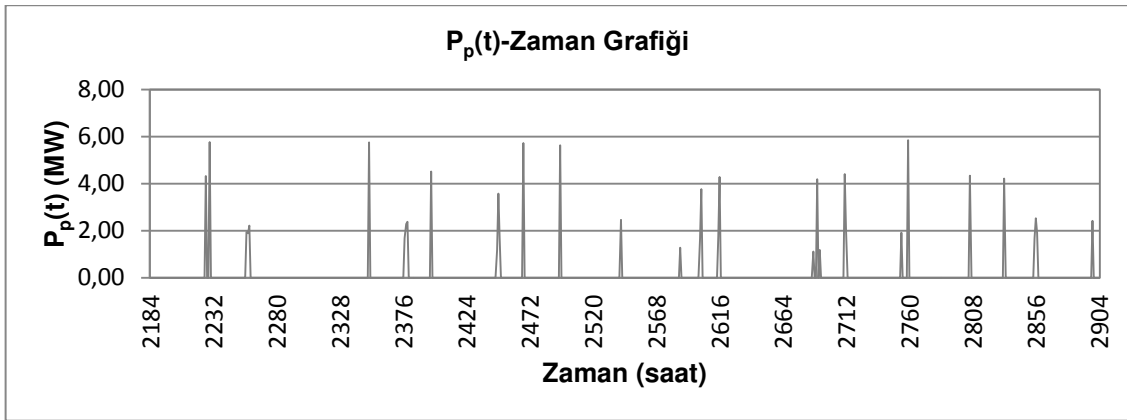
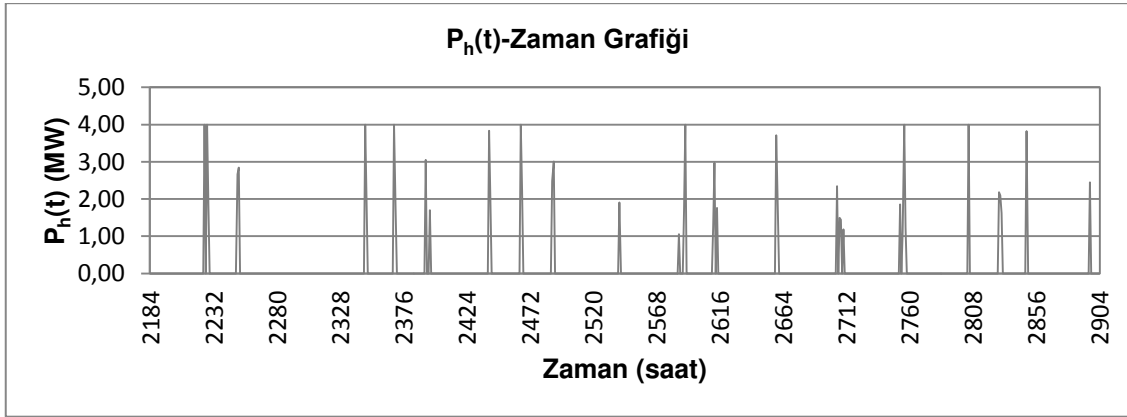
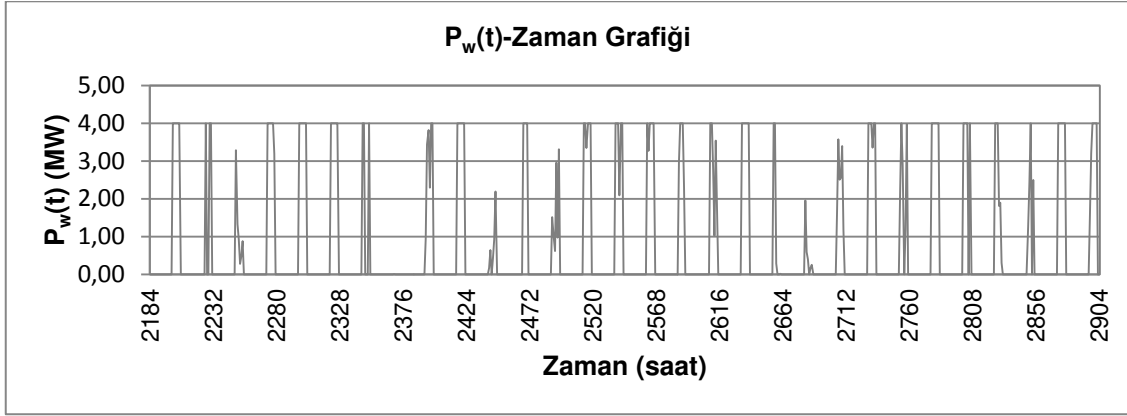


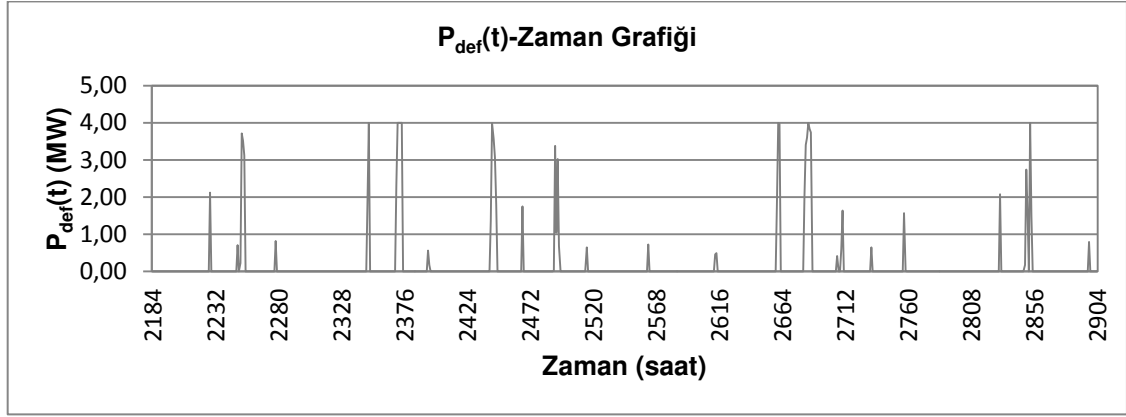




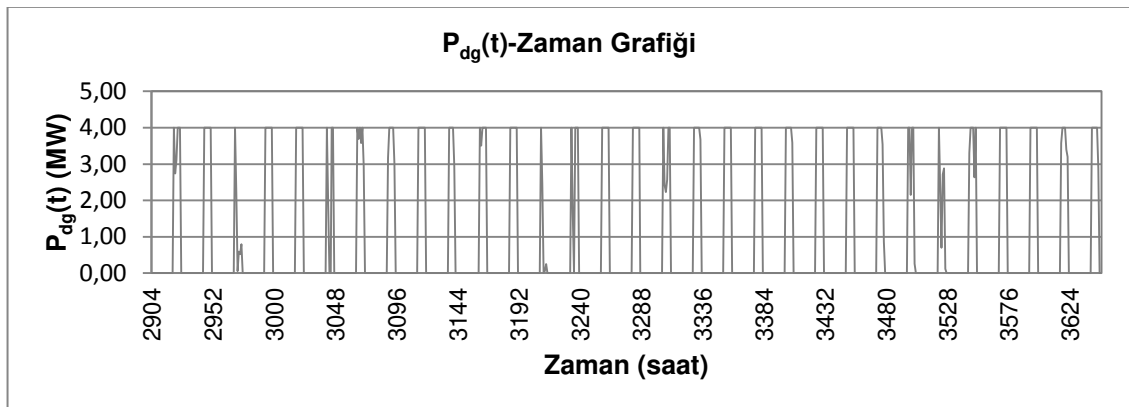
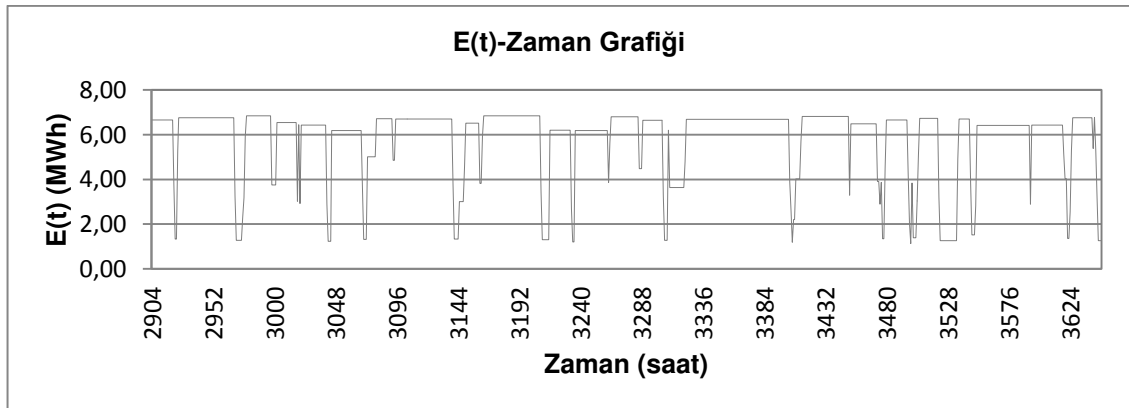
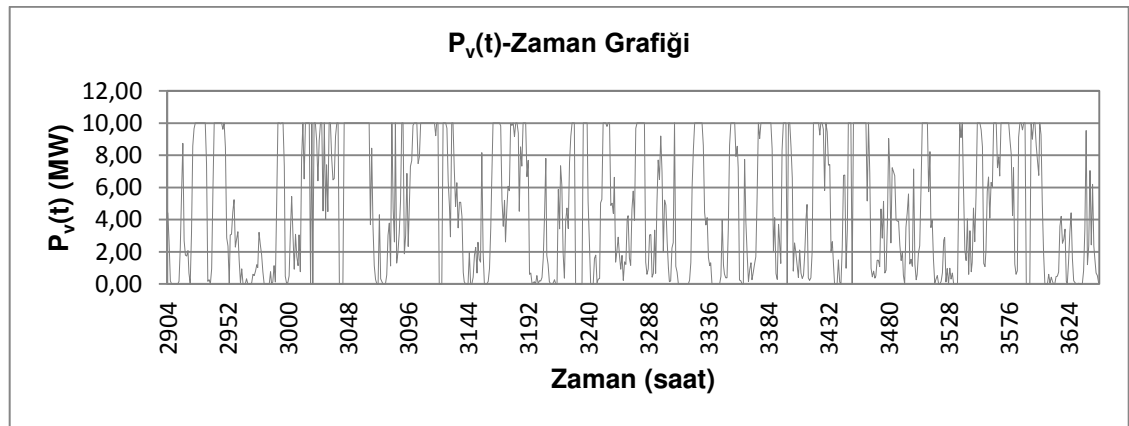
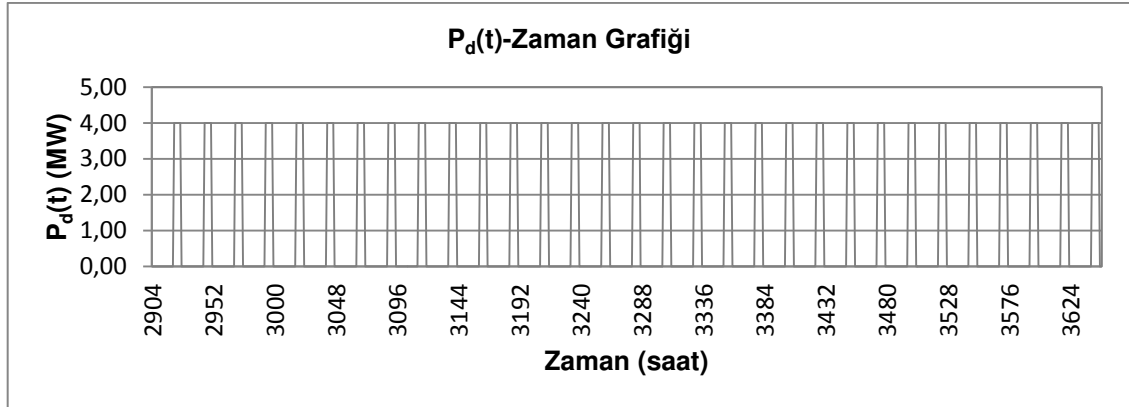
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-NİSAN AYI

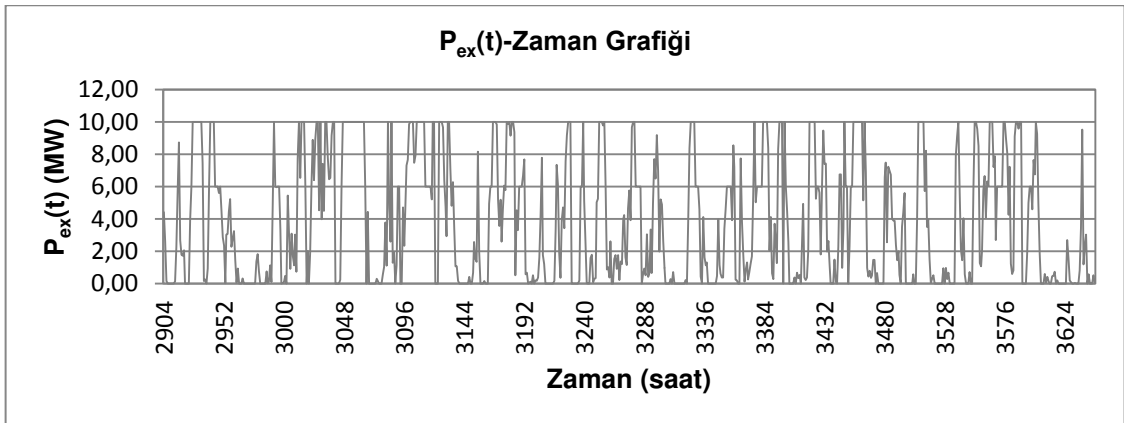
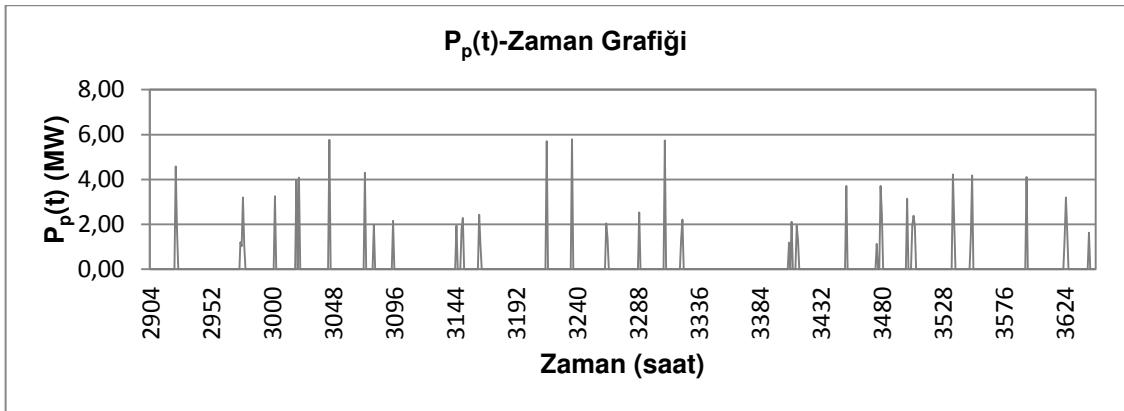
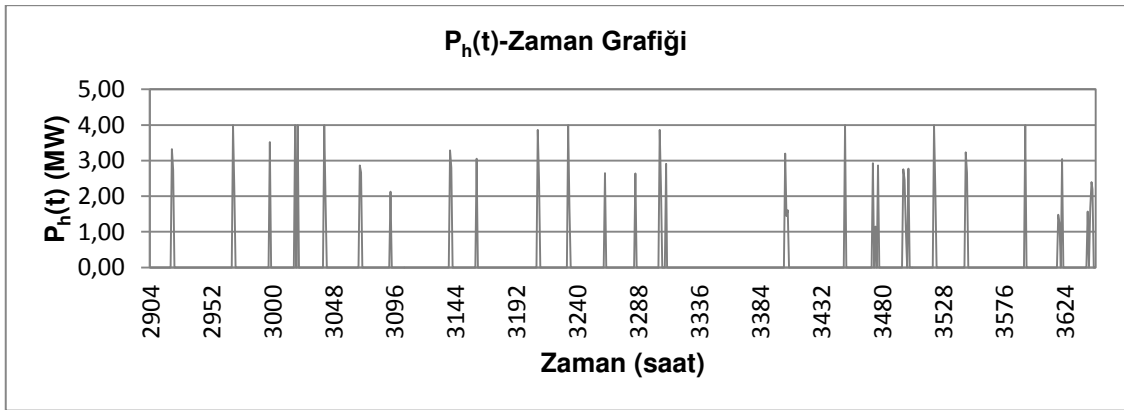
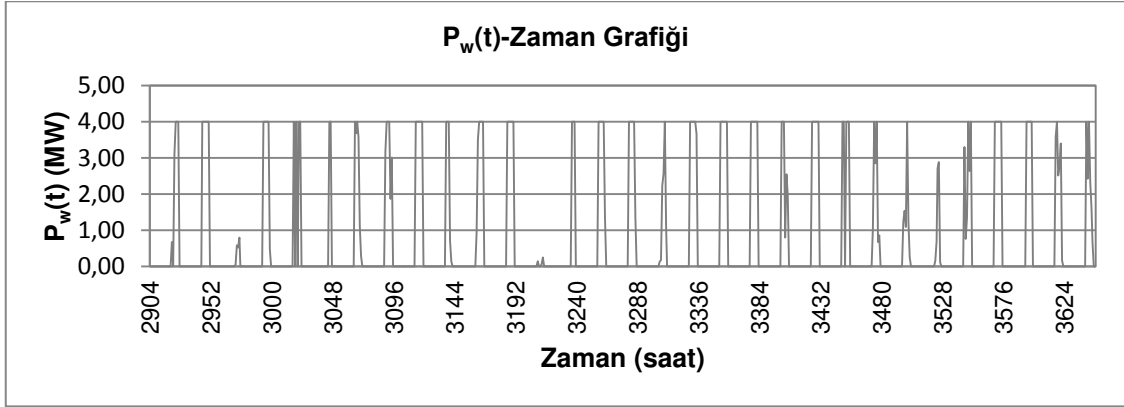


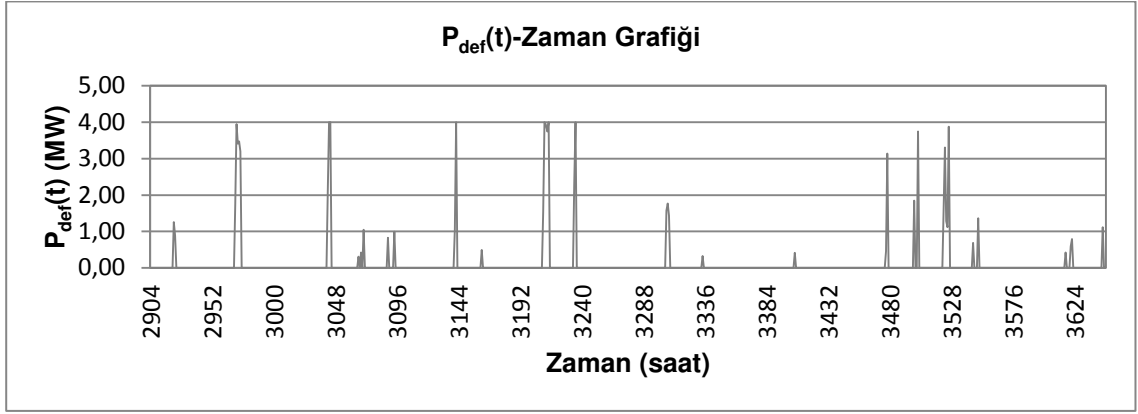




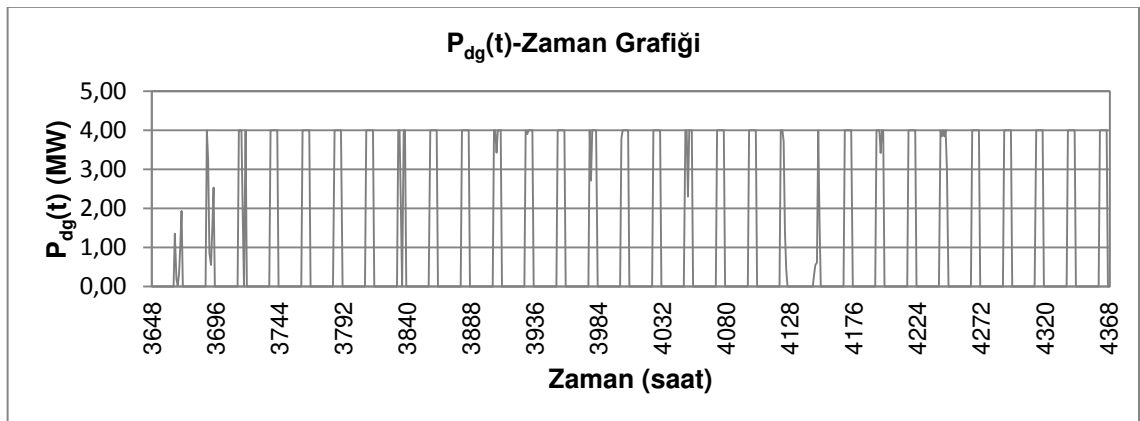
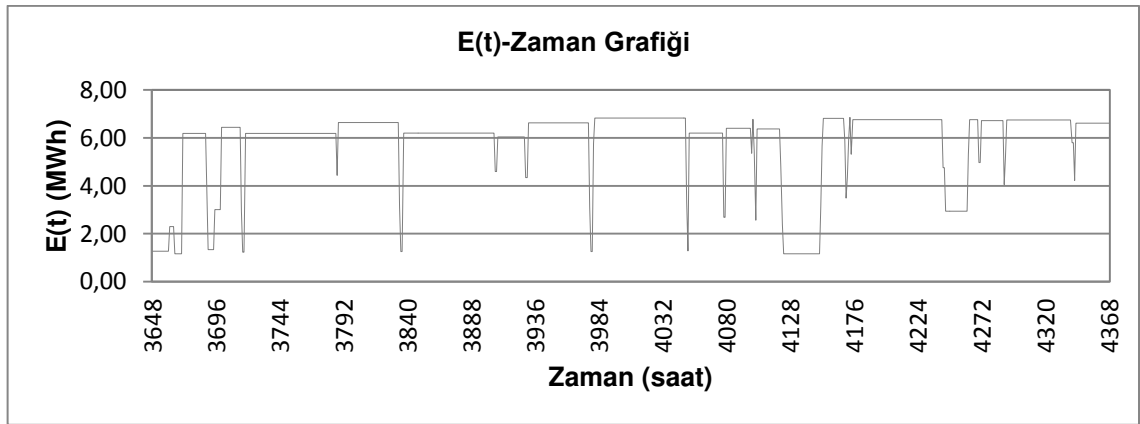
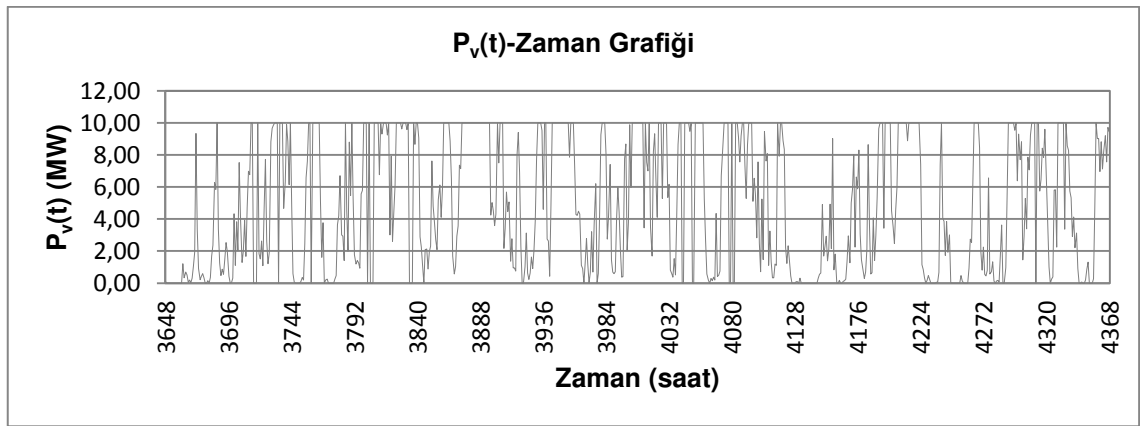
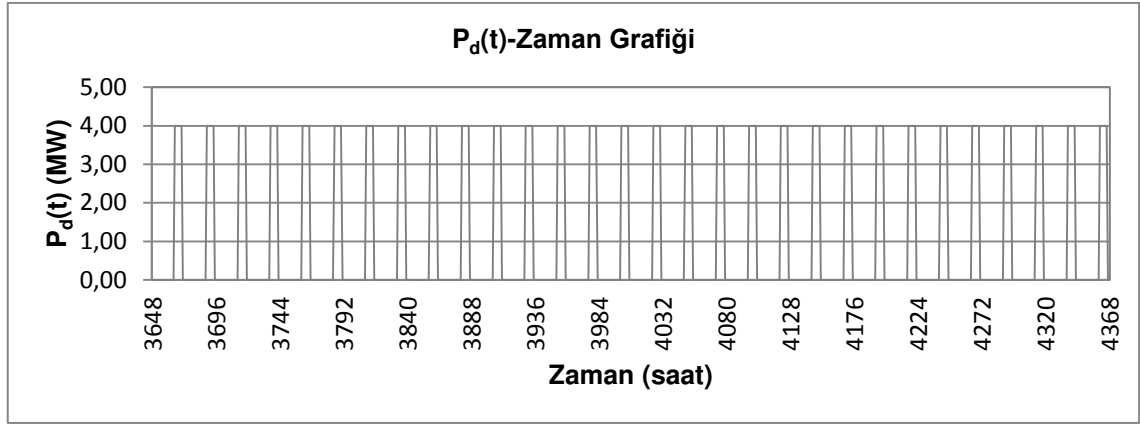
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-MAYIS AYI

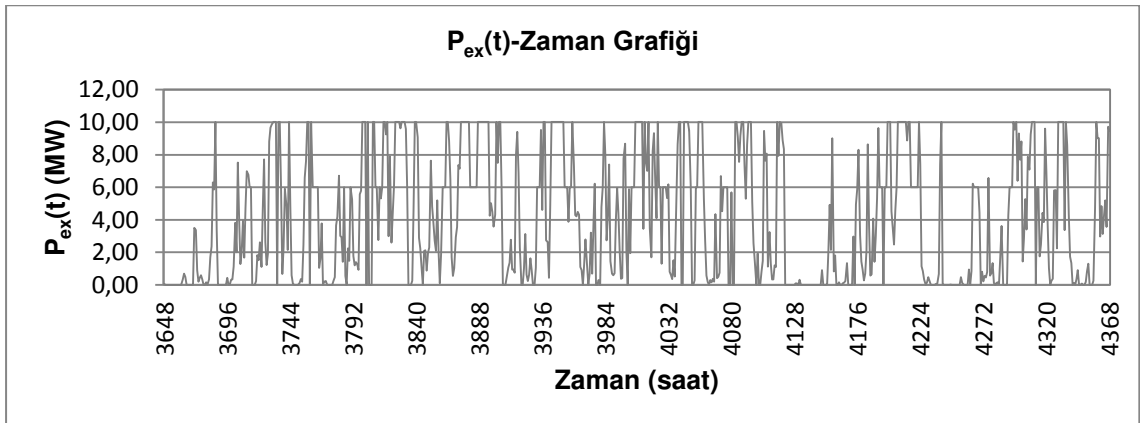
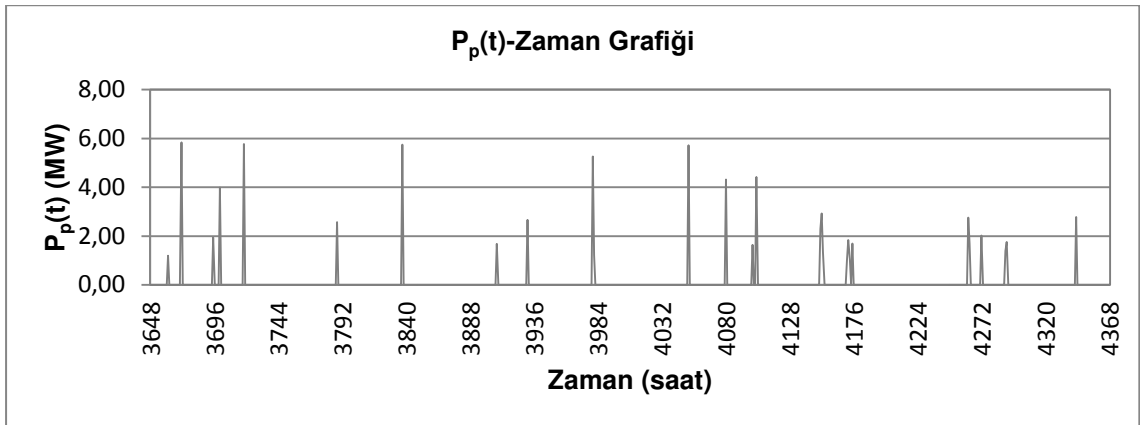
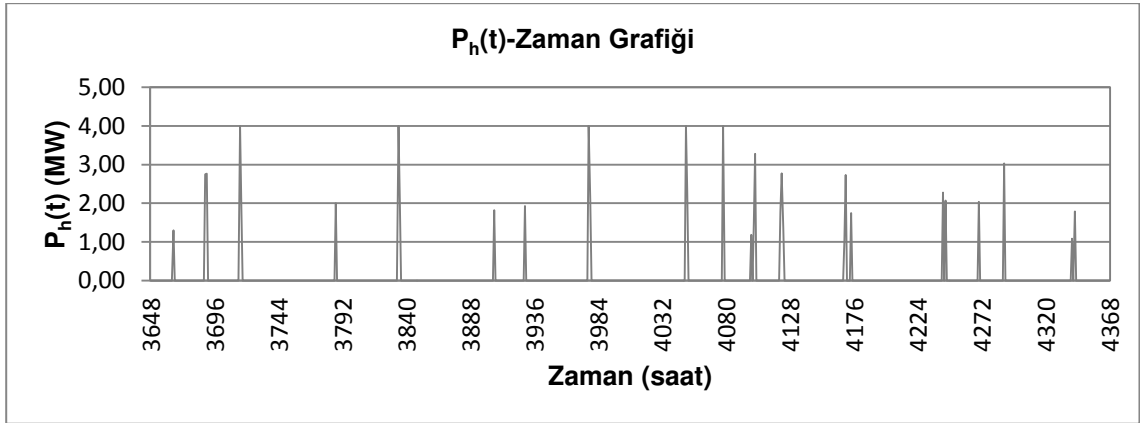
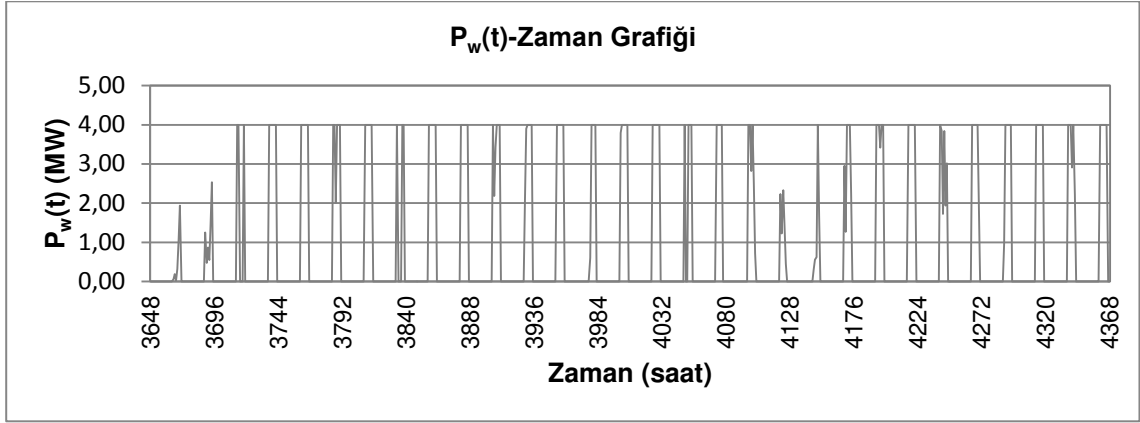


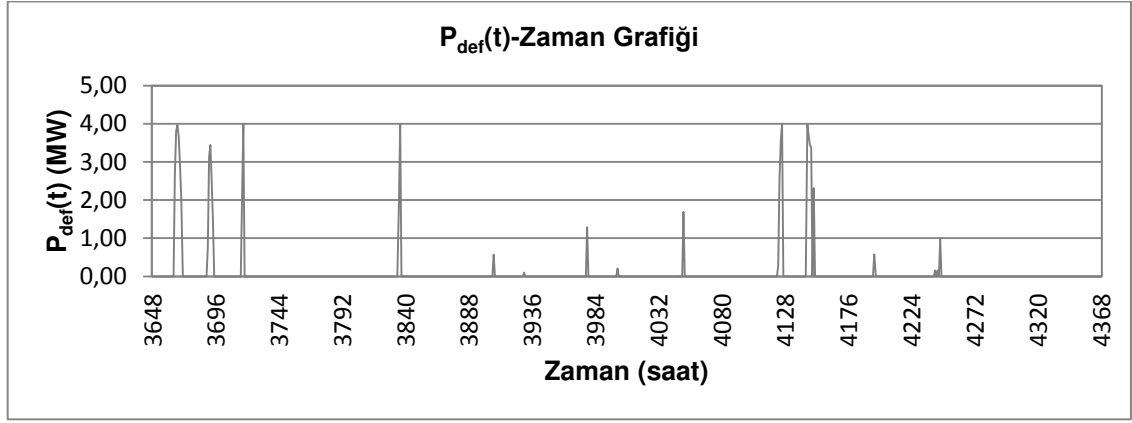




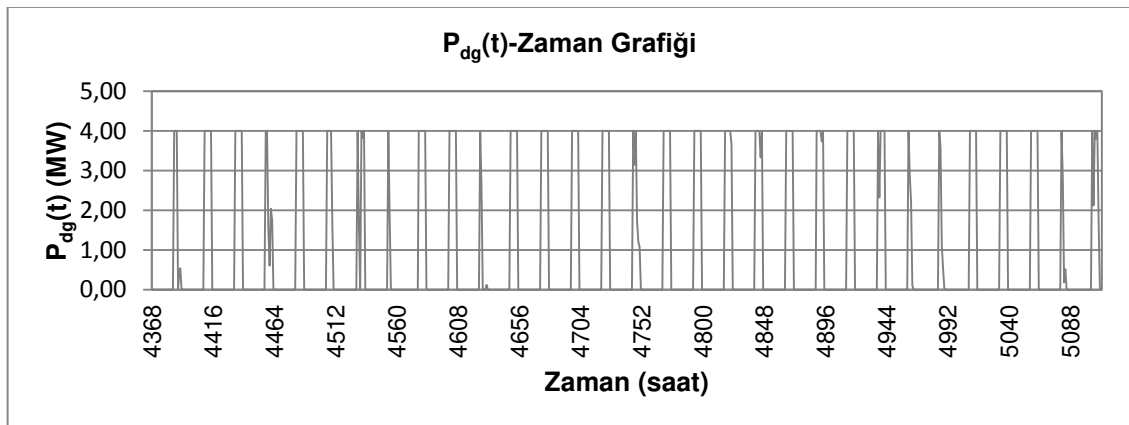
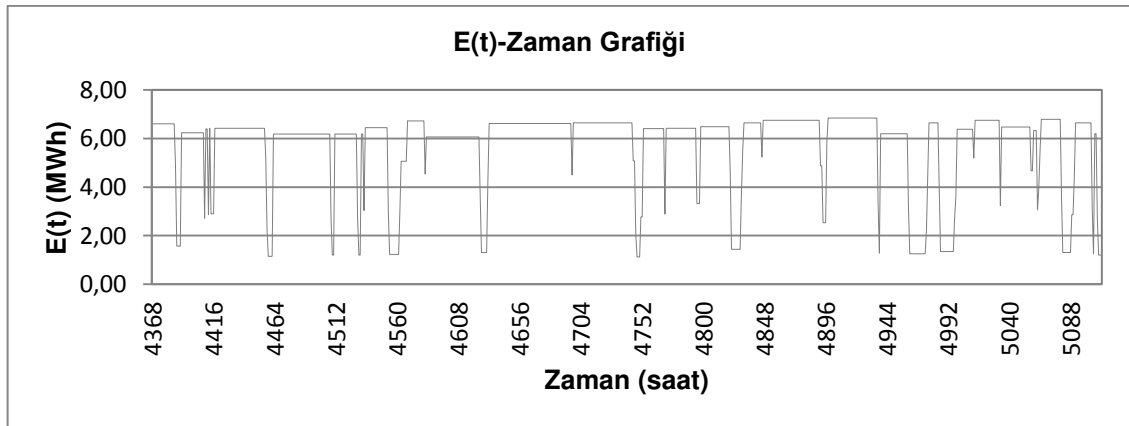
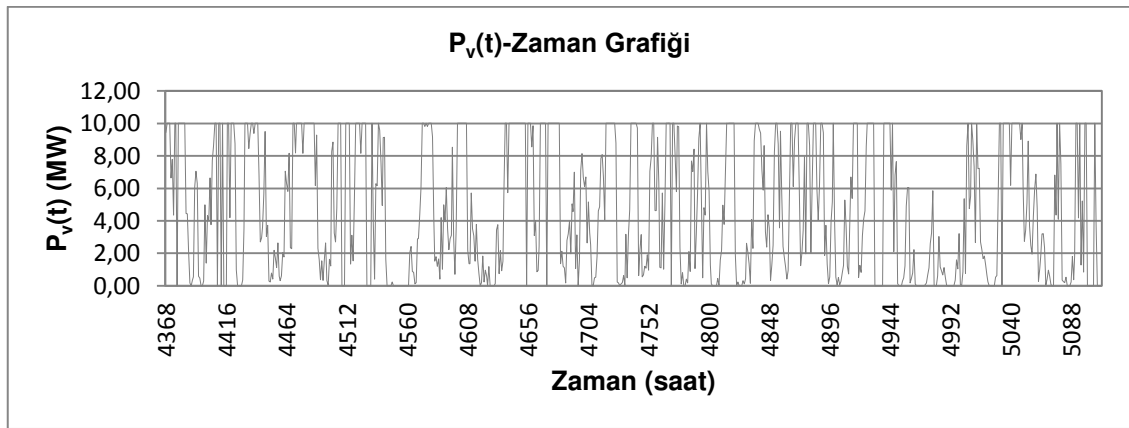
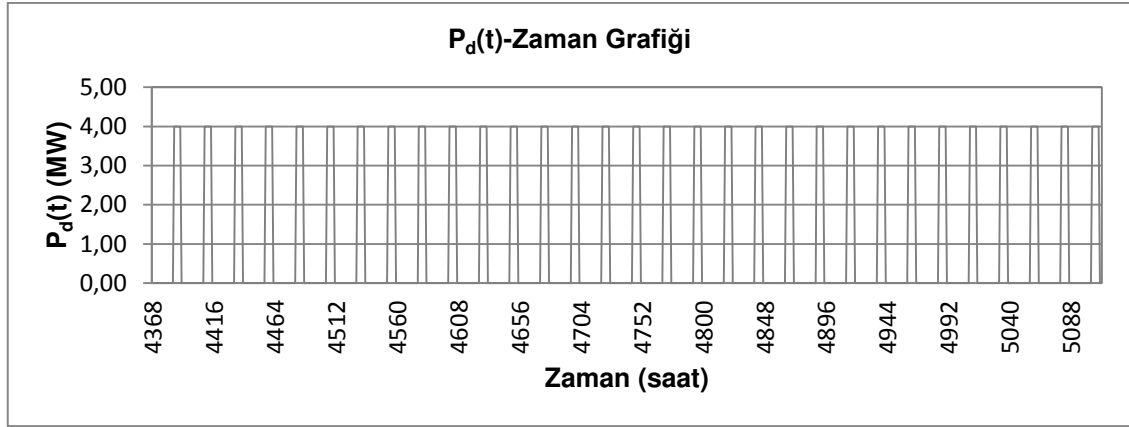
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-HAZİRAN AYI

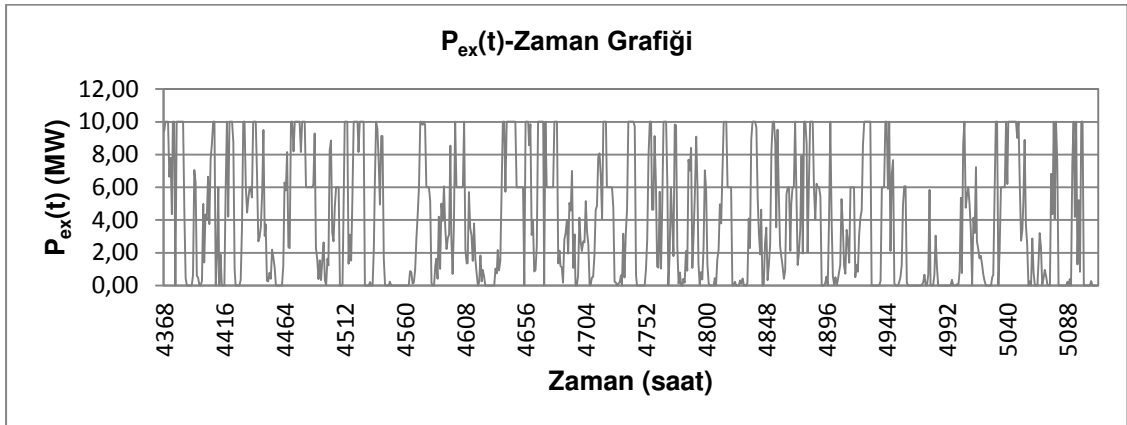
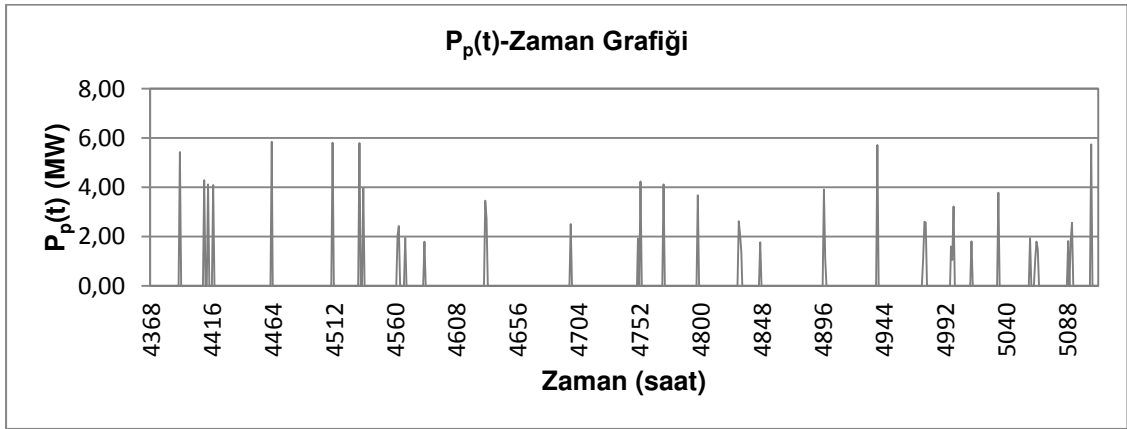
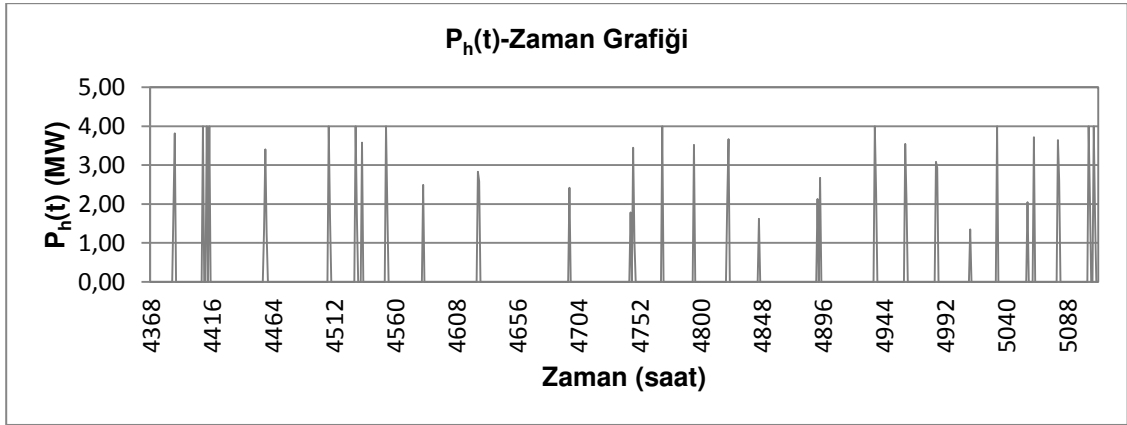
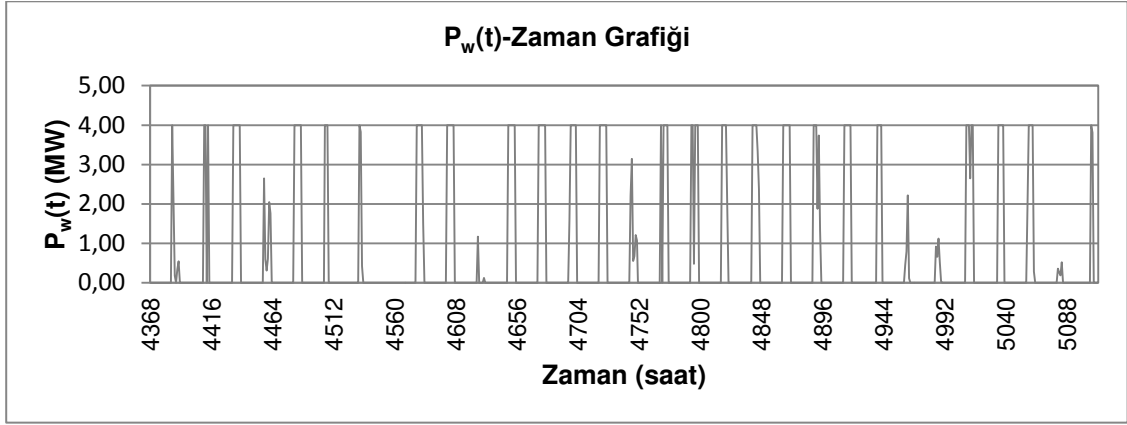


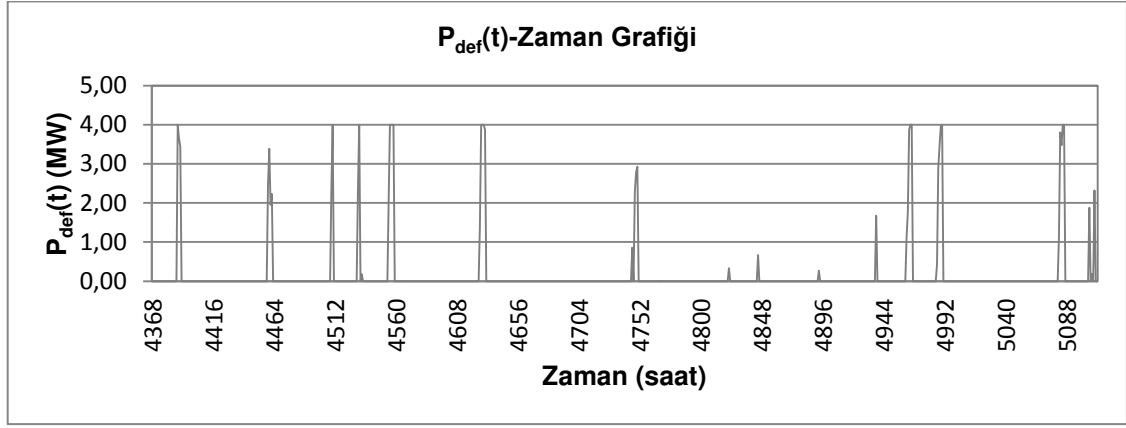




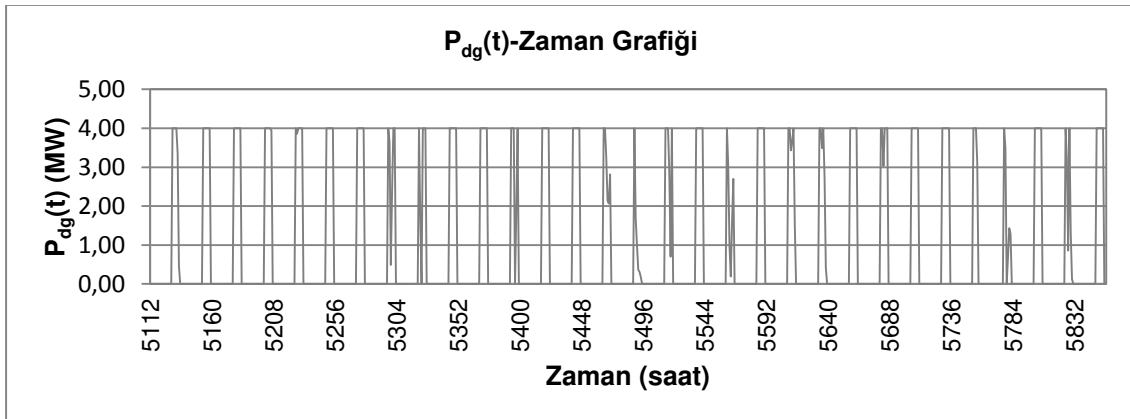
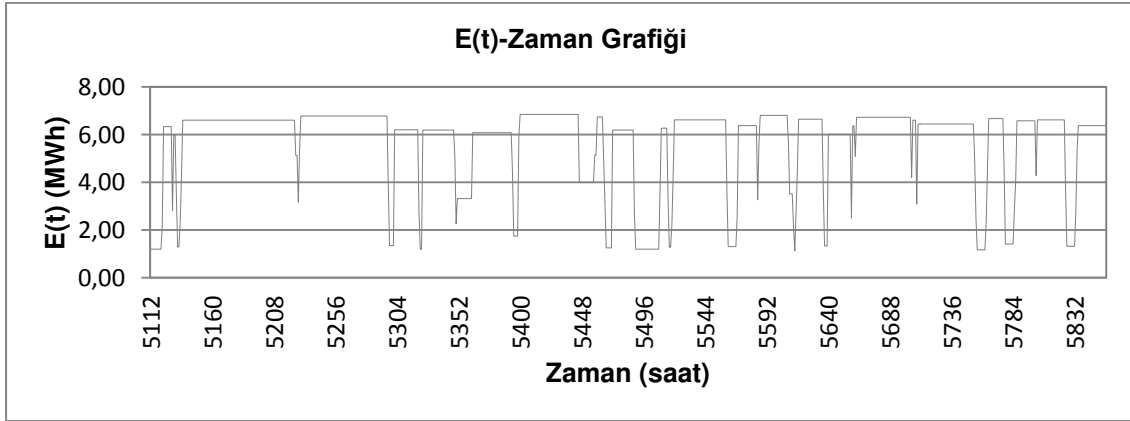
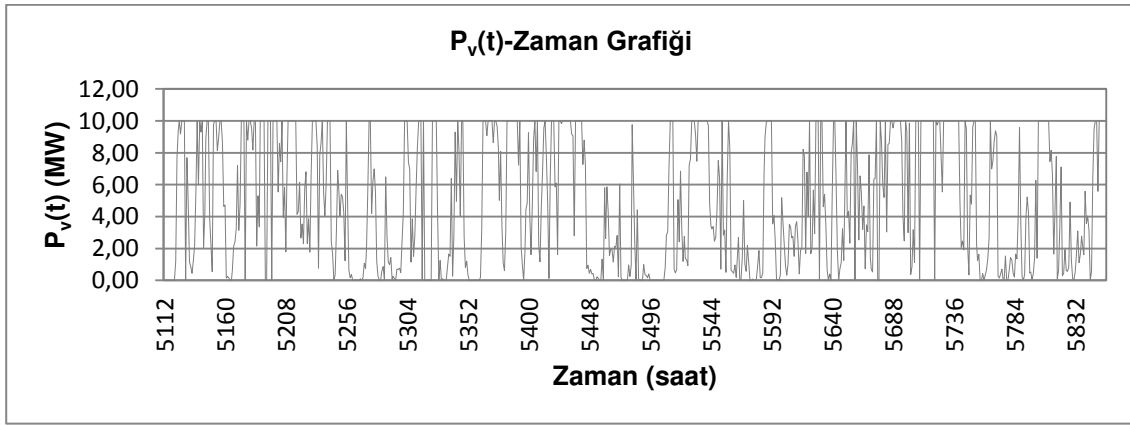
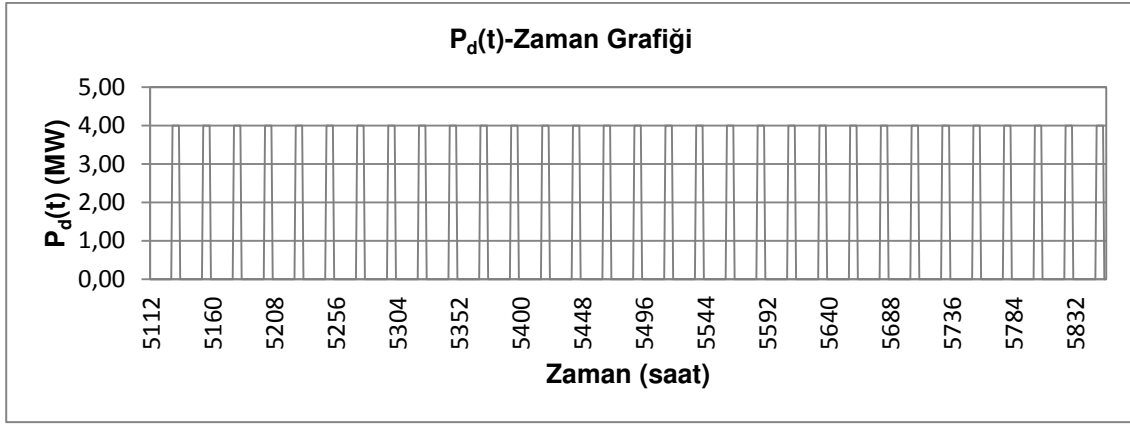
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-TEMMUZ AYI

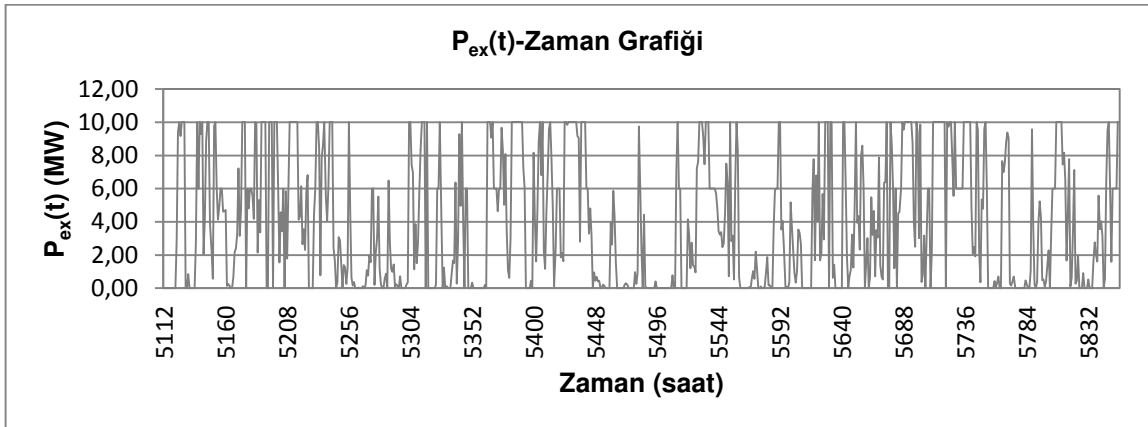
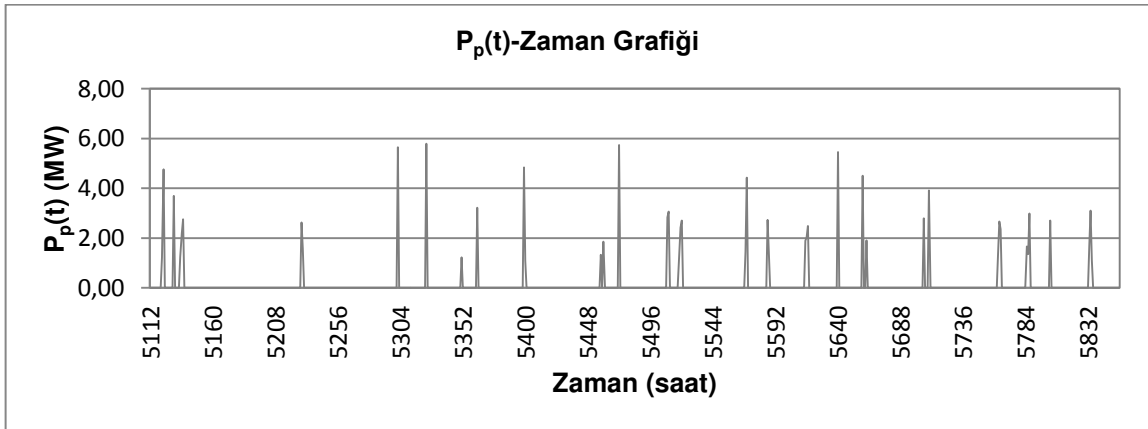
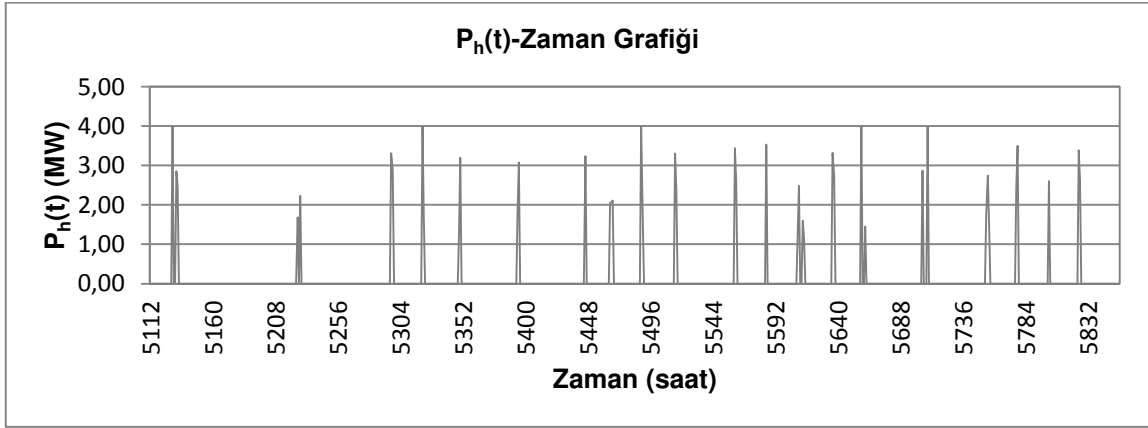
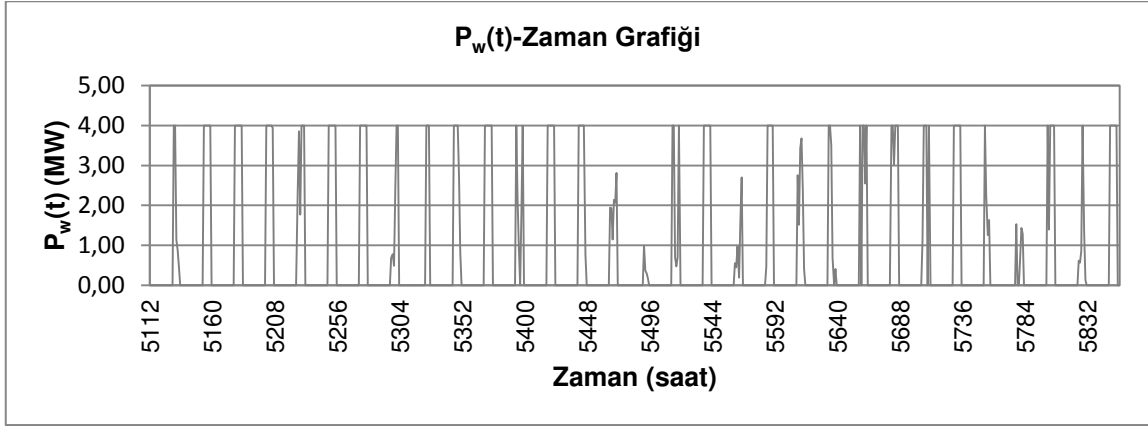


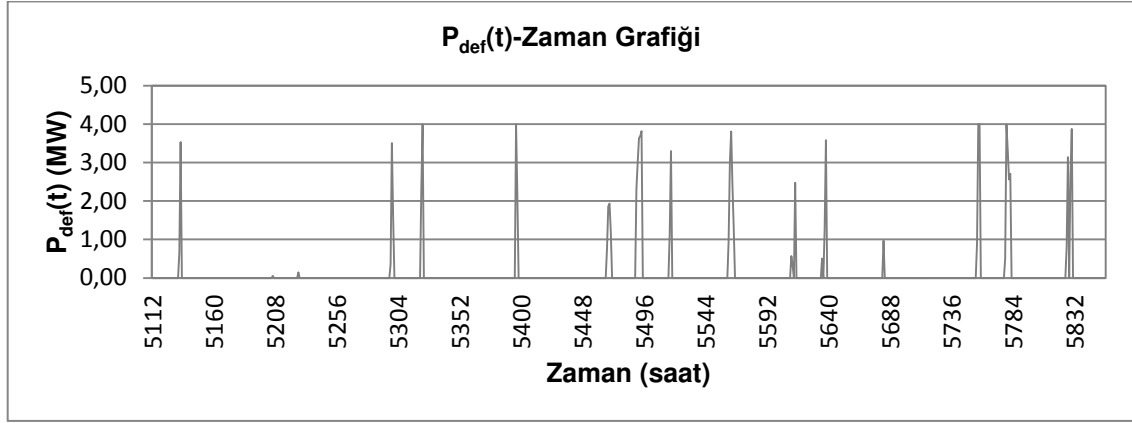




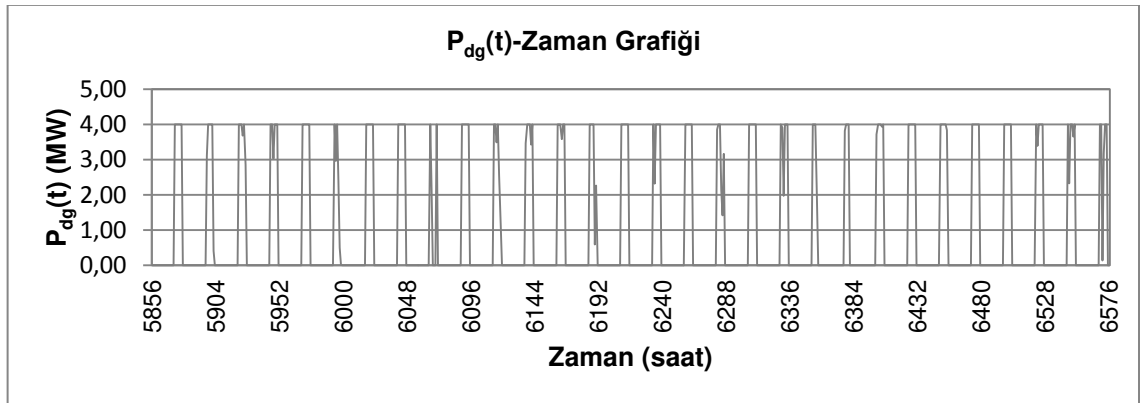
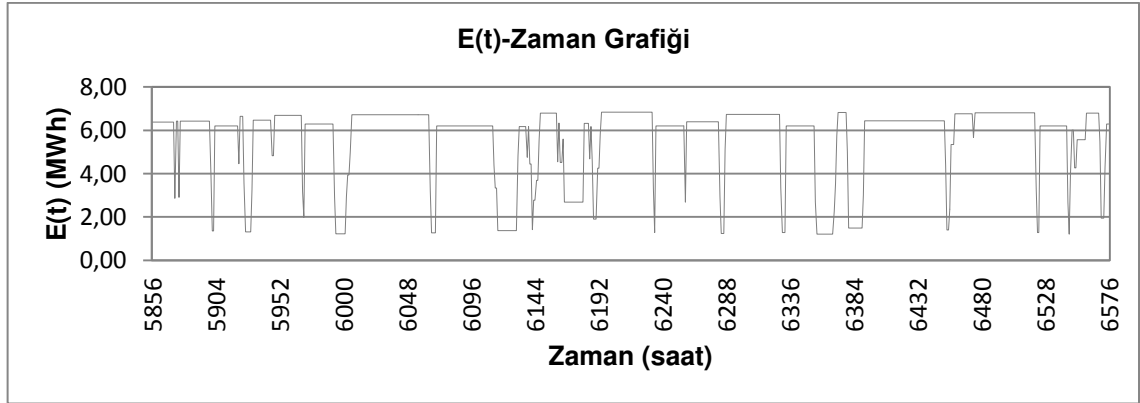
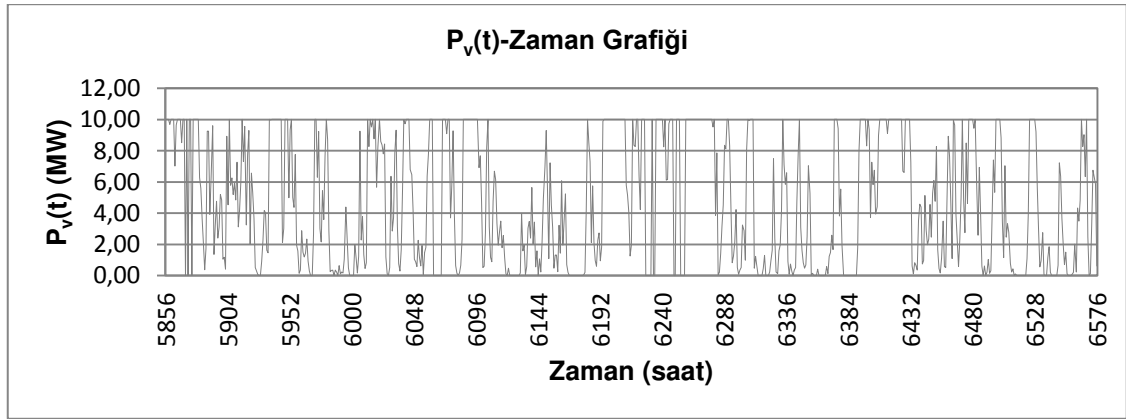
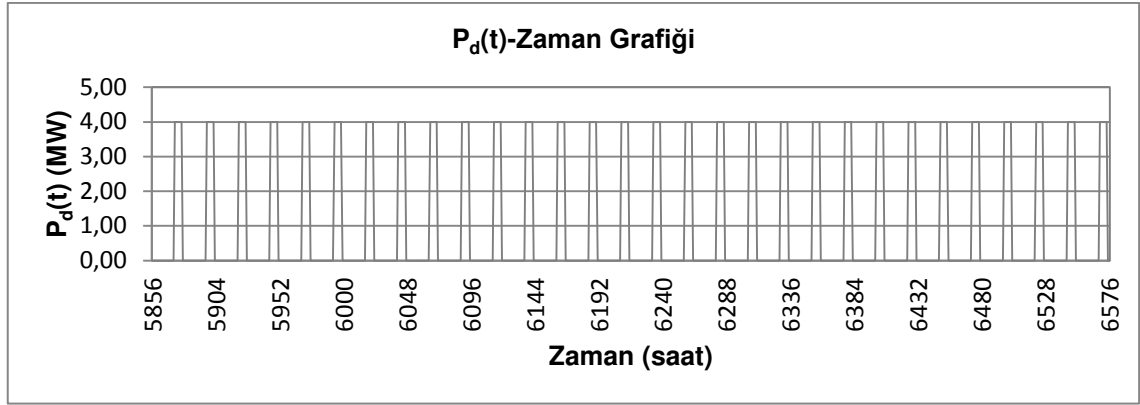
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-AĞUSTOS AYI

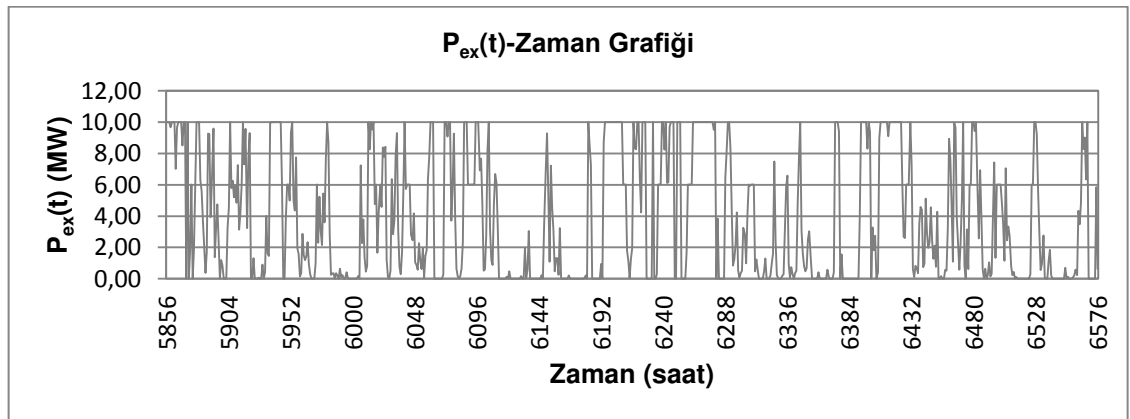
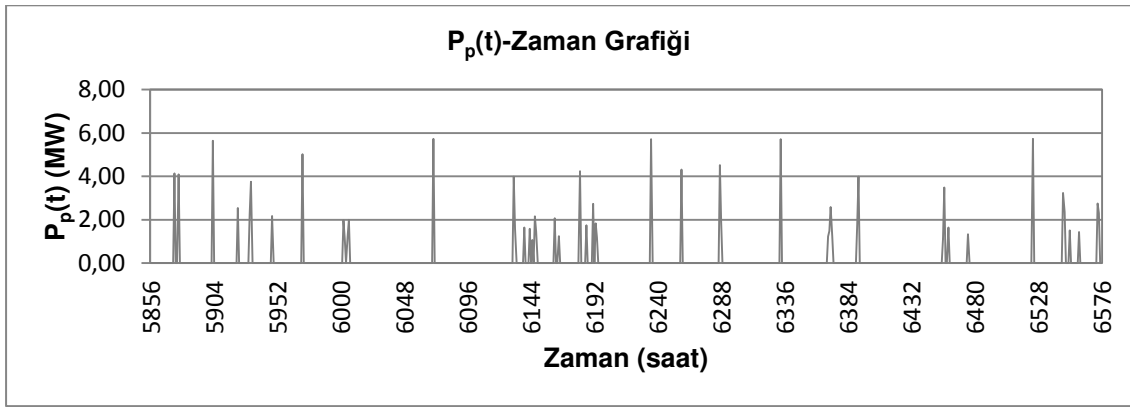
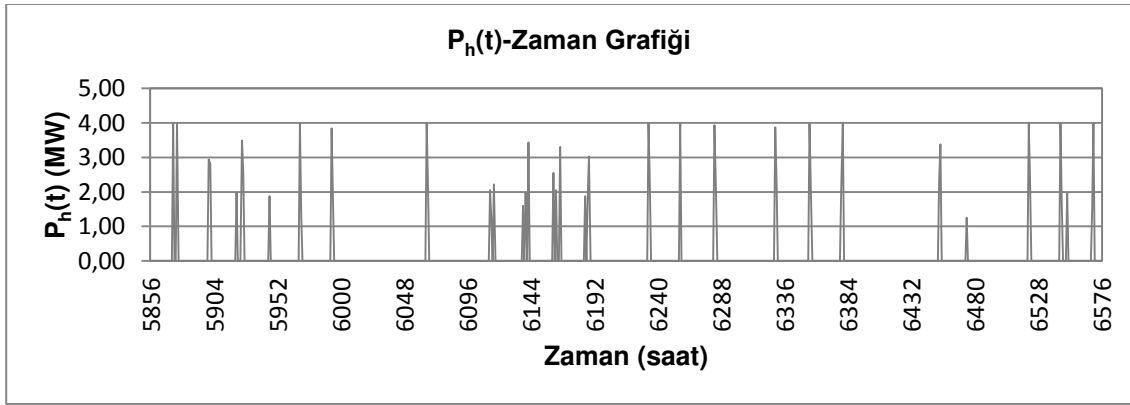
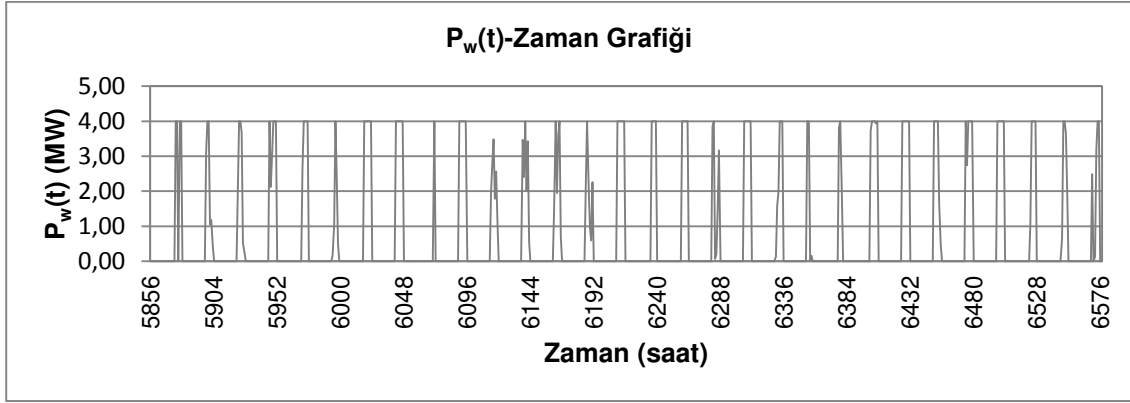


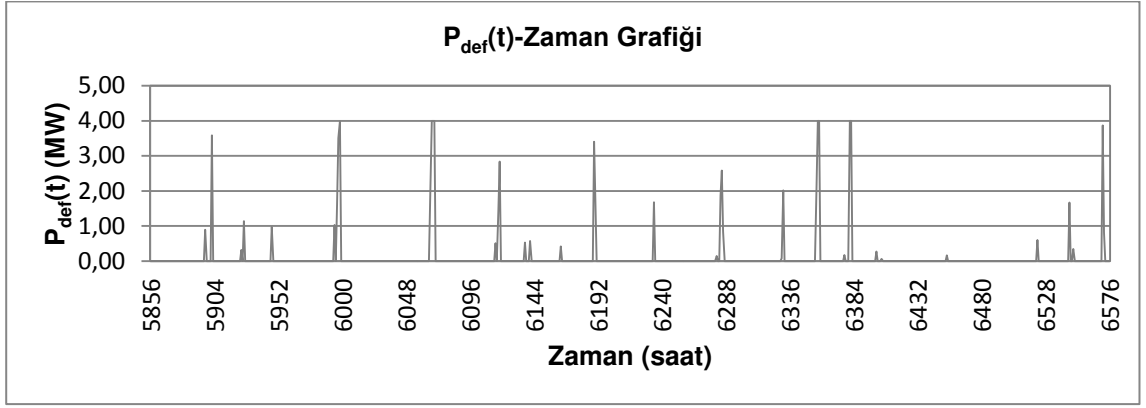




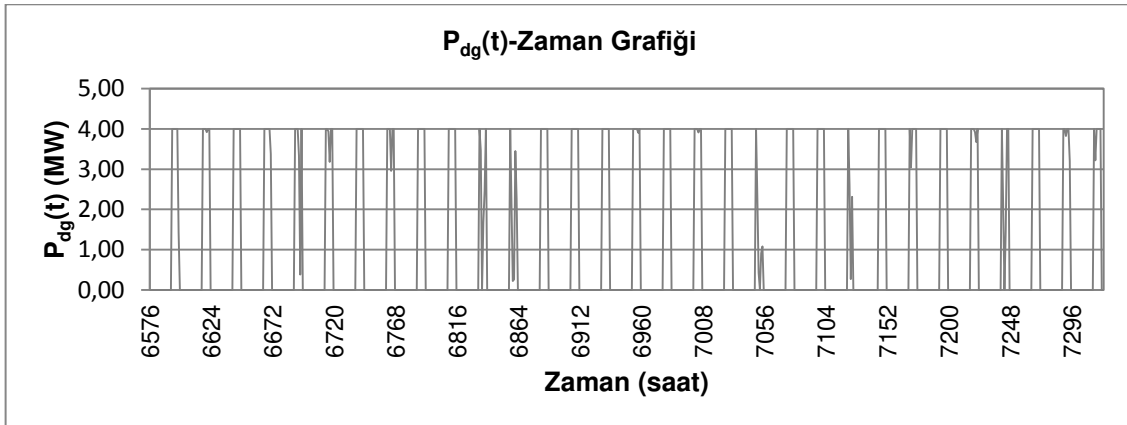
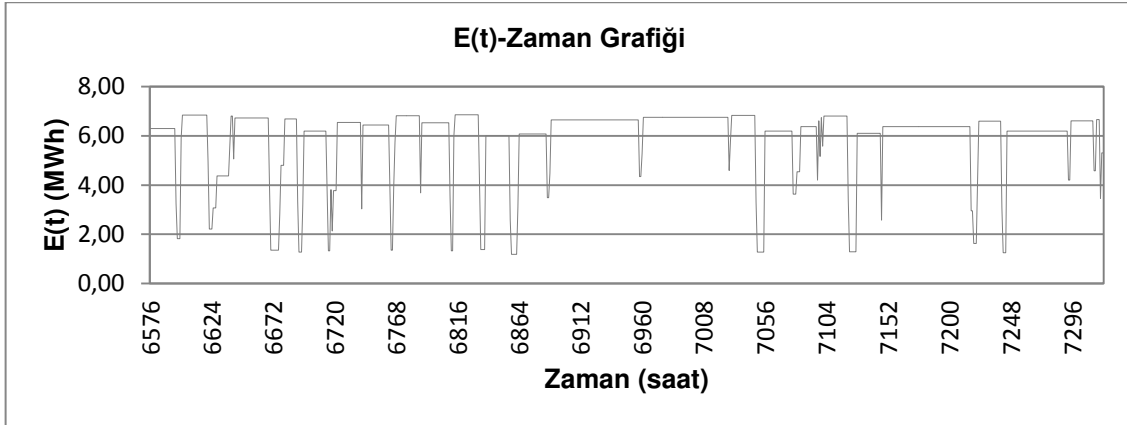
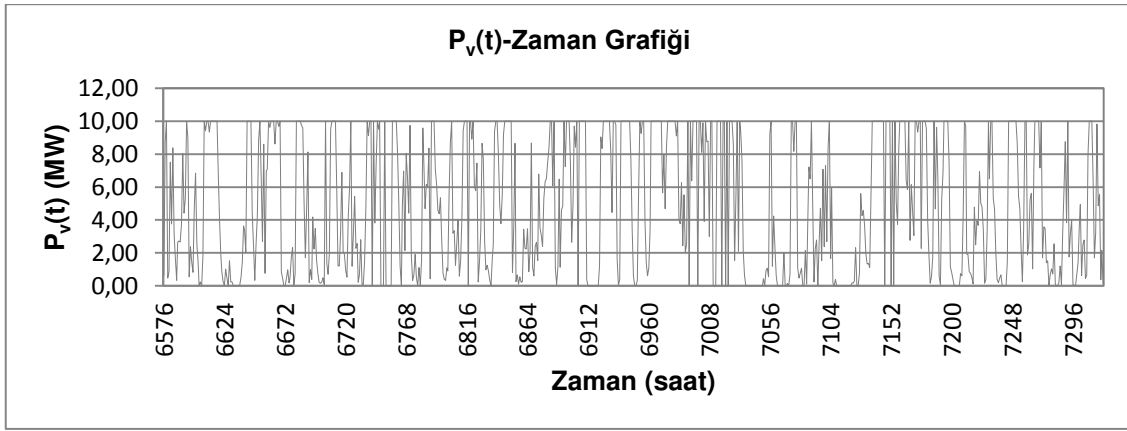
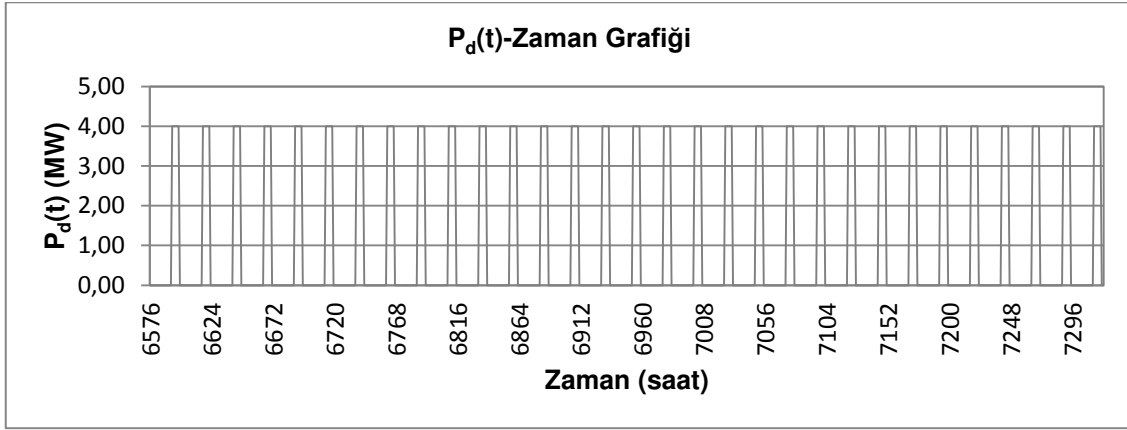
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-EYLÜL AYI

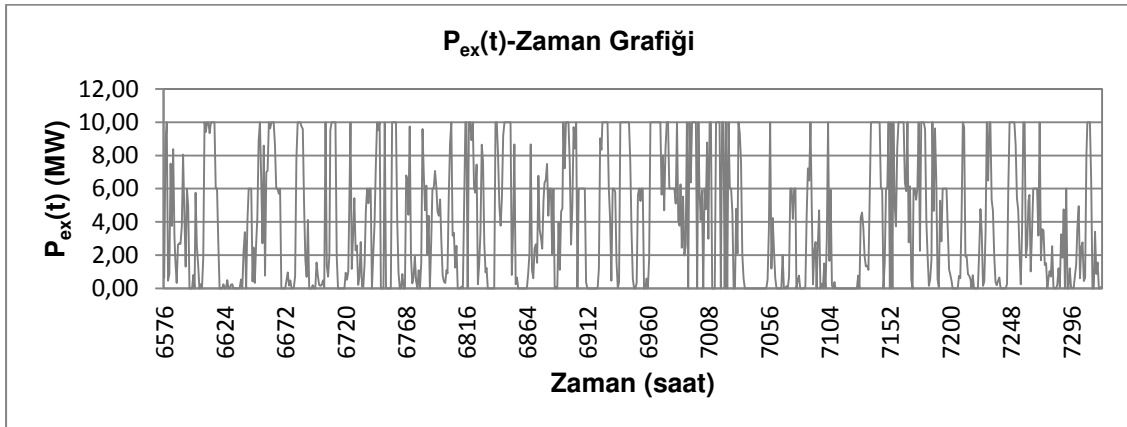
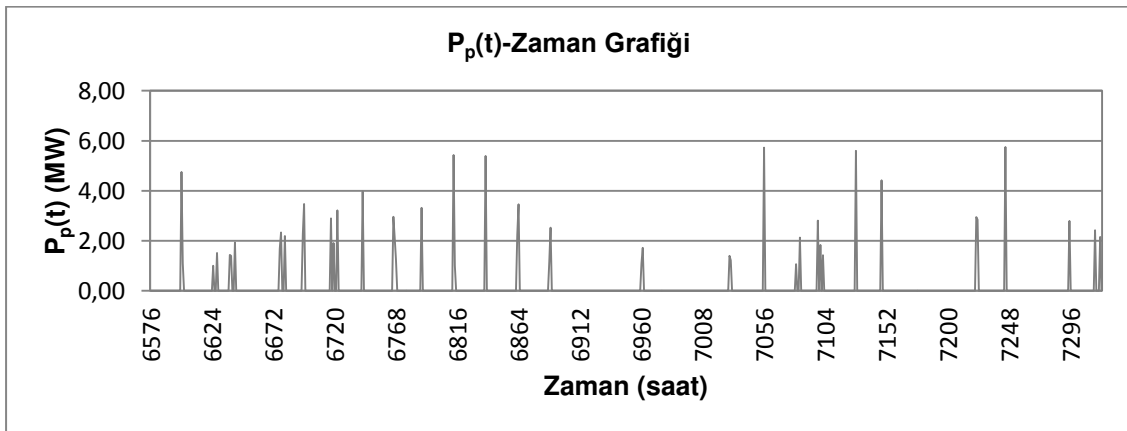
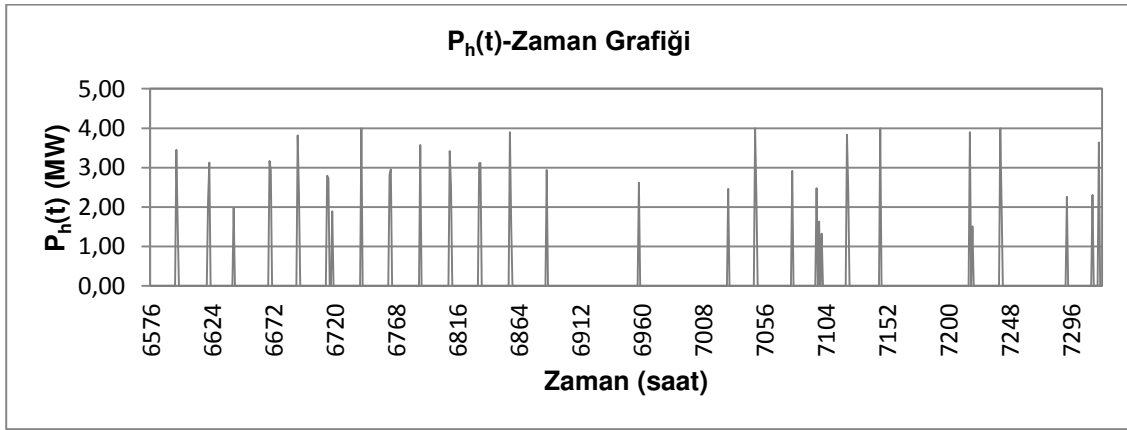
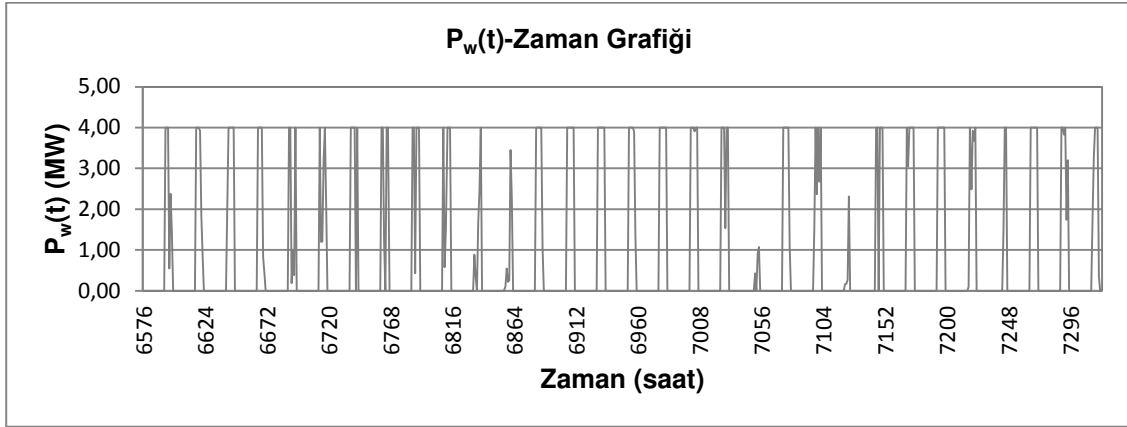


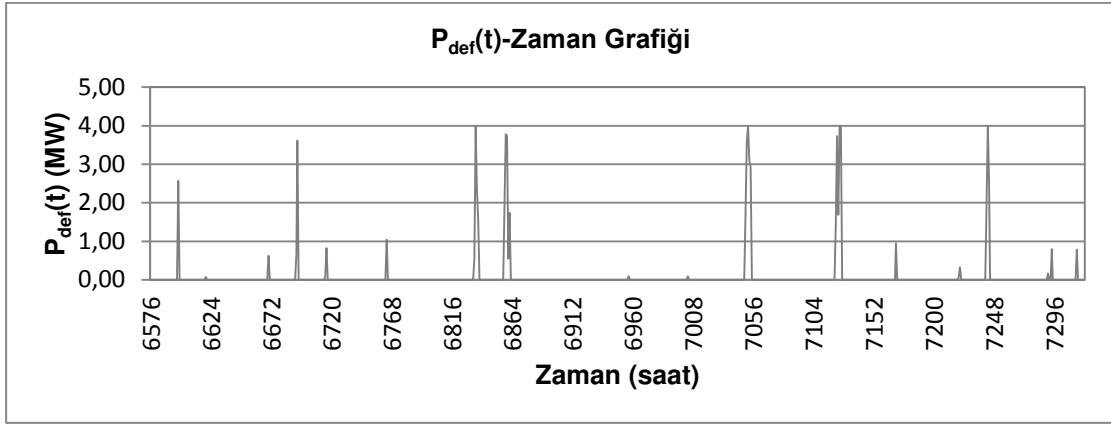




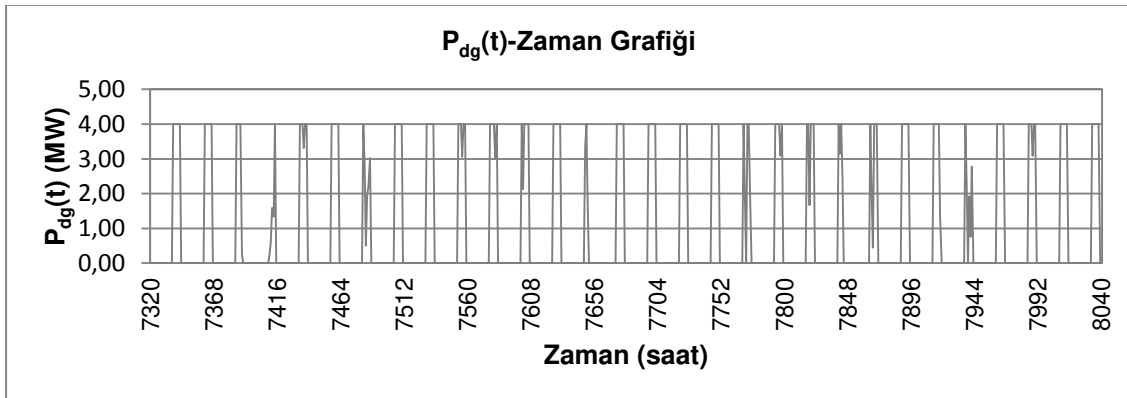
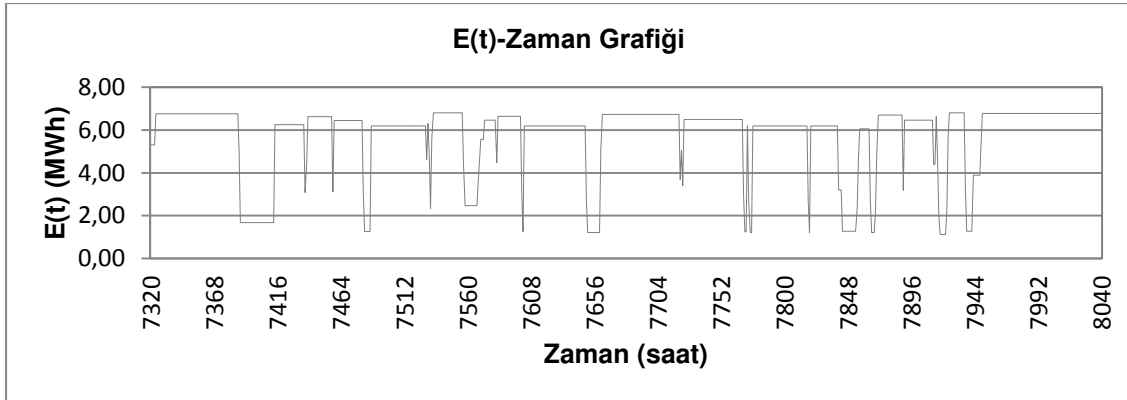
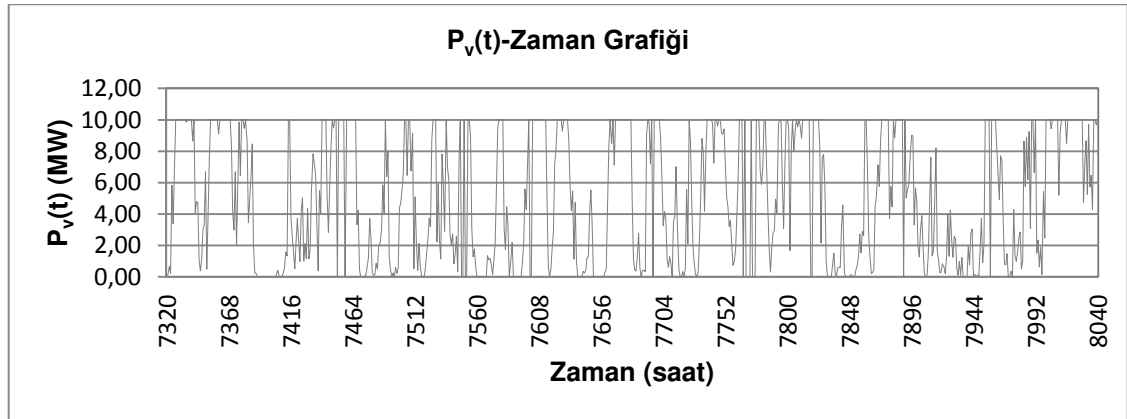
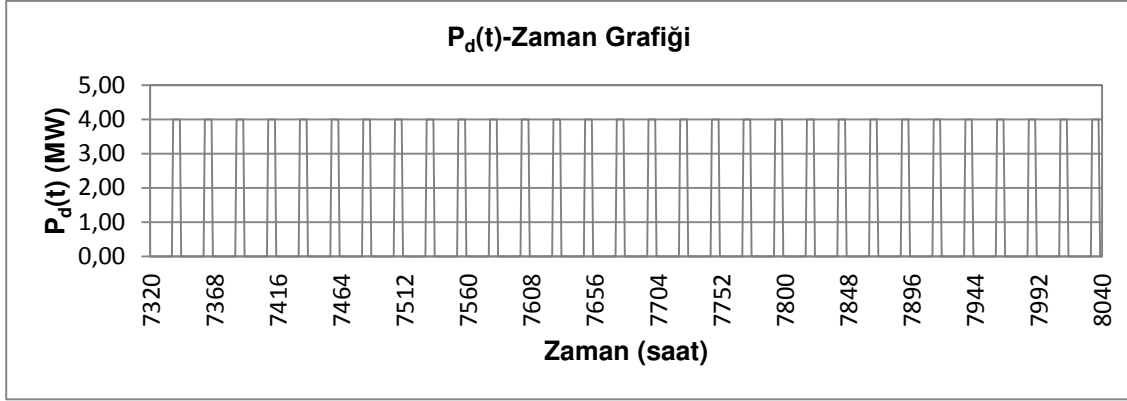
EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-EKİM AYI

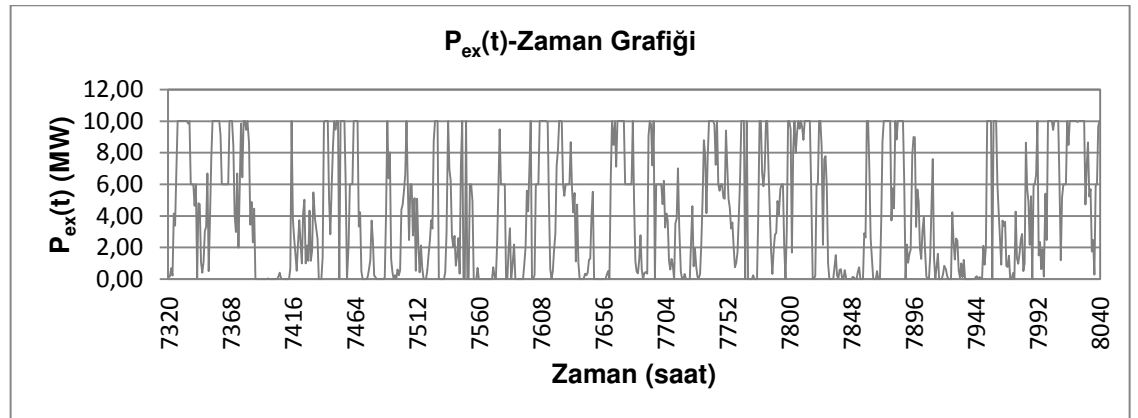
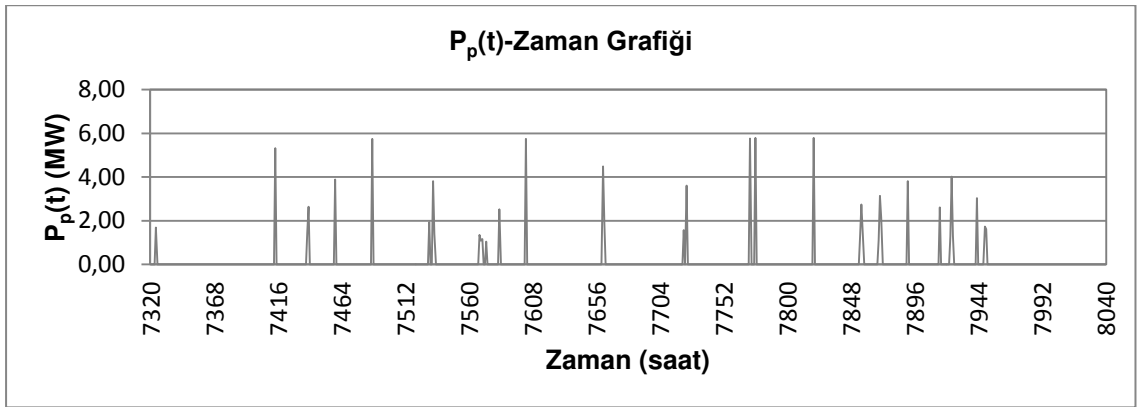
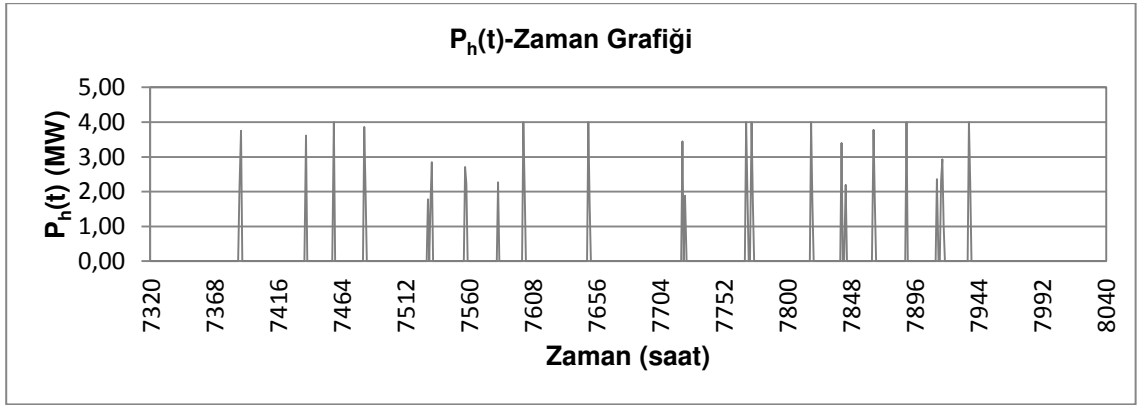
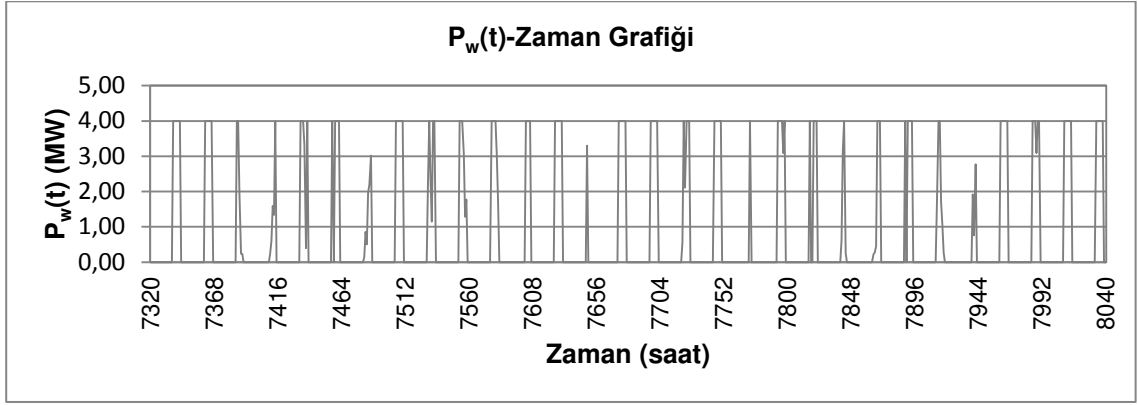


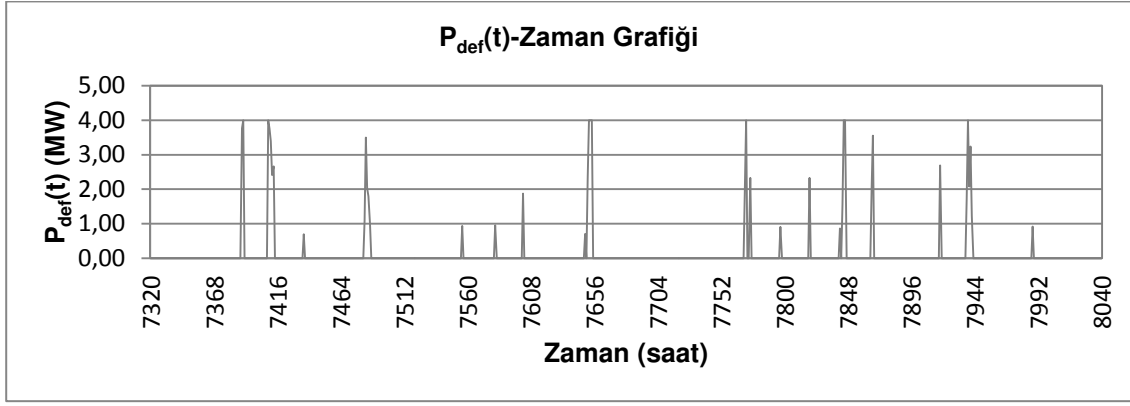




EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-KASIM AYI







EK-2 M.S. YILLIK GÜÇ-ENERJİ DEĞERLERİ GRAFİKLERİ-ARALIK AYI

