



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ RÜZGÂR, GÜNEŞ VE HİDROJEN KAYNAKLI HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN ANALİZİ

ERKAN DURSUN

DOKTORA TEZİ

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Elektrik Eğitimi Programı

DANIŞMAN

Prof.Dr. Osman KILIÇ

EŞ-DANIŞMAN

Doç.Dr. Haluk GÖRGÜN

İSTANBUL, 2013

TEŞEKKÜR

Beraber çalışma fırsatını yakaladığım, tez süresince beni sürekli motive ederek çalışma performansımı arttıran, tezin her aşamasında beni destekleyen değerli danışmanım, hocam Sayın Prof.Dr. Osman Kılıç’a, bana her türlü bilgi ve desteği esirgemeyerek veren, UNIDO-ICHET bünyesinde çalışmalara katılmamı sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesinden hocam Sayın Doç.Dr. Haluk Görgün’e, “yenilenebilir enerji sistemleri” üzerine çalışmalarına önyak olan ve bu konuda ufkumu açan hocam Sayın Prof.Dr. Ahmet Korhan Binark’a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın temelini, UNIDO-ICHET (Birleşmiş Milletler Sinai Kalkınma Teşkilatı ve Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi) bünyesinde yapımına başlanan rüzgâr güneş ve hidrojen enerji sistemlerinden oluşan mobil ev projesi oluşturmaktadır. Bu projenin başlangıcından bitiş aşamasına kadar bütün çalışmalarına gönüllü olarak katıldım. Bu çalışmalarım sırasında her türlü imkan ve desteği sağlayan başta yakıt pili araştırma geliştirme ve eğitim bölümü yöneticisi Doç.Dr. Süha Yazıcı olmak üzere, Mehmed Eroğlu, Gülşah Yeğen Özalp, İbrahim Kuru ve Suat Sevensan’a sonsuz şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmam süresince varlığıyla beni destekleyen, tez içerisindeki görsel düzenlemelerde bana yardımcı olan sevgili eşim Meral’e ve biricik oğlum Toprak’a teşekkür ediyorum.

Erkan DURSUN

Eylül 2013

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Türkiye'de Enerji Durumu	3
1.2 Rüzgâr, Güneş ve Hidrojen Kaynaklı Hibrit Güç Sistemleri ile İlgili Literatür.....	4
1.3 Çalışmanın Amacı.....	6
1.4 Hibrit Rüzgâr Güneş Hidrojen Enerji Sistemleri	7
1.5 Rüzgâr Enerjisi	11
1.6 Güneş Enerjisi.....	18
1.7 Hidrojen Enerjisi.....	21
2 MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
2.1 Sistemde Kullanılan Rüzgâr Türbini.....	38
2.2 Sistemde Kullanılan Güneş Panelleri.....	39
2.3 Sistemde Kullanılan Yakıt Pili.....	40
2.4 Sistemin Diğer Bileşenleri	40
2.5 Sistemin Yük Analizi	42
2.6 Sistemin Güç Yönetim Algoritmasının Geliştirilmesi	49
2.7 Akü Gurubu Enerji Verimliliği	53
2.8 Şarj-Deşarj Akımları	56
3 GÜÇ YÖNETİM STRATEJİLERİ	58
4 HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN HİDROJEN ÜRETİM PERFORMANSININ MODELLENMESİ.....	64
4.1 Rüzgâr Türbininin Modellenmesi	64
4.2 Fotovoltaik Panelin Modellenmesi	70
4.3 PEM Tipi Elektrolizörün Modellenmesi	75
5 SONUÇLAR	85

ÖZET

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ RÜZGÂR, GÜNEŞ VE HİDROJEN KAYNAKLI HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN ANALİZİ

Şebekeden bağımsız rüzgâr ve güneş enerji sistemleri, kullanım kapasitelerinin düşük olmasından dolayı, üretilen enerjinin depolanması ile birlikte üçüncü bir yedek enerji sistemine ihtiyaç duyarlar. Rüzgâr türbini, fotovoltaiik paneller ve yedek enerji ünitesini proton geçirimli membran (PEM) tipi hidrojen yakıt pilinin oluşturduğu şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin, değişken meteorolojik şartlara ve değişken yüklerle hızlı cevap verebilecek güç akış kontrol algoritmalarına gereksinimleri vardır.

Bu tez çalışmasında, hibrit güç sisteminin akü grubu enerji verimliliği, üç farklı güç kontrol algoritması kullanılarak araştırılmıştır. Sistemde yer alan proton geçirimli membran tipi elektrolizör Matlab-Simulink ortamında modellenerek, sistemin hidrojen üretim kapasitesi hesaplanmış ve deneysel yolla üretilen hidrojen miktarı ile karşılaştırılmıştır.

Tez temel olarak dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tezin amacı, tez konusu ile ilgili literatürde yer alan örnekler, sistemi oluşturan elemanlar sırasıyla tanıtılıp, sistemin kurulum aşaması ve veri toplama-işleme düzeneği sırasıyla açıklanmıştır. İkinci bölümde, şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemini oluşturan elemanların matematiksel denklemleri ve eşdeğer devreleri verilmiştir. Üçüncü bölümde uygulama aşamasında kullanılan üç farklı güç kontrol algoritması tanıtılmış ve akü grubunun enerji verimliliği için en iyi sonucu veren algoritma diğerleri ile karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Bu kontrol algoritmasına göre akü grubunun enerji verimliliği % 85'e ulaşmıştır. Tezin sonuç bölümünde sistemin yıllık hidrojen üretim kapasitesi, Matlab-Simulink ortamında oluşturulan modelleme aracı ile bulunmuştur. Yapılan hesaplama göre sistemin yıllık hidrojen üretim kapasitesi, İstanbulun 2010 meteorolojik şartlarına göre 34,3 kg olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan model ile ölçülen gerçek değerler karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Yapılan karşılaştırmada ortalama hata karesi (MSE) $8.28e^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. Önerilen model, şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin değişken meteorolojik şartlardaki hidrojen üretim kapasitelerinin hesaplanabilirliği açısından örnek teşkil etmektedir.

Eylül 2013

Erkan DURSUN

ABSTRACT

ANALYSIS OF A STAND-ALONE WIND-SOLAR AND HYDROGEN HYBRID POWER SYSTEM

Due to its low capacity factors and variable meteorological conditions, stand-alone wind and solar energy systems require backup power system and power flow control algorithms, which is replaced by a proton exchange membrane (PEM) type hydrogen fuel cell. This study presents different power management strategies of a stand-alone hybrid power system. The system consists of photovoltaic (PV) panels, a wind turbine and a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). PV and wind turbine are the main supply for the system, and the fuel cell performs as a backup power source. Therefore, continuous energy supply needs energy storing devices. The state of charge (SOC), charge-discharge currents are affecting the battery energy efficiency. In this study, the battery energy efficiency is evaluated with three different power management strategies using Matlab-Simulink. PEM type electrolyzer are modeled in Matlab-Simulink environment, hydrogen production capacity of the system is calculated and compared with the amount of hydrogen produced experimentally. Thesis mainly consists of four main sections. In the first chapter, the examples in the literature, introduced elements that constitute the system, system installation and data collection phase of the assembly process is described. In the second chapter, system parts that make up the hybrid energy system established mathematical equations and equivalent circuits. In the third chapter, we have been introduced different power control algorithm that gives the best result for the battery's energy efficiency, as compared with others. This control algorithm, the battery's energy efficiency reached by 85%. An annual production capacity of hydrogen in the system was created in the Matlab-Simulink environment with the modeling tool.

September 2013

Erkan DURSUN

YENİLİK BEYANI

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ RÜZGÂR, GÜNEŞ VE HİDROJEN KAYNAKLI HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN ANALİZİ

Rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemlerinin bir arada kullanımı, enerji üretim performansının sürekliliği açısından önemlidir. Şebekeden bağımsız rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinden oluşan hibrit güç sistemleri tamamen meteorolojik şartlara bağlı olduklarından dolayı, bu meteorolojik şartların yetersiz olduğu durumlarda hibrit güç sistemi yük talebini karşılayamaz. Yükün ihtiyacı olan enerji akışını sürekli kılmak için sistemin yedek güç kaynağına ihtiyacı vardır. Bu çalışmada yedek güç kaynağı olarak proton geçirimli membran (PEM) tipi hidrojen yakıt pili kullanılmıştır. Sistemde kullanılan jel akülerin şarj durumları (state of charge SOC) ve şarj-deşarj akımları, akülerin enerji verimliliklerini etkilemektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, şebekeden bağımsız hibrit güç sisteminin akü grubu enerji verimliliği, Matlab/Simulink ortamında farklı güç kontrol algoritmaları kullanılarak araştırılmıştır. Bununla beraber sistemin yıllık hidrojen üretim kapasitesi Matlab/Simulink ortamında oluşturulan modelleme aracı ile bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen model ile farklı meteorolojik şartlar için hibrit güç sistemlerinin hidrojen üretim kapasitesi belirlenebilir. Yapılan çalışmanın, rüzgâr, güneş ve hidrojen kaynaklı hibrit enerji sistemleri alanında çalışacak olan akademisyenlere ve uygulayıcılara yönelik olarak yararlı olacağı düşünülmektedir.

Eylül, 2013

Prof.Dr. Osman KILIÇ

Doç.Dr. Haluk GÖRGÜN

Erkan DURSUN

SEMBOLLER

A	: rotorun süpürme alanı (m^2)
B	: ampirik katsayı
E₀	: Nernst gerilimi (V)
E_{kinetik}	: kinetik enerji (kgm^2/s^2)
F	: Faraday sabiti (96,485 C)
f_{PV}	: fotovolttaik ölçeklendirme faktörü (%)
$\bar{G}_T$	: fotovolttaik yüzeye düşen solar radyasyon (kWm^{-2})
$\bar{G}_{T,STC}$	: standart test kondisyonu altında fotovolttaik yüzeye düşen solar radyasyon ($1 kWm^{-2}$)
I	: yakıt pili yığınının çıkış akımı (mA)
I_L	: sınırlandırılan akım (mA)
i	: akım yoğunluğu (mA/m^2)
i₀	: alıp-verilen akım yoğunluğu (mA/m^2)
N_{hücre}	: yakıt pili yığınındaki hücre sayısı
P_{PV}	: fotovolttaik modülün çıkış gücü (kW)
ρ	: hava yoğunluğu (kg/m^3)
p_{H₂}	: hidrojen basıncı (bar)
p_{O₂}	: oksijen basıncı (bar)
R	: evrensel gaz sabiti (8.314J/mol)
R_{ohm}	: membran direnci (ohm/cm)
r	: rotor yarıçapı (m)
T_C	: fotovolttaik modül çalışma sıcaklığı (°C)
T_{C,STC}	: standart test koşulları altında fotovolttaik yüzey sıcaklığı (25 °C)

T_{el}	: hücre sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{yakıtpili}$	: yakıt pili çalışma sıcaklığı ($^{\circ}C$)
t_m	: membranın kalınlığı (mikron)
V	: rüzgâr hızı (m/s)
Y_{pv}	:fotovoltaik yüzeyin standart test kondisyonu altında nominal kapasitesi (kW)
λ	: kanat ucu hız oranı ($radyan/s$)
λ_m	: membranın su içeriği
ω_m	: rotorun açısal hızı
α_p	: sıcaklık katsayısı = $0.004\ ^{\circ}C^{-1}$
α	: yük transfer katsayısı
σ_m	: membranın iletkenliği (siemens/cm)

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
kWh	: Kilowatt saat
MEA	: Membran elektrot grubu
MW	: Megawatt
PEMFC	: Proton Geçirgen Membran Yakıt Pili
SOC	: Akü Doluluk Durumu (State-of-Charge)

ŞEKİL LİSTESİ

	SAYFA
Şekil 1.1 1980-2007 yılları arası dünyadaki ham petrol tüketimi ve rezervleri	1
Şekil 1.2 Ortalama ham petrol fiyatları	1
Şekil 1.3 Dünya nüfusundaki artış tahmini	2
Şekil 2.1 Rüzgâr-güneş ve hidrojen kaynaklı şebekeden bağımsız hibrit güç sistemi	33
Şekil 2.2 Hibrit güç sisteminin veri toplama ve işleme düzeneği	34
Şekil 2.3 Meteoroloji istasyonu	36
Şekil 2.4 Yüzey tipi ısı algılayıcı (termokupl)	36
Şekil 2.5 Akım ve gerilim transdüserleri	36
Şekil 2.6 Debi ve basınç sensörleri	37
Şekil 2.7 PEM tipi yakıt pilinin yazılım arayüzeyi	37
Şekil 2.8 Sistem için gerekli transdüserler ve sensörlerin yerleri	38
Şekil 2.9 Rüzgâr türbini çıkış güç karakteristikleri	39
Şekil 2.10 Hibrit güç sisteminde yer alan akü grubu	40
Şekil 2.11 Hibrit güç sisteminin otomasyon panosu	41
Şekil 2.12 Hidrojen tüpleri, valfler ve regülatörler	41
Şekil 2.13 Hidrojen ocağı, elektrolizör ve metal hidrid tankı	42
Şekil 2.14 Aralık ayında bir güne ait ortalama ısıma yoğunluğu değerleri	43
Şekil 2.15 Aralık ayına ait ortalama günlük rüzgâr hızı değerleri (10 m yükseklikte)	44
Şekil 2.16 Günlük ortalama enerji üretimi ve enerji talebi	45
Şekil 2.17 Yakıt pilinin akım-gerilim eğrisi	46
Şekil 2.18 Akü şarj-deşarj ömrü ve sayısı	48
Şekil 2.19 Hibrit güç sisteminin blok diagramı	49
Şekil 2.20 Mart 2009, sistemin günlük ortalama yük eğrisi	50
Şekil 2.21 PV panellerin çalışma yüzey sıcaklıklarını ölçen ısı çiftler	51
Şekil 2.22 Aylık ortalama PV panel çıkış güçleri	51
Şekil 2.23 Aylık ortalama rüzgâr türbini çıkış güçleri	52
Şekil 2.24 Yakıt pilinin bir güne ait çıkış gücü eğrisi	52
Şekil 2.25 Yakıt pilinin aylık ortalama çıkış güçleri	53

Şekil 2.26 Akü grubunun gerilimi ve akü doluluk durumu (SOC) arasındaki ilişkiyi gösteren eğri	54
Şekil 2.27 Akü grubunun yıllık doluluk durumu SOC (%)	55
Şekil 2.28 Akü grubunun yıllık şarj akımları	57
Şekil 3.1 Hibrit güç sistemi için güç yönetim stratejisi 1	59
Şekil 3.2 Hibrit güç sistemi için güç yönetim stratejisi 2	60
Şekil 3.3 Hibrit güç sistemi için güç yönetim stratejisi 3	60
Şekil 3.4 Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan kontrol algortiması	61
Şekil 3.5 Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan kontrol altsistemi	61
Şekil 3.6 Üç farklı güç kontrol algoritmasında akü grubu enerji verimliliği	62
Şekil 3.7 Üç farklı stratejiye göre yakıt pilinin devreye alınma sayısı ve elektrik enerjisi üretim miktarı	62
Şekil 3.8 Strateji 3'e göre yakıt pilinin yıllık çalışma zamanları	63
Şekil 4.1 SMSG' ün dq rotor referans eksenleri	65
Şekil 4.2 Sabit mıknatıslı senkron generatörün rotor referans düzleminde bir faz eşdeğer devresi	66
Şekil 4.3 q eksenine göre manyetik akı bloğu	68
Şekil 4.4 d eksenine göre manyetik akı alt bloğu	69
Şekil 4.5 dq eksenlerine göre manyetik akı blokları	69
Şekil 4.6 Rüzgâr türbini mekaniksel model bloğu	70
Şekil 4.7 Elektromanyetik moment bloğu	70
Şekil 4.8 Rotor açısını belirlemek için kullanılan Hall sensor bloğu	70
Şekil 4.9 Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi	71
Şekil 4.10 Fotovoltaik panellerin model ve altmodelleri	75
Şekil 4.11 Alkalın ve PEM tipi elektrolizörlerin karşılaştırmalı çalışma prensipleri	76
Şekil 4.12 PEM tipi elektrolizörün polarizasyon eğrisi ve basit eşdeğer devresi	77
Şekil 4.13 PEM tipi elektrolizörün Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan modeli	81
Şekil 4.14 PEM tipi elektrolizörün Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan altsistem modeli	81
Şekil 4.15 Hibrit güç sisteminin Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan modeli	82
Şekil 4.16 PEM tipi elektrolizörün aylık ortalama hidrojen üretim miktarı	83

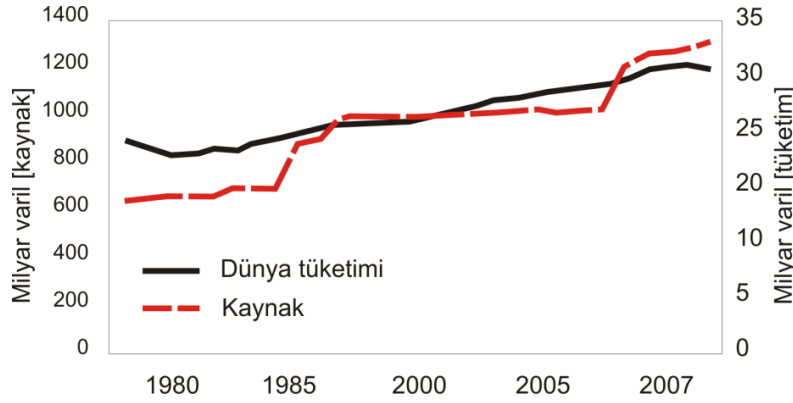
Şekil 5.1 Ocak ayı içerisindeki bir günlük deneysel ve modellenmiş hidrojen üretim miktarları	86
Şekil 5.2 Rüzgâr turbininin ve fotovoltaik panellerin çıkış güçlerine bağlı olarak hibrit güç sisteminin hidrojen üretim performansı	86

TABLO LİSTESİ

	SAYFA
Tablo 1.1 Amerikan standartlarına göre rüzgâr sınıfları	16
Tablo 1.2 IEC 61400-1 standartına göre rüzgâr türbin sınıfları	16
Tablo 1.3 Yakıt pili çeşitlerinin farklılıklarını gösteren tablo	25
Tablo 2.1 Hibrit güç sistemi için hesaplanan enerji tüketimi	33
Tablo 2.2 Rüzgâr-güneş ve hidrojen enerji sisteminin ölçülen girdi ve çıktı verileri	35
Tablo 4.1 Hibrit güç sisteminde kullanılan rüzgâr türbininin teknik özellikleri	68
Tablo 4.2 İki farklı güneş pili paketleme şekli için güneş pili veya modül sıcaklığının	74
Tablo 4.3 Farklı güneş pili tipleri için ideal faktör (A) ve band aralığı (EG) değerleri	74
Tablo 4.4 25°C, 1 atmosfer basınçta yakıtların alt ve üst ısı değerleri	83

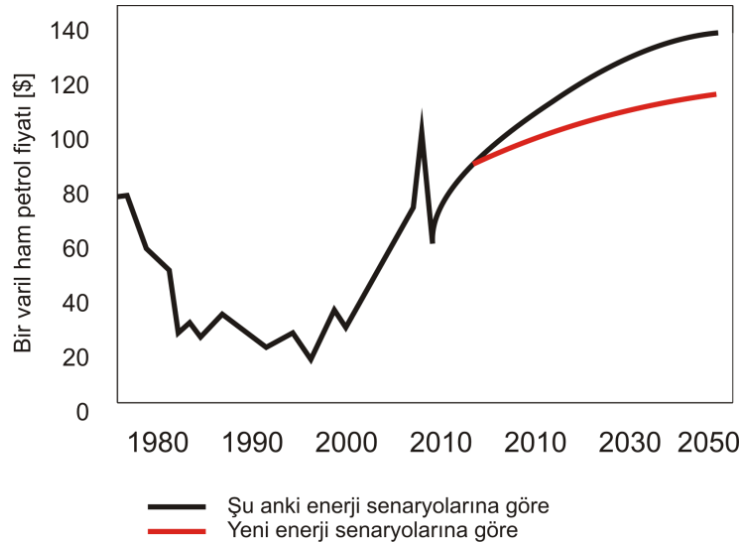
1 GİRİŞ

Enerji; güneş, rüzgâr gibi farklı formlarda doğada yer alabilmektedir. Ancak elektrik enerjisi farklı enerji formlarından dönüşüm yolu ile elde edilir ve bu sürecin ilk basamağını oluşturan kaynaklar çoğunlukla fosil yakıtlardır. Yapılan tahminler göstermiştir ki, yakın gelecekte dünyadaki kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıt rezervleri, enerji talebini karşılamada zorlanacaktır [1].



Şekil 1.1 1980-2007 yılları arası dünyadaki ham petrol tüketimi ve rezervleri [2]

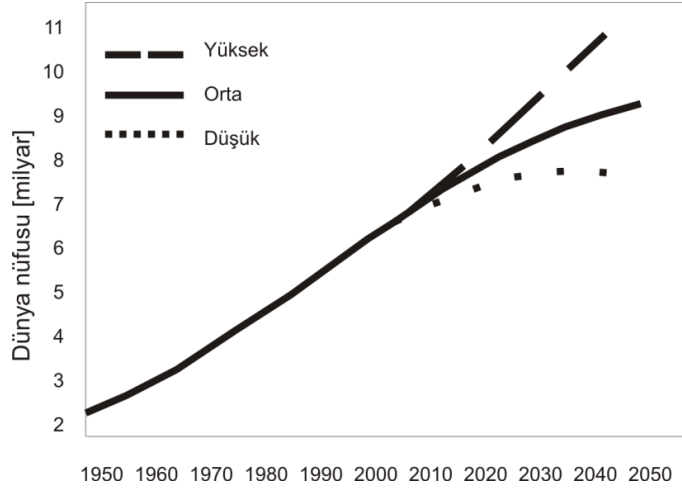
Enerji talebindeki artışa paralel olarak fosil yakıt birim fiyatları artmaktadır [3-4].



Şekil 1.2 Ortalama ham petrol fiyatları [5]

Fosil yakıtların yanması sonucunda CO_x , NO_x gibi zararlı gazlar çevreye salınmaktadır. Bu gazların salınımı iklim değişikliklerini tetiklemektedir [6]. 2000 yılında dünyada ki

insan nüfusu 6,1 milyar iken Birleşmiş Milletler (UN) raporuna göre 2050 de bu sayının % 47 artarak 8,9 milyara dayanacağı öngörülmüştür.

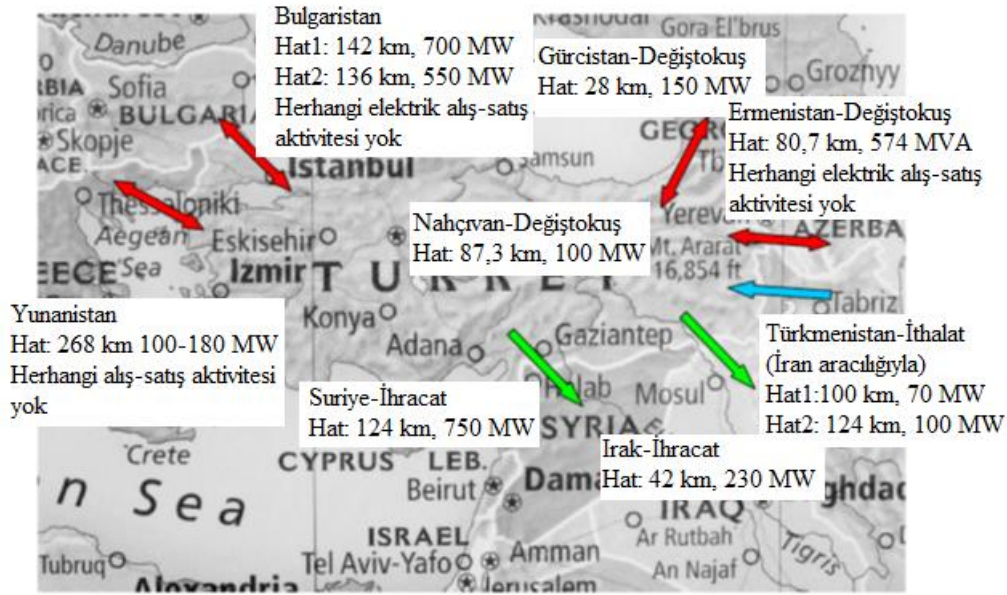


Şekil 1.3 Dünyanın tahmini nüfus artışı [7]

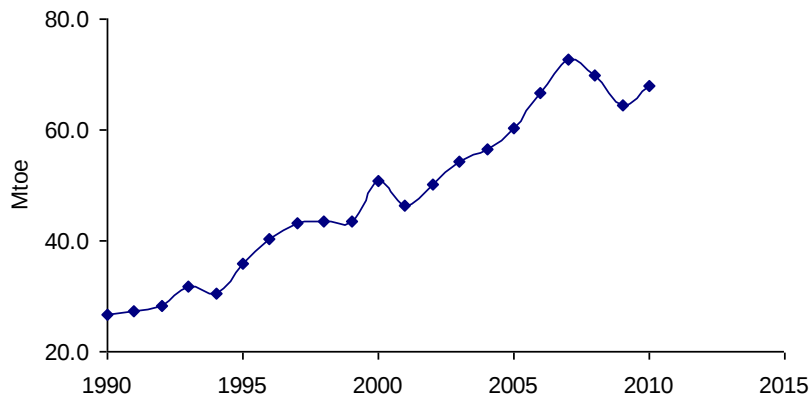
Bütün bu nedenlerden dolayı, çevreyle dost, yenilenebilir enerji sistemlerine olan talep son on yıldır artarak çoğalmaktadır [8]. Yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanım oranının artmasına paralel olarak yenilenebilir enerji sistemlerinin birarada çalışma alanları da artmaktadır. Bu çalışmaya örnek teşkil edecek şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemlerinden oluşan, hibrit bir sistem oluşturulmuştur. Rüzgâr türbini, fotovoltaiik paneller ve PEM tipi hidrojen yakıt pilinden oluşan şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin, değişken meteorolojik şartlara ve değişken yüklerle hızlı cevap verebilecek güç akış kontrol algoritmalarına gereksinimleri vardır. Bu çalışmada, literatürdeki uygulamalardan farklı olarak şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hidrojen kaynaklı hibrit enerji sistemi oluşturularak akü grubu üç farklı güç kontrol sistemleri ile analiz edilip, akü grubunun enerji verimliliği araştırılmıştır. Çalışmada sunulan kontrol algoritması ile akü grubunun enerji verimliliği % 85'e ulaşmıştır. Ayrıca sistemde yer alan elektrolizörün hidrojen üretim kapasitesi, Matlab-Simulink ortamında oluşturulan model aracılığıyla bulunmuş ve deneysel yolla üretilen değerle karşılaştırmalı performansı ortaya konulmuştur. Yapılan hesaplamalara göre sistemin yıllık hidrojen üretim miktarı 34,3 *kg* dır.

1.1 Türkiye'de Enerji Durumu

2011 yılı başı verilerine göre, Türkiye'nin toplam enerji tüketimi 109,3 milyon ton eşdeğer petrol olarak gerçekleşmiştir. Elektrik üretimi 2011 yılında, bir önceki yıla göre % 8,78 artışla 228,431 milyar *kWh*'ye, elektrik tüketimi ise % 8,19 artışla 229,344 milyar *kWh*'ye varmıştır [9-11]. Türkiye'nin enerji talebinin artması ile birlikte, dış ülkelere olan enerji bağımlılığı da artmaktadır. Türkiye, enerji iletim ve dağıtımının küreselleşmesine paralel olarak, komşu ülkeleri ile olan enerji alışverişini sürdürmektedir (Şekil 1.4)



Şekil 1.4 Türkiye'nin komşu ülkeleri ile enerji alış-veriş akışı



Şekil 1.5 Yıllara göre Türkiye'nin toplam enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark

Türkiye'nin toplam kurulu güç kapasitesi, 2010 yılı itibari ile 49,562 MW tır. Bu kurulu kapasitenin % 65'ini oluşturan santrallerin yakıtları, hidrokarbon içeren kömür, petrol ve doğal gaz gibi doğal enerji kaynaklarıdır [12-13]. Türkiye, artan elektrik enerjisi talebini karşılayabilmek ve bulunduğu coğrafya üzerinde enerji bağımsızlığını arttırmak için Rusya federasyonu ile birlikte bir antlaşma imzalamıştır. Bu antlaşma ile Türkiye'nin ilk nükleer santralinin, Mersin Akkuyu bölgesine kurulması çalışmalarına başlanmıştır. Bunun yanısıra, Türkiye ile Japonya arasında imzalanan antlaşma ile Türkiye'nin ikinci nükleer santrali Sinop ilinde kurulacaktır. Ayrıca Türkiye Enerji Bakanlığı bünyesinde “kaya gazı” çalışmalarına başlamıştır. ABD Enerji Bilgi İdaresi (U.S. Energy Information Administration) tarafından yayımlanan 2011 tarihli “Dünya Kaya Kaynakları (World Shale Gas Resources)” başlıklı raporuna göre Türkiye'nin çıkarılabilir kaya gazı rezervleri yaklaşık 424 milyar m³ düzeyindedir. Türkiye'nin bugünkü yıllık doğalgaz tüketiminin 46 milyar m³ olduğu düşünülürse, bu değer Türkiye'nin yaklaşık 9-10 yıllık doğalgaz tüketimine denk düşmektedir [14-24]. Bütün bu veriler gözönüne alındığında, Türkiye'nin sürdürülebilir, çevreyle dost ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyacı, enerji tüketim ihtiyacına olan artışla paralellik göstermektedir. Yenilenebilir enerji ihtiyacının artmasına paralel olarak yenilenebilir enerji sistemlerinin hibrit çalışma alanlarıda artmaktadır. Kaynağını rüzgâr ve güneşten alan yenilenebilir enerji sistemlerinin kapasite faktörleri düşüktür. Bunun öncelikli sebebi, rüzgâr hızının ve güneş radyasyonunun, tamamen coğrafi-meteorolojik şartlara bağlı olmasıdır. Enerji akışının sürekli olabilmesi ve güvenilirliğinin artırılması için şebekeden bağımsız hibrit güç sistemlerinde üçüncü bir yedek güç sistemine ihtiyaç vardır. Bu ihtiyacı karşılaması için hidrojen yakıt pilleri, diğer yedek güç sistemlerine göre iyi bir alternatif olarak gözükmektedir. Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, doğal bir yakıt olmayıp birincil enerji kaynaklarından üretilir. Gelişmiş ülkeler, dünyanın artan enerji gereksinimini karşılayacağı bir gelecekte hidrojen kullanımı için yoğun bir şekilde teknolojik AR-GE programları ve çalışmaları yürütmektedirler [25-27].

1.2 Rüzgâr, Güneş ve Hidrojen Kaynaklı Hibrit Güç Sistemleri ile İlgili Literatür

“Hibrit güç sistemi” kavramının literatüre girmesi, uzay araçlarının ve uzay istasyonlarının güç sistemi çalışmaları ile başlamıştır. Bu tür çalışmalarda genel olarak

güneş ve yakıt pilleri hibrit olarak kullanılmıştır [28]. Daha sonraları şebekeden uzak telekomünikasyon sistemleri için hibrit rüzgâr ve güneş sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Akerlund, çalıştığı telekomünikasyon firması için güneş pili, rüzgâr türbini ve dizel jeneratörden oluşan hibrit güç sistemi tasarlamış ve uygulamıştır [29]. Norton ve Christopher, rüzgâr türbini ve kapalı çevrim turbo jeneratörü hibrit çalıştırmıştır [30]. Kawamoto, şebekeden bağımsız bir telekomünikasyon sistemi için güneş pili, rüzgâr türbini ve dizel jeneratörünü hibrit çalıştırıp, gerekli akü gurubunun kapasitesini hesaplamıştır [31]. Elektronik Araştırma Enstitüsünden (ERI) Mona N. Eskander ve arkadaşları hibrit fotovoltaiik, rüzgâr türbini ve yakıt pili güç sisteminin bulanık mantık kullanarak sistemin enerji akışını yönetmişlerdir [32]. Józef Paska ve Piotr Biczal rüzgâr türbini ve hidrojen yakıt pilinden oluşan hibrit sistemde, yedek güç olarak kullanılan yakıt pilinin dinamik kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [33]. D.B. Nelson ve arkadaşları şebekeden bağımsız rüzgâr türbini, fotovoltaiik panel ve yakıt pilinden oluşan hibrit sistemin sistem planlamasını ve maliyet analizini gerçekleştirmişlerdir [34]. Rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemlerinin bir arada kullanımı ile ilgili uluslararası dergiler, kongre, konferanslar ve yapılan tezlerde konu 4 ana başlıkta toplanmıştır.

1. Enerji sistemini oluşturan elemanların kapasitelerinin belirlenmesi, sistem planlama (Unit Sizing)
 - a-Teknik analiz
 - b-Maliyet analizi
2. Modelleme
3. Kontrol
4. Optimizasyon

Kimi zaman bu dört ana başlığın içiçe geçtiği çalışmalar da bulunmaktadır. Sistem planlama kısmında sistemin herbir parçasının tanımı yapılarak o parçanın girdi-çıkıtları incelenmiş ve yüke göre boyutlandırılması yapılmıştır. Örneğin 3 yıllık ortalama rüzgâr hızı ölçümleri alınarak rüzgâr türbini çıkış güçleri hesaplanmıştır. Bu hesaplara göre talep edilen gücü karşılayıp karşılayamadığına bakılmıştır. Akülerin kapasiteleri hesaplanmış ve sistemin analizi yapılmıştır. Bu analizler teknik ve mali olmak üzere iki

kısımda incelenmiştir. Modelleme kısmında genellikle sistem parçalarının dinamik modelleri Matlab Simulink ortamında oluşturulmuş ve çalıştırılmıştır. Bu modellere gerçek veriler uygulanarak simule edilen verilerle karşılaştırılması yapılmıştır. Kontrol kısmında sistemin PID ve bulanık mantık kontrolü yapılmıştır. Bu kontrol genellikle hidrojen depolanması durumlarında kullanıldığı görülmüştür. Optimizasyon kısmında 3 ana başlıkta çözüme gidildiği gözlenmiştir [29-34].

En küçük kareler methodu (The least square method)

Güç kaynağı kayıp tahmini yöntemi (Loss of power supply probabiltiy -LPSP)

Ödün verme methodu (The trade-off method)

1.3 Çalışmanın Amacı

Rüzgâr türbini ve fotovoltaiik panellerden oluşan hibrit güç sistemlerinin ürettiği elektrik enerjisinin, depolanması gerekmektedir. Çünkü rüzgâr türbini ve fotovoltaiik panellerin kapasite faktörleri düşüktür. Ayrıca, yük tarafına doğru olan enerji akışının sürekliliğinin bozulmaması için, sürdürülebilir enerjide önemli bir yer tutan, çevreye zararsız üçüncü bir yedek güç sistemine ihtiyaç olduğu kadar, yük talebine hızlı cevap verebilecek kontrol algortimasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, rüzgâr türbini ve fotovoltaiik panellerden üretilen elektrik enerjisi akü grubunda depolanmaktadır. Talep edileden fazla üretilen elektrik enerjisi, bir elektrolizörün çalışmasında kullanılarak hidrojen üretilmektedir. Üretilen hidrojen, proton geçirgen membran yakıt pilinde (PEMFC) kullanılarak, tekrar elektrik enerjisine dönüştürölmektedir. Bu tez çalışmasında, sistemin sürekli değişen güç akışının, farklı kontrol algoritmaları ile yönetilmesi ve sistem için en uygun algoritmanın akü grubunun enerji verimliliği gözetilerek oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun yanısıra MATLAB/Simulink modelleme aracı kullanılarak hibrit güç sisteminin hidrojen üretim miktarının hesaplanması amaçlanmıştır. Oluşturulan model ile rüzgâr, güneş ve hidrojen kaynaklı hibrit güç sistemlerinin değişen coğrafi ve meteorolojik şartlardaki hidrojen üretim performansları hesaplanabilecektir.

1.4 Hibrit Rüzgâr Güneş Hidrojen Enerji Sistemleri

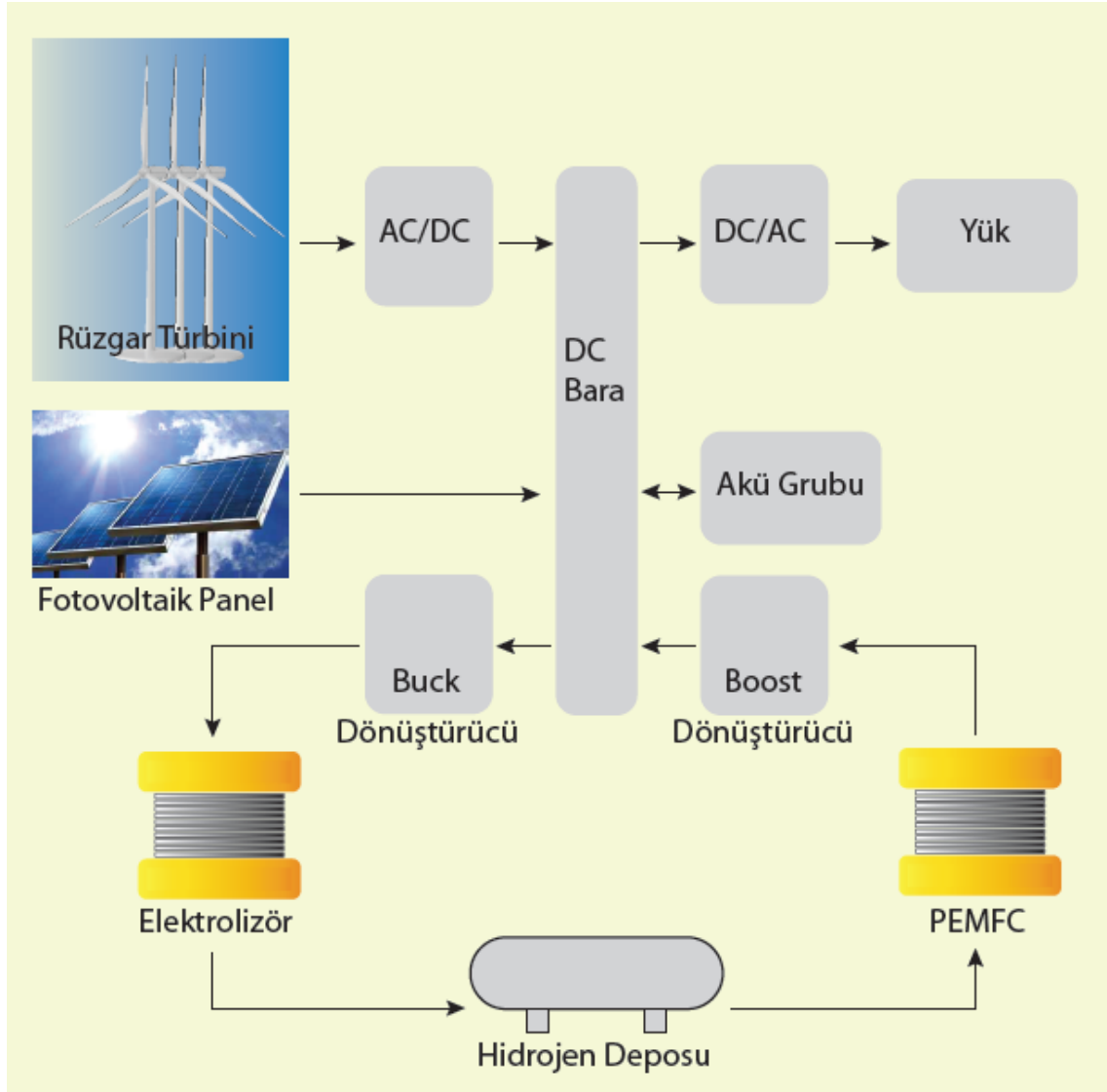
Rüzgâr güneş ve hidrojen entegrasyonunu iki ana başlıkta değerlendirmek gerekir. Birincisi şebekeden bağımsız (off-grid) sistemler, ikincisi şebekeye bağlı (on-grid) sistemlerdir. İster şebekeye bağlı olsun ister şebekeye bağlı olmasın geleneksel elektrik enerjisi üretim santralleri ile karşılaştırıldıklarında şebekeden bağımsız enerji sistemlerinin avantajları;

- Sürdürülebilir olması
- Daha küçük yapıda ve yüke yakın kurulum imkanı sağlaması
- Küresel ısınmayı etkileyen sera gazı salınımının yok denecek kadar az olması
- Dış ülkelere olan enerji bağımlılığını azaltmasına katkıda bulunması [35-36].

olarak verilebilir.

1.4.1 Şebekeden bağımsız sistemler (Stand Alone-Off Grid)

Şebekenin olmadığı yada ulaşmadığı yerler için kullanılan sistemlerdir. Bu tür sistemlerde enerji, aküler ya da süper kapasitörlerde depolanıp ihtiyaç anında tüketilir. Rüzgâr güneş ve hidrojen enerji sistemleri birbirinden bağımsız çalışabilirler. Şebekeye bağlı olmadığı için frekans uyum sorunları ile karşılaşmaz. Bağlantı sistemleri basittir. Bu tür sistemlerin dezavantajlarına baktığımızda, enerji sistemlerinin voltaj uygunluk problemleri ile karşılaşıldıkları görülmektedir. Sistem içerisinde yer alan elemanların çıkış gerilimleri eşit tutulmak zorundadır [37]. Şebekeden bağımsız sistemlerde en önemli eleman DC/AC çevirim yapan eviricidir. Sonuçta amaç yüklerin temiz ve kesintisiz bir enerji ile beslenmesidir. Bu nedenle AC yükten önceki son eleman olan eviricinin çok iyi seçilmesi gerekmektedir. Eviricide oluşacak herhangi bir arıza durumunda yükün enerji iletimi duracağından sistem devre dışı kalacaktır. Bir diğer önemli dezavantaj ise çok fazla güç elektroniği elemanına ihtiyaç vardır. Bu nedenle maliyet artmaktadır. Ayrıca akülerin ekonomik ömürleri çok olmadığı gibi maliyetleri de fazladır [38-41].

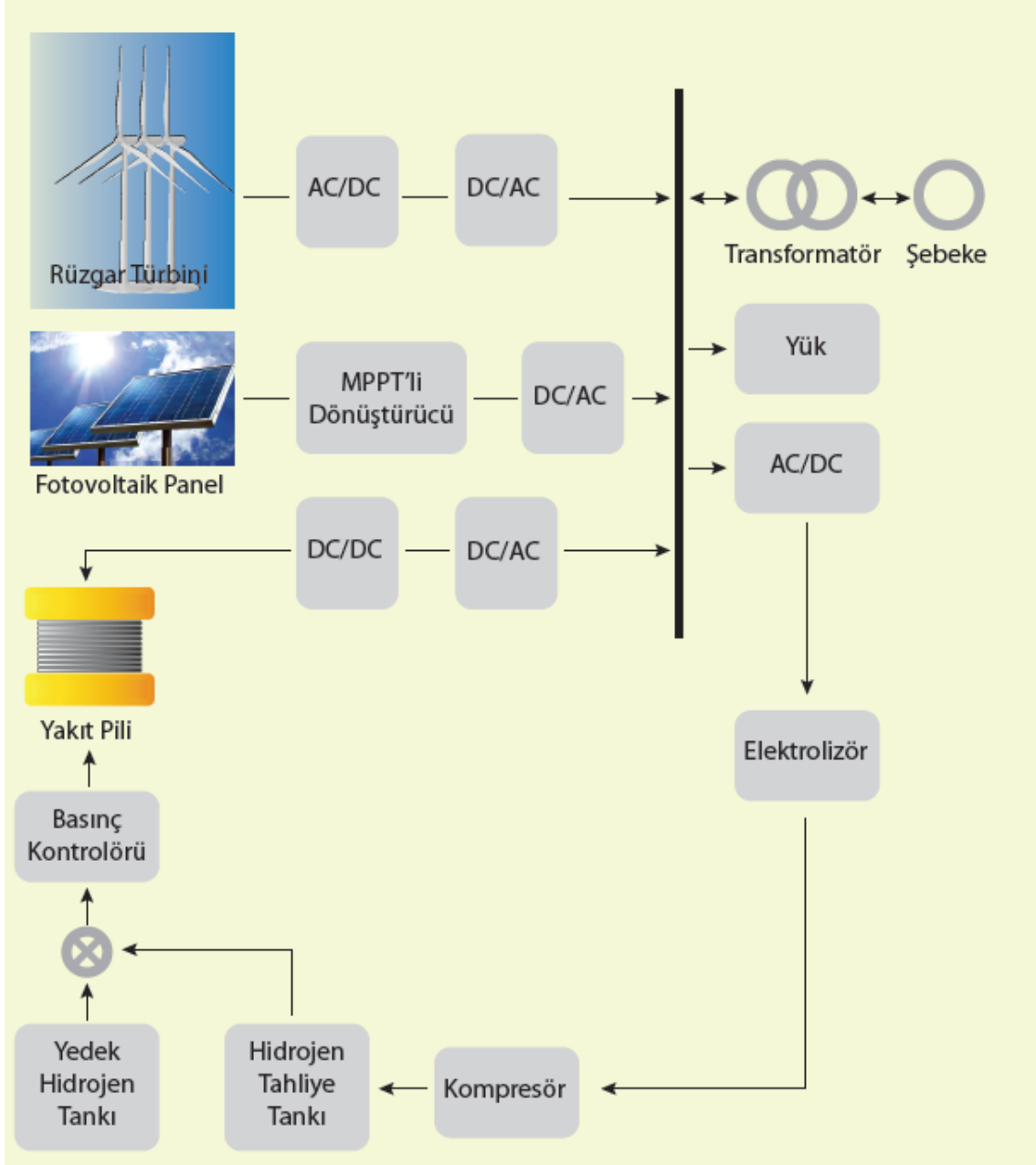


Şekil 1.6 Şebekeden bağımsız rüzgâr-güneş-hidrojen enerji dağıtım sistemi [42]

Rüzgâr türbini ile güneş pillerinin performansları büyük oranda meteorolojik şartlara bağlı olduğundan yeteri kadar rüzgâr ve güneş olduğu sürece enerji akışı devam edecektir. Şekil 1.6’da görüldüğü gibi şebekeden bağımsız bir sistemde rüzgâr türbini ve güneş pillerinden elde edilen enerjinin fazla olduğu durumlarda, buck doğrultucu üzerinden elektrolizörün hidrojen üretmesi sağlanır ve üretilen hidrojen kullanılmak üzere depolanır [43]. Rüzgâr türbini ve güneş pillerinin yetmediği durumlarda ise yakıt pili üzerinden boost doğrultucuya oradan da *DC* baraya enerji akışı sağlanır. Böylelikle tam anlamıyla şebekeden bağımsız kendi kendine yetebilen kapalı çevrim bir sistem elde edilmiştir.

1.4.2 Şebekeye bağılı sistemler (On grid)

Şebekeye bağılı rüzgâr güneş ve hidrojen enerji sistemleri daha büyük güç talepleri için kullanılırlar. Güvenilirliği şebekeden bağımsız sistemlere göre daha yüksektir. Bu tür sistemlerin, bağılı oldukları şebekenin frekansına uyumlu çalışmaları gerektiğinden frekans uyum sorunu ile karşılaşılabilir [44]. Frekans uyum sorunu ile karşılaşmamak için kaliteli güç elektroniği elemanları kullanmak gerekmektedir. Mevsimsel yük değişkenliği dikkate alındığı için şebekeye bağılı sistemler, şebekeden bağımsız sistemlere göre daha verimlidir. Şebekeden bağımsız sistemler gibi enerjiyi depolama sorunu yoktur. Üretilen enerji her zaman kullanılır. Bu tür sistemlerin ekonomik ömrü daha fazladır [45].



Şekil 1.7 Şebekeye bağlı rüzgâr-güneş-hidrojen enerji dağıtım sistemi

Küresel çevre kaygıları ve enerji ihtiyacının artışı yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımını arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin birarada kullanımı hidrojen üretimi açısından çok önemlidir. Çünkü; tamamen yerli, temiz ve yenilenebilir enerji ile hidrojen üretimi yapılmaktadır. Hidrojen üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi suyun elektrolizi yöntemidir. Suyun elektrolizi için, 1 atmosfer basınçta ve 25°C de, ideal olarak $1,23\text{ V}$ yeterlidir [46]. Uygulamada bu değer $1,9\text{ V}$ civarındadır. Bu tür sistemlerde, elektroliz için gerekli olan DC gerilim yenilenebilir

enerjiden karşılanır. Rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemlerinin entegrasyonunda, enerji ihtiyacına göre sisteme dahil olacak elemanların seçimine dikkat edilmelidir. Örneğin şebekeden bağımsız bir sistemde şebeke bağlantısı olmayacağı için rüzgâr türbinin generatörü DC seçilebilir. Hidrojen yanıcı bir gaz olduğu için gerekli güvenlik önlemlerinin alınması gereklidir. Ayrıca hidrojen, standart basınç ve sıcaklıkta havadan 14 kez daha hafif bir gaz olduğundan dolayı [47], hidrojen ile ilgili bağlantı elemanlarının kaliteli olması gerekir.

1.5 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgârın oluşmasındaki temel ilke, sıcak havanın yoğunluğunun soğuk havadan az olması nedeniyle yükselmesi ve bu şekilde havanın yer değiştirmesinden kaynaklanan akımlardır. Sıcak hava ile soğuk havanın yer değiştirmesinin asıl sebebi güneştir. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinin asıl kaynağı güneştir [48]. Rüzgâr enerjisi bu bağlamda kinetik enerji ile ifade edilir. Kinetik enerji, hareket eden cisimlerin sahip olduğu enerji şeklindedir. Bir cismin kinetik enerjisi ne kadar büyükse cisim o kadar büyük iş yapar.

$$E_{kinetik} = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1.1)$$

V : hız

$$m = \rho AVt \quad (1.2)$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (1.3)$$

m : V hızında A süpürme alanından geçen havanın kütlesi (kütle akış oranı- mass flow rate)

ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3)

Deniz seviyesindeki hava yoğunluğu 1 atm basınçta (14,7 psi) ve 15,555 °C’ de 1,225 kg/m^3 ’tür.

R : gaz sabiti =8,3145 ($J/mol.K$)

T : sıcaklık ($^{\circ}K$)

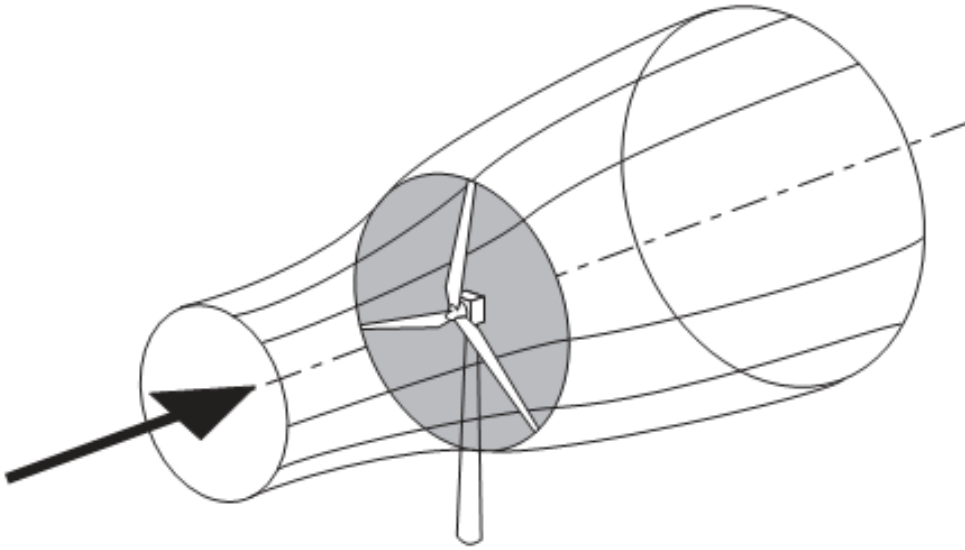
A : rüzgâr türbini kanatlarının süpürme alanı (m^2)

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1.4)$$

D : rotor çapı (m)

V : rüzgâr hızı (m/s)

t : zaman (s)



Şekil 1.8 Rüzgâr türbininin ön ve arkasında oluşan hava akımları [49]

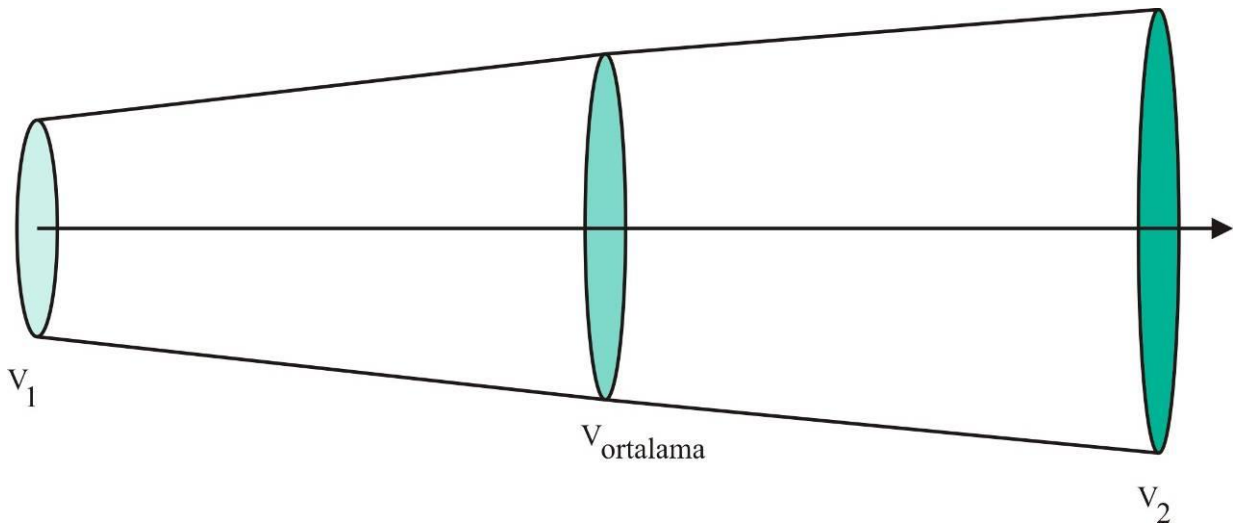
$$E_{kinetik} = \frac{1}{2} \rho A V V^2 t \quad (1.5)$$

olduğuna göre enerjiyi zamana bölersek.

$$P_R = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (1.6)$$

Yukarıdaki formülde yer alan, C_p Albert Betz' in ortaya koyduğu Betz yasasına göre maksimum değeri 0,593 olan değişken değerdir.

Rüzgâr türbinleri rüzgârı sektirip saptırdığından dolayı rüzgârın tüm enerjisinin alması mümkün değildir. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr potansiyel enerjisinin ancak %59,3'ünü yakalayabilirler. İdeal bir rüzgâr türbini rüzgârın hızını $2/3$ oranında düşürmektedir. Özetle bu durum rüzgârın kinetik enerjisinin ancak $16/27$ yani %59' unun rüzgâr türbini ile mekanik enerjiye dönüştürülebileceğini anlatan Betz kanunu ile de açıklanmaktadır [50-52].



Şekil 1.9 Betz yasasına göre rüzgâr türbinin her iki tarafındaki hava akım hızları [48]

$$E = \frac{1}{2} m(V_1^2 - V_2^2)t \quad (1.7)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho A V(V_1^2 - V_2^2)t \quad (1.8)$$

$$V_{avg} = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (1.9)$$

$$E = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)t \quad (1.10)$$

$$E = \frac{1}{4} \rho A V_1^3 \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \right] t \quad (1.11)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} \quad (1.12)$$

$$E = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A V_1^3 t \right) \quad (1.13)$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.5925925926 \quad (1.14)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (1.15)$$

C_p (betz limit) için kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$C_p = (0,000739V^3 + 0,02364V^2 - 0,26584V + 1,2934) [1 - 44,292e^{(-1,0762V)}] \quad (1.16)$$

Veya

$$C_p = -0,2664 + 0,6051\lambda - 0,5196\lambda^2 + 0,2257\lambda^3 - 0,0509\lambda^4 + 0,0058\lambda^5 - 0,0003\lambda^6 \quad (1.17)$$

ve

$$\lambda = \frac{r\omega_m}{V} \quad (1.18)$$

ile verilir. Eşitlik 1.18’de,

λ : kanat ucu hız oranı (tip speed ratio)

r : rotor yarıçapı (m)

ω_m : rotorun açısal hızı (rad/sn) (d/dk) [51-53].

Rüzgâr türbininin kule yüksekliği ile o yükseklikteki rüzgâr hızı arasındaki ilişki aşağıdaki formülle bulunur.

$$\left(\frac{V}{V_0} \right) = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (1.19)$$

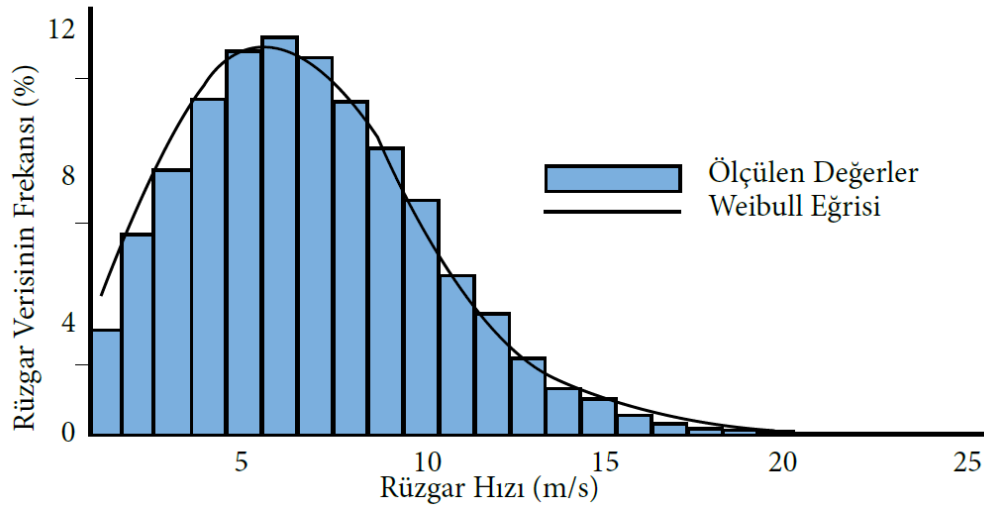
$$\left(\frac{P}{P_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3\alpha} \quad (1.20)$$

Burada H_0 yüksekliğindeki rüzgâr hızı V_0 , H yüksekliğindeki rüzgâr hızı V dir.

α : sürtünme katsayısıdır.

α , örneğin pürüzsüz katı yüzey için 0,10; durgun su için 0,10; uzun binalardan oluşan büyük bir şehir için 0,40; ağaçlık bir bölge için 0,25 tir. Açık alan için genellikle $\alpha = 1/7$ kullanılır [53].

Herhangi bir bölgeye rüzgâr türbini yerleştirilecek ise o bölgenin rüzgâr haritasının çok iyi çıkarılması gerekmekte ve o bölgenin rüzgâr hızı dağılımının sistem güvenilirliğini sağlaması gerekmektedir. Bunun için bölgede bir yıl rüzgâr ölçümleri yapılır. Güvenilirlik, herhangi bir parçanın, ürünün, sistemin veya alt sistemin belirli şartlar altında istenilen emniyet düzeyinde, belirlenen süre boyunca fonksiyonunu hatasız yerine getirme olasılığıdır. Bu olasılık için genellikle weibull dağılımları kullanılır [50].



Şekil 1.10 Rüzgâr hızına göre oluşturulan weibull eğrisi

Rüzgâr, esme hızına göre çeşitli sınıflara ayrılır. Amerikalılar rüzgârı yedi sınıfa ayırırken avrupalılar dört sınıfa ayırmıştır (Tablo 1.1 ve Tablo 1.2). Şekil 1.1’de Türkiye’nin rüzgar haritası verilmiştir.

Tablo 1.1 Amerikan standartlarına göre rüzgâr sınıfları [54]

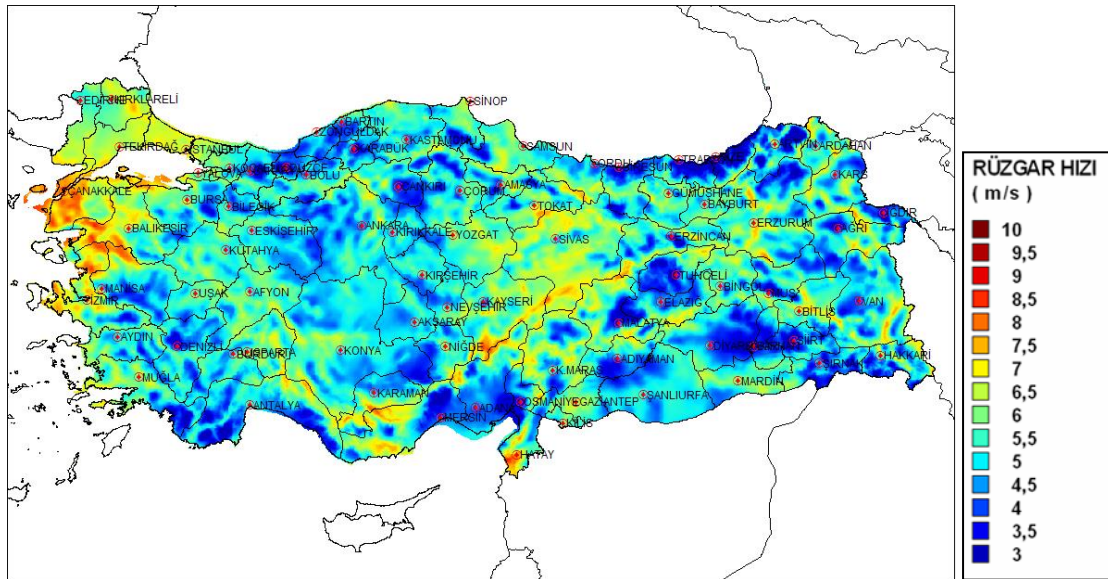
Rüzgâr Sınıfı	Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu (W/m^2)		Rüzgâr Hızı (m/s)	
	10 m yükseklikte	50 m yükseklikte	10 m yükseklikte	50 m yükseklikte
1	0 – 100	0 – 200	0,0 – 4,4	0,0 – 5,6
2	100 – 150	200 – 300	4,4 – 5,1	5,6 – 6,4
3	150 – 200	300 – 400	5,1 – 5,6	6,4 – 7,0
4	200 – 250	400 – 500	5,6 – 6,0	7,0 – 7,5
5	250 – 300	500 – 600	6,0 – 6,4	7,5 – 8,0
6	300 – 400	600 – 800	6,4 – 7,0	8,0 – 8,8
7	400 – 1000	800 – 2000	7,0 – 9,4	8,8 – 11,9

Tablo 1.2 IEC 61400-1 standartına göre rüzgâr türbin sınıfları

IEC Rüzgâr Türbin Sınıfları	1	2	3	4
Referans Rüzgâr Hızı, V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	30
Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı, V_{ort} (m/s)	10	8,5	7,5	6
50 Yıllık Fırtına Hızı, $1,4 V_{ref}$ (m/s)	70	59,5	52,5	42
1 Yıllık Fırtına Hızı, $1,05 V_{ref}$ (m/s)	52,5	44,6	39,4	31,5

Not: Ölçüm 10 dakika aralıklarla alınmıştır ve hava yoğunluğu $1,225 \frac{kg}{m^3}$ tür.

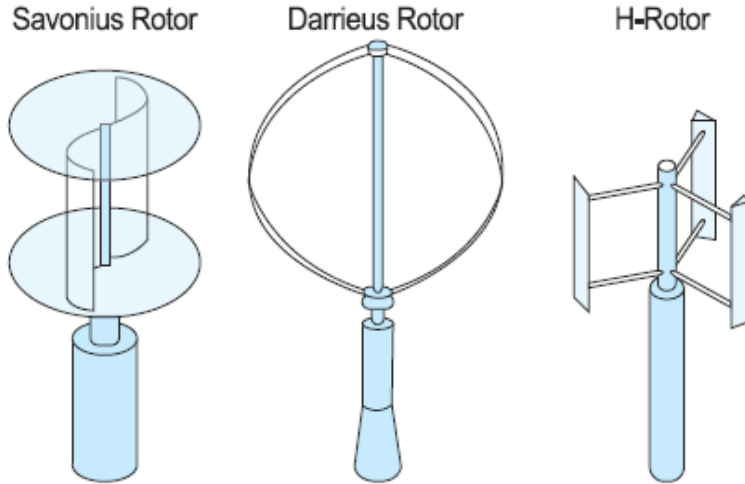
Türkiye rüzgâr hızı ortalaması 3 ile 7 m/s arasında değişmektedir.



Şekil 1.11 Türkiye geneli ortalama rüzgâr hız dağılımı (50 metre) [56]

1.5.1 Rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri sıcak ve soğuk havanın yer değiştirmesi ile oluşan rüzgârın kinetik enerjisini önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine çeviren elektromekanik enerji dönüşüm temelli sistemlerdir [57]. Rüzgâr türbinleri eksenlerinin zemine göre yatay ve dikey olması durumlarına göre ikiye ayrılır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri savanius, darrieus ve H tipi olmak üzere üçe ayrılır. Rüzgâr türbinlerini güçlerine göre iki kısma ayırmak gerekir. Birincisi küçük güçlü rüzgâr türbinleri ikincisi büyük güçlü rüzgâr türbinleri. Küçük güçlü rüzgâr türbinleri 50 W ile 10 kW arası güçlerde üretilirler. Kanat çapları 1-7 metre arasındadır. Kule yükseklikleri maksimum 30 metredir. Kullanılan generatör tipleri DC ve sabit mıknatıslı generatörlerdir. Bu rüzgâr türbinleri şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantı sistemleri olmak üzere iki durumda da kullanılabilir. Büyük güçlü rüzgâr türbinleri 500 kW ile 7 MW arası güçlerde imal edilirler. Kanat çapları 10 ile 100 metre arasındadır. Kule yükseklikleri 250 metreye kadar çıkabilmektedir. Asenkron veya senkron generatör kullanılır. Açıkdeniz (offshore) sistemlerde kullanıma uygundur. Şebeke bağlantılı sistemlerdir.



Şekil 1.12 Dikey eksenli rüzgâr türbin çeşitleri [48]



Şekil 1.13 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri [48]

Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, generatör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden (pal) oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki generatöre aktarılır [52-59]. Temel olarak bir rüzgâr türbinine asenkron, senkron ve doğru akım generatörlerinden herhangi biri bağlanabilir [60-66].

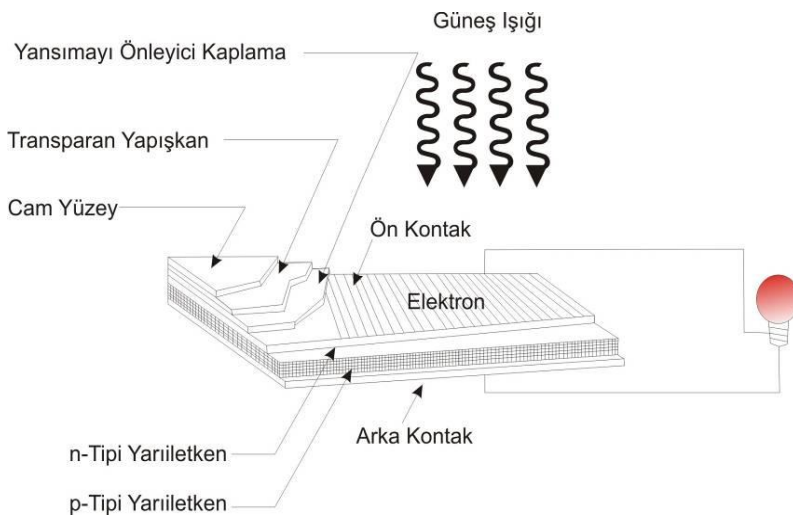
1.6 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, diğer bütün enerjilerin temelidir. Fosil yakıtlar, rüzgâr, hidroelektrik, biyogaz, termik, dalga gibi diğer tüm enerji türleri güneş enerjisinden türerler. Doğal bir füzyon reaktörü olan güneşte; her bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle karşılığı 386 milyon EJ (eksa joule) enerji açığa çıkmaktadır [67]. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Bu enerji, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır.

1.6.1 Fotovoltaik enerji sistemleri

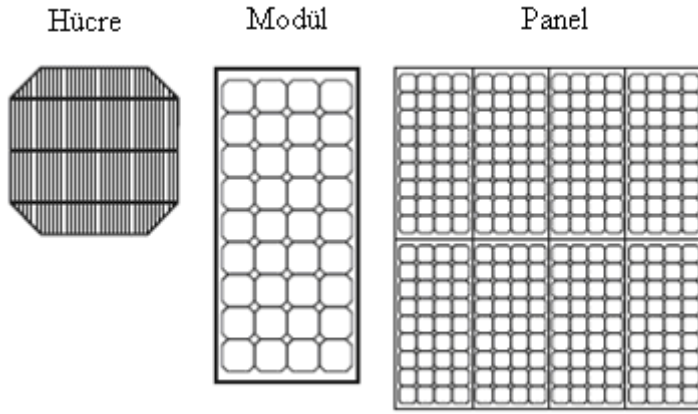
Güneş pilleri (güneş gözeleri), güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik (PV) aygıtlardır. Bir PV pil fiziksel olarak klasik p-n diyota çok benzer. Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda çeşitliğe rağmen ticari olarak piyasada kristal silisyum (C-Si), amorf silisyum (A-Si), Kadmiyum-Tellür (Cd-Te) ve Bakır-İndiyum/Galyum-Diselenyum (CIGS, CuInGaSe₂) güneş pilleri bulunmaktadır ve

modül bazında büyük alanlarda elde edilen verimler, güneş pili boyutunda küçük alanlarda elde edilen verimlerden % 1-4 daha azdır. PV panellerin tarihi 1839'da Fransız fizikçi Edmund Becquerel ile başlar. Edmund Becquerel bir metal elektrotu aydınlatıp gerilim elde etmiştir. Edmund Becquerel, PV hücresini selenyumdan yapmıştı ve bu hücrelerin verimi % 1-2 arasında değişiyordu. 1954'te Bell laboratuvarında ilk silikon photovoltaik hücre yapılmıştır. Pratikte bütün fotovoltaiik araçlar p-n yarıiletkenlerden üretilmiştir [68;73].



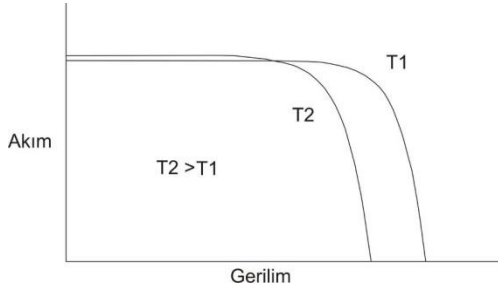
Şekil 1.14 PV hücresinin temel yapısı [71]

Paketlenmiş güneş pillerinden oluşan diziye modül denir. Birkaç modülün birbirine elektriksel olarak bağlanmasıyla paneller oluşur (Şekil 1.15). Modüller halinde paketlenmiş güneş pilleri genellikle 12V'luk veya 24V'luk bir bataryayı şarj edebilecek çıkış gerilimine sahip olacak şekilde tasarlanırlar. Güneş pillerinden yüksek gerilimler elde etmek için çok sayıda güneş pilini birbirine seri bağlayarak paketlenmiş modüller yapılmaktadır. Modüllerin verebilecekleri akım ise yüzeye düşen ışığın şiddetiyle değişmekle birlikte modül içerisindeki paralel bağlı her bir güneş pilinin kapladığı alana bağlıdır [68-72] .



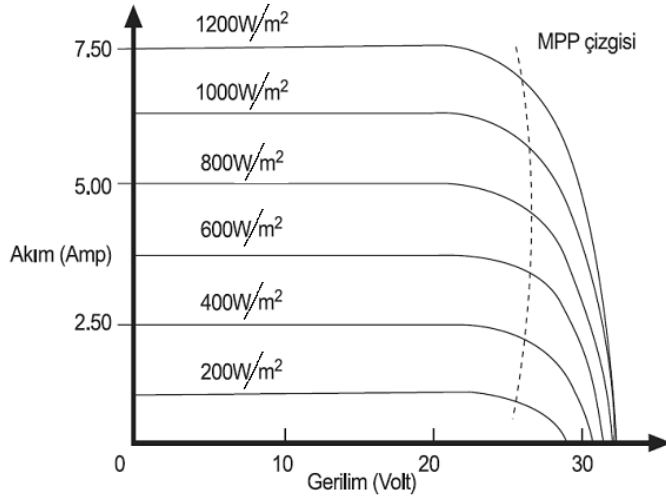
Şekil 1.15 Güneş pili hücresi, modülü ve paneli [68]

Güneş pili hücresinin sıcaklığı arttıkça, güneş pili gerilimi düşmektedir (Şekil 1.16).

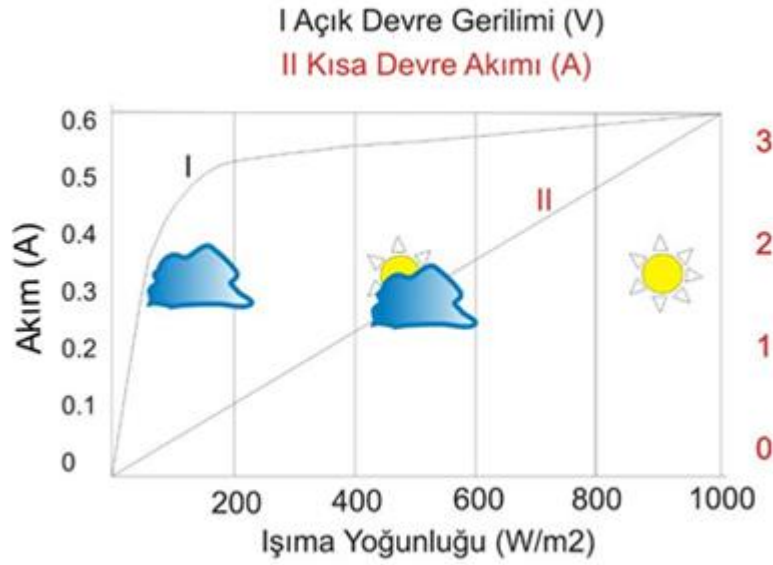


Şekil 1.16 Bir güneş pili hücresinin sıcaklığa bağlı akım-gerilim eğrisi [69-74]

Bir güneş pili hücresinin sıcaklığa bağlı akım-gerilim eğrisi Şekil 1.16'da görülmektedir. Bir fotovoltatik pilin çıkış gücünü etkileyen en önemli değişken ışıma yoğunluğudur. Işıma yoğunluğuna bağlı güneş pilinin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değişimi Şekil 1.18'de görülmektedir.



Şekil 1.17 Işık şiddetindeki değişimin tek kristal silisyum bir modülün akım gerilim eğrisi üzerindeki etkisi ($TC = 25^{\circ}C$) [68]

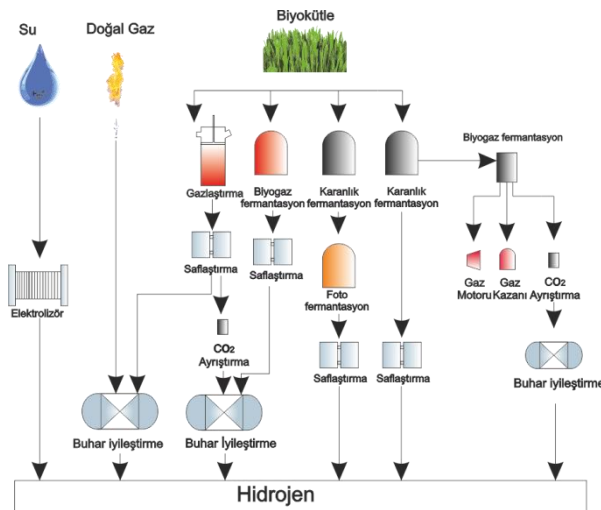


Şekil 1.18 Işıma yoğunluğuna bağlı güneş pilinin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değişimi [74]

1.7 Hidrojen Enerjisi

Hidrojen evrende en bol bulunan ve en basit element olmasına rağmen tek başına oluşmaz. Daima oksijen ve karbon gibi elementlerle birarada bulunur [75]. Hidrojen

doğada bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği ise sudur. Dünyada bulunan hidrojenin çoğu kimyasal bağ yapmış halde bulunmaktadır. Hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilen bir sentetik yakıttır. Hidrojen üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilir. Hidrojenin üretim kaynakları bol ve çeşitlidir. Fosil yakıtlardan elde edilebildiği gibi güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile suyun elektrolizi yoluyla üretimi, biyokütleden üretimi ve biyolojik proseslerle üretimi mümkündür [76]. Hidrojen elde etme işleminde önemli miktarda bir enerji harcadığından hidrojen bir enerji kaynağından çok bir enerji taşıyıcısıdır [77]. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir (Üst ısı değeri $141,9 \text{ MJ/kg}$, alt ısı değeri $119,9 \text{ MJ/kg}$) [78]. 1 kg hidrojen, $2,1 \text{ kg}$ doğal gaz veya $2,8 \text{ kg}$ petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ancak birim enerji başına hacmi yüksektir. Günümüzde hidrojen ağırlıklı olarak doğal gazdan buhar reformasyonu sonucu elde edilmektedir. Suyun elektrolizi bilinen bir yöntem olmakla beraber ekonomik hale getirilmesi konusunda çalışmalar sürmektedir. Benzer şekilde güneş enerjisinden biyoteknolojik yöntemlerle hidrojen üretimi konusunda araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Son yıllarda dünyadaki yönelim, hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisi doğrultusundadır. Hidrojen üretim aşamaları Şekil 1.19’da gösterilmiştir.

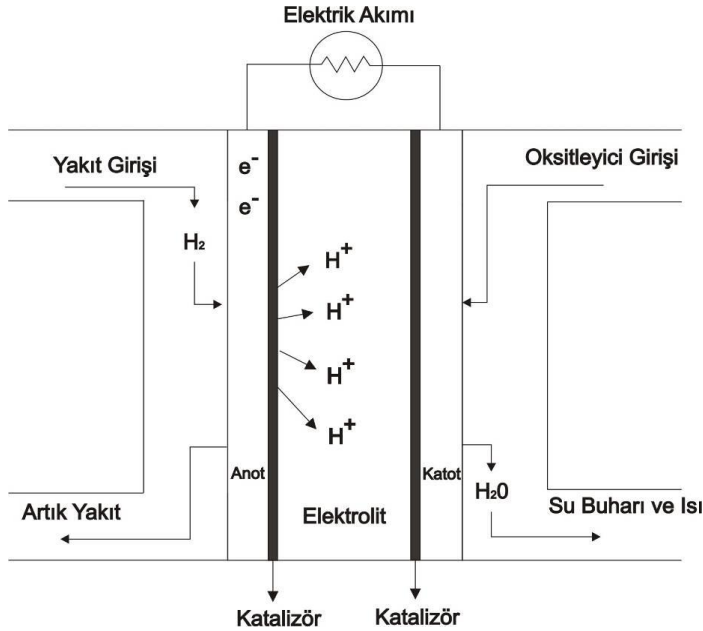


Şekil 1.19 Hidrojen üretim aşamaları [79]

1.7.1 Yakıt pilleri

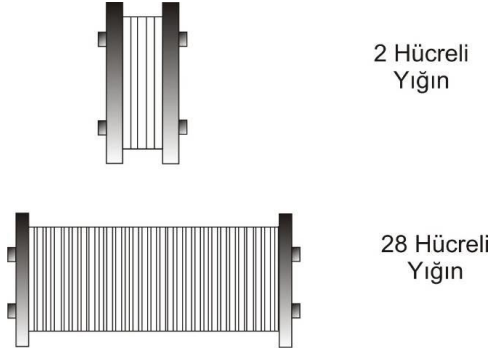
Hidrojen yakıt pilinin çalışması basittir. Yakıt pili ilk defa avukat ve bilim adamı William Grove tarafından 1839 yılında kullanılmıştır. Grove, birisi sülfürik asit kabına, diğeri ise oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrodu düzenleyerek, elektrotlar arasında sabit bir akım aktığını bulmuştur. Yakıt pilleri (yakıt hücreleri) aynı zamanda, sürekli enerji değişimi yapan araçlar (üreteçler) olarak da tanımlanabilir [80].

Yakıt pillerinde yakıt olarak genellikle hidrojen kullanılmaktadır. Ancak metan, doğal gaz, etanol, metanol gibi diğer yakıt türleri de kullanılmaktadır. Bir yakıt pili, negatif şarj elektrodu (anot), pozitif şarj elektrodu (katot) ve elektrolit zardan (membran) oluşur. Anot elektroduna yakıt elektrodu, katot elektrotuna da oksijen elektrodu adı da verilmektedir [81]. Tipik bir yakıt hücresinde yakıt olarak kullanılan madde anodu sürekli şekilde besler, diğer taraftan oksidant madde (havadan alınan oksijen) de katodu sürekli şekilde besler. Elektrotlarda oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar elektrik akımının oluşmasını sağlar. Standart pillere benzemektedirler, bu sebeple diğer adları yakıt pilidir. Aralarındaki fark piller içlerindeki kimyasal bitince işlevini kaybederler ve yeniden şarj edilmeleri verimliliklerini azaltır. Yakıt pilleri ise devamlı yakıtle beslenir ve bu süreçte devamlı enerji üretirler.



Şekil 1.20 Yakıt pilinin çalışması [82]

İstenilen gerilim değerine göre hücreler birbirlerine seri bağlanır [83]. Ayrıca hücrenin üretebileceği akım değeri yüzey alanı ile orantılıdır. Akım değeri arttırılmak istenirse hücrenin yüzey alanı da orantılı olarak arttırılmalıdır [84-85].



Şekil 1.21 Yakıt pilinin yığın (stack) olarak bağlantısı [83]

Hareketli aksamın bulunmadığı yakıt pillerinde sistem, gürültü kirliliği oluşturmamaktadır. Yakıt pillerinde kullanılabilecek yakıt sayısı çok fazla olduğundan, fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilmektedir. Yakıt pilleri istenilen büyüklükte ve kapasitede üretilir. Büyüklüklerine göre 10 W'tan 2 MW'a kadar olan bir güç yelpazesine sahiptirler [81].

1.7.1.1 Yakıt pili çeşitleri

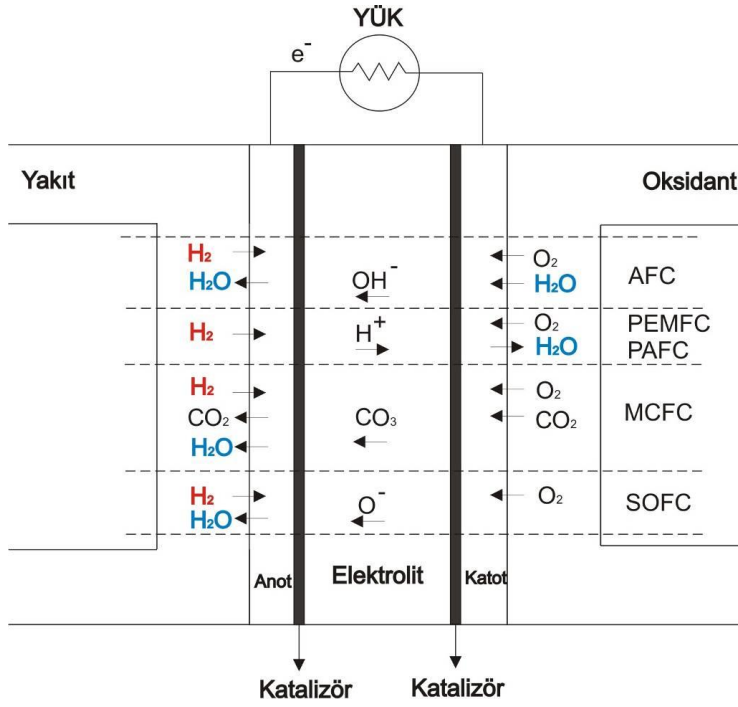
En çok kullanılan sınıflandırma şekli kullanılan elektrolite göre yapılan sınıflandırmadır. Çalışma sıcaklığına göre ise iki gruba ayrılabilir.

1. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (60 – 250 °C arasında).
2. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (600– 1000°C arasında).

Genel olarak yakıt pilleri; Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMFC), Doğrudan Metanollü Yakıt Pilleri (DMFC), Alkali Yakıt Pilleri (AFC), Fosforik Asit Yakıt Pilleri (PAFC), Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (MCFC), Katı Oksitli Yakıt Pilleri (SOFC) olmak üzere altı farklı tip olarak imal edilirler. Yakıt pili tipleri Tablo 1.3'de görülmektedir.

Tablo 1.3 Yakıt pili çeşitlerinin farklılıklarını gösteren tablo [86-87]

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Elektrolit	Katı polimer zar (Nafyon)	Potasyum hidroksit	Fosforik asit	Lityum ve potasyum karbonat	Seramik	Katı polimer zar (Nafyon)
Çalışma sıcaklığı (C)	50-100	50-200	205	650	800-1000	60-200
Yakıt	saf Hidrojen	saf Hidrojen	saf Hidrojen	Hidrojen, metan ve diğer hidrokarbonlar	Hidrojen, metan ve diğer hidrokarbonlar	Metanol ve su bileşimi
Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskite	
Oksidant	Havadaki oksijen	Havadaki oksijen	Havadaki oksijen	Havadaki oksijen	Havadaki oksijen	Havadaki oksijen
Verim (%)	40-50	50	40	>50	>50	40
Hücre gerilimi (V)	1.1	1	1.1	0.7-1.0	0.8-1.0	0.2-0.4
Güç yoğunluğu (Kw/m³)	3.8-6.5	1 civarı	0.8-1.9	1.5-2.6	0.1-1.5	0.6 civarı
Kurulum maliyeti (us \$/kw)	<1500	yaklaşık 1800	2100	2000-3000	3000	
Kapasitesi	30 W, 1-2-5-7-250 kW	10-100 kW	100-200 kW 1.3 MW	155 kW, 200 kW, 250 kW, 1 MW, 2 MW	1-5-25-100-250 kW, 1.7 MW	1W -1 MW (araştırılıyor)
Uygulama alanları	Konut, UPS, hastaneler, bankalar, endüstri, taşımacılık, ticari	Taşımacılık, uzay araştırmaları, taşınabilir güç kaynakları	Taşımacılık, kojen erasyon tesisleri, taşınabilir güç kaynakları	Taşımacılık, fabrikalar	Konutlar, endüstri, taşımacılık,	Cep telefonları, bilgisayarlar, taşınabilir elektronik cihazlar
Avantajları	Yüksek güç yoğunluğu, çalışmaya başlaması hızlı, korozyona dayanıklı elektrolit	Yüksek güç yoğunluğu, çalışmaya başlaması hızlı	Elektrolit karakterleri çok iyi	Yüksek verim	Yüksek verim	Bir yakıt ıslah ediciye gerek duyulmaz. Yüksek çözünürlüklü yakıtın düşük basınç altında tutulabilmesi sebebiyle hidrojen depolamada karşılaşılan problemler yoktur.
Dezavantajları	Katalizörü Platin pahalı, yakıt kirliliği konusunda hassas	Katalizörü Platin pahalı, yakıt kirliliği konusunda hassas	Sıvı elektrolit aşındırıcı, yakıt kirliliği konusunda hassas	Sıvı elektrolit aşındırıcı, fiyatı pahalı, çalışmaya başlaması yavaş	Sıvı elektrolit aşındırıcı, fiyatı pahalı, çalışmaya başlaması yavaş	Verimi ve güç yoğunluğu düşük



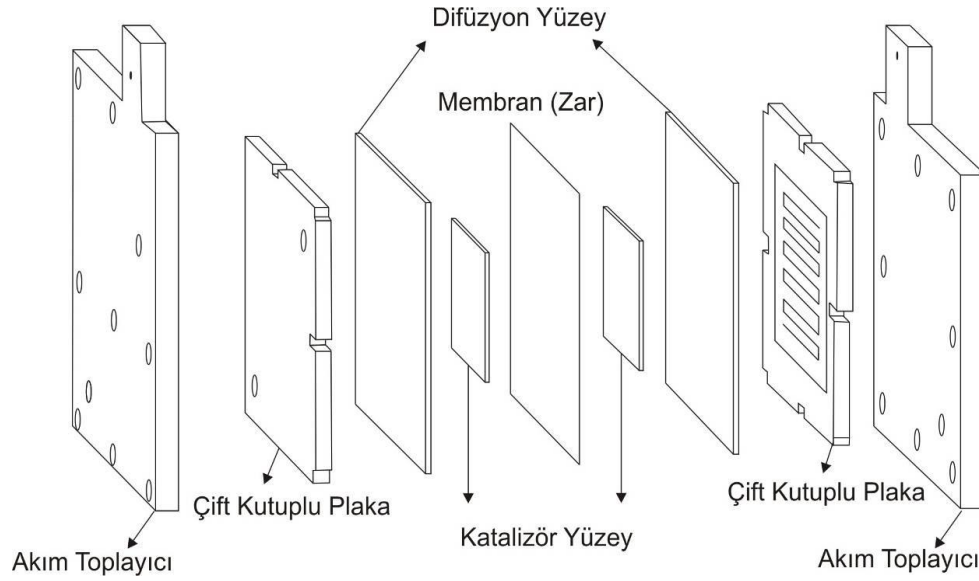
Şekil 1.22 Çeşitli tipdeki yakıt hücrelerinin çalışma prensipleri

Çeşitli tipdeki yakıt hücrelerinin çalışma prensipleri Şekil 1.22’de görülmektedir.

1.7.1.2 Proton geçirgen membran (PEM) yakıt pili ve eşdeğer devre modeli

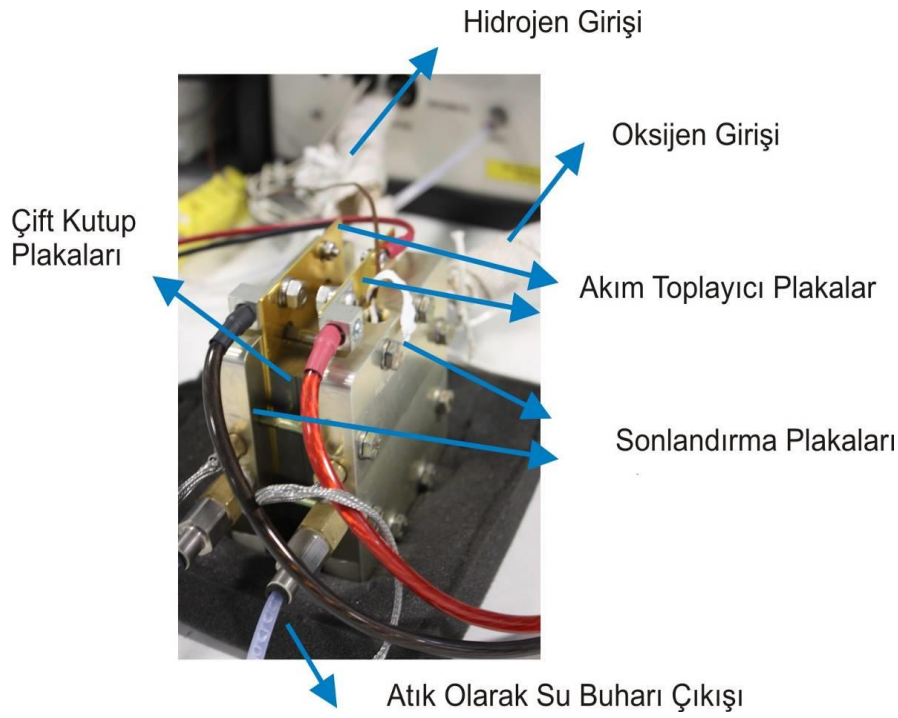
Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak polimer madde kullanıldığı için bu yakıt pillerine “Proton Geçirgen Membran” (PEM) yakıt pili adı verilmiştir. Kullanılan elektrotlar ise karbon yapılıdır. Kullanılan polimer zar ince küçük ve hafiftir. PEM yakıt pilinin en önemli özelliği proton iletim özelliği olan bir membrana (zar) sahip olmasıdır. En çok kullanılan membran materyali DuPont firmasının üretimi olan Nafion® dur. Bu zarın su, yakıt, oksijen ve havadaki diğer gazları geçirmeyen özelliklerde ısı, mekanik ve kimyasal direnci yüksek bir malzemeden yapılmış olması gerekmektedir [88-95]. Membran, anot ve katotta kimyasal reaksiyonlar için katalizörlerle irtibatlıdır. Düşük sıcaklıkta çalışması sebebiyle pahalı katalizörler (genelde Platin) gereklidir. CO, katalizörü zehirleyebilir ve kalıcı bir zarar verebilir olmasından dolayı kullanılacak hidrojen CO içermemelidir. Hidrojen anot kısmına verilir ve burada katalizörün yardımıyla hidrojen iyonlarına (protonlara) ayrılır ve elektronlar serbest bırakılır. Elektronlar dış çevrim vasıtasıyla katot tarafına geçerken elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Daha sonra protonlar membran üzerinden katot tarafına geçerler, burada

hidrojen atomları ile birleşerek su oluşur ve çevrim tamamlanır [96]. Yakıt pilinde anot, katot ve elektrolitten oluşan her bir birime “Membran Elektrot Grubu” (MEA) denir.

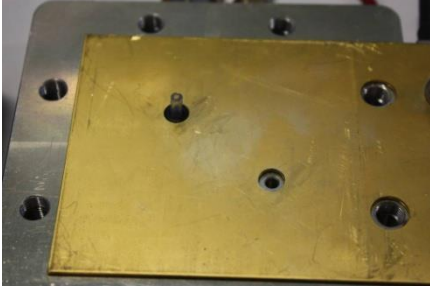


Şekil 1.23 PEM yapısı [97]

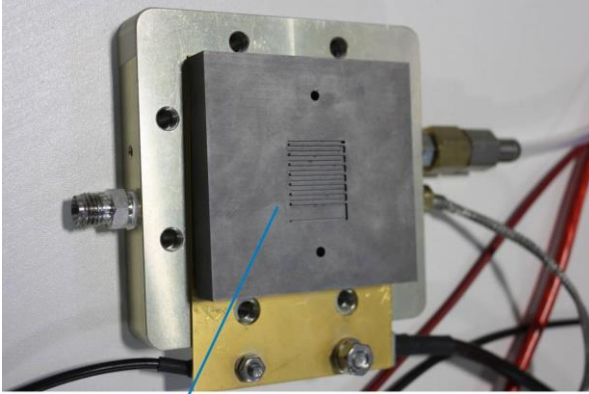
Tipik bir PEM yapısı ve parçaları Şekil 1.23 ve Şekil 1.24’te görülmektedir.



Şekil 1.24 PEM tipi yakıt pili



Şekil 1.25 Sonlandırıcı plakaya bağlı akım toplayıcı plaka



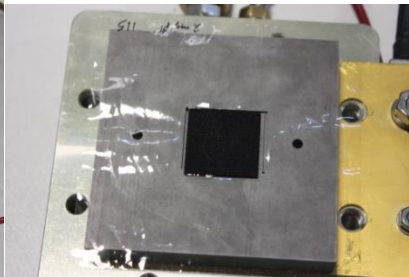
Çift Kutuplu Plaka (Bipolar Plate)
Üzerindeki Gaz Akış Kanalları

Şekil 1.26 PEM tipi yakıt pilinin bipolar tabakası

Yakıt pillerinde yakıt ve hava/O₂ akışını yönlendiren, hücreler arası bağlantıyı sağlayan ve elektrotlarla temas halinde bulunan “Akım Toplayıcı Plakalar (bipolar plaka)” bulunmaktadır. Bu plakalarda genellikle grafit malzeme kullanılmaktadır (Şekil 1.26)

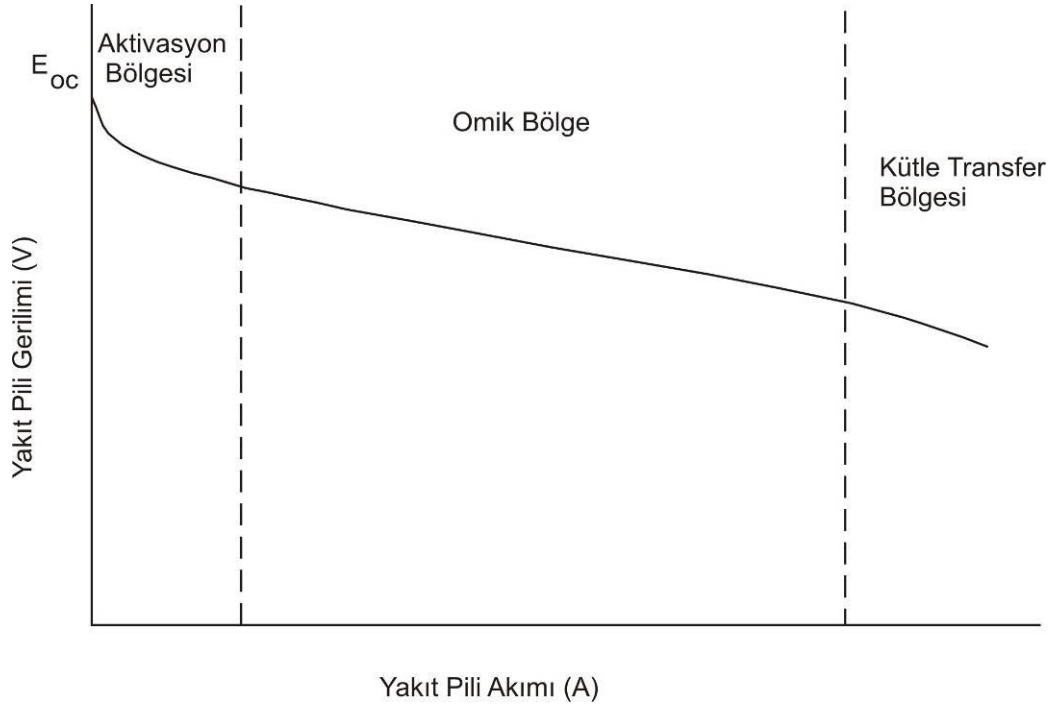


Şekil 1.27 PEM tipi yakıt pili



Şekil 1.28 PEM tipi yakıt pilinin membran (zar) ve katalizör-gaz difüzyon tabakası

PEM tipi yakıt pilinin membran (zar) ve katalizör-gaz difüzyon tabakası Şekil 1.28’de görülmektedir.

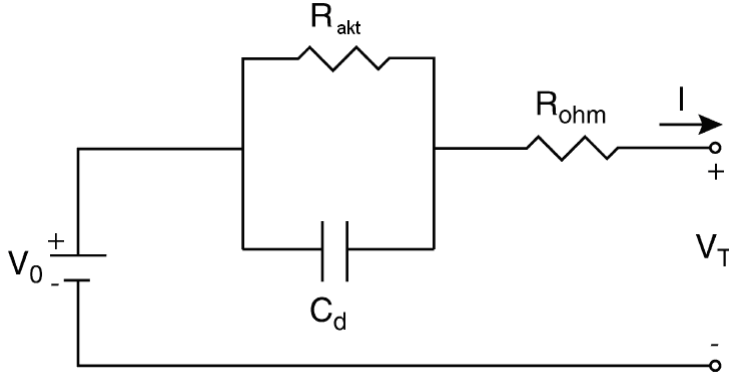


Şekil 1.29 Bir yakıt pilinin tipik polarizasyon eğrisi [86]

Şekil 1.29’da görüldüğü gibi yakıt pilinin tipik polarizasyon eğrisi üç bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge (elektrokimyasal işlev bölgesi) elektrot yüzeylerindeki kimyasal reaksiyonun hızlı olmasından dolayı aktivasyon geriliminin düşmesini göstermektedir. Bu nedenle bu bölgeye aktivasyon bölgesi denilmektedir. Kullanılan katalizöre, elektrotun tipine, sıcaklığa, çalışma basıncına göre bu bölgenin genişliği değişiklik göstermektedir. İkinci bölge yakıt pilinin iç direncinden dolayı meydana gelen kayıpları gösteren ohmik bölgedir. Üçüncü bölge ise yakıt olarak kullanılan tepkimeye giren maddelerin konsantrasyonun değişiminden dolayı oluşan gaz iletim kayıplarını gösteren kütle iletim bölgesidir [85].

Şekil 1.30’da bir yakıt pili yığının eşdeğer devresi görülmektedir. Bu eşdeğer devrede R_{ohm} , elektrotlar, iletim plakalarında ve zardaki (membran) direnci, dolayısıyla yakıt pilinin iç direncini ifade etmektedir. Aktivasyon gerilim düşümünü sağlayan kısım, bir direnç (R_{akt}) ile bu dirence paralel bağlı kondansatör (C_d) ile gösterilir. Membran ve elektrotlar arasındaki iletişimden kaynaklı direnç ve kapasitif etkiyi ifade

eder. V_T , toplam yığın gerilimini ifade eder. V_0 ise yakıt pilinin açık devre gerilimini göstermektedir.



Şekil 1.30 Bir yakıtpili yığının eşdeğer devresi [90]

$$V_T = V_0 - V_{aktivasyon} - V_{ohm} - V_{konsantrasyon} \quad (1.21)$$

$$V_0 = N_{hücre} \left[1.229 - 8.5 \times 10^{-3} (T_{yakıtpili} - 298.15) + \frac{RT_{yakıtpili}}{2F} \ln \left[p_{H_2} (p_{O_2})^{0.5} \right] \right] \quad (1.22)$$

$$V_{aktivasyon} = \frac{RT_{yakıtpili}}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (1.23)$$

$$V_{konsantrasyon} = -B \ln \left(1 - \frac{I}{I_L} \right) \quad (1.24)$$

$$V_{ohm} = iR_{ohm} \quad (1.25)$$

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (1.26)$$

$$\sigma_m = (0.00514\lambda_m - 0.00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{yakıtpili}} \right) \right] \quad (1.27)$$

Burada;

R : evrensel gaz sabiti (8,314J/mol)

T_{el} : hücre sıcaklığı ($^{\circ}C$)

F : Faraday sabiti (96,485 C)

α : yük transfer katsayısı

i : akım yoğunluğu (mA/m^2)

i_0 : alıp-verilen akım yoğunluğu(mA/m^2)

I : yakıt pili yığınının çıkış akımı (mA)

I_L : sınırlandırılan akım (mA)

B : ampirik katsayı

R_{ohm} : zar (membran) direnci (ohm/cm)

σ_m : membranın iletkenliği ($siemens/cm$)

λ_m : membranın su içeriği

$T_{yakıtpili}$: yakıt pili çalışma sıcaklığı ($^{\circ}C$)

t_m : membranın kalınlığı (mikron)

p_{H_2} :hidrojen basıncı (bar)

p_{O_2} :oksijen basıncı (bar)

$N_{hücre}$:yakıt pili yığınındaki hücre sayısıdır [88-91].

2 MATERYAL VE YÖNTEM

Şebekeden bağımsız rüzgâr güneş ve hidrojen enerji sistemlerinden oluşan hibrit güç sistemi UNIDO-ICHET bünyesinde başlatılan bir proje ile oluşturulmuştur. Sistem deprem, sel gibi doğal afetlerde oluşabilecek elektrik kesintilerinde kullanılabilmesi için şebekeden bağımsız ve mobilize şekilde tasarlanmıştır. Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (ICHET) bir UNIDO (Birleşmiş Milletler Sinai Kalkınma Teşkilatı) projesi olup, görevleri; pilot uygulama projeleri, uygulamalı araştırma faaliyetleri, öğretim, eğitim, seminerler, konferanslar ve çalıştaylar gerçekleştirerek veya bunlara destek vererek, hidrojen enerjisi teknolojilerinin; tutarlı uygulamalarını göstermek ve geliştirmekte olan ülkelerde yaygınlaştırılmasını kolaylaştırmaktır. Projede; ana enerji üreticisi olarak bir adet 1 kW'lık rüzgâr türbini ve 8 adet 100 W_p'lık güneş paneli ile yedek güç olarak bir adet 2 kW'lık yakıt pili, 15 m²' lik yaşam alanına sahip bir yerleşim yerinin enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Hibrit güç sistemi şebekeden bağımsız olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla şebekenin ulaşmadığı yerlerde, deprem, sel gibi doğal felaket durumlarında, şebeke kesintisi durumlarında küçük güçlü enerji santrali olarak çalışabilecektir. Rüzgâr türbinleri ve güneş panellerinin verimleri büyük oranda meteorolojik şartlara bağlıdır. Bu nedenle yakıt pili, rüzgâr ve güneşin yetmediği durumlarda yedek güç olarak devreye girmesi için kullanılmıştır. Hibrit güç sisteminde yer alan toplam yük 2835 W değerindedir. Toplam yükü oluşturan elemanlar 1 adet klima, 1 adet buzdolabı, 1 adet LCD TV, 20 W'lık 5 adet lamba, 1500 W'lık 1 adet su ısıtıcı ve 400 W'lık 1 adet PEM tipi elektrolizördür.



Şekil 2.1 Rüzgâr-güneş ve hidrojen kaynaklı şebekeden bağımsız hibrit güç sistemi

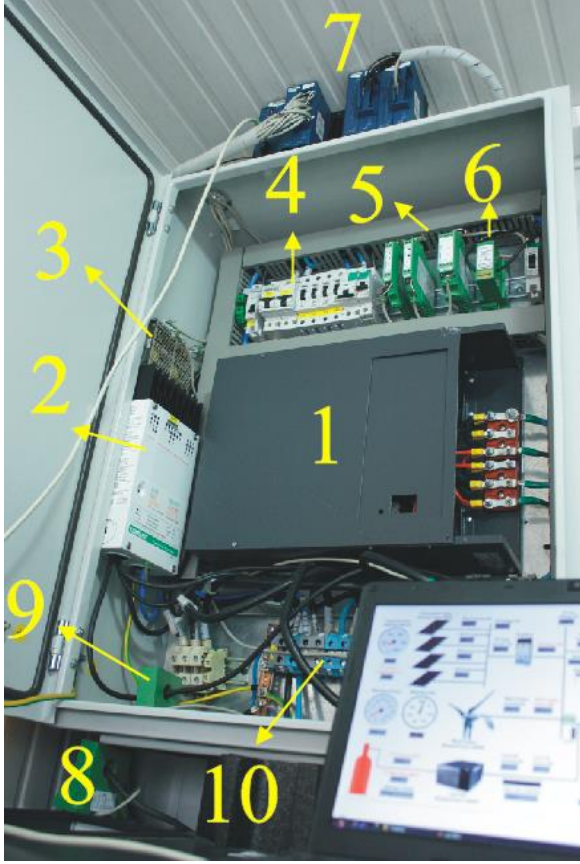
- a- Rüzgâr Türbini (Zephyr Air dolphin)
- b- PV paneller (Solera)
- c- Meteoroloji istasyonu (Davis Vantage Pro2)

Tablo 2.1 Hibrit güç sistemi için hesaplanan enerji tüketimi

Yükler	Adet	Güç [W]	Gün içerisinde ortalama çalışma süresi [saat]	Kullanılan enerji/gün
Klima	1	560	5*	2800
Buzdolabı	1	70	8*	560
LCD TV	1	65	2*	130
Elektrolizör	1	400	0.5	200
Lamba	5	100	2*	200
Su Isıtıcı	1	1500	0,22	330
Toplam		2835		4220

* Dağılık çalışma süresi

Rüzgâr-güneş ve hidrojen kaynaklı şebekeden bağımsız hibrit güç sistemi ve sistemde yer alan yükler Şekil 2.1’de ve Tablo 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.2 Hibrit güç sisteminin veri toplama ve işleme düzeneği

- 1- PEMFC için DC-DC dönüştürücü
- 2- Fotovoltaik paneller için DC-DC dönüştürücü
- 3- DC güç kaynakları
- 4- Sigortalar
- 5- Gerilim transdüserleri
- 6- AC yükler için akım transdüserleri
- 7- DAQ (Data acquisition) NIcFP-180x veri toplama kartı
- 8- Akü grubu için akım transdüserleri
- 9- Fotovoltaik paneller için akım transdüserleri
- 10- DC bara

Hibrit güç sisteminin enerji analizlerini yapabilmek ve optimum çalışma koşullarını belirleyebilmek için sistemi etkileyen girdileri ve bu girdiler karşılığında sistemin verdiği cevapları bilmemiz gerekmektedir. Bu girdiler ve çıktılar Tablo 2.2’de görülmektedir. Bu nedenle enerji sistemini oluşturan elemanlar tek tek incelenmiş ve

enerji verimlerini etkileyecek değişkenler tespit edilmiştir. Bu değişkenlerin özellikle rüzgâr türbini ve güneş paneli için meteorolojik veriler olduğu görülmüştür. Rüzgâr ve güneş sistemlerinin çıkış güçlerini etkileyen en önemli etkenler meteorolojik ve coğrafi verilerdir. Rüzgâr türbini verimini etkileyen en önemli kriterler rüzgâr hızı ve hakim rüzgâr yönü, fotovoltaik piller için güneş ışıma yoğunluğu, ortam sıcaklığı, panel yüzey sıcaklıkları ve panel açılarıdır. Bu değişkenleri ölçebilmek için bir adet meteoroloji istasyonu kullanılmıştır. Fotovoltaik panelin verimini etkileyen eğim açısı bu sistem için sabit bir değerdedir. İleride bu tip çalışmalarda bulunacak olan araştırmacılar için, güneş takip sisteminin kurulması önerilmektedir.

Tablo 2.2 Rüzgâr-güneş ve hidrojen enerji sisteminin ölçülen girdi ve çıktı verileri

Veriler	Rüzgâr	Güneş	Yakıt Pili
Gerilim	•	•	•
Akım	•	•	•
Sıcaklık	•	•	•
Basınç	•		•
Debi			•
Nem	•	•	•
Rüzgâr Hızı	•		
Rüzgâr Yönü	•		
Işıma Yoğunluğu		•	

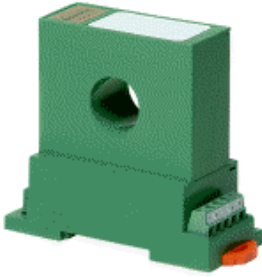
Meteoroloji istasyonu (Şekil 2.3) sayesinde rüzgâr hızı (m/s) ve yönü, iç ve dış ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$), barometrik basınç, nem (%), ışıma yoğunluğu (W/m^2) değerleri ölçülmüştür. Bu değişken sistem girdileri karşılığında rüzgâr türbini, PV panel ve yakıt pili akım-gerilim değerlerini ölçmemiz gerekli olduğundan akım ve gerilim transdüserleri kullanılmıştır (Şekil 2.5). Yakıt piline giren hidrojenin debisi ve basıncıda yakıt pili performansı açısından önemli olduğu için bir adet debi sensörü ve bir adet basınç sensörü kullanılmıştır. Fotovoltaik pillerin verimlerini etkileyen önemli etkenlerden biriside panel yüzey sıcaklıklarıdır. Panel yüzey sıcaklıklarını ölçmek için yüzey tipi ısı algılayıcı (termokupl) kullanılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.3 Meteoroloji istasyonu



Şekil 2.4 Yüzey tipi ısı algılayıcı (termokupl)

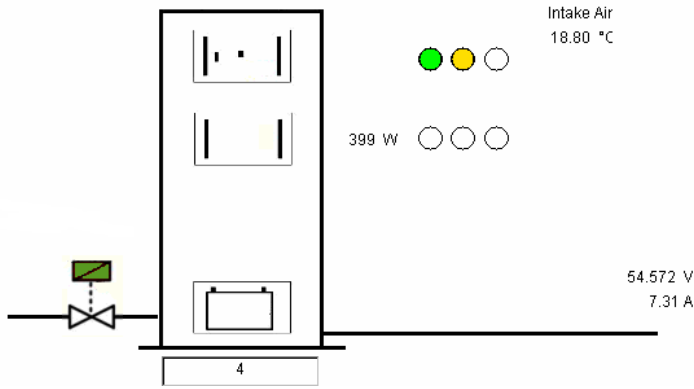


Şekil 2.5 Akım ve gerilim transdüserleri



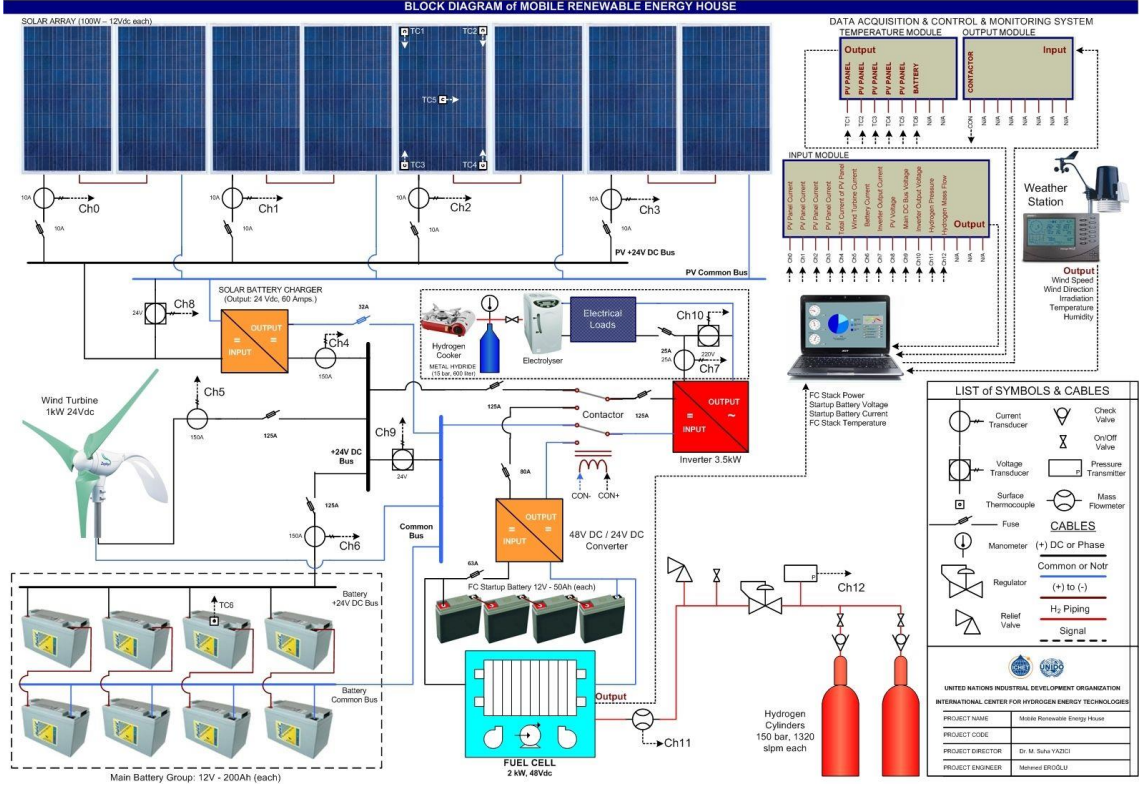
Şekil 2.6 Debi ve basınç sensörleri

Yedek güç sağlayıcısı olarak kullanılan PEM tipi yakıt pilinin verimini etkileyen değerlere baktığımızda bu değerlerin, hidrojenin yakıt piline giriş basıncı, debisi, sıcaklığı ve yakıt pilinin nemi olduğu görülmüştür. Hidrojen giriş basıncı ve debisinin ölçülmesi için Şekil 2.6’da görülen debi ve basınç sensörleri kullanılmıştır. Yakıt pilinin akım, gerilim, sıcaklık değerleri kendi yazılımı sayesinde çalışma anında kaydedilmiştir.



Şekil 2.7 PEM tipi yakıt pilinin yazılım arayüzeyi

PEM tipi yakıt piline ait yazılımın arayüzeyi Şekil 2.7’de görülmektedir.

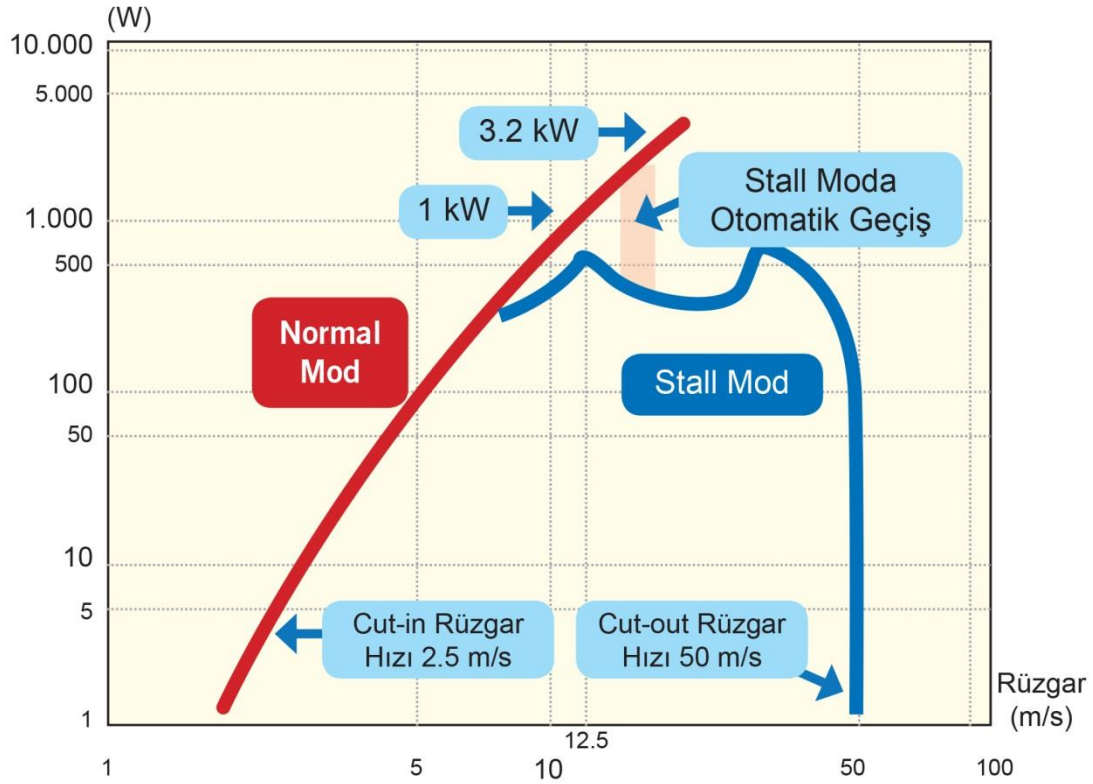


Şekil 2.8 Sistem için gerekli transdüserler ve sensörlerin yerleri

Sistem için gerekli transdüserler ve sensörlerin yerleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bütün alınan bu veriler veri toplama kartı (DAQ) aracılığıyla bilgisayarda depolanmıştır. Veri toplama kartı olarak National Instruments’ın Cfp 180-x modeli seçilmiştir. Rüzgâr türbini, fotovoltaik piller ve yakıt pilinden elde edilecek veriler Matlab ve Labview programları kullanılarak işlenmiştir. Hibrit güç sisteminde yer alan elemanların matematik modelleri oluşturularak MATLAB aracılığıyla bu modellerin entegrasyonu yapılmıştır.

2.1 Sistemde Kullanılan Rüzgâr Türbini

Hibrit güç sisteminde yer alan Airdolphin marka rüzgâr türbini, nominal 1 kW gücünde ve sabit mıknatıslı senkron generatörlüdür. Rüzgâr türbininin devreye girme rüzgâr hızı (cut-in) 2,5 m/s, devreden çıkma rüzgâr hızı (cut-off) 50 m/s dir. Katlanabilir direk sistemi ile birlikte rüzgâr türbini yerden 10 metre yüksekliğe yerleştirilmiştir. Ayrıca rüzgâr türbini kuyruklu tip seçilmiştir. Böylelikle hakim rüzgâr yönüne kolaylıkla dönebilmekte ve rüzgârdan maksimum verim alınabilmektedir.



Şekil 2.9 Rüzgâr türbini çıkış güç karakteristikleri [98]

Rüzgar, Rüzgar türbinine zarar verecek kadar hızlı esmesi durumlarda kanat açılarını değiştirerek türbin kendini korumaya geçer. Bu moda stall mod adı verilir (Şekil 2.9).

2.2 Sistemde Kullanılan Güneş Panelleri

Hibrit güç sisteminde 100W'lık 8 adet Poly-Si güneş paneli kullanılmıştır. Bu tip paneller Mono-Si panellerden daha az verimli olmasına rağmen maliyetleri daha düşük olduğu için tercih edilmişlerdir [99]. Güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisi panel yüzeyine vuran güneş ışığının geliş açısına göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle panelleri yerleştirdiğimiz bölgenin enlem ve boylam dereceleri önemlidir. Güneş panelleri İstanbul'un enlem ve boylam değerleri göz önüne alınarak sistemin üst kısmına 41° lik eğimle yerleştirilmiştir. Lunde'ye göre uygun değer panel açısı = yerleştirilecek sahanın enlem açısı $\pm 15^\circ$ dir [100]. Duffie ve Beckman'a göre ise $(\text{enlemaçısı} + 15) \pm 15^\circ$ dir. Burada ki + ve - ler yaz ve kış aylarına göre değişmektedir. Yaz aylarında -15° kış aylarında $+15^\circ$ olmaktadır [101].

2.3 Sistemde Kullanılan Yakıt Pili

Yakıt pili sistem içerisinde yedek güç olarak düşünülmüştür. Hava soğutmalı ve 70 adet hücreden oluşan 2 kW gücünde PEM tipi yakıt pili kullanılmıştır. Verimi % 50 dir. Yakıt pili, akülerin şarj durumlarına göre devreye girip çıkacaktır.

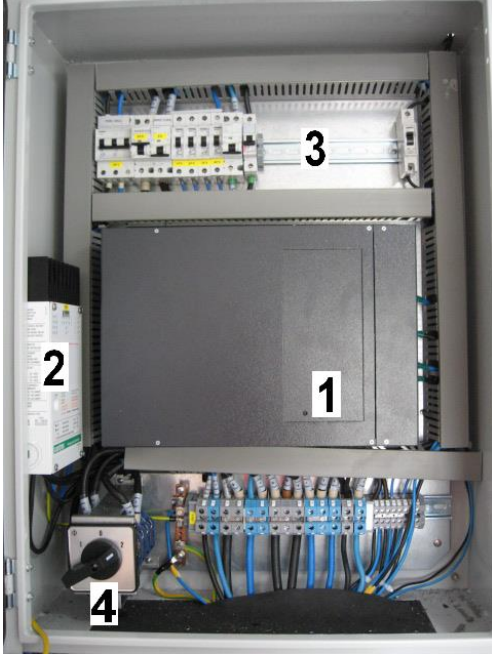
2.4 Sistemin Diğer Bileşenleri

Sistemin diğer bileşenleri; aküler, dönüştürücü (konvertör), şarj kontrol ünitesi ve eviricidir (invertör). Hibrit güç sistemi şebekeden bağımsız çalıştığından enerji depolama elemanları olarak, rüzgâr türbini ve güneş panelleri için 6 adet, yakıt pilinin çalışmaya başlayabilmesi için 2 adet 12 V 200 Ah'lık toplam 8 adet jel akü kullanılmıştır (Şekil 2.10). Aküler tam şarjda sistemin bütün elektriksel yükünü 2 gün boyunca karşılayabilmektedir. Yükler AC oldukları için bir adet 3500 W gücünde evirici kullanılmıştır. Ayrıca hibrit güç sisteminde, üretilen elektrik enerjisinden hidrojen üretimi yapmak için çıkış basıncı 10,5 bar olan PEM tipi elektrolizör kullanılmıştır.

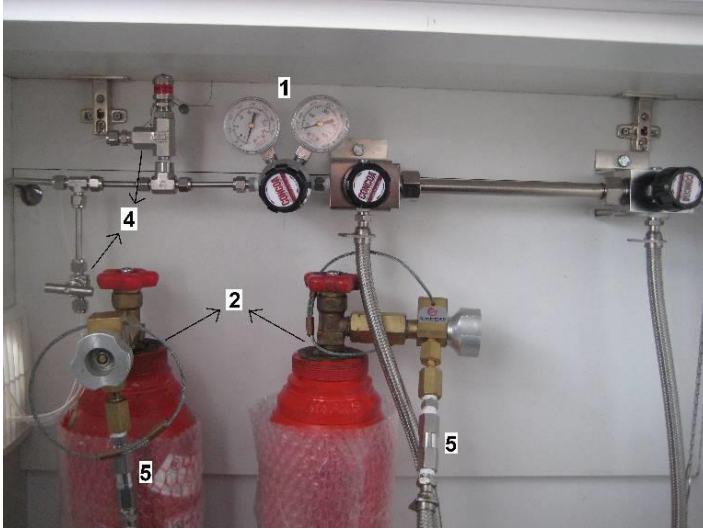


Şekil 2.10 Hibrit güç sisteminde yer alan akü grubu

Şekil 2.11'de sistemin kumanda panosu görülmektedir. 1 nolu kısımda fotovoltaiik paneller için kullanılan 500 W'lık 4 adet DC/DC doğrultucu bulunmaktadır. 2 nolu kısımda fotovoltaiik panellerin şarj reglatörü, 3 nolu kısımda sigortalar ve 4 nolu kısımda paket şalter görülmektedir.



Şekil 2.11 Hibrit güç sisteminin otomasyon panosu



Şekil 2.12 Hidrojen tüpleri, valfler ve regülatörler

Şekil 2.12’te hidrojen tüpleri ve bağlantı elemanları görülmektedir. 1 nolu parça regülatördür. Regülatör hidrojen basıncını 15 bar ile 150 bar arasında ayarlama yapabilmektedir. 2 nolu kısımda 10’ar litrelik 2 adet silindir görülmektedir. 4 nolu kısımda otomatik ve manuel emniyet valfleri görülmektedir. 5 nolu kısım ise çekvalftir.



Şekil 2.13 Hidrojen ocağı, elektrolizör ve metal hidrid tankı

Şekil 2.13'te üretilen hidrojeni kullandığımız hidrojen ocağı, hidrojeni üreten elektrolizör, ve hidrojeni depoladığımız tank görülmektedir.

2.5 Sistemin Yük Analizi

Sitemin şebekeden bağımsız veya şebekeye bağlı olması durumuna göre sistem bileşenlerinin analizleri değişiklik gösterebilir.

$$E_d = \sum_i^n I_n V_n D_n \quad (2.1)$$

E_d : tahmini günlük enerji tüketimi ($Wh/gün$)

I_n : yük akımı (A)

V_n : yük gerilimi (V)

D_n : yükün çalışma süresi

Tablo 6 daki yüklere göre hesap yaptığımız zaman mobil evin ortalama günlük enerji tüketimi $4220 Wh$ olmaktadır. Yapılan ölçümlere göre 2010 yılı içerisinde İstanbul için güneşlenme süresi ve ısıma yoğunluğunun en düşük olduğu ay Aralık ayı olarak bulunmuştur. Dolayısıyla Aralık ayı içerisinde fotovoltaiik pillerden en düşük verim elde edilir. Yük analizlerimizi minimum şartlara göre yapmalıyız ki en kötü durumlarda

sistem çalışabilir halde bulunsun. Fotovoltaik paneller 41° lik açıda iken Aralık ayı içerisinde hesaplanan ortalama ışıma yoğunluğu $2030 \text{ Wh/m}^2/\text{gün}$ olarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik panellerin toplam yerleşim alanı $8,4 \text{ m}^2$ dir. PV panellerden üretilen enerji;

$$E_{PV} = \left(\int_0^{24} I_r \cdot d_t \right) \cdot S \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_A \cdot \eta_i \quad (2.2)$$

formülü ile hesaplanabilir. Buradaki formülde;

S : PV panel yüzey alanı (m^2) = 8.4 m^2

η_{PV} : maksimum PV panel verimi (%) = % 16

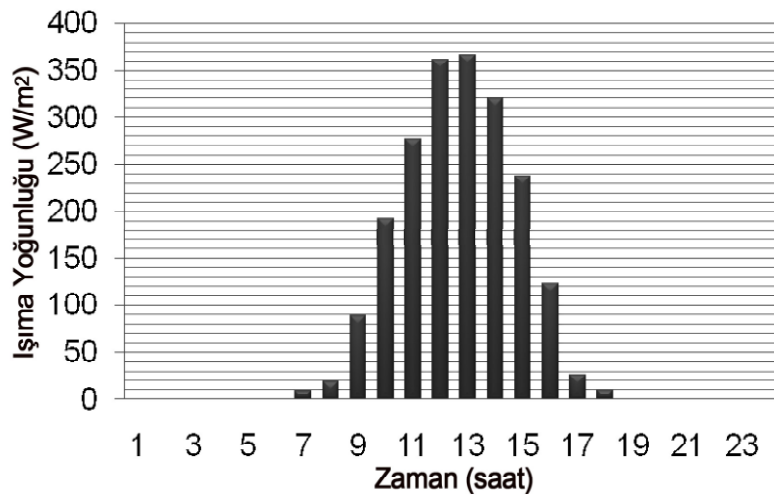
η_A : akülerin verimi (%) = % 85

η_i : eviricinin verimi (%) = % 95

I_r : anlık ışıma yoğunluğu (W/m^2)

$\int_0^{24} I_r d_t$: Aralık ayına ait bir gündeki toplam ışıma yoğunluğu = $2030 \text{ Wh/m}^2/\text{gün}$

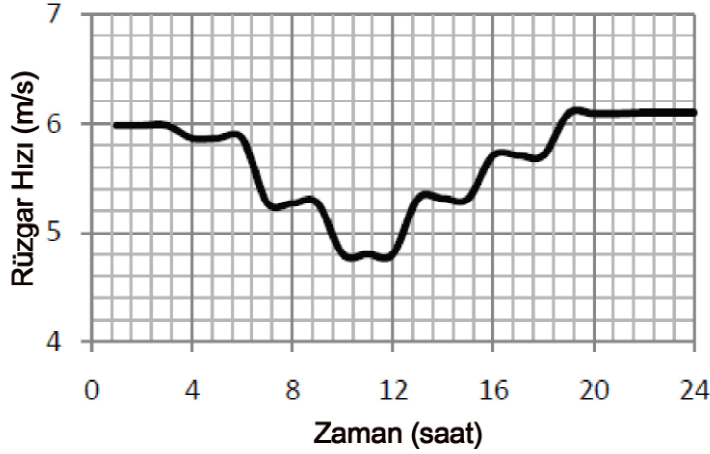
E_{PV} : Aralık ayına ait bir günde fotovoltaik panellerde üretilen enerji = 2203 Wh/gün



Şekil 2.14 Aralık ayında bir güne ait ortalama ışıma yoğunluğu değerleri

Fotovoltaik panellerde üretilen güç ortam sıcaklığına ve panel yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklık arttıkça zaman panellerin verimi azalmaktadır [102].

Panellerden elde edilecek enerji ortalama günlük enerji talebini karşılayabilecek yeterlilikte olmadığından dolayı enerji ihtiyacını karşılayabilmek için bir rüzgâr türbini ve yakıt pili kullanılmıştır. Rüzgâr türbini verimi büyük oranda rüzgâr hızına bağlıdır. Sistemin yük analizlerini Aralık ayına göre yaptığımız için Aralık ayına ait ortalama rüzgâr hızı değerleri Şekil 2.15’de görülmektedir [103].



Şekil 2.15 Aralık ayına ait ortalama günlük rüzgâr hızı değerleri (10 m yükseklikte)

Rüzgar türbininden elde edilen mekaniksel gücü aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$P_R = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_P(\lambda, \theta) \quad (2.3)$$

Bu formülde;

P_R : rüzgârdan elde edilen mekanik güç

ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : rotorun süpürme alanı (m^2)

V : rüzgârın hızı (m/s)

C_P : betz limit, uç hız oranı ve kanat açılarına göre değişiklik göstermektedir.

λ : kanat ucu hız oranı

θ : kanat eğim açısıdır.

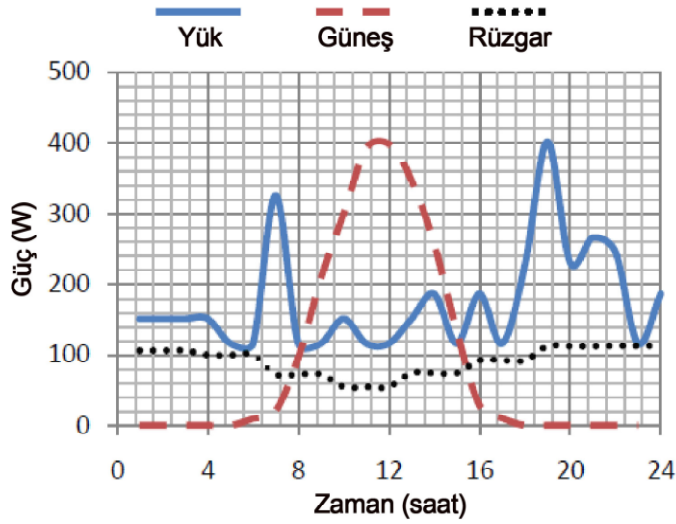
Rüzgârdan üretilen enerji

$$E_R = \left(\int_0^{24} P_R dt \right) \eta_s \quad (2.4)$$

P_R : rüzgârdan üretilen anlık güç

η_s : akü ve evirici ile sistem verimi= % 80

E_R : bir günde rüzgâr türbininden elde edilen enerji= 2177 Wh/gün



Şekil 2.16 Günlük ortalama enerji üretimi ve enerji talebi

Şekil 2.16’da Aralık ayına ait bir günde enerji üretimi ve enerji talebi karşılaştırılmıştır.

$$E_{ED} = (E_{PV} + E_R) - E_T \quad (2.5)$$

E_{ED} : üretilen enerji ile talep edilen enerji arasındaki denge

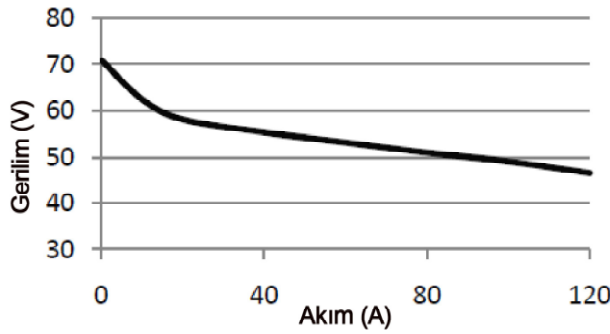
E_{PV} : fotovoltaik panellerden elde edilen enerji

E_R : rüzgâr türbininden elde edilen enerji

E_T : talep edilen enerji

$$E_{ED} = \left(\int_0^{24} P_{PV} dt \right) \eta_s + \left(\int_0^{24} P_R dt \right) \eta_s - \left(\int_0^{24} P_T dt \right) \eta_s \quad (2.6)$$

E_{ED} negatif olduğu zaman yakıt pilinin devreye girmesi planlanmıştır. Sistemde 2 kW'lık yakıt pili kullanılmıştır. Yakıt pili akülerin şarj durumuna göre rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinden üretilen enerji yük talebini karşılayamadığı durumlarda yedek güç olarak devreye girmektedir. Yakıt pilinin verimi % 50 dir. Ayrıca maksimum yükte 22 slpm hidrojen tüketimi vardır. Yakıt pilinin akım-gerilim eğrisi Şekil 2.17'de görülmektedir.



Şekil 2.17 Yakıt pilinin akım-gerilim eğrisi

Bir gün için yetecek hidrojen enerjisi aşağıdaki formülden hesaplanmıştır [104-106].

$$E_H = \frac{E_T}{\eta_{ba}\eta_{yp}\eta_i} \quad (2.7)$$

E_H : günlük talep kendi kendine çalışması için gerekli hidrojen enerji ihtiyacı=10452 Wh/gün = 37,6 MJ/gün

E_T : talep edilen enerji = 4220 Wh/gün

η_{ba} : yakıt pili başlatma akülerinin verimi = % 85

η_{yp} : yakıt pilinin verimi = % 50

η_i : eviricinin verimi = % 95

Hidrojenin alt ısı değeri 120 MJ/kg olduğu için tek başına çalışması için gerekli hidrojen 0.310 kg/gün dür. Mol cinsinden üretilen gaz miktarını aşağıdaki formülde hesaplanır.

$$n = \frac{PV}{RTz} \quad (2.8)$$

P : basınç (*bar*)

V : hacim (*litre*)

R : gaz sabiti = 0.08314 (*bar.l/°K.mol*)

T : sıcaklık (*°K*)

z : sıkıştırılabilirlik katsayısı= 1,1054 (160 *bar* 15°C de)

n : gaz miktarı (*mol*)

Bunun sonucu olarak 160 *bar* 15° de 121 *mol* hidrojen (0,242 *kg*) 2 adet 10 litre tankta depo edilebilir. Bu da 8159 *Wh* enerji etmektedir. Bu miktardaki hidrojen yakıt pilini yaklaşık olarak 19 saat besleyebilir.

Hibrit güç sistemlerinde akü seçimi yapılacağı zaman dikkat edilmesi gereken çeşitli parametreler vardır. Bu parametreler aşağıda tanımlanmıştır [107].

- 1) Nominal kapasite Q_{max} : Aküde depolanabilecek en fazla yük miktarını gösterir. Birimi Amper-saat (*Ah*) olarak ifade edilir. Genelde anma akımı ile birlikte tanımlanır. Kapasitenin anma akımına bölünmesi ile elde edilen değer, anma akımının ne kadarlık süre ile sağlanabileceğini gösterir.
- 2) Şarj durumu (State of Charge - *SOC*): Akünün herhangi bir andaki kapasitesinin nominal kapasitesine oranıdır.
- 3) Şarj/deşarj rejimi: Bu parametre nominal kapasite ve şarj/deşarj akımı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Saatteki şarj/deşarj hızıdır.
- 4) Verim:deşarj boyunca şarj aktarımının oranıdır. Şarj miktarının ihtiyaç olan ilk durumdaki şarj miktarına oranıdır. Şarj durumuna ve şarj/deşarj akımına bağlı olarak değişir.
- 5) Ömür: Akünün nominal kapasitesinin %20'sinin kaybından önce devam eden döngünün sayısıdır.

Hibrit güç sisteminde enerji depolama birimi olarak aküler kullanılmıştır. Sistemin bir günlük toplam enerji talebini karşılayacak toplam akü kapasitesi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır [98].

$$Ah = \frac{\alpha E_{toplamtalep}}{\eta_s V_s (1 - A\mathcal{S}D_m/100)} \quad (2.9)$$

$E_{toplamtalep}$, toplam enerji talebi = 4220 Wh/gün

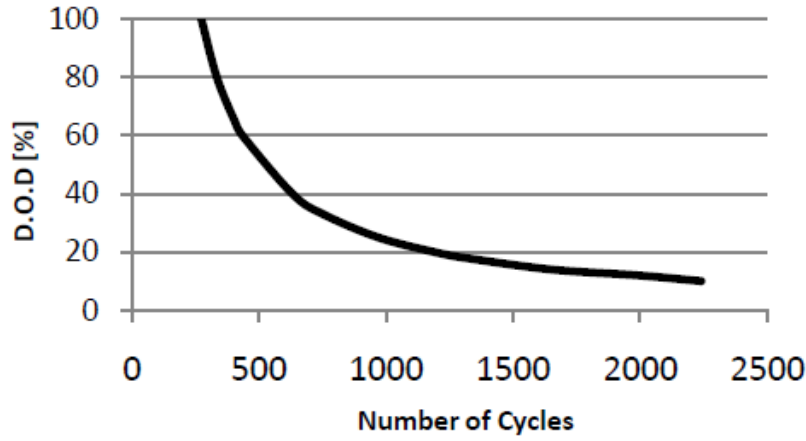
η_s : sistem verimi (%) = % 80

V_s : sistem gerilimi (V) = 24 V

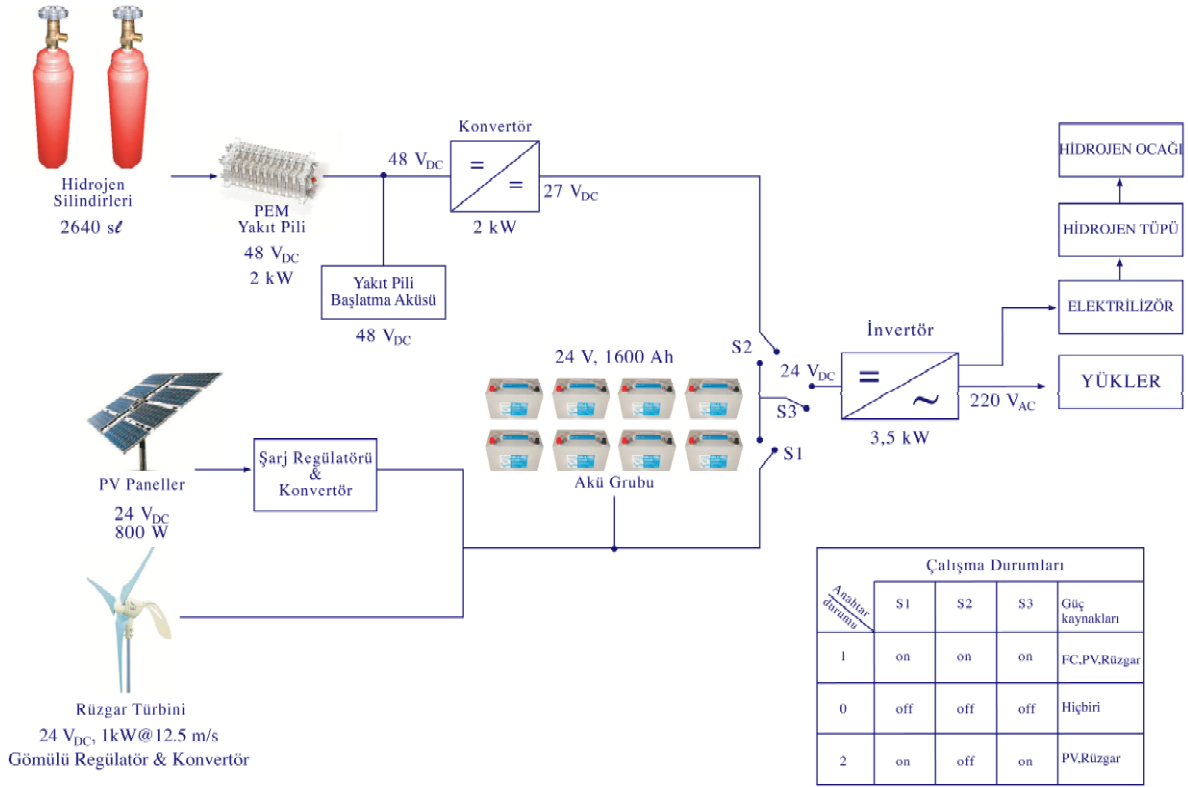
$A\mathcal{S}D_m$: minimum akü şarj durumu (%) = % 50

α : tam şarjda yetebilecek gün sayısı = 2

Yukarıdaki formülden akülerin kapasitesi 879 Ah olarak hesaplanmıştır. Hibrit güç sisteminde yeterli boş alan olmadığından dolayı 8 adet 12 V 200 Ah jel akü kullanılmıştır. Bu durumda aküler tamşarj durumunda 1,8 gün sistemin yük ihtiyacını karşılayabilmektedir.



Şekil 2.18 Akü şarj-deşarj ömrü ve sayısı

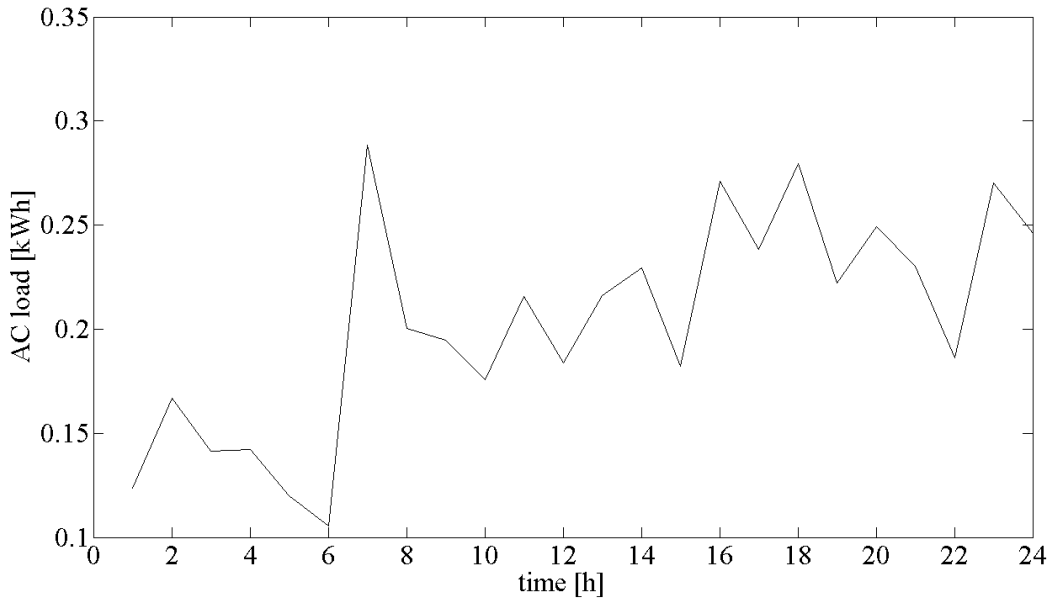


Şekil 2.19 Hibrit güç sisteminin blok diagramı

Hibrit güç sisteminin blok diagramı Şekil 2.19’da görülmektedir. Hibrit güç sisteminde ana güç sağlayıcıları rüzgâr türbini ve güneş panelleridir. Rüzgâr türbini ve fotovoltaik pillerin yetmediği durumlarda yakıt pili devreye girecektir.

2.6 Sistemin Güç Yönetim Algoritmasının Geliştirilmesi

Şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hidrojen enerji sistemlerinden oluşan hibrit güç sistemlerinin enerji üretim performansları, sistemin bulunduğu coğrafi ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Ayrıca yakıt pillerinin çalışma ömürleri, tiplerine göre 2000 saat ile 20000 saat arasında değişiklik göstermektedir. Yakıt pillerinin ve elektrolizörlerin çalışma sıklıkları ömürlerini olumsuz etkilemektedir. Bu tür sistemlerde rüzgâr hızı ve ışıma yoğunluğu gibi çok çabuk değişiklik gösteren etkenlere cevap verebilecek güç yönetim algoritmalarına ihtiyaç vardır.



Şekil 2.20 Mart 2009, sistemin günlük ortalama yük eğrisi

Fotovoltaik modülün çıkış gücü aşağıdaki formülle hesaplanabilir [108].

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_C - T_{C,STC})] \quad (2.10)$$

Burada;

P_{PV} : fotovoltaik modülün çıkış gücü (kW)

Y_{PV} : fotovoltaik yüzeyin standart test koşulları altında nominal kapasitesi (kW)

f_{PV} : fotovoltaik ölçeklendirme faktörü (%)

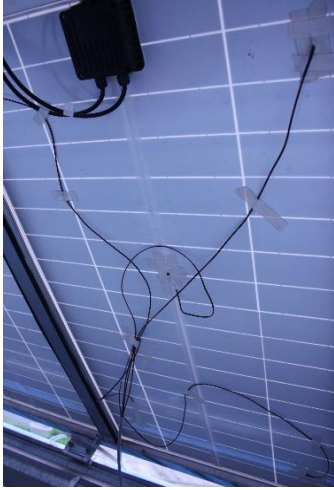
$\bar{G}_T$: fotovoltaik yüzeye düşen solar radyasyon (kWm^{-2})

$\bar{G}_{T,STC}$: standart test kondisyonu altında fotovoltaik yüzeye düşen solar radyasyon ($1 kWm^{-2}$)

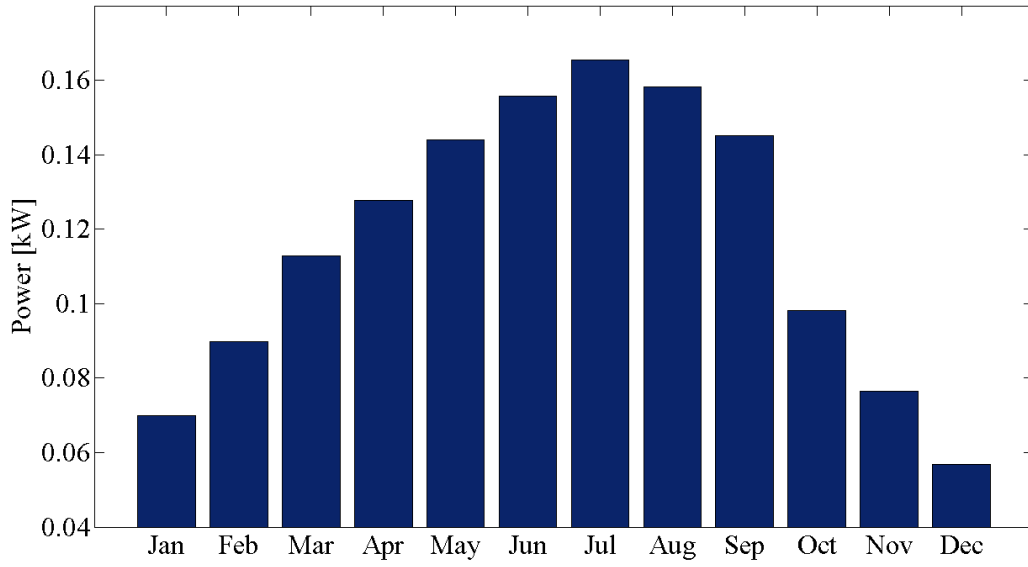
α_P : sıcaklık katsayısı = $0.004 \text{ } ^\circ C^{-1}$

T_C : fotovoltaik modül çalışma sıcaklığı ($^\circ C$)

$T_{C,STC}$: standart test koşulları altında fotovoltaik yüzey sıcaklığı ($25 \text{ } ^\circ C$) dir.

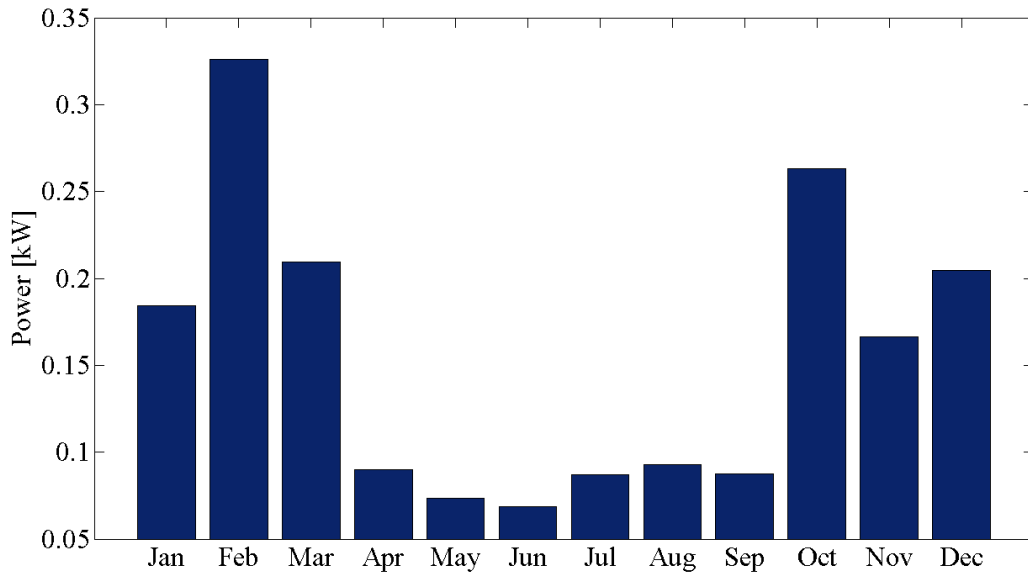


Şekil 2.21 PV panellerin çalışma yüzey sıcaklıklarını ölçen ısı çiftler

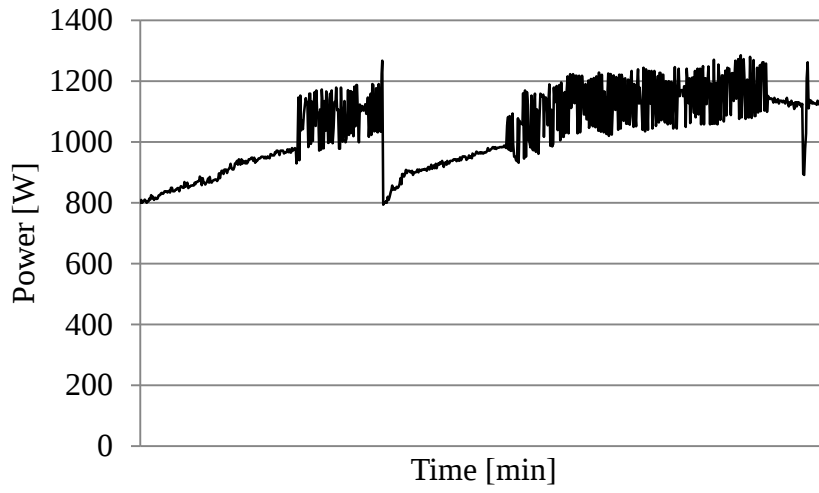


Şekil 2.22 Aylık ortalama PV panel çıkış güçleri

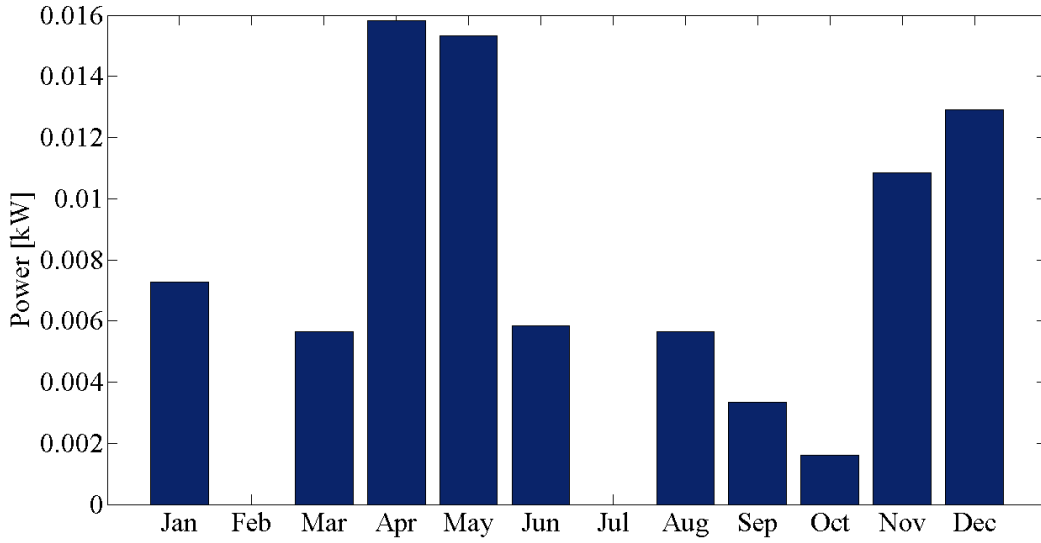
Aylık ortalama PV panel çıkış güçleri Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.23 Aylık ortalama rüzgâr türbini çıkış güçleri



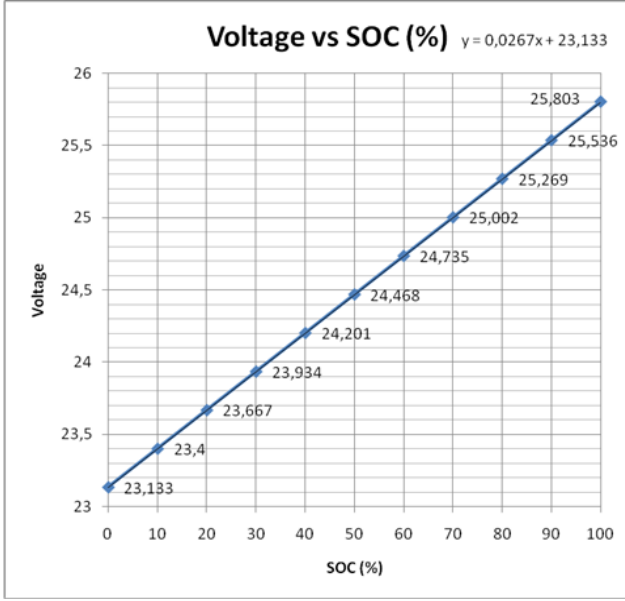
Şekil 2.24 Yakıt pilinin bir güne ait çıkış gücü eğrisi



Şekil 2.25 Yakıt pilinin aylık ortalama çıkış güçleri

2.7 Akü Gurubu Enerji Verimliliği

Şebekeden bağımsız hibrit güç sisteminde, tekrar doldurulabilen valf regüleli kurşun asit (VRLA) tipi, elektrolit yapıları jel yapıda olduğu için “jel akü” diye adlandırılan aküler kullanılmıştır. Jel aküler genellikle akü doluluk durumları (SOC), nihai bağlantı gerilimi, şarj-deşarj zamanı ve akım değerleri ile karakterize edilirler [109]. Tekrar doldurulabilen bir akü grubunun enerji verimliliği, akü grubunun boşalması (deşarj) sırasında verdiği toplam enerjinin, akü grubunun dolması (şarj) sırasında aldığı toplam enerjiye oranı şeklinde hesaplanır. Akü malzemesinde meydana gelen korozyonlar, elektrolitteki gaz sızıntısı, akü iç direnci, elektrotlardaki polarizasyon kayıpları gibi nedenlerden dolayı, akü grubunun enerji verimliliği % 50-55’e kadar düşebilir. Akü şarj-deşarj sayısı akü grubunun enerji verimliliğini etkilemektedir. Akü şarj-deşarj sayısı arttıkça, akü iç direncinde artış ve çıkış geriliminde düşüşler meydana gelir. Bunun sonucu olarak akü grubunun enerji verimi azalır [110]. Akü gurubunun gerilimi ve akü doluluk durumu (**SOC**) arasındaki ilişkiyi gösteren eğri Şeki 2.26’da gösterilmiştir.



Şekil 2.26 Akü grubunun gerilimi ve akü doluluk durumu (**SOC**) arasındaki ilişkiyi gösteren eğri

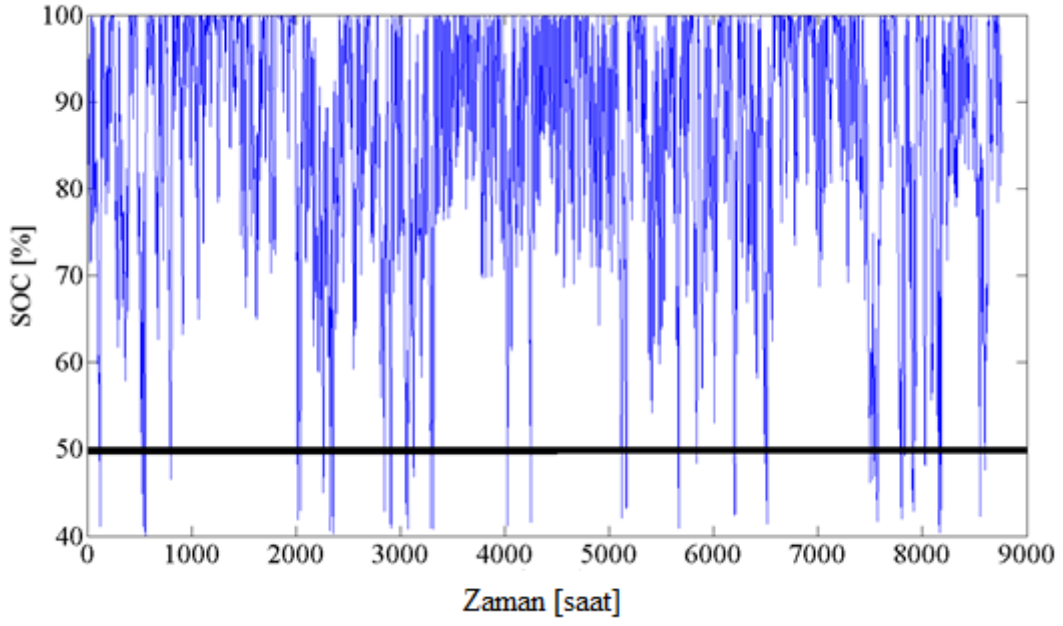
Akü şarjının başladığı andaki akü doluluk oranı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$SOC = SOC_0 + \int_{t_0}^t \left(\frac{I_{akü}}{Cap_{akü}} \right) dt \quad (2.11)$$

$Cap_{akü}$: akü kapasitesi (Ah)

$I_{akü}$: akü akımı (A)

SOC_0 , akü şarjının başladığı andaki akü doluluk durumunu ifade etmektedir. Kattakayam yaptığı deneyler ışığında, kurşun asit aküler için akü şarj durumunun ideal çalışma bölgesini % 50 < SOC < % 80 olarak önermektedir [111]. Lancashire [112] ve Calloway [113] in yaptığı gözlemlere göre akü grubunun ömrü için alt sınır, % 60 SOC'de 4000 şarj-deşarj sayısı veya % 40 SOC'de 2000 şarj-deşarj sayısıdır. Üst sınır, akü grubunun ısınma durumuna göre değişiklik göstermektedir. Sistemde yer alan akü grubunun yıllık doluluk durum değişimi Şekil 2.27'de görülmektedir.



Şekil 2.27 Akü grubunun yıllık doluluk durumu SOC (%)

Akü grubunun enerji verimliliği (η_b), akü grubundan elde edilen toplam enerjinin $E_{çıkış}$ (kWh/yıl), toplam giriş enerjisine $E_{giriş}$ (kWh/yıl) oranından elde edilir.

$$\eta_b = \frac{E_{çıkış}}{E_{giriş}} \times 100\% \quad (2.12)$$

$$E_{çıkış} = P_{çıkış} \cdot t \quad (2.13)$$

$$E_{giriş} = P_{giriş} \cdot t \quad (2.14)$$

$$P_{çıkış} = V_{akü} \cdot I_{aküdeşarj} \quad (2.15)$$

$$P_{giriş} = V_{akü} \cdot I_{aküşarj} \quad (2.16)$$

$I_{aküşarj}$: akü grubunun şarj akımı

$I_{aküdeşarj}$: akü grubunundeşarj akımı

$P_{çıkış}$: akü grubunun anlık çıkış gücü

$V_{akü}$: akü grubunun anlık gerilimi

Akü grubu enerji verimliliğinin yüksek olması, akülerin şarj maliyetlerinin düşmesi demektir. Ayrıca, akü grubunun şarj-deşarj akımları, akü grubunun enerji verimliliğini etkilemektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı, akü grubu enerji verimliliğini yüksek tutacak güç kontrol algoritmasına ihtiyaç vardır.

2.8 Şarj-Deşarj Akımları

Akü grubunun herhangi bir zamandaki şarj-deşarj akımları, sistemdeki yerel yüklerin enerji ihtiyacına ve ihtiyaç fazlası enerjinin kullanım durumuna göre değişiklik göstermektedir. Hibrit güç sistemlerinde, akü grubunu korumak ve optimum çalışmasını sağlamak için, akü şarj kontrolünü sağlayacak güç kontrol algoritmaları büyük önem taşımaktadır [114-115].

Yakıt pili çalışmadığı zamanlarda akü grubu akımı;

$$I_{bat}' = \frac{P_{pv} \cdot \eta_{reg1} + P_{wind} \cdot \eta_{reg2} - P_{dem} / \eta_{inverter}}{V_{bat}} \quad (2.17)$$

P_{pv} : fotovoltaik panel ortalama çıkış gücü (kW)

P_{wind} : rüzgâr turbini çıkış gücü (kW)

η_{reg1} : fotovoltaik panelin regülatör verimi (%) = % 90

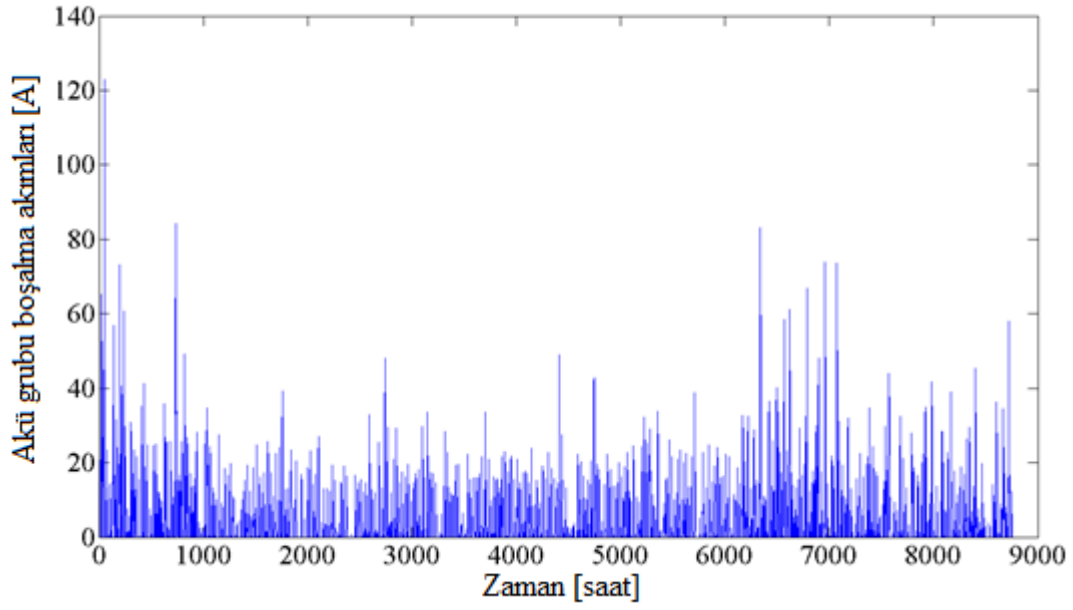
η_{reg2} : rüzgâr turbinini regülatör verimi (%) = % 90

P_{dem} : talep gücü (kW)

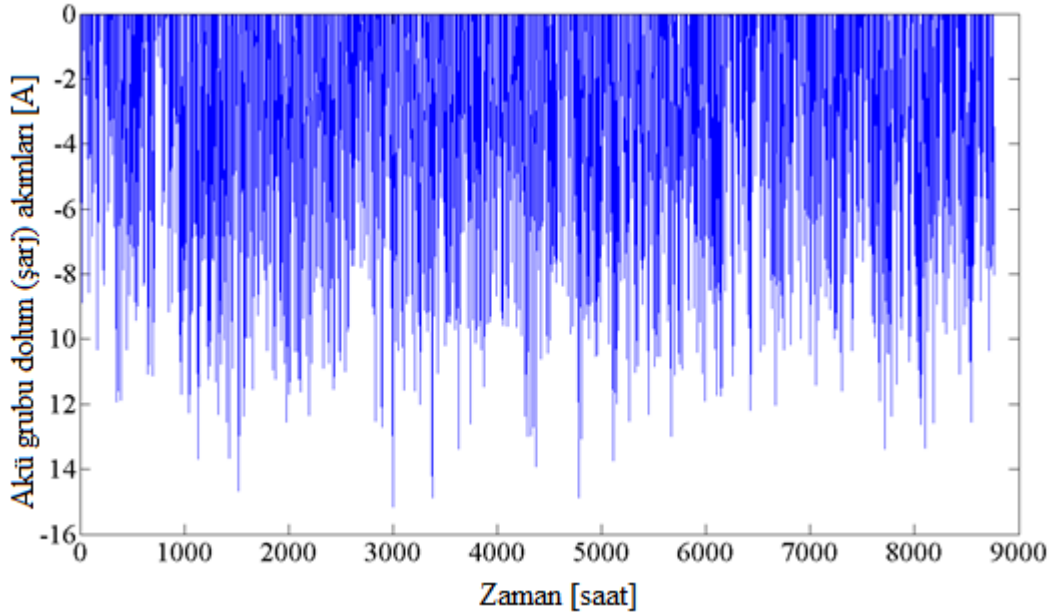
$\eta_{inverter}$: evirici verimi (%) = % 92

V_{bat} : akü grubu gerilimi (V)

Eğer akü grubunun akım değeri pozitif ise akü grubudeşarj oluyor demektir. Negatif ise akü grubu şarj oluyor demektir.



Şekil 2.28 Akü grubunun yıllık deşarj akımları



Şekil 2.28 Akü grubunun yıllık şarj akımları

Yakıt pili çalışırken akü grubu akımı;

$$I_{bat''} = \frac{P_{pv} \cdot \eta_{reg1} + P_{wind} \cdot \eta_{reg2} + P_{fc} \cdot \eta_{con} - P_{dem} / \eta_{inverter}}{V_{bat}} \quad (2.18)$$

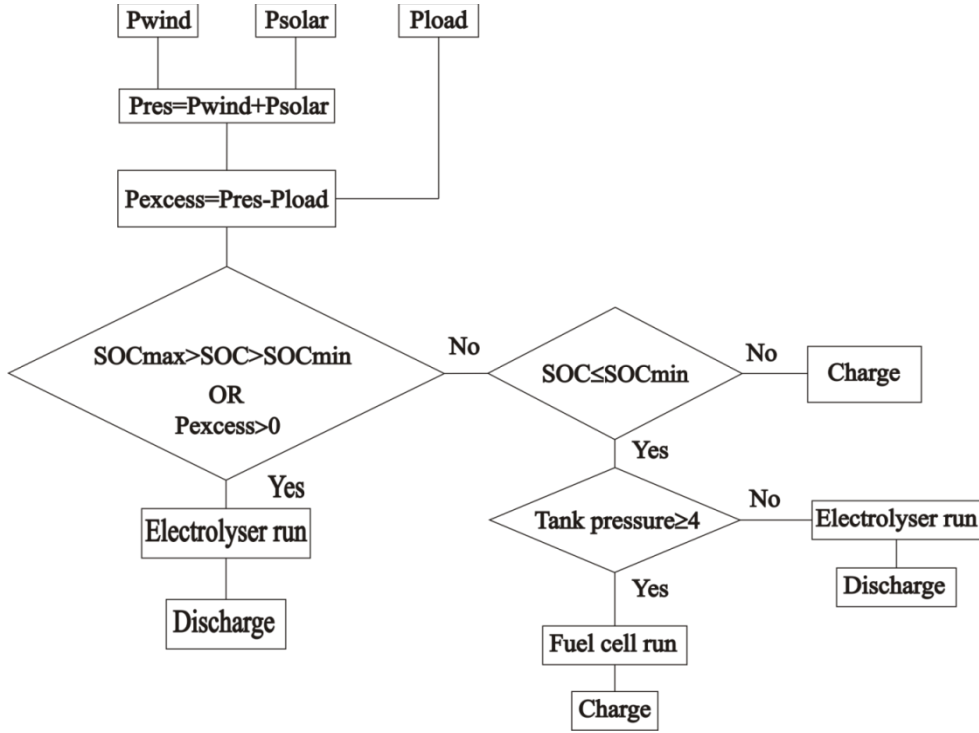
P_{fc} : yakıt pili çıkış gücü (kW)

η_{con} : yakıt pili DC/DC dönüştürücü verimi (%) = % 90

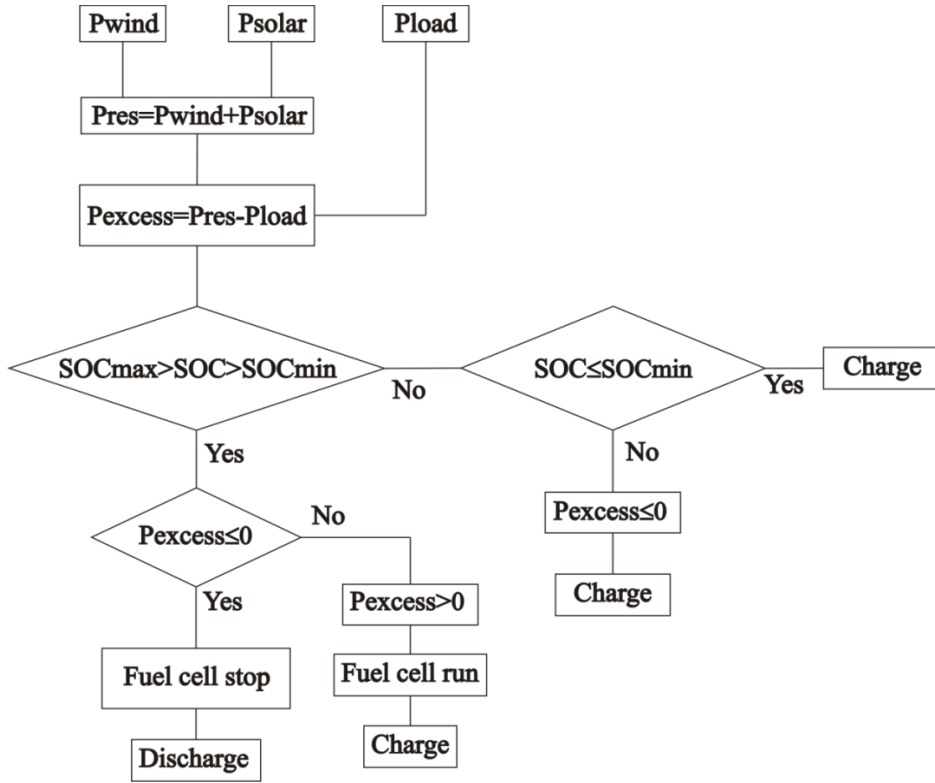
3 GÜÇ YÖNETİM STRATEJİLERİ

Şebekeden bağımsız rüzgar, güneş ve hidrojen kaynaklı hibrit güç sistemlerinin enerji üretim performansları büyük oranda meteorolojik şartlara bağlı olduklarından, sistemi oluşturan elemanların çalışmasını en iyi şekilde kontrol edecek, güç yönetim stratejilerine ihtiyaç vardır. Güç yönetim stratejilerinin amacı, yüklerin enerji ihtiyacını sekteye uğratmadan sağlamak ve bununla birlikte, akü grubu enerji verimliliğini yüksek tutmak ve yakıt pilinin devre girip çıkma sıklığını azaltmaktır. Hibrit güç sisteminin yedek güç destek ünitesi olan yakıt pili ve elektrolizör devreye ne kadar az girip çıkarsa, çalışma ömürleri bir o kadar uzar. Hibrit güç sistemlerinde, güç yönetim stratejisini etkileyen ana etkenler; yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen gücün miktarı ve akü grubunun doluluk oranıdır (SOC). P_{wind} , rüzgâr türbininden üretilen enerjinin miktarını; P_{solar} , fotovoltaik panellerden elde edilen enerjinin miktarını; P_{res} , yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen toplam enerji miktarını; P_{load} , yükün talep ettiği gücü ifade etmektedir. P_{excess} , artan gücü ifade ederken, $P_{res} - P_{load}$ formülü ile bulunur. Strateji 1,2,3 için verilen kontrol algoritmaları Şekil 3.1, 3.2, 3.3 de sırasıyla verilmiştir. Strateji 1’de $SOC_{max} > SOC > SOC_{min}$ ve $P_{excess} > 0$ durumlarında, elektrolizör çalışacak ve akü grubu deşarj olacaktır. $SOC \leq SOC_{min}$ ve hidrojen tank basıncı ≥ 4 iken, yakıt pili çalışacak ve akü grubu şarj olacaktır (Şekil 3.1). Strateji 2’de $SOC_{max} > SOC > SOC_{min}$ ve $P_{excess} \leq 0$ durumlarında yakıt pili çalışmayacak ve akü grubu deşarj olacaktır. $SOC \leq SOC_{min}$ durumlarında akü grubu şarj olacaktır (Şekil 3.2). Strateji 3’de, $SOC_{max} > SOC > SOC_{min}$ ve $P_{excess} > 0$ durumlarında, elektrolizör çalışacak ve akü grubu şarj olacaktır. Eğer $SOC \leq SOC_{min}$ veya $P_{excess} \leq 0$ ve tank basıncı ≥ 4 olur ise, yakıt pili çalışacak ve akü grubu deşarj olacaktır (Şekil 3.3). Akü grubunun enerji verimliliği için en iyi sonuç Strateji 3’e ait olan kontrol algoritması ile sağlanmıştır. Ayrıca bu strateji ile akü grubunun aşırı şarj durumlarına karşı koruma sağlanmıştır. Sunulan güç kontrol algoritması, akü grubunun enerji verimliliğini % 80–85 seviyelerine yaklaştırmıştır (Şekil 3.6). Strateji 3’ün lojik blok diyagramına baktığımızda, diğerlerinden farklı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen toplam enerjinin, talep edilen enerji arasındaki farkı ifade eden P_{excess} değerinin iki farklı durumunda ($P_{excess} \leq 0$ ve $P_{excess} > 0$) güç yönetimi kontrol algoritmasına dahil edildiğini görmekteyiz. Lojik olarak kontrol edilen değişkenlerin durum sayısı arttıkça,

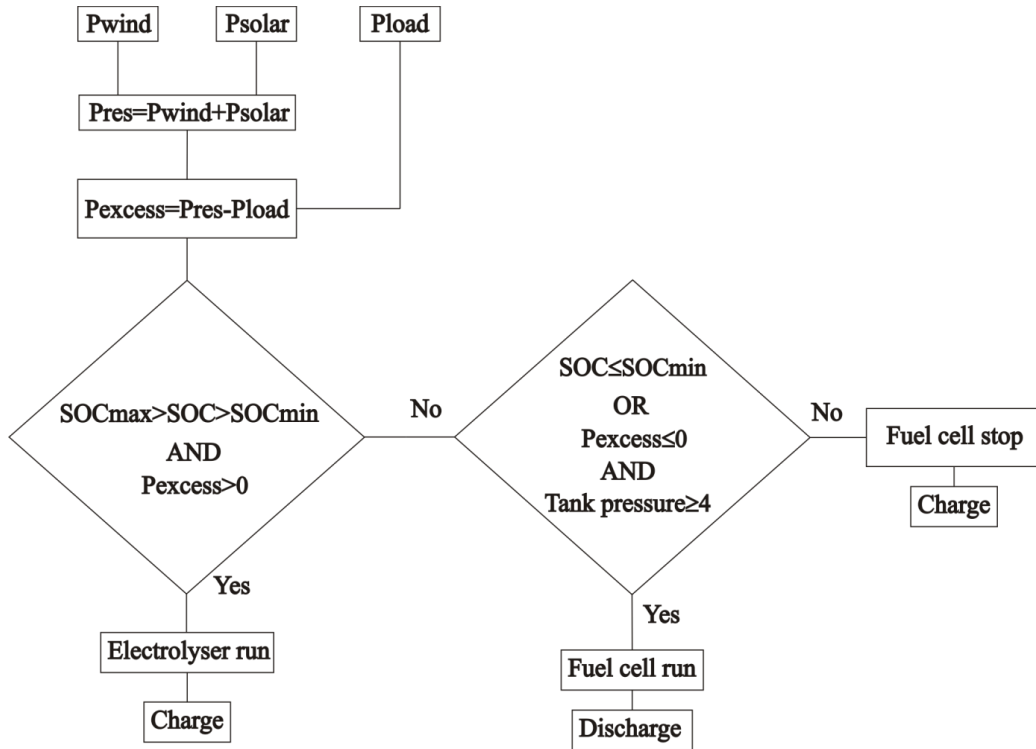
akü grubu enerji verimliliğinin arttığını söyleyebiliriz. Bunun yanı sıra, Strateji 3 ile birlikte akü grubunun aşırı şarj ve deşarj durumuna düşme risklerinden korunulmuştur. Strateji 3 güç yönetim algoritması ile birlikte, hibrit güç sisteminin akü grubu enerji verimliliği % 85’lik değere ulaşmıştır. Literatürde yapılmış çalışmalarda akü grubu enerji verimliliği % 73,1 –84 seviyeleri arasında yer almaktadır [116-119].



Şekil 3.1 Hibrit güç sistemi için güç yönetim stratejisi 1

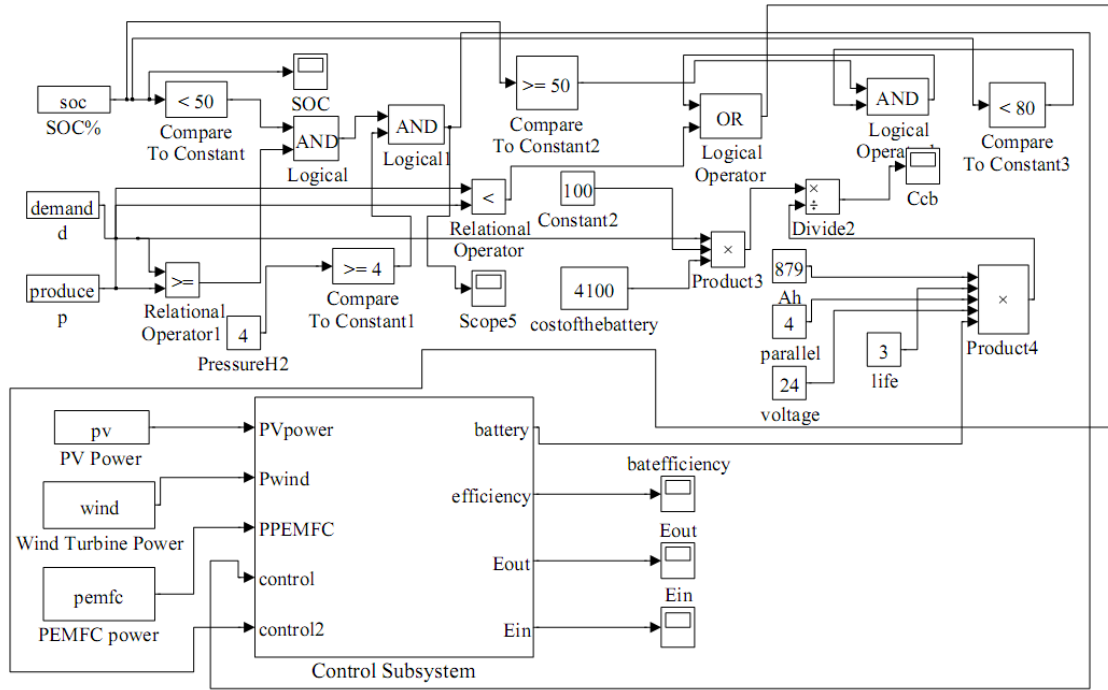


Şekil 3.2 Hibrit güç sistemi için güç yönetim stratejisi 2

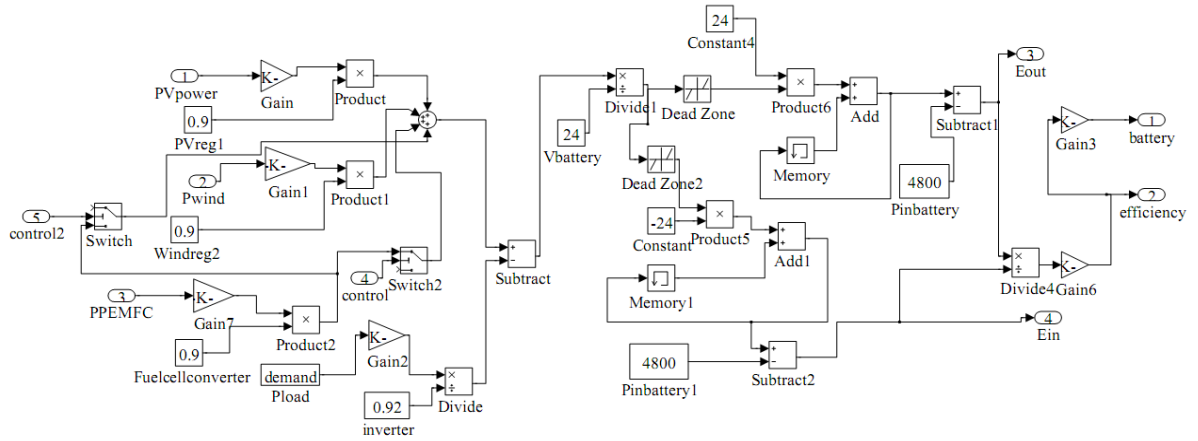


Şekil 3.3 Hibrit güç sistemi için güç yönetim stratejisi 3

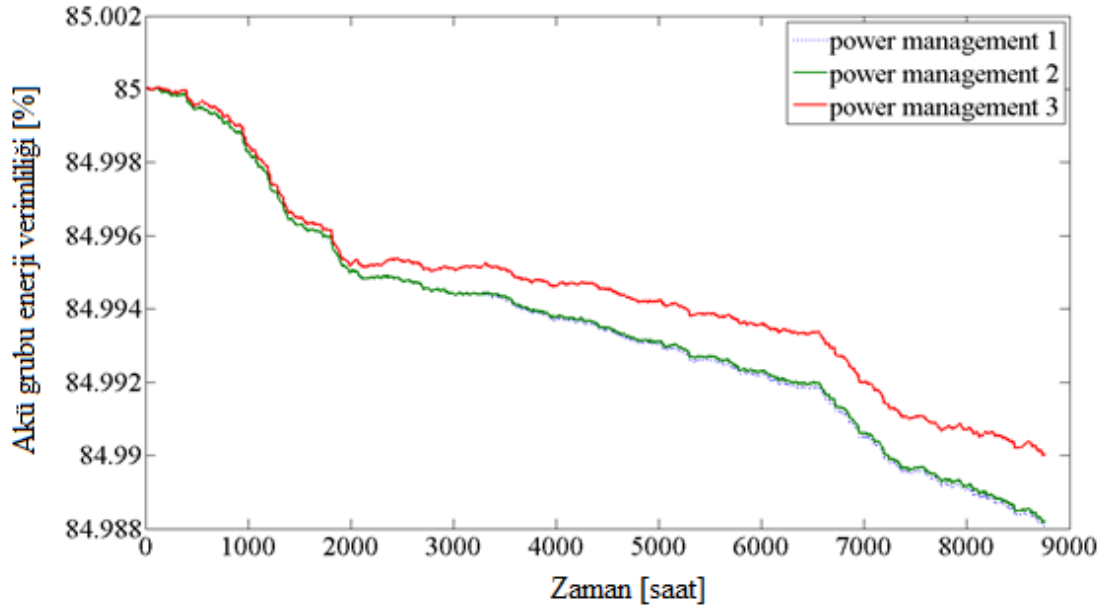
Tez kapsamında geliřtirdiđimiz gücü yönetim stratejisi şekil 3.3’de görülmektedir.



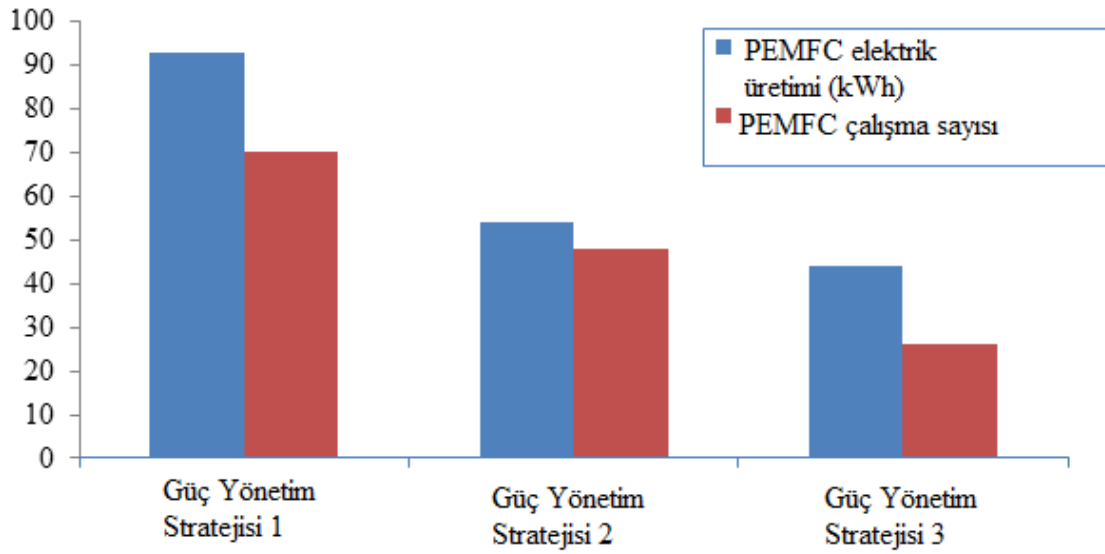
şekil 3.4 Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan kontrol algoritması



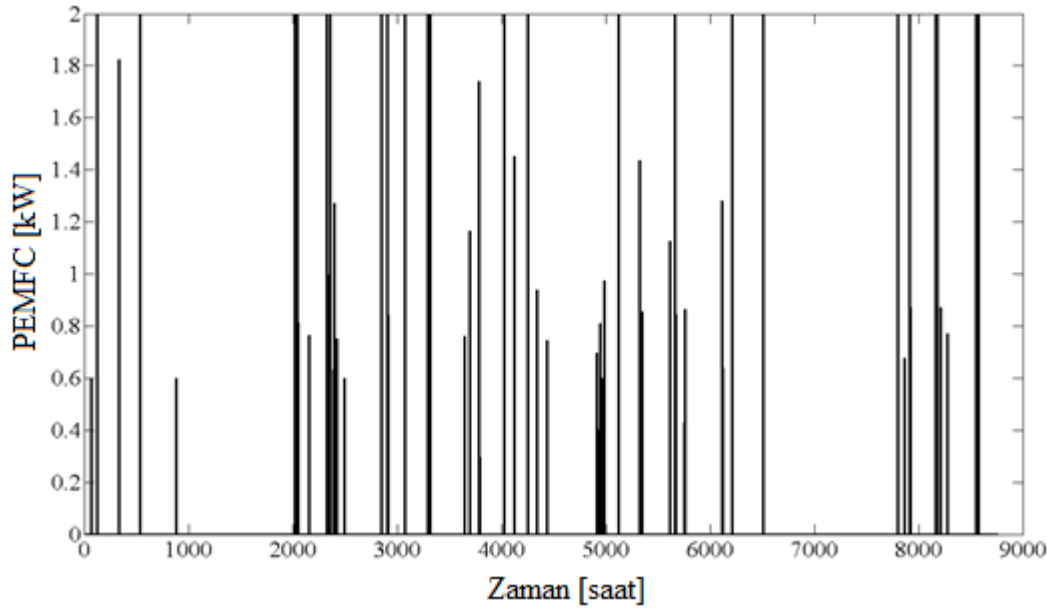
şekil 3.5 Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan kontrol altsistemi



Şekil 3.6 Üç farklı güç kontrol algoritmasında akü grubu enerji verimliliği



Şekil 3.7 Üç farklı stratejiye göre yakıt pilinin devreye alınma sayısı ve elektrik enerjisi üretim miktarı



Şekil 3.8 Strateji 3'e göre yakıt pilinin yıllık çalışma zamanları

Yakıt pilinin devreye alınıp, devreden çıkma sayısı, yakıt pilinde kullanılan membranın ömrünü olumsuz etkilemektedir. Strateji 3'de verilen kontrol algoritması ile şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş, hidrojen kaynaklı hibrit güç sistemlerinde kullanılan yakıt pilinin membran ömrü uzatılabilmektedir. Strateji 3'e göre yakıt pilinin yıllık çalışma zamanları Şekil 3.8'de görülmektedir. Strateji 1 ve 2'de yakıt pilinin devreye girip-çıkma sayısı Strateji 3'e göre daha fazladır.

4 HİBRİT GÜÇ SİSTEMİNİN HİDROJEN ÜRETİM PERFORMANSININ MODELLENMESİ

Yakıt olarak hidrokarbonlar, dünyadaki birincil enerji kaynaklarının % 80'ini oluşturmaktadır [120]. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, diğer hidrokarbon yakıtlarla karşılaştırıldığında yüksek enerji yoğunluğu ile gelecek vaadeden yakıtlardan birisidir [121]. Hidrojenin yakılması sırasında açığa çıkan enerji, alt ısı değeri ve kütle bazda bakıldığında, diğer fosil yakıtlardan sırasıyla; metan, benzin ve kömürden 2.4, 2.8 ve 4 kat daha yüksektir [122]. Ancak hidrojen doğada saf halde bulunamadığından, başka bir doğal yakıtın dönüştürülmesiyle elde edilmesi gerekir. Günümüzde hidrojen, % 95 oranında hidrokarbonlardan (doğal gaz, petrol vb.) buhar reformlama veya kısmi oksidasyon reaksiyonu ile üretilmektedir [123, 124]. Uzun vadede, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimi, sürdürülebilir enerji yönetimi açısından önemli bir yere sahiptir [125-128].

Tezin bu aşamasında, rüzgâr, güneş ve hidrojen kaynaklı şebekeden bağımsız hibrit güç sisteminden elektroliz yöntemi ile hidrojen üretim performansının MATLAB/Simulink® ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

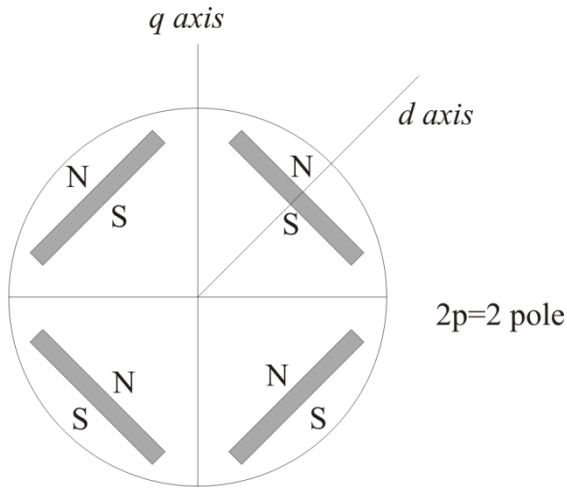
4.1 Rüzgâr Türbininin Modellenmesi

Hibrit güç sistemi içerisinde yer alan Rüzgâr turbininde kullanılan generatör, sabit mıknatıslı senkron generator (SMG) dir. SMG'lerde, uyartım akımının oluşturduğu manyetik alan mıknatıslar tarafından sağlanır ve diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Stator kısmında sargılar, rotor kısmında ise sürekli mıknatıslar vardır. SMG'nin rotorundaki mıknatıslar, senkron generatörün rotoruna yerleştirilen sargıların oluşturduğu elektrik alanına eş değerde manyetik alan oluşturmaktadır. Geleneksel senkron generatörlerle karşılaştırıldığında, rotorda mıknatısların kullanımı ile generatörün dinamik performansı yükselir. Daha geniş hız aralıklarında çalışma imkanı sağlar, rotor kayıpları daha azalır. SMG'lerde kayıpların az olmasından dolayı generatörün sıcaklığı çok artmamaktadır. Çalışma sıcaklığının düşük olmasından dolayı bilyalı yatak ömrü ve dolayısıyla dayanıklılığı yüksektir [129]. Dezavantajlarını sıralarsak; şebeke frekansına bağlı olarak

sabit bir hızda çalışabilirler. Uygulama alanları sabit hızın gerektiği yerlerdir. Sabit mıknatıs ve stator alanı arasında senkronizasyon sağlayabilmek için rotor pozisyonunun bilinmesi gerekir. Generatör çalışma durumunda, gerilim ayarı uyarma akımı olmadığından dolayı yapılamaz. Mıknatıslar sıcaklıktan dolayı mıknatısiyetliklerini kaybederler, bu da generatörün güvenilirliğini düşürmektedir.

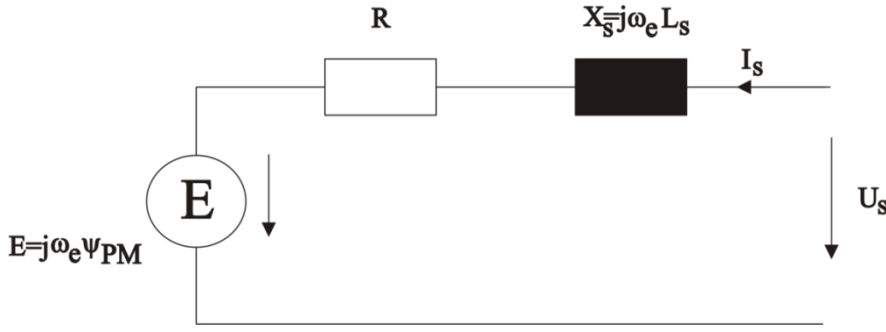
Endüktans değerleri, zamanla rotor konumuna göre farklı değerler alırlar. Bu zamanla değişim, gerilim matrisinin doğrudan çözümünü zorlaştırır. Gerilim denkleminin çözümünü kolaylaştırmak için endüktans matrisi elemanlarının zamanla değişmediği bir eksen sistemi oluşturmak gerekir. Dönüşüm sonucunda endüktans matrisinin elemanları sabit katsayılar haline gelmektedir.

SMSG'nin matematiksel modeli d ve q rotor referans eksenlerine göre oluşturulmuştur [130].



Şekil 4.1 SMSG'ün dq rotor referans eksenleri

Şekil 4.2'de sabit mıknatıslı senkron generatörün 1 faz için eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 4.2 Sabit mıknatıslı senkron generatörün rotor referans düzleminde bir faz eşdeğer devresi [130]

Burada, ω_e , elektriksel açısal hızı; Ψ_{PM} , rotorun sabit mıknatıslarından dolayı statordaki manyetik akıyı; f_e , elektriksel frekansı; I_s , stator sargılarındaki akımı, U_s , toplam manyetik alan ile endüklenen gerilime karşılık gelen SMSG'nin stator gerilimini ifade etmektedir.

$$|E| = \omega_e \Psi_{PM} = 2\pi f_e \Psi_{PM} \quad (4.11)$$

Generatörün dq rotor referans eksenlerine göre kararlı hal gerilim denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_e \Psi_{sq} + \Psi_{sd} \quad (4.12)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_e \Psi_{sd} + \Psi_{sq} \quad (4.13)$$

$$\Psi_{sd} = L_d i_{sd} + \Psi_{PM} \quad (4.14)$$

$$\Psi_{sq} = L_q i_{sq} \quad (4.15)$$

u_{sd} ve u_{sq} stator uç gerilimlerinin dq bileşenlerini, i_{sd} ve i_{sq} stator akımlarının dq bileşenlerini, L_d ve L_q dq referans eksenlerindeki stator endüktanslarını ifade etmektedir. Kararlı durumlarda stator geçişleri ihmal edilebilir. Bu durumda stator gerilim denklemleri aşağıdaki denklemlere indirgenebilir.

$$u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_e \Psi_{sq} \quad (4.16)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_e \Psi_{sd} \quad (4.17)$$

Generatörün elektriksel torku;

$$T_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \Psi_{PM} i_{sq}] \quad (4.18)$$

p : generatörün çift kutup sayısı

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_{PM} i_{sq} \quad (4.19)$$

Rüzgâr türbininin bütün dönen parçaları (kanatlar ve rotor) tek bir parça olarak ifade edilirse, döndürme momentleri arasındaki ilişkiyi aşağıdaki formülle açıklayabiliriz [131];

$$T_{wt} - T_e = 2H \frac{d\omega_e}{dt} \quad (4.20)$$

T_{wt} : aerodinamik mekaniksel döndürme momenti

$$P_{wt} = T_{wt} / \omega_r \quad (4.21)$$

T_e : generatörün elektriksel döndürme momenti

H : bütünleşik dönen sistemler için toplam atalet (eylemsizlik) momenti

ω_e : elektriksel hız

3 kanatlı rüzgâr türbinleri için toplam atalet momenti aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$H = \frac{J\omega_e^2}{2P} \quad (4.22)$$

J : rüzgâr türbininin yüke bağlı atalet momenti (kgm^2)

P : rüzgâr türbininin nominal gücü

$$J = 3m_b \left(\frac{r}{3}\right)^2 = \frac{1}{9} m_r r^2 \quad (4.23)$$

m_b : rüzgâr türbin kanatlarının ağırlığı (380 g)

m_r : rüzgâr türbini bütün kütlenin ağırlığı (18 kg)

r : rotor çapı (1800 mm)

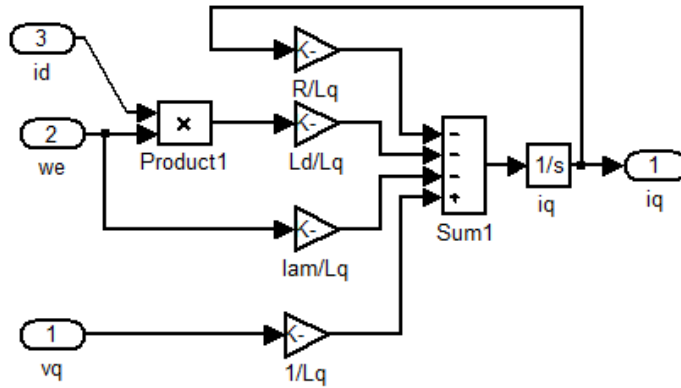
Generatör, rüzgâr türbini rotoruna direkt akupple edilmiştir. Mekaniksel rotor hızını (ω_r) ve generator kutuplarının (n_p) sayısını kullanarak elektriksel hızı aşağıdaki formülle bulabiliriz [131-135].

$$f_e = \frac{n_p}{2} f_m = \frac{n_p}{2} \cdot \frac{\omega_r}{2\pi} \quad (4.24)$$

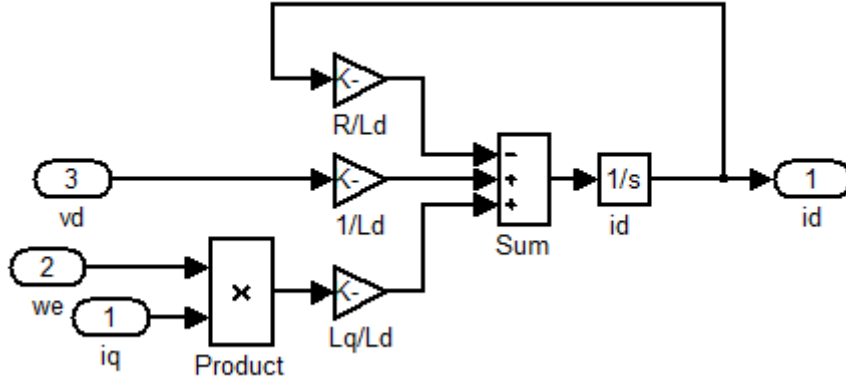
$$\omega_e = 2\pi f_e = \frac{n_p}{2} \omega_r \quad (4.25)$$

Tablo 4.1 Hibrit güç sisteminde kullanılan rüzgâr türbininin teknik özellikleri

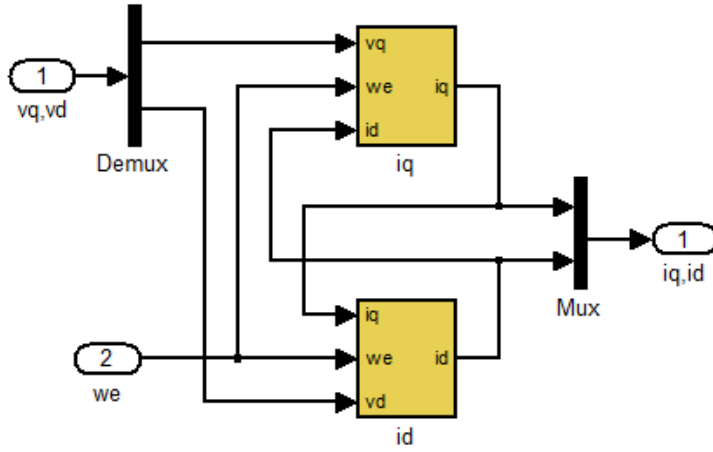
Rüzgâr Türbin Tipi	dikey eksenli
Rotor çapı (mm)	1800
Ağırlığı (kg)	17,5
Pervane sayısı	3
Generatör tipi	sabit mıknatıslı senkron generatör
Cut-in (m/s)	2,5
Cut-off (m/s)	50
Nominal Güç (W)	1000
Maksimum Güç (W)	3200 (20 m/s)
Çıkış gerilimi	25 VDC



Şekil 4.3 q eksenine göre manyetik akı bloğu

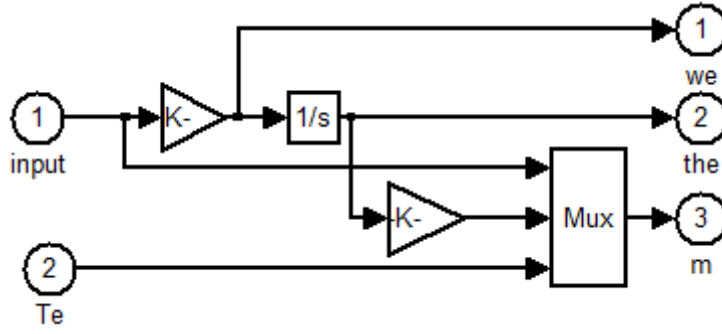


Şekil 4.4 d eksenine göre manyetik akı alt bloğu

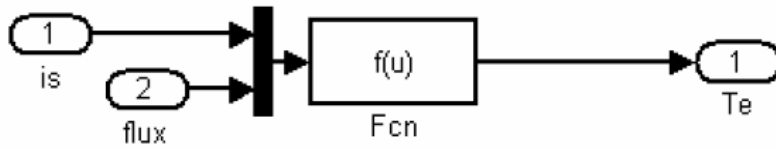


Şekil 4.5 dq eksenlerine göre manyetik akı blokları

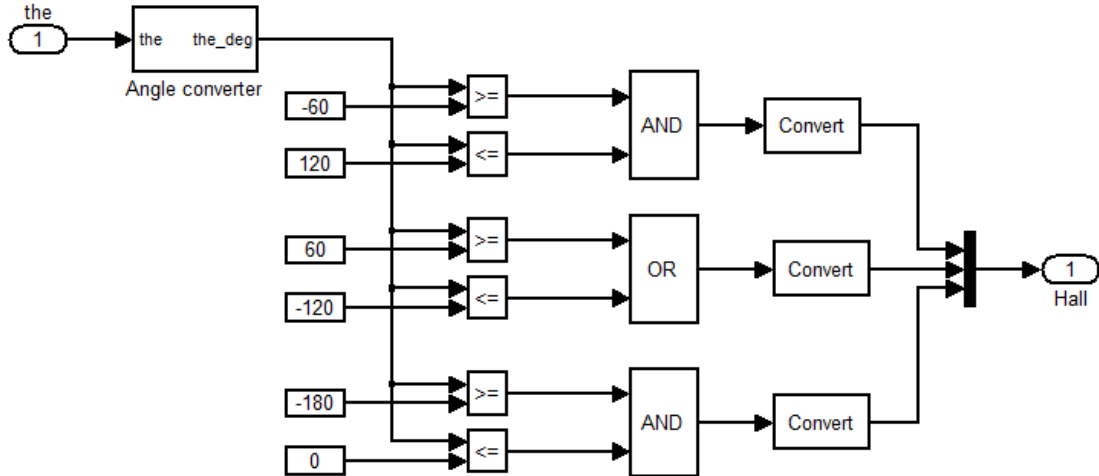
Rüzgâr türbininin modellenmesinde MATLAB programında bulunan hazır Simulink® bloklarından faydalanılmıştır.



Şekil 4.6 Rüzgâr türbini mekaniksel model bloğu



Şekil 4.7 Elektromanyetik moment bloğu

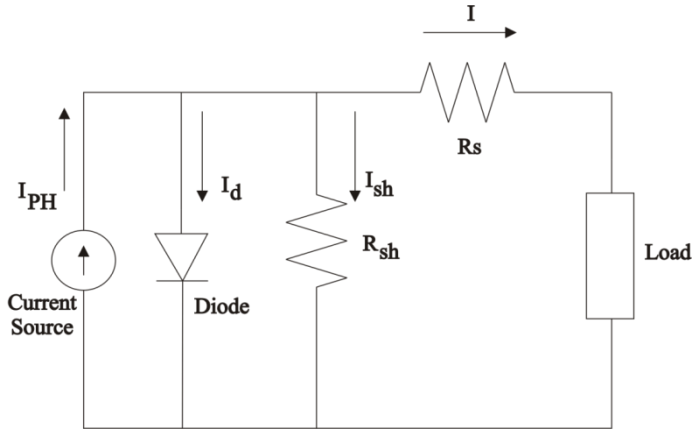


Şekil 4.8 Rotor açısını belirlemek için kullanılan Hall sensor bloğu

4.2 Fotovoltaik Panelin Modellenmesi

Fotovoltaik panellerden elde edilen maximum elektriksel gücü hesaplamak için, güneş pili hücresinin temel matematik modeli kullanılmıştır [136]. Bir güneş pili eşdeğer

devresi bir akım kaynağına paralel bir diyot ile temsil edilebilir. Ancak pratikte eşdeğer devreye bir seri bir de paralel direnç eklenir. Fotovoltaik güneş pili hücresinin tek diyotlu eşdeğer devresi Şekil 4.9’da görülmektedir [137].



Şekil 4.9 Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi

Fotovoltaik pilin eşdeğer devresinden geçen akımın tespit edilebilmesi için aşağıdaki parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler: I_{PH} , fotovoltaik akım; I_s , karanlık doyma akımı; R_s , seri direnç; R_{sh} , paralel direnç ve A , düzeltilmiş idealite faktörü. N_{cs} , seri bağlı güneş pili veya modül sayısı; n , diyot idealite veya kalite faktörü; k , Boltzmann sabiti ($1.38 \times 10^{-23} J/K$); q , elektron yükü ($1.6 \times 10^{-19} C$); T_c , Kelvin olarak etkin güneş pili sıcaklığı olmak üzere;

$$A = N_{cs} \cdot n \cdot k \cdot T_c / q \quad (4.26)$$

olarak hesaplanabilmektedir [138].

R_s , seri direnç, akım akışına karşı olan iç direnci temsil eder ve $p - n$ bağlantı yerinin derinliğine, kirliliğe, kontak direncine bağlı olarak değişir. R_{sh} , paralel direnç, toprağa kaçak akım ile ters olarak ilişkilidir. Paralel direnç, bir güneş pilinde kaçak akımları ifade etmekte olup güneş pili verimini etkileyen parametrelerdendir. Akım-gerilim eğrisinin kısa devre akımı civarındaki eğiminden yola çıkarak paralel direnç değeri, Phang veya Blas modeli kullanılarak hesaplanabilir [139-141]. İdeal hücresinde $R_s=0$ (seri kayıplar yok), $R_{sh} = \infty$ (toprağa kaçak yoktur). Tipik yüksek kaliteli silikon fotovoltaik pil hücresinde $R_s= 0,05-0,10$ arasında değişirken, $R_{sh}=200-300$ ohm arasında değişir [142-144]. Kirchhoff’ un akım kanunu kullanarak, güneş pili hücresinin akım

değerini aşağıdaki denklemlerle ifade edebiliriz. Seçilen herhangi bir noktada devreden geçen akım (I); I_{PH} , güneş pilinde ışıkla üreyen akımı; V , yük üzerine düşen gerilimi; I_d , diyot akımını, I_{sh} , kaçak akım olmak üzere;

$$I = I_{PH} - I_d - I_{sh} \quad (4.27)$$

formülü ile hesaplanır.

Fotovoltaik akım (I_{PH}), fotovoltaik pilin bulunduğu yere düşen ışıma yoğunluğu ve fotovoltaik pilin çalışma sıcaklıklarına göre değişiklik gösterir [145],

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I(T_C - T_C^{ref})]G \quad (4.28)$$

$$I_S = I_{RS}(T_C/T_C^{ref})^3 \exp[qE_G(1/T_C^{ref} - 1/T_C)/kA] \quad (4.29)$$

$$I = I_{PH} - I_S\{\exp[q(V + IR_S)/kT_CA] - 1\} - (V + IR_S)/R_{sh} \quad (4.30)$$

I_{SC} , güneş pili hücresinin kısa devre akımıdır. Işık altında herhangi bir besleme olmaksızın ve ideal durumda (seri ve paralel direnç etkilerinin olmadığı durum) devreden geçen toplam akım kısa devre akımı olarak ifade edilir. Kısa devre akımı yüzeye gelen ışığın karakteristiği ile orantılıdır. K_I , güneş pili hücresinin kısa devre anındaki sıcaklık katsayısı, T_C^{ref} , güneş pili hücresinin referans sıcaklığıdır. G , ışıma yoğunluğudur ($\frac{kW}{m^2}$). I_S , karanlık doyma akımıdır. PV diyot yapımında kullanılan malzemelerin band aralığına ve sıcaklığa bağlıdır. T_C , güneş pilinin çalışma sıcaklığını ifade etmektedir. Güneş pili performansı genel olarak, kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç noktası MPP ve akım-gerilim karakteristiğinin düzgünlüğünün ölçüsü olan dolum çarpanı FF (filling factor) ile açıklanır. Dolum çarpanı, maksimum güç noktasındaki alan ile I_{SC} ve V_{OC} çarpımından oluşacak alanın birbirine oranı olarak ifade edilir. Çalışma gerilimi $V = V_{MPP}$ ve bu gerilime karşılık gelen çalışma akımı $I = I_{MPP}$ olan noktada akım-gerilim eğrisi altında kalan alan maksimum değerindedir. Bu noktaya maksimum güç noktası denir. Güneş pillerinin akım-gerilim karakteristiğinde önemli olan bu noktada gücün gerilime göre değişimi sıfırdır [146]. Bu nedenle güneş pilleri çıkış gerilimini artırmak için birbirine seri bağlanırlar. Güneş pillerinin çalışma sıcaklığı, güneş pilinin yapıldığı yarı iletken malzemeye, güneş pilinin

paketlenme şekline, çevresel etkilere ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Güneş pili sıcaklığı için günümüzde sıkça kullanılan model normal çalışma koşullarında güneş pili sıcaklığı (*NOCT*: Normal Operating Cell Temperature) tanımına dayalı, ısı kayıp katsayısını içeren ve yüzeye gelen ışık şiddetiyle güneş pili sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. T_a , çevre sıcaklığını, G_{eff} , yüzeye gelen etkin ışık şiddetini, T_c , güneş pili sıcaklığını ifade etmektedir.

$$T_c = T_a + C_t G_{eff} \quad (4.31)$$

$$C_t = \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800(W / m^2)} \quad (4.32)$$

C_t , fotovoltaik pilin çalışma sıcaklıklarından dolayı oluşan ısı ve enerji kayıplarını ifade eden bir katsayıdır.

Modülün arka yüzeyinin kaplı olduğu malzemeye bağlı olarak ısı iletimi de değişeceğinden modülün arka yüzeyinde oluşacak sıcaklığın hesaplanmasında kullanılacak modeldeki katsayılar da değişecektir [142]. Güneş pilinin paketlenme şeklide pil verimini etkilemektedir. $T_m(^{\circ}C)$, modülün arka yüzeyindeki sıcaklık, ωs (m/s), rüzgâr hızı, $T_1 (^{\circ}C)$, düşük rüzgâr hızlarındaki üst sıcaklık limitini ifade eden bir değer, $T_2 (^{\circ}C)$, yüksek rüzgâr hızlarındaki alt sıcaklık limitini ifade eden bir değer, b , rüzgâr hızı ile modülün ark yüzeyindeki sıcaklığı arasındaki ilişkiyi ifade eden bir katsayı ve $\Delta T (^{\circ}C)$, ise paketleme malzemesinin sıcaklık aralığı olmak üzere, güneş pilinin çalışma koşullarındaki sıcaklığı;

$$T_c = T_m + \frac{G_{eff}}{G} \Delta T \quad (4.33)$$

olarak ifade edilir. Burada güneş pilinin arka yüzeyindeki sıcaklık;

$$T_m = T_a + \frac{G_{eff}}{G} [T_1 \exp(b.\omega s) + T_2] \quad (4.34)$$

ifadesi ile verilmektedir.

Tablo 4.2 İki farklı güneş pili paketleme şekli için güneş pili veya modül sıcaklığının belirlenmesinde kullanılan sıcaklık katsayıları [141-142]

Paketleme şekli	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	b	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$
Cam/güneş pili/cam	25,0	8,2	-0,112	2
Cam/güneş pili/tedlar	19,6	11,6	-0,223	3

E_G , güneş pilinin yapıldığı yarıiletken malzemenin band aralığı [147-148].

Tablo 4.3 Farklı güneş pili tipleri için ideal faktör (A) ve band aralığı (E_G) değerleri

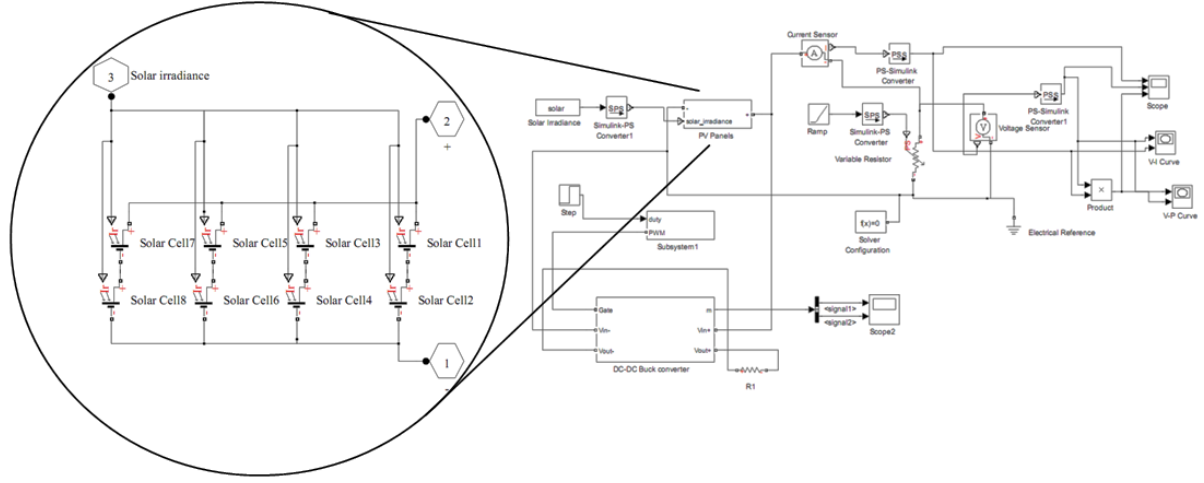
Güneş pili tipi	A	E_G
Mono-Si	1.026	1.12
Poly-Si	1.025	1.14
a-Si:H	1.8	1.65
a-Si:H tandem	3.3	2.9
a-Si:H triple	3.09	1.6
CdTe	1.5	1.48
CIS	1.5	1
AsGa	1.3	1.43

Tablo 4.2 Fotovoltaik panelin etiket değerleri

Fotovoltaik panel tipi	Poly Silisium
Maksimum Güç (P)	100
Kısa devre akımı (I_{SC})	6.44 A
Açık devre gerilimi (V_{OC})	21.4 V
Maksimum system gerilimi	800 VDC
Hücre sayısı ve tipi	36 Poly-Si
Ağırlık (kg)	12
Yükseklik (mm)	1490
Derinlik (mm)	35
Verim (%)	16

Hibrit güç sisteminde kullanılan PV panellerin etiket değerleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

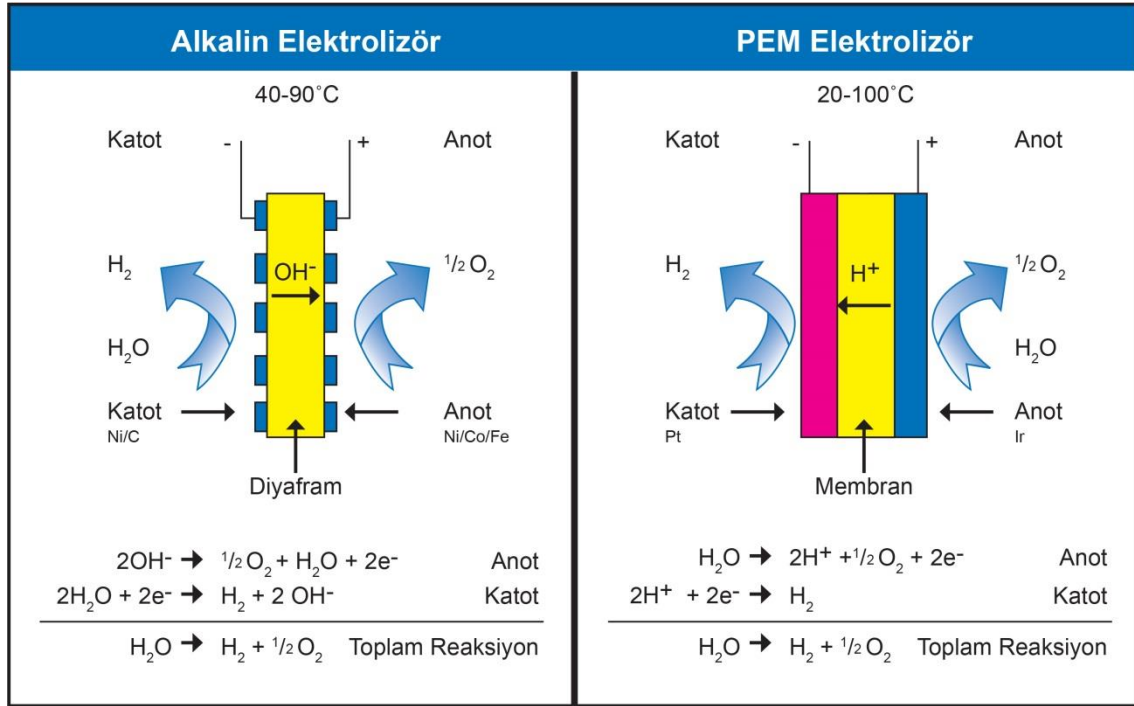
Poly-Si fotovoltaik paneller için The MATLAB/Simulink® ortamında oluşturulan model ve alt modeller Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.10 Fotovoltaik panellerin model ve altmodelleri

4.3 PEM Tipi Elektrolizörün Modellenmesi

Suyun elektrolizi yöntemi ile hidrojen üretiminin enerji verimi, diğer yöntemlere göre yüksektir. Bunun yanı sıra, suyun elektrolizi yönteminin, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve hibrit güç sistemlerine entegrasyonu kolaydır [149]. Elektrolizörler, suyu elektrik enerjisi kullanılarak saf hidrojen ve oksijene ayıran elektrokimyasal cihazlardır. Elektrolit olarak sıvı elektrolit kullanan alkali elektrolizör ve katı elektrolit kullanan PEM tipi elektrolizör olmak üzere iki farklı elektrolizör bulunmaktadır [150]. PEM tipi elektrolizörlerle bir kompresöre ihtiyaç duymadan yüksek basınçlarda hidrojen üretilmektedir. Böylelikle, önemli bir güç tüketicisi olan kompresörler hibrit güç sistemine dahil edilmeyerek, sistem maliyeti düşürülebilir. Bunun yanı sıra, kompresörün çalışma esnasında oluşturduğu, gürültü ve titreşimlerde ortadan kalkmaktadır. PEM tipi elektrolizörler, alkali tipi elektrolizörlerden farklı olarak değişik sıcaklık, basınç ve akım yoğunluklarında çalışabilirler.



Şekil 4.11 Alkalin ve PEM tipi elektrolizörlerin karşılaştırmalı çalışma prensipleri [150]

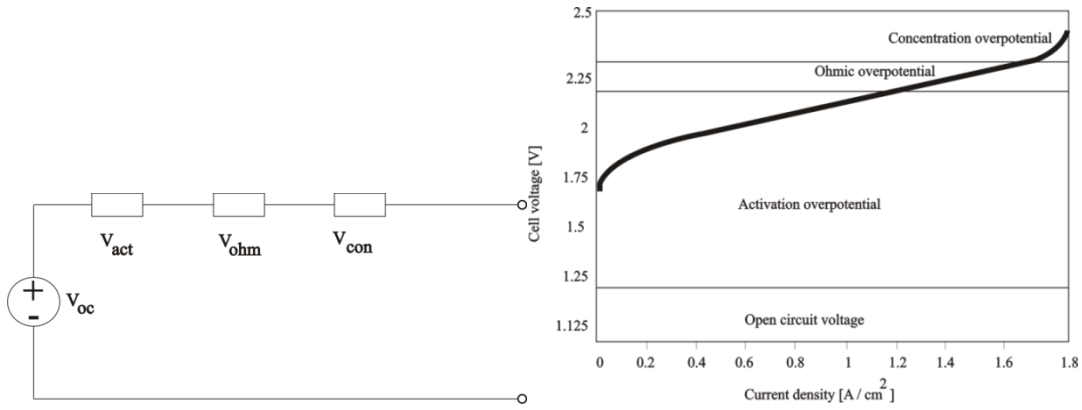
Alkalin ve PEM tipi elektrolizörlerin karşılaştırmalı çalışma prensipleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Hibrit güç sisteminde kullanılan PEM tipi elektrolizörün teknik özellikleri Tablo 4.3’te gösterilmektedir.

Tablo 4.3 PEM tipi elektrolizörün teknik özellikleri

Maksimum gücü (W)	400
Hidrojen akış oranı (sl/h)	60
Maksimum çıkış basıncı	10.5 bar (155psi)
Safılık	99.9999%
STP de hidrojen akış oranı.	0-600 cc / min at STP
STP: Standard temperature and pressure: (20°C / 1bar absolute) (68°F / 14.4PSI absolute)	
Çalışma sıcaklığı	2 - 60 °C
Verim	% 35

Temelde PEM tipi elektrolizör hücresi, PEM tipi yakıt pili hücresine benzemektedir. Yakıt pillerinde çiftkutuplu plaka için en çok kullanılan malzeme grafit iken,

elektrolizörlerde akım dağıtım plakası olarak titanyum kullanılmaktadır. Temel bir PEM tipi elektrolizör, suyun elektrokimyasal reaksiyon ile ayrıştığı ve oksijenin olduğu bir anot katalizör, hidrojenin olduğu bir katot katalizör, bir DC güç kaynağı, sadece protonların geçmesine imkân sağlayan polimer bir membran (Nafion[®], Fumapem[®], Flemion[®], Aciplex[®] vb.) ve elektrik iletiminin sağlandığı elektrot kısmından oluşmaktadır. Anot ve katot arasında *DC* akım uygulanır. Su, anot girişinden hücreye alınır. İçeri alınan su, anot tarafında hidrojen iyonlarına (protonlar) ve oksijen gazına ayrışır. Oksijen gazı anot çıkışından dışarı verilirken hidrojen iyonları membrandan karşıya geçerek katot katalizöründen elektron alır ve sonuç olarak hidrojen gazı oluşur [151-153].



Şekil 4.12 PEM tipi elektrolizörün polarizasyon eğrisi ve basit eşdeğer devresi

Elektrolizörlerin modellenmesinde pek çok yazar Şekil 4.11'deki eşdeğer devresini çalışmalarında referans almıştır [154-158]. Bir PEM tipi elektrolizör, çeşitli elektrolizör hücrelerinin seri bağlanması ile oluşur. Bu tez çalışmasında sunulan model, hücre gerilimi ve hücre akımı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Elektrolitik hücredeki gerçek hücre gerilimi, ideal açık devre geriliminden yüksektir.

$$V = V_{oc} + V_{act} + V_{ohm} + V_{con} \quad (4.31)$$

V_{oc} : açık devre uç gerilimi

V_{act} : ekstra aktivasyon gerilimi. Elektroliz, teorik voltajda gerçekleşmemektedir. Anot ve katot reaksiyonlarının gerçekleştirilebilmesi için sisteme teorik voltajın üzerinde voltaj uygulanması gerekmektedir.

V_{ohm} : elektrotlardaki dirençlerden dolayı oluşan gerilim düşümü (ohmik kayıplar).

V_{con} : ekstra konsantrasyon gerilimi. Tersinir potansiyel (teorik voltaj) veya hücredeki açık devre uç gerilimi (V_{oc}), Nernst denklemlerinden elde edilir [159-160]. Suyun elektrolizinde, aşağıdaki net reaksiyon ile su, hidrojen ve oksijen molekülüne ayrışır.



Bu reaksiyonun Gibbs serbest enerjisi,

$$\Delta G = \mu_{H_2} + \frac{1}{2} \mu_{O_2} - \mu_{H_2O} = \Delta G^0 + RT \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}) \quad (4.33)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Bu denklemde μ kimyasal potansiyeli simgelerken, ΔG^0 25°C ve 1 atmosferik basınç altındaki (standart şartlar) Gibbs serbest enerjiyi ifade eder. $\Delta G^0 = 285,84 \text{ kJ}$.

$$V_{oc} = E_0 + \frac{RT}{2F} \left[\ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \right] \quad (4.34)$$

$$E_0 = 1,229 - 0,9 \times 10^{-3} (T - 298) \quad (4.35)$$

Nernst denklemlerine göre, belirli bir sıcaklıktaki ideal hücre gerilimi, reaktant olarak kullanılan deiyonize suyun yüksek basınca çıkması ile arttırılabilir. Gerçekte, yüksek hücre gerilimleri, yüksek basınçlarda elde edilir [161].

Dalton'un kısmi basınçlar kanununa göre,

$$p_{H_2O} = \frac{610}{10^5} \exp \left[\frac{T}{T+238,3} \times 17,2694 \right] \quad (4.36)$$

$$p_{O_2} = p_{anode} - p_{H_2O} \quad (4.37)$$

$$p_{H_2} = p_{cathode} - p_{H_2O} \quad (4.38)$$

E_0 : nernst gerilimi (V)

p_{anode} : anot basıncı (bar)

$p_{cathode}$: katot basıncı (bar)

pH_2O : suyun kısmi basıncı (bar)

pO_2 : oksijenin kısmi basıncı (bar)

pH_2 : hidrojenin kısmi basıncı (bar)

T : Kelvin biriminden sıcaklık ($273+^0C$)

R : gaz sabiti = $8.314472 J/Kmol = 0.08314 (bar.l/Kmol)$

F : Faraday sabiti = $96485 Cmol^{-1}$

Ekstra aktivasyon gerilimi (V_{act}), elektrotların direncine, dolayısıyla kullanılan elektrot malzemesine ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterir [162]. Anot ve katot katalizör modelleri için kullanılacak olan ekstra aktivasyon gerilimleri ile akım yoğunlukları arasındaki bağıntı, Butler-Volmer denklemleri (4.39) kullanılarak elde edilmiştir [163-164];

$$i = i_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_1 F}{RT} V_{act} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha_2 F}{RT} V_{act} \right) \right] \quad (4.39)$$

$$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c} \quad (4.40)$$

$$V_{act,a} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{i}{i_{0,a}} \right) \right] \quad (4.41)$$

$$V_{act,c} = -\frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) \right] \quad (4.42)$$

$V_{act,a}$: anot katalizördeki ekstra aktivasyon gerilimi

$V_{act,c}$: katot katalizördeki ekstra aktivasyon gerilimi

α_1 : katot tarafı için transfer katsayısı

α_2 : anot tarafı için transfer katsayısı

i : akım yoğunluğu

i_0 : transfer akım yoğunluğu

$\alpha_1 = \alpha_2$ kabul edilmiştir [165].

$i_{0,a}$, $i_{0,c}$: anot ve katot katalizörlerdeki her elektrot için transfer akım yoğunluğu

PEM tipi elektrolizörlerde elektrokimyasal reaksiyonlar membranının her iki tarafında bulunan anot ve katot katalizör tabakalarında gerçekleşir. Ticari uygulamalarda katalizör olarak Platin (*Pt*) kullanılırken, Platin ile birlikte Paladyum (*Pd*), Altın (*Au*), Rutenyum (*Ru*), Nikel (*Ni*), Demir (*Fe*), Kobalt (*Co*), ve metal alaşımlar da kullanılabilir [148]. Katalizör malzemesi olarak Platin (*Pt*) kullanılması durumunda, $i_{0,a}$, değeri seçilirken 10^{-13} - $10^{-6} A/cm^2$, $i_{0,c}$, $10^{-3} A/cm^2$ arasında alınmıştır [166].

Ekstra ohmik gerilimi, akım toplayıcı elektrotlarındaki ohmik dirençlerinden, çift kutuplu plakanın direncinden meydana gelmektedir [167]. PEM tipi elektrolizörlerde akım dağıtım plakası için titanyum veya kompozit malzemeler kullanılır. Ohm yasasını kullanarak aşağıdaki denklemler oluşturulur.

$$V_{ohm} = iR_{ohm} \quad (4.41)$$

$$R_{ohm} = t_m/\sigma_m \quad (4.42)$$

σ_m : membranın iletkenliği

λ_m : membranın su içeriği

T : elektrolizörün çalışma sıcaklığı [168, 169].

$$\sigma_m = (0,00514\lambda_m - 0,00326)\exp(1268(1/303 - 1/T)) \quad (4.43)$$

Konsantrasyon kayıpları, kütle transferinden dolayı meydana gelmektedir ve yüksek akım yoğunluklarında hidrojen ve oksijen konsantrasyonunu etkiler. Akış kanalları tasarımı, elektrot kalınlıklarının azaltılması gibi iyileştirilmeler ile kütle transferinden dolayı oluşan konsantrasyon kayıplarını azaltabilir [170].

$$V_{con} = V_{con,a} + V_{con,c} \quad (4.44)$$

$$V_{con,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(\frac{p_{O_2}^I}{p_{O_2}} \right)^{1/2} \right] \quad (4.45)$$

$$H_2\text{üretim} = \eta_F \frac{n_C(RITt)}{Fpz} \quad (4.47)$$

n_C : PEM tipi elektrolizör yığınındaki hücre sayısı

R : gaz sabiti = $8.314472 \text{ J/Kmol}^\circ = 0.08314 \text{ (bar.l/}^\circ\text{K.mol)}$

I : elektrolizör için sağlanan akım değerleri (A)

T : elektrolizörün çalışma sıcaklığı ($273+^\circ\text{C}$)

t : elektrolizörün çalışma süresi (saniye)

F : Faraday sabiti = 96485 C/mol

p : ortam basıncı = 1.10^5 Pa

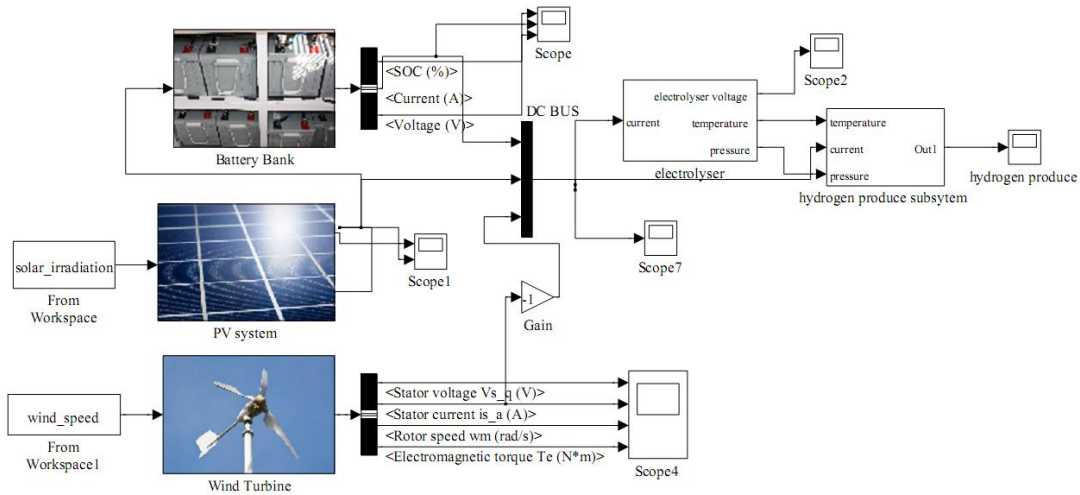
z : reaksiyona katılan elektron sayısı (hidrojen için 2, oksijen için 4)

Elektrolizörün ürettiği hidrojenin, maksimum gerçek ve teorik miktarları arasındaki orana Faraday verimi adı verilir. Elektrolizörün 40°C lik çalışma sıcaklığındaki Faraday verimi aşağıdaki denklemle hesaplanır.

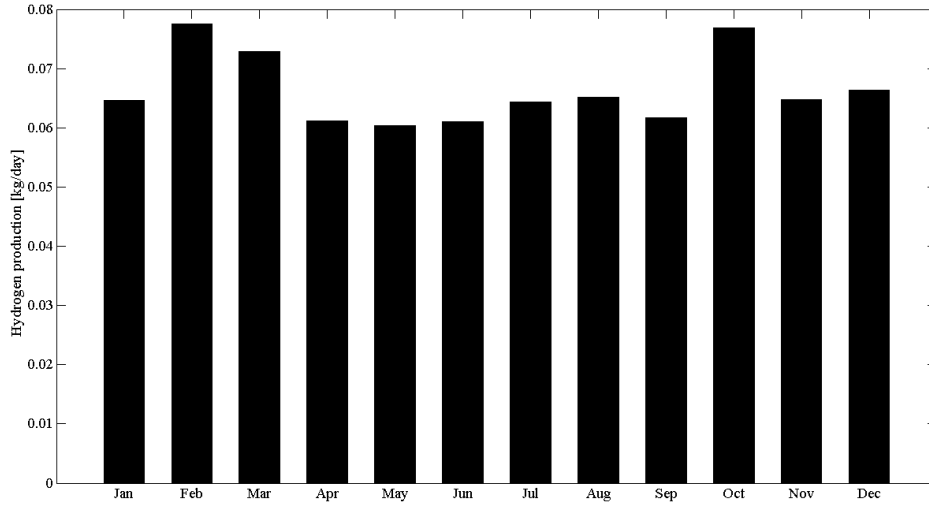
$$\eta_F = 96,5e^{(0.09/i-75.5/i^2)} \quad (4.48)$$

i , elektrolizörün eşdeğer devresinden geçen elektrik akımını ifade etmektedir [173-177].

Hibrit güç sisteminin Matlab/Simulink® aracılığıyla oluşturulan modeli Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15 Hibrit güç sisteminin Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan modeli



Şekil 4.16 PEM tipi elektrolizörün aylık ortalama hidrojen üretim miktarı

Şekil 4.16 incelendiğinde elektrolizör ile üretilen hidrojen miktarının en çok olduğu dönemin Şubat ve Ekim aylarında gerçekleştiği görülmektedir. 2010 yılı meteorolojik verileri gözönüne alındığında, Matlab/Simulink® ortamında oluşturulan model ile hesaplanan yıllık toplam hidrojen üretim miktarı 34,3 kg dır. 1 mol H_2 2 gr olduğuna göre 34,3 kg H_2 17150 mol etmektedir. Hidrojenin tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip olduğu düşünülürse, hibrit güç sisteminin hesaplanan yıllık 34,3 kg lık hidrojen üretim kapasitesi, sürdürülebilir enerji politikaları açısından kayda değer gözükmektedir [177-178].

Tablo 4.4 25°C, 1 atmosfer basınçta yakıtların alt ve üst ısı değerleri [179]

Yakıt	Üst Isıl Değeri (kJ/g)	Alt Isıl Değeri (kJ/g)
Hidrojen	141,86	119,93
Metan	55,53	50,02
Propan	50,36	45,6
Benzin	47,5	44,5
Motorin	44,8	42,5
Metanol	19,96	18,05

4.3.1 Hidrojen tankının hacim hesabı

Hibrit güç sistemlerinden üretilen hidrojenin depolanması için gerekli tankın hacim hesabı (V_{HT}) aşağıdaki formülle yapılabilir [180-184].

$$V_{HT} = 0.0224 M_{HT} \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} [(P_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_{Ct1} + P_W \cdot \eta_{WT} \cdot \eta_{Ct2}) \cdot \eta_{Bt} \cdot \eta_{EL}] dt}{65.8 H_{PT}} (m^3) \quad (4.50)$$

H_{PT} : hidrojen tankının bar cinsinden depolama basıncı.

M_{HT} : hidrojen tankının mevsimsel doluluk oranına göre ve ilk şarj durumuna göre değişiklik gösteren boşluk katsayısı. M_{HT} mevsim durumlarına göre 2-3 den fazla değer alamaz.

SOC_{H_2} : hidrojen tankının şarj doluluk oranı (%)

P_{PV} : fotovoltaiik panelin tepe değer gücü (W)

η_{PV} : fotovoltaiik panelin verimi = % 16

η_{Ct1} : fotovoltaiik panele bağlı DC/DC doğrultucunun verimi = % 90

P_W : rüzgâr türbini çıkış gücü (W)

η_{WT} : rüzgâr türbini verimi = % 56

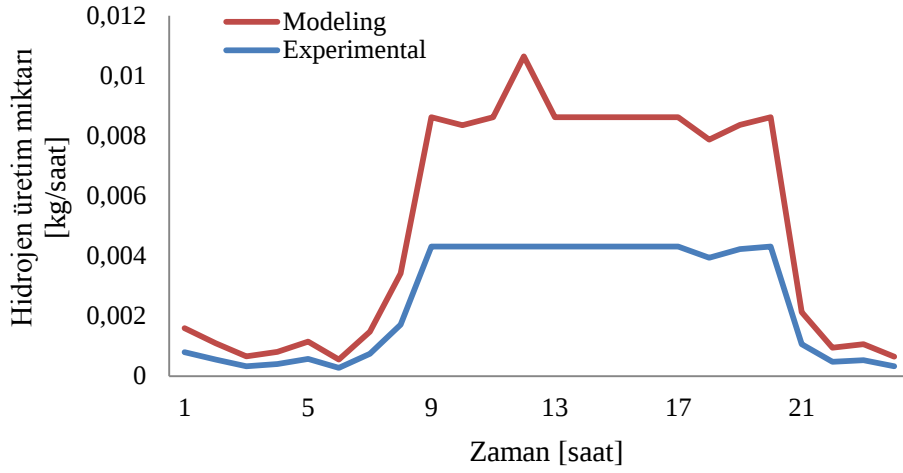
η_{Ct2} : rüzgâr türbinine bağlı AC/DC dönüştürücünün verimi = % 90

η_{Bt} : akü grubunun verimi = % 95

η_{EL} , elektrolizörün verimi = % 35

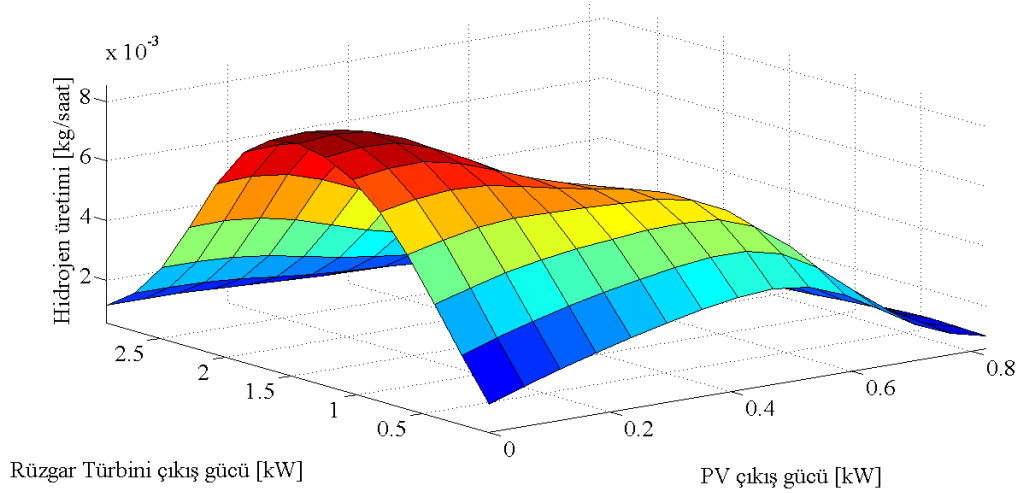
5 SONUÇLAR

Şebekeden bağımsız rüzgâr ve güneş kaynaklı hibrit güç sistemlerinin elektrik enerjisi üretim performansları büyük oranda, sistemin kurulu olduğu bölgenin coğrafi ve meteorolojik şartlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kaynak olarak kullandığımız rüzgâr ve güneşin kesintili olmasından dolayı, hibrit güç sisteminin kapasite faktörü düşüktür. Rüzgâr turbini ve fotovoltaik paneller, yükün talep ettiği enerjiyi karşılayamadığı durumlarda üçüncü bir yedek güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kaynağın coğrafi ve meteorolojik şartlardan etkilenmemesi tercih sebebidir. Şebekeden bağımsız hibrit güç sistemleri için en ideal yedek güç sistemi PEM tipi yakıt pilleri olarak gözükmektedir. Ancak hidrojen yakıt pili teknolojisi yüksek maliyetlidir ve yakıt pillerinde membran olarak kullanılan malzemelerin kullanım ömürleri kısadır. Bu nedenlerden dolayı hibrit güç sistemlerinin güç yönetim stratejilerine ihtiyacı vardır. Bu tez çalışmasında, şebekeden bağımsız güç sistemi için üç tane farklı güç yönetim stratejisi sunulmuştur. Böylelikle sistemde kesintisiz enerji akışı sağlanmış ve yakıt pilinde kullanılan membranın kullanım ömrü uzatılmıştır. Bunun yanı sıra rüzgâr ve güneşten üretilen fazla elektrik enerjisi, hem akü grubunda depolanmış hemde yakıt pilinde kullanılmak üzere elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretilmiştir. Sunulan üç farklı güç yönetim stratejisi de hibrit güç sisteminde yer alan yüklerin taleplerini karşılamıştır. Akü grubunun maksimum ve minimum doluluk oranları (şarj seviyesi-*SOC*) yakıt pilinin çalışıp çalışmamasına karar vermiştir. Akü grubu enerji verimi açısından en ideal stratejinin, verilen üçüncü strateji olduğu Matlab/Simulink® ortamında hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında, şebekeden bağımsız hibrit güç sisteminde PEM tipi elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretim performansı, Matlab/Simulink® ortamında temel elektrokimyasal denklemler kullanılıp modellenerek hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre hibrit güç sisteminin yıllık hidrojen üretim miktarı 34,3 kg olarak bulunmuştur. Oluşturulan model aracılığıyla 2010 yılı ocak ayı içerisindeki hesaplanan bir günlük hidrojen üretim miktarı ile ölçülen gerçek hidrojen üretim miktarı karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.1 Ocak ayı içerisindeki bir günlük deneysel ve modellenmiş hidrojen üretim miktarları

Gerçek ile ölçülen veri arasındaki ortalama hata karesi (MSE) $8.28e^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. Bu destekleyici sonuca göre hibrit güç sisteminin hidrojen üretim performansı için kullanılan model, farklı meteorolojik şartlar için de kullanılabilir örnek bir model olmaktadır. Hibrit güç sisteminde yer alan rüzgâr türbini ve fotovoltaik panellerin çıkış güçlerine bağlı olarak hidrojen üretim performansları Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2 Rüzgâr türbininin ve fotovoltaik panellerin çıkış güçlerine bağlı olarak hibrit güç sisteminin hidrojen üretim performansı

KAYNAKLAR

- [1] Owen, N.A., Inderwildi, O. R., King, D.A. (2010) The status of conventional world oil reserves—Hype or cause for concern? *Energy Policy*, 38(8), 4743-4749.
- [2] Shafiee, S., Topal, E. (2009) When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181-189.
- [3] International Energy Agency
http://www.iea.org/speech/2010/Tanaka/etp2010_berlin.pdf (05.03.2013)
- [4] Shafiee, S., Topal, E. (2010) A long-term view of worldwide fossil fuel prices. *Applied Energy*, 87(3), 988-1000.
- [5] International Energy Agency
http://www.iea.org/speech/2010/Tanaka/Jakarta_weo2010.pdf (05.03.2013)
- [6] Zecca, A., Chiari, L. (2010) Fossil-fuel constraints on global warming, *Energy Policy*, 38(1), 1-3.
- [7] Birleşmiş Milletler,
<http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf> (05.03.2010)
- [8] Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Gil, C., Alcayde, A., Gómez, J. (2011) Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753-1766.
- [9] TMMOB Türkiye'nin enerji görünümü, yayın no: MMO/588
- [10] <http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/yearbook.php> (23.02.2013)
- [11] International Energy Agency <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=TU> (25.04.2013)
- [12] Turkish Electricity Transmission Corporation (TEIAS). Electricity generation-transmission statistics of Turkey 2011. Ankara, Turkey. <<http://www.teias.gov.tr/istatistik2010/%C4%B0statistik%202010.htm>> (20.02.2013)

- [13] Yuksel, I., (2013) Renewable energy status of electricity generation and future prospect hydropower in Turkey. *Renewable Energy*, 50, 1037-1043.
- [14] European Commission, Turkey's 2010 progress report. URL <http://ec.europa.eu/enlargement/pdf/key_documents/2010/package/tr_rapport_2010_en.pdf> (20.02.2013).
- [15] The Ministry of Energy and Natural Resources (ETKB). URL http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Mavi_Kitap_2011.pdf (20.02.2013).
- [16] Kölmek, F. (2010) Turkish electricity market, Regional Black Sea Regulatory Workshop 5-6 May 2010 Chisinau, Moldova.
- [17] Ediger, V.Ş., Berk, I. (2011) Crude oil import policy of Turkey: Historical analysis of determinants and implications since 1968. *Energy Policy*, 39, 2132-2142.
- [18] Sirin, S.M., Ege, A., (2012) Overcoming problems in Turkey's renewable energy policy: How can EU contribute? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4917-4926.
- [19] The republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources Strategic Plan (2010-2014)
http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar_EN/ETKB_2010_2014_Stratejik_Plan_i_EN.pdf> (20.05.2013)
- [20] Sekercioğlu, S., Yılmaz, M. (2012) Renewable energy perspectives in the frame of Turkey's and the EU's energy policies. *Energy Conversion and Management*, 63, 233-238.
- [21] Baris, K., Kucukali, S. (2012) Availability of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective. *Energy Policy*, 42, 377-391.
- [22] Ates, S.A., Durakbasa N.M. (2012) Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, 45, 81-91.

- [23] Demirtaş, Ö (2013) Enerji piyasasındaki son gelişmeler ve kaya (şeyl) gazı, Türkiye İş Bankası, İktisadi Araştırmalar Bölümü.
- [24] Ozturk, I., Acaravci, A. (2012) The long-run and causal analysis of energy, growth, openness and financial development on carbon emissions in Turkey. Energy Economics, In Press, Corrected Proof, Available online 31 August 2012.
- [25] Lu, J., Zahedi, A., Yang, C., Wang, M., Peng, B. (2013) Building the hydrogen economy in China: Drivers, resources and technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 543-556.
- [26] U.S. National Renewable Energy Laboratory,
http://www.nrel.gov/hydrogen/about_ehts.html (20.04.2013).
- [27] The Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA)
<http://www.fchea.org/index.php?id=18> (11.06.2013).
- [28] Mlurray, W.E., Gervais, R.L. (1969) Integration of large power systems into mannedspace stations. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on 5(2) 170-184.
- [29] Akerlund, J. (1983) Hybrid Power Systems for Remote Sites- Solar, Wind and Mini Diesel. IEEE Telecommunications Energy Conference, INTELEC, 18-21 October, Tokyo, Japan.
- [30] Norton, J.H., Christopher, N.S. (1982) Hybrid/Wind Closed Cycle Vapor Turbogenerator Power System. IEEE Telecommunications Energy Conference, INTELEC, 3-6 October, Washington D.C., U.S.
- [31] Kawamoto, H. (1983) Triple Hybrid Primary Power Supply System. IEEE Telecommunications Energy Conference, INTELEC, 18-21 October, Tokyo, Japan.
- [32] Eskander, M.N., El-Shatter, T.F., El-Hagry, M.T. (2002) Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system, IEEE 33rd Annual

Power Electronics Specialists Conference PESC'02, 23-27 June, Queensland, Australia.

- [33] Paska, J., Biczal, P. (2005) Hybrid photovoltaic-fuel cell power plant. IEEE Power Tech, 2005 Russia.
- [34] Nelson, D.B., Nehrir, M.H., Wang, C. (2005) Unit sizing of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, U.S.
- [35] Ahmed, N.A., Miyatake, M., Al-Othman, A.K. (2008) Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems. *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2711-2719.
- [36] Lund, H. (2005) Large-scale integration of wind power into different energy systems. *Energy*, 30(13), 2402-2412.
- [37] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Elmasides, C. (2009) Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16), 7081-7095.
- [38] Santarelli, M., Cali, M., Macagno, S. (2004) Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(15), 1571-1586.
- [39] Mayer, T., Kreyenberg, D., Wind, J., Braun F. (2012) Feasibility study of 2020 target costs for PEM fuel cells and lithium-ion batteries: A two-factor experience curve approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19), 14463-14474.
- [40] Bernal-Agustín, J. L., Dufo-López, R. (2009) Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2111-2118.

- [41] Ferng, Y.M., Su A. (2007) A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), 4466-4476.
- [42] Agbossou, K., Doumbia, M.L., Anouar, A. (2005) Optimal hydrogen production in a stand-alone renewable energy system. *IEEE Industry Applications Conference*, Kowloon, Hong Kong.
- [43] Kaundinya, D.P., Balachandra, P., Ravindranath, N.H. (2009) Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power—A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2041-2050.
- [44] Dalton, G.J., Lockington, D.A., Baldock, T.E. (2009) Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel. *Renewable Energy*, 34(4), 955-964.
- [45] Nagai, N., Takeuchi, M., Kimura, T., Oka, T. (2003) Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1), 35-41.
- [46] Veziroğlu, T.N., Barbir, F. (1998) *Emerging technology series- Hydrogen Energy Technologies*, UNIDO, Vienna.
- [47] Erich, H. (2006) *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Springer, Springer-Verlag Berlin Heidelberg..
- [48] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001) *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 0 471 48997 2, 2001.
- [49] Bianchi, F.D., De Battista H., Mantz and R.J. (2007) *Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag London Limited.
- [50] Ackermann, T. (2005) *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd.

- [51] Carta, J.A. Mentado, D. (2007) A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations, *Energy Conversion and Management*, 48(2), 420-432.
- [52] Patel, M.R. (1999) *Wind and Solar Power Systems*, P.E.U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, Westinghouse Research Center, CRC Press.
- [53] American Wind Energy Association (AWEA),
<http://www.awea.org/faq/basicwr.html> (06.11.2009)
- [54] Johson, G.L. (2006) *Wind Energy Systems*, Electronic Edition, Manhattan, KS.
- [55] Çalışkan, M. (2009) Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sisteminde Sorunlar, Panel, 2 nci rüzgâr sempozyumu OMÜ - EMO Samsun şubesi, Samsun.
- [56] Dursun, E., Binark, A.K. (2008) Generator types in wind turbines. 7.National Clean Energy Symposium, Istanbul.
- [57] Mergen, A.F., Zorlu, S. (2005). *Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler*, Birsen Yayınevi.
- [58] Uyar, M., Gençoğlu, M.T., Yıldırım, S. (2005). Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sistemleri, *YEKSEM 2005, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin.
- [59] Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen, K. (2001) Generators and power electronics technology for wind turbines. *Industrial Electronics Society, IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE 29 November -2 December, Cnver, CO, U.S.*
- [60] Dubois, M.R., Polinder, H., Fereira, J.A. (2000) Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines. *IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, IEEE, New York, U.S.*
- [61] Muller, S., Deicke, M., De Doncker, R.W. (2002) Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *IEEE Industry Applications Magazine*, 8(3), 26-33.

- [62] Bogalecka, E. (1993) Power control of a doubly fed induction generator without speed or position sensor, in EPE 5th European Conference on Power Electronics and Application, Brighton, Great Britain.
- [63] Mergen, A.F., Zorlu, S. (2005) Elektrik Makineleri III Senkron Makineler, BirsenYayınevi, İstanbul.
- [64] Jianzhong, Z., Ming C., Zhe C. (2008) Optimal design of stator interior permanent magnet machine with minimized cogging torque for wind power application. Energy Conversion and Management, 49(8), 2100-2105.
- [65] Pan, Z., Jin. Y. , Zhang, H., (2004) Study on Switched Reluctance Generator, Journal of Zhejiang University, 5(5), 594-602.
- [66] Küpeli, A.Ö. (2005) Güneş pilleri ve verimleri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik A.B.D.
- [67] Gopalswamy, N., Hasan, S.S., Ambastha, A. (2010) Heliophysical Processes, Astrophysics and Space Science Proceedings, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [68] Luque, A. Hegedus, S. (2011) Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom.
- [69] Parida, B., Iniyar, S., Goic, R. (2011) A review of solar photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(3), 1625-1636.
- [70] Zhu, H., Wei, J., Wang, K., Wu, D. (2009) Applications of carbon materials in photovoltaic solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(9), 1461-1470.
- [71] Masters, G.M. (2004) Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley-Interscience, JohnWiley&Sons.
- [72] Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., Corkish, R. (2007) Applied Photovoltaics ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics Second Edition, Earthscan, U.K. and U.S.

- [73] Planning and Installing Photovoltaic Systems A guide for installers, architects and engineers (2008) The German Energy Society (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS LV Berlin BRB)).
- [74] Hordeski, M.F. (2008) Alternative fuels: The future of Hydrogen. The Fairmont Press, Inc. and Taylor & Francis Ltd.
- [75] Aydın, M. (2007) PEM yakıt pilinin iki boyutlu modellemesi, İ.T.Ü., Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [76] Winter, C.J. (2009) Hydrogen energy — Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. International Journal of Hydrogen Energy, 34(14).
- [77] Rahimpour, M.R., Mirvakili, A., Paymooni, K. (2011) Hydrogen as an energy carrier: A comparative study between decalin and cyclohexane in thermally coupled membrane reactors in gas-to-liquid technology. International Journal of Hydrogen Energy, 36(12), 6970-6984.
- [78] Larminie, J. (2003) Fuel Cell Systems Explained, Oxford Brookes University, UK Andrew Dicks University of Queensland, John Wiley & Sons Ltd., UK.
- [79] Miltner, A., Wukovits, W., Pro, Il T., Friedl, A. (2010) Renewable hydrogen production: a technical evaluation based on processsimulation. Journal of Cleaner Production, 18(1), 51-62.
- [80] Kılıçoğlu, A.E. (2008) Pem yakıt pilinin deneysel olarak incelenmesi ve modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- [81] Elsarrag, E. (2008) Experimental study of using fuel cells in dwellings for energy saving lighting and other low power applications. International Journal of Hydrogen Energy, 33(16), 4427-4432.
- [82] Vasquez, L.O. (2007) Fuel cell research trends, Nova Science Publishers, Inc. 2007, Newyork.

- [83] Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, Sung, J., Cho, C., Adroher X.C. (2011) A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 88(4), 981-1007.
- [84] Spiegel, C. (2008) *PEM Fuel Cell modeling and simulation using Matlab*, Elsevier Inc.
- [85] Srinivasan, S. (2006) *Fuel Cells from fundamentals to applications*, Springer Science+Business Media, LLC.
- [86] Kirubakaran, A., Jain, S., Nema R.K. (2009) A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2430-2440.
- [87] Görgün, H. (2006) Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(1), 29-38.
- [88] Khan, M.J., Iqbal, M.T. (2009) Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system. *Applied Energy*, 86(11), 2429-2442.
- [89] Reggiani, U., Sandrolini, L., Burbui G.L.G. (2007) Modelling a PEM fuel cell stack with a nonlinear equivalent circuit. *Journal of Power Sources*, 165(1), 224-231.
- [90] Araki, T., Koori, H., Taniuchi, T., Onda, K. (2005) Simulation of the current density distribution for a PEMFC by using measured electrochemical and physical properties of the membrane. *Journal of Power Sources*, 152, 60-66.
- [91] Chang, W.Y. (2013) Estimating equivalent circuit parameters of proton exchange membrane fuel cell using the current change method *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 584-591.
- [92] Jian-hua, T., Peng-fei, G., Zhi-yuan, Z., Wen-hui, L., Zhong-qiang S. (2008) Preparation and performance evaluation of a Nafion-TiO₂ composite membrane for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(20), 5686-5690.

- [93] Cheddie, D., Munroe, N. (2006) Mathematical model of a PEMFC using a PBI membrane. *Energy Conversion and Management*, 47, 1490-1504.
- [94] Mérida, W., Harrington, D.A., Canut, J.M.L., McLean, G. (2006) Characterisation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) failures via electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of Power Sources*, 161(1), 264-274.
- [95] Lee, J.H., Lalk, T.R., Appleby, A.J. (1998) Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks. *Journal of Power Sources*, 70(2), 258-268.
- [96] Bıyıkoglu, A. (2005) Review of proton exchange membrane fuel cell models *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(11), 1181-1212.
- [97] Jayakumar, K., Pandiyan, S., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K.S. (2006) Cost-benefit analysis of commercial bipolar plates for PEMFC's. *Journal of Power Sources*, 161(1), 454-459.
- [98] http://www.zephyreco.co.jp/en/products/product/air-dolphin/featur_03.html. (11.05.2012)
- [99] Sherwani, A.F., Usmani, J.A., Varun. (2010) Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 540-544.
- [100] Lunde, P.J. (1980) *Solar thermal engineering*, Wiley, New York.
- [101] Kaçira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S. (2004) Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, 29(8), 1265-1275.
- [102] Skoplaki, E., Palyvos, J.A. (2009) Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1), 23-29.
- [103] NASA Surface meteorology and Solar Energy-Location: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?> (01.07.2009)

- [104] Wang, C., Nehrir, M.H. (2008) Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System. *Energy conversion, IEEE transactions*, 23(3), 957-967.
- [105] Lagorse, J., Simoes, M.G., Miraoui, A., Costerg, P. (2008) Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(12), 2871-2879.
- [106] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Papadopoulou, S., Seferlis, P. (2012) Optimal operability by design in a methanol reforming-PEM fuel cell autonomous power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(21), 16697-16710.
- [107] Zhou, W., Yang, H., Fang, Z. (2008) Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar–wind power generation system. *Renewable Energy*, 33(6), 1413-1423.
- [108] National Renewable Energy Laboratory (2005), *Getting Started Guide for Homer*, Golden, 2005.
- [109] Skoplaki, E., Palyvos, J.A. (2009) On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83, 614-624.
- [110] Nafeh, A.E. An effective and safe charging algorithm for lead-acid batteries in PV systems. *International Journal of Energy Research*, 35(8), 733-740.
- [111] Barlak, C. (2009) Batarya model parametrelerinin, doluluk durumunun, sağlık durumunun kestirimi ve Ni-Mh bataryalara uygulanması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D.
- [112] Kattakayam, T.A., Srinivasan, K. (2004) Lead acid batteries in solar refrigeration systems. *Renewable Energy*, 29, 1243-1250.
- [113] Calloway, T.M. (1985) Autonomous photovoltaic diesel power system design, *IEEE PV Specialists Conference*, 20-25 October, Las Vegas, Nevada, U.S.

- [114] Lancashire, S.J. (1988) Life cycle comparison of different battery types for use with photovoltaic systems. IEEE PV Specialists Conference, 20-30 September, Las Vegas, Nevada, U.S.
- [115] Jenkins, D.P., Fletcher, J., Kane, D. (2008) Model for evaluating impact of battery storage on microgeneration systems in dwellings. *Energy Conversion and Management*, 49, 2413-2424.
- [116] Maclay, J.D., Brouwer, J., Samuelsen, G.S. (2006) Dynamic analyses of regenerative fuel cell power for potential use in renewable residential applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31: 994-1009.
- [117] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., Kavadias, K. (2009) Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 378-392.
- [118] Li, C.H., Zhu, X.J., Cao, G.Y., Sui, S., Hu, M.R. (2009) Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology. *Renewable Energy*, 34, 815-826.
- [119] Dursun, E., Kılıç, O. (2012) Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system. *International Journal of Electrical&Power Energy Systems*, 1, 81-89.
- [120] Ikeya, T., Sawada, N., Takagi, S., Murakami, J., Kobayashi, K., Sakabe, T., Kousaka, E., Yoshioka, H., Kato, S., Yamashita, M., Narisoko, H., Mita, Y., Nishiyama, K., Adachi, K., Ishihara, K. (2009) Charging operation with high energy efficiency for electric vehicle valve-regulated lead-acid battery system. *Journal of Power Sources*, 91, 130-136.
- [121] Nelson, D.B., Nehrir, M.H., Wang, C. (2006) Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuelcell power generation systems. *Renewable Energy*, 31, 1641-1656.

- [122] Kalıncı, Y. (2011) Biyokütle esaslı hidrojen üretim sistemlerinin eksergoekonomik analizi ve yaşam döngüsü değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D.
- [123] Mueller-Langer, F., Tzimas, E., Kaltschmitt, M., Peteves, S. (2007) Technoeconomic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 3797-810.
- [124] Frano, B. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, 78, 661-669.
- [125] Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A. (2013) Exergoeconomic and environmental impact analyses of a renewable energy based hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(14), 6104-6111.
- [126] Martinez-Frias, J., Pham, A.O., Aceves, S.M. (2002) A natural gas-assisted steam electrolyzer for high-efficiency production of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 483-490.
- [127] Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A. (2012) Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: Modeling and case study. *Applied Thermal Engineering*, In Press.
- [128] Veziroğlu, T.N., Barbir, F. (1992) Initiation of hydrogen energy system in developing countries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 17, 527-538.
- [129] Yu-Heng, C., Chia-Yon, C., Shun-Chung, L. (2011) Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 6957-6969.
- [130] Özçıra, S. (2007) Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri Ve Endüstriyel Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği A.B.D.

- [131] Mouni, E., Tnani, S., Champenois, G. (2008) Synchronous generator modelling and parameters estimation using least squares method. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(6), 678-689.
- [132] Vas, P. (1992) *Vector Control of AC Machines*, Oxford University Press, New York.
- [133] Ong, C.M. (1998) *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice Hall, U.S.
- [134] Howlader, A.M., Urasaki, N., Yona, A., Senjyu, T., Saber, A.Y. (2013) A review of output power smoothing methods for wind energy conversion systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 135-146.
- [135] Fernandez, L.M., Garcia, C.A., Jurado, F. (2010) Operating capability as a PQ/PV node of a direct-drive wind turbine based on a permanent magnet synchronous generator. *Renewable Energy* 35, 1308-1318.
- [136] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D., Azevedo, G. (2009) Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator, *IEEE Industrial Electronics*, 5-8 July, Seoul, South Korea.
- [137] Morren, J., Pierik, J., de Haan S.W.H. (2006) Inertial response of variable speed wind turbines. *Electric Power Systems Research*, 76(11), 980-987.
- [138] Phang, J.C.H., Chan, D.S.H., Phillips, J.R. (1984) Accurate Analytical Method for The Extraction of Solar Cell Model Parameters. *Electronics Letters*, 20(10) 406-408.
- [139] de Blas M.A., Torres, J.L., Prieto, E., García, A. (2002) Selecting A Suitable Model For Characterizing Photovoltaic Devices. *Renewable Energy*, 25, 371-380.
- [140] Schröder, D.K. (1990) *Semiconductor Material and Device Characterisation*, John Wiley&Sons, New York, U.S.
- [141] Eke, R. (2007) Güneş pili parametrelerinin işletme koşullarıyla ilişkilendirilmesi, Doktora Tezi, Ege üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Enerji A.B.D.

- [142] Solanki, C.S. (2009), Solar Photovoltaics: fundamentals, technologies and applications, PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- [143] Green, M.A. (1982) Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, U.S.
- [144] Green, M.A., Emery, K., King, D.L., Hisikawa, Y., Warta, W. (2005) Solar Cell Efficiency Tables. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 14, 45-51.
- [145] Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E., Jenkins, P. (2012) A cell-to module-to-array detailed model for photovoltaic panels. Solar Energy, 86(9), 2695-2706.
- [146] Tyagi, V.V., Rahim, N.A.A., Rahim, N.A., Selvaraj, J.A.L. (2013) Progress in solar PV technology: Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 443-461.
- [147] Singh, G.K. (2013) Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. Energy, 53(1), 1-13.
- [148] Bizon, N. (2013) Energy harvesting from the PV Hybrid Power Source. Energy, 52, 297-307.
- [149] Becerikli, F. (2011) Yüksek Basıncılı Pem (Proton Geçirgen Membran) Elektrolizör Geliştirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Makina Mühendisliği A.B.D.
- [150] Carmo, M., Fritz, D.L. Mergel, J., Stolten, D. (2013) A comprehensive review on PEM water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, 38(12), 4901-4934.
- [151] Atlam, O., Kolhe, M. (2011) Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser. Energy Conversion and Management, 52, 2952-2957.

- [152] Ursúa, A., Sanchis, P. (2012) Static–dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(24), 18598-18614.
- [153] Marshall, A., Børresen, B., Hagen, G., Tsyppkin, M., Tunold R. (2007) Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers—Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. *Energy*, 32(4), 431-436.
- [154] Awasthi, A., Scott, K., Basu S. (2011) Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22), 14779-14786.
- [155] Hwang, J.J., Lai, L.K., Wu, W., Chang, W.R. (2009) Dynamic modeling of a photovoltaic hydrogen fuel cell hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 9531-9542.
- [156] Dai, C., Chen, W., Cheng, Z., Li, Q., Jiang, Z., Jia, J. (2011) Seeker optimization algorithm for global optimization: A case study on optimal modelling of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33, 369-376.
- [157] Ni, M., Michael, L.K.H., Dennis, Y.C. (2007) Parametric study of solid oxide steam electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2305-2313.
- [158] Khan, M.J., Iqbal, M.T. (2005) Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, 30, 421-439.
- [159] Onar, O.C., Uzunoglu, M., Alam, M.S. (2006) Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuelcell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system. *Journal of Power Sources*, 161, 707-722.
- [160] Barbir, F. (2005) *PEM Fuel Cells – Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, U.S.

- [161] EG&G Services Parsons (2007) Fuel Cell Handbook U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, Morgantown, West Virginia 26507-0880.
- [162] Li, X. (2006) Principles of fuel cells. Taylor&Francis Group.
- [163] Prentice, G. (1991) Electrochemical engineering principles. Prentice- Hall International Editions.
- [164] Marangio, F., Santarelli, M., Calì, M. (2009) Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy, 34, 1143-1158.
- [165] Choi, P., Bessarabov, D.G., Datta, R. (2004) Simple model for solid polymer electrolyte (spe) water electrolysis. Solid State Ionics, 175, 535-539.
- [166] Sun, Y., Lu, J., Zhuang, L. (2010) Rational determination of exchange current density for hydrogen electrode reactions at carbon-supported Pt catalysts. Electrochimica Acta, 55(3), 844-850.
- [167] Biaku, C.Y., Dale, N.V., Mann, M.D., Salehfar, H., Peters, A.J., Han, T. (2008) A semiempirical study of the temperature dependence of the anode charge transfer coefficient of a 6 kW PEM electrolyzer. International Journal of Hydrogen Energy, 33(16), 4247-4254.
- [168] Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G., Peng, H. (2004) Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis, and Feedback Design, Springer.
- [169] García-Valverde, R., Espinosa, N., Urbina, A. (2012) Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. International Journal of Hydrogen Energy, 37(2), 1927-1938.
- [170] Lebbal, M.E., Lecœuche, S. (2009) Identification and monitoring of a PEM electrolyser based on dynamical modelling. International Journal of Hydrogen Energy, 34(14), 5992-5999.

- [171] Tiss, F., Chouikh, R., Guizani, A. (2013) Dynamic modeling of a PEM fuel cell with temperature effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(20), 8532-8541.
- [172] Pino, J., Valverde, L., Rosa, F. (2011) Influence of wind turbine power curve and electrolyzer operating temperature on hydrogen production in wind–hydrogen systems. *Journal of Power Sources*, 196(9), 4418-4426.
- [173] Siracusano, S., Di Blasi, A., Baglio, V., Brunaccini, G., N. Briguglio, A., Stassi, R., Ornelas, E., Trifoni, V., Antonucci, Aricò, A.S. (2011) Optimization of components and assembling in a PEM electrolyzer stack. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011, 36(5), 3333-3339.
- [174] Ulleberg, Ø. (2003) Modeling of advanced alkaline electrolyzers :a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 21-33.
- [175] Kucernak, A.R., Muir, B. (2001) Analysis of the electrical and mechanical time response of solid polymer–platinum composite membranes. *Electrochimica Acta*, 46, 1313-1322.
- [176] Guo, L., Li, X., Zeng, G.M., Zhou, Y. (2010) Effective hydrogen production using waste sludge and its filtrate. *Energy*, 35, 3557-3562.
- [177] Dursun, E., Acarkan, B., Kılıç, O. (2012) Modeling of hydrogen production with a stand-alone renewable hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4, 3098-3107.
- [178] Sevensan, S. (2010) A comparative life cycle assessment study of a stand-alone mobile house with different power generation possibilities, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği A.B.D.
- [179] Gökçek, M. (2010) Hydrogen generation from small-scale wind-powered electrolysis system in different power matching modes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10050-10059.

- [180] http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf (05.05.2013)
- [181] Carapellucci, R., Giordano, L. (2012) Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems. International Journal of Hydrogen Energy, 37(3), 2081-2093.
- [182] Shakya, B.D., Aye, L.P.M. (2005) Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind–photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma. International Journal of Hydrogen Energy, 30(1), 9-20.
- [183] Bajpai, P. Dash, V. (2012) Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(5), 2926-2939.
- [184] Raju, M., Kumar, S. K. (2012) System simulation of compressed hydrogen storage based residential wind hybrid power systems. Journal of Power Sources, 210(15), 303-320.

EKLER

Rüzgâr Türbini için Matlab Komutları

```
% MATLAB script file for permanent magnet
% synchronous generator
% loads generator parameters of the permanent magnet synchronous
% generator
% set up initial operating condition
% Enter into MATLAB workspace the per unit parameter of
% 220 V, 4-pole, 50 Hz
% permanent magnet synchronous generator

Frated = 50;
Poles = 4;
Vrated = 220;
```

```

we = 2*pi*Frated;
wbase = 2*pi*Frated;
wbasem = wbase*(2/Poles);
%Sbase = Prated;
%Vbase = Vrated*sqrt(2/3); % Use peak values as base quantities
%Ibase = sqrt(2)*(Sbase/(sqrt(3)*Vrated));
%Zbase = Vbase/Ibase;
%Tbase = Sbase/wbasem;

% QD0 equivalent circuit parameters in per unit
Domega = 0 % rotor damping coefficient

fprintf('QD0 circuit parameters in per unit\n')

H = 0.3;
rs = 0.017;
xls = 0.065;
x0 = xls;
xd = 0.543;
xq = 1.086;
xmq = xq - xls;
xmd = xd - xls;
rpkd = 0.054;
rpkq = 0.108;
xplkd = 0.132;
xplkq = 0.132;

wb=wbase
xMQ = (1/xls + 1/xmq + 1/xplkq)^(-1);
xMD = (1/xls + 1/xmd + 1/xplkd)^(-1);

disp('Choice of initial values for simulation')

opt_initial = menu

% set up loop for repeating multiple cases in which
% the magnet strength has to be determined from terminal operating
% condition

repeat_option = 3 ;

while repeat_option == 3

Vt = input('Enter pu terminal voltage, e.g 1+j*0, Vt = ');
Vm = abs(Vt);

disp(' Enter your choice to specify magnet excitation')
opt_magnet = menu('Option to specify i_m ? ', 'Will specify delta and
i_m directly','Compute im for desired operating condition')

if (opt_magnet == 1) % enter i'm and delta
Ipm = input('Enter pu value of Ipm , e.g 1.8, Ipm = ')
delt = input('Enter value of delta in radians, e.g. -1.2, delta = ')

```

```

Emo = Ipm*xmd % pm excitation voltage
Ido = (Vm*cos(delt) - Emo)/xd;
Iqo = -Vm*sin(delt)/xq;
end% opt-magnet ==1

if (opt_magnet == 2) % determine i'm from given operating condition
% Steady-state calculations to help determine the required
% equivalent magnetizing current, i'm, of permanent magnets
% when lambda'm is not specified.

Sm = input('Enter pu complex power into motor, e.g 1+j*0, Sm = ')

% ***** END OF INPUT BLOCK *****

% Use steady-state phasor equations to determine
% steady-state values of fluxes, etc to establish the
% initial starting condition for simulation

% It - pu phasor current of generator
% Sm - pu complex input power of generator
% Vt - pu terminal voltage phasor
% Eq - pu voltage behind q-axis reactance
% I - pu rotor qd current with q axis align with Eq

It = conj(Sm/Vt); % It = (Iqe - j*Ide) in pu
Eq = Vt - (rs + j*xq)*It; % Eq = Eqe - j*Ede in pu
delt = angle(Eq); % angle Eq leads Vt

% compute rotor qd steady-state variables

Eqo = abs(Eq);
I = It*(cos(delt) - sin(delt)*j); % same as I = (conj(Eq)/Eqo)*It;
Iqo = real(I);
Ido = -imag(I); % d-axis lags q-axis
Emo = Eqo - (xd-xq)*Ido; % pm excitation voltage
disp('Per unit magnetizing current of magnet, Ipm, is')
Ipm = Emo/xmd %equiv. magnetizing current of permanent magnet
end% if opt_magnet == 2

disp('Computing and plotting steady-state curve next')
% plot steady-state torque versus angle curve for motor,
% using above Ipm and parameters
% but neglecting stator resistance

mdel = (0:-0.1:-(pi +0.1));
N=length(mdel);
texcm = Vm*Ipm*xmd/xd;
treln = Vm*Vm*(1/xq -1/xd)/2;
for n=1:N
mdeln = mdel(n);
texc(n) = - texcm*sin(mdeln);
trel(n) = - treln*sin(2*mdeln);
tres(n) = texc(n) + trel(n); % ignoring stator resistance
end

```

```

clf;
plot(mdel(:), trel(:), '--', mdel(:), texc(:), ':', mdel(:), tres(:), '-')
ylabel('torque in pu')
xlabel('delta in radians')
axis square;
title('Steady-state torque vs. angle curves')

if (opt_initial == 1)
    Psiado = xmd*(Ido + Ipm);
    Psiago = xmq*(Iqo);
    Psiqo = xls*(Iqo) + Psiago;
    Psido = xls*(Ido) + Psiado;
    Psikgo = Psiago;
    Psikdo = Psiado;
    wrslipo = 0; %when wr = we, (wr-we)/we is zero
    delto = delt; % here delto = thetar(0)- thetai(0)
    temo = (xd -xq)*Ido*Iqo + xmd*Ipm*Iqo;
end% if opt_initial == 1

if (opt_initial == 2) % initialize integrators with zeros
    Psiado = xmd*Ipm; % permanent field excitation always on
    Psiago = 0;
    Psiqo = Psiago;
    Psido = Psiado;
    Psikgo = Psiago;
    Psikdo = Psiado;
    wrslipo = -1; % at standstill, wr = 0, (wr-we)/we is -1
    delto = 0; % here delto = thetar(0)- thetai(0)
    temo = 0; %
end% if opt_initial == 2

repeat_option = 2 % reset to enter next loop

% set up loop for repeating runs with different external
% parameters, such as rotor inertia, loading

while repeat_option == 2

    tstop = 1.5 % run time of simulation
    H % inertia constant of rotor assembly

    % program time and output arrays of repeating sequence
    % signal for input mechanical torque, Tmech, (negative for motoring
    load
    % and equivalent magnetizing current of magnet, Ipm.

    tmech_time = [0 tstop]
    tmech_value = [-1 -1]*temo % Tmech is negative for motoring load

    disp('Save steady-state plot and enter desired changes')
    disp(' in parameters or loading now via MATLAB window')
    disp('e.g. tstop - stop time for simulation')
    disp(' H - the inertia constant of rotor assembly')
    disp(' tmech_value - values of Tmech')
    disp('Perform simulation then type ''return'' for plots');

    keyboard

```

```

clf;

% plots of Figure No.1
subplot(3,1,1)
plot(y(:,1),y(:,2),'-')
ylabel('Pm in pu')
title('Real input power')
subplot(3,1,2)
plot(y(:,1),y(:,3),'-')
ylabel('Qm in pu')
title('Reactive input power')
subplot(3,1,3)
plot(y(:,1),y(:,6),'-')
ylabel('Delta in rad')

h1=figure;
title('Power angle delta')
subplot(3,1,1)
plot(y(:,1),y(:,7),'-')
ylabel('wr/wb in pu')
axis([-inf inf -1. 1.5])
title('per unit speed')
subplot(3,1,2)
plot(y(:,1),y(:,9),'-')
ylabel('ia in pu')
xlabel('Time in sec')
title('Instantaneous phase a current')

% compute induction torque component
% and plot torque components with torque in Figure 2
Tinduction = y(:,8) - y(:,4) - y(:,5);

h2=figure;
subplot(4,1,1)
plot(y(:,1),y(:,8),'-')
ylabel('Tem in pu')
title('Instantaneous electrical torque')
subplot(4,1,2)
plot(y(:,1),y(:,4),'-')
ylabel('Trel in pu')
title('Reluctance component')
subplot(4,1,3)
plot(y(:,1),Tinduction,'-')
ylabel('Tind in pu')
title('Induction component')
subplot(4,1,4)
plot(y(:,1),y(:,5),'-')
ylabel('Texc in pu')
title('Excitation component')
xlabel('Time in sec')

% put delta in principal value between -pi and pi
% and plot principal value delta

deltp = angle(exp(j*y(:,6)));

```

```

h3=figure;
subplot(1,1,1)
plot(y(:,1),deltp,'-')
ylabel('Delta in rad')
title('Power angle delta')
disp('Results displayed in four figure windows')
disp('Save plots before typing ''return'' to continue');
keyboard
close(h1)
close(h2)
close(h3)

% prompt for options to repeat over with determination of Ipm
% for new terminal condition or
% just with new parameters, eg inertia or loading.
repeat_option = menu('Repeat what options?','Quit','Just new
parameters', 'Recalculate Ipm for new condition');
if isempty(repeat_option) % if empty return a 1 to terminate
repeat_option = 1;
end% if isempty
end% while repeat_option for new parameters
end% while repeat_option for new case

```

Fotovoltaik Model İçin Matlab Komutları

```

% Compute cell's current [A] from voltage [V], suns [suns] and temp
[°C]
% Based on published code by Francisco M. González-Longatt,
% "Model of Photovoltaic Module in Matlab™",
% 2DO CONGRESO IBEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN (II CIBELEC 2005)

function Ia = solar(Va,Suns,TaC)
% Ia,Va = current and voltage vectors [A] and [V]
% G = number of Suns [] (1 Sun = 1000 W/m^2)
% T = temperature of the cell [°C]
k = 1.38e-23; % Boltzmann constant [J/K]
q = 1.60e-19; % Elementary charge [C]
n = 1.2; % Quality factor for the diode []. n=2 for crystalline, <2
for amorphous
Vg = 1.12; % Voltage of the Crystalline Silicon [eV], 1.75eV for
Amorphous Silicon
T1 = 273 + 25; % Normalised temperature [K]

Voc_T1 = 21.4; % Open-current voltage at T1 [V]. See
SunpowerA300CellDatasheet.pdf
Isc_T1 = 6.44; % Short-circuit current at T1 [A]. See
SunpowerA300CellDatasheet.pdf
K0 = 3.5/1000; % Current/Temperature coefficient [A/K].
dVdI_Voc = -0.00985; % dV/dI coefficient at Voc [A/V]
TaK = 273 + TaC; % Convert cell's temperature from Celsius to
Kelvin [K]
IL_T1 = Isc_T1 * Suns; % Compute IL depending the suns at T1.
Equation (3)

```

```

    IL = IL_T1 + K0*(TaK - T1); % Apply the temperature effect.
Equation (2)
    I0_T1 = Isc_T1/(exp(q*Voc_T1/(n*k*T1))-1); % Equation (6)
    I0 = I0_T1*(TaK/T1).^(3/n).*exp(-q*Vg/(n*k).*(1./TaK)-(1/T1)); %
Equation (5)
    Xv = I0_T1*q/(n*k*T1) * exp(q*Voc_T1/(n*k*T1)); % Equation (8)
    Rs = - dVdI_Voc - 1/Xv; %Compute the Rs Resistance. Equation (7)
    Vt_Ta = n * k * TaK / q; % Equation (9)
    Ia = zeros(size(Va)); %Initialize Ia vector
% Compute Ia with Newton method
for j=1:5;
    Ia = Ia - (IL - Ia - I0.*( exp((Va+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1))./(-1 -
(I0.*( exp((Va+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1)).*Rs./Vt_Ta);
end
end

function createfigure(xdata1, ydata1, zdata1)
%CREATEFIGURE(XDATA1,YDATA1,ZDATA1)
% XDATA1: surface xdata
% YDATA1: surface ydata
% ZDATA1: surface zdata

% Auto-generated by MATLAB on 26-Jun-2013 11:40:54

% Create figure
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'FontSize',20,'FontName','Times New
Roman');
% Uncomment the following line to preserve the X-limits of the axes
% xlim(axes1,[0 0.8245]);
% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes1,[0.0004 2.906]);
% Uncomment the following line to preserve the Z-limits of the axes
% zlim(axes1,[0.0005732 0.008525]);
view(axes1,[-37.5 30]);
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

% Create surf
surf(xdata1,ydata1,zdata1,'Parent',axes1);

% Create xlabel
xlabel('PV output power [kW]','FontSize',20,'FontName','Times New
Roman');

% Create ylabel
ylabel('Wind Turbine output power [kW]','FontSize',20,...
'FontName','Times New Roman');

% Create zlabel
zlabel('Hydrogen production [kg/hr]','FontSize',20,...
'FontName','Times New Roman');

```

Akü Grubu Enerji Verimi Karşılaştırma Grafik Çizim

```
function createfigure(YMatrix1)
%CREATEFIGURE(YMATRIX1)
% YMATRIX1: matrix of y data

% Auto-generated by MATLAB on 26-Jun-2013 11:50:54

% Create figure
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'FontSize',24,'FontName','Times New
Roman');
% Uncomment the following line to preserve the X-limits of the axes
% xlim(axes1,[0 9000]);
% Uncomment the following line to preserve the Y-limits of the axes
% ylim(axes1,[84.99 85]);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

% Create multiple lines using matrix input to plot
plot1 = plot(YMatrix1,'Parent',axes1,'LineWidth',1.5);
set(plot1(1),'LineStyle',':','DisplayName','power management 1');
set(plot1(2),'DisplayName','power management 2');
set(plot1(3),'DisplayName','power management 3');

% Create xlabel
xlabel({'time [h]'},'FontSize',24,'FontName','Times New Roman');

% Create ylabel
ylabel({'Battery bank energy efficiency [%]'},'FontSize',24,...
'FontName','Times New Roman');

% Create legend
legend(axes1,'show');
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Erkan DURSUN
Doğum Yeri ve Tarihi :KAYSERİ 1977
Yabancı Dili :İngilizce, İtalyanca (başlangıç)
E-Posta :erkandursun@marmara.edu.tr

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite/Lise	Mezuniyet Yılı
Lise	Elektrik Bölümü	Fevziçakmak Lisesi	1994
Üniversite	Elektrik Eğitimi	Marmara Ün. Teknik Eğt.F	2001
Y. Lisans	Elektrik Eğitimi	Marmara Ün. Fen Bilim. E.	2006

Bilimsel Eserler:

1. Dursun, E., Kılıç, O. (2012) Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system. International Journal of Electrical&Power Energy Systems, 1, 81–89.
2. Dursun, E., Acarkan, B., Kılıç, O. (2012) Modeling of hydrogen production with a stand-alone renewable hybrid power system. International Journal of Hydrogen Energy, 4, 3098–3107.
3. Dursun, E., Eroğlu, M., Yazıcı, S., Kılıç, O. (2012) Techno-economic analysis for a standalone hybrid power system: A case study, in Istanbul, Turkey. EEST-part A, 2, 1065–1078.
4. Dursun, E., Akıncı, Ç., Şeker, S., Kılıç, O. (2012) Coherence analysis between hydrogen flow and electricity current in fuel cells.EEST-part A, 2, 555– 562.
5. Dursun, E., Eroğlu, M., Sevensan, S., Song, J., Yazıcı, S., Kılıç, O. (2011) A Mobile Renewable House using PV/Wind/Fuel Cell Hybrid Power System. International Journal of Hydrogen Energy, 13, 7985–7992.

6. Dursun, E., Ozalp, G. Y. & Kılıç, O. (2010) Experimental Analysis and Electrical Modeling of PEM Fuel Cell's MEA. International review of Electrical Engineering. Sayı 4. Cilt 5 sf 1595–1599.

Bilimsel Kuruluşlara Üyelikler:

1. IEEE
2. International Association for Hydrogen Energy (IAHE)
3. International Association of Engineers

Ödüller:

Uluslararası Bilimsel Yayınları Teşvik Programı (UBYT), TÜBİTAK Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi (ULAKBİM), Yayın desteği ödülü, 2012

Uluslararası Bilimsel Yayınları Teşvik Programı (UBYT), TÜBİTAK Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi (ULAKBİM), Yayın desteği ödülü, 2012

Uluslararası Bilimsel Yayınları Teşvik Programı (UBYT), TÜBİTAK Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi (ULAKBİM), Yayın desteği ödülü, 2012

Uluslararası Bilimsel Yayınları Teşvik Programı (UBYT), TÜBİTAK Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi (ULAKBİM), Yayın desteği ödülü, 2011