

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

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ UYGULAMALAR İÇİN HİBRİT BİR RÜZGÂR  
TÜRBİNİ/FOTOVOLTAİK/YAKIT HÜCRESİ/BATARYA SİSTEMİNİN  
OPTİMİZASYONU, TASARIMI VE UYGULAMASI**

**OZAN ERDİNÇ**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. MEHMET UZUNOĞLU**

**İSTANBUL, 2012**

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

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ UYGULAMALAR İÇİN HİBRİT BİR RÜZGÂR  
TÜRBİNİ/FOTOVOLTAİK/YAKIT HÜCRESİ/BATARYA SİSTEMİNİN  
OPTİMİZASYONU, TASARIMI VE UYGULAMASI**

Ozan ERDİNÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 25.12.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Celal KOCATEPE  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Önder GÜLER  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan HOCAOĞLU  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2011-04-02-DOP01 ve 2010-04-02-KAP04 numaralı projeleri ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Günümüzde dünyanın karşı karşıya olduğu çevresel olumsuzluklar göz önüne alınarak, enerji üretimi açısından alternatif ve çevre dostu çözümler üretmek üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün hız kazanmaktadır. Dünyada son yıllarda güneş, rüzgâr, vb. alternatif enerji kaynaklarının yedek bir güç (back-up) ünitesi ile hibrit bir şekilde kullanıldığı uygulamalar ön plana çıkmaktadır. Kurulum maliyeti günümüzde yüksek olan bu hibrit yapıların en az maliyet sağlayacak şekilde oluşturulması ve bu yapıların performanslarının prototipler üzerinde değerlendirilmesi de bahsi geçen sistemlerin yaygınlaşması açısından önem arz etmektedir. Bu açıdan, bu tez çalışmasında hibrit bir alternatif enerji sisteminin tasarımı, maliyet açısından optimum boyutlandırılması ve bir prototip vasıtası ile deneysel olarak da gerçekleşmesi hususları ele alınmıştır.

Çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren ve akademik dünyada bildiğim herşeyi bana öğreten sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, kıymetli görüşleri ile bana yol gösteren tezimin jüri üyeleri Prof. Dr. Celal KOCATEPE, Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN, Doç. Dr. Önder GÜLER, ve Doç. Dr. Hakan HOCAOĞLU'na, değerli yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Bülent VURAL'a, dostluk ve sonsuz destekleri için Öğr. Gör. Yavuz ATEŞ, Arş. Gör. Yavuz EREN ve Uzman Akın TAŞCIKARAOĞLU'na, kıymetli katkılarından ötürü Arş. Gör. Onur ELMA'ya, desteklerini esirgemeyen ekip arkadaşlarıma ve beni bugünlere getiren, sevgiyle büyüten ve her zaman yanımda olan canım aileme teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, her zaman bana çalışmalarımda destek olan, motivasyonumun azaldığı anlarda bana teşvikleri ile yol gösteren, sevgisini ve ilgisini bir an bile esirgemeyen biricik eşim, yol arkadaşım Elektrik Yük. Müh. F. Gülşen ERDİNÇ'e sonsuz minnettarlığımı belirtmek isterim.

Son olarak, 2011-04-02-DOP01 ve 2010-04-02-KAP04 numaralı projeler kapsamında desteklerinden ötürü Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve doktora öğrenimim boyunca bana "Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) 2011-Yurtiçi Doktora Burs Programı" kapsamında destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Aralık, 2012

Ozan ERDİNÇ

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT.....	xv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	4
1.3    Tezin Literatüre Katkıları ve Kapsamı.....	5
<b>BÖLÜM 2</b>	
ALTERNATİF ENERJİ SİSTEMLERİNE GİRİŞ .....	9
2.1    Alternatif Enerji Sistemleri .....	9
2.1.1    Rüzgâr Enerjili Güç Sistemleri .....	9
2.1.2    Güneş Enerjili Güç Sistemleri .....	14
2.1.3    Hidrojen Enerjili Güç Sistemleri .....	20
2.2    Alternatif Enerji Sistemleri İçin Enerji Depolama Üniteleri .....	24
2.3    Alternatif Enerji Sistemleri İçin Enerji Yönetimi Stratejileri.....	27
2.4    Alternatif Enerji Sistemleri İçin Boyutlandırılma Yaklaşımları .....	29
2.4.1    Hibrit Sistem Boyutlandırması İçin Ticari Olarak Mevcut Paket Programlar .....	30
2.4.2    Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Boyutlandırılması İçin Kullanılan Optimizasyon Teknikleri.....	32
2.4.2.1    Genetik Algoritma .....	32
2.4.2.2    Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) .....	36

2.4.2.3	Simpleks Algoritması .....	39	
2.4.3	Literatürde Yer Alan Diğer Yöntemler .....	40	
2.5	Bölüm Değerlendirmesi .....	42	
<b>BÖLÜM 3</b>			
<b>HİBRİT SİSTEM BENZETİM ÇALIŞMALARI .....</b>			<b>43</b>
3.1	Hibrit Sistem Bileşenlerinin Modellenmesi .....	44	
3.1.1	Rüzgâr Türbininin Modellenmesi.....	44	
3.1.2	Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi.....	44	
3.1.3	Yakıt Hücresi Modellemesi.....	47	
3.1.4	Elektrolizör Modellemesi .....	52	
3.1.5	Batarya Modellemesi .....	52	
3.2	Meteorolojik Koşulların, Yük Talebinin Değerlendirilmesi ve Hibrit Sistem Bileşenlerinin Nümerik Boyutlandırılması.....	54	
3.3	Hibrit Sistem Enerji Yönetimi Algoritması .....	59	
3.4	Test ve Sonuçlar .....	60	
3.5	Bölüm Değerlendirmesi .....	64	
<b>BÖLÜM 4</b>			
<b>OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI .....</b>			<b>66</b>
4.1	Hibrit Sistem Optimizasyonunda Kullanılan Ekonomik Kriterler .....	67	
4.2	Uygulanan Optimizasyon Algoritması.....	68	
4.3	Optimizasyon Sonuçları .....	73	
4.4	Bölüm Değerlendirmesi .....	79	
<b>BÖLÜM 5</b>			
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>			<b>81</b>
5.1	DeneySEL Test Platformunun Tanıtılması.....	81	
5.1.1	Fotovoltaik ve Rüzgâr Türbini Sistemleri .....	81	
5.1.2	PEMYH Sistemi ve Batarya Üniteleri.....	83	
5.1.3	Yük ve Güç Biçimlendirme Ünitesi Tasarımı .....	84	
5.1.4	Enerji Yönetim Sistemi Tasarımı .....	85	
5.2	Optimum Boyutlandırma İçermeyen Durum İçin DeneySEL Sonuçlar .....	86	
5.3	Optimum Boyutlandırma İçeren Durum İçin DeneySEL Sonuçlar .....	90	
5.4	Bölüm Değerlendirmesi .....	98	
<b>BÖLÜM 6</b>			
<b>HİBRİT SİSTEMLER İLE İLGİLİ GELECEK UYGULAMALARI .....</b>			<b>100</b>
6.1	Hibrit Sistemler İçin Farklı Uygulama Alanları ve Konseptlerinin Değerlendirilmesi.....	100	
6.2	Hibrit Sistemler İçin Örnek Bir Gelecek Uygulaması Konsepti.....	102	
6.2.1	Rüzgâr ve Güneş Enerjisi Sistemleri İçin Güç Üretim Tahmini Yaklaşımları .....	103	
6.2.2	Yük Paylaşımı Yaklaşımı .....	103	

6.2.3 Test ve Değerlendirme.....	105
BÖLÜM 7	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	109
KAYNAKLAR .....	114
EK-A	
HİBRİT SİSTEM BOYUT OPTİMİZASYONU İÇİN UYGULANAN ALGORİTMA .....	128
ÖZGEÇMİŞ .....	138

---

## SİMGE LİSTESİ

---

A	Alan
B	YH konsantrasyon kayıplarının modellenmesinde kullanılan sabit
C	Kapasite
$C_{acap}$	Yıllık eşdeğer yatırım maliyeti (Annualized capital cost)
$C_{arep}$	Yıllık eşdeğer değişim maliyeti (Annualized replacement cost)
$C_{acmain}$	Yıllık eşdeğer bakım maliyeti (Annualized maintenance cost)
$C_{cap}$	İlk yatırım maliyeti
$C_{O_2}$	Çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu
$C_p$	Betz verimi
E	Enerji
$E_b$	Batarya açık devre gerilimi
$E_{Nernst}$	Nernst anlık gerilimi
F	Faraday sabiti
I	Akım
J	Akım yoğunluğu
$N_p$	Paralel bağlı modüllerin sayısı
$N_s$	Seri bağlı hücre sayısı
P	Güç
$P_{H_2}$	Hidrojen kısmi basıncı
$P_{O_2}$	Oksijen kısmi basıncı
R	Direnç
Q	Elektron yükü
T	Sıcaklık
$T_{i,t}^{off}$	i. enerji kaynağının kapalı konumda olduğu zaman periyodu
V	Gerilim
$Y_{proj}$	Proje ömrü
$a_i, b_i, c_i$	Maliyet katsayıları
$e_{gap}$	Materyallerin bant açıklığı
f	Yıllık enflasyon oranı
i	Yıllık faiz oranı
$k_{cmppt}$	Akım tabanlı maksimum güç noktası takibi yöntemi için modelleme sabiti
$k_{in,PV}$	FV hücrelerin geçirgenlik katsayısı



$k_{kf}$	Boyutlandırma sabiti
$k_{loss}$	Genel ısı kaybı katsayısı
$m$	Kütle
$r$	Özdirenç
$q$	Gaz akış miktarı
$t$	Zaman
$v$	Rüzgâr hızı
$\varrho$	Hava yoğunluğu
$\eta$	Verim
$\Phi$	Güneş ışınımı
$\mu_{i,sc}$	FV sistemi kısa devre akımının sıcaklık parametresi
$\Lambda$	YH membranındaki su miktarı
$l$	Membran kalınlığı
$\sigma_i$	Sıcak başlatma maliyeti
$\delta_i$	Soğuk başlatma maliyeti
$\tau_i$	Soğutma zaman sabiti
$\Delta P_{i,down}$	i. enerji kaynağının maksimum izin verilebilir aşağı rampa oranı
$\Delta P_{i,up}$	i. enerji kaynağının maksimum izin verilebilir yukarı rampa oranı
$\zeta_0, \zeta_{rt}, \zeta_{ic}, \zeta_{it}$	YH yığını sıcaklığı için modelleme sabitleri
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	YH aktivasyon gerilim düşümünün modellenmesinde kullanılan sabitler

## KISALTMA LİSTESİ

---

ACS	Yıllık eşdeğer sistem maliyeti (Annualized cost of system)
AGO	Alan tabanlı gözleme ve odaklan algoritması
ATED	Yükün kWh cinsinden yıllık toplam enerji talebi
CRF	Yatırımı geri kazanma faktörü
FC	Yakıt maliyeti (Fuel cost)
FV	Fotovoltaik
HOMER	Yenilenebilir enerji sistemleri için hibrit optimizasyon modeli (Hybrid optimization model for electric renewables)
LPD	Toplam yük talebi
NASA	Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NREL	Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)
PEMYH	Proton değişim membranlı yakıt hücresi
PID	Oransal İntegral Türev kontrolör (Proportional-Integral-Derivative controller)
RT	Rüzgâr türbini
SC	Başlatma maliyeti (Start-up cost)
SFF	Amortisman faktörü (Sinking fund factor)
SOC	Şarj durumu (State-of-charge)
TC	Toplam maliyet (Total cost)
UCEE	Elektrik enerjisi birim maliyeti (Unit cost of electric energy)
YH	Yakıt hücresi

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Rüzgâr formunda hareket eden havanın kinetik enerjisi..... 10
Şekil 2. 2	RT işletiminde farklı hız bantlarının gösterimi ..... 13
Şekil 2. 3	FV sistemlerdeki hücre, modül ve panel yapısı..... 16
Şekil 2. 4	FV sistemlerin elektriksel karakteristikleri ..... 18
Şekil 2. 5	YH sisteminin yapısının basitçe gösterilmesi ..... 20
Şekil 2. 6	Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim ..... 29
Şekil 2. 7	HOMER yazılımının işleyiş blok diyagramı ..... 31
Şekil 2. 8	Genetik algoritma yaklaşımı akış şeması ..... 34
Şekil 2. 9	Parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımı akış şeması ..... 37
Şekil 2. 10	Üç köşeli bir simplekstekteki farklı yeni nokta belirleme durumları ..... 39
Şekil 3. 1	50 kW'lık bir RT'ye ait rüzgâr hızına bağlı çıkış gücü değişimi ..... 44
Şekil 3. 2	FV modeli için elektriksel eşdeğer devre ..... 45
Şekil 3. 3	FV sistem modelinin blok diyagramı ..... 47
Şekil 3. 4	Örnek YH kutuplanma eğrisi ..... 49
Şekil 3. 5	YH elektriksel eşdeğer devresi ..... 50
Şekil 3. 6	YH sisteminin dinamik modeli..... 51
Şekil 3. 7	Batarya eşdeğer devresi..... 52
Şekil 3. 8	Meteorolojik ölçüm sisteminin görünümü ..... 55
Şekil 3. 9	Meteorolojik ölçüm sistemi ile elde edilen dakikalık meteorolojik veriler. 56
Şekil 3. 10	Sistem için dikkate alınan elektriksel yük talebi değişimi..... 56
Şekil 3. 11	Oluşturulan bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi stratejisinin blok diyagramı ..... 59
Şekil 3. 12	Benzetim çalışması sonuçları ..... 62
Şekil 3. 13	Rastgele saatler için rüzgâr hızına bağlı olarak RT gücü değişimi..... 63
Şekil 4. 1	AGO optimizasyon yaklaşımı blok diyagramı ..... 69
Şekil 4. 2	Boyutlandırma işleminde kullanılan yıllık bazda meteorolojik veri ..... 73
Şekil 4. 3	HOMER vasıtası ile elde edilen sonuçların program ekranındaki sıralaması ..... 78
Şekil 5. 1	Yenilenebilir enerji kaynaklarının fotoğrafları ..... 82
Şekil 5. 2	Diğer hibrit sistem bileşenlerinin fotoğrafları..... 83
Şekil 5. 3	Uygulanan bulanık mantık kontrolörün blok diyagramı ..... 85
Şekil 5. 4	Ön değerlendirme durum analizi-1 esnasında kaydedilen meteorolojik veriler ..... 87
Şekil 5. 5	Ön değerlendirme durum analizi-1 için deneysel sonuçlar ..... 88

Şekil 5. 6	Ön değerlendirme durum analizi-2 esnasında kaydedilen meteorolojik veriler .....	89
Şekil 5. 7	Ön değerlendirme durum analizi-2 için deneysel sonuçlar .....	90
Şekil 5. 8	Durum Analizi - 1 süresince kaydedilen meteorolojik veriler .....	91
Şekil 5. 9	Durum Analizi - 1 için hibrit sistem işletim sonuçları .....	92
Şekil 5. 10	Durum Analizi - 2 süresince kaydedilen meteorolojik veriler .....	93
Şekil 5. 11	Durum Analizi - 2 için hibrit sistem işletim sonuçları .....	93
Şekil 5. 12	Durum Analizi - 3 süresince kaydedilen meteorolojik veriler .....	94
Şekil 5. 13	Durum Analizi - 3 için hibrit sistem işletim sonuçları .....	95
Şekil 5. 14	Durum Analizi - 4 süresince kaydedilen meteorolojik veriler .....	96
Şekil 5. 15	Durum Analizi - 4 için hibrit sistem işletim sonuçları .....	96
Şekil 5. 16	Durum Analizi - 5 süresince kaydedilen meteorolojik veriler .....	97
Şekil 5. 17	Durum Analizi - 5 için hibrit sistem işletim sonuçları .....	98
Şekil 6. 1	Bir haftalık periyot için rüzgâr hızı ve gücünün ölçülen ve tahmin değerleri .....	105
Şekil 6. 2	Bir haftalık periyot için sıcaklık ve güneş ışınımının ölçülen ve tahmin değerleri .....	106
Şekil 6. 3	Bir hafta sonraki elektrik pazarı güç anlaşması profiline göre yük paylaşımı algoritmasının sonuçları .....	107

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Başlıca FV malzemelerinin verimlilikleri [35]..... 17
Çizelge 2. 2	YH çeşitleri ve özellikleri [40]..... 22
Çizelge 2. 3	Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması amacıyla literatürde kullanılmış olan farklı boyutlandırma yaklaşımlarının kısa bir değerlendirmesi..... 41
Çizelge 3. 1	FV sisteminin modellenmesinde kullanılan parametreler..... 45
Çizelge 3. 2	PEMYH modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler..... 48
Çizelge 3. 3	Elektrolizör modeli parametreleri..... 52
Çizelge 3. 4	Batarya modeli parametreleri..... 53
Çizelge 3. 5	FV sistemi için kullanılan model parametreleri..... 60
Çizelge 3. 6	YH ve elektrolizör sistemleri için kullanılan model parametreleri..... 61
Çizelge 4. 1	Örnek sistem için lokal arama noktaları hesap tablosu..... 71
Çizelge 4. 2	Örnek sistem için hesaplanmış lokal arama noktaları..... 72
Çizelge 4. 3	Hibrit sistem bileşenlerinin ilgili maliyet ve ömür değerleri..... 74
Çizelge 4. 4	Farklı durum değerlendirmeleri için boyut optimizasyonu sonuçları..... 75
Çizelge 5. 1	Kullanılan FV panellerin teknik özellikleri..... 82
Çizelge 5. 2	Ballard Nexa 1,2 kW PEMYH teknik özellikleri..... 84
Çizelge 5. 3	Bulanık mantık kontrolörün kural tabanı..... 86
Çizelge 6. 1	Enerji kaynakları için kısıtlar ve ekonomik değerler..... 107

---

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ UYGULAMALAR İÇİN HİBRİT BİR RÜZGÂR  
TÜRBİNİ/FOTOVOLTAİK/YAKIT HÜCRESİ/BATARYA SİSTEMİNİN  
OPTİMİZASYONU, TASARIMI VE UYGULAMASI**

Ozan ERDİNÇ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Tüm dünyada enerji talebinin giderek artması, bunun yanında fosil kökenli yakıtların ise giderek azalması, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalara hız kazandırmıştır. Bunun yanı sıra, fosil yakıtların son derece olumsuz çevresel etkileri de yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaların önemini daha da arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının birçok avantajının yanında çözüm bekleyen problemleri de bulunmaktadır. Bu problemler arasında en önemlilerinden biri de rüzgâr, güneş gibi enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretiminin meteorolojik koşullara doğrudan bağımlı olmasıdır. Bu dezavantajın üstesinden gelebilmek için bahsi geçen yenilenebilir enerji kaynaklarının, yedek bir güç ünitesi ve enerji depolama elemanları ile birlikte kullanıldığı hibrit sistemler önerilmektedir. Konvansiyonel uygulamalarda bahsi geçen yenilenebilir enerji kaynaklarına paralel olarak batarya sistemleri sıkça kullanılmaktadır. Ancak kısa ömürlü, büyük boyutlu ve maliyetli batarya ünitelerinin yerine son zamanlardaki çalışmalarda bir elektrolizör ünitesi vasıtası ile yakıt hücresi sistemlerinin kullanılması üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu şekilde oluşturulan hibrit bir sistem ile bir enerji tüketim merkezinin (evsel yükler, sanayi yükleri, telekomünikasyon merkezlerinin yük talepleri, vb.) güç ihtiyacı şebekeden bağımsız şekilde karşılanabilir. Bu sayede, bahsi geçen sistemlerde fosil yakıtların kullanımı ile oluşan olumsuz çevresel etkilerin önüne geçilebildiği gibi, verim arttırımı ve maliyet azaltımı da elde edilebilir. Bu şekilde oluşturulan hibrit sistemlerde

ekonomik olma kriterinin de sağlanması açısından sistem bileşenlerinin optimum şekilde boyutlandırılması da büyük bir önem arz etmektedir.

Bu bağlamda gerçekleştirilen tez çalışmasında, uygun bir güç biçimlendirme ünitesi üzerinden şebekeden bağımsız bir yük için gerekli güç talebini karşılayan hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminin tasarımı, optimizasyonu ve deneysel olarak gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr Türbini/Fotovoltaik/Yakıt Hücresi/Batarya ünitelerinden oluşan hibrit sistem ile ilgili denemeler öncelikle benzetim ortamında, daha sonra da test platformunda deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Optimum boyutlandırma aşamasında hibrit sistem bileşenlerinin performans azalıklarını dikkate alan yeni bir perspektif ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, elde edilen çıktılar ile özellikle hibrit alternatif enerji sistemlerini konu alan mevcut literatüre katkı yapılması hedeflenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya, elektrolizör, enerji yönetim sistemi, dinamik modelleme, fotovoltaik panel, hibrit sistem, optimum boyutlandırma, rüzgâr türbini, yakıt hücresi.

**OPTIMIZATION, DESIGN AND APPLICATION OF A HYBRID WIND  
TURBINE/PHOTOVOLTAIC/FUEL CELL/BATTERY SYSTEM FOR STAND  
ALONE APPLICATIONS**

Ozan ERDİNÇ

Department of Electrical Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

The increase in energy demand in the whole world as well as the rapid depletion of fossil fuels has given increase to the studies on alternative and renewable energy sources. Besides, the growing concerns on the negative environmental effects of fossil fuels have provided a growing importance of the studies on renewable sources of energy. There are many advantages of renewable energy sources, however there are some problems to be solved for the renewable energy issue.

One of the most important drawbacks of renewable energy options such as wind, solar, etc., is their unpredictable nature and dependence on weather and climatic changes. Thus, in order to overcome this problem and satisfy the load demand in all conditions, hybrid energy systems that combine the renewable energy sources with energy storage (or “back-up”) units have been implemented. Traditionally, batteries have been used in this regard. However, due to the size and cost problems of battery systems, the use of fuel cell technology as back-up unit through an electrolyzer system is recommended in recent studies. Such a hybrid system can be used to provide power to energy consumption centers (residential loads, industrial loads, the demand of telecommunication systems, etc.) without grid connection. Thus, the negative impacts of the use of fossil fuels in such systems can be prevented and efficiency improvement



and cost reduction can be obtained. The optimum sizing of such hybrid systems shows great importance in terms of obtaining minimum cost.

In the concept of the realized thesis, it is aimed to design, realize an optimum sizing and experimentally verify a stand alone hybrid system for supplying the power demand of a stand alone load unit. The mentioned hybrid system consisting of wind turbine/photovoltaic/fuel cell/battery units are evaluated in the simulation environment in the first part of the study. Then, experimental studies of the mentioned system are conducted on a test platform. A new perspective considering the performance degradations of hybrid system components during optimum sizing process is presented. Thus, it is aimed to make contributions to the existing literature especially on hybrid alternative energy systems.

**Key words:** Battery, dynamic modeling, electrolyzer, energy management system, fuel cell, hybrid system, optimum sizing, photovoltaic panel, wind turbine.

#### 1.1 Literatür Özeti

İnsanoğlunun en önemli ihtiyaçlarından biri olan enerji alanında dünya, gelecek için farklı açılardan önemli tehlikeler ile karşı karşıyadır. Günümüzde, dünya enerji talebinin %85'e yakın bir kısmı petrol, kömür ve doğalgaz gibi konvansiyonel enerji kaynaklarından karşılanmaktadır [1,2]. Bunun yanı sıra dünyadaki enerji ihtiyacı ciddi oranlarda artış göstermekte, bu durum da konvansiyonel yakıt ihtiyacını giderek arttırmaktadır [3]. Öte yandan bahsi geçen konvansiyonel yakıtların rezervleri dünya üzerinde sınırlıdır ve artan enerji ihtiyacına bağlı olarak giderek tükenmektedir. Bu durum da gelecekteki üretim/tüketim dengesinin sağlanmasını tehlikeye düşürmektedir [4,5]. Konvansiyonel yakıtların rezervlerinin belirli ülkelerin elinde olması ve bu durumun ülkemiz de dâhil olmak üzere birçok ülke için dışa bağımlılığı önemli oranda arttırıcı etkisinin bulunması da, özellikle günümüz dünyasının politik ve ekonomik dengeleri içerisinde dikkate alınması gereken önemli bir husustur [6]. Bütün bunların yanı sıra konvansiyonel yakıtların kullanılması, sera gazı salınımının önemli oranda artmasına ve buna bağlı olarak küresel ısınma gibi bütün dünyayı etkileyebilecek önemli sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır [5,7,8]. Emisyon salınımı azaltılmaz ise, küresel ısınma nedeni ile birçok ülkenin arazi ve iklim koşullarının değişmesi gibi durumlar ile karşılaşılması mümkündür [5]. Bu açıdan konvansiyonel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı düşürerek global sera gazı salınımını azaltmak için Kyoto Sözleşmesi ortaya çıkartılmıştır. Bu durum hem gelişmiş, hem de gelişmekte olan ülkeler için geçerlidir [9].

Günümüzde karşı karşıya olduğumuz yukarıda bahsi geçen sorunlara çözümler getirebilmek açısından, uzun dönemli sürdürülebilir gelişme sağlayabilecek aksiyomların hayata geçirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sürdürülebilir bir enerji sistemi, yerel kaynakların etkin bir şekilde kullanıldığı, maliyet bakımından kabul edilebilir uygunlukta, güvenilir ve çevre dostu bir enerji sistemi olarak tanımlanabilir [10]. Sürdürülebilir bir enerji temini sağlanması açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, en verimli ve etkin çözümlerden biri konumunda bulunmaktadır [5,8]. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, dalga, jeotermal gibi her bir yenilenebilir enerji sisteminin kendine özgü avantajları bulunmaktadır. Yenilenebilir enerjinin yaygınlaşmasının; ithal edilen enerji kaynaklarına olan bağımlılığın azaltılması, iletim ve dağıtım kayıplarının düşürülmesi, vb. birçok avantajı mevcuttur. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarından neredeyse hiçbiri işletim esnasında gaz ya da sıvı halde atık oluşturmamakta ve bu durum konvansiyonel enerji kaynaklarına kıyasla önemli bir avantaj sağlamaktadır [10,11].

Yukarıda bahsi geçen yenilenebilir enerji sistemleri, yerel güç üretimine olanak sağlaması gibi avantajları sayesinde gelecek açısından önemli güç kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Buna rağmen; meteorolojik ve iklimsel koşullara bağımlılıktan ötürü yenilenebilir enerji kaynakları, güç üretimi açısından kesin olarak tahmin edilemeyen bir yapıya sahiptir. Bu husus; yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen gücün, yük talebinin değişimi ile uyum sağlayamaması olasılığını ortaya çıkartmaktadır [7,12-14]. Ayrıca bahsi geçen kaynakların tek başına kullanılması durumu aşırı bir boyutlandırmaya neden olabilmekte ve bu durum da tasarımın büyük oranda pahalılaşmasına yol açmaktadır. Bu açıdan bahsi geçen kaynakların değişken yapılarından kaynaklanan sorunlar bu kaynakları, bir kaynağın güçlü yanının diğer bir kaynağın zayıf yanını elimine etmesine imkân sağlayacak uygun bir hibrit yapıda birleştirerek kısmen ya da tamamen çözülebilmektedir. Bu kaynakların hibrit olarak kullanılması ile birlikte sistemin verimliliği ve enerji temininin güvenilirliği arttırılabilmektedir [5,7,15]. Bu sayede geleceğin sürdürülebilir toplumlarında yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması hızlandırılabilir [13].

Hibrit sistemler şebekeden bağımsız ve şebeke ile paralel olarak farklı uygulama tarzlarında işletilebilmektedirler. Uygulama tarzının seçimi, uygulama bölgesinde

şebekenin uygunluğu, şebekeden çekilen enerjinin birim maliyeti, meteorolojik koşullar gibi farklı parametrelere bağımlıdır. Kendi ihtiyacını karşılamak üzere şebeke ile paralel olarak tesis edilen yenilenebilir enerji sistemleri genellikle şehir içi bölgelerde kullanılmaktadırlar. Bu sistemler arasında büyük çaplı rüzgâr çiftlikleri ve güneş tarlalarının bu çalışmanın konsepti dışında bulunduğu dikkate alınmalıdır. Şebeke ile paralel olarak işletilen yenilenebilir enerji sistemleri yük talebini karşılamakta yetersiz kaldığında, gerek duyulan fazla enerji şebekeden karşılanmaktadır. Bunun yanı sıra gece saatleri gibi düşük yük talebinin olduğu zamanlarda; yenilenebilir enerji sistemi ihtiyaç duyulandan daha fazla güç üretimi gerçekleştirdiğinde, arta kalan enerji şebekeye daha önceden belirlenmiş bir birim fiyattan satılmaktadır. Fakat uzak bölgelerde elektrik şebekesinin mevcut olmaması ile aradaki mesafeden ve arazi koşullarından ötürü bu bölgelere elektrik enerjisinin taşınmasının oldukça pahalı olması nedeniyle bu tür bölgeler açısından alternatif çözüm arayışları söz konusu olmuştur. Şebekeden bağımsız hibrit sistemler bu tür bölgelerin elektriksel ihtiyaçlarını karşılamak üzere en çok umut vaat eden sonuçlardan biri konumundadır. Özellikle adalar gibi ayırık bölgeler bu tür şebekeden bağımsız uygulama tarzındaki teknolojilerin denenmesi açısından önemli bir imkân oluşturmaktadır [13,16]. Şebekeden bağımsız bu tür uygulamalarda her işletim durumunda yük talebinin karşılanmasının güvenilirliği açısından batarya, elektrolizör-yakıt hücresi (YH) kombinasyonu, konvansiyonel dizel generatörler gibi yedek bir güç ünitesine ihtiyaç duyulduğu hususu da aşikârdır.

Yukarıda bahsi geçen farklı uygulama tarzlarında yenilenebilir enerji sistemleri birçok pozitif sonucu beraberinde getirmesine rağmen, bu sistemlerin günümüzdeki mevcut yüksek maliyetleri daha hızlı bir yaygınlaşmanın önüne geçmektedir. Bu açıdan bahsi geçen sistemler için hızlı bir şekilde maliyet azaltımı ve aynı zamanda verim artırımını üzerine yapılan geliştirme çalışmaları günümüzde büyük bir ivme kazanmıştır [2]. Yenilenebilir enerji tabanlı hibrit bir sistemden güvenilir ve ekonomik bir şekilde elektrik enerjisi elde etmek için hibrit sistemin boyutlandırması da işletim ve bileşen seçimi açısından optimum bir şekilde gerçekleştirilmelidir [17,18]. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli ve ekonomik bir şekilde kullanılması açısından bir optimum boyutlandırma yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır [6]. Özellikle bu tür sistemlerin optimum boyutlandırması, güneş ışınımı, rüzgâr hızı, sıcaklık gibi kurulum

bölgesine göre değişen parametrelerin etkisinden ötürü belirli bir bölge için detaylı bir analiz gerektirmektedir [7,19]. Temel bir boyutlandırma yaklaşımı olarak yük talebinin belli bir baz seviyesi hibrit sistem bileşenlerinin bazıları tarafından karşılanırken, diğer hibrit sistem bileşenleri de yük takibi konsepti vasıtası ile yük talebinin geriye kalan kısmının karşılanmasında kullanılabilir. Bu tür matematiksel hesap tabanlı yaklaşım daha önce Wang ve Nehrir [5] tarafından rüzgâr türbini (RT) ve fotovoltaik (FV) sistemlerini baz yükün karşılanmasında ve YH sistemini ise bir batarya grubu ile birlikte yük takibinde kullanan hibrit bir sistemin boyutlandırmasını içeren bir çalışmada kullanılmıştır. Fakat bu tür bir boyutlandırma işlemi, ekonomik koşulları dikkate almadan sadece yük talebinin karşılanmasını sağlamaktadır. Bu sebepten ötürü, yük talebi karşılanmasının güvenilirliğini ekonomik bir şekilde gerçekleştirebilmek açısından “optimum” boyutlandırmayı sağlayan bir “optimizasyon algoritması”na ihtiyaç vardır ve genetik algoritma, parçacık sürü algoritması gibi birçok optimizasyon yaklaşımı bu bağlamda kullanılmıştır. Ayrıca farklı araştırma laboratuvarlarının ve üniversitelerin web sitelerinden bedelsiz bir şekilde indirilebilen “Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER)” gibi ünlü yazılım programları da mevcuttur. Yeni nesil bilgisayarların hesap güçleri önemli oranda artış göstermekte, bu açıdan bu tür bilgisayar tabanlı benzetim ile optimizasyon yaklaşımları daha da dikkat çekici hale gelmekte ve detaylı bir analiz gerektiren güç sistemlerinin tasarımında önemli bir araç konumunu almaktadır [20].

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışmada ilk kez hibrit sistem bileşenlerinin performans azalmasını dikkate alan yeni bir perspektif ile şebekeden bağımsız bir hibrit alternatif enerji sisteminin optimum boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle MATLAB/Simulink benzetim ortamında hibrit sistem bileşenleri için detaylı dinamik benzetim modelleri oluşturulmuş ve hibrit sisteme ait komple bir model meydana getirilmiştir. Ardından, “alan tabanlı gözlemler ve odaklan (AGO)” isimli bir yaklaşım kullanılarak bahsi geçen optimum boyutlandırma çalışmaları gerçekleştirilmiş ve farklı hibrit sistem opsiyonları, yukarıda belirtilen performans azalımı hususu ile birlikte ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Optimum boyutlandırma çalışmaları ile elde edilen sonuçlar

işığında normalize edilen değerler ile hibrit sisteme ait bir deneysel test platformu oluşturulmuş ve optimum boyutlandırılmış sistemin etkinliği bir de deneysel olarak sınanmıştır. Bunların yanı sıra hibrit alternatif enerji sistemleri için olası gelecek uygulamaları kısaca irdelenmiş ve bu kapsamda bahsi geçen sistemlerin “sanal güç santrali (virtual power plant)” konseptinde bir incelemesi gerçekleştirilmiştir.

### **1.3 Tezin Literatüre Katkıları ve Kapsamı**

Gerçekleştirilen çalışmanın farklı açılardan literatüre yeni katkıları bulunmaktadır. Bu katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- Daha önce de belirtildiği üzere, yük talebi karşılanmasının güvenilirliğini ekonomik bir şekilde gerçekleştirebilmek açısından “optimum” boyutlandırmayı sağlayan farklı optimizasyon yaklaşımları ve ünlü paket programlar literatürde birçok çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmalar alternatif enerji sistemlerinin daha yaygın kullanımına önemli katkı sağlamış olmasına rağmen bu çalışmaların hiçbiri, işletim süresince hibrit sistem bileşenlerinin performans azalmasını dikkate almamıştır. Her bir bileşenin belirtilen etkin kullanılabilir ömrü özel bir performans kriterinin ölçülmesine bağlı olduğu halde, yenilenebilir kaynaklar ve yedek güç üniteleri yer değiştirilmelerine kadar aynı performansı sağlayacak şekilde dikkate alınmıştır. Örneğin; batarya sistemlerinin, bataryanın kullanılabilir kapasitesi başlangıç kapasitesinin %80’ine ulaştığında değiştirileceği dikkate alınmaktadır. Fakat yukarıda verilen literatür çalışmaları, bataryanın yer değiştirme zamanı gelene kadar başlangıçtaki kapasitesinin tamamı ile kullanılabilirliğini kabul etmektedirler. Bu husus her bir sistem bileşeni için geçerlidir ve her bir bileşen işletim ömrü boyunca başlangıçtaki performansı ile bir çıkış gücü verecek şekilde kabul edildiğinden, proje ömrünün sonuna doğru yük talebinin karşılanmasında risk oluşturmaktadır. Bu açıdan bu çalışmada, en kötü durum senaryosunda hibrit sistem bileşenlerinin performans azalmasını dikkate alan yeni bir perspektif ile şebekeden bağımsız bir hibrit alternatif enerji sisteminin optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bahsi geçen optimum boyutlandırma çalışmasında, literatürde mevcut

yaklaşımların olumlu yönlerini içerisinde barındıracak şekilde oluşturulmuş olan AGO isimli yeni bir yaklaşımdan yararlanılmıştır.

- Literatürde, hibrit enerji sistemlerinin performansını yıllık bazda değerlendiren benzer çalışmalarda genellikle saatlik veriler kullanılmaktadır. Kısa dönemli verilerin kullanıldığı çalışmalar ise genellikle günlük ya da haftalık zaman dilimlerini kapsamakta, bu açıdan da yıl içerisinde her gün değişen meteorolojik koşullar tam anlamıyla değerlendirilememektedir. Ayrıca, özellikle YH sistemi dinamiklerinin dakikalar, hatta saniyeler mertebesinde incelenmesi, uygulanan enerji yönetimi yaklaşımının değerlendirilmesi açısından daha uygundur. Bunun yanı sıra; özellikle rüzgâr hızı gibi meteorolojik parametreler de dakikalar mertebesinde değişim gösterebildiğinden ötürü meteorolojik verilerin bu şekilde ayrıntılı bir biçimde ele alınması, gerçek zamanlı uygulamalar ile saatlik bazda bir incelemeye göre daha fazla paralellik arz etmektedir. Bu açıdan; ilerleyen bölümlerde aktarılacak benzetim çalışmalarında, dakikalık bazda uzun zamanlı bir yük ölçümünden ve meteorolojik veriden yararlanılmış ve dakikalık veri kullanımının oluşturduğu fark, ilgili karşılaştırmalar ile ortaya konulmuştur.
- Benzetim ortamında değerlendirilen ve yeni bir konsept ışığında optimum boyutlandırması gerçekleştirilen hibrit sistemin etkinliği normalize edilmiş bir test prototipi vasıtası ile deneysel ortamda da değerlendirilmiş ve hem benzetimsel, hem de deneysel olarak sistem bir bütün halinde tüm yönleriyle ele alınmıştır.
- Literatürde ilk kez; yenilenebilir enerji kaynaklarının yer aldığı bu tür bir hibrit yapı, yeni bir kavram olan “sanal güç santrali” konsepti içerisinde hibrit sistemler için olası gelecek çalışmaları kapsamında optimum işletim açısından da değerlendirilmiştir. Hibrit bir alternatif enerji sisteminin optimum boyutlandırmasını konu alan bu tez çalışmasında optimum işletim hususunun da bu yeni konsept içerisinde ele alınması ile, birbirini tamamlayan konular olan optimum yatırım ve optimum işletim açısından alternatif enerji sistemlerine tamamen bir bütünlük ile yaklaşılacaktır. Ayrıca bahsi geçen sanal güç santrali benzetim çalışmasının içerisinde de daha sonra ilgili bölümde detaylıca aktarılacak yenilikler mevcuttur.

Kapsam olarak benzetim, optimum boyutlandırma ve deneysel çalışmalarını içeren tez çalışmasının geri kalan kısımlarının düzeni şu şekildedir:

Bölüm 2’de alternatif enerji sistemlerine genel bir giriş yapılmaktadır. Burada, tez kapsamında kullanılacak alternatif enerji kaynakları olan rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemleri temel olarak tanıtılmaktadır. Bunun yanı sıra, alternatif enerji kaynaklarının hibrit olarak kullanılması ve bu açıdan kullanılabilir enerji depolama sistemleri irdelenmektedir. Ayrıca, hibrit alternatif enerji sistemlerinin enerji yönetimi amacıyla mevcut literatürde kullanılmış olan önde gelen yaklaşımlar da bu bölüm kapsamında ele alınmaktadır. Son olarak da literatürde hibrit alternatif enerji sistemlerinin optimum boyutlandırması ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar ve bu amaçla kullanılan yaklaşımlar detaylıca aktarılmaktadır.

Bölüm 3’te ise önerilen hibrit sistem için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına yer verilmektedir. Öncelikle hibrit sistem bileşenleri için geliştirilen dinamik benzetim modelleri ile ilgili detaylar belirtilmektedir. Sonrasında ise, hibrit sistem benzetim çalışmasında ve daha sonraki bölümlerde yer alan optimum boyutlandırma ve deneysel çalışmalarda kullanılacak olan yük modeli ve enerji yönetim stratejisi ile ilgili detay ve analizler sergilenmektedir. Bu bölüm kapsamında son olarak da hibrit sistem benzetim modelleri kullanılarak elde edilen komple sistem modeli ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları irdelenmektedir. Bahsi geçen sonuçlar içerisinde daha önce de belirtilen detaylı meteorolojik veri kullanımının önemi de ilgili analizler ile gösterilmektedir.

Bölüm 4’te ise hibrit sistem bileşenlerinin optimum boyutlandırması hususu ele alınmaktadır. Başlangıç olarak boyutlandırma çalışmasının ekonomik yönleri ile boyutlandırma işleminde kullanılan yaklaşım tanımlanmaktadır. Akabinde ise Bölüm 3’te aktarılan benzetim modellerinin de kullanılması ile gerçekleştirilen optimum boyutlandırma çalışmasının sonuçları sergilenmektedir. Burada, performans azalımı hususunun tez kapsamında önerildiği şekilde hibrit sistem boyutlandırmasında dikkate alınmasının önemi de detaylıca tartışılmaktadır.

Benzetim ortamında gerçekleştirilen çalışmaları takiben Bölüm 5’te, boyutlandırma sonuçlarına göre oluşturulan deneysel test platformu ile elde edilen deneysel sonuçlar



ve ilgili irdellemeler aktarılmaktadır. Bu bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile birlikte boyutlandırma işleminin doğruluğu ve enerji yönetim stratejisinin gerçek zamanlı uygulamalardaki etkinliği de değerlendirilmektedir.

Hibrit alternatif enerji sistemleri için olası gelecek çalışmaları ise Bölüm 6'da irdelenmiş ve bu bölümde hibrit alternatif enerji sistemlerinin optimum işletimi hususu da örnek bir gelecek uygulaması konseptinde ele alınmıştır. Bu bağlamda, daha önce belirtildiği üzere sanal güç santrali konsepti içerisinde gerçekleştirilen yeni bir yaklaşım aktarılmaktadır. Son olarak da çalışma Bölüm 7'de sonuçlandırılmakta ve mevcut çalışmanın önemi ile birlikte gelecek çalışmaları belirtilmektedir.

### ALTERNATİF ENERJİ SİSTEMLERİNE GİRİŞ

Alternatif enerji sistemleri, daha önce de belirtildiği üzere her geçen gün gittikçe artan bir kullanım alanına sahiptir. Rüzgâr, güneş gibi günümüzün popüler enerji kaynaklarının yanı sıra hidrojen, hidroelektrik, biyokütle vb. tabanlı birçok alternatif enerji sistemi farklı uygulamalarda kullanım alanı bulmuşlardır. Bu açıdan, bu bölümde tez kapsamında dikkate alınacak olan rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemleri tezin diğer bölümlerine altyapı olacak şekilde tanıtılmaktadır. Bahsi geçen alternatif enerji sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak açısından önemli hususlar olan enerji depolama sistemleri ve enerji yönetimi stratejileri de bu bölüm kapsamında ele alınmaktadır. Son olarak da tezin özellikle başlıca hedeflerinden biri olan hibrit sistem bileşenlerinin optimum boyutlandırılması hususunda uygulanmış yaklaşımları içeren geniş bir literatür taramasına yer verilmekte ve Bölüm 4'te bahsedilecek olan optimum boyutlandırma çalışmalarına altyapı oluşturulmaktadır.

#### 2.1 Alternatif Enerji Sistemleri

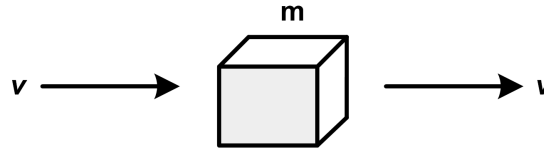
Alternatif enerji sistemlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak açısından aşağıdaki alt bölümlerde sırası ile rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemleri ile ilgili temel bilgilere yer verilmektedir:

##### 2.1.1 Rüzgâr Enerjili Güç Sistemleri

Rüzgâr enerjisi, yeryüzündeki birçok enerji kaynağında olduğu gibi, güneş enerjisi kaynaklıdır. Güneş tarafından yayılan güneş ışınımı uzay boyunca yol alarak dünyaya

çarpmakta ve karalar ve okyanuslar arasında ısıl farklar yaratmaktadır. Bu ısıl farklılıklardan dolayı da bölgeler arasında basınç farklılıkları meydana gelmektedir. Bu husus nedeni ile hava, yüksek basınçlı bölgelerden düşük basınçlı bölgelere doğru hareket etmekte ve bu hava akımı rüzgâr adını almaktadır. Dünya üzerine gelen güneş enerjisinin yaklaşık %2'si rüzgâr enerjisine dönüşmektedir. Bu enerjiden insanoğlu çok eski dönemlerden beri faydalanmaktadır [21].

Rüzgâr enerjisinin kullanımı hakkında bilinen en eski uygulama, M. Ö. 500'de Mısır'da kullanılan yelkenli tarzı gemilerdir. Ancak aktif olarak ilk rüzgâr değirmeninin M.Ö. 200'de Mezopotamya'nın antik kenti Babil'de kurulduğu tahmin edilmektedir. M. S. 10. yy'a kadar Doğu İnan ve Afganistan'da yaklaşık 5 m kanat uzunluğuna sahip ve 10 m kule yüksekliğine sahip rüzgâr değirmenleri ile tahıl öğütüldüğü bilinmektedir. Batıda rüzgâr enerjisinin kullanımına dair ilk kaynaklar ise 12. yy'a aittir. Günümüzde rüzgâr enerjisi hala birçok amaçla kullanılmakta, ancak günümüzdeki en önemli uygulamalar rüzgârdan elektrik enerjisi üretimi üzerine yoğunlaşmaktadır [22].



Şekil 2. 1 Rüzgâr formunda hareket eden havanın kinetik enerjisi

Havanın kütlesi olduğundan ötürü, rüzgâr formunda hareket eden havanın bir kinetik enerjisi vardır (Şekil 2.1). Bir RT bu mevcut kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Belli bir hacimdeki rüzgarın enerji kapasitesi Eşitlik 2.1'de görüldüğü üzere rüzgar hızının karesi ile doğru orantılıdır:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Burada  $E_k$  oluşan kinetik enerjiyi,  $m$  hareket eden havanın kütlesini,  $v$  ise anlık rüzgâr hızını göstermektedir. Bu eşitlikten görüldüğü üzere rüzgâr hızının iki katına çıkması, bu hava kütlesinden elde edilecek enerji miktarını dört katına çıkartmaktadır. Yüksek rüzgâr hızları, dünyanın ekvator bölgesinin kutup bölgelerine kıyasla daha çok ısınmasından kaynaklanmaktadır. Hâkim rüzgârlar bir bölgede tepelerin, dağların, ağaçların, binaların ve denizlerin varlığı gibi yerel faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Bu

açından rüzgâr hızının yüksek olduğu bölgelerin seçimi rüzgâr enerjisinden azami bir şekilde yararlanılması açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra; rüzgâr hızının iki katına çıkması bir türbinden belirli bir zaman aralığında geçecek havanın hacmini de iki katına çıkartmakta, bu sayede de üretilebilecek güç sekiz kat artmaktadır. Bu durum, rüzgâr hızındaki en ufak bir artışın bile ne kadar dikkat çekici bir güç artışı oluşturma potansiyeline sahip olduğunu açıkça göstermektedir [21].

Rüzgârın kinetik enerjisine göre rüzgâr hızının mekanik güç kapasitesi, Bernoulli eşitliğine göre şu şekilde hesaplanmaktadır [22]:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{dt} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'deki hareket eden hava kütlesinin türevin alındığı ifade şu şekilde elde edilmektedir:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \rho A \bar{v} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3'te  $V$  ifadesi havanın hacmini ( $m^3$ ),  $\rho = m/V$  olmak üzere hava yoğunluğunu ( $kg/m^3$ ) ve  $A$  ise rüzgar türbini kanatlarının süpürdüğü alanı ( $m^2$ ) belirtmektedir. Hava yoğunluğunun değeri  $0^\circ C$ 'de ve deniz seviyesinde  $1,2929 \text{ kg/m}^3$  olarak hesaplanmaktadır.

Etkin rüzgâr gücü ise RT'ye ulaşan rüzgâr hızı  $v_1$  ve RT'den hemen ayrılan rüzgâr hızı  $v_2$  kullanılarak hesaplanmaktadır. Buna göre Eşitlik 2.3 aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenmektedir [22]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\rho A (v_1 + v_2)}{2} \quad (2.4)$$

Yukarıdaki ifadeye benzer olarak RT'ye ulaşan ve RT'yi terk eden rüzgâr hızlarının kinetik enerjileri arasında da fark vardır. Bahsi geçen fark da dikkate alınarak toplam RT mekanik gücü  $W/m^2$  cinsinden aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_m = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) \frac{dm}{dt} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.4 ve 2.5 birleştirilerek toplam mekanik güç ifadesi,

$$P_m = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) = \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (2.6)$$

şeklinde düzenlenmektedir. Güç katsayısı ya da rotor verimliliği olarak da bilinen  $C_p$  Betz verimi;

$$C_p = \frac{\left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)}{2} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilmek üzere toplam mekanik güç nihai olarak [23],

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 C_p \quad (2.8)$$

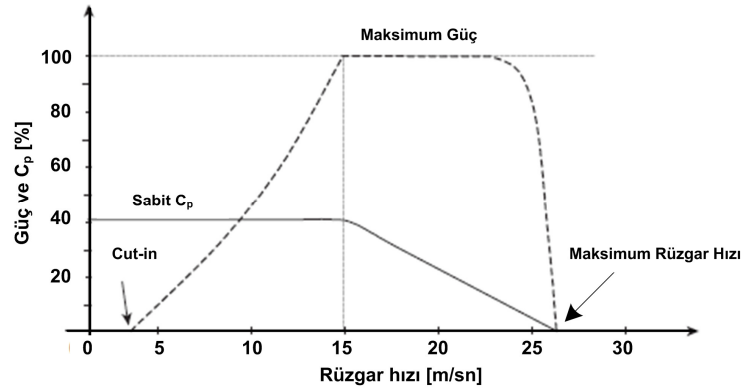
eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

Eşitlik 2.8'deki  $C_p$  ifadesi  $v_2/v_1$  değişiminin bir fonksiyonu olarak düşünülüp bu fonksiyonun türevi alınıp sıfıra eşitlenerek fonksiyonu maksimum yapan  $v_2/v_1$  oranı 1/3 olarak hesaplanmaktadır. Buna bağlı olarak da fonksiyonun maksimum noktası 0,5926 olarak elde edilmektedir. Bu değere "Betz sınırı" adı verilmektedir. Bu nokta, türbin kanatlarının teorik olarak %100 verimli olduğu konumda, havanın kanatları geçtikten hemen sonra bütün enerjisini türbine aktararak durduğu anlamına gelmektedir. Ancak gerçek uygulamalara hiçbir türbindeki rotor verimliliği %59'a ulaşmamaktadır. Tipik rotor verimliliği %35 ile %45 arasında değişmektedir.

Burada atmosferik şartların rüzgâr gücü üzerindeki etkisi de önemli bir parametredir. Sıcaklık arttıkça havanın yoğunluğu ve buna bağlı olarak da rüzgâr gücü azalmaktadır. Rakım arttığında da basıncın azalmasına bağlı olarak hava yoğunluğu azalmaktadır. Ancak deniz seviyesinden yukarılara çıkıldıkça rüzgâr hızı önemli oranda arttığından ötürü hava yoğunluğundaki bu azalışın rüzgâr gücü üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek düzeyde kalmaktadır. Deniz seviyesinden yüksekliğe göre rüzgâr hızının değişimi;

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (2.10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada  $v_0$ ,  $H_0$  referans yüksekliğindeki (genellikle 10 m) rüzgâr hızını,  $v$  ise  $H$  yüksekliğindeki rüzgâr hızını göstermektedir. Ayrıca  $\alpha$  ise havanın farklı bölgelerdeki pürüzlülük katsayısını belirtmektedir. Bu değer, deniz yüzeyleri ve pürüzsüz topraklardan oluşan bölgelerden yüksek katlı binaların bulunduğu bölgelere doğru gidildikçe artış göstermekte ve yaklaşık olarak 0,1-0,4 değerleri arasında değişmektedir [22].



Şekil 2. 2 RT işletiminde farklı hız bantlarının gösterimi

Yukarıda verilen bilgilere bağlı olarak bir RT'nin işletiminde Şekil 2.2'de görüldüğü gibi dört hız bandı bulunmaktadır. İlk bant sıfır noktası ile üretim yapılabilecek asgari rüzgâr hızı (cut-in rüzgâr hızı) arasındaki bölgeden oluşmaktadır. Bahsi geçen bu cut-in hızının aşağısında üretilen güç, sadece sürtünme kayıplarını karşılayabilecek düzeydedir. Bu nedenle cut-in hızının altında RT çalıştırılmamakta ve dolayısıyla güç üretimi yapılmamaktadır.

İkinci bant (optimize edilmiş sabit  $C_p$  bölgesi) rüzgâr yönüne bağlı olarak kanat pozisyonunun kontrolü ile normal işletimin sağlandığı şartları içermektedir. Üçüncü bantta ise yüksek rüzgâr hızlarında sadece generatör kapasitesi ile sınırlı olarak azami bir sabit çıkış gücünü sağlayan hız kontrolü gerçekleştirilmektedir. Bu bandın üzerinde ise (25 m/s'lik rüzgâr hızları civarında), rotor kanatları rüzgâr yönüne göre hizalanmakta ve bu sayede elektrik generatöründe hız sınırının aşılmasından ötürü mekanik bir hasar ortaya çıkmasının önüne geçilmektedir [22].

Bahsi geçen şekilde bir işleme sahip olan RT'ler genel olarak yatay eksenli RT'ler ve dikey eksenli RT'ler olarak iki gruba ayrılır. Yatay eksenli RT'ler dönme eksenini rüzgârın akım çizgilerine paralel olan türbinlerdir. Günümüzde elektrik üretmek amacıyla

kullanılan RT'lerin büyük bir kısmı yatay eksenli türbinlerdir. Rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan türbinler olmak üzere başlıca iki tip yatay eksenli RT konfigürasyonu mevcuttur [24,25]. Bu tip makinaların rotorları, maksimum enerjiyi tutabilmek için rüzgâr akışına dik olarak durmaktadır. Rüzgârı önden alan sistemlerde kılavuz kuyruk vasıtasıyla, rotor ve kanatlar rüzgâra dik gelecek şekilde yönlendirilir. Düşey eksenli türbinler ise dönme eksenini rüzgârın akım çizgilerine dik olan türbinlerdir. Darrieus ve Savonius olmak üzere başlıca iki tipi vardır, ancak bunlardan yalnızca Darrieus tipi ticari olarak başarılı olabilmektedir. En önemli özellikleri rüzgâra doğru dönmeyi sağlayan bir sapma mekanizmasına (yaw) ihtiyaç duymamalarıdır. Diğer bir avantajı ise tüm ağır donanımlarının yerde olmasıdır. Bu sayede kulenin yatay eksenli türbinlerdeki gibi güçlü olması gerekmemektedir. Dikey eksenli türbinlerin günümüzde çok fazla kullanılmamasının başlıca nedenleri; yere yakın olmalarından dolayı düşük ve türbülanslı rüzgâr hızında çalışmak zorunda kalmaları, verimlerinin düşük olması ve ilk hareket momentine ihtiyaç duymalarıdır. Bu türbinlerin en büyük avantajı rüzgârı her yönde alabilmesidir. Yatay eksenlilerde olduğu gibi hareket belirli bir açıyla düşey mile aktarılmamaktadır. Dolayısıyla hız yükseltme kutusu ve diğer aksamlar toprak seviyesinde olabilir [26,27].

Bahsi geçen türbin teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte günümüzde oldukça önemli bir konuma gelen rüzgâr enerjili güç sistemleri, yüksek kapasiteli ünitelerin şebeke bağlantısında karşılaşılabilecek olumsuzlukların giderilmesi üzerine yapılan ileri çalışmalar ile birlikte yakın gelecekte daha da artan bir kullanım alanına sahip olacaktır.

### **2.1.2 Güneş Enerjili Güç Sistemleri**

Çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi ile ilgili çalışmalar, artan enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla son zamanlarda yoğunluk kazanmıştır. Güneş, nükleer yakıtlar dışında dünyada kullanılan tüm yakıtların ana kaynağıdır. İçinde sürekli olarak hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmekte ve oluşan kütle farkı ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Ancak bu enerjinin çok küçük bir kısmı yeryüzünü ulaşmaktadır. Atmosferdeki CO<sub>2</sub>, su buharı ve ozon gibi gazların güneş ışığını absorbe etmeleri, bunun yanısıra kat edilmesi

gereken yolun uzunluğu, yeryüzüne ulaşabilen güneş ışığı değerinin düşük olmasına neden olur [24,28].

Güneş enerjisinin kullanılabilmesi için öncelikle toplanması gerekir. Bu toplama işlemi ısı ve elektriksel olmak üzere iki farklı yöntemle yapılmaktadır. Basitlik ve ucuzluk gibi nedenlerle yakın bir geçmişe kadar ısı toplama yöntemi daha çok tercih edilmiştir. Elektriksel güneş kolektörleri ise günümüzde kullanımı ve bilinirliği oldukça artan FV hücreler vasıtası ile oluşturulmaktadır [29,30].

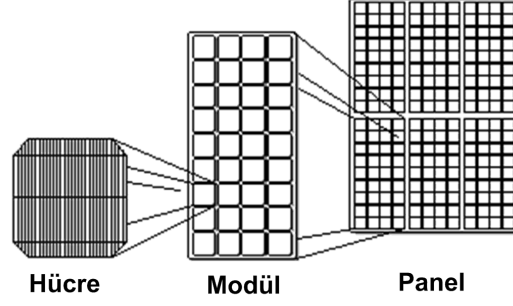
FV hücreler üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde herhangi bir hareketli parça bulunmaz. Hücrelerin çalışma ilkesi, FV olayına dayanır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek FV olayını bulmuştur.

FV etki, birbirinden farklı iki malzemenin ortak temas bölgesinin (common junction) foton radyasyonu ile aydınlatılması durumunda bu iki malzeme arasında oluşan elektriksel potansiyel olarak tanımlanabilir. FV (Photovoltaic) terimi ışık anlamına gelen "Phos" ve elektrik anlamına gelen "voltaic" olmak üzere temelde Yunanca iki kelimenin birleşmesinden oluşmaktadır. FV kelimesi İngiliz lügatına 1849'da girmiştir [31,32].

İlk FV hücre ise 1883 yılında Charles Fritts tarafından üretilmiştir. Üretilen bu ilk hücrenin verimi %1 civarındadır. İlk FV hücrenin üretilmesi ile birlikte birçok araştırmacı güneş hücrelerinin kapasitesinin artırılması üzerine yoğun çalışmalar başlatmışlardır. 1954 yılında ise Bell Laboratuvarı'nda Darly Chapin isimli bir araştırmacı modern anlamdaki ilk FV hücreyi geliştirmiştir. Bahsi geçen FV hücre silikon temellidir ve %6 civarında bir verime sahiptir. İlk FV hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilmeleri nedeni ile uzay programlarında yoğun bir şekilde kullanılmışlardır.

FV hücreler uzay uygulamalarında sıklıkla kullanılmalarına rağmen yüksek üretim maliyetleri ve düşük çıkış güçleri nedeni ile diğer alanlarda pek kullanım alanı bulamamışlardır. Bu nedenle bahsi geçen tarihten itibaren araştırmalar FV hücrelerin verimini artırmak ve maliyetini düşürmek üzerine yoğunlaşmıştır.





Şekil 2. 3 FV sistemlerdeki hücre, modül ve panel yapısı

Tipik olarak bir FV hücre 25-30 cm<sup>2</sup>'lik kare bir alana sahip olup, yaklaşık 1 W'lık güç üretir. Yüksek güçler elde edebilmek için birçok FV hücre Şekil 2.3'te görüldüğü üzere seri ve paralel olarak bağlanır ve büyük bir alana sahip bir modül elde edilir. Bir FV güneş paneli ise ihtiyaç olan akım ve gerilimi üretecek şekilde modüllerin seri-paralel kombinasyonlarını içerir. FV sistem teknolojisi elektrik üretim ihtiyacımızı karşılayacak potansiyele sahiptir. Mevcut elektrik şebekesinden 1 km uzaktaki bir ev için FV sistemleri kullanmak, bir transformatör istasyonu kurmak ve iletim kabloları ile direkleri inşa etmekten daha ucuza gelebilir [33,34].

Ancak FV sistemlerin verimlerinin artmasına rağmen Watt başına fiyatları fosil yakıtlar ile kıyaslandığında hala yüksek durumdadır. Bu durum yukarıda da belirtildiği üzere güneş enerjili sistemlerinin günümüzde enerji hatlarının ulaşamadığı bölgelerdeki enerji ihtiyacının karşılanmasında ve saat, hesap makinesi, vb. küçük aletlerin çalıştırılmasında kullanılmasını daha uygun kılmaktadır. FV sistemlerin üretim maliyetlerinde gelecekte beklenen azalma ile birlikte güneş enerjili sistemlerin büyük ölçekli ünitelerin güç ihtiyacının karşılanmasında da yoğunlukla kullanılacağı öngörülmektedir. Bu hususta FV sistemin üretiminde kullanılan malzeme seçimi de büyük bir önem arz etmektedir. FV sistemlerin üretiminde birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Bunların arasında silikon tabanlı sistemler uygulamaların birçoğunda yer almaktadır. Monokristal, polikristal ve amorf tabanlı bahsi geçen silikon sistemlerinin yanı sıra, galyum arsenit ve indiyum fosfat bazlı FV üniteleri ile ince film yapısında üretilen FV sistemleri de günümüz uygulamalarında kullanımı artan teknolojilerdir. Bahsi geçen günümüz teknolojilerinin maliyet ve birim üretim başına harcanan enerji açısından dezavantajları nedeni ile boyaya duyarlı (dye-sensitized) FV üniteleri gibi teknolojiler de güneş enerjili sistemlerde geleceğin teknolojileri olarak

geliştirilmektedirler [35]. Bu teknolojinin günümüzdeki verimi düşük olmasına rağmen bu dezavantajın da giderilmesi için önemli araştırma-geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bahsi geçen başlıca FV sistem malzemelerinin ortalama ve günümüze kadar ölçülen en yüksek verim değerleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2. 1 Başlıca FV malzemelerinin verimlilikleri [35]

Tür	Laboratuvar şartlarında ölçülen en yüksek hücre verimi [%]	Ölçülen en yüksek modül verimi [%]	Ortalama modül verimi [%]
Monokristal silikon	24,7	22,7	18
Polikristal silikon	20,3	15,3	10-14
Amorf kristal	12,1	10,4	8-10
Galyum arsenit	25,1	-	-
İndiyum fosfat	21,9	-	-
Kadmiyüm tellür (ince film)	16,5	10,7	8-10
Bakır indiyum diselenür (ince film)	19,5	13,4	9-12
Boyaya duyarlı (dye-sensitized)	8,2	4,7	-

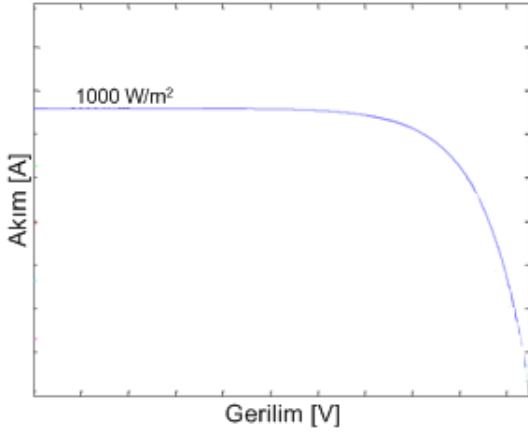
FV sistemlerin diğer yaygın güç kaynaklarına kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir [36]:

- FV sistemlerin 20 yılı aşan uzun ömürleri vardır.
- FV sistemler her meteorolojik koşulda çalışabilmektedir. Ayrıca güneş ışınımına anlık bir cevap sağlayabilmektedir.
- FV sistemler güvenilir, modüler, dayanıklı ve oldukça az bakım gerektiren bir yapıya sahiptir.
- FV sistemler sessiz bir işletim sağlamaktadır.

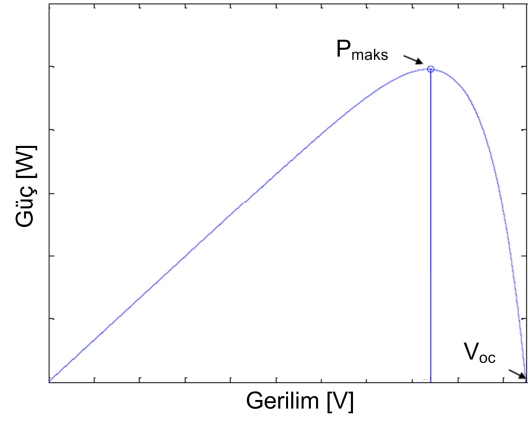
Ancak bu avantajlarının yanı sıra, her enerji kaynağında olduğu gibi FV sistemlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajların önemli olanları şu şekildedir [36]:

- FV sistemlerin yüksek bir kurulum maliyeti vardır. Meteorolojik koşullara bağımlı olmasından ötürü FV sistemler ile üretilen güç sabit değildir. Bu nedenle FV sistemler çoğu uygulamada bir enerji depolama ünitesine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum kurulum maliyetini daha da artırmaktadır.
- FV sistemlerin verimliliği diğer birçok enerji sistemine oranla oldukça düşüktür.

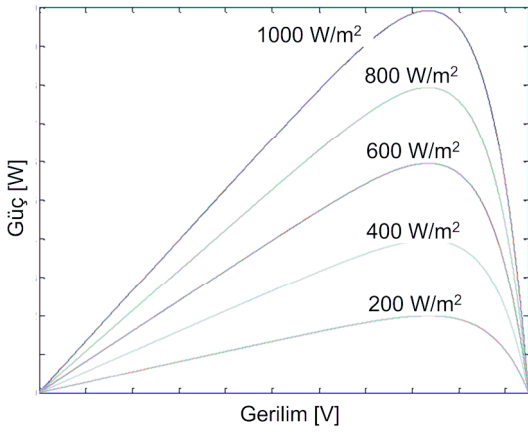
- Yapısındaki yarı iletken malzemenin yaşlanma faktöründen ötürü FV sistemlerin performansı zamanla azalmaktadır. Bunun yanı sıra bir modül içerisindeki bütün hücreler aynı oranda performans azalmasına maruz kalmayacağından bu durum modül içerisinde artan kayıplara ve daha da düşen bir verimliliğe yol açacaktır.
- FV modülün güneş ışığını belli oranda yansıtma etkisinden ötürü ek kayıplar da söz konusudur. Bu durum fotonların yarı iletken materyale doğru geçişini engellemektedir. Bu nedenle FV modüllerin yüzeyinde özel anti-reflektif bir materyal bulunmaktadır. Ancak bu materyal zamanla ortadan kalkmakta ve böylece kayıplar artış göstermektedir. Bu nedenle yaşlanma etkisi FV sistemlerin performansı açısından büyük bir öneme sahiptir.



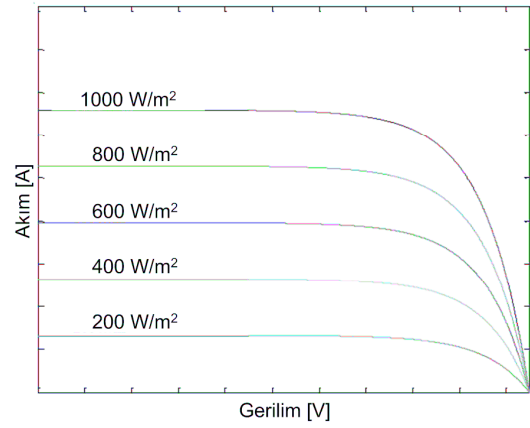
(a) FV sisteme ait akım-gerilim eğrisi değişimi



(b) FV sisteme ait güç-gerilim eğrisi değişimi



(c) Işınım değişimine göre FV sisteme ait güç-gerilim eğrisi değişimi



(d) Işınım değişimine göre FV sisteme ait akım-gerilim eğrisi değişimi

Şekil 2. 4 FV sistemlerin elektriksel karakteristikleri

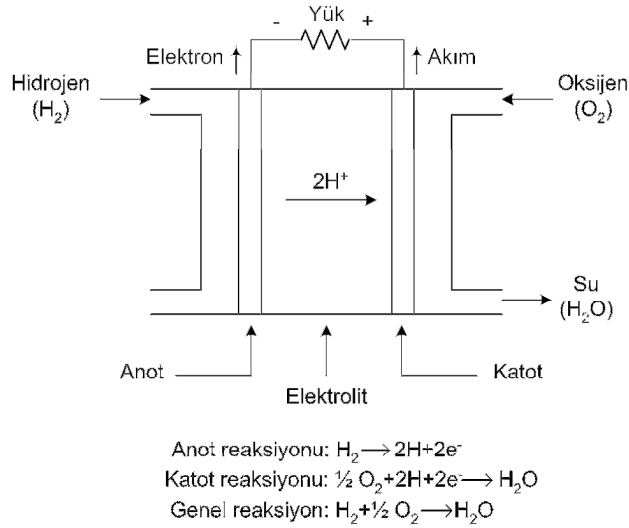
Bir FV hücrenin akımı ile gerilimi arasında Şekil 2.4(a)'da görüldüğü gibi lineer olmayan bir ilişki vardır. Şekil 2.4(a)'da görülen değişim, standart test koşullarında (1000 W/m<sup>2</sup>'lik güneş ışınımı ve 25°C sıcaklıkta) bir güneş hücresinin I-V karakteristiğini yansıtmaktadır. Görüldüğü üzere FV hücrenin açık devre akımı ( $I_{sc}$ ) adı verilen bir maksimum çıkış akımı ve açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) adı verilen bir maksimum çıkış gerilimi vardır. Burada açık devre gerilimi, çıkış akımının sıfır olduğu, bir başka deyişle de yük direncinin sonsuz olduğu açık devre durumundaki FV hücrenin uç gerilimini temsil etmektedir. Kısa devre akımı ise yük direncinin sıfır olmasına karşılık gelen FV hücrenin uçlarının kısa devre edildiği ve uç geriliminin sıfırlandığı durumdaki üretilen çıkış akımını temsil etmektedir. Ayrıca akım değeri arttıkça gerilim değerinin buna ters orantılı olarak azaldığı da açıkça görülmektedir [37].

FV hücrelerin lineer olmayan I-V karakteristiğinden ötürü bir FV hücrenin her bir ışınım değerinde maksimum güç çıkışına sahip olduğu tek bir nokta vardır. Bu durum FV hücrenin güç-gerilim eğrisinin gösterildiği Şekil 2.4(b)'de de görülmektedir. Maksimum güç noktası, tek bir gerilim değerine tekabül etmektedir. FV hücrelerin çıkış gücü, güneş ışınımına göre de büyük bir oranda değişmektedir. Bu durum Şekil 2.4(c)'de gösterilmiştir. Şekil 2.4(d) ise referans ortam sıcaklığı olarak kabul edilen 25°C'de bir FV hücrenin I-V eğrisinin ışınımına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Işınımdaki değişimlerin FV hücrenin açık devre akımını önemli oranda etkilediği, ancak açık devre gerilimi üzerinde aynı oranda büyük bir etkisi olmadığı kolayca görülebilmektedir. FV hücrenin maksimum güç, açık devre gerilimi ve akımı gibi karakteristikleri hücre sıcaklığından da önemli oranda etkilenmektedir. Sıcaklık arttıkça FV hücre açık devre gerilimi neredeyse lineer bir şekilde düşüş göstermekte, buna bağlı olarak da elde edilen çıkış gücü de azalmaktadır.

Bahsi geçen güneş enerjili güç sistemleri, özellikle bina bazlı lokal uygulamalarda günümüzde sıklıkla tercih edilmektedir. Maliyet azaltımı ve verimlilik arttırımı açısından FV sistemleri üzerine yapılan çalışmalar ile birlikte santral bazlı büyük güneş enerjili güç sistemi uygulamalarının sayısının önemli oranda artacağı da yatırımcılar tarafından rahatlıkla öngörülebilmektedir.

### 2.1.3 Hidrojen Enerjili Güç Sistemleri

Suyun elektrolizi, doğalgaz vb. konvansiyonel yakıtların dönüşümü gibi yöntemler ile elde edilen hidrojen enerjisi, güç sistemlerinde YH teknolojisi vasıtası ile kullanılmaktadır. YH, gaz halindeki bir yakıt (hidrojen) ile oksidantı (havadaki oksijen) elektrokimyasal olarak birleştirerek elektrik enerjisi ve ısı üreten bir enerji dönüştürücüsüdür. Bu işlem sonucunda Şekil 2.5'te görüldüğü üzere atık olarak sadece su oluşmaktadır. YH sistemleri ve bataryalar yapısal anlamda benzerlikler içermektedir. Ancak batarya sisteminin aksine YH'lar girişindeki yakıt sağlandığı sürece enerji üretmekte ve şarja ihtiyaç duymamaktadır. YH'ların kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme yetenekleri, konvansiyonel termo-mekanik sistemlere oranla daha yüksek dönüşüm verimliliğine sahip olmalarını sağlamaktadır. Yani aynı miktardaki bir yakıt ile YH sayesinde daha fazla miktarda elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Isıl geri kazanım işlemi ile birlikte elektrik üretiminde %80'lere varan bir verimliliğe ulaşmak mümkündür. Ayrıca bir yanma olayı gerçekleşmediğinden ve hareketli parçalar içermediğinden ötürü YH'lar sessiz bir işleme ve çevresel anlamda oldukça avantajlı bir konuma sahiptirler [25].



Şekil 2. 5 YH sisteminin yapısının basitçe gösterilmesi

YH, Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere negatif yüklü bir elektrot (anot), pozitif yüklü bir elektrot (katot) ve bir elektrolit membran tabakasından oluşmaktadır. Yakıt olarak kullanılan hidrojen anotta yükseltgenmekte, oksijen ise katotta indirgenmektedir. Protonlar ise anottan katoda doğru elektrolit membran içerisinde geçerek transfer

edilmekte, elektronlar ise dış bir devre üzerinden katoda taşınmaktadır. Bu sayede, elektronların yolunu tamamladığı bu dış devre üzerine bağlanan bir yük beslenebilmektedir. Katotta ise oksijen, proton ve elektronlar ile tepkimeye girmekte ve çıkışta su ve ısı oluşmaktadır. Hem anot hem de katotta bu elektrokimyasal işlemi hızlandıracak katalizör tabakaları bulunmaktadır. Bahsedilen bu elektrokimyasal tepkimeye ilişkin kimyasal denklemler de Şekil 2.5'te gösterilmektedir [25,38].

YH teknolojisinin temel prensipleri 1838 yılında İsveç'li bilim insanı Christian Friedrich Schönbein tarafından ortaya konulmuştur. 1839 yılında ise Sir William Grove suyun elektrolizi işleminin tam tersini uygulayarak ilk YH sistemini oluşturmuştur. 1950 yılında Cambridge Üniversitesi'nden Francis Bacon ilk 5 kW'lık alkalin YH sistemini geliştirmiştir. Alkalin YH'ların başarıyla ticarileştirilmesinin ardından Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından uzay uygulamaları için hafif bir sistem geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1970'lerde NASA'nın uzay istasyonlarında kullanılmak üzere 12 kW'lık bir alkalin YH geliştirilmiştir. 1960'ların ortalarından itibaren de ulaşım sistemleri gibi uygulamalarda kullanılmak için farklı YH çeşitlerinin araştırılmasına yoğunlaşmıştır [39].

YH sistemlerinin bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir [38]:

- YH'lar yüksek işletme verimliliği sağlama potansiyeline sahiptir.
- YH'lar için pek çok yakıt ve yakıt sağlama seçeneği bulunmaktadır.
- YH'lar oldukça modüler bir yapıya sahiptir.
- YH'lar çevreye zararlı atık üretmezler.
- Hareketli parçalar içermediklerinden ötürü YH'lar oldukça az bakım gereksinimi duyarlar.
- YH'lar tekrar şarj edilmeye ihtiyaç duymazlar ve girişinde yakıt beslemesi olduğu sürece güç üretimi yaparlar.

Bütün YH sistemlerinin daha da yaygınlaşmasının önündeki engeller ise şu şekilde sıralanabilir [38]:

- YH'lar, yapılarında bulunan özel malzemeler nedeni ile günümüzde konvansiyonel sistemlere kıyasla pahalı konumdadır. Burada araştırmacılar

özellikle bahsi geçen malzemeler yerine daha ucuz ikamelerini bulmak üzerine yoğunlaşmış durumdadırlar.

- Hidrojen üretimi için yakıt dönüşümü yapılacak ise bu teknoloji de önemli derecede pahalıdır ve bu dönüşümün gerçekleşmesi de belli bir güç tüketimine neden olmaktadır.
- Eğer YH sisteminde hidrojenden başka bir yakıt kullanılırsa, sistem performansı katalizörün kalitesinin bozulması ve elektrolit zehirlenmesi adı verilen durumlardan ötürü zamanla önemli oranda azalabilmektedir.

Günümüzde YH sistemlerinin kullanıldığı birçok farklı alan bulunmaktadır. Gerçekleştirilen uygulamanın gereksinimlerine göre de kullanılacak farklı özelliklere sahip YH çeşitleri günümüzde ticari olarak üretilmektedirler. En sık kullanılan YH çeşitleri ve özellikleri Çizelge 2.2’te belirtilmektedir.

Çizelge 2. 2 YH çeşitleri ve özellikleri [40]

YH Çeşidi	İşletim Sıcaklığı [°C]	Kullanılan Elektrolit	Kullanılan Yakıt	Kullanılan Oksitleyici	Verimlilik (%)
Alkalin YH	90-100	Potasyum hidroksit	Doğrudan Hidrojen	Saf oksijen	~60
Erimiş Karbonlu YH	600-700	Erimiş karbon çözeltisi	Doğal gazın dönüştürülmesiyle elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit	Havadan elde edilen oksijen	~45
Fosforik Asit YH	150-200	Dengelenmiş fosforik asit	Doğal gazdan elde edilen hidrojen	Havadan elde edilen oksijen	>40
Katı Oksit YH	600-1000	Seramik katı oksit elektrolit	Doğal gazın dönüştürülmesiyle elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit	Havadan elde edilen oksijen	35-45
Proton değişim membranlı YH	50-100	Geçirgen polimer elektrolit	Doğrudan ya da dönüştürülmüş hidrojen	Saf ya da havadan elde edilen oksijen	~55

Burada bahsi geçen YH çeşitlerinden proton değişim membranlı YH (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMYH); yüksek ömrü, hızlı cevap verebilme yeteneği, yüksek güç yoğunluğu ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi gibi özellikleri nedeniyle taşınabilir küçük güçlü uygulamalardan dağıtık üretim sistemleri gibi büyük çaplı uygulamalara kadar birçok alanda en çok gelecek vaat eden YH sistemidir [41-44]. Bu açıdan Ballard, UTC, Nuvera, PlugPower, General Electric, Toshiba, Sanyo, vb. birçok büyük firma PEMYH üretmektedir. Daimler-Chrysler, Ford, Renault, Toyota, Nissan, General Motors, BMW, Hyundai, vb. büyük otomotiv firmaları ile Samsung, IBM, vb. gibi önde gelen dünya markaları PEMYH teknolojisini farklı uygulamalarda ticari olarak kullanmışlardır [45].

PEMYH'ların diğer YH çeşitlerine kıyasla başlıca avantajları şu şekildedir [41-43]:

- Elektrolit yapısı diğer YH sistemlerine kıyasla daha güvenilir bir yapıdadır.
- Yüksek akım ve güç yoğunluğuna sahiptirler.
- Düşük basınçlarda başarıyla çalışabilmektedirler. Bu durum da sistem güvenilirliğini arttırmaktadır.
- Reaksiyona giren maddelerin basınç farklılığına karşı toleransları yüksektir.
- Dayanıklı bir yapıya ve basit bir mekanik tasarıma sahiptirler.

Bu öncü YH sisteminin bazı dezavantajları da şu şekildedir [41-43]:

- Hidrojenin saflığına oldukça bağımlı bir yapıya sahiptirler.
- Karbonmonoksit ve sülfür parçacıklarına karşı düşük toleransları vardır.
- Reaksiyona giren gazların nemlendirilmesine ihtiyaç duymaktadırlar.
- Oldukça pahalı bir platinyum katalizör ve katı polimer bir membran içermektedirler.

PEMYH sistemlerinin farklı uygulamalarda konvansiyonel teknolojilerin yerine geçmesi açısından özellikle maliyet azaltımı için çalışmaların daha da artırılması gerekmektedir. Ancak YH çeşitleri arasında farklı alanlarda kullanım açısından en umut vaat eden teknoloji hala PEMYH sistemleridir.



## 2.2 Alternatif Enerji Sistemleri İçin Enerji Depolama Üniteleri

Önceki bölümlerde bahsi geçen alternatif enerji kaynakları doğanın koşullarına son derece bağımlı durumdadır. Bu nedenle bu kaynaklar ile üretilen enerji, daha önce de bahsedildiği üzere sezonluk, günlük ve hatta anlık olarak bile büyük değişimler gösterebilmektedir. Bu husus, özellikle şebekeden bağımsız uygulamalarda üretilen enerjinin genel enerji talebi ile tam olarak örtüşmemesine neden olabilmektedir. Bahsi geçen alternatif kaynaklardan üretilen fazla enerji farklı tür enerji depolama ünitelerine aktarılmakta, depolanan bu enerji ise ana kaynakların mevcut olmadığı ya da yetersiz olduğu durumlarda yük talebinin karşılanmasında kullanılmaktadır [46]. Açıkça görüldüğü üzere şebekeden bağımsız uygulamalar için, tüketicilerin enerji ihtiyacının her durumda başarı ile karşılanabilmesi açısından enerji depolama üniteleri oldukça büyük öneme sahiptirler [47].

Bahsi geçen enerji depolama üniteleri, elektriksel ya da termal olabilir. Elektriksel enerji depolama sistemlerinde elektriksel bir giriş-çıkış söz konusu iken termal sistemlerde de benzer bir şekilde termal bir giriş-çıkış mevcuttur. Elektriksel enerji depolama sistemleri elektrokimyasal sistemler (batarya, vb.), kinetik enerji depolama sistemleri (volan, vb.) ya da potansiyel enerji depolama sistemleri (pompalanmış su, sıkıştırılmış hava, vb. formunda) olabilirler [48]. Termal enerji depolama sistemlerinde de benzer şekilde farklı teknolojilerin kullanımı uygulamalarda yer almıştır.

Batarya sistemleri elektrik enerjisini kimyasal formda depolamanın uygulanmış en eski yöntemlerinden biridir. Bataryalar; kameralar, cep telefonları, laptoplar vb. elektronik cihazlardan taşıt sistemlerine kadar birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Farklı uygulamalardaki ihtiyaçları karşılamak açısından birçok farklı batarya çeşitleri geliştirilmiş durumdadır. Burada günümüzde ticari olarak mevcut olan batarya çeşitleri kurşun-asit, lityum-iyon, nikel-kadmiyum, nikel metal hidrit, sodyum-sülfür ve sodyum-nikel klorit (ZEBRA) bataryalar olarak sıralanabilir.

Bahsi geçen batarya çeşitleri arasında öncü olarak kurşun-asit ve lityum-iyon batarya teknolojileri belirtilebilir. Kurşun-asit bataryalar, Fransız fizikçi Gaston Planté tarafından 1860 yılında geliştirilen pratikte kullanılabilecek ilk prototipten beri yüzyılı aşkın bir süredir elektrik güç sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar [48]. Kurşun-asit

bataryalar elektrik enerjisinin depolanması hususunda en eski ve en olgunlaşmış teknolojidir. Düşük yatırım maliyeti, bütün tekrar şarj edilebilir bataryalar arasında en düşük self-deşarja sahip olması ve nispeten daha kolay bakımı gibi avantajları sayesinde birçok alandaki depolama sorununun çözülmesinde kurşun-asit bataryalar oldukça yüksek bir yoğunlukta kullanılmaktadırlar [49,50]. Bu teknolojinin dezavantajları ise sınırlı çevrim ömrü, nispeten düşük enerji yoğunluğu, düşük ve yüksek ortam sıcaklıklarında azalan performans, derin deşarja karşı hassasiyet ve çevresel olarak zararlı kurşun bileşenini ve asit elektroliti bünyesinde barındırmasıdır [51,52].

Günümüzde özellikle taşıt uygulamalarında kullanılmak üzere araştırılan önemli bir kurşun-asit tabanlı batarya teknolojisi ise, jel akü olarak da bilinen valf-kontrollü kurşun asit (valve-regulated lead acid-VRLA) bataryalardır. Bu batarya teknolojisinin özellikle yüksek şarj-deşarj ömrü ve yüksek verim gibi avantajları mevcuttur [53,54]. Ancak VRLA bataryaların özellikle sürekli olarak kısmi şarjlılık durumunda tutulması durumunda yapısında meydana gelen bozulmalar, bu sistemlerin geliştirilmesi gereken yönlerini ortaya koymaktadır [55]. Her ne kadar yeni batarya teknolojileri üzerine birçok çalışma gerçekleştirilse de kurşun-asit bataryaların, sahip olduğu geniş kullanım alanını birçok uygulamada daha uzun bir süre koruyacağı öngörülmektedir.

Lityum-iyon bataryaların kullanımı ise Sony tarafından 1991 yılında ticari olarak üretimi gerçekleştirildiğinden beri kısa sürede birçok farklı alanda yaygınlaşmıştır [51]. Lityum-iyon bataryaların laptoplar, MP3 çalarlar ve cep telefonları gibi taşınabilir elektronik cihazlardaki kullanımı son derece yaygın olmasının yanı sıra elektrikli taşıtlarda ve alternatif enerji kaynakları bazı uygulamalarda bu teknolojinin kullanımının yakın gelecekte daha da hızlı bir şekilde artacağı beklenmektedir. Bu açıdan yıllık olarak milyarlarca lityum-iyon batarya ünitesi üretilmektedir [51,56].

Lityum-iyon bataryalar diğer batarya teknolojilerine kıyasla yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler [51]. Lityum-iyon bataryalar hafif bir yapıya, hücre başına yaklaşık 4 V'luk nispeten yüksek bir gerilim seviyesine ve 100 Wh/kg ile 150 Wh/kg arasında değişen bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak bu teknolojinin dezavantajları yüksek ilk yatırım maliyeti ve hassas çalışma limitlerinden ötürü karmaşık şarj yönetim sistemidir [56].

Bunun yanı sıra, aşırı şarj gibi durumlar lityum-iyon bataryaların yapısında oldukça kalıcı hasarlara yol açabilmektedir. Ayrıca güvenlik, düşük çevrim ömrü, performansın sıcaklıktan oldukça fazla etkilenmesi ve iç yapısında kullanılan materyalin bulunmasının nispeten zor olması lityum-iyon bataryaların günümüzde daha da sık kullanılmasının önündeki önemli engeller konumundadır.

Lityum-iyon bataryaların hassas kimyasal yapılarını iyileştirmek ve özellikle elektrikli taşıt uygulamaları gibi dayanıklılığın ön planda olduğu yapılarda daha sık kullanım sağlamak açısından araştırma çalışmaları günümüzde oldukça yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmalar özellikle lityum-iyon bataryaların elektrot yapısında kullanılmak üzere alternatif materyallerin geliştirilmesi ve maliyet azaltımı üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Lityum-silikon (Li-Si), lityum-tin (Li-Sn), vb. materyaller lityum-iyon bataryaların negatif elektrotunda kullanılmak üzere sıklıkla araştırılmaktadırlar. Bu açıdan geleceğin teknolojisi olarak görülen önemli bir yaklaşım da negatif elektrot olarak karbon nanotüpler kullanılmasıdır. Bu yaklaşım vasıtası ile özellikle hacim ve ağırlık açısından önemli avantajların elde edilebileceği öngörülmektedir [57]. Ayrıca lityum-iyon bataryaların yapısındaki grafit ve lityum kobalt oksit materyallerinin daha yüksek kapasiteli ve daha düşük maliyetli alternatifleri ile değiştirilmesi de üzerinde çalışılan bir husustur.

Alternatif enerji kaynaklarının dağıtık sistemlerde kullanıldığı uygulamalarda elektrik enerjisinin hidrojen formuna dönüştürülerek depolanması da, günümüzde araştırmacılar için dikkat çekici bir alternatif haline gelmiştir. Bu tarz sistemlerde rüzgâr, güneş, vb. ana alternatif enerji kaynaklarının ürettiği enerjinin yük talebinin haricinde kalan fazla kısmı bir elektrolizör ünitesi üzerinden hidrojen elde etmek için kullanılmaktadır. Elde edilen hidrojen, farklı yapılardaki hidrojen tanklarında depolanabilmekte ve ihtiyaç olduğunda bir YH sistemi tarafından elektrik enerjisine çevrilerek yük talebinin karşılanması açısından kullanılabilir. Böylelikle, bu tür hibrit alternatif enerji sistemlerinde kullanılan konvansiyonel batarya ünitelerinin hacim, maliyet ve çevresel etki açılarından olumsuz sonuçlarının önüne geçilebilmektedir. Ancak hidrojen depolaması çözümünün günümüzde bazı önemli sorunları mevcuttur. Hidrojen depolama ile ilgili problemler, tercih edilen depolama yöntemine göre değişmektedir. Hidrojen depolama sistemleri, mevcut problemlerinin

çözümü ile birlikte geleceğin en önemli enerji depolama yöntemlerinden biri olarak görülmektedir.

### **2.3 Alternatif Enerji Sistemleri İçin Enerji Yönetimi Stratejileri**

Hibrit sistemlerde performans artışı elde etmek açısından, hibrit sistemi oluşturan her bir kaynağın yük karakteristiklerini göz önünde bulunduran bir enerji yönetim stratejisinden yararlanılması, birçok açıdan olumlu sonuçları beraberinde getirmektedir. Hibrit alternatif enerji sistemlerini oluşturan enerji kaynakları, daha önce belirtildiği üzere farklı performans karakteristiklerine sahiptirler. Bahsi geçen kaynakların verimli şekilde işletilmesindeki en önemli etkenlerden biri, sistemde uygulanan enerji yönetimi stratejisidir.

Literatürde birçok farklı yapıdaki hibrit sisteme uygulanmış farklı enerji yönetimi yaklaşımları mevcuttur. Bunların arasında pratik uygulamalarda kullanılabilmeye oldukça uygun bir yapıya sahip olması nedeni ile bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi akıllı enerji yönetim stratejileri ve konvansiyonel PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörler ön plana çıkmaktadır. Bunun yanı sıra optimal kontrol teorisi, adaptif kontrol, dayanıklı (robust) kontrol, vb. diğer birçok yöntem de literatürdeki çalışmalarda farklı hibrit sistem yapılarına uygulanmıştır. Bu açıdan bahsi geçen farklı yöntemler arasında uygulamanın türüne göre farklı seçimler yapılabilmektedir.

Konvansiyonel PID kontrol stratejileri endüstriyel anlamda en sık kullanılan yaklaşımlardan biri konumundadır. Basit yapısı, her türlü mikroişlemci yapısına uygulanabilirliği gibi avantajları PID kontrolörü popüler kılmaktadır. Ancak hibrit alternatif enerji sistemleri gibi karmaşık çok amaçlı yapıların enerji yönetimi için bu yaklaşım farklı açılardan yetersiz kalabilmektedir. Enerji yönetimi açısından ön planda bulunan akıllı enerji yönetimi stratejileri arasında ise yapay sinir ağları yaklaşımı birçok farklı uygulamada yoğun bir şekilde kullanılmış ve literatüre bu açıdan birçok çalışma ile katkıda bulunulmuştur [58-61]. Yapay sinir ağları, biyolojik sinir sistemlerinin çalışmasını modelleyen genel bir matematik tabanlı yazılımdır. Bir sinir ağı, bireysel işlem yapan birbirine bağlı küçük ünitelerden oluşan bir yapıdır. Bu üniteler arasında bilgi transferi bağlantılar aracılığı ile yapılmaktadır. Bahsi geçen her bağlantı, giriş ve

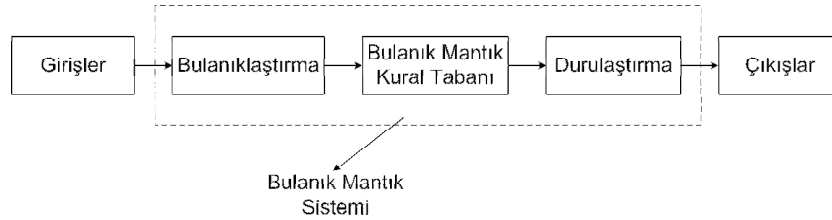
ağırlık olmak üzere iki değere sahiptir [62]. Bu değerler sinir ağları içerisinde gerçekleşen işlemler ile birlikte çıkış elde edilmesinde kullanılmaktadırlar.

Yapay sinir ağlarını konvansiyonel yöntemlerden ayıran önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir [62]:

- Öğrenme aşamasında verilen problem ile ilgili doğrudan bilgi edinip bunu bir sonraki aşamada yeniden öğrenmeye gerek kalmadan başarıyla kullanabilmektedir.
- Diğer yöntemlerin işlemekte oldukça zorlanabilecekleri nümerik ya da analog veriler ile kolayca çalıştırılabilmektedir.
- Bir “kapalı kutu (black box)” yaklaşımı olarak değerlendirilebilmektedir ve bu sayede kullanıcı derin bir matematiksel altyapıya sahip olmadan da bu yöntemi kolayca kullanabilmektedir.
- Giriş sinyalinde gürültü söz konusu olsa bile dayanıklı yapısını muhafaza edebilmektedir.
- Eğitilmiş yapay sinir ağları önceden bilinmeyen bir giriş bilgisine oldukça yüksek oranda bir doğrulukla yanıt verebilmektedir.

Yapay sinir ağlarının ötesinde literatürde günümüze kadar en sık kullanılan enerji yönetimi stratejilerinden biri de, bulanık mantık tabanlı yaklaşımlardır. İlk defa Zadeh tarafından ortaya konulan ve günümüzde endüstriyel uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanı bulunan bulanık mantık sistemleri, klasik kontrol yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir [63]. Bu kontrol yönteminin sağladığı en büyük fayda insana özgü tecrübe ile öğrenme olayının kolayca modellenenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine imkân sağlamasıdır. Böylece bulanık mantık sistemleri, günlük hayatta sıkça karşılaşılan belirsizlik durumlarında kullanılmaya uygun bir yapıdadır. Bu avantajları sayesinde birçok farklı alanda kullanım açısından oldukça ilgi çekici bir konuma gelmiştir [64]. Ancak bulanık mantık ile ilgili en önemli uygulamalar kontrol alanında yoğunlaşmaktadır [65,66]. Bulanık mantık kontrolör özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan modellerdeki süreçleri değerlendirmek için oldukça uygundur [65,67]. Uygulanacağı sisteme ait komple bir matematiksel modelin geliştirilmesini gerektirmeyen bulanık mantık kontrolörler,

“EĞER-O ZAMAN” ifadelerini içeren bir kurallar bütünüden oluşmaktadır. Kuralların ‘EĞER’ kısımları girişlerin bölgelerini nitelemektedir. Bir giriş, üyelik fonksiyonunun derecesine göre bu bölgelere aittir. Kuralların ‘O ZAMAN’ kısımları ise çıkış değişkeninin değerini belirlemektedir. Kontrolörün çıkışını elde etmek için bütün kuralların ‘EĞER’ kısımlarına ait üyelik fonksiyonlarının derecelerinin ortalaması alınır ve üyelik dereceleri ile ağırlıklandırılır [66,67]. Oluşturulan kurallar, çıkışlar ve girişler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi modellemekte ve kontrol işlemi, kuralların içeriğine göre bulanıklaştırma ve durulaştırma operatörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [68,69]. Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2. 6 Bulanık mantık kontrolörün işleyiş sürecine ait şematik gösterim

Bulanık mantık yaklaşımı literatürde birçok farklı uygulamada en sık kullanılan yöntem konumundadır [67-77]. Bu yaklaşımın daha birçok uygulamada konvansiyonel yaklaşımların yerini alabileceği ve mevcut popülerliğini birçok farklı alanda koruyacağı da birçok araştırmacı tarafından öngörülmektedir.

#### 2.4 Alternatif Enerji Sistemleri İçin Boyutlandırılma Yaklaşımları

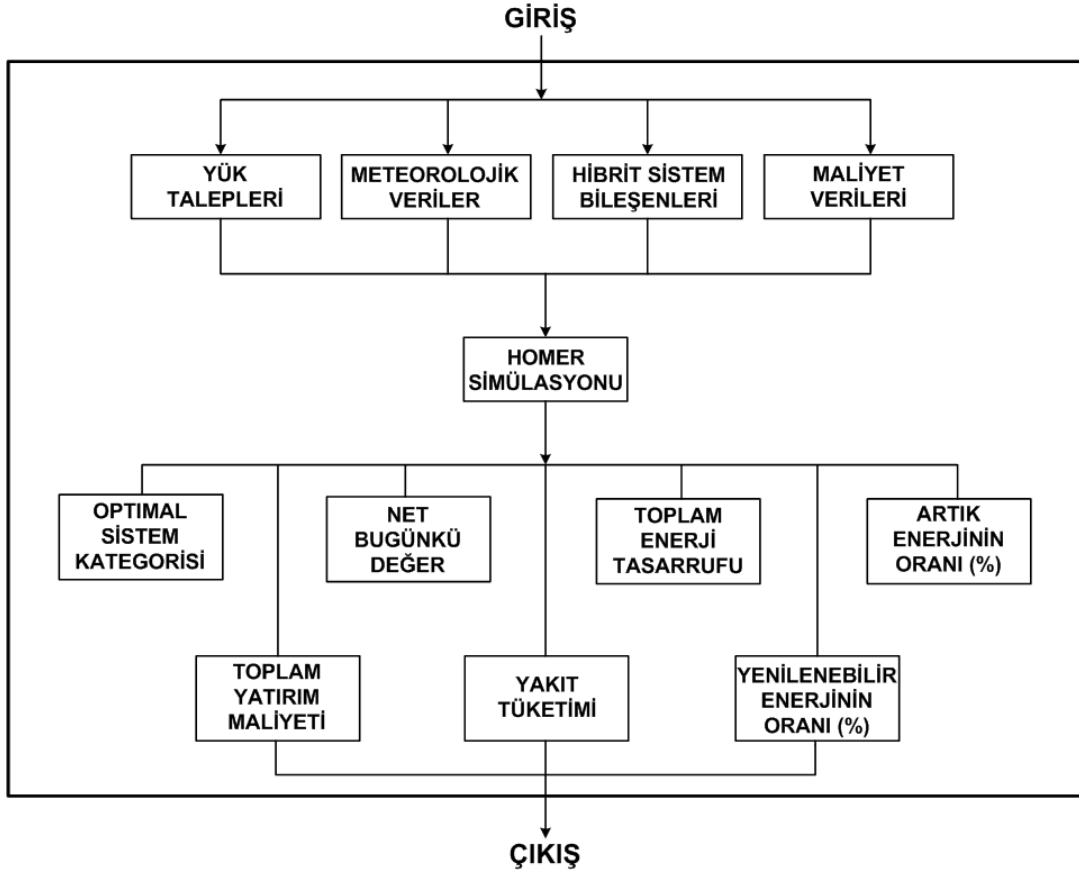
Hibrit alternatif enerji sistemlerinin optimum tasarımı son zamanlarda oldukça ilgi çeken bir konudur ve bu açıdan literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bahsi geçen tasarım problemi, belirli bir bölgedeki güç sistemi için ekonomik, çevresel, vb. açılardan optimum bir konfigürasyonunun belirlenmesi ile alakalıdır [78]. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı, sistem ömrü boyunca ortaya çıkan maliyet ve emisyon salınımı açısından değerlendirilebilir. Buradaki sistem konfigürasyonları, asgari ömür boyu maliyeti ve/veya emisyon salınımını sağlayan kaynak tipleri ve boyutlarını ortaya koymaktadır. Aday hibrit sistem konfigürasyonları arasından en düşük “net bugünkü değer”e sahip olan konfigürasyon, “optimal konfigürasyon” ya da “optimum tasarım” olarak adlandırılmaktadır [79,80].

Bahsi geçen bu “optimum tasarım” kriterini sağlamak için birçok yaklaşım mevcuttur. Bu amaçla gerçek zamanlı sistem entegrasyonu için yararlı olabilecek birçok paket program da ticari olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması için birçok araştırmacı tarafından farklı optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Bu bölümde hibrit sistem boyutlandırma yaklaşımlarının günümüzdeki konumunun incelenmesi açısından detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir:

#### **2.4.1 Hibrit Sistem Boyutlandırması İçin Ticari Olarak Mevcut Paket Programlar**

Simülasyon programları, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin performansının değerlendirilmesi açısından en yaygın araçlar konumundadırlar. Bu konuda günümüzde birçok araştırma laboratuvarının ve üniversitenin web adreslerinden indirilebilen çeşitli yazılımlar mevcuttur. Bahsi geçen simülasyon programlarının kullanılması ile birlikte farklı sistem konfigürasyonlarının performans ve enerji üretim maliyetleri karşılaştırılarak daha önce ele alınan “optimum konfigürasyon” elde edilebilmektedir. Belirtilen simülasyon programları arasında “Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı - National Renewable Energy Laboratory (NREL)” tarafından geliştirilen HOMER yazılımı günümüzde en sık kullanılan araç konumundadır [81].

HOMER programı FV paneller, RT’ler, hidroelektrik sistemler, bataryalar, konvansiyonel dizel generatörler, elektrolizör üniteleri ve YH sistemleri gibi birçok farklı enerji sistemine ait modelleri bünyesinde barındırmakta, fiyat ve bölgesel olarak enerji kaynağının mevcudiyetini dikkate alarak uygun hibrit sistem seçeneklerini belirlemektedir [82]. HOMER içerisindeki tasarım işleminde ayrıca şebeke bağlantısı da dikkate alınabilmektedir. HOMER yazılımı; dikkate alınacak enerji kaynaklarının türü, ekonomik ve teknik kısıtlar, enerji depolama gereksinimleri ve sistem kontrol stratejileri açısından başlangıç verisine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca sistem bileşenlerinin türü, verimlilikleri, işletim ömürleri, yatırım, işletim ve bakım maliyetleri, vb. giriş bilgileri de yazılımın çalıştırılması için gereklidir [3]. Bahsi geçen yazılımın çalışma prensibini gösteren blok diyagram Şekil 2.7’de verilmiştir [83].



Şekil 2. 7 HOMER yazılımının işleyiş blok diyagramı

HOMER programı içerisinde hem şebekeden bağımsız, hem de şebeke ile paralel işletim tarzları için farklı hibrit sistem seçenekleri saatlik enerji akışının simüle edilmesi ile değerlendirilmektedir. Yıl içerisindeki 8760 saatin her biri için enerji üretim/tüketim dengesi sağlanacak şekilde sistem işletimi HOMER vasıtası ile simüle edilmektedir. Her bir saatteki yük talebi, o saatteki sistemin üretebileceği enerji ile karşılaştırılmaktadır. Eğer sistem konfigürasyonu içerisinde enerji depolama elemanları mevcut ise model, elektriksel şarj ve deşarjın zamanını da belirlemektedir. Sistem konfigürasyonlarının simüle edilmesinin ardından, net bugünkü değerlerine bağlı olarak uygun sonuçları içeren bir liste oluşturulmaktadır [3,5,84,85]. Sistem tasarımının bileşen maliyeti ya da bölgesel meteorolojik veriler gibi belirli anahtar parametrelere karşı hassasiyetini değerlendirebilmek amacı ile HOMER içerisinde hassasiyet analizleri de gerçekleştirilebilmektedir [5].

HOMER yazılımı, literatürde yer alan birçok yenilenebilir enerji sistemi tabanlı durum analizi çalışmasında sıklıkla kullanılmış durumdadır. Bahsi geçen çalışmalarda; hem şebekeden bağımsız, hem de şebeke ile paralel işletim tarzları incelenmiştir. Bunun



yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının dizel generatörler gibi konvansiyonel sistemler ile paralel olarak işletimi hususu da birçok çalışmada ele alınmıştır. Literatürde HOMER kullanılarak hibrit sistemlerin optimum boyutlandırması üzerine gerçekleştirilen bazı yayınlar Ref. [3,5,80,83,84,86-88]'de yer almaktadır.

HOMER dışında hibrit sistem tasarımı açısından birçok farklı yazılım da mevcuttur. Bu yazılımlara örnek olarak "The Hybrid Power System Simulation Model (HYBRID2)" [89], "The General Algebraic Modeling System (GAMS)" [90], "Optimization of Renewable Intermittent Energies with Hydrogen for Autonomous Electrification (ORIENTE)" [91], OptQuest [92,93], LINDO [94,95], WDILOG2 [96], "Dividing Rectangles (DIRECT)" [97,98], "Determining Optimum Integration of RES (DOIRES)" [99], "Simulation of Photovoltaic Energy Systems (SimPhoSys)" [100], "Geo-Spatial Planner for Energy Investment Strategies (GSPEIS)" [101,102], "Grid-connected Renewable Hybrid Systems Optimization (GRHYSO)" [103], H<sub>2</sub>RES [104] vb. verilebilir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin performans değerlendirmesi açısından ticari olarak mevcut paket programlar üzerine detaylı bir araştırma Ref. [105]'te yer almaktadır.

## **2.4.2 Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Boyutlandırılması İçin Kullanılan Optimizasyon Teknikleri**

### **2.4.2.1 Genetik Algoritma**

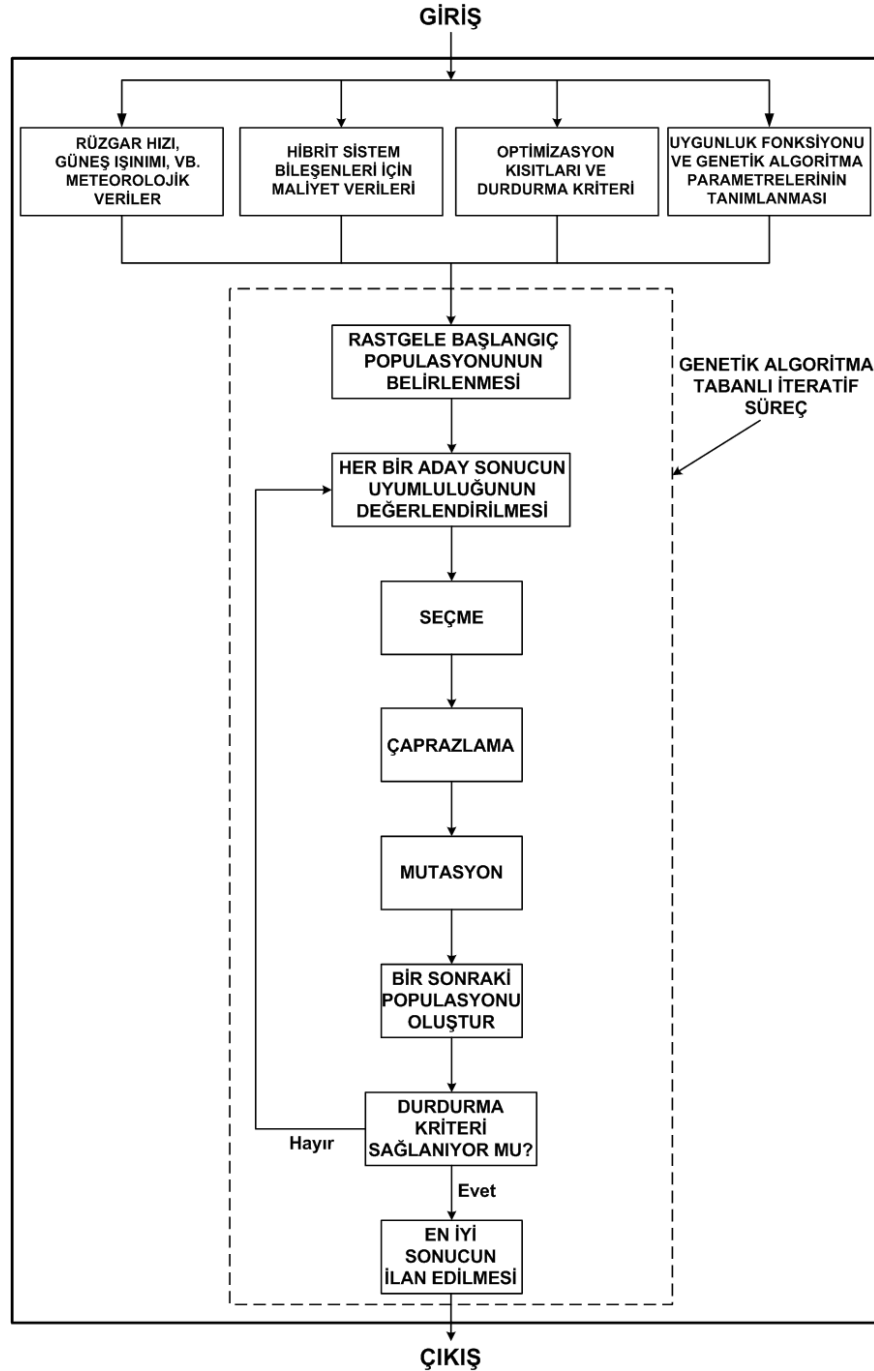
Genetik algoritma biyolojik organizmaların genetik olarak evrimini temel alan bir optimizasyon yöntemidir [106,107]. Genetik algoritmanın konsepti ilk olarak Holland [108] tarafından ortaya konulmuş ve bu yaklaşım birçok farklı uygulamada sıklıkla kullanılmıştır.

Genetik algoritmanın enerji sistemlerinin boyutlandırılmasında kullanımı Şekil 2.8'deki gibi özetlenebilmektedir. Şekil 2.8'de görüldüğü üzere genetik algoritma tabanlı yaklaşımın giriş verileri; bölgesel meteorolojik veriler, belirlenen hibrit sistem bileşenlerinin kurulum ve bakım maliyetlerini de içeren birim maliyetleri, vb. olarak belirlenmiştir. Algoritma içerisine sistemin durumuna göre bazı kısıtlar da eklenebilmektedir. Bu kısıtlara örnek olarak; bir çatı üzerine kurulacak FV sistemindeki maksimum panel sayısının çatı alanına bağlı olarak sınırlandırılması, belirli bir arazide

kurulacak olan RT sayısının arazi alanına bağılı olarak sınırlandırılması ya da bir YH sisteminin çıkış gücü değişiminin sınırlandırılması vb. verilebilir. Uygulamanın türüne göre çok farklı kısıtlar da tanımlanabilmektedir. Bunun yanı sıra, bir uygunluk fonksiyonu da genetik algoritma yaklaşımına bir giriş olarak belirtilmelidir. Ayrıca seçim oranı, mutasyon oranı vb. gibi genetik algoritma operatörlerinin değerleri de genetik algoritma tabanlı boyutlandırma işlemi öncesinde tanımlanmalıdır. Oluşturulan bu giriş verileri ile birlikte genetik algoritma tabanlı boyutlandırma yaklaşımı, önceden tanımlanmış bir durdurma kriteri sağlanıncaya ya da maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar iteratif olarak devam etmektedir. Temel bir genetik algoritma yaklaşımı beş adet bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler rastgele bir başlangıç popülasyonu üretici, bir “uygunluk” değerlendirme ünitesi ile seçme, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç adet genetik algoritma operatöründen ibarettir [109-111]. Başlangıçtaki rastgele popülasyon oluşturulması işlemi ile birlikte genetik algoritma, hibrit sistem bileşenleri için yük talebi/güç üretimi dengesini her adımda sağlayan rastgele boyutlandırmalar ortaya çıkartmaktadır. Rastgele seçimlerin her biri tanımlanmış uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilmektedir. “Seçme” operatörü uygunluk değerlerine göre başlangıç popülasyonunun önceden belirlenmiş bir oranını seçmektedir [112,113]. Seçilen bu çözümler kullanılarak “çaprazlama” operatörü, daha yüksek uygunluk değerlerine ulaşabilmek amacı ile yeni olası sonuçlar oluşturmaktadır.

Bu işlemin daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacı ile örnek olarak bir RT-FV-YH hibrit sistemi ele alınabilir. Bu tarz bir sistemde seçme operatörünün 10/20/15 (10 kW’lık RT, 20 kW’lık FV sistemi ve 15 kW’lık YH) ve 5/25/12 (5 kW’lık RT, 25 kW’lık FV sistemi ve 12 kW’lık YH) olmak üzere iki sonucu seçtiğini farz edelim. Örnek bir çaprazlama işlemi ile birlikte mevcut sonuçlardan daha yüksek veya düşük uyumluluk değerine sahip olabilecek 5/25/15 (5 kW’lık RT, 25 kW’lık FV sistemi ve 15 kW’lık YH) ve 10/20/12 (10 kW’lık RT, 20 kW’lık FV sistemi ve 12 kW’lık YH) şeklinde iki adet yeni sonuç üretilmektedir. Yeni bir popülasyon, bu örnekte görüldüğü gibi seçme operatörünün seçtiği uygun sonuçlara çaprazlama operatörünün uygulanması ile elde edilmektedir. Bu şekilde daha yüksek uyumluluk değerine sahip sonuçların seçilmesi ve bu sayede yeni bir popülasyon üretilmesi işlemi iteratif süreç boyunca her bir iterasyonda devam etmektedir. İteratif süreç boyunca algoritmanın yerel bir minimumda takılmasını

önlemek amacıyla bir “mutasyon” operatörü de uygulanabilmektedir. Örnek olarak, 10/20/15 (10 kW’lık RT, 20 kW’lık FV sistemi ve 15 kW’lık YH) sonucunda YH boyutunun 15 kW yerine 5 kW olarak dikkate alınması mutasyon operatörünün uygulanması ile sağlanabilmektedir. Seçme, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulandığı döngüyü içeren bu iteratif süreç, daha önce belirtilen durdurma kriterlerine ulaşıncaya kadar devam etmektedir [114-117].



Şekil 2. 8 Genetik algoritma yaklaşımı akış şeması

Genetik algoritmanın hibrit sistemlerin boyutlandırılmasında kullanım açısından en önemli avantajı lokal bir minimumdan kolayca kurtulabilmesi ve global minimum noktayı bulmadaki etkinliğidir. Bunun yanı sıra bir kromozom içerisinde sonsuz sayıda değişkenin gömülü olarak adapte edilebilmesi, yüksek boyutlu optimizasyon problemleri sınıfına giren hibrit enerji sistemlerinin boyutlandırılması hususunda genetik algoritmaya büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu avantaj parçacık sürü optimizasyonu gibi bir sonraki bölümlerde ele alınacak optimizasyon yaklaşımları bünyesinde mevcut değildir. Örneğin FV-RT-YH-hidro hibrit yenilenebilir enerji sistemi gibi üç adet bileşenden daha fazla sayıda bileşen içeren hibrit sistemlerin boyutlandırılması açısından genetik algoritma ön plana çıkmaktadır. Ayrıca genetik algoritmanın konvansiyonel Newton-Raphson yaklaşımı gibi yöntemlerdeki türev bilgisi ihtiyacına gerek duymaması da önemli bir avantajdır. Ancak genetik algoritma, karmaşık yapısından ötürü diğer optimizasyon yaklaşımlarına göre yazılımı oluşturma açısından zor bir yöntem konumundadır. Bunun yanı sıra, optimize edilecek sistemdeki parametre sayısı arttıkça genetik algoritmanın yapısı daha da karmaşıklaşmakta ve buna bağlı olarak algoritmanın cevap süresi önemli bir oranda uzamaktadır [118-121].

Yukarıda belirtilen avantajları sebebi ile genetik algoritma birçok farklı alanda kullanılmakta ve hibrit sistem boyutlandırması alanında çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalar arasında Koutroulis vd. [122,123], Yang vd. [124,125] ve Bilal vd. [126] şebekeden bağımsız hibrit bir RT-FV sisteminin boyutlandırılmasında genetik algoritmadan yararlanmışlardır. Lagorse vd. [127] ise FV, RT ve YH'den oluşan çok kaynaklı hibrit bir sistemin ekonomik olarak tasarımında genetik algoritmayı uygulamıştır. FV, RT, YH, mikrotürbin ve bataryadan oluşan daha detaylı bir sistem ise genetik algoritma kullanılarak Kalantar vd. [128] tarafından ekonomik olarak optimum boyutlandırılmıştır. Lopez ve Agustin [129,130] ise yenilenebilir enerji üniteleri ve konvansiyonel dizel generatör gibi kaynaklardan oluşan, şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin farklı kombinasyonlarının tasarımı amacı ile, genetik algoritma tabanlı olarak "Hybrid Optimization by Genetic Algorithms (HOGA)" isimli bir paket program oluşturmuşlardır. Genetik algoritma&Simpleks yaklaşımlarının beraberce kullanıldığı bir çalışma ise Lagorse vd. [131] tarafından gerçekleştirilmiştir. Genetik algoritma daha birçok çalışmada da farklı türdeki hibrit enerji sistemleri için

uygulanmıştır. Açıkça görüldüğü üzere genetik algoritma, hibrit sistem boyutlandırma çalışmaları arasında oldukça önemli bir kullanım alanına sahiptir.

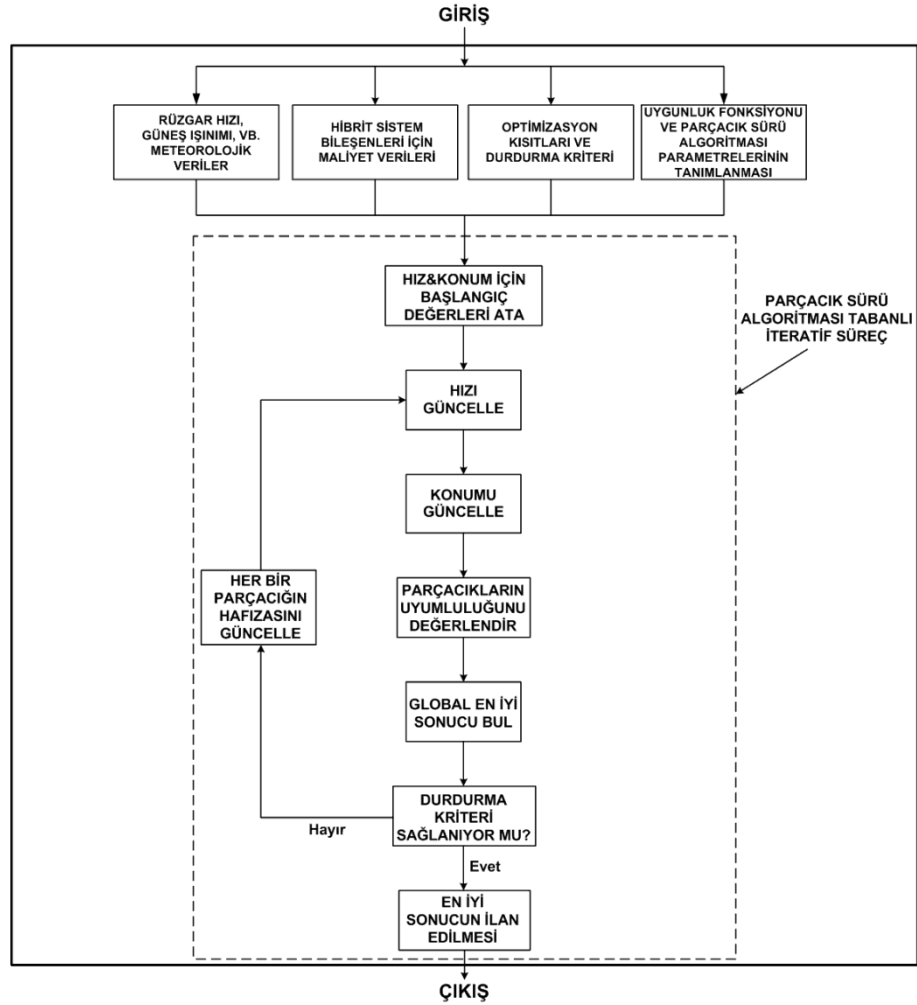
#### **2.4.2.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)**

Parçacık sürü optimizasyonu, sürülerin hareketi ve akılsal davranışlarını baz alarak geliştirilen ve evrimsel hesaplama teknikleri ailesi içerisinde yer alan bir optimizasyon yöntemidir. Parçacık sürüsü, yemek arayışı gibi ortak bir hedefle hareket eden bir grubun temel sosyal yapısını örnek olarak geliştirilen bir sistem modelidir. Bu yaklaşım Sosyo-psikolog James Kennedy ve Elektrik Mühendisi Russell Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirilmiştir [132,133].

Parçacık sürü algoritmasında parçacık olarak adlandırılan her bir çözüm, çok boyutlu bir problem uzayında bir hız ile yer değiştirmektedir. Bahsi geçen bu yer değiştirme hızı, parçacığın kendi ve komşularının deneyimlerine bağlı olarak ayarlanmaktadır. Burada her bir parçacığın komşularının deneyimlerinden de yararlanıyor olması, sürü hareketini oluşturmaktadır [134,135].

Parçacık sürü optimizasyonunun hibrit sistem boyutlandırma çalışmalarındaki kullanım yapısı Şekil 2.9'da özetlenmektedir. Genetik algoritmaya benzer olarak parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımının da giriş verileri Şekil 2.9'da görüldüğü üzere; bölgesel meteorolojik koşullar, planlanan hibrit sistem bileşenlerinin kurulum ve bakım maliyetlerini içeren birim fiyatları, önceden belirlenmiş kısıtlar, değerlendirme açısından gerekli olan bir uyumluluk fonksiyonu ve parçacık sürü optimizasyonuna ait parametrelerin değerleri şeklindedir. Daha önce de belirtildiği üzere parçacık sürü optimizasyonu popülasyonunda her bir olası çözüm parçacık olarak adlandırılmaktadır [136,137]. Parçacık sürü optimizasyonunda her bir parçacık kendisine ait konum ve hız vektörü ile ilişkili olarak olası bir çözümü temsil etmektedir. Bahsi geçen parçacıklar, rastgele bir başlangıç hızına sahip olarak arama alanında yer değiştirmektedir. Her iterasyonda parçacık o andaki hızı, uyumluluk fonksiyonu değerine göre şu ana kadar elde ettiği en iyi konum ve bütün parçacıklar arasında elde edilen en iyi konum değerlerini göz önüne alarak optimum sonuca doğru hareket etmektedir [138,139].

Parçacık sürü optimizasyonunun işleyişini daha iyi kavramak için hibrit bir FV-RT sistemi ele alınabilir. Örneğin *i*. iterasyonda bir parçacığın x-y eksenindeki mevcut konumunun 15,20 (15 kW'lık RT, 20 kW'lık FV sistemi) olduğunu düşünelim. Bunun yanı sıra bahsi geçen iterasyonda bütün parçacıklar arasında en iyi uyumluluk değerine sahip parçacığın konumunun 25,20 (25 kW'lık RT, 20 kW'lık FV sistemi) olduğunu farz edelim. Ayrıca parçacık sürü optimizasyonu popülasyonundaki bütün parçacıkların komşuları ve en iyi konuma sahip parçacık hakkında tam bir bilgiye sahip olduklarını düşünelim. Bu durumda 15,20 konumundaki parçacık x eksenindeki hızını arttırarak 25,20 pozisyonundaki parçacığın konumuna ulaşmaya çalışacaktır. Popülasyon içerisindeki bütün parçacıklar her bir iterasyonda aynı prosedürü uygulayacak ve bu sayede en iyi konumlu parçacığın önderliğinde grup halinde bir hareket oluşacaktır. Bahsi geçen bu iteratif süreç, daha önceden belirlenmiş bir durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam edecektir [140,141].



Şekil 2. 9 Parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımı akış şeması

Hem genetik algoritma, hem de parçacık sürü optimizasyonu benzer iteratif süreçler ışığında üstün bir etkinliğe sahip olmalarına rağmen, parçacık sürü optimizasyonunun genetik algoritma ile kıyaslandığında bazı avantajları bulunmaktadır. Bu yaklaşımın en önemli özelliklerinden birisi, bir yazılım programında kolaylıkla uygulanabilecek, sadece birkaç eşitlik içeren nispeten basit bir yapıya sahip olmasıdır. Bu sayede işlem zamanı nispeten kısaltmakta ve hafıza gereksinimi azalmaktadır [8,142]. Ancak parçacık sürü optimizasyonunun bir arama alanındaki global optimum noktaya ulaşma açısından güvenilirliği genetik algoritmaya göre daha düşüktür. Bunun yanı sıra daha önce de belirtildiği üzere parçacık sürü optimizasyonu, üç parametreden daha fazla parametre içeren optimizasyon problemlerinde kullanılmak açısından genetik algoritmaya kıyasla dezavantajlı konumdadır. Bu husus, parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımının parçacıkların konumlarının tanımlanması esasına dayanması ve bahsi geçen konumların en fazla x, y ve z eksenlerinde tanımlanabilmesi nedeniyle dayanmaktadır (Örneğin bir FV-RT-YH sistemi ele alınırsa ve sistem bileşenlerinin boyutları optimize edilmek istenirse, x eksenini FV panel sayısını, y eksenini RT sayısını ve z eksenini YH sisteminin kW olarak gücünü temsil edecek şekilde tanımlanabilmektedir). Bu nedenle üç parametre ve altındaki sayılarda parametre içeren sistemlerde basit yapısı nedeni ile parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımı genetik algoritmaya göre ön plana çıkarken, üç adetten fazla parametrelili problemlerde genetik algoritma parçacık sürü optimizasyonuna göre daha kullanışlı bir çözüm oluşturmaktadır.

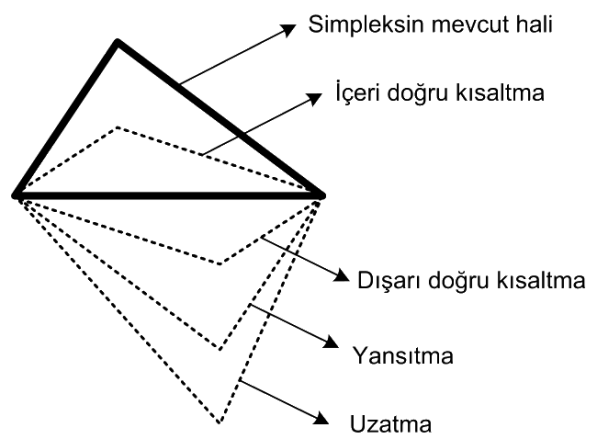
Genetik algoritma yaklaşımına benzer olarak parçacık sürü optimizasyonu yöntemi de hibrit sistem boyutlandırma çalışmalarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu açıdan genetik algoritmada olduğu gibi parçacık sürü optimizasyonu ile ilgili örnek literatür çalışmalarına da ulaşmak oldukça kolaydır. Bunların arasından Sanchez vd. [140], Denghan vd. [141] ve Kaviani vd. [143] parçacık sürü optimizasyonu yöntemini kullanarak RT-FV-YH'den oluşan bir dağıtık üretim sistemi için optimum boyutlandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Hibrit bir RT-YH sisteminin parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımı ile boyutlandırılması Tafreshi ve Hakimi [144,145] tarafından ele alınmıştır. RT-FV hibridizasyonunda parçacık sürü optimizasyonunun kullanılması ise Wang vd. [146] ve Zhao vd. [147] tarafından irdelenmiştir. Wang vd. [148] ise şebeke ile paralel çalışan hibrit bir yenilenebilir enerji sistemini parçacık sürü optimizasyonu yardımıyla

boyutlandırmıştır. Bu yöntem, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tekno-ekonomik tasarımını amaçlayan daha birçok çalışmada da yer almaktadır.

### 2.4.2.3 Simpleks Algoritması

Yöntemi geliştiren kişilerin isimlerinden ötürü Nelder&Mead yöntemi olarak da bilinen Simpleks algoritması, hangi dereceden olursa olsun her türlü fonksiyon minimizasyonunda başarılı bir performans göstermektedir. Simpleks yöntemi, diğer bazı konvansiyonel algoritmalar gibi türev alma işlemi gerektirmemekte, bu durum da özellikle işlem süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır [149].

Bu yöntem, bir amaç fonksiyonunu çok boyutlu olarak minimize eden nümerik bir yöntemdir. Yöntem  $n$  değişkenli  $n$  boyutlu bir uzayda  $n+1$  noktanın oluşturduğu simpleks adı verilen bir çokgen üzerine kuruludur. Burada  $i=1, \dots, n+1$  olmak üzere  $x(i)$ 'nin o anki simpleksi oluşturan noktalar kümesini temsil ettiğini düşünelim. Bu noktalar  $f(x)$  amaç fonksiyonu içerisinde  $f(x(1)), \dots, f(x(n+1))$  şeklinde sıralanmaktadır. Burada amaç fonksiyonunun türüne göre en kötü sonucu veren  $x(i)$  değeri devre dışı bırakılmakta ve bu değer yerine yeni bir değer atanarak bir sonraki adımdaki simpleksin şekli belirlenmektedir. Burada elimine edilen noktanın yerine yeni noktanın belirlenmesi için uzatma, yansıtma, içeri veya dışarı doğru kısaltma gibi farklı durumlar mevcuttur [150]. Bu farklı durumlara göre simpleksin şekli Şekil 2.10'daki üç köşeli bir simpleks örneğinde olduğu gibi değişebilmektedir.



Şekil 2. 10 Üç köşeli bir simpleksteki farklı yeni nokta belirleme durumları

Simpleks yaklaşımının hibrit sistemlerdeki boyutlandırmada kullanımı ile ilgili literatür örnekleri Ref. [131,153,155]'de bulunmaktadır. Simpleks yaklaşımı günümüze kadar



birçok farklı uygulamada başarıyla kullanılmıştır ve birçok uygulamada da kullanım açısından önemli bir potansiyeli olduğu öngörülmektedir.

### **2.4.3 Literatürde Yer Alan Diğer Yöntemler**

Yukarıda sayılmış olan yaklaşımların yanı sıra hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin en az maliyetle tasarımı amacıyla kullanılmış olan birçok farklı yöntem literatürde yer almaktadır. Lineer programlama, evrimsel algoritma, yapay sinir ağları, dinamik programlama, stokastik yaklaşım, benzetimli tavlama, iteratif ve olasılıksal yaklaşımlar, tasarım alanı (design space) tabanlı yaklaşım, parametrik ve nümerik yaklaşımlar, cevap yüzeyi (response surface) yöntemi, matris yöntemi, Quasi-Newton algoritması, “enerji merkezi (energy hub)” yaklaşımı vb. yaklaşımlar literatürde kullanılan çalışmalara örnek olarak verilebilir. Daha birçok farklı algoritma da hibrit enerji sistemleri alanında kullanılmak için uygulanabilir olarak nitelendirilmektedir. Yukarıda bahsi geçen literatürde kullanılmış olan farklı boyutlandırma yaklaşımlarının kısa bir değerlendirmesi Çizelge 2.3’te yer almaktadır.

Çizelge 2.3’te görüldüğü üzere, literatürde yer alan her bir boyutlandırma yönteminin kendine has avantajları bulunmakta ve bu açıdan birçok yeni yöntem de gelecekte kullanım için önemli bir potansiyel içermektedir. Uygun yaklaşımın seçilmesi; uygulamanın türüne, kullanıcının gereksinimlerine, vb. göre değişmektedir. Kısacası, geliştirilen her boyutlandırma yaklaşımı, yenilenebilir enerji sistemlerinin uygulanabilirliğini önemli oranda arttırmak açısından bir potansiyel içermektedir. Bu nedenle bu yaklaşımlar, yenilenebilir enerji alanında büyük bir öneme sahip olmaktadır.

Çizelge 2. 3 Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması amacıyla literatürde kullanılmış olan farklı boyutlandırma yaklaşımlarının kısa bir değerlendirmesi

<b>Boyutlandırma Yaklaşımı</b>	<b>Avantajları</b>	<b>Dezavantajları</b>
HOMER	Ücretsiz olarak edinebilme imkanı, hibrit bir enerji sistemindeki boyutlandırma işleminin temellerinin kolay bir şekilde kavranmasına imkan sağlayan yapıda olması	İçerisine müdahale imkanı tanımayan “kapalı kutu (black box)” olarak sunulma, hibrit sistem bileşenlerinin gerçek karakteristiklerini tam olarak yansıtmayan birinci dereceden denklemler ile modellenmesi
Diğer paket programlar (HYBRID2,etc.)	Her bir programın kendine has bir avantajı mevcuttur, birçoğu ücretsiz olarak kolaylıkla edinilebilmektedir	Birçoğu içerisine müdahale imkanı tanımayan “kapalı kutu (black box)” olarak sunulmaktadır
Genetik algoritma	Global optimumu bulmaktaki etkin performans, literatür örneklerinin sıklığı, yüksek sayıda parametre içeren karmaşık problemler için uygunluk	Kod yazılımı açısından nispeten zor olması
Parçacık sürü optimizasyonu	Birkaç matematiksel eşitlik ile basit kod yazılımı, literatür örneklerinin sıklığı	Global optimumu bulmakta nispeten düşük performans, fazla sayıda parametre içeren problemler için uygun olmama
Lineer programlama	Basit kod yazılımı	Hesaplama zamanının nispeten uzunluğu
Simpleks algoritması	Çalışmasının basitçe kavranabilmesi	Global optimumu bulmakta nispeten düşük performans
Stokastik, iteratif, parametrik, nümerik ve arama alanı yaklaşımları	Çalışmasının basitçe kavranabilmesi ve uygulanmasının kolaylığı	Hesaplama zamanının nispeten uzunluğu
Diğer yaklaşımlar	Her bir yaklaşımın kendine has bir avantajı mevcuttur	Literatür örneklerinin azlığı

## 2.5 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde, tezin geri kalan bölümlerine de yardımcı olacak şekilde alternatif enerji sistemlerine genel bir giriş yapılmıştır. Burada öncelikle, tez kapsamında kullanılacak alternatif enerji kaynakları olan rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemleri temel olarak ele alınmıştır. Bahsi geçen enerji sistemlerinin elektriksel karakteristikleri incelenmiş, ticari olarak mevcut çeşitleri kıyaslanmış ve önde gelen teknolojiler ile birlikte bahsi geçen sistemlerin daha da yaygın kullanımı için gerekli olan geliştirme çalışmaları irdelenmiştir.

Bunun yanı sıra, alternatif enerji kaynaklarının hibrit olarak kullanılması ve bu açıdan kullanılabilir enerji depolama sistemleri bu bölüm kapsamında kısaca ele alınmıştır. Önde gelen elektriksel enerji depolama sistemleri ve enerji yönetimi stratejileri avantaj ve dezavantajları açısından irdelenmiştir. İlgili literatür örnekleri ile birlikte yapılan değerlendirmeler ışığında bahsi geçen açılardan kullanılabilir önde gelen teknolojiler ve yaklaşımlardan tezin ilerleyen bölümlerinde yararlanılmaktadır.

Son olarak da literatürde hibrit alternatif enerji sistemlerinin optimum boyutlandırması ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar ve bu amaçla kullanılan yaklaşımlar detaylıca aktarılmıştır. Önde gelen yaklaşımlar ile ilgili özellikle hibrit sistem boyutlandırmasında kullanım için nümerik örnekler sunulmuştur. Özellikle Bölüm 4'te aktarılabilecek olan optimizasyon çalışmaları için mevcut literatürün içeriğini sergilemek ve tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların ilgili literatüre katkısını daha da iyi belirtebilmek açısından bu şekilde geniş bir literatür çalışması oldukça gereklidir. Bu sayede, önceki alt bölümlere ele alından alternatif enerji sistemleri için gerçekleştirilen irdemeler ile birlikte bu bölümde tezin geri kalan kısımları için geniş bir altyapı sağlanmaktadır.

### HİBRİT SİSTEM BENZETİM ÇALIŞMALARI

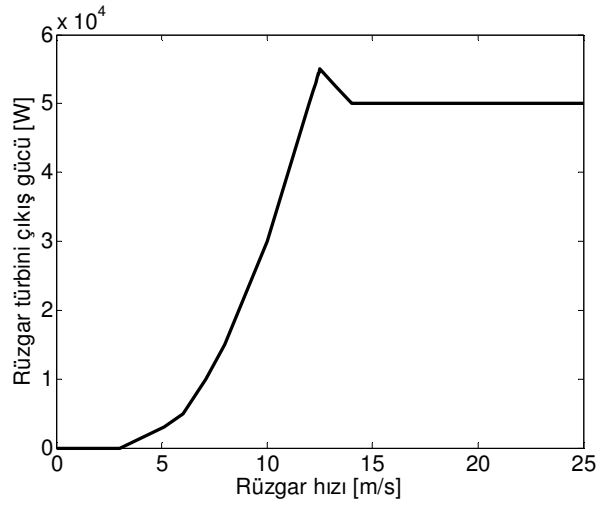
Hibrit alternatif enerji sistemleri ile ilgili saha kurulumları gerçekleştirilmeden önce sistem performansının benzetim ortamında değerlendirilmesi ve buna göre ilgili iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi endüstriyel anlamda sıklıkla başvuru alan bir yaklaşımdır. Bu açıdan bu bölümde, deneysel olarak kurulacak hibrit sisteme ışık tutacak olan optimum boyutlandırma çalışmalarında kullanılmak için komple bir hibrit sistem benzetim modeli geliştirilmiştir. Bahsi geçen model kullanılarak hibrit sistem performansı için bir ön değerlendirme gerçekleştirilmiş ve buna bağlı olarak hibrit sistem fizibilitesi hakkında ön değerlendirmeler yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında irdelenen hibrit RT/FV/YH/Batarya sisteminde daha önce belirtildiği üzere, rüzgâr ve güneş sistemleri ana enerji kaynağı konumundadırlar. Yük talebinin haricinde kalan fazla enerji, bir elektrolizör ünitesi üzerinden hidrojen elde etmek için kullanılmaktadır. Elde edilen hidrojen, ihtiyaç olduğunda YH sistemi tarafından yük talebinin karşılanması için kullanılabilir. Bu şekilde oluşturulan hibrit bir sisteme, nispeten küçük boyutta bir batarya grubu da eklenerek anlık yüklenmelerin karşılanması ve günümüzde oldukça pahalı konumda olan elektrolizör ünitesinin boyutlarının azaltılması sağlanmaktadır.

Bu bağlamda aşağıdaki alt bölümlerde, gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının detaylarına yer verilmiş ve benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve çıktılar irdelenmiştir.

### 3.1 Hibrit Sistem Bileşenlerinin Modellenmesi

#### 3.1.1 Rüzgâr Türbininin Modellenmesi

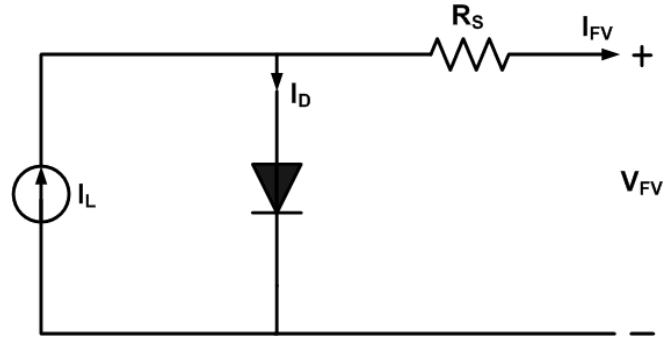
Gerçekleştirilen çalışmada, ticari olarak mevcut olan 50 kW'lık bir RT'ye ait Şekil 3.1'de gösterilen ve rüzgâr hızına bağlı çıkış gücü değişimini belirten güç eğrisi grafiğinden yararlanılmıştır [151]. RT'lere ait bu tür grafiklerin elde edilmesinde daha önce verilen eşitliklerin yanı sıra, gerçek saha ölçümlerinden de faydalanılmaktadır. Gerçek saha ölçümlerini yansıtmasından ötürü, modellemede güç eğrisi yaklaşımından yararlanılmıştır. Farklı RT tiplerine ait güç eğrilerini RT modellemesi açısından kullanan benzer çalışmalar Ref. [152,153]'da yer almaktadır.



Şekil 3. 1 50 kW'lık bir RT'ye ait rüzgâr hızına bağlı çıkış gücü değişimi Anlık rüzgâr hızı verisi RT sistemine ait bahsi geçen güç eğrisine giriş olarak iletilmekte ve buna bağlı olarak da rüzgâr tabanlı güç üretiminin değişimi elde edilmektedir.

#### 3.1.2 Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi

FV hücreler daha önce de belirtildiği üzere, üzerine güneş ışığı düştüğünde güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. FV sistem modellemesinde yararlanılan elektriksel eşdeğer devre Şekil 3.2'de görülmektedir:



Şekil 3. 2 FV modeli için elektriksel eşdeğer devre

FV sisteminin modellenmesinde kullanılan parametreler ise Çizelge 3.1’de verilmiştir:

Çizelge 3. 1 FV sisteminin modellenmesinde kullanılan parametreler

$A$	FV hücrenin etkin kullanım alanı [ $m^2$ ]
$C_{FV}$	FV hücrenin birim alandaki ısı kapasitesi [ $J/(cm^2)$ ]
$e_{gap}$	Materyallerin bant açıklığı [eV]
$I_{mp}$	Maksimum güç noktasındaki akım değeri [A]
$I_L$	Işık akımı [A]
$I_{L,ref}$	Referans durumdaki ( $1000 W/m^2$ ve $25^\circ C$ ) ışık akımı [A]
$I_0$	Doyma akımı [A]
$I_{0,ref}$	Referans durumdaki doyma akımı [A]
$I_{FV}$	FV panel çıkış akımı [A]
$I_{mp,ref}$	Referans durumdaki maksimum güç noktası akımı [A]
$I_{sc}$	Kısa devre akımı [A]
$I_{sc,ref}$	Referans durumdaki kısa devre akımı [A]
$k_{cmpt}$	Akım tabanlı maksimum güç noktası takibi yöntemi için modelleme sabiti
$k_{in,FV}$	FV hücrelerin geçirgenlik katsayısı
$k_{loss}$	Genel ısı kayıp katsayısı [ $W/(cm^2)$ ]
$N_s$	Bir FV modüldeki seri bağlı hücre sayısı
$N_p$	Paralel bağlı FV modüllerin sayısı
$R_s$	Seri direnç [ $\Omega$ ]
$Q$	Elektron yükü [C]
$T_a$	Ortam sıcaklığı [ $^\circ C$ ]
$T_c$	FV hücre sıcaklığı [ $^\circ C$ ]
$T_{c,ref}$	Referans sıcaklık [ $^\circ C$ ]
$V_{FV}$	FV çıkış gerilimi [V]
$V_{OC,ref}$	Referans koşullarda FV sisteminin açık devre gerilimi [V]
$V_{mp,ref}$	Referans durumdaki maksimum güç noktası gerilimi [V]
$\Phi$	Güneş ışınımı [ $W/m^2$ ]
$\Phi_{ref}$	Referans güneş ışınımı [ $W/m^2$ ]
$\alpha_{ref}$	$\alpha$ değişkeninin referans durumdaki değeri
$\mu_{I,sc}$	Kısa devre akımının sıcaklık parametresi [ $A/^\circ C$ ]

FV sisteminin çıkış akımı ve gerilimi arasındaki ilişki,

$$I_{FV} = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{FV} + I_{FV} R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir [23]. Burada bahsi geçen akım-gerilim karakteristiğini oluşturmak için öncelikle Eşitlik 3.1’de görülen  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_s$  ve  $\alpha$  parametrelerinin belirlenmesi gereklidir. Bu parametreler sıcaklık, yük akımı ve güneş ışınımına bağlı olarak değişmektedirler. Eşitlik 3.1’deki ışık akımı parametresi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [154]:

$$I_L = \frac{\phi}{\phi_{ref}} [I_{L,ref} + \mu_{I,SC}(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.2)$$

Referans durumdaki değerine göre doyma akımının değişimi,

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T_{c,ref} + 273}{T_c + 273} \right)^3 \exp \left[ \frac{e_{gap} N_s}{q \alpha_{ref}} \left( 1 - \frac{T_{c,ref} + 273}{T_c + 273} \right) \right] \quad (3.3)$$

olarak şekilde elde edilmektedir [155,156]. Burada  $I_{0,ref}$  parametresinin değişimi,

$$I_{0,ref} = I_{L,ref} \exp \left( - \frac{V_{oc,ref}}{\alpha_{ref}} \right) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca  $\alpha_{ref}$  parametresinin değişimi [156],

$$\alpha_{ref} = \frac{2V_{mp,ref} - V_{oc,ref}}{\frac{I_{sc,ref}}{I_{sc,ref} - I_{mp,ref}} + \ln \left( 1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}} \right)} \quad (3.5)$$

biçiminde belirtilmektedir. Buna bağlı olarak  $\alpha$  değişkeni,

$$\alpha = \frac{T_c + 273}{T_{c,ref} + 273} \alpha_{ref} \quad (3.6)$$

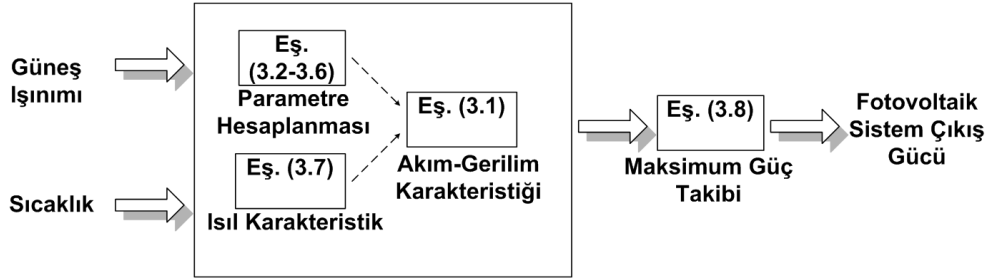
şeklinde hesaplanmaktadır.

Yukarıdaki eşitliklerde görüldüğü üzere sıcaklık değişiminin FV sistem dinamikleri üzerinde göz ardı edilemeyecek bir etkisi mevcuttur. Bu açıdan ortam sıcaklığı, güneş ışınımı ile çıkış akım ve gerilim değişimine göre FV sistem sıcaklığı şu şekilde ifade edilmektedir [23]:

$$C_{PV} \frac{dT_c}{dt} = k_{in,FV} \phi - \frac{V_{FV} \times I_{FV}}{A} - k_{loss} (T_c - T_a) \quad (3.7)$$

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak FV sistemlerin ilk yatırım maliyetleri her geçen gün azalmaktadır. Ancak daha önce de belirtildiği üzere FV sistemler günümüzdeki konvansiyonel uygulamalara kıyasla hala oldukça pahalı konumdadır. Bu açıdan FV sistemlerinden mümkün olan maksimum gücün elde edilmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Bu amaç için literatürde birçok maksimum güç noktası takibi (maximum power point tracking-MPPT) yaklaşımları yer almaktadır [157]. Bu çalışmada, akım tabanlı bir maksimum güç noktası izleyici yaklaşımından yararlanılmaktadır. Akım tabanlı maksimum güç noktası izleyici yaklaşımının temelinde, maksimum güç noktasındaki  $I_{mp}$  akımının,  $I_{sc}$  kısa devre akımı ile oldukça güçlü bir lineer ilişkisi olduğu öngörüsü yatmaktadır.  $I_{mp}$  ve  $I_{sc}$  arasındaki lineer ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$I_{mp} = k_{mppt} \times I_{sc} \quad (3.8)$$



Şekil 3. 3 FV sistem modelinin blok diyagramı

Yukarıda belirtilen matematiksel eşitlikler ışığında MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan FV sistem modeline ait blok diyagram Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

### 3.1.3 Yakıt Hücresi Modellemesi

Bu kısımda, farklı YH sistemleri arasından PEMYH sistemlerinin modellenmesi ele alınmıştır. Gerçekleştirilen PEMYH dinamik benzetim modeli, YH potansiyelinde tersinemez kayıpların etkisiyle oluşan değişimin sıcaklık, akım ve basınç gibi parametrelere bağlı matematiksel ifadelerle modellenmesi ile oluşturulmuştur. Modelin oluşturulmasında kullanılan PEMYH parametreleri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.



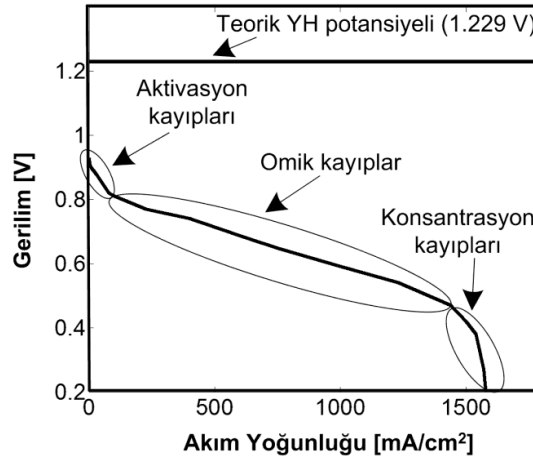
Çizelge 3. 2 PEMYH modelinin oluşturulmasında kullanılan parametreler

$A$	Aktivasyon alanı [ $\text{cm}^2/(\text{hücre})$ ]
$B$	Konsantrasyon kayıplarının modellenmesinde kullanılan sabit [V]
$C$	YH çift katmanlı kapasitesi [F]
$C_{O_2}$	Çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzündeki konsantrasyonu
$E_{Nernst}$	Nernst anlık gerilimi [V]
$F$	Faraday sabiti [C/(kmol)]
$I_{YH}$	YH akımı [A]
$J$	Akım yoğunluğu [ $\text{A}/(\text{cm}^2)$ ]
$J_{maks}$	Maksimum akım yoğunluğu [ $\text{A}/(\text{cm}^2)$ ]
$\ell$	Membran kalınlığı [ $\mu\text{m}$ ]
$N_s$	Yığındaki seri YH sayısı
$N_p$	YH yığını sayısı
$P_{H_2}$	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
$P_{O_2}$	Oksijen kısmi basıncı [atm]
$q_{H_2}$	Yük değişimini karşılamak için gerekli olan hidrojen akış miktarı [kmol/(sn)]
$r_m$	Nafion proton değişimli membranın öz direnci [ $\Omega(\text{cm})^2/\text{m}$ ]
$R_a$	Aktivasyon ve konsantrasyon dirençlerinin toplamını ifade eden eşdeğer direnç [ $\Omega$ ]
$R_c$	Membran ve elektrotlar arasındaki kontak direnci [ $\Omega$ ]
$R_m$	Eşdeğer membran direnci [ $\Omega$ ]
$R_{omik}$	YH iç direnci [ $\Omega$ ]
$T$	YH yığını sıcaklığı [ $^{\circ}\text{K}$ ]
$\zeta_o, \zeta_{rt}, \zeta_{ic}, \zeta_{it}$	YH yığını sıcaklığı için modelleme sabitleri
$V_{akt}$	Aktivasyon gerilim düşümü [V]
$V_d$	$R_a$ üzerindeki gerilim düşümü [V]
$V_{kons}$	Konsantrasyon gerilim düşümü [V]
$V_{omik}$	Omik gerilim düşümü [V]
$V_{YH}$	YH gerilimi [V]
$V_{Toplam}$	YH yığını gerilimi [V]
$\Lambda$	Membrandaki su miktarı
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	Aktivasyon gerilim düşümünün modellenmesinde kullanılan sabitler

Normal koşullar altında ( $25^{\circ}\text{C}$  ve 1 atm) hidrojen ve oksijen ile beslenen ve kimyasal denklemler sonucunda çıkışında ürün olarak sadece su oluşan bir PEMYH'nın ideal standart gerilimi 1,229 V'tur. Fakat gerçek YH gerilimi, oluşan kayıplardan dolayı bu referans değerden daha düşük seviyelere inmektedir.

YH'lar için; aktivasyon kayıpları, omik kayıplar ve konsantrasyon kayıpları olmak üzere üç çeşit tersinemez kayıp söz konusudur. Düşük akım yoğunluklarında, oksijenin indirgenmesine ait kimyasal reaksiyonda meydana gelen aktivasyon kayıpları, YH

geriliminin azalmasında önemli rol oynamaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında ise konsantrasyon kayıpları, YH geriliminin azalmasında büyük rol oynamaktadır. YH'daki kayıplar ve buna göre YH geriliminin değişimi, Şekil 3.4'teki örnek YH kutuplanma eğrisinde görülebilmektedir.



Şekil 3. 4 Örnek YH kutuplanma eğrisi

Buna göre, YH'deki bu kayıplar göz önünde bulundurularak YH'nin çıkış gerilimi temel olarak [158,159],

$$V_{YH} = E_{Nernst} - V_{akt} - V_{kons} - V_{omik} \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada Nernst anlık geriliminin ifadesi [160,161],

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T \times \ln(P_{H_2} + \frac{1}{2} P_{O_2}) \quad (3.9)$$

biçimindedir. Eşitlik 3.9'da yer alan hidrojen ve oksijenin kısmi basınçları, akımla ters orantılı biçimde doğrusal olarak bir alt ve bir üst sınır arasında değişecek şekilde ele alınmıştır. Eşitlik 3.9'daki sıcaklık ifadesinin, YH akımına bağlı olarak değişimi ise Eşitlik 3.10'daki gibi ifade edilebilmektedir [162]:

$$T = 273 + \zeta_0 + (\zeta_0 - \zeta_{rt} + \zeta_{ic} \times I_{YH}) (1 - \exp(-\frac{t \times I_{YH}}{\zeta_{it}})) \quad (3.10)$$

YH'de gerçekleşen aktivasyon kayıpları ise [163,164],

$$V_{akt} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(I_{YH}) + \xi_4 \ln(C_{O_2}) \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada çözünmüş oksijenin sıvı/gaz ara yüzeyindeki konsantrasyonu [163],

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)} \quad (3.12)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. YH'daki omik kayıplar, katı polimer elektrodun proton iletkenliği ve YH'nin iç direnci ile bağlantılı olan  $I \times R$  gerilim düşümünün bir ölçüsüdür. Buna göre YH'nin omik kayıpları [158],

$$V_{omik} = I_{YH} \times R_{omik} = I_{YH} \times (R_m + R_c) \quad (3.13)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Burada eşdeğer membran direnci, Ohm kanunu kullanılarak,

$$R_m = \frac{r_m \times \ell}{A} \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. YH'nin akım yoğunluğu,

$$J = \frac{I_{YH}}{A} \quad (3.15)$$

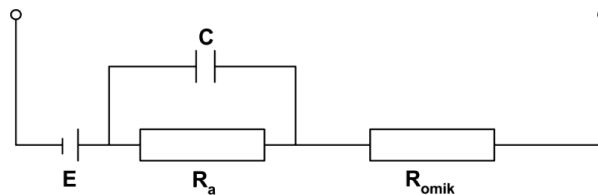
şeklinde belirtilmek üzere, Eşitlik 3.14'teki Nafion proton değişimli membranın öz direncinin ifadesi [158,160],

$$r_m = \frac{181.6[1 + 0.03 \times J + 0.062 \times (\frac{T}{303})^2 \times J^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3 \times J] \exp[4.18 \times (\frac{T - 303}{T})]} \quad (3.16)$$

biçimindedir. YH sisteminin yüksek akım yoğunluklarında çalışacağı durumlarda göz önüne alınması gereken konsantrasyon kayıplarının değişimi ise Eşitlik 3.17'deki gibi hesaplanmaktadır [159],

$$V_{kons} = B \times \ln(1 - \frac{J}{J_{maks}}) \quad (3.17)$$

YH içerisinde gerçekleşen önemli kimyasal olaylardan bir tanesi de çift katmanlı kapasitör etkisidir [164]. Çift katmanlı kapasitörün de hesaba katıldığı YH elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3.5'te görülmektedir [163].



Şekil 3. 5 YH elektriksel eşdeğer devresi

Burada aktivasyon ve konsantrasyon dirençlerinin toplamını ifade eden eşdeğer  $R_a$  direncinin değişimi,

$$R_a = \frac{V_{akt} + V_{kons}}{I_{YH}} \quad (3.18)$$

biçiminde hesaplanmaktadır [164]. Buna göre aktivasyon ve konsantrasyon gerilim düşümlerinin ve çift katmanlı kapasitör etkisinin de göz önüne alındığı  $R_a$  üzerindeki gerilim düşümünü belirten diferansiyel eşitlik [163],

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_{YH}}{C} - \frac{V_d}{R_a \times C} \quad (3.19)$$

şeklinde elde edilmektedir. YH'nın termal ve momentum karakteristiği ile kütle transferi de göz önüne alınarak, YH'nın çıkış geriliminin değişimi,

$$V_{YH} = E_{Nernst} - V_d - V_{omik} \quad (3.20)$$

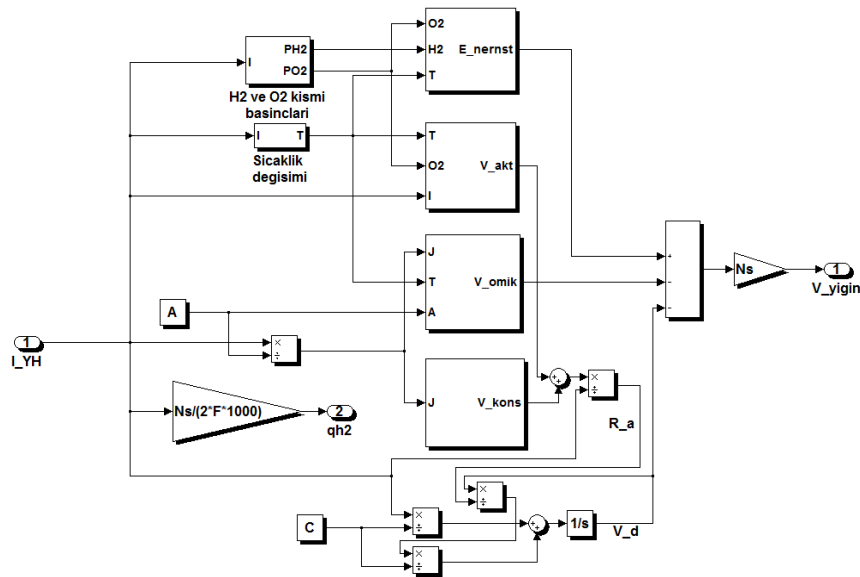
şeklinde yazılabilir [163].  $N_s$  sayıda seri bağlı YH hücresinden oluşan bir YH yığına ait çıkış gerilimi ise,

$$V_{Toplam} = N_s \times V_{YH} \quad (3.21)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Son olarak, YH sisteminin hidrojen tüketimi [161],

$$q_{H_2} = \frac{I_{YH} \times N_s}{2F} \times 10^{-3} \quad (3.22)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 3. 6 YH sisteminin dinamik modeli

Eşitlik 3.8-3.22 kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan PEMYH modeli Şekil 3.6'da görülmektedir.

### 3.1.4 Elektrolizör Modellemesi

Hidrojen elde edilmesi açısından kullanılan elektrolizör sistemi modelinin oluşturulmasında, Çizelge 3.3'te verilen parametrelerden yararlanılmıştır:

Çizelge 3. 3 Elektrolizör modeli parametreleri

$F$	Faraday sabiti [C/(kmol)]
$i_e$	Elektrolizör akımı [A]
$n_c$	Seri bağlı elektrolizör hücrelerinin sayısı
$n_{H_2}$	Üretilen hidrojen miktarı [mol/s]
$\eta_F$	Faraday verimliliği

Elektrolizör sistemine ait basit bir model Eşitlik 3.21'de belirtildiği üzere MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur [165]:

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F n_c i_e}{2F} \quad (3.21)$$

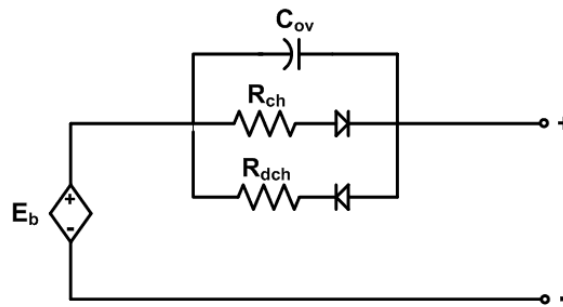
Burada Faraday verimliliği,

$$\eta_F = 965 \exp(0.09/i_e - 75.5/i_e^2) \quad (3.22)$$

şeklinde dir.

### 3.1.5 Batarya Modellemesi

Sistemde kullanılan dinamik kurşun-asit batarya modeli oluşturulurken Jantarami ve Zhang'ın deneysel doğrulamasını yaptıkları çalışma referans alınmıştır [166]. Burada oluşturulan batarya eşdeğer devresi ise Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3. 7 Batarya eşdeğer devresi

MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan modelde kullanılan parametreler ise Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3. 4 Batarya modeli parametreleri

$V_{bat}$	Batarya çıkış gerilimi [V]
$E_b$	Batarya açık devre gerilimi [V]
$I_{bat}$	Batarya akımı [A]
%SOC	Şarj durumu
%SOC <sub>0</sub>	Başlangıç şarj durumu
$R_{bc}, R_{bci}$	Şarj direnci bileşenleri [ $\Omega$ ]
$R_{bd}, R_{bdi}$	i
$R_{ch}$	Şarj direnci [ $\Omega$ ]
$R_{dch}$	Deşarj direnci [ $\Omega$ ]
$C_{ov}$	Polarizasyon kapasitesi [F]
$C_n$	Batarya kapasitesi [Ah]
$t$	Batarya çıkış gerilimi örnekleme zamanı [dakika]

Deşarj durumunda bataryaya ait çıkış gerilimi eşitliği, batarya açık devre gerilimine ve eşdeğer iç empedansındaki gerilim düşümüne bağlı olarak,

$$V_{bat} = E_b - I_{bat} R_{dch} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_{dch} \cdot C_{ov}}\right) \right] \quad (3.25)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada deşarj direncinin iki adet bileşeni bulunmaktadır:

$$R_{dch} = R_{bdi} + R_{bd} \quad (3.26)$$

Deşarj direncinin anlık değişimini modellemek amacı ile kullanılmış olan bileşenin, batarya akımına bağlı olarak değişimi şu şekildedir:

$$R_{bdi} = 1.01 \cdot \exp(-2.21 \cdot I_{bat}) + 0.24 \cdot \exp(-0.06 \cdot I_{bat}) \quad (3.27)$$

Deşarj direncinin, deşarj işlemi sırasında batarya şarj durumuna bağlı olarak değişimini gösteren bileşeni ise:

$$R_{bd} = 2.926 \cdot \exp(-0.042 \cdot \%SOC) \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şarj durumunda bataryaya ait çıkış gerilimi eşitliği ise,

$$V_{bat} = E_b + I_{bat} R_{ch} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_{ch} \cdot C_{ov}}\right) \right] \quad (3.29)$$

şeklinde elde edilmektedir. Deşarj direncine benzer olarak şarj direncinin de iki adet bileşeni mevcuttur:

$$R_{ch} = R_{bci} + R_{bc} \quad (3.30)$$

Şarj direncinin, şarj işlemi sırasında batarya şarj durumuna bağılı olarak değişimini gösteren bileşeni,

$$R_{bc} = 9.32 \times 10^{-5} \cdot (\%SOC)^2 + 0.01 \cdot (\%SOC) + 0.028 \quad (3.31)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Diğer bileşen olan  $R_{bci}$  ise 1.5  $\Omega$  olarak belirlenmiştir. Eşitlik 3.27 ve 3.31'deki polarizasyon kapasitesi ve örnekleme zamanı sabitlerinin de sırası ile 40 F ve 1 dakika olarak dikkate alındığı hesaba katılmalıdır.

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan batarya şarj durumu değişimi şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\%SOC = \%SOC_0 - \left( \frac{1}{C_n} \int I_{bat} dt \right) \times 100 \quad (3.32)$$

Bataryanın açık devre gerilimi ise, yüksüz durumda iki ucu arasındaki potansiyele eşittir ve şarj durumu ile doğrudan ilişkilidir. Batarya açık devre gerilimi ifadesi,

$$E_b = 0.01375 \cdot (\%SOC) + 11.5 \quad (3.33)$$

şeklinde dikkate alınmaktadır. Batarya için yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan model, daha sonra genel hibrit sistem modeline adapte edilmiştir.

### 3.2 Meteorolojik Koşulların, Yük Talebinin Değerlendirilmesi ve Hibrit Sistem Bileşenlerinin Nümerik Boyutlandırılması

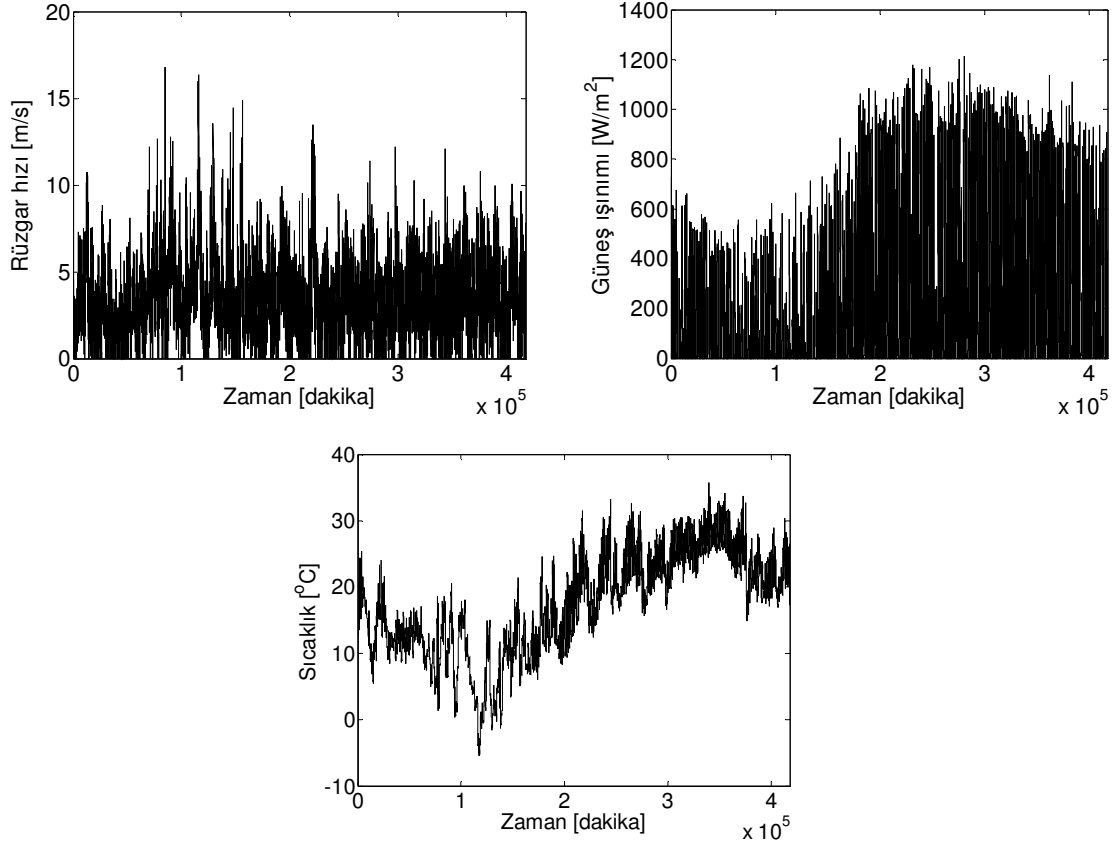
Önerilen hibrit sistem için gerçekleştirilen benzetim çalışmasında “Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü” içerisinde kurulmuş olan ölçüm sistemi ile elde edilen dakikalık meteorolojik veriler kullanılmıştır. Bahsi geçen dakikalık verilerin elde edildiği ölçüm sisteminin görünümü Şekil 3.8'de yer almaktadır.



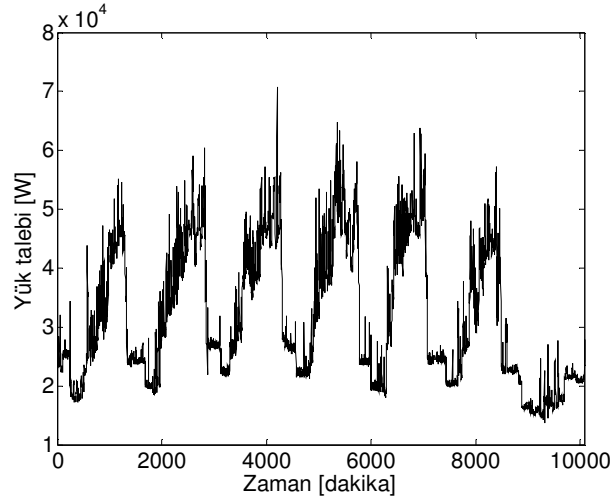
Şekil 3. 8 Meteorolojik ölçüm sisteminin görünümü

Literatürde yapılan ve hibrit enerji sistemlerinin performansını yıllık bazda değerlendiren benzer çalışmalarda genellikle saatlik veriler kullanılmaktadır. Kısa dönemli verilerin kullanıldığı çalışmalar ise genellikle bir günlük ya da bir haftalık zaman dilimlerini kapsamakta, bu açıdan da yıl içerisinde her gün değişen meteorolojik koşullar tam anlamıyla değerlendirilememektedir. Ayrıca; YH sistemleri dinamiklerinin dakikalar, hatta saniyeler mertebesinde incelenmesi, uygulanan enerji yönetimi yaklaşımının değerlendirilmesi açısından daha uygundur. Bunun yanı sıra; özellikle rüzgâr hızı da dakikalar mertebesinde değişim gösterebildiğinden ötürü güç talebinin anlık olarak tamamen karşılanması istenilen çalışmalarda meteorolojik verilerin bu şekilde ayrıntılı bir biçimde dakikalık bazda ve yıllık bir periyotta ele alınması, hibrit sistem değerlendirmesi açısından gerçek zamanlı uygulamalar ile saatlik bazda bir incelemeye göre daha fazla paralellik arz edecek potansiyel oluşturmaktadır. Elde edilen meteorolojik veriler 22.10.2009 tarihinde saat 00:00'dan başlamak üzere Şekil 3.9'da gösterilmektedir.





Şekil 3. 9 Meteorolojik ölçüm sistemi ile elde edilen dakikalık meteorolojik veriler



Şekil 3. 10 Sistem için dikkate alınan elektriksel yük talebi değişimi

Benzetim çalışmasında kullanılan yük profili ise Şekil 3.10'da görülmektedir. Bahsi geçen yük talebi, üç katlı bir ofis binasından bir haftalık olarak alınan dakikalık aktif güç talebi ölçümünden oluşmaktadır. Ölçüm yapılan ofis binası 09:00 ile 22:00 saatleri arasında çalışmakta ve 14 adet masaüstü bilgisayar, 11 adet laptop, 1 adet bulaşık makinesi, 4 adet fırın, 2 adet buzdolabı, 3 adet mini buzdolabı, 9 adet LCD televizyon, 2 adet LCD monitör, 14 adet printer-fax cihazı, muhtelif sayıda klima, aydınlatma aygıtları

ve diğer farklı elektriksel yükleri içermektedir. Ölçüm yapılan zaman aralığında gündüz başlayan ve gece boyunca da devam eden muhtelif inşai yenileme çalışmaları da gerçekleştiğinden ötürü çeşitli elektriksel yüklerin anlık olarak devreye girip çıkmaları da mevcuttur. Buna bağlı olarak elde edilen bir haftalık veri, meteorolojik verinin süresi boyunca aynı kabul edilip periyodik olarak tekrarlanmıştır.

Verilen bu güç talebi ve meteorolojik veriler dikkate alınarak sistem boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen boyutlandırma işleminde 50 kW'lık RT'nin sistem kurulumunda zaten mevcut olduğu kabul edilmiştir. Burada öncelikle aşağıdaki kapasite faktörü formülü dikkate alınarak, ele alınan bölgedeki yenilenebilir enerji kaynağının etkinliği değerlendirilmiştir:

$$k_{kf} = \frac{\bar{P}}{P_{nom}} \quad (3.34)$$

Eşitlik 3.34'te  $\bar{P}$  belirli bir periyot boyunca elde edilen ortalama çıkış gücünü temsil ederken,  $P_{nom}$  yenilenebilir enerji kaynağının nominal gücünü belirtmektedir. Bahsi geçen eşitlik ışığında elde edilen mevcut meteorolojik veri süresince yapılan değerlendirmede mevcut 50 kW'lık RT'nin kapasite faktörü %4,35 olarak, FV sistemine ait kapasite faktörü değeri ise %16,49 olarak elde edilmiştir.

Burada yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak yapılan boyutlandırma yaklaşımının temel amacı, Şekil 3.10'da verilmiş olan yük talebindeki baz yükü ortalama olarak bakıldığında yenilenebilir enerji kaynakları vasıtası ile karşılamaktır. Burada dikkate alınan baz yük 13,5 kW olarak Şekil 3.10'dan elde edilmektedir. Bu yük talebinin karşılanması için dikkate alınan ve Wang ve Nehrir [23] tarafından gerçekleştirilen çalışmadan örnek alınarak oluşturulan matematiksel eşitlik şu şekildedir:

$$P_{baz} = P_{rt-nom} \times k_{kf-rt} + P_{fv-nom} \times k_{fv-rt} \quad (3.35)$$

Burada  $P_{baz}$  yukarıda bahsi geçen baz yük talebini,  $P_{rt-nom}$  RT'nin nominal gücünü,  $k_{kf-rt}$  RT'nin kapasite faktörünü,  $P_{fv-nom}$  FV sisteminin nominal gücünü ve  $k_{kf-fv}$  FV sisteminin kapasite faktörünü belirtmektedir. Buradan FV sisteminin nominal gücü,

$$P_{fv-nom} = \frac{P_{baz} - P_{rt-nom} \times k_{kf-rt}}{k_{fv-rt}} \quad (3.36)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bahsi geçen eşitliğin ortalama değerlere göre sadece nümerik bir yaklaşım sağlamak amacı ile dikkate alındığı, RT ve FV sistemlerinin beraberce hiçbir güç üretimi gerçekleştirmediği gibi anlık durumların bu eşitliğin amacı dışında olduğu belirtilmelidir. Bu eşitlik kullanılarak 50 kW'lık RT'nin mevcut kabul edilmesi ile oluşturulacak olan FV sisteminin nominal gücü 69 kW olarak belirlenmektedir.

YH sistemi yukarıda bahsi geçen baz güç değeri ile 71,4 kW'lık maksimum güç talebi değeri arasındaki farkı karşılayabilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Buna göre 60 kW'lık bir YH sistemi dikkate alınmıştır. Burada; yukarıda belirtilen yenilenebilir enerji sistemleri en kötü koşulda güç üretimi gerçekleştirirse bile, ortalama olarak karşılamaları gereken baz yük değeri YH gücünün oldukça altındadır ve bu sayede YH sistemi her koşulda yük talebinin karşılanması için yeterli durumdadır. Elektrolizör ünitesi ise, teorik olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının nominal güçlerinin toplamını sağlayacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Ancak uygulamada bu toplamın yarısından az bir elektrolizör boyutunun yeterli sonucu sağladığı belirlenmiştir [23]. Buna göre sistemde kullanılan elektrolizör ünitesinin boyutu 50 kW olarak dikkate alınmıştır. Elektrolizör sistemlerinin pahalılığından ötürü bu sistemlerin boyutunu teorik olarak ihtiyaç duyulan seviyeden daha aşağılara çekebilmek amacı ile sisteme fazla enerjinin bir kısmını depolayabilecek ve gerekli durumlarda yük talebinin ve özellikle de yük talebindeki anlık değişimlerin karşılanmasına yardımcı olabilecek bir batarya ünitesi de dahil edilmiştir.

Literatürdeki benzer hibrit sistem boyutlandırmaları incelenirse, farklı meteorolojik koşullarda ve yük taleplerinde farklı oranlarda hibrit sistem bileşeni boyutları belirlendiği açıkça görülmektedir. Silva vd. [88] Brezilya koşulları için yaptığı incelemede HOMER paket programını kullanarak 0,8 kW baz ve 2,3 kW pik değerlere sahip bir yük talebi değişimi için 9,55 kW'lık FV sistemi, 1 kW'lık YH ve 1,4 kW'lık elektrolizör sistemleri ile 3 adet 12 V-110 Ah'lik batarya grubunun gerekli olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Lagorse vd.'nin [127] genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiş boyutlandırma çalışmasında ise 1,7 kW baz ve 5,9 kW pik değerli bir yük talebi için 48,6 kW'lık FV ve 5 kW'lık YH sistemleri, bu sistemlerin ihtiyacını karşılayabilecek bir elektrolizör sistemi ve 217 kWh'lik bir batarya ünitesinin optimum

konfigürasyonu oluşturduğu sonucuna varılmıştır. 0,12 kW baz ve 0,55 kW pik değerlere sahip bir evsel yük için ise 3,6 kW RT, 0,17 kW YH sistemi, 0,325 kW elektrolizör ünitesi ve 10,67 kWh'lik bir batarya yapısının gerekliliği Del Real vd. [167] tarafından “enerji merkezi (energy hub)” yaklaşımı kullanılarak belirtilmiştir. Benzer örnek boyutlandırma çalışmalarının sonuçları literatürde farklı yayınlarda detaylı bir şekilde yer almaktadır.

### 3.3 Hibrit Sistem Enerji Yönetimi Algoritması

Hibrit sistem enerji yönetimi için kullanılan bulanık mantık kontrolördeki temel hedef, sistemdeki genel enerji akışını düzenlemenin yanı sıra batarya sisteminin şarj durumunu da uygun bir şekilde kontrol etmektir. Bu sayede sistemdeki güç arzı güvenilirliği maksimum hale getirilirken, genel hibrit sistem performansı da arttırılabilecektir. Burada batarya sisteminin şarj durumunun 0,7 değeri civarında [168] kontrol edilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 3. 11 Oluşturulan bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi stratejisinin blok diyagramı

Bahsi geçen bulanık mantık kontrolör yapısı Şekil 3.11’de görüldüğü üzere 3 girişten ve 2 çıkıştan oluşmaktadır. Bulanık mantık kontrolörün girişleri; yük talebi ile RT ve FV sistemleri tarafından üretilen güç arasında karşılanması gereken eksik güç değeri, batarya sisteminin şarj durumu ve RT ile FV sistemlerinin yük talebini karşılamasının ardından mevcut olan fazla güç değeridir. Bu verileri kullanarak bulanık mantık kontrolör, YH sisteminden talep edilecek ve elektrolizör ünitesine hidrojen üretimi için aktarılacak olan güç değerlerini belirlemektedir. YH sisteminden talep edilecek güç değerinin belirlenmesi açısından bulanık mantık kontrolör, yük talebi ile RT ve FV sistemleri tarafından üretilen güç arasında karşılanması gereken eksik güç değeri ile batarya sisteminin şarj durumu verilerini kullanmaktadır. Eğer şarj durumu hedeflenen

değerde ise, YH sistemi talep edilen güç değerini yüke aktarmaktadır. Eğer şarj seviyesi hedeflenen değerin altında ise, YH sistemi batarya ünitesinin şarj durumunu arttırmak amacıyla talep edilen güç değerinden daha fazla bir gücü sisteme iletir. Benzer şekilde, eğer şarj durumu hedeflenen seviyenin üzerinde ise YH ünitesinin sisteme aktardığı güç, talep edilen güç değerinin altında olmaktadır. Elektrolizör ünitesine hidrojen üretimi için aktarılacak olan güç değeri ise, RT ve FV sistemlerinin yük talebini karşılamasının ardından mevcut olan fazla güç değeri ve batarya sisteminin şarj durumu göz önüne alınarak belirlenmektedir. Eğer batarya sistemi normal ya da yüksek bir şarj durumuna sahip ise fazla gücün 50 kW'a kadarlık kısmı hidrojen üretimi için elektrolizör ünitesine aktarılmaktadır. Batarya sisteminin şarj durumunun düşük seviyede olması durumunda ise fazla güç, elektrolizör ve batarya üniteleri arasında paylaştırılmaktadır.

### 3.4 Test ve Sonuçlar

Yukarıda modelleme detayları verilen hibrit sistem için MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bu bölüm kapsamında irdelenmiştir. Bahsi geçen hibrit sistemin benzetim çalışması içerisinde FV ünitesi için kullanılan model parametreleri Çizelge 3.5'te görülmektedir.

Çizelge 3. 5 FV sistemi için kullanılan model parametreleri

$A$	1,5 [m <sup>2</sup> ]
$C_{PV}$	5x10 <sup>4</sup> [J/cm <sup>2</sup> ]
$e_{gap}$	1,17 [eV]
$I_{L,ref} (I_{sc,ref})$	2,664 [A]
$k_{cmpt}$	0,9245
$k_{in,PV}$	0,9
$k_{loss}$	30 [W/(cm <sup>2</sup> )]
$N_s$	153
$N_p$	411
$R_s$	1,324 [Ω]
$Q$	1,60217733x10 <sup>-19</sup> [C]
$T_{C,ref}$	25 [°C]
$U_{OC,ref}$	87,72 [V]
$U_{mp,ref}$	70,731 [V]
$I_{mp,ref}$	2,448 [A]
$\Phi_{ref}$	1000 [W/m <sup>2</sup> ]
$\alpha_{ref}$	5,472

Çizelge 3.6'da ise YH ve elektrolizör sistemleri için benzetim modeline adapte edilen model parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 3. 6 YH ve elektrolizör sistemleri için kullanılan model parametreleri

$A$	150 [cm <sup>2</sup> /hücre]
$B$	0,016 [V]
$C$	2,5 [F]
$F$	96486,7 [C/kmol]
$J_{maks}$	1,5 [A/cm <sup>2</sup> ]
$N_s$	176
$N_p$	6
$R_c$	$2 \times 10^{-4}$ [ $\Omega$ ]
$T_o, T_{rv}, T_{ic}, T_{it}$	28; 20; 0,7; 4000
$U$	0,8
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	-0,9514; 0,00312; $7,4 \times 10^{-5}$ ; $-1,87 \times 10^{-4}$

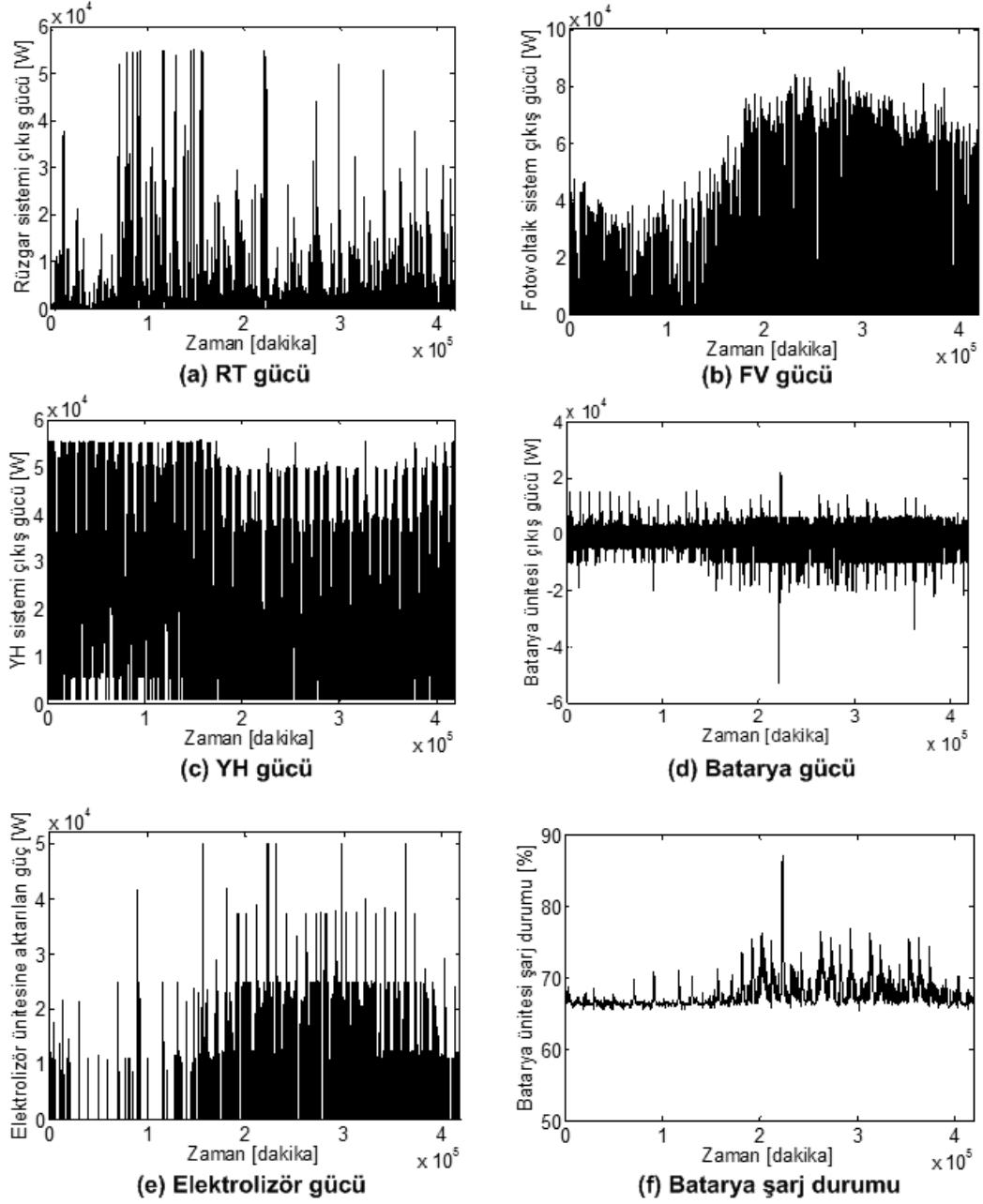
Bahsi geçen hibrit sistemin performansını değerlendirmek açısından RT, FV, YH ve batarya sistemlerinin çıkış güçleri, elektrolizör ünitesine aktarılan güç ve batarya sisteminin şarj durumu değişimleri Şekil 3.12'de verilmiştir.

RT çıkışında elde edilen güç değeri Şekil 3.12(a)'da görüldüğü gibi değişim göstermektedir. Görülen değişim, güç eğrisi tabanlı RT modelinin girişine uygulanan rüzgâr hızı verisi ile elde edilmiştir. FV sisteminden DC baraya aktarılan maksimum güç değişimi ise Şekil 3.12(b)'de gösterilmektedir. Güneş enerjisi sisteminden maksimum güç aktarımı yaz mevsiminde gerçekleşmiş olup, sonbahar ve kış aylarında güneş ışınımı nispeten az olduğundan ötürü FV sisteminin çıkış gücü de daha düşük seviyelerdedir.

RT ve FV sisteminin çıkış gücüne ve yük talebine göre, bulanık mantık kontrolör tarafından YH sistemi için belirlenen çıkış gücü değişimi Şekil 3.12(c)'de görülmektedir. YH sistemi, rüzgârın ve güneş ışınımının olmamasından veya az olmasından ötürü RT ve FV sistemlerinin güç üretemediği ya da gücünün yetmediği periyotlarda devreye girerek yükü beslemektedir.

Batarya sisteminin çıkış gücü değişimi Şekil 3.12(d)'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere batarya sistemi yük talebi ve FV sistemi ile RT tarafından üretilen güç arasındaki farkta mevcut olan anlık yüklenmeleri karşılamıştır. Bu sayede YH sisteminin ilk çalışma anında aniden yüklenmesinin ve anlık değişimlere maruz kalmasının nispeten önüne

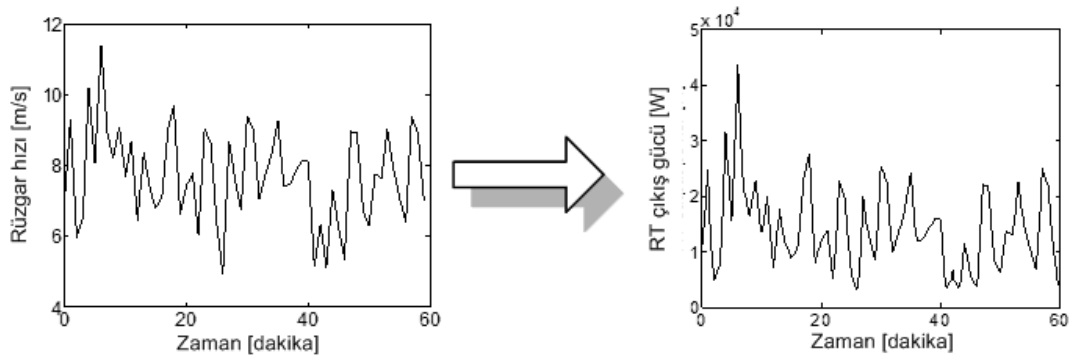
geçilmiştir. Böylece YH sisteminin işletim ömründe artış elde edilebileceği öngörülmektedir.



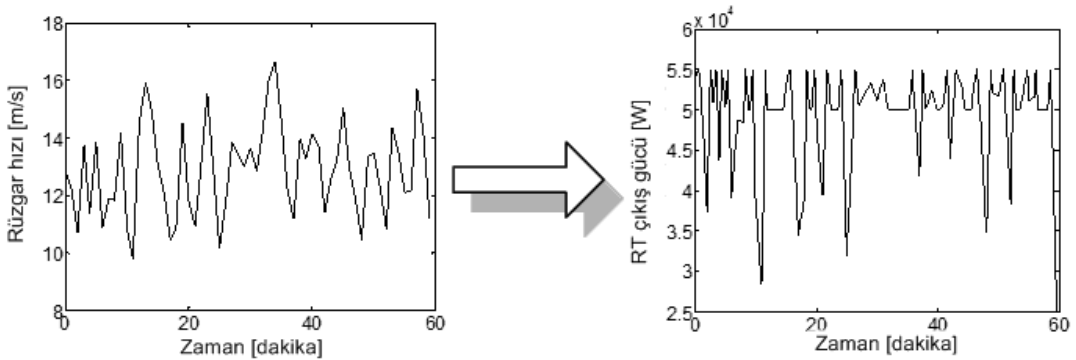
Şekil 3. 12 Benzetim çalışması sonuçları

Elektrolizör ünitesine hidrojen üretimi için aktarılan gücün değişimi Şekil 3.12(e)'de gösterilmektedir. Bu güç değişimi, FV sisteminin ve RT'nin yük talebini karşılamasının ardından fazla olan üretim gücüne bağlı olarak elde edilmiştir. Burada elde edilen hidrojen, muhtelif anlarda YH sistemi tarafından yük talebinin karşılanması amacı ile kullanılabilir.

Batarya ünitesinin şarj durumunun değişimi ise Şekil 3.12(f)'de verilmiştir. Görüldüğü üzere batarya ünitesinin şarj durumu istenilen düzeyde tutulabilmiştir. Bazı periyotlarda hem rüzgâr hem de güneş enerjisi sistemleri tarafından üretilen gücün aynı anda yüksek seviyelerde olmasından ötürü, batarya sistemine aktarılan şarj gücü artmış, dolayısı ile de batarya ünitesinin şarj durumu yükselmiştir. Bu depolanan enerji ise daha sonraki aşamalarda yük talebinin karşılanması amacı ile kullanılarak batarya ünitesinin şarj durumu istenilen seviyelere düşürülmüştür. Bu sayede batarya ünitesi her an yük taleplerini karşılayabilecek ve üretilen fazla enerjiyi depolayabilecek bir şarj durumuna sahip olmaktadır.



**31.10.2009 12:00-12:59**



**23.01.2010 07:00-07:59**

Şekil 3. 13 Rastgele saatler için rüzgâr hızına bağlı olarak RT gücü değişimi

Yukarıda verilen benzetim sonuçlarından ayrı olarak, literatürde sıkça kullanılan saatlik bazda veri yerine dakikalık bazda veri kullanımının önemini göstermek üzere farklı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak, Şekil 3.13'te gösterildiği gibi rüzgâr hızı ve buna bağlı olarak RT gücü değişimleri ele alınmıştır. Bahsi geçen analiz için iki adet rastgele saat seçilmiştir. İlk ele alınan değerlendirme periyodu 31.10.2009 tarihinde 12:00 ve 12:59 saatleri arasındaki bir saatlik periyottur. Belirtilen periyotta ölçülen



dakikalık bazda rüzgâr hızı verisi Şekil 3.13'te görüldüğü üzere 4,91 m/s ile 11,36 m/s arasında değişmektedir. Buna bağlı olarak RT çıkış gücü 3190 W ile 43590 W arasında değişim göstermektedir. Saatlik veri kullanılması durumunda, değerlendirilen periyotta rüzgâr hızı verisinin 7,7 m/s olarak hesaplanan ortalama değeri kullanılacaktır. Bu ortalama değer bu 60 dakikalık periyot için sabit olarak 13500 W'lık bir RT çıkış gücü oluşturacaktır. Açıkça görüldüğü gibi, saatlik veri gerçek zamanlı anlık veri ile kıyaslandığında oldukça farklı bir çıkış sağlamak ve bu durum bulanık mantık kontrolörün çıkış değerlerini önemli oranda etkilemektedir. Dakikalık veri kullanıldığında RT gücünün 3190 W ile 43590 W arasındaki değişiminden kaynaklı olarak YH gücünde oldukça büyük değişimler meydana gelecek olmasına rağmen, saatlik veri kullanılması durumunda YH sistemi çıkış gücü değişimi neredeyse sabit olarak dikkate alınacaktır. Buradan da görüldüğü üzere, hibrit sisteme uygulanan bir enerji yönetimi stratejisinin performansı dakikalık veri kullanılması durumunda daha iyi değerlendirilebilecektir.

Dakikalık ve saatlik veri çıkışları arasındaki farkı daha iyi gösterebilmek açısından, rastgele olarak seçilen 23.01.2010 tarihinde 07:00 ile 07:59 saatleri arasındaki bir saatlik periyot da ayrıca ele alınmıştır. Ölçülen dakikalık bazda rüzgâr hızı verisi ve buna bağlı olarak RT çıkış gücü belirtilen periyotta 9,78 – 16,67 m/s ve 28360 - 55000W aralıklarında değişmektedir. Saatlik bazda kullanılacak rüzgâr hızı verisi ise 12,9 m/s olarak elde edilmekte ve bu değer 53670 W'lık RT çıkış gücü oluşturmaktadır. Bu sabit verinin kullanılması, dakikalık bazdaki veriye kıyasla yine bulanık mantık kontrolörün çıkışlarını değiştirecektir. Benzer kıyaslamaların diğer meteorolojik koşullar ve benzer şekilde yük talebi değişimleri için de gerçekleştirilebileceği belirtilmelidir. Kısacası bu analiz, hibrit bir sistem benzetim çalışması için gerçek zamanlı uygulamalara daha yakın performans elde edilmesi açısından, anlık detaylı bir verinin kullanımının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

### **3.5 Bölüm Değerlendirmesi**

Bir sonraki bölümde aktarılacak olan optimum boyutlandırma çalışmalarının altyapısı olarak gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi ele alınmıştır. Bahsi geçen sistemde RT ve FV üniteleri başlıca enerji kaynağı

konumundadırlar. YH sistemi, başlıca enerji kaynakları meteorolojik koşulların değişiminden ötürü güç talebini karşılayamadığı durumlarda devreye girerek sisteme güç aktarmaktadır. Elektrolizör sistemi ise FV ve RT ünitelerinin fazla güç üretimleri vasıtası ile hidrojen elde edilmesinde kullanılmaktadır. Yük talebindeki anlık değişimlerin karşılanması amacıyla ise de sisteme bir batarya ünitesi entegre edilmiştir.

Sistemdeki bulanık mantık tabanlı bir enerji yönetimi yaklaşımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarının yetersiz güç üretimi ve fazla güç üretimi durumlarında, batarya ünitesinin şarj durumu da dikkate alınarak genel enerji akışı düzenlenmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında sistemin şebekeden bağımsız bir uygulamada etkin sonuçlar verdiği, geliştirilen enerji yönetimi yaklaşımının daha farklı hibrit enerji sistemi topolojilerine kolayca adapte edilebilir bir yapıya sahip olduğu belirtilebilir.

Bunun yanı sıra; literatürde genellikle saatlik bazda ele alınan meteorolojik veriler ve yük talebi değişimi, gerçekleştirilen bu çalışmada bir yıla yakın bir periyot içerisinde dakikalık olarak değerlendirilmiştir. Bu sayede daha önce de belirtildiği üzere, özellikle YH ünitesi içeren hibrit enerji sistemlerine uygulanan bir enerji yönetimi stratejisinin benzetim ortamında daha etkin olarak değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bu anlamda gerçekleştirilen bu çalışma ile literatüre de katkı sağlanması hedeflenmektedir. Bu bölümde oluşturulan hibrit sistem benzetim modellerinden bir sonraki bölümde yer alan optimizasyon çalışmalarında yararlanılacağı hususu da belirtilmelidir.

### OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Günümüzde konvansiyonel enerji sistemleri ile kıyaslandığında özellikle maliyet açısından dezavantajlı konumda olan alternatif enerji sistemleri, birim maliyette en verimli şekilde enerji üretimi açısından özellikle detaylıca irdelenmelidir. Bu bağlamda, hibrit sistemlerin optimum boyutlandırması ile ilgili çalışmalar, daha önce de belirtildiği üzere sistem kurulumunun teknik ve ekonomik açıdan etkin bir şekilde sağlanması için oldukça önem arz etmektedir. Bu açıdan bu bölümde, bir önceki bölümde detayları aktarılan hibrit sistem benzetim modeli kullanılarak gerçekleştirilen optimum boyutlandırma çalışmasının deneysel olarak kurulacak hibrit sistem prototipine ışık tutacak sonuçları aktarılmaktadır. Daha önce Bölüm 2.4'te verilen çalışmalar alternatif enerji sistemlerinin daha yaygın kullanımına önemli katkılar yapmış olmalarına rağmen, bu çalışmaların hiçbiri yatırımın ömrü boyunca hibrit sistem bileşenlerinin performans azalmasını dikkate almamıştır. Bu açıdan, bu çalışmada en kötü durum senaryosunda hibrit sistem bileşenlerinin performans azalmasını dikkate alan yeni bir perspektif ile şebekeden bağımsız bir hibrit alternatif enerji sisteminin optimum boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Boyutlandırma işleminde AGO isimli bir yaklaşım kullanılmıştır. Farklı yedek güç ünitesi teknolojilerini ele alan hibrit sistem opsiyonları, yukarıda belirtilen performans azalımı hususu ile birlikte ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Hibrit sistem bileşenlerinin performans azalımını dikkate alarak oluşturulan optimizasyon yaklaşımının detayları ve elde edilen sonuçlar bu kapsamda irdelenmiştir. Burada elde edilen sonuçlardan, bir sonraki bölümde yer alan deneysel hibrit sistem prototipinin kurulumunda da yararlanılacaktır.

#### 4.1 Hibrit Sistem Optimizasyonunda Kullanılan Ekonomik Kriterler

Hibrit bir alternatif enerji sisteminin optimum kombinasyonu, sistemin güç arzı güvenilirliği ve sistem maliyeti gibi iki amaç arasında en iyi dengeyi sağlamalıdır. Yıllık eşdeğer sistem maliyeti (annualized cost of system- ACS) ile ilişkili olan ekonomik yaklaşım, sistemin karşılaştırmalı olarak en iyi maliyetini sağlamak için tasarlanmıştır. Hibrit bir sistemin yıllık eşdeğer maliyeti; yıllık eşdeğer yatırım maliyeti (annualized capital cost- $C_{acap}$ ), değişim maliyeti (annualized replacement cost- $C_{arep}$ ) ve bakım maliyetinden (annualized maintenance cost- $C_{amain}$ ) meydana gelmektedir. Bu açıdan yıllık eşdeğer toplam sistem maliyeti şu şekilde hesaplanmaktadır [169]:

$$ACS = C_{acap} + C_{arep} + C_{amain} \quad (4.1)$$

Burada her bir sistem bileşeni için yıllık eşdeğer yatırım maliyeti,

$$C_{acap} = C_{cap} \cdot CRF(i, Y_{proj}) \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.2'de  $C_{cap}$  her bir bileşen için \$ cinsinden ilk yatırım maliyetini,  $Y_{proj}$  bileşenin yıl cinsinden ömrünü,  $CRF$  ise yatırımı geri kazanma faktörünü belirtmektedir. Bir anüvitenin (yıllık olarak eşit miktarlı bir nakit akışı dizisi) şimdiki değerini hesaplamakta kullanılan  $CRF$ ,

$$CRF(i, Y_{proj}) = \frac{i \cdot (1+i)^{Y_{proj}}}{(1+i)^{Y_{proj}} - 1} \quad (4.3)$$

şeklinde belirtilmektedir. Eşitlik 4.3'te verilen yıllık faiz oranı ( $i$ ) ifadesi nominal faiz oranı ( $i'$ ) ve yıllık enflasyon oranı ( $f$ ) değişimleri ile Eşitlik 4.4'te verildiği üzere doğrudan ilişkilidir:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.5'te hibrit sistem bileşenlerinin yıllık eşdeğer değişim maliyetlerini gösteren parametre, projenin ekonomik ömrü boyunca oluşabilecek bütün değişim maliyetlerinin yıllık eşdeğeridir. Bu bağlamda bahsi geçen yıllık eşdeğer değişim maliyeti,

$$C_{arep} = C_{rep} \cdot SFF(i, Y_{rep}) \quad (4.5)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada  $C_{rep}$  bileşenlerin \$ cinsinden değişim maliyetlerini,  $Y_{rep}$  bileşenlerin yıl cinsinden ömrünü ve  $SFF$  (sinking fund factor) ise eşit bir biçimde planlanmış yıllık nakit akışının gelecek değerini belirten amortisman faktörünü temsil etmektedir. Bahsi geçen  $SFF$  ise şu şekilde belirtilmektedir:

$$SFF(i, Y_{rep}) = \frac{i}{(1+i)^{Y_{rep}} - 1} \quad (4.6)$$

Enflasyon oranını dikkate alan sistem bakım maliyeti ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$C_{amain}(n) = C_{amain}(1) \cdot (1+f)^n \quad (4.7)$$

Burada  $C_{amain}(n)$   $n$ . yıldaki bakım maliyetini belirtmektedir.

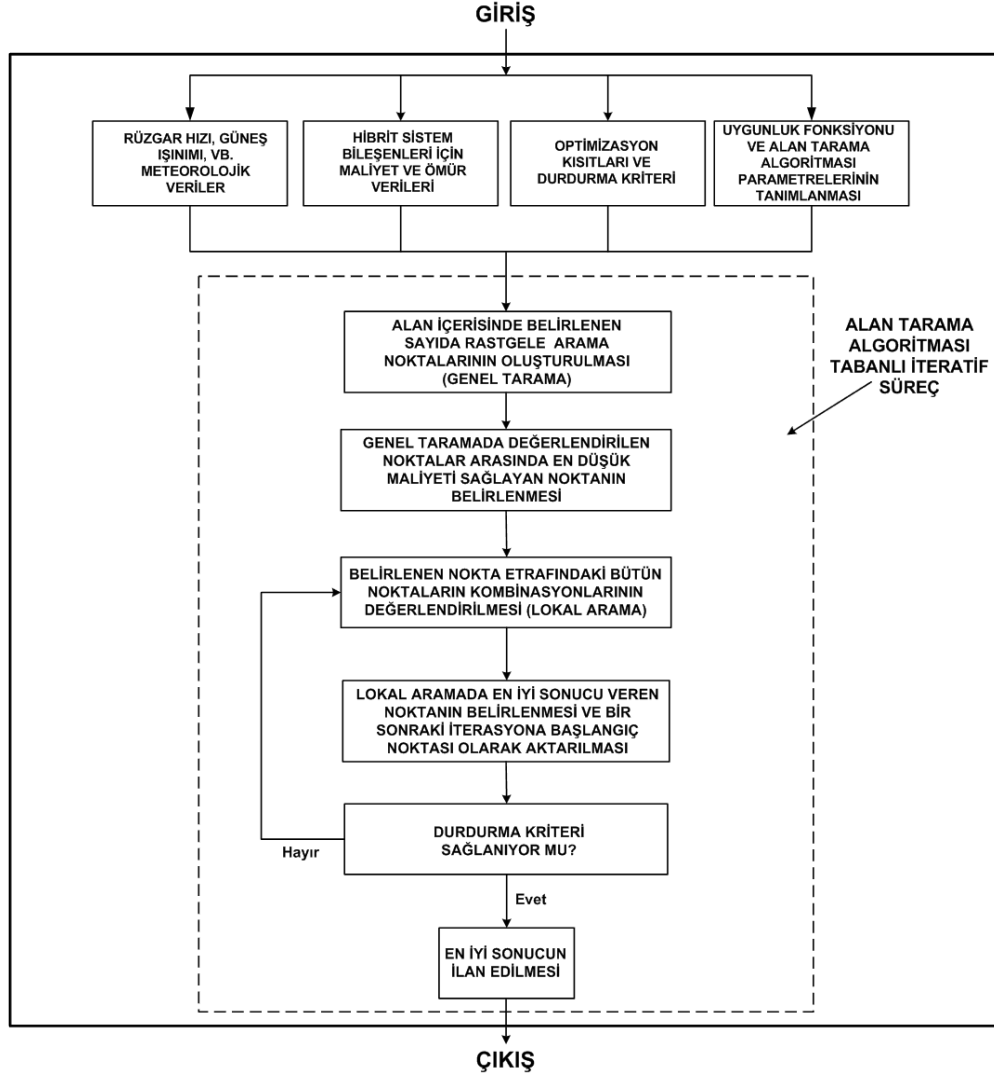
Burada olası hibrit sistem tasarımları arasında nispeten en iyi maliyeti sağlayabilmek için ACS ile ilişkili olan “elektrik enerjisi birim maliyeti – unit cost of electric energy ( $UCEE$ )” tabanlı ekonomik bir yaklaşım tasarlanmıştır. Bahsi geçen  $UCEE$ , ACS değerine göre şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$UCEE = \frac{ACS}{ATED} \quad (4.8)$$

Burada “Annual total energy demand – ATED” yükün kWh cinsinden yıllık toplam enerji talebidir. Belirtilen ekonomik yönlere göre ilerleyen bölümlerde yeniden değerlendirilecek olan optimum konfigürasyonun, yük talebini her koşulda en düşük  $UCEE$  ile sağlayan hibrit sistem konfigürasyonu olduğu belirtilmelidir. Bu belirleme işlemi daha önce de belirtildiği üzere ilgili optimizasyon yaklaşımı ile sağlanmaktadır.

## 4.2 Uygulanan Optimizasyon Algoritması

Sistem boyutlandırması için kullanılacak olan yaklaşım, en düşük maliyet ile hibrit sistem yük talebinin karşılanmasının sağlanmasında, sistem parametreleri arttıkça oluşan karmaşıklığı bertaraf edebilecek yetkinlikte ve kullanıcı için rahatça anlaşılabilir ve müdahale edilebilir yapıda olmalıdır. Bu çalışmada hibrit sistem boyutlandırması için AGO yaklaşımından yararlanılmıştır.



Şekil 4. 1 AGO optimizasyonu yaklaşımı blok diyagramı

AGO algoritmasının enerji sistemlerinin boyutlandırılmasında kullanımı Şekil 4.1'deki gibi özetlenebilmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere AGO yaklaşımının giriş verileri bölgesel meteorolojik veriler, belirlenen hibrit sistem bileşenlerinin kurulum, değişim ve bakım maliyetlerini de içeren birim maliyetleri, vb. olarak belirlenmiştir. Algoritma içerisine hibrit sistem bileşen boyutları için bazı kısıtlar da eklenmiştir. Ayrıca hibrit sistemin yük talebini batarya şarj durumu belirli bir seviyenin altına düşmeden her daim karşılaması da teknik bir kısıt olarak eklenmiş, bu kısıta uymayan sonuçlar bir ceza katsayısına maruz bırakılmışlardır. Bunun yanı sıra Eşitlik 4.8'de verilen *UCEE* fonksiyonu, minimize edilecek uygunluk fonksiyonu biçiminde bir giriş olarak belirtilmiştir. Algoritma başlangıcındaki rastgele arama noktalarının sayısı, iterasyon sayısı ve yerel aramada kullanılacak adım parametrelerinin değerleri de iteratif süreç öncesinde tanımlanmıştır.

Oluşturulan bu giriş verileri ile birlikte AGO yaklaşımının arama süreci, önceden tanımlanmış bir durdurma kriteri sağlanıncaya ya da maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar iteratif olarak devam etmektedir. Öncelikle, belirlenen sayıda rastgele arama noktası için uygunluk fonksiyonunun değeri hesaplanmıştır. Bu rastgele arama noktalarından en düşük sistem maliyetini sağlayan nokta ise yerel aramaya tabi tutulmuş, bu noktanın etrafındaki noktaların bu noktadan daha iyi bir sonuç verip vermediği irdelenmiştir. Daha iyi sonuç veren bir nokta saptandığı takdirde, akabindeki iterasyonda bu nokta yerel aramanın merkezi olarak tanımlanmış ve bu yeni nokta etrafındaki noktalarda yerel arama gerçekleştirilmiştir. Algoritma başlangıcındaki rastgele genel arama noktalarının sayısı ne kadar fazla olursa, alan içerisinde daha farklı kısımlar taranacağından ötürü algoritmanın yerel bir minimuma takılmadan genel minimumu bulmadaki etkinliği o denli artacaktır.

Bahsi geçen AGO yaklaşımındaki iteratif arama sürecinin hibrit alternatif enerji sistemlerinin boyutlandırmasında kullanımı kısıtlı bir optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir. Burada, Eşitlik 4.8’de verilen UCEE fonksiyonunun minimizasyonunu başarı göstergesi olarak ele almaktadır ve

$$LPSP = \frac{\sum_{t=0}^{TZ} Zaman(P_{\text{üret}}(t) < P_{\text{gerek}}(t))}{TZ} \quad (4.9)$$

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (4.10)$$

şeklindeki kısıt denklemleriyle [169] bahsi geçen boyutlandırma yaklaşımının temeli oluşturulmaktadır. Eşitlik 4.9’da yer alan  $LPSP$  değeri, yıl içerisinde güç talebinin karşılanamadığı anların toplam ele alınan zaman içerisindeki oranıdır.  $P_{\text{üret}}$  ve  $P_{\text{gerek}}$  ise sırasıyla  $t$  anında üretilen güç ve ihtiyaç duyulan yük talebi değerleridir. Son olarak da  $TZ$  ifadesi ise değerlendirilen periyodun saat biriminde toplam zamanını belirtmektedir. Eşitlik (4.10)’da ise  $P_{i,\min}$  ve  $P_{i,\max}$   $i$ . enerji kaynağının izin verilebilir minimum ve maksimum çıkış gücü değerleridir. Bu kısıtlar sayesinde hem sistemdeki arz-talep dengesinin sağlanması dikkate alınmış, hem de çeşitli durumlardan ötürü sistem bileşenlerinin boyutlarına getirilebilecek kısıtlamalar maliyet etkin hibrit bir sistem konfigürasyonunun tespitinde hesaba katılmıştır.

Bu şekilde oluşturulan kısıtlı bir optimizasyon probleminin çözümünde AGO yaklaşımının işleyişinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacı ile örnek bir irdeleme ele alınabilir. Örneğin, parametre sayısının 3 olduğu bir RT/FV/YH sisteminde rastgele arama noktası sayısının algoritma başlangıcında 3 olduğunu ve rastgele arama noktalarının şu şekilde belirlendiğini farz edelim:

$K_1=[10 \ 15 \ 30]$  (10 kW'lık RT, 15 kW'lık FV sistemi ve 30 kW'lık YH)

$K_2=[15 \ 10 \ 25]$  (15 kW'lık RT, 10 kW'lık FV sistemi ve 25 kW'lık YH)

$K_3=[40 \ 28 \ 13]$  (40 kW'lık RT, 28 kW'lık FV sistemi ve 13 kW'lık YH)

Çizelge 4. 1 Örnek sistem için lokal arama noktaları hesap tablosu

	RT gücü [kW]	FV gücü [kW]	YH gücü [kW]
$K_1$	$15+A_{RT}$	10	25
$K_2$	$15+A_{RT}$	$10+A_{FV}$	$25+A_{YH}$
$K_3$	$15+A_{RT}$	$10+A_{FV}$	25
$K_4$	$15+A_{RT}$	$10+A_{FV}$	$25-A_{YH}$
$K_5$	$15+A_{RT}$	10	$25+A_{YH}$
$K_6$	$15+A_{RT}$	$10-A_{FV}$	$25+A_{YH}$
$K_7$	$15+A_{RT}$	10	$25-A_{YH}$
$K_8$	$15+A_{RT}$	$10-A_{FV}$	25
$K_9$	$15+A_{RT}$	$10-A_{FV}$	$25-A_{YH}$
$K_{10}$	15	10	25
$K_{11}$	15	$10+A_{FV}$	$25+A_{YH}$
$K_{12}$	15	$10+A_{FV}$	25
$K_{13}$	15	$10+A_{FV}$	$25-A_{YH}$
$K_{14}$	15	10	$25+A_{YH}$
$K_{15}$	15	$10-A_{FV}$	$25+A_{YH}$
$K_{16}$	15	10	$25-A_{YH}$
$K_{17}$	15	$10-A_{FV}$	25
$K_{18}$	15	$10-A_{FV}$	$25-A_{YH}$
$K_{19}$	$15-A_{RT}$	10	25
$K_{20}$	$15-A_{RT}$	$10+A_{FV}$	$25+A_{YH}$
$K_{21}$	$15-A_{RT}$	$10+A_{FV}$	25
$K_{22}$	$15-A_{RT}$	$10+A_{FV}$	$25-A_{YH}$
$K_{23}$	$15-A_{RT}$	10	$25+A_{YH}$
$K_{24}$	$15-A_{RT}$	$10-A_{FV}$	$25+A_{YH}$
$K_{25}$	$15-A_{RT}$	10	$25-A_{YH}$
$K_{26}$	$15-A_{RT}$	$10-A_{FV}$	25
$K_{27}$	$15-A_{RT}$	$10-A_{FV}$	$25-A_{YH}$

Genel aramadaki bu arama noktaları arasında en düşük maliyeti sağlayan sistemin  $K_2$  noktasında bulunduğu belirlensin. Buna bağlı olarak, iteratif süreç dahilinde bahsi geçen nokta etrafında yerel arama başlatılacaktır. Örneğin RT, FV ve YH sistemleri için



adım faktörlerinin ( $A_{RT}$ ,  $A_{FV}$  ve  $A_{YH}$ ) sırası ile 5, 1 ve 1 olarak belirlendiğini düşünelim. Burada bahsi geçen yerel aramadaki değerlendirilecek noktalar Çizelge 4.1'e göre dikkate alınacaktır. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere her bir bileşen için arama alanı,

$$C_y = B_y \pm A_y \quad (4.9)$$

eşitliğine göre belirlenmektedir. Burada  $B_y$  mevcut iterasyonda  $y$  bileşeninin genel aramadan ya da bir önceki yerel aramadan gelen başlangıç boyutunu,  $A_y$  ise  $y$  bileşeni için lokal arama adım faktörünü temsil etmektedir. Buna göre, ele alınan örnekte ilk iterasyonda yerel arama yapılacak olan noktalar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Örnek sistem için hesaplanmış lokal arama noktaları

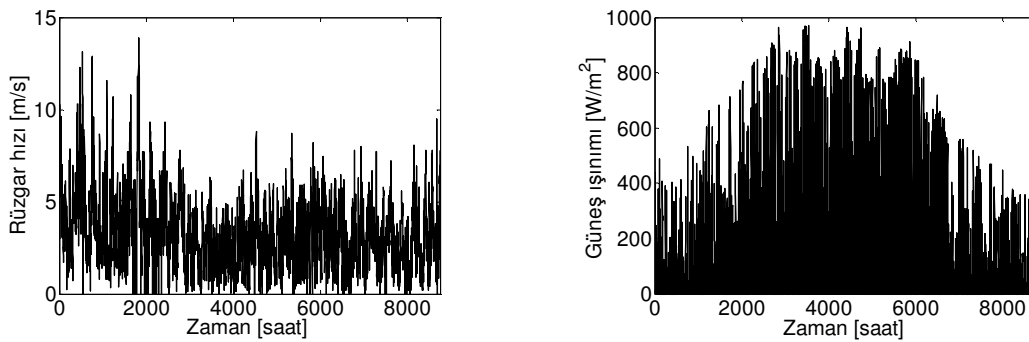
	RT gücü [kW]	FV gücü [kW]	YH gücü [kW]
K <sub>1</sub>	20	10	25
K <sub>2</sub>	20	11	26
K <sub>3</sub>	20	11	25
K <sub>4</sub>	20	11	24
K <sub>5</sub>	20	10	26
K <sub>6</sub>	20	9	26
K <sub>7</sub>	20	10	24
K <sub>8</sub>	20	9	25
K <sub>9</sub>	20	9	24
K <sub>10</sub>	15	10	25
K <sub>11</sub>	15	11	25
K <sub>12</sub>	15	11	26
K <sub>13</sub>	15	11	25
K <sub>14</sub>	15	10	24
K <sub>15</sub>	15	9	26
K <sub>16</sub>	15	10	26
K <sub>17</sub>	15	9	24
K <sub>18</sub>	15	9	25
K <sub>19</sub>	10	10	24
K <sub>20</sub>	10	11	25
K <sub>21</sub>	10	11	26
K <sub>22</sub>	10	11	25
K <sub>23</sub>	10	10	24
K <sub>24</sub>	10	9	26
K <sub>25</sub>	10	10	26
K <sub>26</sub>	10	9	24
K <sub>27</sub>	10	9	25

Burada belirtilen 27 adet noktanın her biri Eşitlik 4.8'i belirten uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilecek ve teknik kısıtları sağlayarak en düşük maliyeti veren sonuç, bir

sonraki iterasyonda yerel aramanın merkez noktası olacaktır. Önerilen AGO yaklaşımının özellikle literatürde benzer çalışmalarda sıklıkla kullanılan parçacık sürü optimizasyonuna kıyasla avantajları bulunmaktadır. Ancak parçacık sürü optimizasyonuna benzer olarak önerilen yaklaşımda, özellikle genel aramanın başlangıç aşamasında yapılmasından ötürü genel aramadaki rastgele arama noktası sayısı az ise algoritmanın yerel bir minimuma yakın bir noktada takılıp diğer alanları ihmal etmesi ve sadece bu yerel minimuma ulaşacak şekilde ilgili nokta etrafında yerel arama yapması riski söz konusudur. Bu açıdan, daha önce de belirtildiği üzere genel aramadaki rastgele arama noktası sayısı algoritmanın karmaşıklığını da arttırmayacak şekilde, mümkün olduğunca fazla seçilmelidir. Ayrıca; yerel aramada da algoritmanın yerel minimumdan kurtulabilmesine olanak sağlamak için, genetik algoritmadaki mutasyon operatörüne benzer bir “odak kayması” operatörü algoritma yapısına eklenmiştir. Bu sayede literatürde en sık kullanılan yaklaşımlar olan parçacık sürü optimizasyonunun basit yapısı ve genetik algoritmanın genel minimumu yakalamadaki üstün performansı gibi güçlü yanları dikkate alınarak etkin bir yaklaşım elde edilmektedir.

### 4.3 Optimizasyon Sonuçları

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları boyunca amaç, daha önce de belirtildiği üzere teknik kısıtları ve yük talebi arzını her durumda mümkün olan en düşük *UCEE* ile sağlayan hibrit sistem yapısını elde etmektir. Optimizasyon işlemi boyunca dikkate alınan saatlik veriler yıllık bazda güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve bir yükün güç talebi değişimidir.



Şekil 4. 2 Boyutlandırma işleminde kullanılan yıllık bazda meteorolojik veri

2011 yılında çatıda konumlandırılmış bir meteorolojik veri istasyonundan elde edilen ve saatlik ortalamaya çevirilen güneş ışınımı ve rüzgâr hızı verileri Şekil 4.2’de görülmektedir. Bunun yanı sıra bir ofis bloğu için daha önce açıklanan ölçümden alınan dakikalık güç talebi verisi saatlik ortalamaya çevirilerek boyutlandırma işleminde kullanılmıştır.

Güneş ve rüzgâr tabanlı temel yenilenebilir kaynakların güç üretimi değişimleri, Şekil 4.2’de verilen meteorolojik veri kullanılarak FV ve RT sistemlerinin önceden tanımlanan modellerine göre hesaplanmaktadır. Diğer hibrit sistem bileşenlerinin (YH, elektrolizör ve batarya) güç değişimleri ise bir ana kontrolör tarafından batarya sisteminin şarj durumu dikkate alınarak belirlenmektedir. Elektrolizör tarafından üretilen ve depolanan hidrojen miktarına göre YH sistemi ise, tanklarda yetersiz hidrojen enerjisi bulunması durumlarında kapatılmaktadır.

Çizelge 4. 3 Hibrit sistem bileşenlerinin ilgili maliyet ve ömür değerleri

Parametre	Değer
RT ömrü [yıl]	25
FV ömrü [yıl]	25
YH ömrü [yıl]	6
Elektrolizör ömrü [yıl]	8
Batarya ömrü [yıl]	4
RT ilk yatırım maliyeti [\$/kW]	3500
FV ilk yatırım maliyeti [\$/kW]	6500
YH ilk yatırım maliyeti [\$/kW]	3000
Elektrolizör ilk yatırım maliyeti [\$/kW]	3500
Batarya ilk yatırım maliyeti [\$/kAh]	1500
YH değiştirme maliyeti [\$/kW]	3000
Elektrolizör değiştirme maliyeti [\$/kW]	3500
Batarya değiştirme maliyeti [\$/kAh]	1500
RT bakım maliyeti [\$/kW]	95
FV bakım maliyeti [\$/kW]	65
YH bakım maliyeti [\$/kW]	20
Elektrolizör bakım maliyeti [\$/kW]	20
Batarya bakım maliyeti [\$/kW]	50
Nominal faiz oranı [%]	3,75
Nominal enflasyon oranı [%]	1,5

Optimum boyutlandırma çalışmasında hibrit sistem bileşenlerinin ilgili maliyet ve ömür değerleri ise Çizelge 4.3’te verildiği gibi dikkate alınmıştır [96,122,139]. Ayrıca DC/DC dönüştürücü ve inverter verimliliği değerlerinin sırası ile 0,9 ve 0,95 olarak hesaba

katıldığı da belirtilmelidir. Bununla birlikte Ref. [170]'de belirtildiği gibi FV gücü, 20 yıllık işletimin ardından başlangıçtaki maksimum gücünün %90'ına düşmektedir. Belirtilen %90 değeri ayrıca YH ve elektrolizör sistemleri için de 6 ve 8 yıllık değiştirme zamanlarının sonunda dikkate alınmaktadır [171]. Daha önce de belirtildiği gibi batarya kullanılabilir kapasitesinin, değişim zamanında başlangıç kapasitesinin %80'ine düştüğü hesaba katılmaktadır [172]. Ayrıca gerekli bakım işlemlerinin düzenli gerçekleştirildiği kabul edilerek RT sistemi için bir güç azalımının dikkate alınmadığı da belirtilmelidir.

Çizelge 4. 4 Farklı durum değerlendirmeleri için boyut optimizasyonu sonuçları

	FV gücü [kW]	RT gücü [kW]	YH gücü [kW]	Elektrolizör gücü [kW]	Batarya kapasitesi [kAh]	UCEE [\$/kWh]
Durum 1	204,2	100	20	30	2	5,439
Durum 2	182,1	100	15	25	1,8	4,769
Durum 3	60,6	50	40	-	1	2,162
Durum 4	117,7	50	-	-	20,4	2,795

**Durum 1** : Rejeneratif hidrojen enerji sistemi tabanlı yedek güç ünitesi & Performans azalması dikkate alınmış durum

**Durum 2** : Rejeneratif hidrojen enerji sistemi tabanlı yedek güç ünitesi & Performans azalması dikkate alınmamış durum

**Durum 3** : Gaz reformasyonu beslemeli YH sistemi tabanlı yedek güç ünitesi & Performans azalması dikkate alınmış durum

**Durum 4** : Sadece batarya ünitesi tabanlı yedek güç ünitesi & Performans azalması dikkate alınmış durum

Hibrit sistem tasarım geçmişi ile ilgili verilen bilgilerin ışığında farklı hibrit sistem konfigürasyonlarını dikkate alarak çeşitli durumlar değerlendirilmiştir. Burada oluşturulan AGO algoritması EK-A'da verilmektedir. Algoritma cevabının değerlendirildiği bir periyodun ardından, hesaplama karmaşıklığını engellemek için maksimum iterasyon sayısı 15 olarak seçilmiştir. Bu konseptte, yukarıda belirtilen farklı durum analizleri içerisinde her bir hibrit sistem bileşeninin performans azalmasını dikkate alarak, rejeneratif hidrojen sistemi tabanlı bir yedek güç ünitesi içeren hibrit sistem tasarımı Durum-1'de ele alınmaktadır ve ilgili boyutlandırma sonuçları Çizelge 4.4'te gösterilmektedir. Optimizasyon işleminden önce başlangıçtaki gözlem noktası sayısı 500 olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere 100 kW'lık RT sistemi, 204,2 kW'lık FV sistemi, 20 kW'lık YH ünitesi, 30 kW'lık elektrolizör sistemi ve 2 kAh'lık bir batarya bankasından oluşan bir hibrit sistem kurulumu, performans azalımı hususunun dikkate alındığı durumda yük talebinin ve meteorolojik koşulların değişimini karşılamada yeterli olmaktadır. Güneş ve rüzgâr kaynaklarının enerji katkıları aydan aya önemli oranda değişmektedir. Bu husus yetersiz yenilenebilir güç üretiminde, net yük talebini karşılamak için uygun boyutlu bir YH sistemi ve yenilenebilir kaynakların olası

fazla güç üretimlerini etkin bir şekilde geri kazanabilmek için uygun boyutlu elektrolizör ve batarya ünitelerine gereksinimi ortaya çıkarmaktadır.

Performans azalımı hususunun dikkate alınmadığı bir durum (Durum-2) için optimizasyon işlemi yeniden uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar ve ilgili UCEE değeri Çizelge 4.4'te gösterilmektedir. Çizelge 4.4'ten görüldüğü gibi, beklendiği üzere hibrit sistem bileşenlerinin boyutları Durum-1 ile kıyaslandığında daha düşüktür. Fakat bu boyutlandırma özellikle YH, elektrolizör ve batarya sistemleri gibi FV ve RT sistemlerine kıyasla daha düşük işletim ömrüne sahip olan hibrit sistem bileşenlerinin ömürlerinin sonlarına doğru, yük talebinin karşılanmasının güvenilirliğini tehlikeye düşürebilir. Durum-1 ve Durum-2 için Çizelge 4.4'te görülen sonuçlarda dikkat çeken önemli bir husus da yüksek boyutlu bir yenilenebilir enerji sisteminin kurulmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu hususun iki ana nedeni vardır: Birinci neden; RT ve FV sistemlerinin yıl içerisindeki pik enerji üretim periyotlarının, meteorolojik koşulların mevsimsel değişimine bağlı olarak birbirinden farklı olmasıdır. İkinci neden ise; YH sistemi işletimi için yüksek miktarda depolanmış hidrojen enerjisine gereksinim duyulmasıdır. Durum-2'deki optimum boyutlandırma sonuçları bir de herhangi bir yedek güç ünitesi veya enerji depolama sistemi olmadan, şebeke ile paralel olarak sadece elde edilen boyutlardaki FV ve RT sistemlerinin kullanılması durumunda ortaya çıkacak birim enerji maliyeti açısından değerlendirilmiştir. Burada FV ve RT sistemlerinin yük talebini karşılamasının ardından kalan fazla güç üretiminin her iki kaynağın üretimi ortak değerlendirilecek şekilde 0,15 \$/kWh'lık bir birim fiyattan şebekeye satıldığı, tam tersi bir durumda eksik kalan yük talebinin ise 0,12 \$/kWh'lık bir birim fiyattan şebekeden satın alındığı hesaba katılmıştır. Bu durumda şebeke ile hibrit sistem arasında gerçekleşen enerji alışverişi de dikkate alındığında şebekeye paralel işletilen FV/RT hibrit sistemi için UCEE değeri 0,477 \$/kWh olarak elde edilmektedir. Görüldüğü üzere, bahsi geçen değer şebekeden satın alınan enerjinin birim maliyetine yukarıda belirtilen hibrit sistem yapılarına kıyasla önemli oranda daha yakın konumdadır. Bunun başlıca nedeni şebekenin hem yedek güç, hem de enerji depolama ünitesinin fonksiyonlarını üstlenmesi nedeni ile bahsi geçen FV/RT sisteminde YH-elektrolizör gibi oldukça pahalı bir yedek güç ünitesine ihtiyaç olmamasıdır. Ayrıca aşağıda ele alınacak olan Durum-4 içerisinde sadece batarya tabanlı yardımcı bir güç ünitesi mevcut olsa


























bile, oldukça yüksek boyutlu bir batarya sistemi ve proje ömrü içerisindeki batarya değişim gereksinimlerinden ötürü bu konfigürasyonun sonuçları da Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere bahsi geçen birim enerji maliyetine yaklaşmayacak bir değerdedir. Bu durum da özellikle bazı alternatif enerji sistemlerinin maliyetlerinin düşürülmesine ne oranda ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

Farklı bir analiz olarak elektrolizör kullanımı olmadan, sadece YH sistemi tabanlı yedek güç ünitesi kullanımı Durum-3'te değerlendirilmektedir. Gerekli hidrojenin 0,04 \$/kWh'lik bir birim maliyet ile gaz reformasyonu vasıtasıyla elde edildiği hesaba katılmaktadır [173]. 50 kW'lık bir RT, 60,6 kW'lık FV, 40 kW'lık YH ve 1 kAh'lık batarya sistemleri Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi bu konfigürasyon için en düşük *UCEE* değerini oluşturmaktadır. Çizelge 4.4'te Durum-3 ile ilgili görülen sonuçlar; eğer hibrit sistem bileşenlerinin birim maliyetleri azalır, bu konfigürasyonun konvansiyonel anlamdaki enerji üretimi ile yarışabilir olduğunu göstermektedir. Fakat yeterli bir gaz sağlama altyapısına ihtiyaç duyulduğundan ötürü gaz dönüşümü işleminin gereksinimi, bu konfigürasyonun uygulanmasını etkileyebilir.

Son analiz olarak, hidrojen yedek güç ünitesi olmadan bir hibrit sistem tasarımı Durum-4'te ele alınmıştır ve ilgili sonuçlar Çizelge 4.4'te gösterilmektedir. Bu durumda; 20,4 kAh'lık yukarıda ele alınan hibrit sistem konfigürasyonlarına kıyasla önemli oranda büyük bir batarya grubu ile birlikte 50 kW'lık bir RT ve 117,7 kW'lık bir FV sisteminin gerekli olduğu görülmektedir. Bu konfigürasyonun *UCEE* değeri de nispeten ümit vericidir ve beklenen maliyet düşüşleri ile birlikte daha da rekabetçi olabilir.

Elde edilen sonuçların mukayeseli olarak irdelenmesi açısından daha önce bahsi geçen HOMER paket programı ile de aynı maliyet ve ömür değerleri ışığında bir analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te bahsi geçen iteratif süreç tabanlı analize ait sonuçların HOMER ekranındaki sıralaması gösterilmektedir. Görüldüğü üzere HOMER tarafından belirtilen en iyi sonuç, AGO algoritması ile elde edilen Durum-2'deki sonuçlar ile paralellik arz etmektedir. Ancak HOMER programı ile elde edilen FV boyutu tez çalışmasında elde edilen sonuca göre biraz daha yüksek değerde iken, HOMER tarafından nispeten daha düşük boyutlu bir YH sistem boyutu belirlenmiştir. Bu durum temel olarak HOMER tarafından belirlenen hibrit sistem bileşen modelleri ve enerji

yönetimi yaklaşımı seçeneklerine dışarıdan müdahale edilememesi ve bu nedenle kullanılan benzetim konsepti ve enerji yönetimi stratejisinin tamamen aynı olmamasından kaynaklanmaktadır.

	PV (kW)	WT	FC (kW)	US-250	Conv. (kW)	Elec. (kW)	H2 Tank (kg)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC
	190	2	10	8	400	25	10	\$ 1,689,501	68,707	\$ 2,791,782
	190	2	10	12	400	25	10	\$ 1,695,501	70,477	\$ 2,826,184
	170	3	10	4	400	25	10	\$ 1,728,501	71,082	\$ 2,868,877
	200	2	10	8	400	25	10	\$ 1,754,501	69,469	\$ 2,869,009
	170	3	10	8	400	25	10	\$ 1,734,501	72,091	\$ 2,891,067
	200	2	10	12	400	25	10	\$ 1,760,501	71,296	\$ 2,904,319
	190	2	30	12	400	20	10	\$ 1,743,001	73,153	\$ 2,916,608
	170	3	10	12	400	25	10	\$ 1,740,501	73,663	\$ 2,922,291
	180	3	10	4	400	25	10	\$ 1,793,501	71,735	\$ 2,944,364
	180	3	10	8	400	25	10	\$ 1,799,501	72,800	\$ 2,967,449
	170	2	30	12	400	25	10	\$ 1,625,501	83,715	\$ 2,968,561
	180	3	10	12	400	25	10	\$ 1,805,501	74,335	\$ 2,998,074
	200	2	30	12	400	20	10	\$ 1,808,001	74,727	\$ 3,006,857
	190	2	20	4	400	30	10	\$ 1,726,001	79,899	\$ 3,007,834
	170	3	30	4	400	20	10	\$ 1,776,001	77,093	\$ 3,012,819
	190	3	10	4	400	25	10	\$ 1,858,501	72,646	\$ 3,023,972
	170	2	30	8	400	30	10	\$ 1,632,001	86,971	\$ 3,027,295
	170	3	30	8	400	20	10	\$ 1,782,001	78,196	\$ 3,036,509
	170	2	30	12	400	30	10	\$ 1,638,001	87,637	\$ 3,043,978
	190	3	10	8	400	25	10	\$ 1,864,501	73,612	\$ 3,045,479
	180	2	30	12	400	25	10	\$ 1,690,501	84,536	\$ 3,046,736
	190	3	10	12	400	25	10	\$ 1,870,501	75,045	\$ 3,074,470
	200	2	20	4	400	30	10	\$ 1,791,001	81,068	\$ 3,091,594
	180	3	30	4	400	20	10	\$ 1,841,001	78,210	\$ 3,095,748
	200	3	10	4	400	25	10	\$ 1,923,501	73,246	\$ 3,098,609

Şekil 4. 3 HOMER vasıtası ile elde edilen sonuçların program ekranındaki sıralaması Bölüm kapsamında elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, hibrit sistem bileşenlerinin boyutlandırması zorlu bir husustur ve dikkatlice ele alınacak çok sayıda parametre mevcuttur. Bu bağlamda, alternatif enerji sistemlerinin daha yaygın ve verimli kullanımı açısından bu gibi çok boyutlu ve oldukça karmaşık problemlerin çözümü için etkin ve kolay kullanılabilir optimizasyon algoritmalarına oldukça ihtiyaç olduğunu tekrar belirtmekte fayda vardır. Ayrıca her bir konfigürasyonun *UCEE* değerinin, konvansiyonel anlamdaki elektrik enerjisi üretiminin birim fiyatından fazla olduğu da tartışılabilir. Fakat uzak bölgelerin elektrik ihtiyacını karşılamak için sıfırdan bir elektrik altyapısı kurulmasının maliyeti de burada dikkate alınmalıdır. Ayrıca hibrit sistem bileşenlerinin birim maliyet değerleri, artan kurulum gücü değeri ile birlikte azalmaktadır. Örneğin FV'nin kW başına 6500 \$'lık maliyeti eğer FV kapasitesi belirli miktarların üzerine çıkarsa düşmektedir ve bu azalış Çizelge 4.4'te gösterilen sonuçlarda hesaba katılmamıştır. Bunun yanı sıra, bu çalışmanın birçok yerinde daha önce bahsedildiği üzere alternatif kaynakların azalan maliyetlere sahip olması beklenirken, konvansiyonel kaynakların rezervlerinin tükenmesi ile birlikte bu

kaynakların birim fiyatları artan bir trend yaşayacaktır. Ayrıca, fosil yakıt kullanımının olumsuz çevresel sonuçlarının ekonomik etkileri de ayrıca hesaba katılmalıdır. Bu açıdan, bu birim fiyatların öngörülebilir bir gelecekte alternatif enerji sistemlerinin son kullanıcılara ekonomik uygulanabilirliklerini kanıtlayabilecekleri ortak bir noktada birleşeceği beklenmektedir.

#### **4.4 Bölüm Değerlendirmesi**

Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmada hibrit bir alternatif enerji sisteminin boyutlandırması için bir optimum boyutlandırma yaklaşımı önerilmektedir. Ele alınan hibrit sistem, rüzgâr enerjisi için RT'den, güneş enerjisi için FV'den, ana yedek güç ünitesi olarak hidrojen enerjisi için YH-elektrolizör kombinasyonundan ve bir batarya sisteminden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, gaz reformasyonu tabanlı hidrojen beslemeli YH yedek güç ünitesi ve sadece batarya bankası tabanlı yedek güç ünitesi de bu çalışmada ayrıca ele alınmışlardır.

Hibrit sistemlerin boyutlandırması üzerine yapılan benzer literatür çalışmalarından öte, güç üretimi açısından hibrit sistem bileşenlerinin güç azalmaları boyutlandırma yaklaşımında dikkate alınmıştır. Bunun yanı sıra, her bir hibrit sistem bileşeninin dinamik modelleri optimizasyon işleminde kullanılmıştır. Performans azalması hususunun dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar için hibrit sistem boyutlandırması irdelenmiş ve performans azalımı dikkate alındığında kayda değer bir fark olduğu gösterilmiştir. Bu fark FV sistemi için %10'a ulaşırken, değerlendirilen hibrit sistem tasarım koşullarında YH sistemi için %25 fark oluşmuştur. Bunun yanı sıra bu gibi kaynakların maliyetlerinin yakın gelecekte azalan bir trende gireceği sıklıkla tartışılmaktadır. Bu açıdan olası maliyet değişimlerinin etkilerini kurulum aşamasından önce değerlendirmek önemlidir. Sonuç olarak, gerçekleştirilen çalışma ile birlikte ilgili literatüre yeni bir perspektif ile katkıda bulunulması hedeflenmiş ve bu teknik perspektifin sağladığı farklılıklar bu bölüm kapsamında irdelenmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlardan, bir sonraki bölümde aktarılacak olan deneysel çalışmalarda da yararlanılacaktır. Bu bölümde bahsi geçen katkılar, sistem bileşeni maliyetlerinin ve buna bağlı olarak toplam maliyet içerisindeki değişim maliyeti değerinin proje ömrü boyunca azalmasını, ayrıca kurulum maliyetlerinin her bir bileşen için kurulum



kapasitesinin artışına göre azalımını da dikkate alan ekonomik perspektifler ile daha da geliştirilebilir. Örneğin batarya sistemi maliyetinin bugün için kAh başına 1500 \$ olarak dikkate alınan değeri 4 veya 8 yıllık gibi bir süre zarfında bugünkü değerinin aynısı olmayacaktır. Bunun yanı sıra 1 ve 200 kW'lık PV kurulumlarının birim maliyetleri aynı değildir, gerçek hayattaki uygulamalarda kurulum kapasitesi arttıkça firmaların teklif bedellerindeki birim fiyat azalmaktadır. Bu çalışmalar optimum boyutlandırma kapsamında gelecek dönem hedefleri arasındadır.

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Hibrit sistem performansının benzetim ortamında ilgili modelleme çalışmaları ile sınanması ve gerçekleştirilen optimum boyutlandırma çalışmalarının ardından, bahsi geçen çalışmaların deneysel olarak da doğrulanması, çalışma bütünlüğü açısından önemli bir husustur. Bu açıdan, bu bölümde hibrit sistem için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer verilmektedir. Öncelikle deneysel test platformunun teknik detayları belirtilmektedir. Akabinde, uygulanan enerji yönetimi yaklaşımının ön değerlendirilmesi için gerçekleştirilen başlangıç deneysel çalışması aktarılmaktadır. Sonraki aşamada ise, Bölüm 4.1’de aktarılan optimum boyutlandırma sonuçları normalize edilerek, boyutlandırma yaklaşımının da etkinliği farklı çalışma koşulları altında değerlendirilmektedir. Buna göre, bahsi geçen alt bölümler ile ilgili detaylar sırası ile aşağıda yer almaktadır.

#### 5.1 Deneysel Test Platformunun Tanıtılması

Test platformunu oluşturan yenilenebilir enerji kaynakları ile yedek güç ve enerji depolama ünitelerini içeren hibrit sistem bileşenleri, ortak bir DC bara üzerinden beraberce yükü beslemektedirler. İlerleyen alt bölümlerde her bir hibrit sistem bileşeni tanıtılmakta ve detaylıca irdelenmektedir:

##### 5.1.1 Fotovoltaik ve Rüzgâr Türbini Sistemleri

Güneş enerjisinden yararlanmak için ANELES ve Solen markalı iki adet farklı FV grubu kullanılmıştır. ANELES marka monokristal FV panellerin her biri 180 W’lık bir nominal

çıkış gücüne sahiptir. Bunun yanı sıra mevcut polikristal Solen marka FV panellerin her biri 130 W'lık bir güç çıkışı sağlamaktadır. Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü'nde ALTEK laboratuvarı çatısında daha önce kurulu olan toplam FV sistemine ait fotoğraflar Şekil 5.1(a-b)'de gösterilmektedir.



(a) ANELES FV paneller



(b) SOLEN FV paneller



(c) Zephyr Airdolphin rüzgâr türbini

Şekil 5. 1 Yenilenebilir enerji kaynaklarının fotoğrafları

Kullanılan ANELES ve Solen FV modüllere ait teknik özellikler ise Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Kullanılan FV panellerin teknik özellikleri

	<b>ANELES</b>	<b>Solen</b>
Açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ) [V]	29,7	21
Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) [A]	8,39	8,25
Maksimum gerilim ( $V_{mp}$ ) [V]	22,99	17
Maksimum akım ( $I_{mp}$ ) [A]	7,83	7,65
Modül gücü [W]	180	130
Hücre sayısı	48	36

Bunun yanı sıra çalışmada 1 kW'lık nominal çıkış gücüne sahip Zephyr Airdolphin model bir RT kullanılmaktadır. Bahsi geçen RT içerisinde sabit mıknatıslı senkron bir generatör mevcuttur. Kullanılan RT için üretime başlanan rüzgâr hızı 2,5 m/s'dir. 20 m/s'lik rüzgâr hızlarının üzerinde elektromekanik fren düzeneği devreye girmekte ve frenlemeli kontrol altında güç üretimi yapılmaktadır. RT, Şekil 5.1(b-c)'de görüldüğü üzere laboratuvar çatısı üzerine yerleştirilmiş olan bir direk üzerine monte edilmiş ve RT'nin elektriksel çıkışı oluşturulan DC baraya bağlanmıştır.

### 5.1.2 PEMYH Sistemi ve Batarya Üniteleri

Hidrojen enerjisi sistemi olarak çalışmada kullanılan YH ünitesi, Şekil 5.2(a)'da gösterilen ve maksimum 1,2 kW'lık ve 46 A'lik elektriksel çıkışa sahip Ballard firmasının Nexa modeli PEMYH sistemidir.



(a) PEM YH sistemi



(b) Hidrojen depolama ünitesi



(c) Batarya ünitesi



(d) Test düzeneği genel görünümü

Şekil 5. 2 Diğer hibrit sistem bileşenlerinin fotoğrafları

Bahsi geçen YH yiğinin nominal çıkış gerilimi 22-50 V aralığındadır. Sistem hava soğutmalı olarak tasarlanmıştır. Girişteki hidrojenin saflığı en az %99,99 olmalıdır. Hava kompresörü, manifoldlar, soğutucu, vb. gerekli yardımcı ekipmanlar ile birlikte toplam YH sisteminin ağırlığı yaklaşık 22 kg'dır. Kullanılan 1,2 kW'lık PEMYH ünitesine ait teknik parametreler Çizelge 5.2'de sıralanmıştır.

Çizelge 5. 2 Ballard Nexa 1,2 kW PEMYH teknik özellikleri

Nominal çıkış gücü	1,2 kW
DC gerilim aralığı	22...50 V
Maksimum çıkış akımı	46 A DC
Yakıt girişi	%99,99 saflıkta hidrojen
Maksimum yığın sıcaklığı	70 °C
Ağırlık	13 kg

YH sisteminin çalışması için gerekli olan hidrojen; yüksek basınçlı, sıvılaştırılmalı ya da metal hidrit tüplerde depolanabilmektedir. Ancak, şebekeden bağımsız sistemler için metal hidrit teknolojisi ideal bir çözümdür [174]. Bu çalışmada hibrit sistem işletiminde Şekil 5.2(b)'de görüldüğü gibi Ovonics firmasının üç adet metal hidrit hidrojen tüpü kullanılmıştır. Kullanılan her bir tüp 2 litrelik bir hacme ve 6,5 kg'lık bir ağırlığa sahiptir. Bahsi geçen hidrojen tüplerinin teknik özellikleri Ref. [175]'de verilmiştir.

Bunun yanı sıra oluşturulan hibrit sistemde gerçekleştirilen farklı durum analizlerinde iki farklı tip VRLA batarya kullanılmıştır. Şekil 5.2(c)'de görülen VRLA bataryaların elektriksel özellikleri 12 V-12 Ah (Micronlight) ve 12 V-80 Ah (FirstPower) şeklindedir.

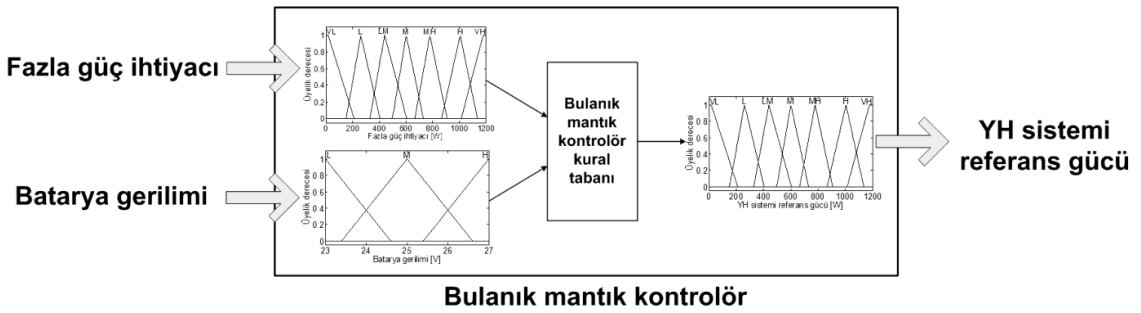
### 5.1.3 Yük ve Güç Biçimlendirme Ünitesi Tasarımı

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada Şekil 5.2(d)'de görülen elektronik bir DC yük bankası kullanılmıştır. Burada test sisteminin yük değişimi, bahsi geçen ve BK Precision firmasının bir ürünü olan 1,2 kW'lık yük bankası ile sağlanmıştır [176].

RT'nin DC baraya entegrasyonunu sağlayan kendine ait bir DC/DC dönüştürücüsü bulunmaktadır. Bunun yanı sıra FV sisteminin DC bara entegrasyonunda ticari olarak mevcut olan bir şarj kontrol ünitesi kullanılmaktadır. Ayrıca YH sisteminin entegrasyonu için ayrı bir DC/DC dönüştürücü tasarlanmış ve batarya ünitesi ise DC baraya doğrudan bağlanmıştır. Tasarlanan YH sistemi dönüştürücüsü, bir sonraki alt bölümde aktarılacak bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi stratejisi tarafından belirlenen referans güç ve buna bağlı olarak referans akım değerinin YH sisteminden çekilmesini sağlamak için kullanılmaktadır. Bahsi geçen dönüştürücü ile ilgili detaylı anlatım Ref. [177]'de yer almaktadır.

#### 5.1.4 Enerji Yönetim Sistemi Tasarımı

Bu çalışmada, daha önce de belirtildiği üzere bulanık mantık tabanlı bir kontrolörden yararlanılmıştır. Oluşturulan bulanık mantık kontrolör yapısında temel kontrol hedefi, batarya gerilimini belirli bir seviyede tutarken sistemdeki genel güç akışını düzenlemektir. Gerçekleştirilen çalışmada batarya sistemi için seçilen gerilim seviyesi 25 V'tur. Buna göre düzenlenen bulanık mantık kontrolör Şekil 5.3'te görüldüğü gibi 2 giriş ve 1 çıkışa sahiptir. Bulanık mantık kontrolörün girişleri yük talebi ile RT ve FV sistemlerinin çıkış güçleri arasındaki fark ve batarya ünitesinin anlık gerilim değeridir. Bu girişlerden gelen bilgi ışığında bulanık mantık kontrolör YH sisteminden talep edilecek referans gücü belirlemektedir.



Şekil 5.3 Uygulanan bulanık mantık kontrolörün blok diyagramı

Yük talebi ile RT ve FV sistemlerinin çıkış güçleri arasındaki fark, RT ve FV tabanlı güç üretimini negatif bir yük olarak kabul ederek şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{fark} = P_{yük} - P_{RT} - P_{FV} \quad (5.1)$$

Burada  $P_{fark}$  yük talebi ile RT ve FV sistemlerinin çıkış güçleri arasındaki farkı temsil eden net talep gücünü,  $P_{yük}$  yük talebi gücünü,  $P_{RT}$  RT tabanlı üretilen gücü ve  $P_{FV}$  ise FV tabanlı üretilen güç değerini temsil etmektedir.  $P_{fark}$  değerinin negatif olması durumunda, bu negatif değer yüksek güç talebi durumlarında kullanılmak üzere şarj enerjisi olarak tamamen batarya ünitesine aktarıldığı da belirtilmelidir. Fazla güç üretimi ve fazla güç talebi durumlarında ise batarya ünitesinin gerilim değerine göre YH sistemi için anlık referans güç değeri Bölüm 3.3'te aktarıldığı şekilde belirlenmektedir. Bu bağlamda, Şekil 5.3'te gösterilen üyelik fonksiyonları dikkate alınarak oluşturulan bulanık mantık kontrolör ile ilgili gerekli kural yapısı Çizelge 5.3'te detaylıca verilmiştir. Burada batarya ünitesi DC baraya doğrudan bağlı olduğundan, önerilen yaklaşım

sayesinde DC bara gerilimi regülasyonunun da sağlanabildiği belirtilmelidir. Bahsi geçen bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi stratejisi, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen kontrol algoritmalarının kullanılmasını oldukça kolaylaştıran dSPACE MicroAutoBox kontrol ünitesine gömülü olarak adapte edilmiştir.

Çizelge 5. 3 Bulanık mantık kontrolörün kural tabanı

		Fazla Güç İhtiyacı						
		VL	L	LM	M	MH	H	VH
Batarya Gerilimi	L	L	LM	M	MH	H	VH	VH
	M	VL	L	LM	M	MH	H	VH
	H	VL	VL	L	LM	M	MH	H

\*VL: Çok düşük, L: Düşük, LM: Orta altı, M: Orta, MH: Orta üstü, H: Yüksek, VH: Çok yüksek.

## 5.2 Optimum Boyutlandırma İçermeyen Durum İçin Deneysel Sonuçlar

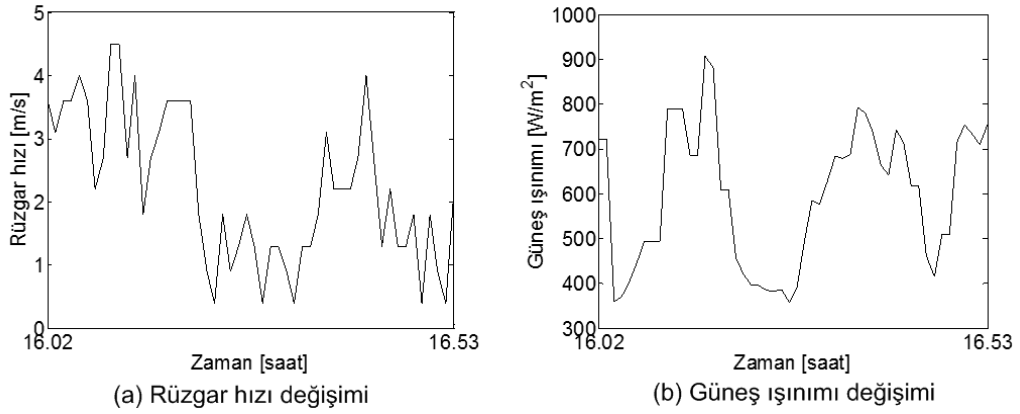
Bu başlangıç çalışmasında, gerekli bütün güç biçimlendirme üniteleri ile birlikte hibrit sisteme ait bir deneysel test platformu oluşturulmuştur. Daha önce de belirtildiği üzere, RT ile FV sistemleri bahsi geçen hibrit yapıda rüzgâr ve güneşten üretilebilecek enerjiyi değerlendiren ana kaynaklar konumundadırlar. YH sistemi farklı meteorolojik koşullar ve yük değişimleri altında yük talebinin karşılanmasının garanti edilmesi açısından temel yardımcı kaynak konumundadır. Batarya üniteleri ise olası fazla güç üretiminin depolanması ve YH sistemi için daha güvenli bir işletim koşulu yaratılması açısından, YH gücündeki anlık değişimlerin azaltılması amacıyla sistemde kullanılmaktadırlar.

Test prosedüründe temel amaç, değişken meteorolojik koşullar altında önerilen sistemin performansını nihai deneysel çalışmalar öncesinde gözlemlemek ve değerlendirmektir. Oluşturulan hibrit güç sistem prototipi toplam 1,1 kW'lık bir FV sistemi, 1 kW'lık bir RT, 1,2 kW'lık YH ve her bir durum analizi için farklı batarya gruplarından meydana gelmektedir. Bahsi geçen sistemlerin boyutları, her bir kaynak nominal gücü açısından yük talebinin azami değerini karşılayabilecek şekilde seçilmiştir. Test süresince ortaya çıkan güneş ışınımı ve rüzgâr hızı profilleri, teknik özellikleri Ref. [178]'de verilen ve Davis firması tarafından üretilmiş olan bir meteorolojik veri

istasyonu vasıtası ile anlık olarak kaydedilmiştir. Hibrit sistem performansını değerlendirmek için dikkate alınan iki farklı durum analizi aşağıda irdelenmiştir:

### **Durum Analizi - 1:**

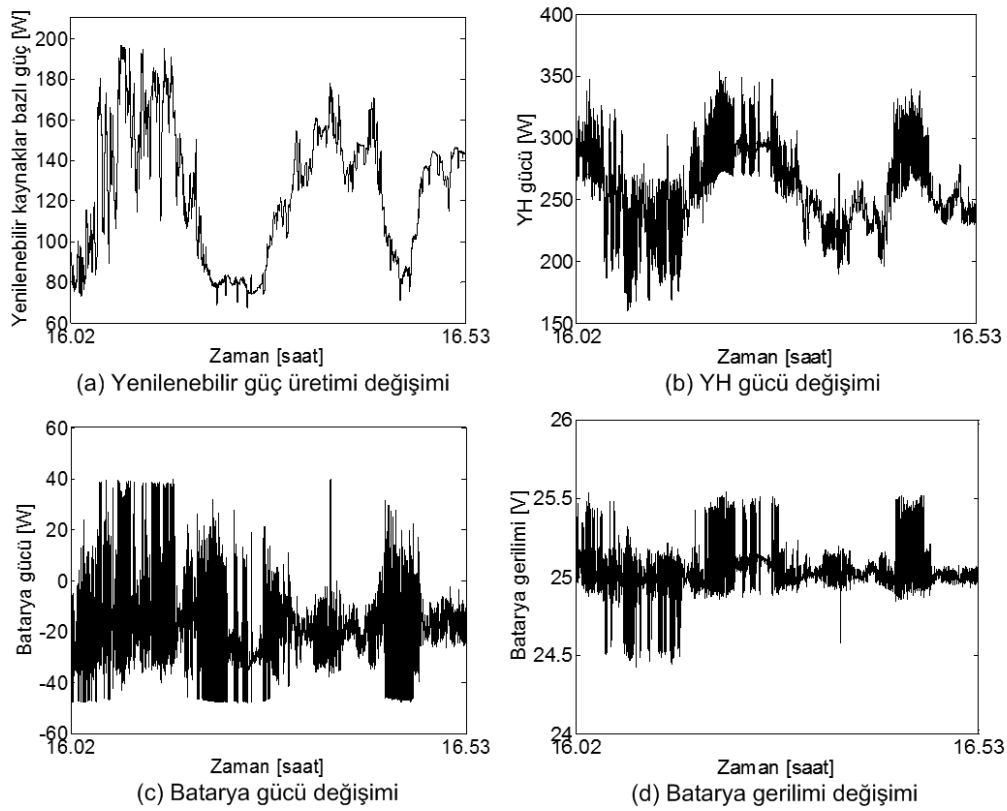
Bu durum analizinde yenilenebilir enerji tabanlı güç üretiminin değişken koşulları altında 400 W'lık sabit bir yük durumu dikkate alınmıştır. Bu sayede, bulanık mantık kontrolörün performansı üzerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının güç üretimi değişkenliğinin etkisi, yük dinamiklerinin değişkenliği olmadan daha iyi analiz edilebilecektir. Düşük bir güç talebini içeren bu analizde 2 adet 180 W'lık ANELES panel ve 2 adet seri bağlı 12 V-12 Ah'lık batarya kullanılmıştır. Bahsi geçen test 01.07.2011 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4 ve 5.5 bahsi geçen bu durum analizinde elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 5.4 Ön değerlendirme durum analizi-1 esnasında kaydedilen meteorolojik veriler Şekil 5.4(a-b)'de gösterilen rüzgâr hızı ve güneş ışınımı değişimlerine göre RT ve FV sistemleri Şekil 4.5(a)'da gösterilen değişken toplam çıkış gücünü sağlamaktadır. Toplam yenilenebilir bazlı güç üretimi, Şekil 5.5(a)'da görüldüğü gibi 48 W ile 197 W arasında değişmektedir. Bu değişken üretim de yük talebinin etkin bir şekilde karşılanması açısından diğer hibrit sistem bileşenleri tarafından bastırma gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanı sıra, yük talebine ve RT ile FV sistemlerinin toplam çıkış güçlerine göre önerilen bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen YH çıkış gücü ise Şekil 5.5(b)'de görülmektedir. YH sistemi, test periyodu süresince meydana gelen düşük seviyedeki güneş ışınımı ve rüzgâr hızı değişimlerine bağlı olarak, yenilenebilir bazlı toplam güç üretiminin yük talebini tamamen karşılayamadığı durumlarda değişken bir çıkış gücü sağlamaktadır. Ayrıca batarya sisteminin test



süresince güç ve gerilim değişimleri ise sırasıyla Şekil 5.5(c-d)'de görülmektedir. Şekil 5.5(d)'de görüldüğü gibi batarya gerilim regülasyonu önerilen kontrol yaklaşımı sayesinde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan açıkça görüldüğü üzere deneysel çalışma süresince hibrit güç sistemi bileşenleri sabit yük talebini beraberce karşılamaktadırlar. Bunun yanı sıra; yenilenebilir enerji kaynakları tarafından sağlanan toplam güç üretimi zamanla değişmesine rağmen uygulanan bulanık mantık kontrolör, bahsi geçen bu üretim değişimine bağlı olarak anlık meteorolojik koşullar tabanlı güç gereksinimini YH ve batarya sistemleri arasında paylaştırarak bastırmaktadır.

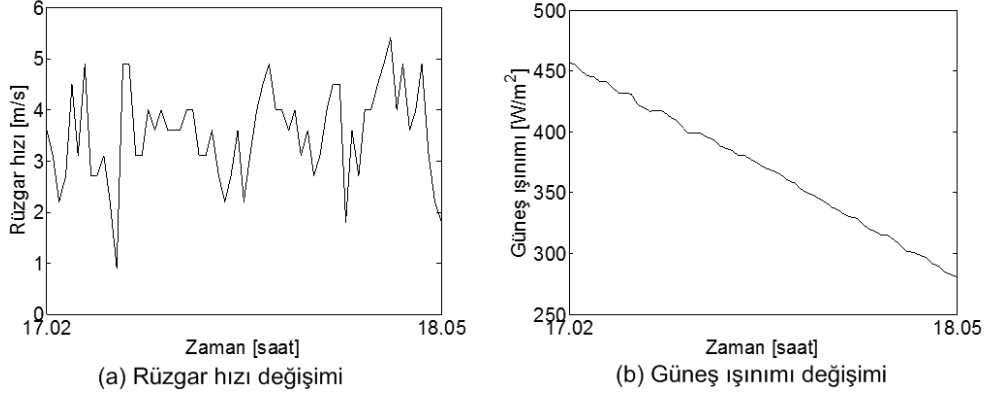


Şekil 5. 5 Ön değerlendirme durum analizi-1 için deneysel sonuçlar

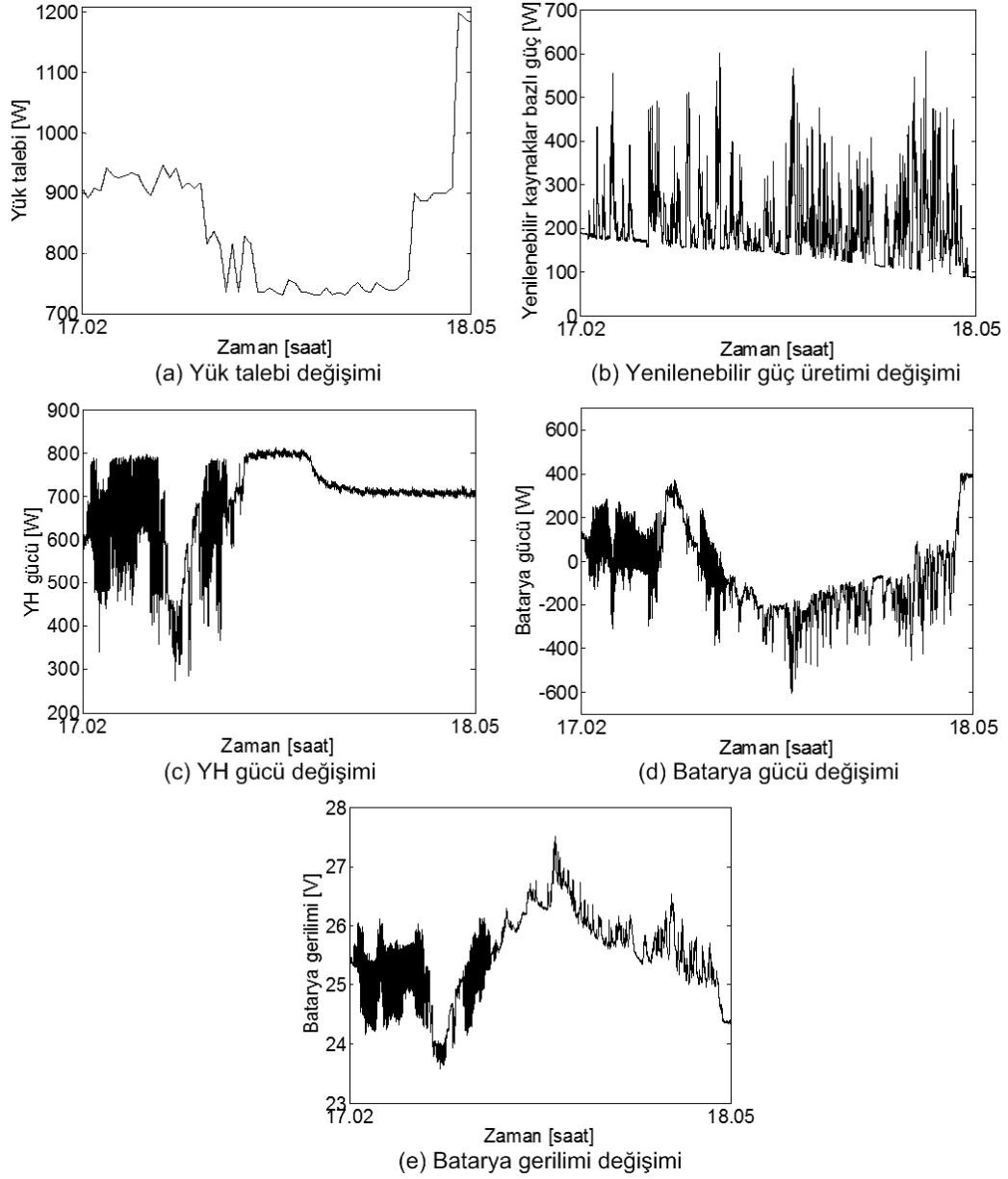
### **Durum Analizi - 2:**

Yukarıda verilen durum analizinde yük talebinin olası değişimleri dikkate alınmamıştır. Bu açıdan, Şekil 3.10'da daha önce verilen gerçek zamanlı olarak ölçülen yük talebi değişimlerini dikkate alan farklı bir durum analizi de gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen yük talebinin maksimum değeri olan 71 kW'lık anını da içeren bir kısmı mevcut elektronik yük bankasının gücü ile uyumlu olması açısından maksimum 1,2 kW'lık bir değere normalize edilmiştir. Bunun yanı sıra 2 adet ANEL FV panelin yanında bu test

için 6 adet Solen FV panel de devreye alınmıştır. Ayrıca bu durum analizinde 2 adet 12 V-80 Ah'lik batarya ünitesi kullanılmıştır. Bahsi geçen test 08.07.2011 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Durum analizi-2 için elde edilen sonuçlar Şekil 5.6 ve 5.7'de gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Ön değerlendirme durum analizi-2 esnasında kaydedilen meteorolojik veriler Bu test periyodu esnasındaki meteorolojik koşulların değişimi Şekil 5.6(a-b)'de verilmiştir. Bunun yanı sıra test esnasında uygulanan normalize edilmiş yük talebi değişimi Şekil 5.7(a)'da gösterilmektedir. Görüldüğü üzere test süresince yük talebi 725 W ile 1200 W arasında değişmektedir. Ayrıca Şekil 5.6(a-b)'de verilen meteorolojik koşullar, Şekil 5.7(b)'de gösterilen yenilenebilir enerji kaynakları bazlı toplam güç üretimini sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji bazlı güç üretimi bu test periyodunda 95 W ile 604 W arasında değişmektedir. Bu toplam güç üretimine ve yük değişimlerine bağlı olarak YH çıkış gücü ise Şekil 5.7(c)'de gösterildiği gibi değişmektedir. Bulanık mantık kontrolör tarafından belirlenen bu YH çıkış gücü değişimi ve yenilenebilir güç üretimi ile yük değişimleri Şekil 5.7(d)'de gösterilen batarya gücü ve buna bağlı olarak Şekil 5.7(e)'de gösterilen batarya gerilimi değişimlerini oluşturmaktadır. Tekrar açıkça görüldüğü gibi hibrit sistem elemanlarının ortak koordineli aksiyonları ve uygulanan enerji yönetim stratejisi, yük talebi ve güç üretimi değişimlerini dikkate alarak başarılı bir batarya gerilimi regülasyonu gerçekleştirirken, aynı zamanda etkin bir şekilde yük talebinin karşılanmasını da sağlamaktadır.



Şekil 5. 7 Ön değerlendirme durum analizi-2 için deneysel sonuçlar

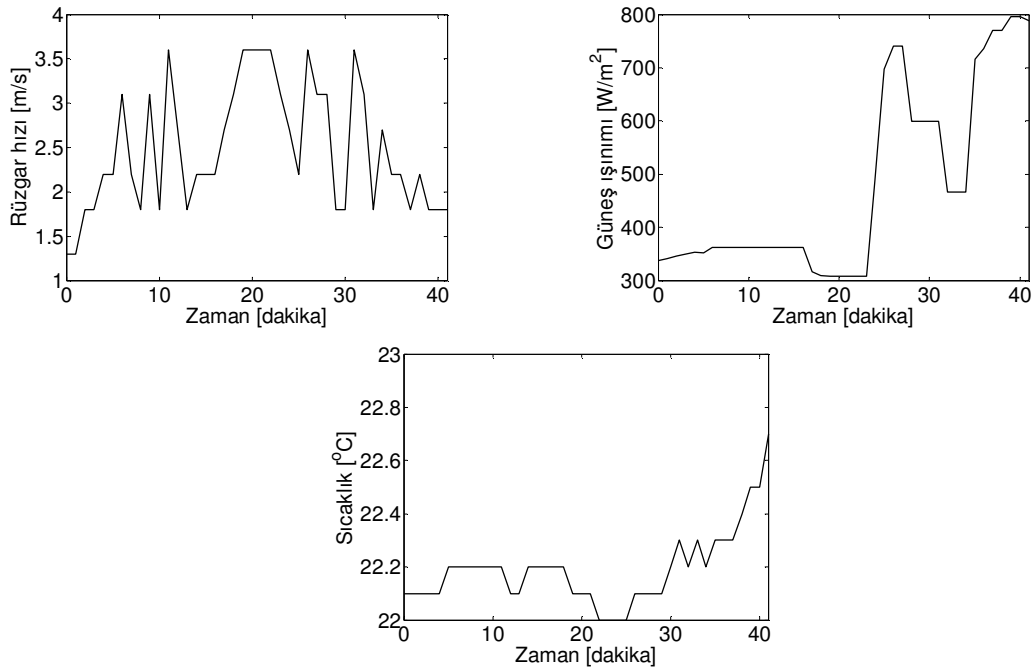
### 5.3 Optimum Boyutlandırma İçeren Durum İçin Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, daha önce optimum boyutlandırma sonuçları verilen hibrit sisteme ile ait normalize edilmiş değerler ile gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar ve ilgili sonuçlara yer verilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, gaz reformasyonu tabanlı YH sistemi içeren hibrit konfigürasyonda elde edilen optimum boyutlardan yararlanılmıştır. Daha önce verilen ölçülmüş yük talebinin 71 kW'lık maksimum kısmı, elimizde mevcut olan DC yük bankasının 1,2 kW'lık maksimum gücüne göre normalize edilmiş ve diğer sistem bileşenlerinin boyutları da aynı oranda azaltılmıştır. Buna göre

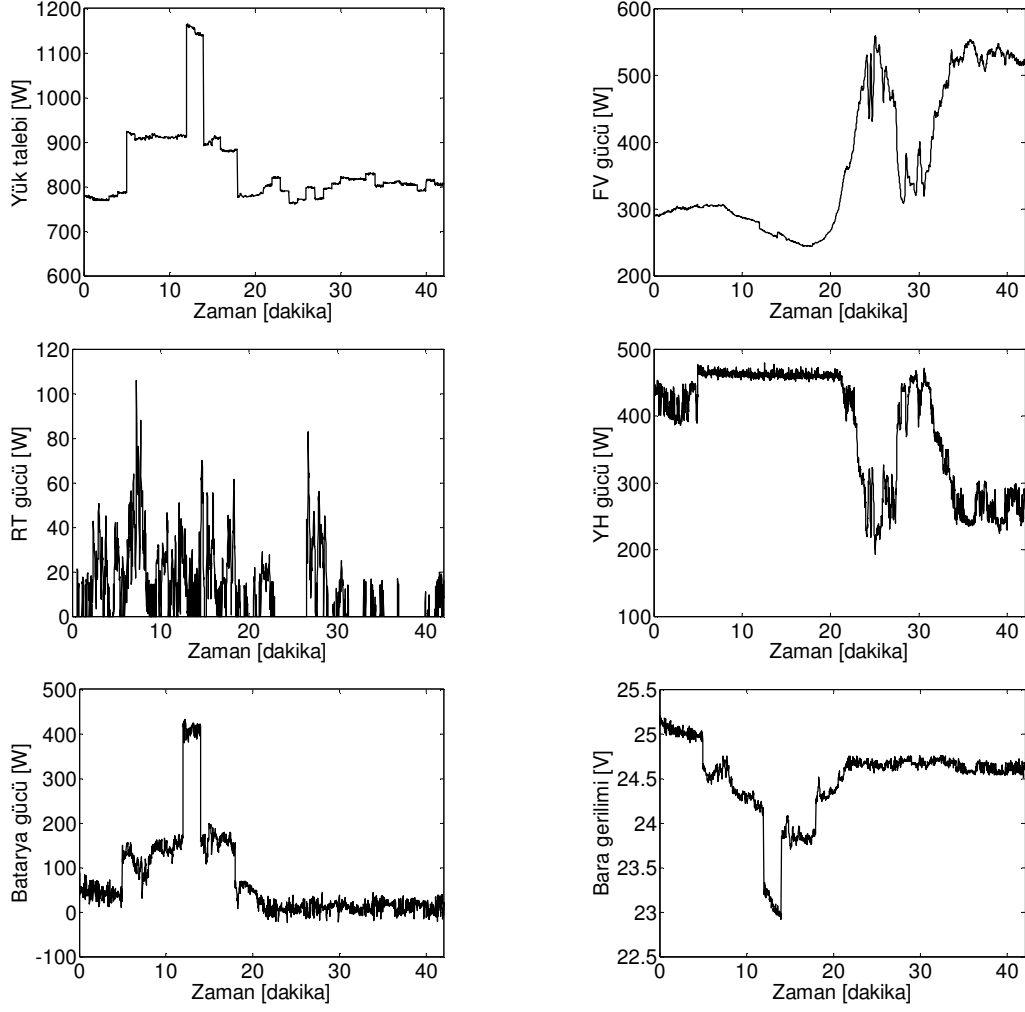
gerçekleştirilen deneysel çalışmada 1 kW'lık FV sistemi, 1 kW'lık RT ünitesi, 1,2 kW'lık YH ünitesinin çıkış gücünün kontrolör üzerinden sınırlandırılması ile elde edilen 680 W'lık YH sistemi ve 24 Ah'lik batarya grubu kullanılmıştır. Hidrojen tüplerinin boyutları sistemin kesintisizce uzun bir periyotta çalışmasına izin vermediğinden, sadece yük talebinin maksimum olduğu "en kötü durum senaryosu" günün farklı koşulları altında aşağıda detaylandırılan farklı durum analizleri ile incelenmiş ve optimum boyutlandırılmış sistemin etkinliği değerlendirilmiştir:

### **Durum Analizi - 1:**

Bu durum analizi 23.05.2012 tarihinde 14:35 ile 15:16 saatleri arasında sistemin öğleden sonraki performansını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8'de bu periyottaki meteorolojik veri istasyonu vasıtası ile ölçülen meteorolojik veriler görülmektedir.



Şekil 5. 8 Durum Analizi - 1 süresince kaydedilen meteorolojik veriler

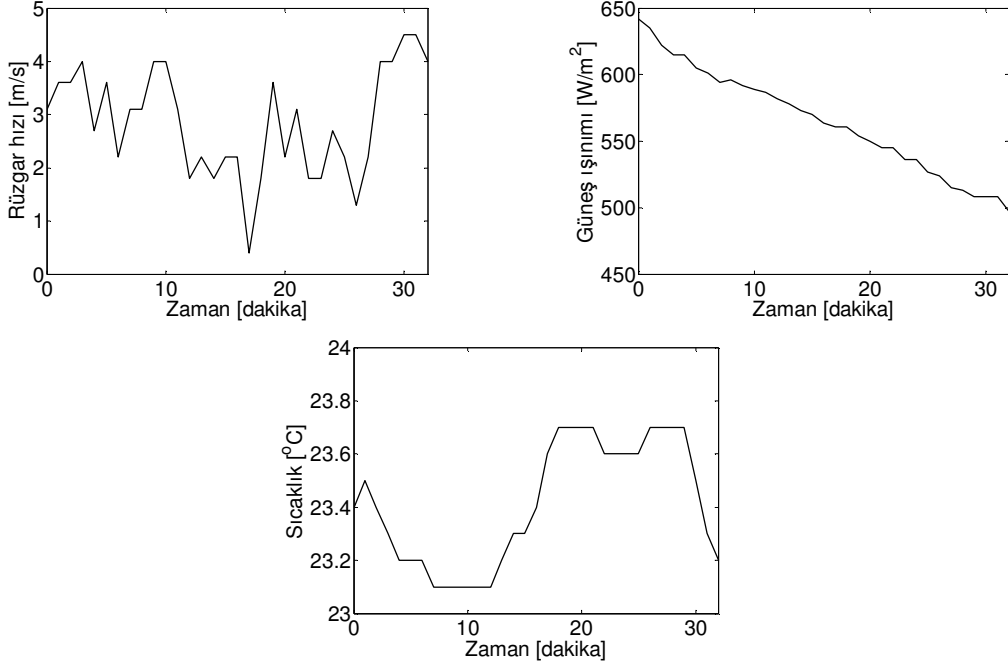


Şekil 5. 9 Durum Analizi - 1 için hibrit sistem işletim sonuçları

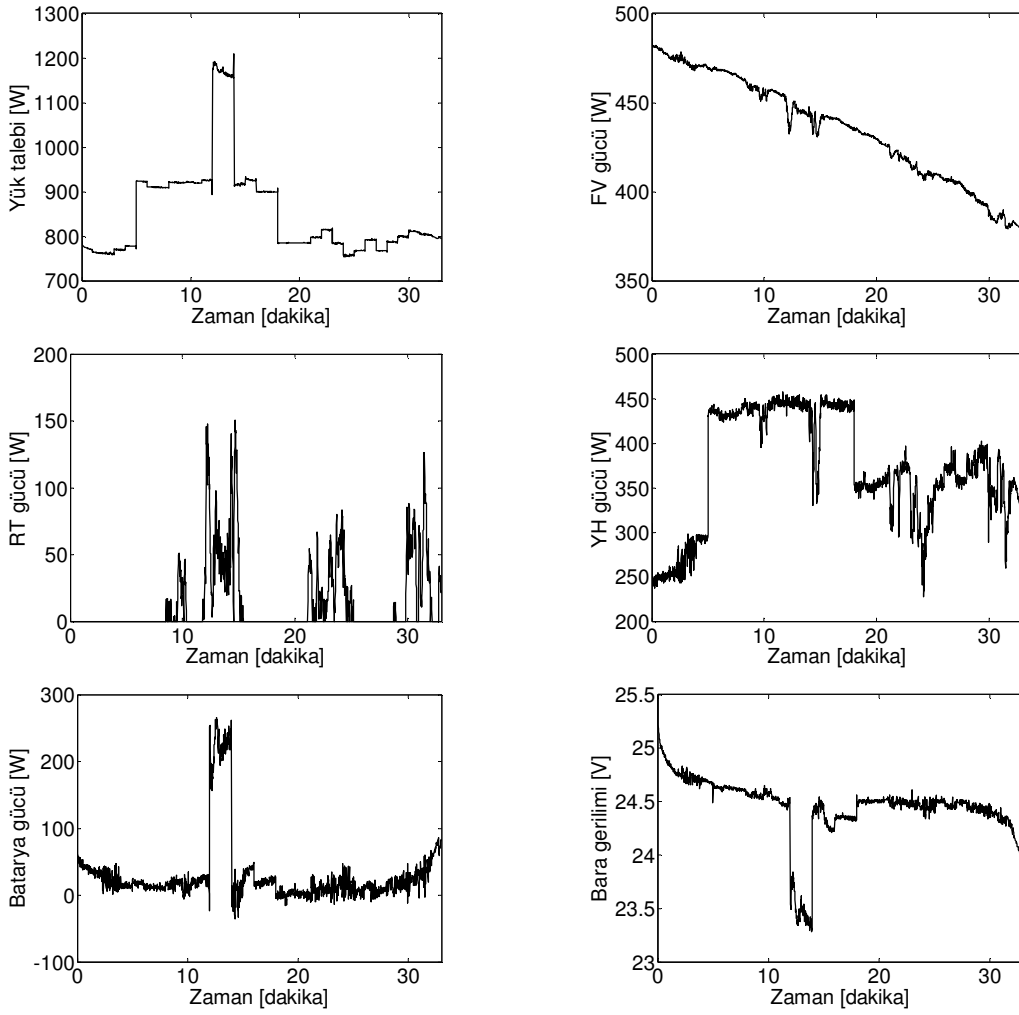
Şekil 5.9'da ise bahsi geçen periyotta elde edilen hibrit sistem işletim sonuçları görülmektedir. Bahsi geçen parçalı bulutlu gün içerisinde özellikle bu durum analizinde sık sık gölgelenme durumları ile karşılaşmış ve bu durum FV gücüne de Şekil 5.9'da görüldüğü üzere doğrudan yansımıştır. Bunun dışında, görüldüğü üzere oldukça değişken rüzgâr ve güneş tabanlı güç üretimine rağmen uygulanan bulanık mantık tabanlı kontrolör, hibrit sistem güç akışını etkin bir şekilde sağlamaktadır.

### **Durum Analizi - 2:**

Bu durum analizi 23.05.2012 tarihinde 16:24 ile 16:58 saatleri arasında sistemin akşam saatlerine yakın bir zamandaki performansını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10'da bu periyot süresince ölçülen meteorolojik veriler görülmektedir. Şekil 5.11'de ise bahsi geçen periyotta elde edilen hibrit sistem işletim sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5. 10 Durum Analizi - 2 süresince kaydedilen meteorolojik veriler

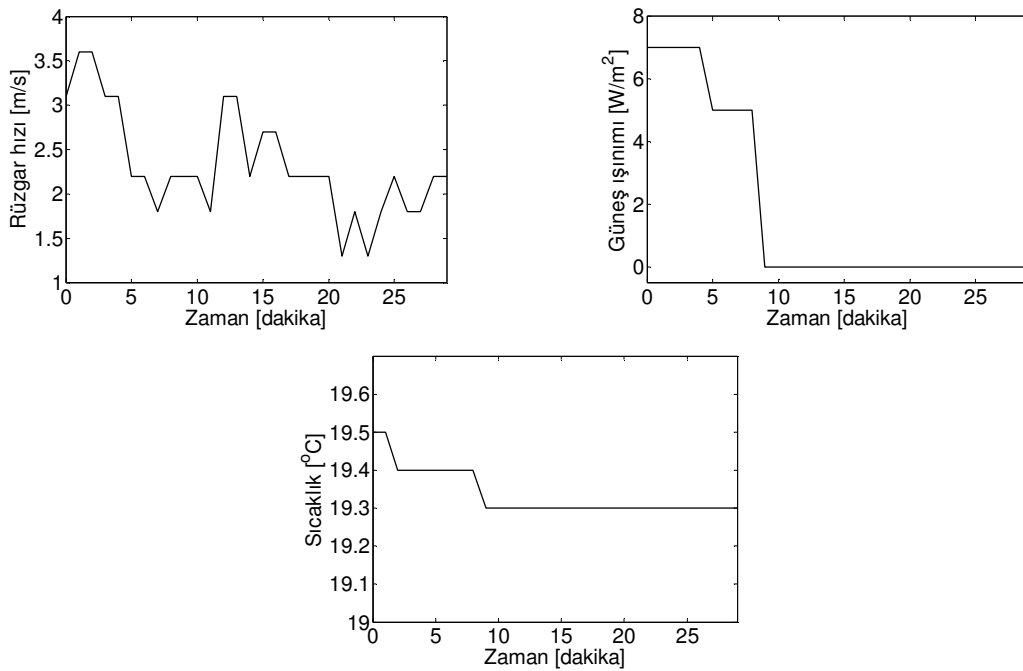


Şekil 5. 11 Durum Analizi - 2 için hibrit sistem işletim sonuçları

Bahsi geçen periyotta FV gücü artık ışınımın azalmaya başlaması ile birlikte azalan bir rejim sergilemiştir. RT sistemi ise ara ara devreye girerek yük talebinin karşılanmasına destek sağlamıştır. Bunun dışında bu durum analizinde RT tabanlı güç üretimi ve yük talebi dinamiklerinin değişkenliklerine rağmen hibrit sistem güç akışı yine etkin bir şekilde sağlanmaktadır.

### **Durum Analizi - 3:**

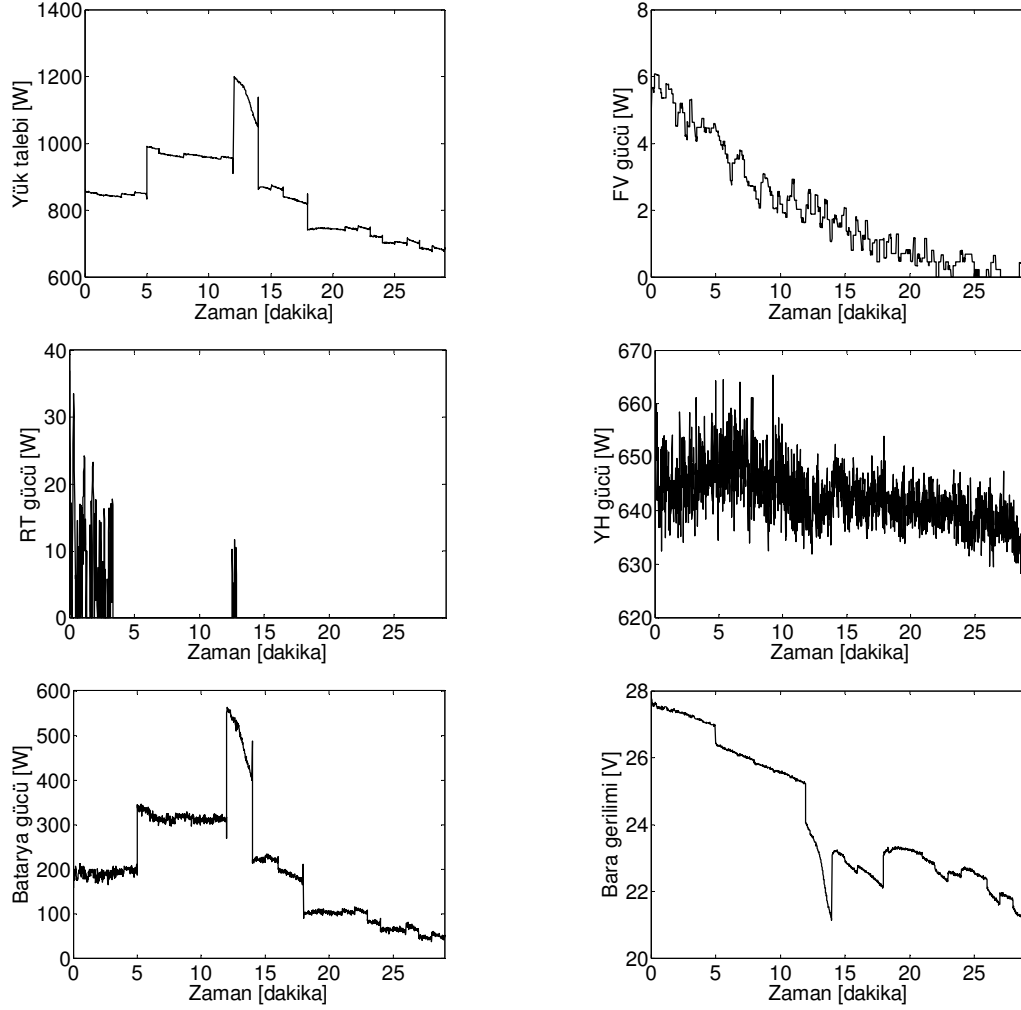
Bu durum analizi 23.05.2012 tarihinde 20:09 ile 20:38 saatleri arasında sistemin gece performansını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Bu durum analizi hem yük talebindeki en kötü koşulun dikkate alınması, hem de gece koşulu nedeniyle FV tabanlı güç üretimi desteğinin mevcut olmamasından ötürü, genel değerlendirme açısından arıza koşulları dışında normal işletimde olabilecek en kötü durumdur. Şekil 5.12’de bu periyot süresince ölçülen meteorolojik veriler görülmektedir.



Şekil 5. 12 Durum Analizi - 3 süresince kaydedilen meteorolojik veriler

Şekil 5.13’te ise bahsi geçen periyotta elde edilen hibrit sistem işletim sonuçları görülmektedir. Bahsi geçen periyotta FV gücü mevcut değildir, RT sistemi ise ihmal edilebilecek bir güç üretimi sergilemiştir. RT sisteminin düşük rüzgâr hızı seviyesinden kaynaklanan bu durumu zaten teorik olarak en kötü olan koşulları daha da kötüleştirmektedir. Özellikle yükün pik anındaki talebin karşılanmasına, yenilenebilir

enerji kaynaklarının hiçbir katkısı olamamıştır. Şekil 5.13'te görüldüğü gibi bu en kötü koşulda bile hibrit sistem dinamikleri etkin bir şekilde kontrol edilebilmiştir.

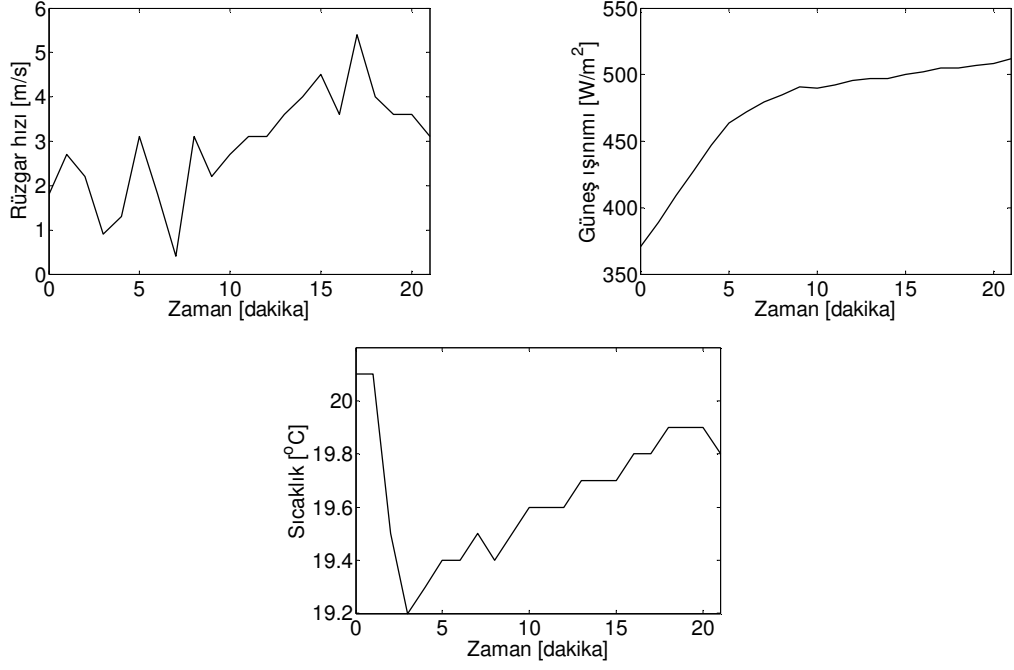


Şekil 5. 13 Durum Analizi - 3 için hibrit sistem işletim sonuçları

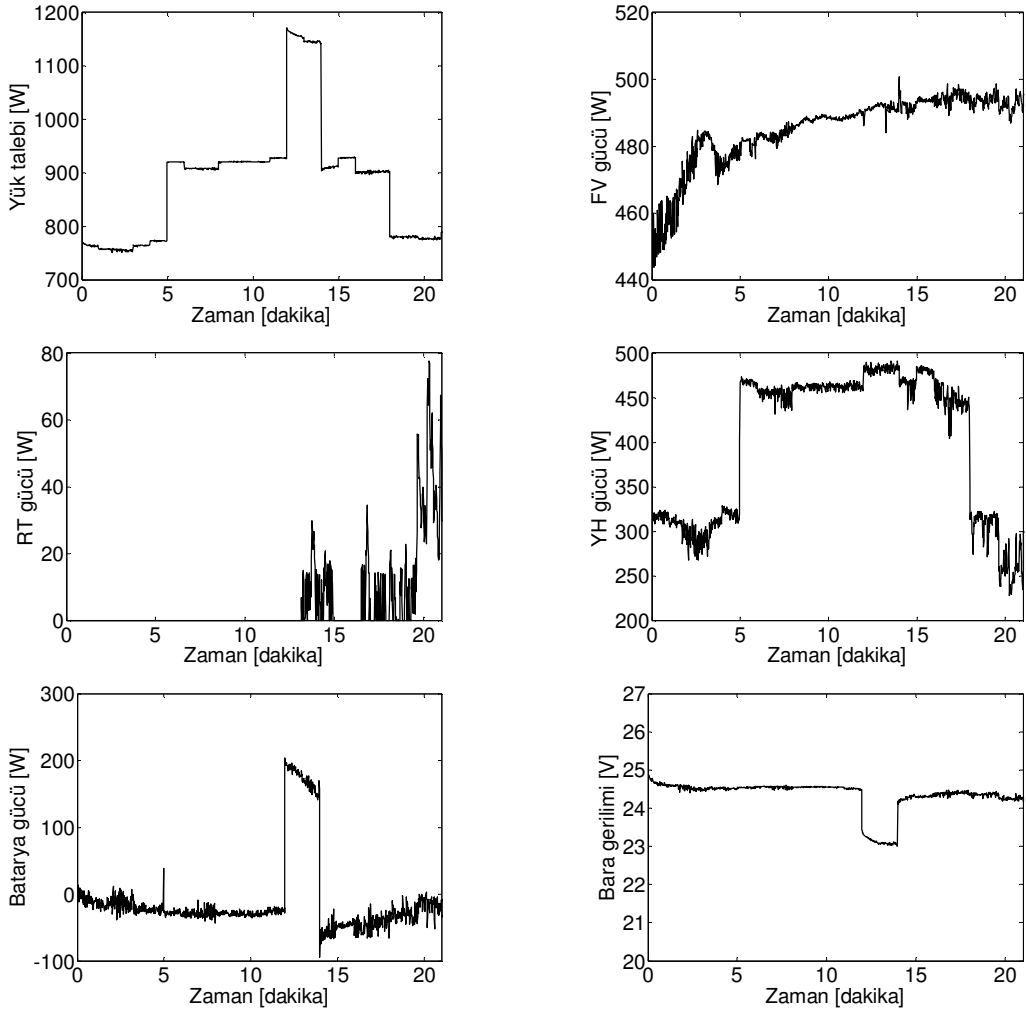
#### **Durum Analizi - 4:**

Bu durum analizi 24.05.2012 tarihinde 09:35 ile 09:56 saatleri arasında sistemin sabah performansını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.14'te genel olarak güneşli, ara ara parçalı bulutlu geçen günde, bu periyot süresince ölçülen meteorolojik veriler görülmektedir.





Şekil 5. 14 Durum Analizi - 4 süresince kaydedilen meteorolojik veriler

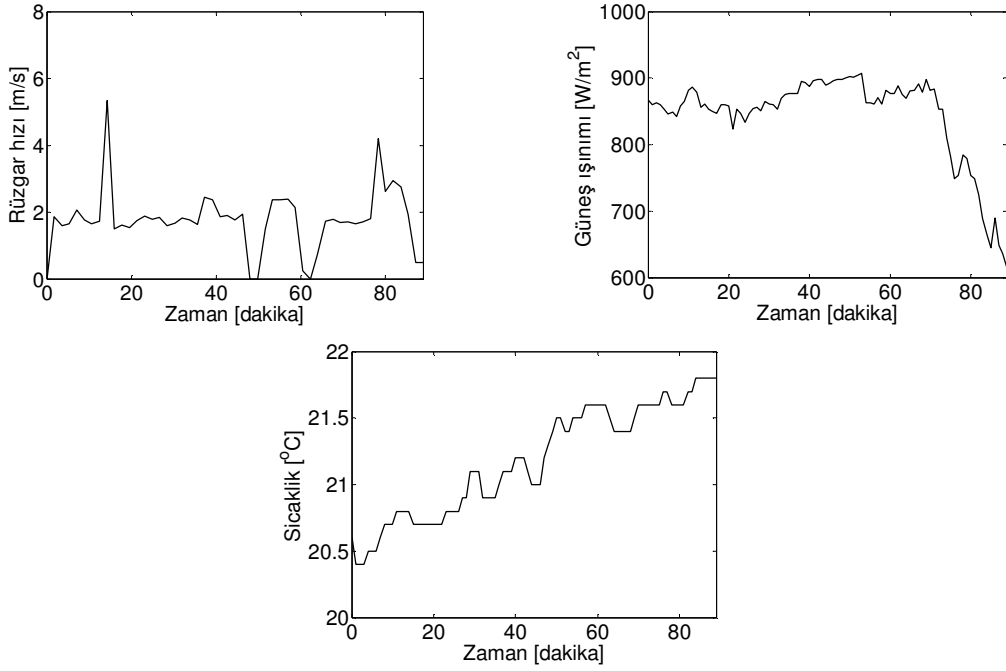


Şekil 5. 15 Durum Analizi - 4 için hibrit sistem işletim sonuçları

Şekil 5.15'te ise bahsi geçen periyotta elde edilen hibrit sistem işletim sonuçları görülmektedir. Bahsi geçen periyotta FV sistemi nominal gücünün yarısına yakın civarlarda sabite yakın, ancak güneş ışınımının günün saatlerinin öğlene doğru ilerlemesi ile birlikte az da olsa artan bir güç üretimi sağlamaktadır. RT sistemi ise ara ara devreye girerek güç üretimi gerçekleştirmektedir. Bu nispeten iyi koşulda, hibrit sistem yük paylaşımı gece koşuluna kıyasla kolayca gerçekleştirilmiştir.

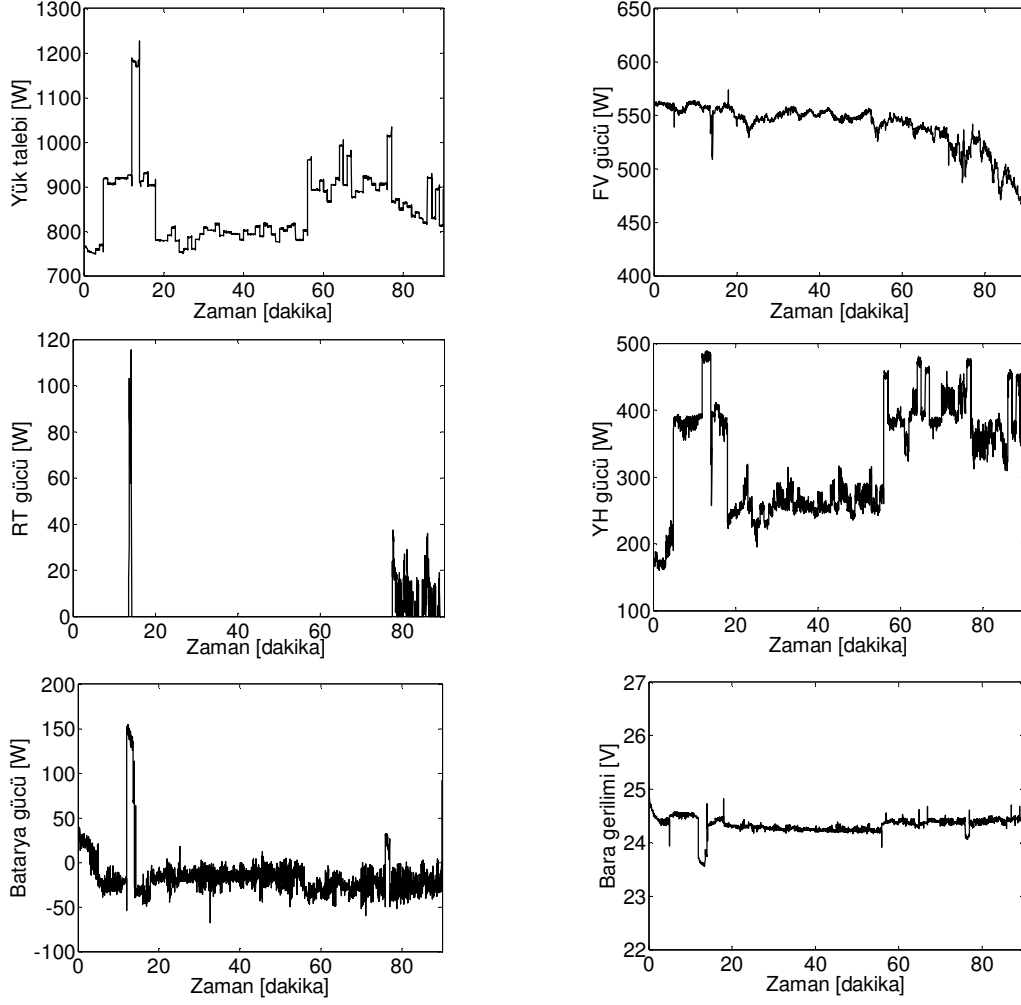
### **Durum Analizi - 5:**

Bu durum analizi 24.05.2012 tarihinde 11:42 ile 13:12 saatleri arasında sistemin öğlen performansını incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.16'da bu periyot süresince ölçülen meteorolojik veriler görülmektedir.



Şekil 5. 16 Durum Analizi - 5 süresince kaydedilen meteorolojik veriler

Şekil 5.17'de ise bahsi geçen periyotta elde edilen hibrit sistem işletim sonuçları gösterilmektedir. Bahsi geçen periyotta sistem, diğer analizlere kıyasla yenilenebilir kaynaklar tabanlı güç üretimi açısından en iyi konumdadır. Bu durum, en kötü yük koşulunun dikkate alındığı koşulda üretim açısından en iyi koşuldur. Bu durum altında YH sisteminin ilgili zamanlarda devreye girmesi ile birlikte gerçekleştirilen etkin yük paylaşımı Şekil 5.17'de açıkça görülmektedir.



Şekil 5. 17 Durum Analizi - 5 için hibrit sistem işletim sonuçları

#### 5.4 Bölüm Değerlendirmesi

Bölüm kapsamında, önerilen hibrit sistem için gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Öncelikle hibrit sistem test platformu bileşenleri ve uygulanan bulanık mantık tabanlı enerji yönetimi stratejisi aktarılmıştır. Sonrasında ise sisteminin deneysel ön değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Burada deneysel çalışmalarda kullanılan bileşen boyutları herhangi bir ön boyutlandırma çalışması yapılmadan belirlenmiştir. Buradaki temel amaç enerji yönetimi yaklaşımının etkinliğini ve önerilen hibrit alternatif enerji sisteminin fizibilitesini nihai deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden önce değerlendirmektir. Burada gerçekleştirilen iki durum analizi sonuçları incelendiğinde görüldüğü üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının 95 W ile 604 W arasında değişen üretim durumu bile başarıyla bastırılmış ve batarya gerilimi ile

buna bağlı olarak DC bara gerilimi regölasyonu, yük talebi 725 W ile 1200 W arasında değişirken başarı ile sağlanmıştır.

Akabinde ise hibrit sistem bileşenlerinin Bölüm 4'te elde edilen optimum boyutlarına göre test sistemi kurulumu revize edilmiştir. Buradaki amaç, önerilen boyutlandırma yaklaşımının etkinliğini değerlendirmektir. Oluşturulan hibrit sistem; günün farklı zamanlarında gerçekteştirilen durum analizlerinde görüldüğü gibi hem yükün, hem de yenilenebilir enerji kaynakları tabanlı güç üretiminin en kötü koşulunda bile yük talebini etkin bir şekilde karşılayabilmektedir. Deneysel çalışmalarda karşımıza çıkan bulutlu hava koşulları da özellikle kış aylarında öğlen saatlerinde karşılaşılabilecek değişken koşullara benzer durumlar oluşturmuş ve çalışmamızın farklı koşullar altında testine daha da katkı sağlamıştır. Dikkate alınmayan daha hafif yük durumlarında sistemin bu etkinliğini daha da arttırarak sağlayacağı öngörüsü ise kolayca yapılabilir. Elde edilen sonuçlar gerçekteştirilen boyutlandırmanın işlevselliğini açıkça ortaya koymaktadır.

### HİBRİT SİSTEMLER İLE İLGİLİ GELECEK UYGULAMALARI

Farklı alternatif enerji sistemlerinin çeşitli konfigürasyonlarda bir araya getirilmesi ile oluşturulan hibrit alternatif enerji sistemleri, evsel uygulamalardan telekomünikasyon merkezlerinin enerji temini, taşıt sistemleri, vb. birçok farklı alanda kullanım açısından gelecekte daha da ön plana çıkabilecek potansiyele sahiptir. Bahsi geçen alternatif enerji sistemlerinin farklı konseptler altında farklı işletim biçimlerinde ele alınması da günümüzde popüler bir araştırma alanıdır. Bu açıdan, bu bölümde hibrit alternatif enerji sistemlerinin olası gelecek uygulamaları ve geliştirilen farklı konseptler kısaca irdelenmiş ve hibrit alternatif enerji sistemleri için yeni bir konsept olan sanal güç santrali yaklaşımı kapsamında gerçekleştirilen örnek bir uygulamaya yer verilmiştir.

#### 6.1 Hibrit Sistemler İçin Farklı Uygulama Alanları ve Konseptlerinin Değerlendirilmesi

Hibrit alternatif enerji sistemleri, günümüzde alternatif enerji konusu üzerine artan ilgi ve buna bağlı olarak devlet teşviklerinin de dikkat çekici hale gelmesi ile birlikte günlük hayattaki farklı alanlarda artan bir oranda karşımıza çıkmaya başlamıştır. Özellikle küçük çaplı yenilenebilir enerji uygulamaları ülkemiz ve dünyanın birçok ülkesinde son kullanıcılar için maliyet etkin çözümler haline gelmeye başlamıştır. Örneğin, evsel uygulamalar alanında Almanya’da küçük çaplı çatıya monte edilmiş FV uygulamaları şebeke ile paralel bir şekilde işletim ile birlikte son kullanıcılara maliyet açısından büyük faydalar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra enerji depolama ünitesi olarak batarya sistemi ile birlikte kullanılan küçük güçlü RT uygulamaları son yıllarda oldukça dikkat çekici bir oranda artmıştır. Farklı bir uygulama alanı olarak ise taşıt sistemlerinde özellikle

YH/Batarya ya da YH/UK gibi hibrit sistem konfigürasyonları büyük taşıt üreticileri için de dikkat çekici bir konuma gelmiş ve farklı prototip taşıt tipleri geliştirilmiştir. Bahsi geçen taşıt uygulamaları hibrit konfigürasyonlarının binek araçlar dışında tren, tramvay, deniz taşıtı vb. farklı taşıma sistemlerinde uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi de birçok araştırma projesinin kapsamı içerisinde ele alınmaktadır. Bu konuda daha birçok büyük ve bahsi geçen örneklerdeki gibi küçük çaplı uygulamalar farklı alanlar bünyesinde yer almaktadır. Ancak alternatif enerji sistemlerinin daha da yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biri, daha önce de bahsedildiği üzere maliyet hususudur. Bahsi geçen hibrit sistemlerin daha etkin ve yaygın bir şekilde kullanımı bu hususa daha da ileri seviyede tatmin edici çözümler getirilmesi ile doğru orantılıdır.

Günümüzde hibrit alternatif enerji sistemlerinin ele alınması için farklı konseptler de ortaya konulmuş durumdadır. Daha önce de belirtilen ve tez kapsamında irdelenen rüzgâr ve güneş enerjisi sistemlerini içeren hibrit bir yapı iki farklı boyutta ele alınabilmektedir. Bunlardan ilki, önceki bölümlerde ele alındığı gibi belirli bir alanın (bir bina, bir bina grubu, bir ada, vb.) yük talebini karşılayan nispeten küçük boyutlu bir hibrit sistem yapısının değerlendirilmesidir. Bu tür bir yapıda hibrit sistem bileşenleri fiziksel olarak aynı alan içerisinde bulunmakta ve uygun güç biçimlendirme üniteleri vasıtası ile hibrit bir kombinasyonda birleştirilmektedirler. Benzer bir hibrit kombinasyon, büyük boyutlu olarak son zamanlarda üzerinde daha yoğun çalışmalar gerçekleştirilen “sanal güç santrali (virtual power plant)” yaklaşımı konseptinde de ele alınabilmektedir.

Sanal güç santralleri; yenilenebilir enerji sistemleri, konvansiyonel ya da konvansiyonel olmayan diğer tip generatörler ve enerji depolama sistemlerinin tek bir güç santrali olarak elektrik pazarında boy gösterebilen bir kombinasyonudur [179]. Sanal güç santrali konseptinde hibrit sistem bileşenleri, bir ülkenin çok farklı yerlerinde konumlanabilecek kadar fiziksel olarak birbirinden ayrı konumdadırlar. Sanal güç santraline katkı sağlayan her bir dağıtık üretim tesisi sahibi ile kontrat yapan ve bu sayede sanal bir hibrit sistem oluşturan bir “toplayıcı (aggregator)” mevcuttur. Bu sayede toplayıcı, elektrik pazarına güvenilir ve sabit bir güç arzı ile katılma şansı yakalamaktadır. Böylece rüzgâr çiftliği, vb. kontrol edilemeyen güç santrali sahipleri,

tek başlarına elektrik pazarına girme durumuna göre, güvenilirliği düşük güç santralının ürettiği güç için daha yüksek bir ekonomik bedel elde etme şansı yakalamaktadır.

Bahsi geçen hibrit alternatif enerji sistemleri için oluşturulan sanal güç santrali benzeri konseptler ve akıllı şebeke kavramı gibi nispeten yeni yaklaşımlar ile birlikte, hibrit alternatif enerji sistemlerinin en küçük çaplı uygulamadan en büyük boyutlu uygulamaya kadar bahsi geçen sistemlerin şebeke ile de etkileşimli olarak maliyet etkin kullanımına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

## **6.2 Hibrit Sistemler İçin Örnek Bir Gelecek Uygulaması Konsepti**

Bu bölümde örnek bir gelecek uygulaması konsepti olarak, yukarıda bahsi geçen sanal güç santrali yapısındaki hibrit bir sistemin ekonomik işletimi, elektrik pazarına yüksek değerli güvenilir güç üretimi ile katılmak açısından değerlendirilmektedir. Hibrit alternatif enerji sistemleri için farklı gelecek konseptlerini ele alan bu bölüm kapsamında optimum işletim hususunun da bu yeni konsept içerisinde ele alınması ile, hibrit sistemin optimum boyutlandırmasını konu alan bu tez çalışması içerisinde birbirini tamamlayan konular olan optimum yatırım ve optimum işletim hususları beraberce değerlendirilerek alternatif enerji sistemlerine tamamen bir bütünlük ile yaklaşılacaktır. Benzer literatür çalışmalarından ayrı olarak rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri gerekli meteorolojik tahmin işlemleri ile birlikte bahsi geçen sanal güç santrali konseptinde ele alınmıştır. Ayrıca, sadece bir sonraki gündeki elektrik pazarı aksiyomlarını dikkate alan çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada bir haftalık bir elektrik pazarı aksiyom planlaması yapılmıştır. Bu hususlara ek olarak; yeni ölçülen meteorolojik verilere göre meteorolojik durum tahmin stratejisinin kendini sürekli yenilemesine dayanan adaptif bir yük paylaşımı stratejisi uygulanmıştır.

Önerilen sanal güç santrali yapısı rüzgâr enerjisi dönüşümü için bir rüzgâr çiftliği, güneş enerjisi dönüşümü için güneş tarlası, hidrojen enerjisi dönüşümü için YH parkı ve konvansiyonel bir termik güç santralinden oluşmaktadır. İlgili tahmin ve yük paylaşımı stratejileri ve elde edilen sonuçlar şu şekilde sunulmaktadır:

### 6.2.1 Rüzgâr ve Güneş Enerjisi Sistemleri İçin Güç Üretim Tahmini Yaklaşımları

Rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri için güç üretim tahmini; elektrik güç sistemlerinin maliyet açısından etkin, güvenilir ve enerji verimli olarak işletilmesi açısından oldukça önemli bir husustur. Gerçekleştirilen çalışmada rüzgâr enerjisi sistemi güç tahmini için “Ampirik Mod Ayrıştırması (Empirical Mode Decomposition)”, yapay sinir ağları ve bir lineer model birleşiminden oluşan bir tahmin yönteminden yararlanılmıştır. Bahsi geçen yöntemin bir bölümü, güneş enerjisi sistemi güç tahmini kapsamında ilgili güneş ışınımı ve sıcaklık verilerinin tahmininde de kullanılmıştır.

### 6.2.2 Yük Paylaşımı Yaklaşımı

Yük talebinin, önerilen hibrit sanal güç santrali yapısında kontrol edilebilir kaynakların zamanlanması vasıtası ile paylaşımı, temel olarak saatlik dilimlerde işletim maliyetinin optimizasyonuna dayanmaktadır. Bahsi geçen optimize edilecek ekonomik kriter; yakıt maliyeti, başlatma maliyeti, vb. maliyetlerin dikkate alındığı, enerji kaynaklarının bireysel karakteristikleri ile alakalı olan farklı bileşenler içermektedir. Ekonomik değerlendirme kriterinin temel bileşenlerinden biri olarak, bir enerji kaynağının işletim esnasındaki yakıt maliyeti temel olarak şu şekilde belirtilebilmektedir:

$$FC_{i,t} = a_i + b_i p_{i,t} + c_i p_{i,t}^2 \quad (6.1)$$

Burada  $FC_{i,t}$   $i$ . enerji kaynağının  $t$  zamanındaki yakıt maliyeti,  $p_{i,t}$   $i$ . enerji kaynağının  $t$  anındaki çıkış gücü değeri, ve  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$   $i$ . enerji kaynağının ilgili maliyet katsayılarıdır. Bahsi geçen yakıt maliyeti denkleminin YH parkı için geçerli olmadığı, YH parkı için birim enerji üretimi açısından gerekli doğalgaz maliyeti ile üretilen enerji miktarının çarpımı vasıtası ile yakıt maliyetinin hesaplandığı da belirtilmelidir. Bunun yanı sıra her bir enerji kaynağının başlatma aksiyomları ile bağlantılı olarak diğer bir maliyet bileşeni mevcuttur ve bahsi geçen bu maliyet bileşeni şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$SC_{i,t} = \sigma_i + \delta_i \left( 1 - \exp\left(\frac{-T_{i,t}^{off}}{\tau_i}\right) \right) \quad (6.2)$$

Eşitlik (6.2)'de,  $SC_{i,t}$   $i$ . enerji kaynağının  $t$  zamanındaki başlangıç maliyeti,  $\sigma_i$  ve  $\delta_i$  sıcak ve soğuk başlatma maliyetleri,  $\tau_i$  soğuma zamanı sabiti ve  $T_{i,t}^{off}$  ise  $i$ . enerji kaynağının



kapalı konumda olduğu zaman periyodudur. Bu verilen maliyet bileşenlerine göre bir sistemin toplam işletim maliyeti şu şekilde elde edilmektedir:

$$TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (FC_{i,t} + SC_{i,t}) \quad (6.3)$$

Bahsi geçen optimum işletim stratejisi için ayrıca bazı kısıtlar da mevcuttur [180]. Öncelikle sistemdeki genel yük talebi ve arzı için güç dengesi,

$$LPD_t = \sum_i^N p_{i,t} \quad (6.4)$$

şeklinde garanti edilmektedir. Burada  $LPD_t$   $t$  anındaki toplam yük talebidir. Bunun yanı sıra her bir bileşen, minimum ve maksimum güç değerleri ile aşağıdaki gibi sınırlandırılmaktadır:

$$P_{i,\min} \leq p_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (6.5)$$

Burada, daha önce Bölüm 4'te Eşitlik (4.10)'da da belirtildiği üzere  $P_{i,\min}$  ve  $P_{i,\max}$   $i$ . enerji kaynağının izin verilebilir minimum ve maksimum çıkış gücü değerleridir. Bunun yanı sıra her bir güç kaynağının yukarı ve aşağı rampa oranları da şu şekilde sınırlandırılmıştır:

$$p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq \Delta P_{i,up} \quad (6.6)$$

ve

$$p_{i,t-1} - p_{i,t} \leq \Delta P_{i,down} \quad (6.7)$$

Eşitlik (6.6,6.7)'de  $\Delta P_{i,up}$  ve  $\Delta P_{i,down}$ ,  $i$ . enerji kaynağının maksimum izin verilebilir yukarı ve aşağı rampa oranlarıdır.

Son olarak enerji kaynaklarının minimum kapalı açık/kapalı konumda olma süresi ile ilgili bir kısıt da şu şekilde hesaba katılmaktadır [181]:

$$[t_{ON,i}(t-1) - T_{ON,i}] \times [v_i(t-1) - v_i(t)] \geq 0 \quad (6.8)$$

ve

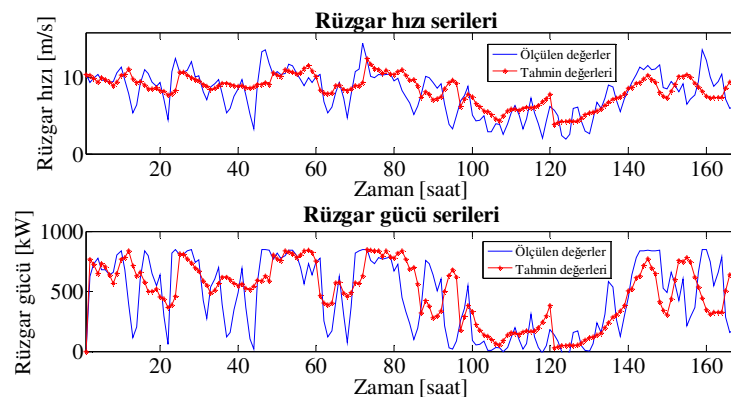
$$[t_{OFF,i}(t-1) - T_{OFF,i}] \times [v_i(t) - v_i(t-1)] \geq 0 \quad (6.9)$$

Burada  $t_{ON,i}$  ve  $t_{OFF,i}$  sırası ile  $i$ . enerji kaynağının aralıksız olarak çalışmakta ya da durmakta olduğu zaman periyodunu,  $T_{ON,i}$  ve  $T_{OFF,i}$ ,  $i$ . enerji kaynağının asgari aralıksız çalışma ve durma periyotlarını,  $v_i(t)$  ise  $t$  anında  $i$ . enerji kaynağının 0 veya 1 olarak devrede olup olmadığını temsil eden sabiti belirtmektedir.

### 6.2.3 Test ve Değerlendirme

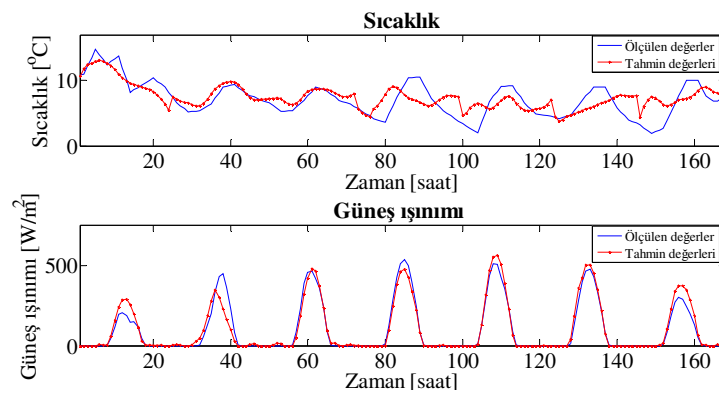
Önerilen sanal güç santrali yapısının yenilenebilir enerji tabanlı değişken güç üretimi ve elektrik pazarında satılan değişken güç değerleri altındaki işletimini değerlendirmek için sistem performansı denenmiş ve elde edilen ilgili sonuçlar aşağıda yorumlanmıştır.

Daha önceden de belirtildiği üzere gerçekleştirilen çalışmada rüzgâr enerjisi sistemi güç tahmini için ampirik mod ayrıştırması, yapay sinir ağları ve bir lineer model birleşiminden oluşan gelişmiş bir tahmin yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan çalışmada Aliğa-İzmir bölgesine ait ölçülmüş rüzgâr hızı verisi kullanılmıştır. Burada Mart 2011 ile Haziran 2011 tarihleri arasındaki veri öğrenme ve test alt kümeleri olmak üzere iki alt kümeye ayrılmıştır. Haziran 4-11 günleri arasındaki veri test verisi olarak kullanılırken, geriye kalan kısım öğrenme işlemi için dikkate alınmıştır. Ayrıca tahmin yaklaşımındaki lineer model içerisinde son 3 yıla ait rüzgâr hızı verilerinden de yararlanılmıştır. Burada yeni gelen rüzgâr hızı verilerine göre sistem kendi tahminlerini yenileyecek ve bu sayede gerçeğe daha yakın tahminler elde etme imkânı sağlanacaktır.



Şekil 6. 1 Bir haftalık periyot için rüzgâr hızı ve gücünün ölçülen ve tahmin değerleri Her bir günde kontrollü güç üretimi için gerekli olan güç tahminleri, Şekil 6.1'de gösterildiği üzere 850 kW'lık ticari bir RT'ye ait güç eğrisi vasıtasıyla gerçekleştirilen rüzgâr tahminleri kullanılarak hesaplanmıştır. Burada bahsi geçen RT'nin nominal gücü,

devreye girme ve devreden çıkma rüzgâr hızları gibi güç eğrisi karakteristik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 6.1’de görüldüğü gibi ölçülen ve tahmin edilen güç değerleri arasında özellikle rüzgâr hızının aşırı şekilde değiştiği kısa periyotlarda önemli farklar oluşmuştur. Bunun temel nedeni, rüzgâr hızı tahminindeki ufak bir hatanın rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü arasındaki kübik orantıdan ötürü, rüzgâr gücü tahmininde önemli hatalar meydana getirebilmesidir. Bunun yanı sıra, uzun tahmin aralığı için seçilen oldukça değişken ve düzensiz rüzgâr koşulları da bu duruma neden olan bir başka önemli etkidir. Ayrıca bu çalışmada 10 adet 850 kW’lık RT’den oluşan bir rüzgâr çiftliğinin dikkate alındığı da not olarak belirtilmelidir.



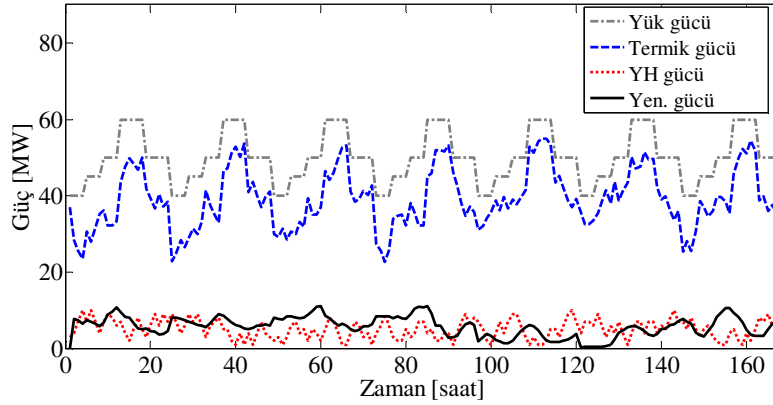
Şekil 6. 2 Bir haftalık periyot için sıcaklık ve güneş ışınlamının ölçülen ve tahmin değerleri Benzetim işleminde İzmir bölgesinde ölçülmüş saatlik sıcaklık ve güneş ışınlamı verileri, FV güç santralının güç değerlerinin tahmininde kullanılmıştır. Bu husus çerçevesinde, gerçek veriler ile karşılaştırmalı olarak ilgili ışınlam ve sıcaklık tahminleri Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Şekil 6.2’de görüldüğü üzere tahmin değerleri gerçek veriler ile kabul edilebilir bir yakınlıktadır. Burada bahsi geçen tahmin verilerinin, Bölüm 3’te detayları verilen FV benzetim modeline güç üretimi değerini elde etmek için giriş olarak sağlandığı belirtilmelidir. Ayrıca, gerçekleştirilen çalışmada 8 MW’lık bir güneş enerjisi sisteminin dikkate alındığı da hesaba katılmalıdır.

Bu veriler ışığında; yük paylaşımı algoritması YH parkı ve termik güç santrali arasındaki yük paylaşımını, her birinin bireysel işletim kısıtları ve işletim maliyetlerini dikkate alarak sağlamaktadır. Belirtilen enerji kaynakları için bahsi geçen kısıtlar ve ekonomik değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Enerji kaynakları için kısıtlar ve ekonomik değerler

Parametre	Değer
Termik güç santrali güç aralığı	10-55 [MW]
Termik güç santrali yukarı&aşağı rampa oranı	15 [MW]
Termik güç santrali maliyet katsayısı (a)	665 [\$]
Termik güç santrali maliyet katsayısı (b)	27,27 [\$/kWh]
Termik güç santrali maliyet katsayısı (c)	0,0022 [\$/kWh <sup>2</sup> ]
YH parkı güç aralığı	1-11,6 [MW]
YH parkı yukarı&aşağı rampa oranı	3 [MW]
YH parkı için doğal gaz maliyeti	0,04 [\$/kWh]

Bir hafta sonraki elektrik pazarı güç anlaşması profiline göre yük paylaşımı algoritmasının sonuçları Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Her bir kaynak güvenilir işletim sınırları içerisinde işletilmekte ve değerlendirme periyodu boyunca güç satışı profili başarı ile karşılanmaktadır. Sanal güç santrali bileşenleri arasında en yüksek nominal güç termik enerji sistemine ait olduğundan ötürü, bu sistem güç profilini takip eden ana kaynak konumundadır. YH parkı ise sanal güç santralinin pazar anlaşması profilini tamamlamak için kontrol edilemeyen yenilenebilir enerji üretimini ve kendi güç rampa değerini dikkate alarak işletilmektedir.



Şekil 6. 3 Bir hafta sonraki elektrik pazarı güç anlaşması profiline göre yük paylaşımı algoritmasının sonuçları

Bir hafta için toplamda 8389 MWh'lik bir pazar profilinin sağlanmasında güneş, rüzgâr, hidrojen ve termik enerji sistemlerinin enerji katkıları sırası ile 144,4, 821,8, 854,8 ve 6568 MWh şeklindedir. Değerlendirme periyodu boyunca dikkate alınan sanal güç santrali yapısında yenilenebilir enerjinin katkı oranı yaklaşık %12'dir. Fakat bu sanal güç santrali bileşenlerinin zaten hali hazırda kurulu güç santralleri olduğu ve sanal güç santrali yapısındaki yenilenebilir enerji katkı oranınının, bir ülkenin değişik bölgelerindeki

farklı yenilenebilir enerji santrali sahipleriyle yapılacak yeni anlaşmalar ile arttırılabileceği hususlarını hatırlatmakta fayda vardır. Değerlendirilen 168 saatlik periyotta sanal güç santrali bileşenlerini işletmenin toplam maliyeti 3,29 milyon \$'dır. Burada yenilenebilir enerji birimlerinin işletme maliyetinin sıfır olarak kabul edildiği belirtilmelidir. Karşılaştırma amacıyla, tek başına yeterli nominal güce sahip bir termik güç santrali ile verilen güç değişiminin karşılanması durumu 6,86 milyon \$'lık bir toplam işletim maliyeti ortaya çıkarmaktadır. Bu karşılaştırma ile de görülmektedir ki; bu tür stratejilerde yenilenebilir enerji birimlerinin entegrasyonu çevresel etkilerin azaltılması avantajı ile birlikte ekonomikliği de arttırmaktadır.

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Global anlamdaki enerji talebindeki artış ve fosil yakıt kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan çevresel sorunlar, geleneksel fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanılması üzerine yapılan çalışmalara ivme kazandırmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile yedek güç üniteleri veya konvansiyonel enerji kaynaklarının bir kombinasyonu olarak tanımlanan hibrit sistemler, enerji temini ve çevre korumasının sürdürülebilirliği açısından dünyada yaşanan sıkıntılara uygulanabilir bir çözüm olarak görülmektedir.

Bahsi geçen hibrit sistemler, kurulacağı alanın topoğrafyasına, potansiyel olarak kullanılacak enerji kaynaklarının çeşitliliğine ve enerji taleplerinin karakteristiğine göre kurulum alanındaki gereksinimleri karşılayacak şekilde oluşturulabilmekte ve optimize edilebilmektedir. Yenilenebilir enerji tabanlı bu hibrit sistemlerin optimum bir şekilde boyutlandırılması, güç kaynağının ekonomik ve teknik performansını ciddi bir oranda arttırırken, çevre dostu bu kaynakların daha geniş bir oranda kullanımını sağlayabilecektir. Tekno-ekonomik açıdan optimum bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi elde etmek için farklı boyutlandırma yöntemleri uygulanabilmektedir. Hangi boyutlandırma ya da optimizasyon yöntemi kullanılırsa kullanılsın bütün yaklaşımlar, sistemdeki enerji arzı güvenilirliği ve sistem maliyeti açısından optimum bir kombinasyon elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın kullanımının önündeki engeller kısmen aşılabilecektir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışmada böyle bir hibrit alternatif enerji sisteminin boyutlandırması için bir optimum boyutlandırma yaklaşımı önerilmektedir.

Önerilen optimum boyutlandırma yaklaşımının uygulanmasından önce bütün hibrit sistem bileşenleri için dinamik benzetim modelleri oluşturulmuştur. Bahsi geçen modellerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan genel hibrit sistem modeli ile hibrit sistem performansı öncelikle benzetim ortamında değerlendirilmiştir. Literatürde genellikle saatlik bazda ele alınan meteorolojik veriler ve yük talebi değişimi, gerçekleştirilen bu başlangıç benzetim çalışmasında bir yıla yakın bir periyot içerisinde dakikalık olarak değerlendirilmiştir. Bahsi geçen dakikalık veri kullanımının önemini göstermek amacı ile farklı değerlendirme periyotları ele alınmıştır. Bu periyotlar arasından örneğin 31.10.2009 tarihinde 12:00 ve 12:59 saatleri arasındaki bir saatlik zaman diliminde ölçülen dakikalık bazda rüzgâr hızı verisi, daha önce de belirtildiği üzere 4,91 m/s ile 11,36 m/s arasında değişmektedir. Buna bağlı olarak güç eğrisi vasıtası ile elde edilen RT çıkış gücü 3190 W ile 43590 W arasında değişim göstermektedir. Saatlik veri kullanılması durumunda ise, değerlendirilen periyotta rüzgâr hızı verisinin 7,7 m/s olarak hesaplanan ortalama değeri kullanılacaktır. Bu ortalama değer bu 60 dakikalık periyot için sabit olarak 13500 W'lık bir RT çıkış gücü oluşturacaktır. Açıkça görüldüğü gibi, daha önce de belirtildiği şekilde saatlik veri, gerçek zamanlı anlık veri ile kıyaslandığında oldukça farklı bir çıkış sağlamakta ve bu durum bulanık mantık kontrolörün çıkış değerlerini önemli oranda etkilemektedir. Dakikalık veri kullanıldığında RT gücünün 3190 W ile 43590 W arasındaki değişiminden kaynaklı olarak YH gücünde oldukça büyük değişimler meydana gelecek olmasına rağmen, saatlik veri kullanılması durumunda YH sistemi çıkış gücü değişimi neredeyse sabit olarak dikkate alınacaktır. Bu sayede, dakikalık veri kullanımı ile birlikte özellikle YH ünitesi içeren hibrit enerji sistemlerine uygulanan bir enerji yönetimi stratejisinin daha etkin olarak değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Böylece, gerçekleştirilen bu çalışma ile literatüre de katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Genel hibrit sistem benzetim modelinin elde edilmesinin ardından gerçekleştirilen hibrit sistem boyutlandırma çalışmaları kapsamında YH-elektrolizör kombinasyonlu yedek güç ünitesi, gaz reformasyonu tabanlı hidrojen beslemeli YH yedek güç ünitesi ve sadece batarya bankası tabanlı yedek güç ünitesi opsiyonları ele alınmıştır. Hibrit sistemlerin boyutlandırması üzerine yapılan mevcut literatür çalışmalarından farklı olarak, hibrit güç sistemi bileşenleri için zamana bağlı olarak güç azalması hususu

boyutlandırma yaklaşımında dikkate alınmıştır. Böylece, hibrit sistem boyutlandırması üzerine olan literatüre, yeni bir perspektif ile katkıda bulunulması hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra, optimizasyon işleminde her bir hibrit sistem bileşeninin dinamik modelleri kullanılmıştır. Performans azalması hususunun dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar için hibrit sistem boyutlandırması irdelenmiş ve performans azalımı hesaba katıldığında dikkate değer bir fark olduğu gösterilmiştir. Her bir hibrit sistem bileşeninin performans azalmasını dikkate alarak, rejeneratif hidrojen sistemi tabanlı bir yedek güç ünitesi içeren hibrit bir sistemin tasarımında 100 kW'lık RT sistemi, 204,2 kW'lık FV sistemi, 20 kW'lık YH ünitesi, 30 kW'lık elektrolizör sistemi ve 2 kAh'lık bir batarya ünitesi, yük talebinin ve meteorolojik koşulların değişimini karşılamada yeterli olmaktadır. Aynı hibrit yapıda, performans azalımı hususunun dikkate alınmadığı durumda ise 100 kW'lık RT sistemi, 182,1 kW'lık FV sistemi, 15 kW'lık YH ünitesi, 25 kW'lık elektrolizör sistemi ve 1,8 kAh'lık bir batarya ünitesi en düşük UCEE değerini sağlamaktadır. Elektrolizör kullanımı olmadan, sadece YH sistemi tabanlı yedek güç ünitesi kullanımında ise 50 kW'lık bir RT, 60,6 kW'lık FV, 40 kW'lık YH ve 1 kAh'lık batarya sistemleri maliyet ve performans açısından en uygun değeri vermektedir. Son olarak da, hidrojen tabanlı yedek güç ünitesi olmadan bir hibrit sistem tasarımı ele alındığında ise, 20,4 kAh'lık bir batarya grubu ile birlikte 50 kW'lık bir RT ve 117,7 kW'lık bir FV sistemine gereksinim duyulmaktadır. Ele alınan hibrit sistem konfigürasyonları arasında en az maliyetli tasarım, gaz reformasyonlu FV/RT/YH/Batarya kombinasyonudur. Fakat şebekeden bağımsız sayılabilecek bu kombinasyonda gaz temini gereksinimi olduğundan, bu konfigürasyon bir mahsur oluşturabilir. Kısacası en iyi konfigürasyonun seçimi, optimizasyon stratejisi vasıtası ile farklı opsiyonları inceledikten sonra yatırımcının kararına bağlıdır.

Optimum boyutlandırma çalışmalarını takiben, hibrit sistem performansını deneysel olarak da değerlendirmek açısından gerekli güç biçimlendirme üniteleri ile birlikte bir test platformu oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra her türlü yük talebi durumlarında enerji akışının düzenlenmesi ve yenilenebilir bazlı güç üretiminin değişkenliğinin bastırılması için bulanık mantık tabanlı akıllı bir enerji yönetimi stratejisi uygulanmıştır. Bulanık mantık kontrolü yaklaşımının özellikle dSPACE benzeri kontrol ünitelerine adapte edilmeye uygun yapısı, genel bir matematiksel sistem modeline ihtiyaç



duymaması ve sistem işletiminde meydana gelebilecek yeni koşullara kolayca adapte olabilmesi gibi avantajları, bu yaklaşım ile benzer hibrit alternatif enerji sistemlerinde basit bir yapıyla etkin sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Oluşturulan hibrit sistem, günün farklı zamanlarında gerçekleştirilen durum analizlerinde görüldüğü gibi hem yükün, hem de yenilenebilir enerji kaynakları tabanlı güç üretiminin en kötü koşulunda bile yük talebini etkin bir şekilde karşılayabilmektedir. Elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen boyutlandırmanın da işlevselliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bunun yanı sıra hibrit sistemler için olası gelecek uygulamaları kapsamında; daha önce de belirtildiği üzere literatürde ilk kez yenilenebilir enerji kaynaklarının yer aldığı bu tür bir hibrit yapı, yeni bir kavram olan sanal güç santrali konsepti içerisinde optimum işletim açısından da değerlendirilmiştir. Rüzgâr, güneş, hidrojen ve termik enerji sistemlerinden oluşan bu hibrit sanal güç santrali sisteminin ekonomik işletimi dikkate alınmıştır. Önceki literatür çalışmalarından farklı olarak, rüzgâr enerji sisteminin yanı sıra güneş ve yüksek boyutlu hidrojen enerjisi sistemleri de sanal güç santrali konseptinde, meteorolojik veri için ilgili tahmin algoritmaları ile birlikte adaptif yapıdaki bir yük paylaşımı stratejisi de uygulanarak ele alınmıştır. Ayrıca, sadece bir sonraki günün pazar aksiyomlarını dikkate alan benzer literatür çalışmalarının ötesinde bu çalışmada, bir haftalık bir periyot için pazar aksiyomlarının planlaması değerlendirilmiştir. Tahmin ve yük paylaşımı stratejilerinden elde edilen sonuçlar irdelendiğinde; rüzgâr hızı, güneş ışınımı ve sıcaklık tahmin algoritmalarının yeterli sonuçlar sağladığı görülmektedir. Bunun yanı sıra; önerilen yük paylaşım stratejisi, önceden belirlenen güç satış profili için efektif bir performans göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen optimum boyutlandırma ve enerji yönetimi yaklaşımlarının daha farklı hibrit alternatif enerji sistemi topolojilerine kolayca adapte edilebilir bir yapıya sahip olduğu belirtilebilir. Bu bağlamda, özellikle performans azalımı hususunun bundan sonra aynı alandaki gelecek literatür çalışmalarında dikkate alınabileceği öngörülmektedir. Önerilen AGO algoritması kullanılarak, uygun yazılım ortamlarında ilgili arayüz tasarımı ile birlikte HOMER benzeri, ancak ilk kez Türkçe kullanım sağlayan bir hibrit sistem boyutlandırma paket programı oluşturulması hususu da gelecek hedefi olarak önerilmektedir.

Gelecek alışmaları kapsamında örnek bir uygulama olarak ele alınan sanal güç santrali konseptindeki optimum işletim çalışması ise, özellikle serbest elektrik piyasasının gelecekteki halinin şekillenmesine yardımcı olacak bir çok çalışmaya altyapı oluşturabilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren büyük çaplı uygulamaların bu bağlamda değerlendirilmesi ile birlikte, detaylı gelecek çalışmaları çalışmaları gerçekleştirilebilir. Mevcut alışma; hidro, biyoktle güç santralleri vb. farklı enerji dönüşüm birimleri ve pompalanmış su, sıkıştırılmış hava depolaması vb. büyük boyutlu enerji depolama sistemleri dikkate alınarak geliştirilebilir. Çalışmada dikkate alınan enerji birimleri ayrıca her bir enerji dönüşüm teknolojisi için birden fazla ayrıık santral olacak şekilde (rneğin tek bir rüzgâr santrali yerine farklı bölgelerde farklı meteorolojik koşullarda üç adet rüzgâr santrali hesaba katılabilir) gruplanabilir. Toplayıcı ve bireysel güç santrali sahipleri arasındaki i antlaşmalar da bir sonraki aşama olarak hesaba katılabilir. Bu hususlar, sanal güç santralleri konseptinde gelecekte hedeflenen çalışmalar olarak belirtilebilir. Gerek benzetim ve optimizasyon çalışmalarının, gerekse de deneysel çalışmaların geleceğin en önemli uygulamalarından biri olarak değerlendirilen akıllı şebekelerle bağdaştırılmasıyla da oldukça detaylı gelecek çalışmaları gerçekleştirilebilecektir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Goedecke, M., Therdthianwong, S. ve Gheewala, S.H., (2007). "Life cycle cost analysis of alternative vehicles and fuels in Thailand", *Energy Policy*, 35:3236–3246.
- [2] Straatman, P.J.T. ve Van Sark W.G.J.H.M., (2008). "A new hybrid ocean thermal energy conversion–Offshore solar pond (OTEC–OSP) design: A cost optimization approach", *Solar Energy*, 82:520–527.
- [3] Rehman, S., El-Amin, I.M., Ahmad, F., Shaahid, S.M., Al-Shehri, A.M., Bakhawain, J.M. ve Shash, A., (2007). "Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:635–653.
- [4] Ball, M., Wietschel, M. ve Rentz, O., (2007). "Integration of a hydrogen economy into the German energy system: an optimising modelling approach", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:1355 – 1368.
- [5] Shaahid, S.M. ve Elhadidy, M.A., (2007). "Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1794–1810.
- [6] Yilmaz, P., Hocaoglu, M.H. ve Konukman, A.E.S., (2008). "A pre-feasibility case study on integrated resource planning including renewables", *Energy Policy*, 36:1223–1232.
- [7] Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L. ve Yang, H., (2010). "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems", *Applied Energy*, 87:380–389.
- [8] Kornelakis, A., (2010). "Multiobjective Particle Swarm Optimization for the optimal design of photovoltaic grid-connected systems", *Solar Energy*, 84:2022-2033.
- [9] Zhou, W., Yang, H. ve Fang, Z., (2008). "Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar–wind power generation system", *Renewable Energy*, 33:1413–1423.

- [10] Hepbasli, A., (2008). "A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:593–661.
- [11] Nayar, C.V., Islam, S.M., Dehbonei, H., Tan, K. ve Sharma H., (2007). *Power Electronics for Renewable Energy Sources*, in Muhammad H Rashid(eds), *Power Electronics Handbook*, 2nd edn, Academic Press - imprint of Elsevier Inc., United Kingdom., 673-716.
- [12] Yang, H., Lu, L. ve Zhou, W., (2007). "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system", *Solar Energy*, 81:76–84.
- [13] Chen, F., Duic, N., Alves, L.M. ve Carvalho, M.G., (2007). "Renewislands—Renewable energy solutions for islands", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1888–1902.
- [14] Alawi, A.A., Alawi, S.M.A. ve Islam, S.M., (2007). "Predictive control of an integrated PV-diesel water and power supply system using an artificial neural network", *Renewable Energy*, 32:1426–1439.
- [15] Ekren, O. ve Ekren, B.Y., (2010). "Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing", *Applied Energy*, 87:592–598.
- [16] Capizzi, G. ve Tina, G., (2007). "Long-term operation optimization of integrated generation systems by fuzzy logic-based management", *Energy*, 32:1047–1054.
- [17] Mellit, A., Benghanem, M. ve Kalogirou S.A., (2007). "Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network: Proposition for a new sizing procedure", *Renewable Energy*, 32:285–313.
- [18] Anagnostopoulos, J.S., ve Papantonis, D.E., (2007). "Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant", *Energy Conversion and Management* 48:3009–3017.
- [19] Phuangpornpitak, N., ve Kumar, S., (2007). "PV hybrid systems for rural electrification in Thailand", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1530–1543.
- [20] Hwang, J.J., Chang, W.R. ve Su, A., (2008). "Dynamic modeling of a solar hydrogen system under leakage conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:3615 – 3624.
- [21] Erdogdu, E., (2009). "On the wind energy in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1361–1371.
- [22] Farret, F.A. ve Simoes, M.G., (2006). *Integration of alternative sources of energy*, John Wiley&Sons.
- [23] Wang, C. ve Nehrir, N.H., (2008). "Power Management of a Stand-Alone Wind/ Photovoltaic/Fuel Cell Energy System", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23:957-967.

- [24] Patel, M.R., (2006). Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, CRC Press, Boca Raton.
- [25] Poullikkas, A., (2007). "Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:30–56.
- [26] Petchers, N., (2003). Combined Heating, Cooling&Power Handbook: Technologies&Applications: An Integrated Approach to Energy Resource Optimization, The Fairmont Press, Marcel Dekker.
- [27] Bianchi, F.D., Battista, H. ve Mantz, R.J., (2007). Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, Springer-Verlag, London.
- [28] Freris, L. ve Infield, D., (2008). Renewable Energy in Power Systems, Wiley&Sons.
- [29] Akpınar, A., Komurcu, M.I., Kankala, M., Ozolcer, I.H. ve Kaygusuz, K., (2008). "Energy situation and renewables in Turkey and environmental effects of energy use", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12:2013–2039.
- [30] Georgilakis, P.S., (2008). "Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12:852–863.
- [31] Smee, A., (1849). Elements of Electro-Biology, or The Voltaic Mechanism of Man; of Electro-Pathology, Especially of the Nervous System, Longman, London.
- [32] Shao, H., (2009). System Design and Power Management for Ultra Low Energy Applications Using Energy Harvesting Techniques, PhD Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology.
- [33] Perlin, J., (1999). From Space to Earth The Story of Solar Electricity, Harvard University Press.
- [34] Jones, D.A., (1991). Principles and Prevention of Corrosion, MacMillan Publishing Company, New York.
- [35] Tyagi, V.V., Kaushik, S.C. ve Tyagi, S.K., (2012). "Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16:1383-1398.
- [36] Alam, M.S., (2009). Real-Time Maximum Power Tracking and Robust Load Matching of a Stand-Alone Photovoltaic System, PhD Thesis, Tennessee Technological University.
- [37] Khaligh, A. ve Onar, O.C., (2010). Energy Harvesting: Solar, Wind and Ocean Energy Conversion Systems, CRC Press.
- [38] Spiegel, C., (2008). PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB®, Academic Press.

- [39] Kirubakaran, A., Jain, S. ve Nema, R.K., (2009). "A review on fuel cell technologies and power electronic interface", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:2430–2440.
- [40] Mekhilef, S., Saidur, R. ve Safari, A., (2012). "Comparative study of different fuel cell Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:981-989.
- [41] Barbir, F., (2005). *PEM fuel cells: theory and practice*, Elsevier Academic Press.
- [42] Bowers, B.J., Zhao, J.L., Ruffo, M., Khan, R., Dattatraya, D., Dushman, N., Beziat, J. C. ve Boudjemaa, F., (2007). "Onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 32:1437-1442.
- [43] Corbo, P., Migliardini, F. ve Veneri, O., (2007). "Performance investigation of 2.4 kW PEM fuel cell stack in vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:4340-4349.
- [44] Hou, Y., Zhuang, M. ve Wan, G., (2007). "A transient semi-empirical voltage model of a fuel cell stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:857-862.
- [45] Wee, J.H., (2007). "Applications of proton exchange membrane fuel cell systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1720–1738.
- [46] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. ve Efthimiou, V., (2009). "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1513–1522.
- [47] Ibrahim, H., Ilinca, A. ve Perron, J., (2008). "Energy storage systems—Characteristics and Comparisons", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:1221–1250.
- [48] Baker, J., (2008). "New technology and possible advances in energy storage", *Energy Policy*, 36:4368–4373.
- [49] Moseley, P.T. ve Rand, D.A.J., (2010). "In celebration of the sesquicentennial of the lead–acid battery", *Journal of Power Sources*, 19:4423.
- [50] Kurzweil, P., (2010). "Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery", *Journal of Power Sources*, 195:4424–4434.
- [51] Nair, N.K.C. ve Garimella, N., (2010). "Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration", *Energy and Buildings*, 42:2124-2130.
- [52] Divya, K.C. ve Østergaard, J., (2009). "Battery energy storage technology for power systems—An overview", *Electric Power Systems Research*, 79:511–520.
- [53] Bentley, P., Stone, D.A. ve Schofield, N., (2005). "The parallel combination of a VRLA cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer", *Journal of Power Sources*, 147:288-294.

- [54] Nakayama, Y., Hojo, E. ve Koike, T., (2003). "Development of VRLA battery for hybrid bus", *Journal of Power Sources*, 124:551-558.
- [55] May, G.J., Maleschitz, N., Diermaier, H. ve Haeupl, T., (2010). "The optimisation of grid designs for valve-regulated lead/acid batteries for hybrid electric vehicle applications", *Journal of Power Sources*, 195:4520–4524.
- [56] Scrosati, B. ve Garche, J., (2010). "Lithium batteries: Status, prospects and future", *Journal of Power Sources*, 195:2419–2430.
- [57] Casas, C. ve Li, W., (2012). "A review of application of carbon nanotubes for lithium ion battery anode material", *Journal of Power Sources*, 208:74-85.
- [58] Ates, Y., Erdinc, O., Uzunoglu, M. ve Vural, B., (2010). "Energy management of an FC/UC hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35:774-783.
- [59] Prokhorov, D.V., (2008). "Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics", *Neural Networks*, 21:458-465.
- [60] Azmy, A.M. ve Erlich, I., (2005). "Online Optimal management of PEM fuel cells using neural networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20:1051-1058.
- [61] Hatti, M. ve Tioursi, M., (2009). "Dynamic neural network controller model of PEM fuel cell system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:5015-5021.
- [62] Mellit, A. ve Kalogirou, S.A., (2008). "Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34:574–632.
- [63] Zadeh, L.A., (2008). "Is there a need for fuzzy logic?", *Information Sciences*, 178:2751–2779.
- [64] Chen, S.M., Huang, C.M., (2008). "A new approach to generate weighted fuzzy rules using genetic algorithms for estimating null values", *Expert Systems with Applications*, 35:905–917.
- [65] Wang, L.X., (1997). *A course in fuzzy systems and control*, Prentice-Hall International, USA.
- [66] Leondes, C.T., (1998). *Fuzzy logic and expert systems application*, Academic Press, California, USA.
- [67] Schouten, N.J., Salman, M.A. ve Kheir, N.A., (2003). "Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic", *Control Engineering Practice*, 11:171-177.
- [68] Jeong, K.S., Lee, W.Y. ve Kim, C.S., (2005). "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", *Journal of Power Sources*, 145:319–326.

- [69] Chu, B., Kim, D., Hong, D., Park, J., Chung, J.T., Chung, J.H. ve Kim, T.H., (2008). "GA-based fuzzy controller design for tunnel ventilation systems", *Automation in Construction*, 17:130–136.
- [70] Erdinc, O., Vural, B. ve Uzunoglu, M., (2009). "A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system", *Journal of Power Sources*, 194:369-380.
- [71] Erdinc, O., Vural, B., Uzunoglu, M. ve Ates, Y., (2009). "Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load sharing and control algorithm", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:5223-5233.
- [72] Stewart, E.M., Lutz, A.E., Schoenung, S., Chiesa, M., Keller, J.O., Fletcher, J., Ault, G., McDonald, J. ve Cruden, A., (2009). "Modeling, analysis and control system development for the Italian hydrogen house", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:1638–1646.
- [73] Gao, D., Jin, Z. ve Lu, Q., (2008). "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus", *Journal of Power Sources*, 185:311-317.
- [74] Li, C.Y. ve Liu, G.P., (2009). "Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles", *Journal of Power Sources*, 192:525-533.
- [75] Eren, Y., Erdinc, O., Gorgun, H., Uzunoglu, M. ve Vural, B., (2009). "A fuzzy logic based supervisory controller for an FC/UC hybrid vehicular power system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:8681-8694.
- [76] Kisacikoglu, M.C., Uzunoglu, M. ve Alam, M.S., (2009). "Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultra-capacitor hybrid vehicle", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:1497-1507.
- [77] Li, X., Xu, L., Hua, J., Lin, X., Li, J. ve Ouyang, M., (2009). "Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system", *Journal of Power Sources*, 191:542–549.
- [78] Ter-Gazarian, A.G. ve Kagan, N., (1992). "Design model for electrical distribution systems considering renewable, conventional and energy storage units", *IEE Proceedings-C Generation, Transmission and Distribution*, 139:499-504.
- [79] Anglani, N. ve Muliere, G., (2010). "Analyzing the Impact of Renewable Energy Technologies by means of Optimal Energy Planning", *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 1-5.
- [80] Mizani, S. ve Yazdani, A., (2009). "Design and Operation of a Remote Microgrid", *35th Annual Conference on Industrial Electronics (IECON'09)*, 4299-4304.
- [81] Razali, N.M.M. ve Hashim, A.H., (2010). "Backward Reduction Application for Minimizing Wind Power Scenarios in Stochastic Programming", *The 4th International Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO'2010)*, 430-434,.



- [82] Zoulias, E.I. ve Lymberopoulos, N., (2007). "Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems", *Renewable Energy*, 32:680–696.
- [83] Fung C.C., Rattanongphisat, W. ve Nayar, C., (2002). "A simulation study on the economic aspects of hybrid energy systems for remote islands in Thailand", *IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCON'02)* 1966-1969.
- [84] Turkay, B.E. ve Telli, A.Y., (2009). "Economic Analysis of Stand Alone and Grid Connected Hybrid Energy Systems", *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* 34-39.
- [85] Gilau, A.M. ve Small, M.J., (2008). "Designing cost-effective seawater reverse osmosis system under optimal energy options", *Renewable Energy*, 33:617–630.
- [86] Bekele, G. ve Palm, B., (2010). "Feasibility study for a standalone solar–wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia", *Applied Energy*, 87:487–495.
- [87] Lau, K.Y., Yousof, M.F.M., Arshad, S.N.M., Anwari, M. ve Yatim, A.H.M., (2010). "Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions", *Energy*, 35:3245-3255.
- [88] Silva, S.B., Oliveira, M.A.G. ve Severino M.M., (2010). "Economic evaluation and optimization of a photovoltaic–fuel cell–batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon", *Energy Policy*, 38:6713–6723.
- [89] Isherwood, W., Smith, J.R., Aceves, S.M., Berry, G., Clark, W., Johnson, R., Das, D., Goering, D. ve Seifert, R., (2000). "Remote power systems with advanced storage Technologies for Alaskan villages", *Energy*, 25:1005–1020.
- [90] Mousa, K., AlZu'bi, H. ve Diabat, A., (2010). "Design of a Hybrid Solar-Wind Power Plant Using Optimization", *2nd International Conference on Engineering Systems Management and Its Applications (ICESMA)*, 1-6.
- [91] Darras, C., Sailler, S., Thibault, C., Muselli, M., Poggi, P., Hoguet, J.C., Melscoet, S., Pinton, E., Grehant, S., Gailly, F., Turpin, C., Astier, S. ve Fontes, G., (2010). "Sizing of photovoltaic system coupled with hydrogen/oxygen storage based on the ORIENTE model", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35:3322–3332.
- [92] Mazhari, E., Zhao, J., Celik, N., Lee, S., Son, Y.J. ve Head, L., (2011). "Hybrid simulation and optimization-based design and operation of integrated photovoltaic generation, storage units, and grid", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19:463–481.
- [93] Ekren, B.Y. ve Ekren, O., (2009). "Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions", *Applied Energy*, 86:1387–1394.

- [94] Akella, A.K., Sharma, M.P. ve Saini, R.P., (2007). "Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:894–908.
- [95] Gupta, A., Saini, R.P. ve Sharma, M.P., (2008). "Hybrid Energy System for Remote Area – An Action Plan for Cost Effective Power Generation", 3rd Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 1-6.
- [96] He, W., (1993), "A simulation module for wind-diesel systems with multiple units", *International Conference on Renewable Energy-Clean Power*, 171-176.
- [97] Belfkira, R., Barakat, G., Nicolas, T. ve Nichita, C., (2009). "Design study and optimization of a grid independent wind/PV/Diesel system", 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'09), 1-10.
- [98] Belfkira, R., Nichita, C., Reghem, P. ve Barakat, G., (2009). "Modeling and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy System", 13th Power Electronics and Motion Control Conference (EPE), 1834-1839.
- [99] Berberi, P., Thodhorjani, S. ve Aleti, R., (2009). "Integration and Optimization of Alternative Sources of Energy in a Remote Region", (*ELECTROMOTION*), 1-4.
- [100] Schmitt, W., (2002). "Modeling and simulation of photovoltaic hybrid energy systems-optimization of sizing and control", *Conference Record of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1656-1659.
- [101] Malinchik, S., Roberts, A., Fierro, S., (2010). "Geo-Spatial Resource Analysis and Optimization of Investment Strategies for Renewable Energy", *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)* 70-77.
- [102] Sukumar, S.R., Olama, M.M., Shankar, M., Hadley, S., Nutaro, J.J., Protopopescu, V., Malinchik, S.ve Ives, B., (2010). "Modeling Resource, Infrastructure, and Policy Cost Layers for Optimizing Renewable Energy Investment and Deployment", *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)* 151-158.
- [103] Lopez, R.D., Agustin, J.L.B. ve Mendoza, F., (2009). "Design and economical analysis of hybrid PV–wind systems connected to the grid for the intermittent production of hydrogen", *Energy Policy*, 37:3082–3095.
- [104] Krajacic, G., Duic, N. ve Carvalho, M.G., (2009). "H<sub>2</sub>RES, Energy planning tool for island energy systems – The case of the Island of Mljet", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:7015-7026.
- [105] Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V. ve Leahy, M., (2010). "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems", *Applied Energy*, 87:1059–1082.
- [106] Goncalves, J.F., Mendes, J.J.M. ve Resende, M.G.C., (2008). "A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 189:1171–1190.

- [107] Chen, S.M. ve Huang, C.M., (2008). "A new approach to generate weighted fuzzy rules using genetic algorithms for estimating null values", *Expert Systems with Applications*, 35:905–917.
- [108] Holland, J.H., (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press, Massachusetts, Cambridge.
- [109] Raza, S.M.A., Kamran, F. ve Akbar, M., (2005). "Dynamic and Scenario Based Elicitation of Genetic Algorithms of Agents for Control of Distributed Power System Networks and Renewable Energy Resources", 17th International Conference on Microelectronics (ICM).
- [110] Chen S.M. ve Huang, C.M., (2008). "A new approach to generate weighted fuzzy rules using genetic algorithms for estimating null values", *Expert Systems with Applications*, 35:905–917.
- [111] Goncalves, J.F., Mendes, J.J.M. ve Resende, M.G.C., (2008). "A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem", *European Journal of Operational Research*, 189:1171–1190.
- [112] Mellit, A. ve Kalogirou, S.A., (2008). "Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34:574–632.
- [113] Yan, M.T. ve Fang, C.C., (2008). "Application of genetic algorithm-based fuzzy logic control in wire transport system of wire-EDM machine", *Journal of Materials Processing Technology*, 205:128–137.
- [114] Shook, D.A., Roschke, P.N., Lin, P.Y. ve Loh, C.H., (2008). "GA-optimized fuzzy logic control of a large-scale building for seismic loads", *Engineering Structures*, 30:436–449.
- [115] Chu, B., Kim, D., Hong, D., Park, J., Chung, J.T., Chung, J.H. ve Kim, T.H., (2008). "GA-based fuzzy controller design for tunnel ventilation systems", *Automation in Construction*, 17:130–136.
- [116] Turkmen, I. ve Guney, K., (2008). "Genetic tracker with adaptive neuro-fuzzy inference system for multiple target tracking", *Expert Systems with Applications*, 35:1657–1667.
- [117] Sáez, D., Cortés, C.E. ve Núñez, A., (2008). "Hybrid adaptive predictive control for the multi-vehicle dynamic pick-up and delivery problem based on genetic algorithms and fuzzy clustering", *Computers and Operations Research*, 35:3412-3438.
- [118] Causa, J., Karer, G., Núñez, A., Sáez, D., Skrjanc, I. ve Zupanci, B., (2008). "Hybrid fuzzy predictive control based on genetic algorithms for the temperature control of a batch reactor", *Computers and Chemical Engineering*, 32:3254-3263.
- [119] Sharaf, A.M. ve El-Gammal, A.A.A., (2010). "A Novel Coordinated Efficient GA-Self Regulating PID Controller for Hybrid PVFC- Diesel-Battery Renewable Energy Scheme for Household Electricity Utilization", 4th Asia International

Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation, 456-462.

- [120] Ustun, S.V. ve Demirtas, M., (2008). "Optimal tuning of PI coefficients by using fuzzy-genetic for V/f controlled induction motor", *Expert Systems with Applications*, 34:2714–2720.
- [121] Warsono, D.J., King, C., Özveren, S. ve Bradley, D.A., (2007). "Economic Load Dispatch Optimization of Renewable Energy in Power System Using Genetic Algorithm", *IEEE Lausanne Power Tech*, 2174-2179.
- [122] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A. ve Kalaitzakis, K., (2006). "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms", *Solar Energy*, 80:1072–1088.
- [123] Koutroulis, E. ve Kolokotsa, D., (2010). "Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources", *Desalination*, 258:171–181.
- [124] Yang, H., Zhou, W., Lu, L. ve Fang, Z., (2008). "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm", *Solar Energy*, 82:354–367.
- [125] Yang, H., Zhou, W. ve Lou, C., (2009). "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system", *Applied Energy*, 86:163–169.
- [126] Bilal, B.O., Sambou, V., Ndiaye, P.A., Kébé, C.M.F. ve Ndongo, M., (2010). "Optimal design of a hybrid solar-wind–battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP)", *Renewable Energy*, 35:2388-2390.
- [127] Lagorse, J., Paire, D. ve Miraoui, A., (2009). "Hybrid Stand-Alone Power Supply Using PEMFC, PV and Battery - Modelling and Optimization", *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 135-140, 2009.
- [128] Kalantar, M. ve Mousavi, S.M., (2010). "Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage", *Applied Energy*, 87:3051–3064.
- [129] Lopez, R.D. ve Agustin, J.L.B., (2005). "Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms", *Solar Energy*, 79:33–46.
- [130] Lopez, R.D. ve Agustin, J.L.B., (2008). "Influence of mathematical models in design of PV-Diesel systems", *Energy Conversion and Management*, 49:820–831.
- [131] Lagorse, J., Paire, D. ve Miraoui, A., (2009). "Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery", *Renewable Energy*, 34:683–691.
- [132] Miyatake, M., Toriumi, F., Endo, T. ve Fujii, N., A Novel Maximum Power Point Tracker Controlling Several Converters Connected to Photovoltaic Arrays with

- Particle Swarm Optimization Technique, European Conference on Power Electronics and Applications, 1-10, 2007.
- [133] Hakimi, S.M., Tafreshi, S.M.M. ve Kashefi, A., (2007). "Unit Sizing of a Stand-alone Hybrid Power System Using Particle Swarm Optimization (PSO)", IEEE International Conference on Automation and Logistics, 3107-3112.
- [134] Saber, A.Y. ve Venayagamoorthy, G.K., (2010). "Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid —A cost-emission optimization", Journal of Power Sources, 195:898–911.
- [135] Mahor, A., Prasad, V. ve Rangnekar, S., (2009). "Economic dispatch using particle swarm optimization: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:2134–2141.
- [136] Phuangpornpitak, N., Tia, S., Prommee, W. ve Phuangpompitak, W., (2010). "A Study of Particle Swarm Technique for Renewable Energy Power Systems", International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD), 1-6.
- [137] Lee, T.Y. ve Chen, C.L., (2009). "Wind-photovoltaic capacity coordination for a time-of-use rate industrial user", IET Renewable Power Generation, 3:152–167.
- [138] Chung, I.Y., Liu, W., Cartes, D.A. ve Schoder, K., (2008). "Control Parameter Optimization for a Microgrid System Using Particle Swarm Optimization", IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET) 837-842.
- [139] Ardakani, F.J., Riahy, G. ve Abedi, M., (2010). "Design of an optimum hybrid renewable energy system considering reliability indices", 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 842-847.
- [140] Sánchez, V., Ramirez, J.M. ve Arriaga, G., (2010). "Optimal sizing of a hybrid renewable system", IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 949-954.
- [141] Dehghan, S., Saboori, H., Parizad, A. ve Kiani, B., (2009). "Optimal Sizing of a Hydrogen-based Wind/PV Plant Considering Reliability Indices", International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS'09), 1-9.
- [142] Avril, S., Arnaud, G., Florentin, A. ve Vinard, M., (2010). "Multi-objective optimization of batteries and hydrogen storage technologies for remote photovoltaic systems", Energy, 35:5300-5308.
- [143] Kaviani, A.K., Riahy, G.H. ve Kouhsari, S.H.M., (2009). "Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages", Renewable Energy, 34:2380–2390.
- [144] Tafreshi, S.M.M., Hakimi, S.M., (2007), "Optimal Sizing of a Stand-alone Hybrid Power System via Particle Swarm Optimization (PSO)", International Power Engineering Conference (IPEC), 960-965.

- [145] Hakimi, S.M. ve Tafreshi, S.M.M., (2009). "Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran", *Renewable Energy*, 34:1855–1862.
- [146] Wang, L. ve Singh, C., (2006). "PSO-Based Multidisciplinary Design of A Hybrid Power Generation System With Statistical Models of Wind Speed and Solar Insolation", *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6.
- [147] Zhao, Y.S., Zhan, J., Zhang, Y., Wang, D.P. ve Zou, B.G., (2009). "The optimal capacity configuration of an independent wind/PV hybrid power supply system based on improved PSO algorithm", *8th International Conference on Advances in Power Sytem Control, Operation and Management (APSCOM)*, 1-7.
- [148] Wang, L. ve Singh, C., (2007). "PSO-Based Multi-Criteria Optimum Design of A Grid-Connected Hybrid Power System With Multiple Renewable Sources of Energy", *IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS)*, 250-257.
- [149] Santarelli, M. ve Pellegrino, D., (2005). "Mathematical optimization of a RES-H<sub>2</sub> plant using a black box algorithm", *Renewable Energy*, 30:493–510.
- [150] Arora, J.S., (2004). *Introduction to Optimum Design*, Elsevier Academic Press.
- [151] Örnek 50 kW'lık rüzgar türbini güç eğrisi, [http://www.wind-energy-resources.com/wer\\_50kw\\_wind\\_turbine.html](http://www.wind-energy-resources.com/wer_50kw_wind_turbine.html), 10 Aralık 2012.
- [152] Khan, M.J. ve Iqbal, M.T., (2005). "Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system", *Renewable Energy*, 30:421-439.
- [153] Wu, W., Xu, J.P. ve Hwang, J.J., (2009). "Multi-loop nonlinear predictive control scheme for a simplistic hybrid energy system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34:3953-3964.
- [154] Wang, C., (2006). *Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems*, PhD Thesis, Montana State University.
- [155] Ulleberg, Ø., (1998). *Stand-Alone Power Systems for the Future: Optimal Design, Operation & Control of Solar-Hydrogen Energy Systems*. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- [156] Townsend, T.U., (1989). *A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems*. MSc Thesis, University Of Wisconsin-Madison.
- [157] Masoum, M.A.S., Dehbonei, H. ve Fuchs, E.F., (2002). "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17:514 – 522.
- [158] Andujar, J.M., Segura, F. ve Vasallo, M. J., (2008). "A suitable model plant for control of the set fuel cell-DC/DC converter", *Renewable Energy*, 33:813-826.

- [159] Park, S.K. ve Choe, S.Y., (2008). "Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects", *Journal of Power Sources*, 179:660-672.
- [160] Mann, R.F., Amphlett, J. C., Hooper, M.A.I., Jensen, H.M., Peppley, B.A. ve Roberge, P.R., (2000). "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 86:173-180.
- [161] Xue, X., Tang, J., Smirnova, A., England, R. ve Sammes, N., (2004). "System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 133:188-204.
- [162] Zhang, Z., Huang, X., Jiang, J. ve Wu, B., (2006). "An improved dynamic model considering effects of temperature and equivalent internal resistance for PEM fuel cell power models", *Journal of Power Sources*, 161:1062-1068.
- [163] Pathapati, P.R., Xue, X. ve Tang, J., (2005). "A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system", *Renewable Energy*, 30:1-22.
- [164] Adzakpa, K.P., Agbossou, K., Dube, Y., Dostie, M., Fournier, M. ve Poulin, A., (2008). "PEM Fuel Cells Modeling and Analysis Through Current and Voltage Transient Behaviors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23:581-591.
- [165] Gorgun, H., (2006). "Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31:29-38.
- [166] Jantharamin, N. ve Zhang, L., (2008). "A New Dynamic Model for Lead-Acid Batteries", 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), York, 2-4 April 2008, 86-90.
- [167] Real, A.J.D., Arce, A. ve Bordons, C., (2009). "Optimization strategy for element sizing in hybrid power systems", *Journal of Power Sources*, 193:315–321.
- [168] Amrhein, M. ve Krein, P.T., (2005). "Dynamic Simulation for Analysis of Hybrid Electric Vehicle System and Subsystem Interactions, Including Power Electronics", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54:825-836.
- [169] Yang, H., Lu, L. ve Zhou, W., (2007). "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system", *Solar Energy*, 81:76–84.
- [170] Dunlop, E.D., Halton, D. ve Ossenbrink, H.A., (2005). "20 years of life and more: where is the end of life of a PV module?", *IEEE Photovoltaic Specialists Conference Florida: Orlando*.
- [171] HOMER – Hybrid Optimization Model for Electric Renewables, [www.nrel.gov/Homer](http://www.nrel.gov/Homer), 15 Kasım 2012.
- [172] Spotnitz, R., (2003). "Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, 113:72-80.

- [173] El-Sharkh, M.Y., Tanrioven, M., Rahman, A. ve Alam, M.S., (2006). "A study of cost-optimized operation of a grid-parallel PEM fuel cell power plant", IEEE Transactions on Power Systems, 21:1104-1114.
- [174] Botzung, M., Chaudourne, S., Gillia, O., Perret, C., Latroche, M., Percheron-Gurgan, A. ve Marty, P., (2008). "Simulation and experimental validation of a hydrogen storage tank with metal hydrides", International Journal of Hydrogen Energy, 33:98-104.
- [175] Hidrojen depolama sistemi özellikleri, [http://69.41.172.100/PDFs/rosa\\_nha\\_presentation\\_030503/nha\\_ryoung\\_pres\\_030503.pdf](http://69.41.172.100/PDFs/rosa_nha_presentation_030503/nha_ryoung_pres_030503.pdf), 20 Ağustos 2012.
- [176] 1.2 kW BK Precision DC yük bankası teknik özellikleri, [http://www.bkprecision.com/products/docs/datasheets/85xx\\_datasheet.pdf](http://www.bkprecision.com/products/docs/datasheets/85xx_datasheet.pdf), 20 Ekim 2012.
- [177] Vural, B., Boynuegri, A. R., Nakir, I., Erdinc, O., Balikci, A., Uzunoglu M., Gorgun., H., Dusmez, S., (2010). "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications", International Journal of Hydrogen Energy, 35:11161-11171.
- [178] Davis meteoroloji istasyonu teknik özellikleri, [http://www.weatherconnection.com/manuals/VP2\\_Console\\_Manual.pdf](http://www.weatherconnection.com/manuals/VP2_Console_Manual.pdf), 05 Eylül 2012.
- [179] Mashhour, E. ve Tafreshi, S.M.M., (2011). "Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets-Part I: Problem Formulation", IEEE Transactions on Power Systems, 26:949-56.
- [180] Chen, C.L., (2008). "Optimal Wind-Thermal Generating Unit Commitment", IEEE Transactions on Energy Conversion, 23:273-80.
- [181] Hosseini, S.H., Khodaei, A. ve Aminifar, F., (2007). "A Novel Straightforward Unit Commitment Method for Large-Scale Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, 22:2134-214.



---

## HİBRİT SİSTEM BOYUT OPTİMİZASYONU İÇİN UYGULANAN ALGORİTMA

```
clear all;
clc;
warning off;

load wind; %%Ruzgar hizi verisi
load rad; %%Gunes isinimi verisi
load temp; %%Sicaklik verisi
load load; %%Yuk talebi verisi

Eff_DC=0.95; %%DC-DC donusturucu verimi
Eff_AC=0.9; %%Inverter verimi
Capacitydeg_bat=0.8; %%5 yillik isletimden sonra kalan batarya kullanılabilir kapasitesi
katsayisi
Powerdeg_PV=0.9; %%25 yillik isletimden sonra kalan FV cikis gucu katsayisi
Powerdeg_ELEC=0.9; %%8 yillik isletimden sonra kalan elektolizor gucu katsayisi
Powerdeg_FC=0.9; %%6 yillik isletimden sonra kalan YH gucu katsayisi

%%FV parametreleri

Temp_coeff=0.5;
Ref_Lightcurrent=2.664;
Ref_Irradiance=1000;
Ref_Temp=25;
q=1.60217733e-19;
e_gap=1.17;
U_oc_ref=87.72;
U_mp_ref=70.731;
I_sc_ref=2.664;
I_mp_ref=2.448;
R_s=1.324;
k_in_PV=0.9;
```

A=1.5;  
k\_loss=30;  
C\_pv=5e4;

#### %%YH ve elektrolizor parametreleri

N=88;  
deltaG=237180;  
f1=-0.9514;  
f2=0.00312;  
f3=7.4e-5;  
f4=-0.000187;  
L=51e-6;  
lambda=20;  
deltaS=-163.15;  
F=96486.7;  
R=8.314;  
B=0.016;  
C=2.5;  
J\_max=1.5;  
R\_c=2e-4;  
T\_ref=298.15;

#### %%Başlangic parametreleri

i\_r=3.75; %%Nominal faiz oranı (%)  
f=1.5; %%Yillik fazi oranı(%)  
ii=(i\_r-f)/(i\_r+f);  
n=25; %%Degerlendirme periyodu (yil)  
Y\_PV=25; %%FV omru  
Y\_WT=25; %%RT omru  
Y\_bat=5; %%Batarya omru  
Y\_fc=6; %%YH omru  
Y\_elec=8; %%Elektrolizor omru  
Cost\_PV=6500; %%\$/kW – FV ilk yatırım maliyeti  
Cost\_WT=3500; %%\$/kW – RT ilk yatırım maliyeti  
Cost\_BAT=1500; %%\$/kAh – Batarya ilk yatırım maliyeti  
Cost\_FC=3000; %%\$/kW – YH ilk yatırım maliyeti  
Cost\_ELEC=3500; %%\$/kW – Yeterli hidrojen depolama sistemi ile birlikte elektrolizor ilk yatırım maliyeti  
Rep\_BAT=1500; %%\$/kAh – Batarya yer degistirme maliyeti  
Rep\_FC=3000; %%\$/kW – YH yer degistirme maliyeti  
Rep\_ELEC=2500; %%\$/kW – Elektrolizor yer degistirme maliyeti  
Main\_PV=65; %%\$/kW – FV bakım maliyeti  
Main\_WT=95; %%\$/kW – RT bakım maliyeti  
Main\_BAT=50; %%\$/kAh – Batarya bakım maliyeti



```

FC=Ns_4*5; %%YH boyutu (kW)
ELEC=Ns_5*5; %%Elektrolizor boyutu (kW)
CRF_pv=ii*(1+ii)^Y_PV/((1+ii)^Y_PV-1);
Ccap_PV=PV*Cost_PV*CRF_pv;
CRF_wt=ii*(1+ii)^Y_WT/((1+ii)^Y_WT-1);
Ccap_WT=WT*Cost_WT*CRF_wt;
CRF_bat=ii*(1+ii)^Y_bat/((1+ii)^Y_bat-1);
Ccap_BAT=Bat*Cost_BAT*CRF_bat;
CRF_fc=ii*(1+ii)^Y_fc/((1+ii)^Y_fc-1);
Ccap_FC=FC*Cost_FC*CRF_fc;
CRF_elec=ii*(1+ii)^Y_elec/((1+ii)^Y_elec-1);
Ccap_ELEC=ELEC*Cost_ELEC*CRF_elec;
Ccap_total=Ccap_PV+Ccap_WT+Ccap_BAT+Ccap_FC+Ccap_ELEC;
SFF_BAT=ii/((1+ii)^Y_bat-1);
Crep_BAT=Bat*Rep_BAT*SFF_BAT;
SFF_FC=ii/((1+ii)^Y_fc-1);
Crep_FC=FC*Rep_FC*SFF_FC;
SFF_ELEC=ii/((1+ii)^Y_elec-1);
Crep_ELEC=ELEC*Rep_ELEC*SFF_ELEC;
Crep_total=Crep_BAT+Crep_FC+Crep_ELEC;
Cmain_PV=PV*Main_PV*KKK;
Cmain_WT=WT*Main_WT*KKK;
Cmain_BAT=Bat*Main_BAT*KKK;
Cmain_FC=FC*Main_FC*KKK;
Cmain_ELEC=ELEC*Main_ELEC*KKK;
Cmain_total=Cmain_PV+Cmain_WT+Cmain_BAT+Cmain_FC+Cmain_ELEC;
co(n)=Ccap_total+Crep_total+Cmain_total;
if y*100>LSPS;
    co(n)=vvv;
else co(n)=co(n);
end
akk(n)=co(n)
end

Cost_first=[co(1:n)];

for iii=1:j
if co(1,iii)==min(Cost_first)
    a1=zzz(1,iii);
    a2=xxx(1,iii);
    a3=mmm(1,iii);
    a4=ddd(1,iii);
    a5=eee(1,iii);
end
end

```







```

[t,x,y] = sim('Hybrid_main', ttt, simset('MaxRows', 1, 'OutputVariables', 'ty',
'FinalStateName', 'xFinal'));
PV=Ns_1*173/1000;
Bat=Ns_2*0.004;
WT=Ns_3*50;
FC=Ns_4*5;
ELEC=Ns_5*5;
CRF_pv=ii*(1+ii)^Y_PV/((1+ii)^Y_PV-1);
Ccap_PV=PV*Cost_PV*CRF_pv;
CRF_wt=ii*(1+ii)^Y_WT/((1+ii)^Y_WT-1);
Ccap_WT=WT*Cost_WT*CRF_wt;
CRF_bat=ii*(1+ii)^Y_bat/((1+ii)^Y_bat-1);
Ccap_BAT=Bat*Cost_BAT*CRF_bat;
CRF_fc=ii*(1+ii)^Y_fc/((1+ii)^Y_fc-1);
Ccap_FC=FC*Cost_FC*CRF_fc;
CRF_elec=ii*(1+ii)^Y_elec/((1+ii)^Y_elec-1);
Ccap_ELEC=ELEC*Cost_ELEC*CRF_elec;
Ccap_total=Ccap_PV+Ccap_WT+Ccap_BAT+Ccap_FC+Ccap_ELEC;
SFF_BAT=ii/((1+ii)^Y_bat-1);
Crep_BAT=Bat*Rep_BAT*SFF_BAT;
SFF_FC=ii/((1+ii)^Y_fc-1);
Crep_FC=FC*Rep_FC*SFF_FC;
SFF_ELEC=ii/((1+ii)^Y_elec-1);
Crep_ELEC=ELEC*Rep_ELEC*SFF_ELEC;
Crep_total=Crep_BAT+Crep_FC+Crep_ELEC;
Cmain_PV=PV*Main_PV*KKK;
Cmain_WT=WT*Main_WT*KKK;
Cmain_BAT=Bat*Main_BAT*KKK;
Cmain_FC=FC*Main_FC*KKK;
Cmain_ELEC=ELEC*Main_ELEC*KKK;
Cmain_total=Cmain_PV+Cmain_WT+Cmain_BAT+Cmain_FC+Cmain_ELEC;
Cost(p)=Ccap_total+Crep_total+Cmain_total; %%ACS
    if y*100>LSPS;
        Cost(p)=vvv;
    else Cost(p)=Cost(p);
    end
end

%%
costs=[Cost(1:p)];
for fy=1:243;
if Cost(1,fy)==min(costs)
    a1=ay(1,fy);
    a2=by(1,fy);
    a3=cy(1,fy);
    a4=dy(1,fy);

```



```

a5=ey(1,fy);

end
end

%%ODAK KAYMASI

mmmmm=floor(4*rand(1,tttt))+kwt; %%50 kW'lik RTnin sayısı
zzzzz=floor(982*rand(1,tttt))+kpv; %%0-170 kW arası FV (153 cell 173 W)
xxxxx=floor(250*2*rand(1,tttt))+kbat; %%0-2 kAh batarya (Her cell 4 Ah=0.004 kAh)
ddddd=floor(11*rand(1,tttt))+kfc; %%5 kW'lik YHnin sayısı
eeeeee=floor(11*rand(1,tttt))+kel; %%5 kW'lik elektrolizor sayısı
for mm=1:tttt
    Ns_1=zzzzz(1,mm);
    Ns_2=xxxxx(1,mm);
    Ns_3=mmmmm(1,mm);
    Ns_4=ddddd(1,mm);
    Ns_5=eeeeee(1,mm);
    Ns_41=Ns_4*Powerdeg_FC;
    A=150*N*Ns_41;
[t,x,y] = sim('Hybrid_main', ttt, simset('MaxRows', 1, 'OutputVariables', 'ty',
'FinalStateName', 'xFinal'));
PV=Ns_1*173/1000;
Bat=Ns_2*0.004;
WT=Ns_3*50;
FC=Ns_4*5;
ELEC=Ns_5*5;
CRF_pv=ii*(1+ii)^Y_PV/((1+ii)^Y_PV-1);
Ccap_PV=PV*Cost_PV*CRF_pv;
CRF_wt=ii*(1+ii)^Y_WT/((1+ii)^Y_WT-1);
Ccap_WT=WT*Cost_WT*CRF_wt;
CRF_bat=ii*(1+ii)^Y_bat/((1+ii)^Y_bat-1);
Ccap_BAT=Bat*Cost_BAT*CRF_bat;
CRF_fc=ii*(1+ii)^Y_fc/((1+ii)^Y_fc-1);
Ccap_FC=FC*Cost_FC*CRF_fc;
CRF_elec=ii*(1+ii)^Y_elec/((1+ii)^Y_elec-1);
Ccap_ELEC=ELEC*Cost_ELEC*CRF_elec;
Ccap_total=Ccap_PV+Ccap_WT+Ccap_BAT+Ccap_FC+Ccap_ELEC;
SFF_BAT=ii/((1+ii)^Y_bat-1);
Crep_BAT=Bat*Rep_BAT*SFF_BAT;
SFF_FC=ii/((1+ii)^Y_fc-1);
Crep_FC=FC*Rep_FC*SFF_FC;
SFF_ELEC=ii/((1+ii)^Y_elec-1);
Crep_ELEC=ELEC*Rep_ELEC*SFF_ELEC;
Crep_total=Crep_BAT+Crep_FC+Crep_ELEC;
Cmain_PV=PV*Main_PV*KKK;

```

```

Cmain_WT=WT*Main_WT*KKK;
Cmain_BAT=Bat*Main_BAT*KKK;
Cmain_FC=FC*Main_FC*KKK;
Cmain_ELEC=ELEC*Main_ELEC*KKK;
Cmain_total=Cmain_PV+Cmain_WT+Cmain_BAT+Cmain_FC+Cmain_ELEC;
coss(mm)=Ccap_total+Crep_total+Cmain_total;
if y*100>LSPS;
    coss(mm)=vvv;
else coss(mm)=coss(mm);
end
end
costsss=[coss(1:mm)];
for fyy=1:mm;
if coss(1,fyy)==min(costsss)&&coss(1,fyy)<min(costs)
    a1=ay(1,fyy);
    a2=by(1,fyy);
    a3=cy(1,fyy);
    a4=dy(1,fyy);
    a5=ey(1,fyy);
else
    a1=ay(1,fy);
    a2=by(1,fy);
    a3=cy(1,fy);
    a4=dy(1,fy);
    a5=ey(1,fy);
end
end
    i=i+1
    OPT(i)=min(costs);
end

WT_power=Ns_3*50 %%Nihai RT gucu
PV_power=Ns_1*173/1000 %%Nihai FV gucu
FC_power=Ns_4*5 %%Nihai YH gucu
Electrolyzer_power=Ns_5*5 %%Nihai elektrolizor gucu
Battery_capacity=Ns_2*0.004 %%Nihai batarya kapasitesi
Cost_degradation=OPT(2:i) %%Iteratif surecteki maliyet dususu

```

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Ozan ERDİNÇ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 12.05.1985 – Üsküdar  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : oerdinc@yildiz.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Müh./Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lise	Fen Bilimleri- Matematik	Adile Mermerci Anadolu Lisesi	2003

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010-Devam	VARYAP Varlıbaşlar Yapı San. Tur. Yat. Tic. ve Elek. Ürt. A. Ş.	Uzman

2007-2010

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastırma  
Kurumu (TÜBİTAK)

107M355 no'lu projede  
proje bursiyeri

## YAYINLARI

### Makale

1. **Erdinc, O.**, Uzunoglu, M., (2012). "A New Perspective in Optimum Sizing of Hybrid Renewable Energy Systems: Consideration of Component Performance Degredation Issue", International Journal of Hydrogen Energy, 37:10479-10488.
2. **Erdinc, O.**, Uzunoglu, M., (2012). "Optimum Design of Hybrid Renewable Energy Systems: Overview of Different Approaches", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16:1412-1425.
3. **Erdinc, O.**, Elma, O., Uzunoglu, M., Selamogullari, U.S., Vural, B., Ugur, E., Boynuegri, A.R., Dusmez, S., (2012). "Experimental Performance Assessment of an Online Energy Management Strategy for Varying Renewable Power Production Suppression", International Journal of Hydrogen Energy, 37:4737-4748.
4. **Erdinc, O.**, Uzunoglu, M., (2011). "The Importance of Detailed Data Utilization on the Performance Evaluation of a Grid-Independent Hybrid Renewable Energy System", International Journal of Hydrogen Energy, 36:12664-12677.
5. Tascikaraoglu, A., Uzunoglu, M., Vural, B. **Erdinc, O.**, (2011). "Power Quality Assesment of Wind Turbines and Comparison With Conventional Legal Regulations: A Case Study In Turkey", Applied Energy, 88:1864-1872.
6. **Erdinc, O.**, Uzunoglu, M., (2010). "Recent Trends in PEM Fuel Cell-Powered Hybrid Systems: Investigation of Application Areas, Design Architectures and Energy Management Approaches", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:2874-2884.
7. Vural, B., Boynuegri, A. R., Nakir, I., **Erdinc, O.**, Balikci, A., Uzunoglu M., Gorgun., H., Dusmez, S., (2010). "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications", International Journal of Hydrogen Energy, 35:11161-11171.
8. Vural, B., **Erdinc, O.**, Uzunoglu, M., (2010). "Parallel Combination of FC and UC for Vehicular Power Systems Using a Multi-Input Converter-Based Power Interface", Energy Conversion and Management, 51:2613-2622.
9. Ates, Y., **Erdinc, O.**, Uzunoglu, M., Vural, B., (2009). "Energy Management of an FC/UC Hybrid Vehicular System Using a Combined Neural Network-Wavelet Transform Based Strategy" International Journal of Hydrogen Energy, 35:774-783.

10. Eren, Y., **Erdinc, O.**, Gorgun, H., Uzunoglu, M., Vural, B., (2009). "A Fuzzy Logic Based Supervisory Controller for a FC/UC Hybrid Vehicular Power System" International Journal of Hydrogen Energy, 34:8681-8694.
11. **Erdinc, O.**, Vural, B., Uzunoglu, M., (2009). "A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system", Journal of Power Sources, 194:369-380.
12. **Erdinc, O.**, Vural, B., Uzunoglu, M., Ates, Y., (2009). "Modeling and Analysis of an FC/UC Hybrid Vehicular Power System Using a Wavelet-Fuzzy Logic Based Load Sharing and Control Algorithm", International Journal of Hydrogen Energy, 34:5223-5233.

### **Bildiri**

1. Erdinc, O., Uzunoğlu, M., Vural, B., (2011). "Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri", Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011), Elazığ-TÜRKİYE, 5-7 Ekim 2011.
2. **Erdinç, O.**, Uzunoğlu, M., Boynueğri, A.R., (2011). "İstanbul'un Finans Merkezi Oluşum Sürecinde Enerji Verimliliği ve Altyapı Analizi", 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK 2011), Kocaeli-TÜRKİYE, 12-13 Mayıs 2011.
3. Vural, B., Uzunoglu, M., Dusmez, S., Ugur, E., **Erdinc, O.**, (2010). "Small Scale Test Bench Based Performance Analysis of a Fuel Cell/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System with an Improved Power Conditioning Unit", IEEE ICSET 2010, Kandy-SRI LANKA, December 6-9, 2010.
4. Eren, Y., Balıkcı, A., **Erdinc, O.**, Gorgun, H., Uzunoglu, M., Vural, B., "Dynamic modeling of PEM fuel cells for stand alone applications," International Conference on New Perspectives in Eco-Technologies and Eco-Economy, Istanbul, Turkey, May 10-12, 2010.
5. **Erdinc, O.**, Vural, B., Uzunoglu, M., (2009). "A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 383-386, Capri, Italy, June 9-11, 2009.
6. Ates, Y., Uzunoglu, M., **Erdinc, O.**, Vural, B., (2009). "A Wavelet-ADALINE Network Based Load Sharing and Control Algorithm for a FC/UC Hybrid Vehicular Power System," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 591-594, Capri, Italy, June 9-11, 2009.
7. Vural, B., Uzunoglu, M., **Erdinc, O.**, Onar, O. C., (2009). "A Dynamic Ultra-Capacitor Model for Vehicular Applications," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 595-598, Capri, Italy, June 9-11, 2009.
8. Ateş, Y., **Erdinç, O.**, Uzunoğlu, M., Vural, B., (2008). "Hibrit bir YH/UK Tasıt Güç

Sisteminin Yapay Sinir Ağları ile Kontrolü", Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Bursa, Kasım 2008, s.153-157.

9. **Erdinç, O.**, Uzunoğlu, M., Vural, B., (2008). "Genetik-Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Algoritması Kullanılarak Tasıt Uygulamaları için Hibrit YH/UK Güç Sisteminin Modellenmesi ve Analizi", Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Bursa, Kasım 2008, s.148-152.

10. **Erdinç, O.**, Ateş, Y., Uzunoğlu, M., Vural, B., (2008). "Dalgacık Dönüşümü/Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetim Stratejisi Kullanılarak Yakıt Hücresi/Ultra-kapasitörlü Hibrit Tasıt Sisteminin Modellenmesi ve Analizi", II. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi (UGHEK), Eskisehir, Haziran 2008, s. 148-166.

### **Proje**

1. Şebekeden Bağımsız Uygulamalar İçin Hibrit Bir Rüzgar Türbini/Fotovoltaik/Yakıt Hücresi/Batarya Sisteminin Optimizasyonu, Tasarımı ve Uygulaması, YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Proje No: 2011-04-02-DOP01, 4 Ocak 2011 – 4 Ocak 2013, Bütçe: 15.000 TL (Proje Araştırmacısı)

2. Bir Evin Elektrik İhtiyacının Karşılmasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması Durumunda Hem Yük Hem De Kaynak Değişkenliği Dikkate Alınarak Sistem Tasarımı ve Uygulaması, 2010-04-02-KAP04, 15 Mayıs 2010-15 Kasım 2011, Bütçe: 20.000 TL (Proje Araştırmacısı)

3. Elektrikli Taşıtlar için Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitör/Batarya Hibridizasyonunun Tasarımı ve Uygulaması, YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Proje No: 29-04-02-01, 4 Mayıs 2009 – 4 Mayıs 2011, Bütçe: 40.000 TL (Proje Araştırmacısı)

4. Yakıt Hücreli ve Ultra-Kapasitörlü Hibrit Taşıtlar için Enerji Yönetim Sisteminin Tasarım ve Uygulaması, TÜBİTAK Projesi (1001), Proje No:107M355, 1 Kasım 2007-1 Kasım 2010, Bütçe: 256.000 TL (Proje Bursiyeri)