

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HOMER İLE YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI HİBRİT MİKRO
ŞEBEKE TASARIMI VE ENERJİ YÖNETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED TUĞRUL

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK

BİNGÖL-2025

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, her aşamada destek ve rehberliğini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez süreci boyunca akademik bilgi ve birikimleriyle çalışmama değer katan, yönlendirmeleriyle katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali KÖPRÜ'ye teşekkür ederim.

Bu sürecin her anında sabır, anlayış ve fedakârlıklarıyla yanımda olan, desteğini esirgemeyen sevgili aileme en derin minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

MUHAMMED TUĞRUL

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
3. MİKRO ŞEBEKELER VE BİLEŞENLERİ	10
3.1. Biyogaz Generatörleri	10
3.2. Batarya Depolama Sistemleri.....	11
3.3. Dönüştürücüler	12
3.4. FV Sistemler	13
3.5. Hidrojen Tankı	16
3.6. Yakıt Hücreleri	16
3.7. Elektrolizör.....	17
3.8. Rüzgâr Türbinleri.....	18
3.9. Hidrolik Türbinler.....	19
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
4.1. HOMER Pro Yazılımı.....	21
4.2. Mikro Şebeke Bileşenlerinin Matematiksel Modelleri.....	21
4.2.1. Biyogaz Generatörün Modellenmesi	21
4.2.2. Batarya Sisteminin Modellenmesi	22
4.2.3. Dönüştürücünün Modellenmesi.....	23
4.2.4. FV Panellerinin Modellenmesi	24
4.2.5. Rüzgâr Türbin Modellenmesi	25
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27

5.1. Uygulama-1: Kırsal Alanlarda Yenilenebilir Enerji ve Hidrojen Depolama	
MŞ Sistemi Fizibilite Çalışması.....	27
5.1.1. Sistem Modellenmesi.....	27
5.1.2.Bölgenin Meteorolojik Verileri.....	28
5.1.3. Yük Profili.....	29
5.1.4. Simülasyon Sonuçları.....	30
5.1.4.1. Elektrik Üretimi	30
5.1.4.2. Ekonomik Analiz.....	33
5.2. Uygulama-2: Hastane Elektrik Yükünün Optimizasyonu ve Oksijen Üretimi	
İçin Hibrit MŞ Uygulaması: HOMER Pro ile Simülasyon ve Fizibilite	
Analizi.....	34
5.2.1.Sistem Modellenmesi	34
5.2.2. Bölgenin Meteorolojik Verileri	35
5.2.3. Yük Profili	36
5.2.4. Simülasyon Sonuçları.....	37
5.2.5. Ekonomik Analiz.....	40
5.2.6. Duyarlılık Analizi.....	41
6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKLAR.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HOMER	: Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
MŞ	: Mikro Şebeke
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
FV	: Fotovoltaik
RT	: Rüzgâr Türbini
BDS	: Batarya Depolama Sistemi
FC	: Yakıt Hücresi (Fuel Cell)
HT	: Hidrojen Tankı
BGG	: Biyogaz Generatörü
DG	: Dizel Generatör
NPC	: Net Şimdiki Maliyet (Net present cost)
LCOE	: Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (Levelized Cost of Electricity)
AC	: Alternatif Akım (Alternating Current)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
kWh	: Kilowatt Saat
Ni	: Nikel
Cd	: Kadmiyum
MH	: Metal Hidrit
Li-ion	: Lityum-iyon
W	: Watt
H ₂ O	: Su
CO ₂	: Karbondioksit
HES	: Hidroelektrik Santrali

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	MŞ'lerin yapısı.....	10
Şekil 3.2.	BGG'nin yapısı.....	11
Şekil 3.3.	Li-ion batarya yapısı.....	12
Şekil 3.4.	Güneş pili, modül ve dizinin yapısal görünümü.....	14
Şekil 3.5.	FV hücresinin elektriksel eşdeğer devre modeli.....	14
Şekil 3.6.	FC'nin şematik diyagramı.....	17
Şekil 3.7.	PEM su elektrolizinin şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.8.	HES'lerin yapısı.....	20
Şekil 4.1.	Eocycle EO10 model RT'ye ait güç eğrisi.....	26
Şekil 5.1.	HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli.....	28
Şekil 5.2.	Şanlıurfa ili güneş radyasyonu ve açıklık indeksi.....	29
Şekil 5.3.	Şanlıurfa iline ait aylık rüzgar hızı grafiği.....	29
Şekil 5.4.	Çalışma bölgesinin günlük elektrik yük profili.....	30
Şekil 5.5.	Çalışma bölgesinin yıllık elektrik yük profili.....	30
Şekil 5.6.	MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları	31
Şekil 5.7.	FV panellerinin güç çıkış eğrisi	32
Şekil 5.8.	RT'nin güç çıkış eğrisi.....	32
Şekil 5.9.	Elektrolizörün giriş gücü eğrisi	33
Şekil 5.10.	FC'nin güç çıkış eğrisi.....	33
Şekil 5.11.	MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti.....	34
Şekil 5.12.	HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli.....	35
Şekil 5.13.	Diyarbakır ili güneş radyasyonu ve açıklık indeksi	36
Şekil 5.14.	Diyarbakır ili için aylık rüzgâr hızı grafiği	36
Şekil 5.15.	Örnek hastanenin günlük elektrik yük profili	37
Şekil 5.16.	Örnek hastanenin yıllık elektrik yük profili.....	37
Şekil 5.17.	MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları.....	38
Şekil 5.18.	FV panellerinin güç çıkış eğrisi	39
Şekil 5.19.	RT'nin güç çıkış eğrisi	39

Şekil 5.20.	Elektrolizörün giriş gücü eğrisi.....	39
Şekil 5.21.	FC'nin güç çıkış eğrisi.....	40
Şekil 5.22.	MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti.....	41
Şekil 5.23.	Farklı enflasyon oranlarının NPC üzerindeki etkisi	43

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 5.1. MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri.....	28
Tablo 5.2. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri.....	30
Tablo 5.3. MŞ bileşenlerinin üretim değerleri.....	31
Tablo 5.4. MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri.....	35
Tablo 5.5. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri.....	37
Tablo 5.6. YEK’lerdeki dalgalanmaların sistemin ekonomik parametrelerine etkisi.....	42

HOMER İLE YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI HİBRİT MİKRO ŞEBEKE TASARIMI VE ENERJİ YÖNETİMİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) dayalı hibrit mikro şebeke (MŞ) sistemlerinin, farklı tüketici gruplarının enerji ihtiyaçlarını karşılamadaki teknik ve ekonomik fizibilitesi değerlendirilmiştir. HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, biri şebekeden bağımsız (off-grid) kırsal alan için, diğeri ise şebekeye bağlı (on-grid) bir hastane için olmak üzere iki farklı MŞ uygulaması tasarlanmış ve analiz edilmiştir.

Kırsal uygulamada; fotovoltaik (FV) paneller, rüzgâr türbini (RT), yakıt hücresi (FC), batarya depolama sistemi (BDS), hidrojen tankı (HT), konvertör ve elektrolizör bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarımı yapılmıştır. Güneş ve rüzgâr potansiyeli dikkate alınarak optimize edilen sistemin yıllık elektrik üretimi 117.240 kWh, net bugünkü maliyeti (NPC) 361.922 \$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) 0,464 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Hastane uygulamasında ise enerji tüketimi yanında oksijen ihtiyacını da karşılayan hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Bu modelde elektrolizör ile üretilen hidrojen, FC’de elektrik üretiminde, eş zamanlı üretilen oksijen ise tıbbi gaz olarak değerlendirilmiştir. Uygulama kapsamında FV, RT, FC, BDS ve HT bileşenlerinden oluşan sistemin NPC değeri 1.342.409 \$, LCOE değeri ise 0,09745 \$/kWh olarak belirlenmiştir. Ayrıca sistem yılda 8.372 kg hidrojen ve yaklaşık 66.460 kg oksijen üretmiştir.

Sonuçlar, YEK’lere dayalı hibrit MŞ sistemlerinin teknik olarak uygulanabilir ve uzun vadede ekonomik açıdan sürdürülebilir olduğunu göstermektedir. Hastane gibi kritik altyapılarda hem enerji hem de oksijen üretimini sağlayan bu tür entegre çözümler, dışa bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini artırabilir.

Anahtar Kelimeler: Güneş, Rüzgâr, Hidrojen, Mikro şebeke, Oksijen, CO₂, NPC, LCOE.

DESIGN OF RENEWABLE ENERGY-BASED HYBRID MICROGRIDS AND ENERGY MANAGEMENT WITH HOMER

ABSTRACT

In this thesis study, the technical and economic feasibility of hybrid microgrid (MG) systems based on renewable energy sources was evaluated to meet the energy demands of different consumer groups. Using the HOMER Pro software, two different MG configurations were designed and analyzed: one off-grid system for a rural area and one grid-connected system for a hospital.

In the rural application, a hybrid MG consisting of photovoltaic (PV) panels, a wind turbine (WT), a fuel cell (FC), a battery storage system (BSS), a hydrogen tank (HT), a converter, and an electrolyzer was developed. The system was optimized based on local meteorological conditions and sample electricity consumption data from a rural area in Şanlıurfa, Türkiye. The total annual energy production of the system was calculated as 117,240 kWh, with a net present cost (NPC) of \$361,922 and a levelized cost of energy (LCOE) of \$0.464/kWh.

In the hospital application, a hybrid MG system was designed not only to meet electricity demands but also to supply medical oxygen. In this configuration, hydrogen generated during the electrolysis process was stored for later use in the FC, while the oxygen, typically released into the atmosphere, was recovered and stored to meet the hospital's oxygen demand. The grid-connected system included PV, RT, FC, BSS, and HT components. Simulation results showed that the system produced 8,372 kg of hydrogen and approximately 66,460 kg of oxygen per year. The economic indicators revealed an NPC of \$1,342,409 and an LCOE of \$0.09745/kWh.

The findings demonstrate that renewable-based hybrid MG systems are technically viable and economically sustainable in the long term. Particularly in critical infrastructures such as hospitals, integrated solutions that address both energy and oxygen supply can enhance operational security and reduce dependence on external logistics.

Keywords: Solar, Wind, Hydrogen, Microgrid, Oxygen, CO₂, NPC, LCOE.

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler, enerjiye olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2025 yılı raporuna göre, küresel elektrik tüketiminin 2025-2027 tahmin döneminde önemli bir artış kaydetmesi beklenmektedir. Bu artışın temel nedenleri arasında endüstriyel üretimdeki yükseliş, klima kullanımının yaygınlaşması, elektrifikasyon süreçlerinin hızlanması ve veri merkezlerinin küresel çapta genişlemesi yer almaktadır [1].

Raporda belirtildiği üzere, 2024 yılında küresel elektrik talebi %4,3 oranında artış göstermiştir. Bu eğilimin 2027 yılına kadar yıllık ortalama yaklaşık %4'lük bir büyüme hızıyla devam edeceği öngörülmektedir. Söz konusu üç yıllık dönemde, küresel elektrik tüketiminde yaklaşık 3.500 TWh'lik rekor bir artış beklenmektedir [1]. Bu durum, dünya genelindeki enerji talebinde dikkate değer bir yükselişe işaret etmektedir. Artan bu enerji talebi, fosil yakıt tüketiminde ciddi bir artışa yol açarak küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunların daha da derinleşmesine neden olmaktadır. Fosil yakıt kullanımını azaltmak ya da tamamen ortadan kaldırmak amacıyla, dünya genelinde araştırmacılar alternatif enerji kaynakları üzerine yoğun çalışmalar yürütmektedir [2].

Enerjide dışa bağımlılığı azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla, YEK'lerden (güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrolik vb.) faydalanarak elektrik enerjisi üretimi yapılması gerekmektedir. Ülkemiz, YEK'ler açısından oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. YEK'lerden elektrik üretimi fosil kaynaklara kıyasla daha çevrecidir. Bu çerçevede, güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi YEK'ler, küresel enerji dönüşümünün yönünü belirlemede kritik bir rol üstlenmektedir. Söz konusu kaynaklar yalnızca teknik alternatifler sunmakla kalmamakta; aynı zamanda enerjinin üretim ve tüketim biçimlerinde köklü bir dönüşümün göstergesi olarak, sürdürülebilirlik, sistem esnekliği ve çevresel uyum açısından daha kapsamlı bir yaklaşımı temsil etmektedir [3].

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi süreçlerinde verimliliğin artırılması, kayıpların azaltılması, kaliteli ve kesintisiz enerji arzının sağlanması ile

mevcut kaynakların etkin kullanımı, günümüzde enerji politikalarının temel hedefleri arasında yer almaktadır. Bu çerçevede, büyük ölçekli merkezi üretim sistemleri yerine daha küçük ölçekli, yüksek verimliliğe sahip, tüketim merkezlerine yakın ve YEK'lere dayalı sistemlerin tercih edilmesi önerilmektedir [4].

MŞ, belirli bir bölgedeki enerji üretim, depolama ve tüketim kaynaklarını birbirine bağlayan, ana şebekeye bağlı çalışabilen veya gerektiğinde ondan bağımsız olarak elektrik sağlayabilen küçük ölçekli enerji sistemidir. MŞ'ler, dağıtılmış üretimin sunduğu avantajları en verimli şekilde kullanarak, yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna ilişkin teknik sınırlamaları ortadan kaldırabilecek potansiyele sahiptir. YEK'lerin entegrasyonu ve enerji açısından verimli üretim kaynaklarının kullanımıyla önemli çevresel faydalar sunan bu sistemler; aynı zamanda ağ kayıplarını azaltmakta, büyük ölçekli ağ yükseltmeleri için gereken yüksek yatırım maliyetlerini erteleme imkânı sağlamakta ve merkezi üretim sistemlerinin rezerv gereksinimlerini azaltarak daha esnek bir enerji altyapısının oluşturulmasına katkı sunmaktadır [5].

MŞ'lerin başlıca üstünlükleri şunlardır:

- Ana şebekeden bağımsız çalışarak elektrik kesintilerini önler ve kritik tesislere sürekli güç sağlar.
- YEK'leri kolayca entegre ederek karbon emisyonunu azaltır ve enerji iletim kayıplarını düşürür.
- Daha düşük enerji maliyetleri, altyapı tasarrufları ve enerji piyasalarında esnek katılım imkânı sunar.
- Akıllı kontrol sistemleriyle optimize edilmiş enerji akışı ve modüler yapısıyla kolay kapasite artırımı sağlar.
- Yerel enerji kontrolü sağlayarak toplulukların ve stratejik tesislerin enerji güvenliğini artırır.

Bu tezin ana hedefi, günümüz enerji sistemlerinin teknik, ekonomik ve çevresel zorluklarını dikkate alarak, hibrit enerji üretim sistemlerini farklı kullanım senaryolarına özel olarak tasarlamak ve analiz etmektir.

Çalışma kapsamında iki ayrı uygulama senaryosu incelenmiştir:

- İlk senaryoda, kırsal bir bölgede şebekeden bağımsız bir MŞ sistemi analiz edilmektedir. Bu sistem, FV, RT, FC, Elektrolizör, BDS ve HT bileşenlerini içermektedir.
- İkinci senaryoda ise, bir hastanenin elektrik talebini karşılamaya yönelik, şebekeye bağlı hibrit bir MŞ modeli geliştirilmiştir. Bu model, hidrojen ve oksijen üretimini destekleyecek şekilde tasarlanmış ve tekno-ekonomik performansı detaylı olarak incelenmiştir.

Bu tez, altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, YEK'ler ve YEK tabanlı MŞ'lerin önemi vurgulanarak çalışmanın amaçları açıklanmıştır. İkinci bölümde, MŞ'lerle ilgili literatürdeki çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde, MŞ'lerin yapısı ve bileşenleri hakkında genel bilgiler sunulurken, dördüncü bölümde ise çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde, HOMER Pro yazılımında tasarlanan ve analiz edilen iki farklı MŞ senaryosuna ait sonuçlar sunulmuştur. Tezin son bölümü olan altıncı bölümde ise, elde edilen tüm sonuçlar yorumlanmış ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Hibrit enerji sistemlerinin verimliliğini ve etkinliğini artırmaya yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazıları aşağıda detaylı şekilde sunulmuştur.

Odetoye vd. [6], HOMER Pro yazılımını kullanarak Nijerya'da günlük 975 kW güç talebi ve 23.028 MWh elektrik tüketimi olan kırsal bir topluluk için bir MŞ modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen MŞ modeli; 3 MW FV, 9 MW CSP (Concentrated Solar Thermal), 200 kW HES, 200 batarya dizisi ve 2,5 MW dönüştürücü içermektedir. Sistemin LCOE değeri 0,26 \$/kWh, NPC değeri ise 55,7 milyon \$ olduğunu ve yılda 7.540 ton CO₂ emisyonu tasarrufu sağladığını ifade etmişlerdir.

Yadav vd. [7], Hindistan'ın Maharashtra eyaletindeki Kanur kırsal bölgesinin elektrik talebini karşılamak için HOMER Pro yazılımı kullanarak RT, FV, BGG ve BDS'den oluşan şebekeden bağımsız bir MŞ'nin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda %0 kapasite eksikliğinde NPC değeri 529.459 \$ ve LCOE değeri 0,146 \$/kWh iken, %2,5 kapasite eksikliğinde NPC değeri 399.680 \$ ve LCOE değeri 0,112 \$/kWh olduğunu ifade etmişlerdir.

Benchenina vd. [8], HOMER Pro yazılımı kullanarak FV panellerden oluşan yeşil hidrojen üretim potansiyelini analiz etmişlerdir. Çalışmada ayrıca sürdürülebilir su temini için deniz suyu elektrolizi ve atık su kullanımı gibi alternatif yöntemler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çöl bölgelerinden Tamanrasset'in, yıllık 33,5 GWh enerji ile 679 ton H₂ üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Adrar bölgesinin 32,9 GWh enerji ve 668 ton H₂ üretim potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir.

Obileke vd. [9], HOMER Pro ve MATLAB yazılımlarını kullanarak, biyoenerji ve rüzgâr kaynaklı şebekeden bağımsız bir MŞ'yi tekno-ekonomik açıdan analiz etmişlerdir. Çalışmada, %10'un altında iskonto oranı ve 15 yıldan kısa geri ödeme

süresiyle sistemin ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu, LCOE değerinin ise 0,0085–0,1 \$/kWh arasında değiştiği ifade edilmiştir.

Ba-swaimi vd. [10], sağlık tesisleri için HOMER Pro yazılımı kullanarak hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız FV, RT, BDS, elektrolizör, HT, FC, dizel generatör (DG) bileşenlerinden oluşan altı farklı sistem konfigürasyonunun analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analiz sonucunda FV, FC, elektrolizör, BDS, HT ve DG'nin olduğu MŞ sisteminin NPC değeri bakımından, FV, BDS, HT ve şebeke bileşenlerinin olduğu senaryonun ise, 0,049 \$/kWh'lik LCOE değeri açısından en uygun maliyetli çözüm olduğu ifade edilmiştir.

Mishref ve Tanaka, [11], şebekeden bağımsız bir MŞ sistemi tasarlamışlardır. Mısır'ın Doğu Owienat kenti için tasarlanan sistem, RT, FV paneller, mikro HES, BDS ve gri hidrojen üretimi sağlayan buhar dönüştürücülerinden oluşmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, hidrojen üretim maliyetinin 2,1 ila 2,8 \$/kg aralığında değiştiği ve sistemin NPC değerinin, elektrikli boyler kullanılan senaryoya kıyasla %13,6 oranında daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Ennemiri vd. [12], Fas'ta bulunan bir ticari platformun elektrik talebini karşılamak amacıyla HOMER Pro yazılımı kullanarak FV, BGG ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, bileşenlerin en uygun kapasite değerleri FV için 231 kW, BGG için 170 kW, dönüştürücü için 140 kW ve BDS için 201 kWh olarak belirlenmiştir. Tasarlanan sistemin LCOE değeri 0,280 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Manoo vd. [13], Pakistan'da yer alan bir eğitim kurumunun enerji gereksinimini karşılamak amacıyla, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız seçenekler dahilinde FC, RT ve FV bileşenlerinden oluşan çeşitli MŞ yapılarını modelleyerek analiz etmişlerdir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, şebekeye bağlı FV sistemin 0,155 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun çözüm olduğu ortaya konulmuştur.

Khalil vd. [14], Ürdün'ün Karak bölgesi için HOMER Pro yazılımı kullanarak üç farklı MŞ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. İlk senaryoda, FV paneller, DG ve BDS

bileşenlerinden oluşan bir yapı analiz edilmiş ve sistemin LCOE değeri 0,488 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. İkinci senaryoda sisteme RT entegre edilmiş ve bu durumda LCOE değeri 0,489 \$/kWh olarak bulunmuştur. Son senaryoda ise yalnızca DG içeren bir sistem değerlendirilmiş ve bu tasarımın LCOE değerinin 0,727 \$/kWh olacağı ifade edilmiştir.

Nadeem vd. [15], Pakistan'da şebekeden bağımsız bir MŞ sistemi tasarlamak amacıyla FV paneller, BGG ve BDS bileşenlerini içeren bir model geliştirmişlerdir. HOMER Pro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen optimizasyon analizleri sonucunda, 15 kW BGG, 11,5 kW FV, 1 kWh BDS ve 10,8 kW dönüştürücüden oluşan sistemin NPC değeri 95.858 \$, LCOE değerinin ise 0,104 \$/kWh olacağı hesaplanmıştır.

El-Maaroufi vd. [16], HOMER Pro yazılımını kullanarak Fas'ın Zoumi bölgesindeki konutların yıllık enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla FV, RT, BGG ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Yapılan simülasyon ve analizler sonucunda, önerilen sistemin yılda 11,14 GWh elektrik enerjisi üretebileceği, geleneksel DG'lere kıyasla yıllık yaklaşık 5.900 ton CO₂ emisyonunu azaltabileceği ve LCOE değerinin 0,125 \$/kWh seviyesinde olacağı belirtilmiştir.

Araoye vd. [17], Nijerya'nın Agu-Amede köyünün elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla HOMER Pro yazılımı kullanarak şebekeden bağımsız bir MŞ tasarlamış ve tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Günlük üç ton biyokütle kullanımı ile BGG'nin enerji talebini karşılayabileceği belirtilmiştir. En uygun sistemde FV paneller 98.714 kWh (%20,50), BGG ise 381.979 kWh (%79,50) enerji üretmektedir. Sistemin NPC değeri 30.331,25 \$ ve LCOE değeri 0,066 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Yusupov ve Almagrahı [18], Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin elektrik enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla HOMER Pro yazılımı kullanarak şebekeye bağlı DG, FV paneller ve BDS bileşenlerinden oluşan dört farklı MŞ modeli tasarlamışlardır. Yapılan analizler sonucunda, DG ve FV bileşenlerinden oluşan

şebekeye bağlı sistemin 0,284 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun seçenek olduğunu belirtmişlerdir.

Qiblawey vd. [19] yaptıkları çalışmada, Kanarya takımadalarından Tenerife ve Gran Canaria için önerdikleri dört farklı senaryo yardımıyla YEK kullanımının arttırılmasına yönelik kapsamlı bir tekno-ekonomik değerlendirme sunmuşlardır. HOMER Pro yazılımı yardımıyla tasarlanan sistem ile elektrik üretim maliyetinin her iki ada için sırasıyla %23 ve %25,3 azalacağı, CO₂ emisyonunda ise %70'e varan bir düşüş olacağı ifade edilmiştir.

Fikari vd. [20], Kenya'da 100 kişilik nüfusa sahip kırsal bir bölge için bağımsız bir hibrit güç sistemi modelleyerek analiz etmişlerdir. FV, DG, BDS, RT, temel yükler, su pompalama ve arıtma yükünden oluşan MŞ sistemi MATLAB Simulink yardımı ile modellenmiş ve tekno-ekonomik açıdan analiz edilmiştir.

Serat vd. [21], bir üniversite kampüsü için HOMER Pro yazılımı kullanarak şebekeye bağlı FV, RT ve DG bileşenlerini içeren dört farklı senaryoyu analiz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda; 117 kW FV, 6 kW RT, 25 kW DG ve minimum düzeyde şebeke bağlantısına sahip sistemin, %94,8 yenilenebilir enerji penetrasyonu sağladığı ve yıllık 7.460 kg CO₂ emisyonu ürettiği ifade edilmiştir. Ayrıca, tüm bileşenlerin yer aldığı senaryonun 0,0172 \$/kWh seviyesindeki LCOE ile en uygun seçenek olduğu belirtilmiştir.

Shezan vd. [22], Malezya'nın Perhentian Adası'nda kesintisiz enerji sağlamak amacıyla HOMER Pro yazılımını kullanarak güneş ve rüzgar enerjisine dayalı hibrit MŞ sistemini analiz etmişlerdir. Yapılan analiz sonucunda tasarlanan sistemin NPC değeri 387.185 \$, LCOE değeri ise 0,64 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Ali vd. [23], Bangladeş'in Rajshahi bölgesinde yer alan beş katlı bir konut için HOMER Pro yazılımı ile şebekeye bağlı FV, RT ve BGG bileşenlerinin olduğu altı farklı MŞ modelinin tekno-ekonomik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. En uygun modelin 0,0306 \$/kWh LCOE ve 46.813 \$ NPC değerine sahip şebekeye bağlı FV/BGG sisteminin olduğunu belirtmişlerdir. FV ve BGG sistemleri sırasıyla yıllık

31.168 kWh ve 3.040 kWh enerji üretmişlerdir. Ayrıca tasarlanan sistem şebekeden yıllık 21.951 kWh enerji alırken 13.411 kWh enerjiyi şebekeye vermiştir.

Asghar vd. [24], HOMER Pro yazılımını kullanarak Suudi Arabistan'daki Telekom kulelerinin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla şebekeden bağımsız FV, RT, DG ve BDS bileşenlerinin olduğu MŞ sistemini farklı senaryolar için teknik, ekonomik ve çevresel analizini gerçekleştirmişlerdir. Farklı senaryolara göre yapılan simülasyonlar sonucunda FV, DG ve BDS'den oluşan sistemin 0,18 \$/kWh'lik LCOE değeriyle en ekonomik olduğunu ve yılda 37.326 kg CO₂ salımını azaltarak çevresel katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Chowdhury vd. [25], Bangladeş'in Saint Martin Adası'nda bulunan bir sağlık merkezinin elektrik talebini karşılamak için HOMER Pro yazılımını kullanarak FV, RT, BDS ve DG bileşenlerinden oluşan şebekeden bağımsız bir MŞ'nin analizini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen sistemin LCOE değeri 0,4688 \$/kWh, sistemin geri ödeme süresi yedi yıl, yatırım getiri oranı %10 ve iç verim oranı ise %13 olarak belirtilmiştir. Ayrıca oluşturdıkları sistemin dizel yakıtlı bir yapıya göre %27 daha az CO₂ emisyonu yaydığını ifade etmişlerdir.

Singh vd. [26], HOMER Pro yazılımını kullanarak kırsal bölgelerin elektrik talebi için FV, RT, FC, DG ve BDS bileşenlerinin olduğu sekiz farklı MŞ senaryosunun analizini gerçekleştirmişlerdir. İncelenen senaryolar arasında FV, RT, DG ve BDS bileşenlerinin olduğu MŞ modeli en düşük NPC (129.053 \$) değerine sahip iken, FV, RT, FC ve BDS bileşenlerinin olduğu modelin ise en düşük LCOE (0,1510 \$/kWh) değerine sahip olduğu belirtilmiştir.

Rezk ve Dousoky yaptıkları çalışmada [27], FV-akü, FV-FC, RT-akü, FV-RT, RT-FC ve FV-FC-akü olmak üzere toplam altı farklı MŞ modeli incelenmiştir. Sistemin optimizasyonu, simülasyonu ve performans değerlendirmesi HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uzak bir tarımsal bölgede ve şebekeden bağımsız olacak şekilde tasarlanan modeller, minimum NPC ve enerji maliyeti kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. İncelenen tüm modeller için LCOE değeri 0,058 -0,18 \$/kWh arasında, NPC değeri ise 50.321-156.142 \$ arasında değişmektedir.

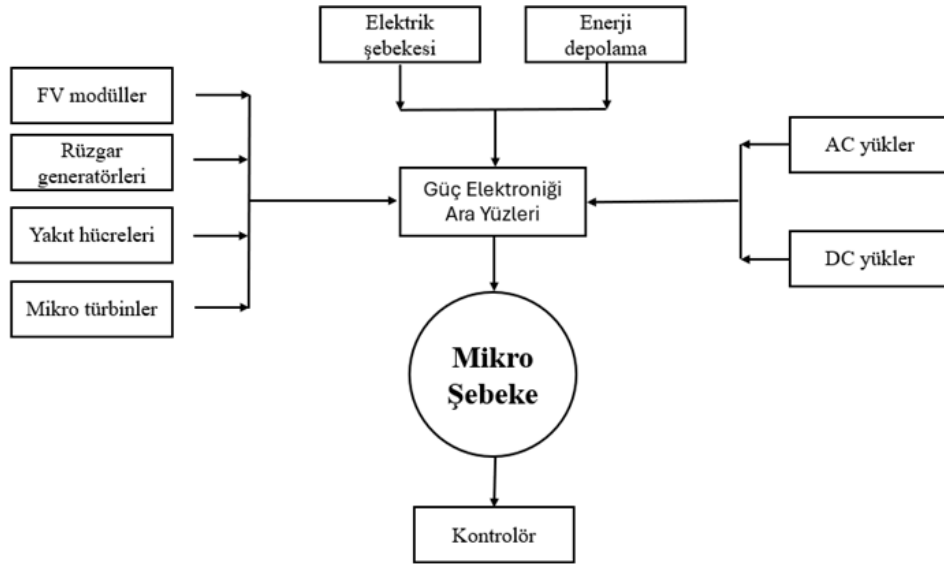
Shezan vd. [28], Malezya'da gerçekleştirdikleri bir çalışmada, FV–RT–DF–BDS bileşenlerinden oluşan şebekeden bağımsız bir MŞ modelinin performans analizini yapmışlardır. Modelleme, günlük ortalama enerji ihtiyacı 33 kWh ve pik yükü 3,9 kW olan bir topluluk için yapılmıştır. Sistem tasarımı gerçek zamanlı iklim verileri kullanılarak HOMER yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve NPC ile emisyon seviyesi açısından değerlendirilmiştir. Önerilen sistemin geleneksel enerji sistemine kıyasla yıllık 16 ton CO₂ emisyonunu engelleyeceği ve NPC değerini %29,65 oranında azaltacağı ifade edilmiştir. Tasarlanan sistemin NPC değeri 288.194 \$, LCOE değeri ise 1,877 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Türkay ve Telli [29], İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi'nin YEK açısından uygunluğunu değerlendirmiş ve şebekeye bağlı ile şebekeden bağımsız olarak tasarlanan hibrit enerji sistemlerini ekonomik ve teknik açılarından incelemişlerdir. Çalışmada, RT, FV, HT, FC, elektrolizör ve çevirici içeren sistemler tasarlanmıştır. Seçilen bölgenin rüzgâr ve güneş enerji potansiyeli analiz edilmiş, enerji talebinin karşılanamadığı veya yenilenebilir enerji üretiminin fazla olduğu durumlarda yedek sistem/depolama birimi olarak HT ve FC kullanılmıştır. Tasarlanan sistemlerin uygunluğu ve kullanılabilirliği, HOMER yazılımı ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, şebekeye bağlı FV/HT/FC/elektrolizör bileşenlerini içeren modelin en uygun LCOE değerine (0,307 \$/kWh) sahip olduğu belirtilmiştir.

Yukarıda bazıları sunulan literatürdeki çalışmalar, araştırmacıların dünya genelindeki farklı kırsal alanlar için farklı hedeflere yönelik olarak yenilenebilir enerji tabanlı hibrit sistemlerin modellenmesi üzerine odaklandığını göstermektedir. Araştırmacıların bu ilgisi, YEK tabanlı hibrit sistemlerin enerji ihtiyacını karşılamada ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

3. MİKRO ŞEBEKELER VE BİLEŞENLERİ

MŞ'ler birden fazla enerji kaynağının entegre bir biçimde kullanıldığı ve sistem performansının optimize edildiği enerji üretim tesisleridir. Bu tür sistemlerde, birden fazla enerji kaynağının birlikte kullanılması; herhangi bir kaynağın yetersiz veya devre dışı kaldığı durumlarda diğer kaynakların devreye girerek enerji talebini karşılaması ve böylece güç sürekliliğinin sağlanması amacıyla tercih edilmektedir [30]. Şebekeden bağımsız çalışan MŞ'ler ise bulundukları bölgedeki YEK'leri değerlendirerek enerji gereksinimlerini karşılayan ve çevresel açıdan sürdürülebilir sistemlerdir. Küresel ölçekte güvenilir ve sürdürülebilir MŞ sistemlerine geçiş, hibrit sistemlerin sunduğu teknik ve ekonomik avantajların yanı sıra fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi nedeniyle giderek daha büyük önem kazanmaktadır [31]. MŞ'lerin yapısal şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. MŞ'lerin yapısal şeması [32]

3.1. Biyogaz Generatörleri

Generatör sistemleri, kimyasal enerjiyi sırasıyla ısı, mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürme prensibiyle çalışmaktadır. Dizel, benzin, doğalgaz ve biyogaz gibi yakıtların

yanması sonucu ortaya çıkan ısı enerjisi, önce mekanik harekete çevrilir; bu hareket ise generatör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu sistemler, kullanım amacına ve ölçeğine bağlı olarak çeşitli teknik özelliklerle tasarlanmaktadır. BGG özelinde ise, enerji üretiminde biyogazdan yararlanılarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflenmekte ve bu sistemler genellikle üç ana bileşenden oluşmaktadır: gaz motoru, generatör ve otomasyon panoları [33]. BGG'nin görsel yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir.



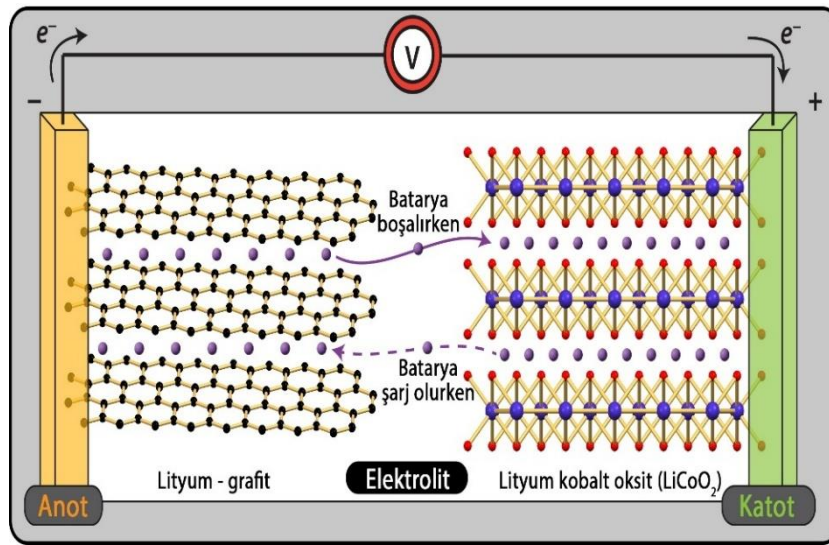
Şekil 3.2. BGG'nin yapısı [34]

3.2. Batarya Depolama Sistemleri

BDS'ler, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen veya ters yönde çalışarak elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çevirebilen elektrokimyasal cihazlardır. Geniş bir kullanım alanına sahip olan bu cihazlar, genel olarak primer (birincil) ve sekonder (ikincil) bataryalar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Primer bataryalar şarj edilemez olup, kullanım ömürlerinin sona ermesiyle birlikte atılırlar. Buna karşılık, sekonder bataryalar ise bir elektrik kaynağı aracılığıyla yeniden şarj edilebilme özelliğine sahiptir [35].

Ni-Cd bataryalar, uzun çevrim ömrü ve çevresel dayanıklılıklarıyla öne çıkarken, kadmiyumun toksik yapısı çevre açısından risk oluşturmaktadır. Buna karşılık Ni-MH bataryalar daha çevreci bir alternatif sunmakta ve gelişmiş performanslarıyla taşınabilir

cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Li-ion bataryalar ise yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik ve uzun ömür gibi üstün özellikleri sayesinde yalnızca taşınabilir cihazlarda değil, aynı zamanda otomotiv ve yenilenebilir enerji sistemlerinde de etkin bir depolama çözümü olarak tercih edilmektedir. %100'e yakın enerji verimliliği ve düşük bakım gereksinimi, bu bataryaların yaygınlığını artıran başlıca etkenlerdir [36]. Ayrıca, nikel tabanlı bataryalarla karşılaştırıldığında daha düşük bakım maliyetleri sunmaları, bu bataryaların tercih edilme nedenlerinden bir diğeridir. Li-ion bataryanın yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Li-ion batarya yapısı [37]

3.3. Dönüştürücüler

Dönüştürücüler, elektrik enerjisinin biçimini ve karakteristiklerini değiştirmek amacıyla kullanılan temel güç elektroniği elemanlarıdır. Bu cihazlar, alternatif akımı (AC) doğru akıma (DC) veya tersi yönde dönüştürürken gerilim ve frekans değerlerini de istenilen düzeyde değiştirebilen cihazlardır. Özellikle YEK'lerin entegrasyonunda ve farklı yük türlerinin beslenmesinde, sistemlerin artan karmaşıklığı nedeniyle dönüştürücüler kritik bir rol üstlenmektedir.

Güneş ve rüzgâr gibi değişken üretim karakterine sahip YEK'lerin şebekeye entegrasyonunda sadece transformatörlerin kullanımı yetersiz kalmaktadır. Gerilim salınımları, harmonik bozulmalar ve benzeri güç kalitesi problemleri, sistem

performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum, gelişmiş dönüştürücü çözümlerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır [38]. Dönüştürücüler; yalnızca YEK'lerin olduğu sistemlerde değil, aynı zamanda taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli araçlarda ve genel güç elektroniği uygulamalarında da yaygın biçimde kullanılmaktadır [39].

DC ve AC baraları arasındaki enerji dönüşümü, doğrultucu ve invertörlerden oluşan DC/AC dönüştürücü birimleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu bileşenlere ait çıkış gücü ifadeleri Denklem 3.1 ve 3.2'de ayrıntılı olarak verilmiştir [40].

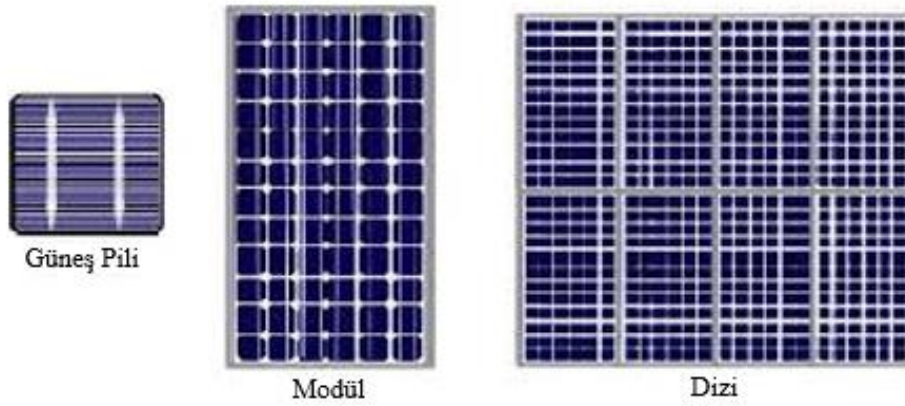
$$P_{\text{doğrultucu}} = P_{\text{AC}} \cdot \eta_{\text{doğrultucu}} \quad (3.1)$$

$$P_{\text{invertör}} = P_{\text{DC}} \cdot \eta_{\text{invertör}} \quad (3.2)$$

3.4. FV Sistemler

FV paneller, güneş enerjisini fotovoltaiik etki prensibine dayalı olarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu paneller, genellikle 25–30 cm² büyüklüğünde kare yüzey alanına sahip hücrelerden oluşmaktadır. Standart test koşulları altında bir FV hücresi yaklaşık olarak 1 watt (W) elektriksel güç üretimi sağlayabilmektedir [41].

Güneş pillerinin toplam güç çıkışını artırmak amacıyla, bu hücreler elektriksel olarak seri veya paralel biçimde birbirine bağlanarak belirli bir yapısal düzen içerisinde bir yüzeye monte edilir. Bu birleşim yapısına “güneş pili modülü” ya da “FV modül” adı verilmektedir. Talep edilen güç seviyesine göre, FV modüller yine seri veya paralel bağlantı teknikleriyle bir araya getirilerek, birkaç watt’tan megawatt mertebelerine kadar çıkabilen daha büyük ölçekli FV dizileri oluşturulabilmektedir [42]. Şekil 3.4’te, bir güneş pili, modülü ve dizin yapısı sunulmaktadır.

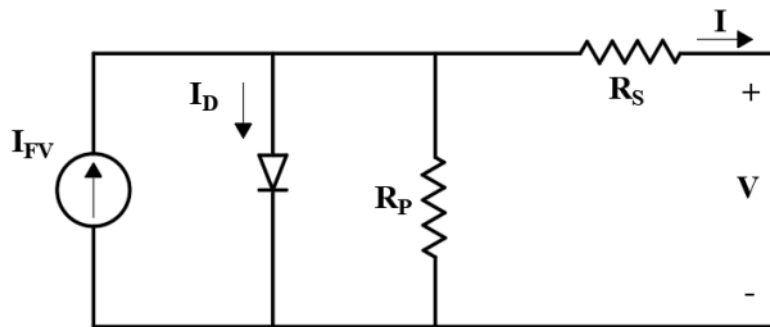


Şekil 3.4. Güneş pili, modül ve dizinin yapısal görünümü [43]

FV paneller, güneş enerjisinden yararlanmak amacıyla farklı coğrafi ve iklim koşullarında kolaylıkla kurulabilen, çevresel etkileri düşük ve ekonomik açıdan uygulanabilir sistemlerdir. Bu sistemlerin esnek kurulum olanakları ve modüler yapıları, kırsal bölgelerden şehir merkezlerine kadar geniş bir yelpazede enerji ihtiyacının karşılanmasını mümkün kılmaktadır.

FV teknolojisinde yaşanan ilerlemeler, güneş enerjisi sistemlerinin hem enerji dönüşüm verimliliğini hem de saha uygulama potansiyelini önemli ölçüde artırmıştır. Bu gelişmeler, FV sistemlerin yalnızca bireysel kullanıcılar için değil, aynı zamanda şebeke ölçekli enerji üretimi için de cazip bir çözüm haline gelmesini sağlamıştır [44].

Bir FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi, birbirlerine paralel bağlı direnç, diyot ve akım kaynağı ile bunlara seri bağlanmış bir dirençten oluşur [45]. Bir FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. FV hücrenin elektriksel eşdeğer devre modeli [46]

Eşdeğer güneş hücresi devresinde; I_{FV} güneş ışınlamı ile üretilen FV akımını, I_D diyot üzerinden geçen akımı, R_S yarı iletken ile metal temas yüzeyinden kaynaklanan seri direnç değerini ve R_P ise yarı iletken yapısındaki mikroskobik kusurlardan kaynaklanan direnç değerini temsil etmektedir.

Güneş hücresinde üretilen toplam çıkış akımı I_{FV} , bu parametreler dikkate alınarak Denklem 3.3 ile tanımlanmaktadır.

$$I_{FV} = ((I_{SC} + K_i \cdot (T - T_{ref})) \cdot \lambda) / 1000 \quad (3.3)$$

Burada; λ güneş ışınlamını (kW/m^2), I_{SC} 25 °C'de ölçülen kısa devre akımını, K_i kısa devre akımının sıcaklık katsayısını; T ise hücrenin Kelvin cinsinden çalışma sıcaklığını ifade etmektedir. Ters doyum akımı (I_{rs}) ise Denklem 3.4 ile tanımlanmaktadır.

$$I_{rs} = I_{sc} / \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{N_s \cdot k \cdot A \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Bu denklemde; V_{OC} güneş pilinin açık devre gerilimini, q elektron yükünü, N_s modülde seri bağlı güneş hücresi sayısını, k Boltzmann sabitini ve A ise güneş pilinde kullanılan yarı iletken malzemenin ideallik katsayısını ifade etmektedir.

Güneş pilinin sıcaklık değeri doyum akımı (I_s) üzerinde doğrudan etkilidir. Doyum akımının hesaplanması Denklem 3.5 ile verilmektedir. Bu denklemde, T_{ref} , referans sıcaklığını, E_g ise kullanılan yarı iletken malzemenin bant aralığı enerjisini temsil etmektedir.

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{(q \cdot E_g)}{A \cdot k \cdot (1/T_{ref} - 1/T)}} \quad (3.5)$$

FV hücresinin toplam akımı (I) Denklem 3.6'ya göre hesaplanır.

$$I = I_{PV} - I_s \left[e^{\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.6)$$

3.5. Hidrojen Tankı

HT'ler, elektrolizörler aracılığıyla üretilen hidrojenin güvenli bir şekilde depolanmasını sağlayan temel birimlerdenidir. Tankın yapıldığı malzemenin türü, duvar kalınlığı, depolama basıncı, hacmi ve ağırlığı maliyet üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar.

Hidrojen depolama tanklarının üretiminde genellikle üç temel malzeme grubu kullanılmaktadır: metaller (özellikle alüminyum ve çelik), polimerler (yüksek yoğunluklu polietilen ve poliamid) ve karbon fiber takviyeli kompozitler [47].

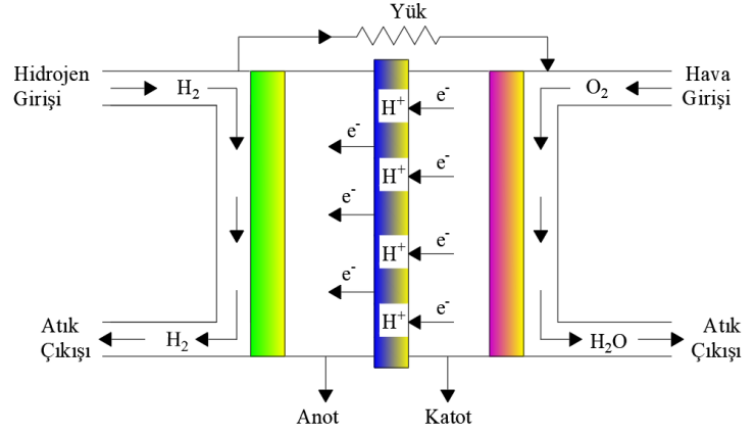
3.6. Yakıt Hücreleri

FC, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal sistemlerdir. Bu sistemlerde genellikle yakıt olarak hidrojen kullanılır ve hidrojen kaynağı sürdüğü sürece kesintisiz elektrik üretimi gerçekleştirilebilir.

Hareketli parça içermemeleri sayesinde sessiz çalışırlar ve reaksiyon sonucu yan ürün olarak yalnızca su (H_2O) açığa çıkar. Bu özellikleriyle FC'ler hem çevre dostu hem de yüksek verimli enerji üretim teknolojileri arasında yer almaktadır.

FC'lerde, türlerinden bağımsız olarak, anot tarafına gaz formunda hidrojen, katot tarafına ise oksitleyici olarak hava (oksijen) beslenir. Elektrolit, bu iki gazın birbirine karışmasını engelleyerek yalnızca iyon iletimine izin verir.

Hidrojenin anot yüzeyinde elektrokimyasal olarak oksitlenmesi ve oksijenin katotta indirgenmesi sonucu oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar, elektronların dış devre üzerinden anottan katoda doğru akmasına neden olur. Bu elektron akışı sayesinde sistem dış devrede elektrik enerjisi üretir [48]. FC hücresinin şematik diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. FC'nin şematik diyagramı [49]

3.7. Elektrolizör

Elektroliz, elektrik akımı kullanılarak bir sıvı içerisinde çözünmüş kimyasal bileşiklerin bileşenlerine ayrılması işlemidir. Bu işlem, “elektroliz kabı” veya “elektroliz tankı” olarak adlandırılan bir sistem içerisinde gerçekleştirilir. Sistemde, artı ve eksi yüklü iyonlara ayrılmış bir bileşiğin (elektrolit) içerisine birbirine temas etmeyecek şekilde yerleştirilmiş iki elektrot bulunur. Elektrolit genellikle eritilmiş hâlde veya bir tuz çözeltisinin sulu formunda kullanılır. Elektrolizör ise, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen ve oksijen gazlarının elde edilmesini sağlayan birimdir ve farklı kaynaklardan hidrojen üretiminde etkin bir rol oynar. Hidrojen; taşınabilirliği, yüksek enerji yoğunluğu, çevresel etkiler açısından temiz oluşu ve maliyet etkinliği gibi özellikleriyle alternatif enerji kaynaklarının temel kriterlerini karşılayan çok yönlü bir enerji taşıyıcısıdır [50].

Proton Değişim Membranlı (PEM) elektrolizörlerde meydana gelen hidrojen ve oksijen üretim reaksiyonları, Denklem 3.7, 3.8 ve 3.9’da açıklanmıştır [51].

Anot reaksiyonu;



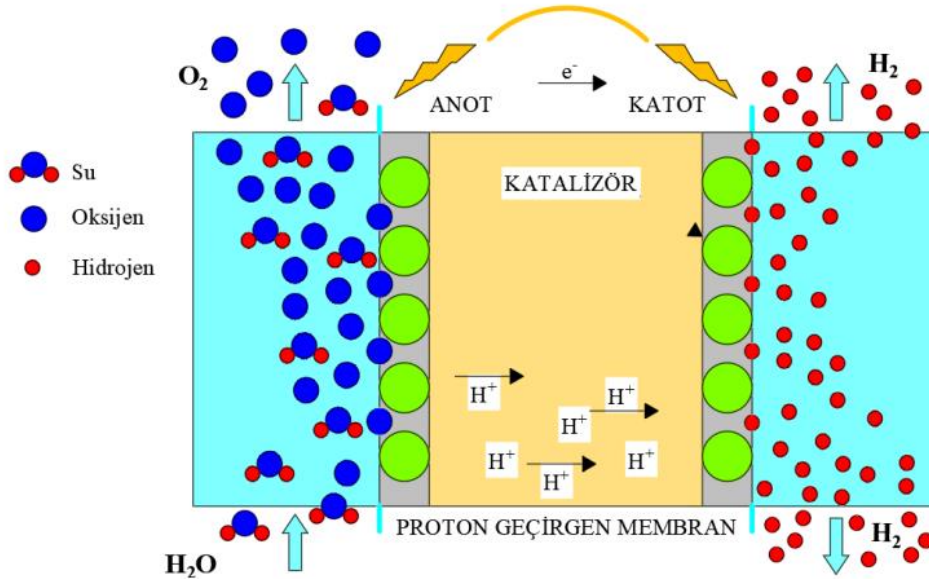
Katot reaksiyonu;



Toplam reaksiyon



Su molekülleri, elektrot yüzeylerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılır. Bu süreçte su, anot bölgesine yönlendirilir ve burada oksijen gazına (O_2), protonlara (H^+) ve elektronlara (e^-) ayrılır. Oluşan protonlar, proton iletkenliği yüksek olan membran aracılığıyla katot tarafına transfer edilirken, elektronlar ise harici bir elektriksel devre üzerinden anottan uzaklaştırılır. Bu harici devre, hücreye gerekli olan potansiyel farkını sağlar. Katot bölgesine ulaşan protonlar, elektronlarla birleşerek hidrojen gazını oluşturur. Bu birleşme mekanizması, Şekil 3.7’de detaylı biçimde sunulmaktadır.



Şekil 3.7. PEM su elektrolizinin şematik gösterimi [52]

3.8. Rüzgâr Türbinleri

Güneş, belirli bir bölgedeki havayı ısıttığında, ısınan hava moleküllerinin kinetik enerjisi artar ve bu durum havanın yoğunluğunun azalmasına neden olur. Yoğunluğu azalan sıcak hava yükselirken, yerini doldurmak üzere çevredeki daha soğuk ve yoğun hava kütlesi hareket eder. Bu hava hareketi, rüzgâr olarak tanımlanır. Akışkan bir yapıya sahip olan

hava, hareket hâlindeyken belirli bir kinetik enerji taşır. RT'lerin özel olarak tasarlanmış aerodinamik kanatları, bu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Kanatların dönmesiyle birlikte, belirli bir rüzgâr hızı eşiğinin aşılması durumunda, kanatlara bağlı ana mil (şaft) döner ve generatör rotorunu hareket ettirir. Generatörde, dönen mıknatıslar ve sabit sargılar arasındaki etkileşim sonucu gerilim indüklenir ve böylece elektrik enerjisi elde edilir. RT'lerin üretebileceği elektrik gücü şu şekilde belirlenir:

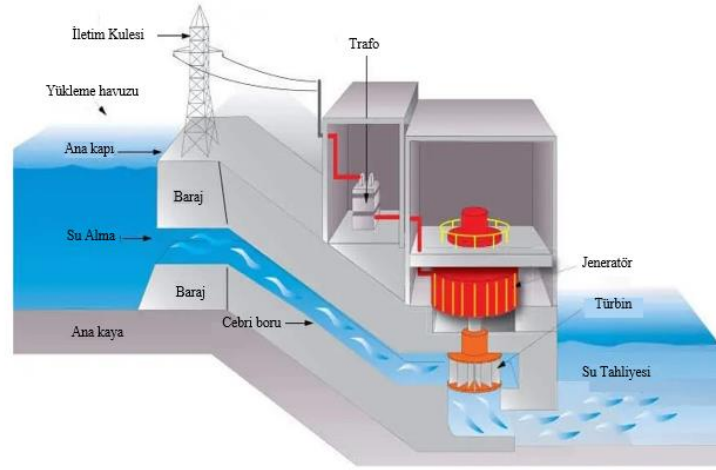
$$P_{\text{rüzgar}} = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot A \cdot \rho \cdot d \quad (3.7)$$

Burada; v rüzgâr hızı (m/s), A türbinin kanatlarının süpürdüğü alan (m^2) ve ρ hava yoğunluğudur (kg/m^3). d katsayısı Betz limiti olarak bilinir ve ideal koşullarda elde edilebilecek maksimum enerji dönüşüm oranıdır. Türbin tasarımına ve üretici firmaya bağlı olarak en fazla 0.59 değerini alabilir [53]. Formülden de görüldüğü gibi rüzgâr hızındaki artış, üretilen güç üzerinde kübik bir etkiye sahiptir.

3.9. Hidrolik Türbinler

Hidroelektrik enerji teknolojileri; nehirler, akarsular, göller ve diğer su kütlelerinin doğal akışını düzenlemek amacıyla barajlar, kanallar ve benzeri yapısal mühendislik çözümleri kullanılarak elektrik enerjisi üretimini mümkün kılar. Bu sistemler yardımıyla suyun potansiyel enerjisi önce kinetik enerjiye ardından mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olan hidroelektrik sistemler çevreci ve uzun ömürlüdürler. HES türleri üç başlık altında toplanabilir: depolamalı sistemler, nehir tipi sistemler ve pompa depolamalı (rezervuar) sistemler [54].

Hidrolik türbinler, suyun kinetik ve potansiyel enerjisinden yararlanma biçimlerine göre etki (aksiyon) türbinleri ve tepki (reaksiyon) türbinleri olarak sınıflandırılır. Etki türbinleri genellikle yüksek düşü seviyelerinde tercih edilmekte olup Pelton, Turgo ve Crossflow (Michell-Banki) gibi türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Reaksiyon türbinlerine ise Francis, Kaplan ve Water Wheel gibi türbinler örnek olarak verilebilir [55]. HES'lerin genel yapısı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. HES'lerin yapısı [56]

Bir HES'de elde edilebilecek güç; suyun net hidrolik yüksekliği, debisi ve yoğunluğu gibi parametrelere bağlıdır. Net hidrolik yükseklik, türbin girişindeki su seviyesi ile çıkış seviyesi arasındaki farkı ifade eder ve bu fark, potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünde belirleyici bir etkindir. Su debisi, belirli bir zaman aralığında türbinden geçen su miktarını gösterir ve enerji üretimini doğrudan belirler. Su yoğunluğu ise kinetik enerjinin türbinde mekanik enerjiye dönüşüm verimliliği üzerinde etkili olur. Bu üç parametre, HES'in toplam enerji üretim kapasitesini belirleyen temel değişkenlerdir. Su debisi ile türbinin giriş ve çıkış güçleri sırasıyla Denklem 3.8, 3.9 ve 3.10 ile hesaplanmaktadır.

$$D=S \cdot V \quad (3.8)$$

$$P_{\text{giriş}}=D \cdot H \cdot \rho \cdot g \quad (3.9)$$

$$P_{\text{çıkış}}= \eta \cdot P_{\text{giriş}} \quad (3.10)$$

Burada, D su debisini (m^3/s), S akışın gerçekleştiği kesit alanını (m^2), V suyun hızını (m/s), $P_{\text{giriş}}$ türbinin giriş gücünü (Watt), H net hidrolik yüksekliği (m), ρ suyun yoğunluğunu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesini (9.81 m/s^2), $P_{\text{çıkış}}$ türbinin çıkış gücünü (Watt) ve η ise sistemin toplam verimliliğini temsil etmektedir [57].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. HOMER Pro Yazılımı

HOMER, on-grid ve off-grid şebeke modellerinin tasarımı ve simülasyonunda yaygın olarak kullanılan bir yazılım programıdır. Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory, NREL) tarafından geliştirilen program, güneş, rüzgar, dizel generatör, batarya ve şebeke gibi farklı enerji kaynaklarını bir arada modelleyerek tekno-ekonomik analizler yapar [58]. Yazılım, sistemin teknik performansını değerlendirmenin yanı sıra net NPC, LCOE ve geri ödeme süresi gibi ekonomik göstergeleri de analiz eder. Bu analizler sonucunda, tüm senaryolar maliyet yönünden sıralanır ve en uygun sistem modeli belirlenir. Bu özellikleri sayesinde HOMER Pro; enerji mühendisleri, araştırmacılar ve yenilenebilir enerji projeleriyle ilgilenen profesyoneller tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.2. Mikro Şebeke Bileşenlerinin Matematiksel Modelleri

Bu bölümde, HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanan hibrit MŞ'nin bileşenlerine ilişkin matematiksel modeller ve açıklamaları detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

4.2.1. Biyogaz Generatörün Modellenmesi

Biyogaz destekli enerji üretim sistemleri, HOMER Pro yazılımında; yakıt türü, güç sınırı, verim katsayısı ve maliyet parametreleri dikkate alınarak modellenir. Girdi verisi olarak tarım atıkları, hayvan gübresi, organik evsel artıklar gibi biyokütle kaynakları kullanılır. Bu kaynakların mevsimsel verimliliği ve üretim hacmi, sistemin enerji ihtiyacına göre yapılandırılmasına olanak tanır.

Sistem, generatörün üretim sınırı ve minimum biyogaz ihtiyacına bağlı sabit yükte çalışacak şekilde tanımlanır. Program, yakıt sürekliliğini ve enerji arz yeterliliğini analiz ederek en uygun performans dengesini kurmayı amaçlar.

Yakıt tüketim oranı, cihazın ömrü ve servis gereksinimleri gibi girdiler ışığında yapılan ekonomik simülasyonlar; üretim potansiyeli, maliyet etkinliği ve yıllık enerji profilleri hakkında detaylı veri üretir. HOMER Pro ayrıca, toplam yatırım bedeli, yıllık işletme gideri ve enerji başına maliyet gibi çıktılarla finansal yapılabirlik analizini de mümkün kılar [49].

HOMER Pro yazılımı, BGG çıkış gücü değerini Denklem 4.1'e göre hesaplar [59, 60].

$$P_{BGG} = \frac{m \cdot Q_{ısı} \cdot \eta_{BGG} \cdot \eta_{gaz}}{3600} \quad (4.1)$$

Burada, m tüketilen biyokütleyi (kg), $Q_{ısı}$ biyogazın düşük ısı değerini (kJoul/m³), η_{BGG} BGG'nin verimliliğini, η_{gaz} ise gazlaştırıcının gazlaştırma verimliliğini ifade etmektedir. Bu parametreler, BGG'nin üretim sürecindeki verimlilik ve enerji dönüşüm oranlarının hesaplanmasında önemli rol oynamaktadır.

4.2.2. Batarya Sisteminin Modellenmesi

Hibrit enerji sistemlerinde gerçekleştirilen üretim değeri talep miktarını aştığında fazla enerji BDS'ye yönlendirilerek depolanmaktadır. Ters durumda ise, yani talep miktarının üretim değerinden büyük olması durumunda, BDS'lerde depolanan enerji kullanılarak kesintisiz bir şekilde enerji arzının sürekliliği sağlanır.

HOMER Pro yazılımı, bu enerji akışlarını dinamik biçimde simüle edebilmek için Kinetik Akü Modelini kullanır. Bu model, her zaman adımında bataryaya aktarılacak ya da bataryadan çekilebilecek enerji miktarını matematiksel olarak belirler. İlgili modele göre batarya sistemi, iki bölmeli bir yapıyla temsil edilir. Birinci bölüm, DC forma çevrilmeye hazır olan enerjiyi içerir. İkinci bölüm ise kimyasal bağlarla depolanmış olup, gecikmeli bir süreçle erişilebilen enerjiyi temsil eder.

Bataryanın hem deşarj hem de şarj döngülerindeki doluluk seviyesini hesaplamak için Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 kullanılabilir [61].

$$E_{(b)}(t+1)=E_b(t) \times (1-\sigma) - \left(\frac{E_l(t)}{\eta_{\text{dönüştürücü}}} - E_g(t) \right) \times \eta_{\text{deşarj}} \quad (4.2)$$

$$E_{(b)}(t+1)=E_b(t) \times (1-\sigma) - \left(E_g(t) - \frac{E_l(t)}{\eta_{\text{dönüştürücü}}} \right) \times \eta_{\text{şarj}} \quad (4.3)$$

$E_l(t)$ ve $E_g(t)$ sırasıyla tüketilen ve üretilen enerjiyi temsil etmektedir. $\eta_{\text{deşarj}}$ ve $\eta_{\text{şarj}}$ ise bataryanındeşarj ve şarj verimliliklerini göstermektedir. σ parametresi bataryanın özdeşarj oranını, $\eta_{\text{dönüştürücü}}$ ise dönüştürücünün verimliliğini ifade etmektedir.

4.2.3. Dönüştürücünün Modellenmesi

Hibrit enerji sistemlerinde AC ve DC kaynakların birlikte kullanılması, enerji biçimleri arasında uyum gerektirir. Bu uyum, çift yönlü çalışan güç dönüştürücüler aracılığıyla sağlanmaktadır. Örneğin; güneş panelleri ve bataryalar gibi DC tabanlı kaynakların şebekeye ya da AC yüklerine bağlanabilmesi için DC/AC dönüştürücülere (invertörlere), jeneratör veya biyogaz ünitesi gibi AC üreticilerden elde edilen enerjinin bataryalarda depolanabilmesi için ise AC/DC dönüştürücülere (doğrultuculara) ihtiyaç duyulur. Bu çift yönlü dönüşüm işlemleri hem sistem uyumluluğunu hem de enerji verimliliğini doğrudan etkileyen kritik unsurlar arasında yer alır.

Doğrultucu kapasitesinin sistem ihtiyacına göre esnek biçimde belirlenebilmesi amacıyla, invertör biriminin kapasitesine bağlı olarak tanımlanan “göreceli kapasite” oranı kullanılır. Bu oran sayesinde doğrultucu, sistemin genel ölçeğiyle senkronize biçimde boyutlandırılabilir.

HOMER Pro yazılımı, optimizasyon modülü etkinleştirildiğinde, güç dönüştürücü elemanların kapasite değerlerini hem teknik gereklilikler hem de ekonomik kriterler doğrultusunda analiz ederek, sistemin en uygun yapılandırmasını belirlemeye yardımcı olur [62].

4.2.4. FV Panellerin Modellenmesi

HOMER Pro yazılımı, FV sistemlerin anlık güç üretimini hesaplamak amacıyla belirli fiziksel ve matematiksel modellere dayanmaktadır. Bu kapsamda, FV modül çıkış gücünün belirlenmesinde Denklem 4.6'dan yararlanılmaktadır [62]. Söz konusu denklemler, sistemin enerji verimliliği ile güç üretim kapasitesinin nicel olarak değerlendirilmesinde temel bir araç işlevi görmektedir.

$$P_{FV} = y_{fv} * f_{fv} * \frac{G_T}{G_{T,STC}} * [1 + \alpha_p * (T_C - T_{C,STC})] \quad (4.6)$$

Burada; P_{FV} FV dizisinin çıkış gücünü (W), y_{fv} FV dizisinin nominal gücünü (W), f_{fv} FV'nin derecelendirme faktörünü (%), G_T FV dizisine ulaşan mevcut güneş ışıınımını (kW/m²), $G_{T,STC}$ standart test koşullarındaki güneş ışıınımını (kW/m²), α_p güç sıcaklık katsayısını (% / °C), T_C FV hücre sıcaklığını (°C), $T_{C,STC}$ ise standart test koşullarındaki FV hücre sıcaklığını (25 °C) ifade etmektedir.

FV sistemlerin performans analizinde nominal kapasite (y_{fv}) ve zayıflama faktörü (f_{fv}) olmak üzere iki temel parametre öne çıkmaktadır. Nominal kapasite, panel yüzey alanı ile panel verimliliği dikkate alınarak belirlenmekte olup, sistemin ideal koşullarda sağlayabileceği maksimum güç çıkışını temsil eder. Zayıflama faktörü ise, panel yüzeyinde biriken toz ve kir, gölgeleme etkileri, kablolama kayıpları gibi çevresel ve sistemsel etkenlerden kaynaklanan güç kayıplarını modellemek amacıyla kullanılmaktadır.

HOMER Pro yazılımı T_C 'yi dinamik olarak hesaplayarak, P_{FV} 'yi daha doğru belirleyebilmek için kullanır. Denklem 4.7 ile gösterilmektedir.

$$T_c = \frac{T_a + (T_{C,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right] \left[1 - \frac{\eta_{mp,STC}(1 - \alpha_p T_{C,STC})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (T_{C,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right] \left[\frac{\alpha_p \eta_{mp,STC}}{\tau \alpha} \right]} \quad (4.7)$$

Burada, T_C FV hücre sıcaklığını (°C), T_a ortam sıcaklığını (°C), $T_{C,NOCT}$ nominal çalışma hücre sıcaklığını (°C), G_T FV dizisine ulaşan mevcut güneş ışıınımını (kW/m²), $G_{T,NOCT}$

nominal çalışma hücre sıcaklığındaki güneş radyasyonunu (0.8 kW/m^2), $\eta_{mp,STC}$ standart test koşullarındaki maksimum güç noktası verimliliğini (%), α_p güç sıcaklık katsayısını ($\% / ^\circ\text{C}$), $T_{C,STC}$ standart test koşullarındaki FV hücre sıcaklığını ($25 ^\circ\text{C}$), τ FV dizisinin üzerindeki her türlü kaplamanın güneş radyasyonu geçirgenliğini (%), α FV dizisinin güneş emme oranını (%), $T_{a,NOCT}$ nominal çalışma hücre sıcaklığındaki ortam sıcaklığını ($20 ^\circ\text{C}$), α_p ise güç sıcaklık katsayısını ($\% / ^\circ\text{C}$) ifade eder.

4.2.5. Rüzgâr Türbin Modellenmesi

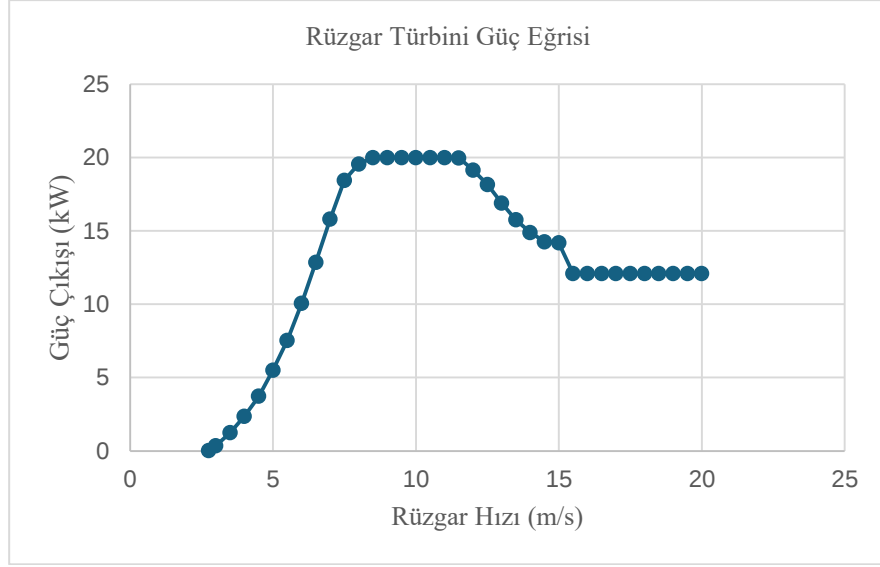
HOMER Pro yazılımı, RT'nin her bir zaman adımındaki güç üretimini üç aşamalı bir hesaplama yöntemiyle belirlemektedir. Bu yöntemin ilk aşamasında, türbinin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızının tahmini gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr hızının yükseklikle değişimini modellemek amacıyla, kullanıcı tercihine bağlı olarak Denklem 4.8 veya Denklem 4.9 kullanılmaktadır. RT güç çıktısına ilişkin hesaplamalarda kullanılan parametreler ile bu parametrelere karşılık gelen açıklamalar aşağıda sistematik biçimde sunulmuştur.

$$U_{hub} = U_{anem} \left(\frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right)^\alpha \quad (4.8)$$

$$U_{hub} = U_{anem} \frac{\ln\left(\frac{Z_{hub}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{anem}}{Z_0}\right)} \quad (4.9)$$

Burada, Z_{anem} anemometre yüksekliğini (m), U_{anem} anemometre yüksekliğindeki rüzgâr hızını (m/s), U_{hub} RT'nin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını (m/s), Z_0 yüzey pürüzlülük uzunluğunu (m) ve Z_{hub} RT'nin göbek yüksekliğini (m) ifade eder.

Göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızının belirlenmesinin ardından, HOMER Pro yazılımı hesaplama sürecinin ikinci aşamasına geçmekte ve bu hız değerine karşılık gelen güç üretimini tespit etmektedir. Bu aşamada, RT'nin enerji üretim performansını değerlendirmek amacıyla üreticiye özgü güç eğrisi kullanılmaktadır (Şekil 4.1). Güç eğrisi, belirli rüzgâr hızlarında türbinin üretebileceği güç miktarını tanımlayarak, gerçekçi üretim senaryolarının modellenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.1. Eocycle EO10 model RT'ye ait güç eğrisi

RT'lere ait güç eğrileri, standart atmosferik koşullar, yani belirli sıcaklık ve basınç değerleri altında türbinin performansını temsil etmektedir. Ancak, gerçek çevresel koşullarda hava yoğunluğundaki değişimler, türbinin güç çıktısını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, gerçeğe daha yakın bir güç tahmini yapılabilmesi için hava yoğunluğu etkisinin hesaba katılması gerekmektedir. Bu kapsamda, HOMER Pro yazılımı hesaplama sürecinin üçüncü aşamasında, güç eğrisinden elde edilen teorik güç değerini mevcut hava yoğunluğu ile ilişkilendirerek düzeltmekte ve bu işlemde Denklem 4.10'dan yararlanmaktadır.

$$P_{RTG} = \left(\frac{\rho_h}{\rho_0} \right) \cdot P_{RTG,STP} \quad (4.10)$$

Burada, P_{RTG} RT'nin güç çıkışını (kW), ρ_h gerçek hava yoğunluğunu (kg/m^3), ρ_0 standart sıcaklık ve basınçta hava yoğunluğunu (1.225 kg/m^3) ve $P_{RTG,STP}$ standart sıcaklık ve basınç altında RT güç çıkışını (kW) ifade etmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, farklı tüketici gruplarının elektrik enerji gereksinimlerini karşılamaya yönelik olarak, HOMER Pro yazılımı aracılığıyla şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı iki farklı hibrit MŞ uygulaması tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu uygulamalar aşağıda sunulmuştur:

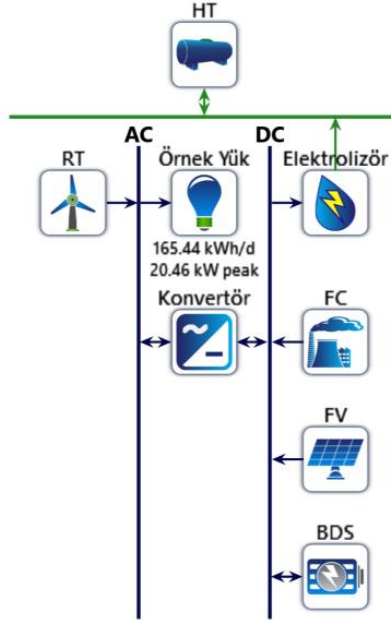
Birinci uygulamada şehir merkezinden uzak kırsal bir alan için şebekeden bağımsız bir MŞ sistemi modellenmiştir. İkinci uygulamada ise 300 yataklı bir hastanenin elektrik talebini karşılayacak şebekeye bağlı bir MŞ modeli geliştirilmiştir. Her bir model teknik, ekonomik ve çevresel boyutlar dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular tablolar ve grafiksel gösterimler aracılığıyla sunulmuştur.

5.1. Uygulama-1: Kırsal Alanlarda Yenilenebilir Enerjili ve Hidrojen Depolamalı MŞ Sisteminin Fizibilite Çalışması

5.1.1. Sistem Modellenmesi

Bu çalışmanın temel amacı, şehir merkezinden uzak kırsal bir alan için bağımsız bir MŞ sisteminin fizibilitesini değerlendirmektir. Çalışma kapsamında batarya ve hidrojen depolama sistemlerine sahip hibrit bir MŞ konfigürasyonu HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve detaylı olarak analiz edilmiştir. Sistem tasarımı, Şanlıurfa ilinin kırsal bir bölgesine ait örnek elektrik tüketim verilerine ve bölgenin meteorolojik koşullarına dayanmaktadır. Elektrik yükünü karşılamak üzere optimize edilen sistemin teknik ve ekonomik fizibilitesi bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

FV, RT, FC, BDS ve HT bileşenlerinden oluşan MŞ'nin şematik yapısı Şekil 5.1'de, bileşenlere ait birim maliyet değerleri ise Tablo 5.1'de sunulmuştur. YEK'ler tarafından üretilen fazla enerjinin bir bölümü BDS'de depolanmakta, kalan kısmı ise elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretiminde kullanılmaktadır.



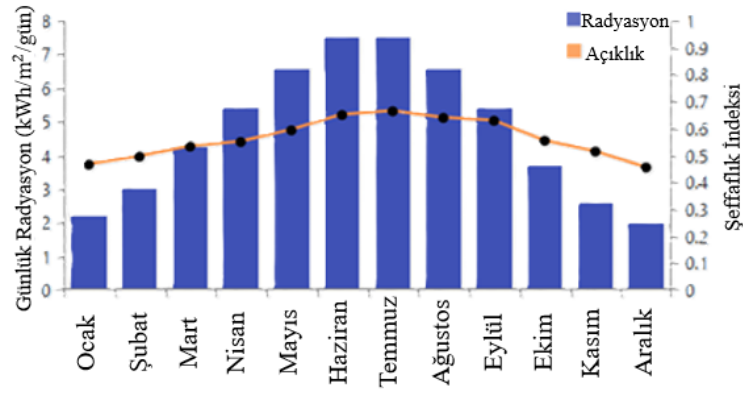
Şekil 5.1. HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli

Tablo 5.1. MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri

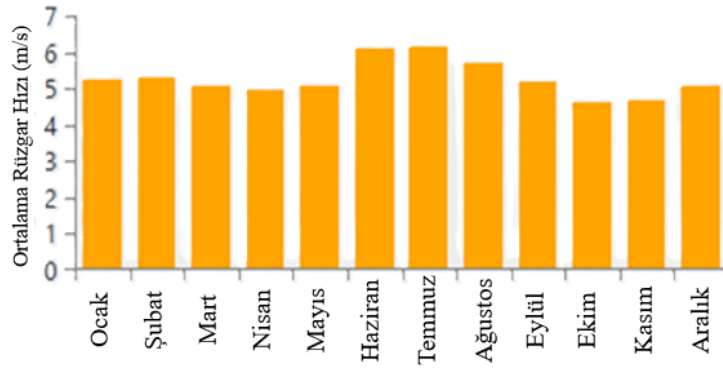
Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti	Geri dönüşüm maliyeti	Bakım ve onarım maliyeti	Çalışma ömrü
FV	700 \$/kW	700 \$/kW	10 \$/kW	25 yıl
RT	29.000 \$	25.000 \$	20 \$/kW	20 yıl
FC	3.000 \$/kW	2.500 \$/kW	0,01 \$/saat	50.000 saat
BDS	550 \$/kW	550 \$/kW	10 \$/kW	15 yıl
HT	500 \$/kg	500 \$/kg	-	25 yıl
Konvertör	300 \$/kW	300 \$/kW	-	15 yıl
Elektrolizör	1.000 \$/kW	1.000 \$/kW	10 \$/kW	15 yıl

5.1.2. Bölgenin Meteorolojik Verileri

Çalışmada kullanılan meteorolojik veriler HOMER Pro yazılımına entegre edilmiş NASA'nın küresel veri tabanından elde edilmiştir. Şanlıurfa ilinin yıllık ortalama güneşlenme potansiyeli 4,70 kWh/m²/gün ve ortalama rüzgâr hızı 5,25 m/s'dir. Bölgenin aylık güneşlenme süresi ve açıklık indeksi Şekil 5.2'de, aylık ortalama rüzgâr hızı ise Şekil 5.3'te sunulmuştur.



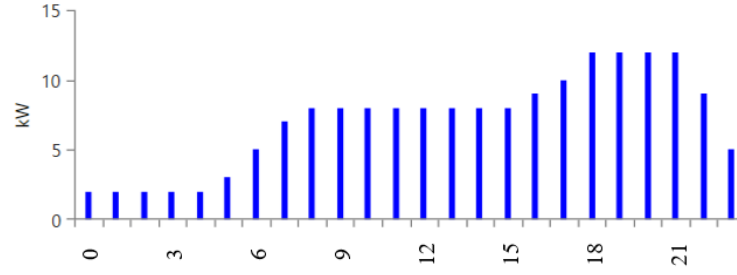
Şekil 5.2. Şanlıurfa İli güneş radyasyonu ve açıklık indeksi



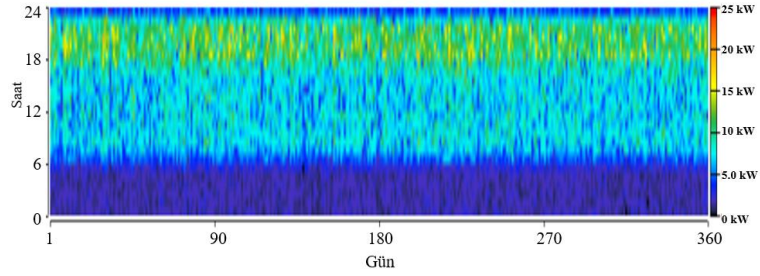
Şekil 5.3. Şanlıurfa İline ait aylık rüzgâr hızı grafiği

5.1.3. Yük Profili

Bu çalışmada, HOMER Pro yazılımı kullanılarak Gülveren İlçesi'ne ait aylık elektrik tüketim verileri temel alınmıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, sistem tasarımı ve analizlerine temel teşkil edecek şekilde ortalama günlük ve yıllık yük profilleri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te sunulmaktadır. İncelenen verilere göre, yıl boyunca elektrik tüketim değerlerinde belirgin bir mevsimsel dalgalanma görülmemekte olup yıl boyunca büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bu durum, Gülveren İlçesi'nde elektrik talebinin yıl boyunca istikrarlı bir yapıda olduğunu ve enerji arzı planlamasında bu sürekliliğin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.4. Çalışma bölgesinin günlük elektrik yük profili



Şekil 5.5. Çalışma bölgesinin yıllık elektrik yük profili

5.1.4. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon sonucunda MŞ bileşenlerinin optimum kapasite değerleri belirlenmiş olup, ilgili veriler Tablo 5.2’de sunulmuştur.

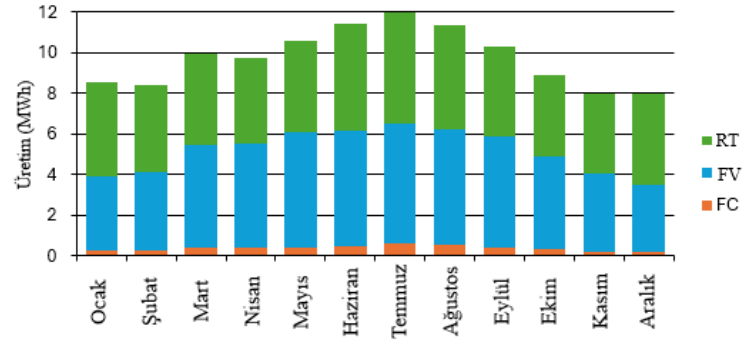
Tablo 5.2. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

Bileşenler	Kapasite	Birim
FV	40	kW
RT	10	kW
FC	4	kW
BDS	272	kWh
HT	20	kg
Konvertör	20,7	kW
Elektrolizör	20	kW

5.1.4.1. Elektrik Üretimi

Tasarlanan MŞ’nin günlük elektrik enerjisi üretim kapasitesi 291 kWh belirlenmiştir. MŞ bileşenlerine ait üretim miktarları Şekil 5.6’da sunulmuştur. Sistemin enerji üretimi ağırlıklı olarak FV ve RT tarafından gerçekleştirilmektedir. Üretilen enerjinin talep

edilenden fazla olması durumunda, fazla enerji öncelikle BDS’de depolanmaktadır. BDS tamamen şarj olduğunda ise fazla enerji elektrolizör aracılığıyla hidrojen formunda depolanmaktadır. FV ve RT bileşenlerinin üretimi yük talebini karşılamakta yetersiz kaldığında, enerji ihtiyacını dengelemek amacıyla öncelikle BDS devreye girmektedir. BDS'nin de yetersiz kaldığı durumlarda FC enerji üretimine katkı sağlamaktadır.



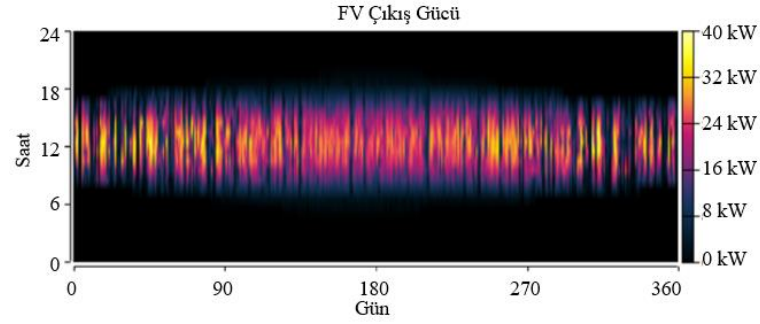
Şekil 5.6. MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları

MŞ bileşenlerinin aylık bazda elektrik üretimi incelendiğinde, güneş radyasyonundaki mevsimsel değişkenliğe bağlı olarak, belirli aylarda FV bileşenlerinden elde edilen elektrik üretiminde azalmalar meydana gelmektedir. Bu dönemlerde BDS ve FC sistemin enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir dengeleme rolü üstlenmektedir. MŞ bileşenlerine ait üretim miktarları Tablo 5.3’te sunulmuştur.

Tablo 5.3. MŞ bileşenlerinin üretim değerleri

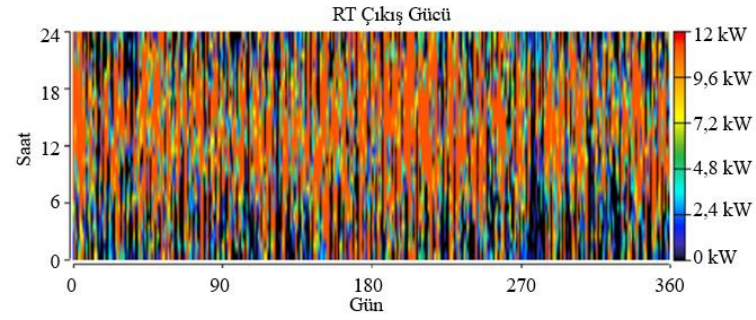
Bileşenler	Üretim Miktarı (kWh/yıl)	Oran (%)
FV	57.691	49,2
RT	54.841	46,8
FC	4.707	4,0
Toplam	117.240	100

FV sistemin nominal kapasitesi 40 kW olup, yıllık toplam enerji üretimi 57.691 kWh olarak gerçekleşmiştir. Sistem, özellikle gün ortasında nominal kapasitesine yakın bir seviyede enerji üretmektedir. Ancak, sonbahar ve kış mevsimlerinde bulutlu gün sayısının artması nedeniyle enerji üretiminde düşüşler gözlemlenmektedir. FV sistemi, günlük ortalama 158 kWh enerji üreterek toplam yıllık üretimin %49,2’sini karşılamaktadır. FV panellerine ait yıllık güç çıkış profili Şekil 5.7’de sunulmaktadır.



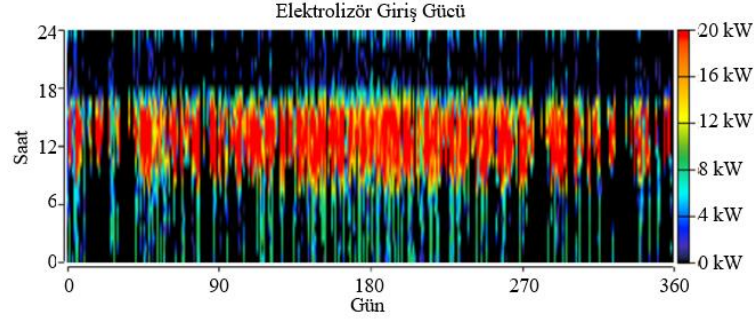
Şekil 5.7. FV panellerinin güç çıkış eğrisi

RT'nin nominal kapasitesi 10 kW, ortalama güç çıkışı 6,26 kW, yıllık toplam enerji üretimi ise 54.841 kWh olarak belirlenmiştir. Bu üretim miktarı, MŞ'nin toplam enerji üretiminin %46,8'ine karşılık gelmektedir. RT'ye ait güç çıkış eğrisi Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



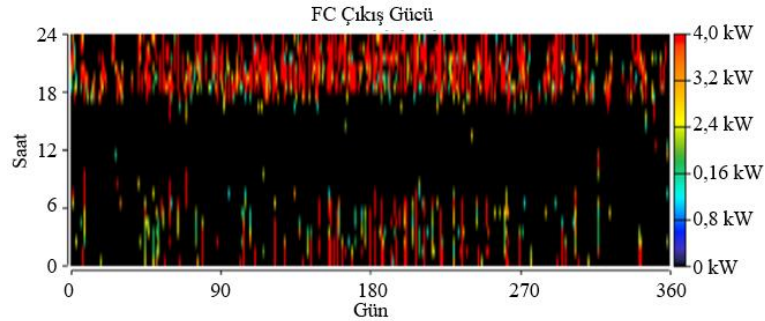
Şekil 5.8. RT'nin güç çıkış eğrisi

Elektrolizör, genellikle YEK'lerin tam kapasitede elektrik ürettiği veya elektrik talebinin düşük seviyelerde seyrettiği zaman dilimlerinde devreye girmektedir. Özellikle gün ortasında elektrolizörün tam kapasiteyle çalıştığı gözlemlenmiştir. Nominal kapasitesi 20 kW olan bu bileşen, yıllık toplamda 986 kg hidrojen üretmiştir. Elektrolizöre ait giriş gücü eğrisi Şekil 5.9'da sunulmaktadır.



Şekil 5.9. Elektrolizörün giriş gücü eğrisi

Elektrolizör tarafından üretilen hidrojen, YEK'lerin yetersiz kaldığı dönemlerde, yük talebini karşılamak amacıyla FC tarafından kullanılmaktadır. Yıllık toplam 1.348 saat çalışan FC, bu süre boyunca 4.707 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. Şekil 5.10'da verilen eğriden de görüleceği üzere, FC özellikle sabah ve akşam saatlerinde daha aktif çalışmıştır. Bu durum, söz konusu saat dilimlerinde enerji talebinin arttığını ve FC'nin bu artışı karşılamak üzere daha yüksek kapasitede devreye girdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, mevsimsel değişimlere bağlı olarak yıl içerisinde farklı üretim seviyeleri gözlemlenmiştir.

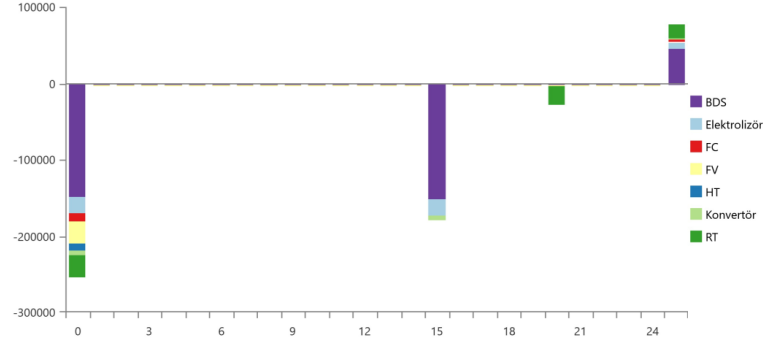


Şekil 5.10. FC'nin güç çıkış eğrisi

5.1.4.2. Ekonomik Analiz

Tasarlanan sistemin sermaye maliyeti 254.800 \$, yıllık işletme maliyeti 8.286 \$, bakım giderleri 43.875 \$, NPC değeri 361.922 \$, LCOE değeri ise 0,464 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Sistemin ilk yatırımında sermaye maliyeti belirleyici unsur olarak öne çıkarken, işletme giderleri zaman içerisinde sabit kalmaktadır. Sistemi oluşturan BDS, RT, elektrolizör ve dönüştürücü gibi bazı bileşenlerin ekonomik ömürlerinin tamamlanmasıyla birlikte, yenileme maliyetleri oluşmakta ve bu durum toplam NPC

üzerinde etkili olmaktadır. En yüksek bakım, onarım ve yenileme maliyetleri 35.163 \$ ile BDS, 5.171 \$ ile FV, 2.586 \$ ile elektrolizör, 697 \$ ile FC ve 259 \$ ile RT takip etmektedir. Ayrıca, sistemin 25. yıl sonunda sahip olduğu hurda değeri ekonomik performansa olumlu katkı sağlamaktadır. Projenin 25 yıllık ekonomik performansı, Şekil 5.11’de grafiksel olarak özetlenmiştir.



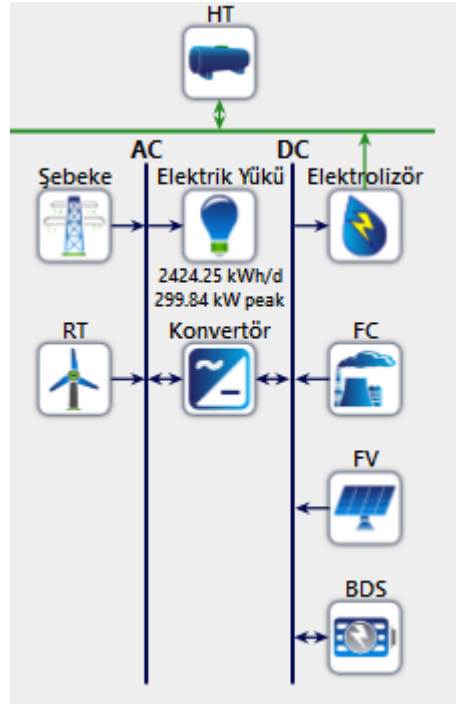
Şekil 5.11. MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti

5.2. Uygulama-2: Hastane Elektrik Yükünün Optimizasyonu ve Oksijen Üretimi İçin Hibrit MŞ Uygulaması: HOMER Pro ile Simülasyon ve Fizibilite Analizi

5.2.1. Sistem Modellenmesi

Bu çalışmada, Diyarbakır İlinde yer alan örnek bir hastanenin gerçek elektrik ve oksijen tüketim verileri dikkate alınarak bir MŞ modeli HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Batarya ve hidrojen depolama sistemleriyle entegre edilen bu modelde, elektroliz süreci sırasında açığa çıkan hidrojen, yakıt pilinde kullanılmak üzere depolanmaktadır. Aynı işlem esnasında ortaya çıkan ve genellikle atmosfere salınan oksijen ise, hastanenin oksijen ihtiyacını karşılamak amacıyla geri kazanılarak depolanmaktadır.

Şebekeye bağlı olarak tasarlanan MŞ; FV, RT, FC, BDS ve HT bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistemin şematik yapısı ise Şekil 5.12’de, bileşenlere ait birim maliyet değerleri ise Tablo 5.4’te sunulmuştur. YEK tarafından üretilen fazla enerjinin bir bölümü BDS depolanmakta, kalan kısmı ise elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretiminde kullanılmaktadır.



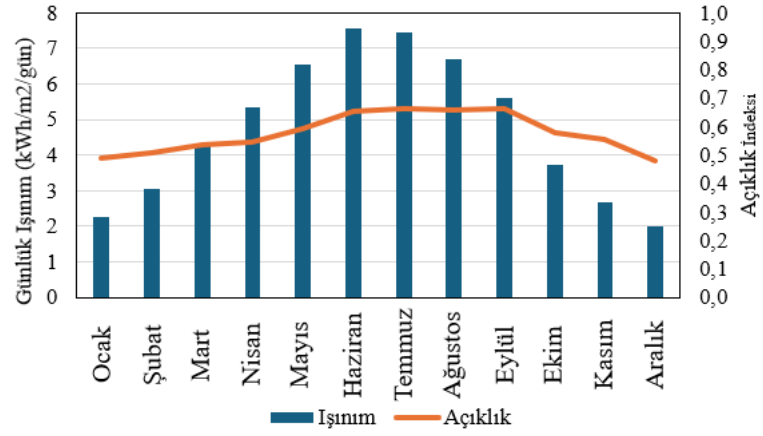
Şekil 5.12. HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli

Tablo 5.4. MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri

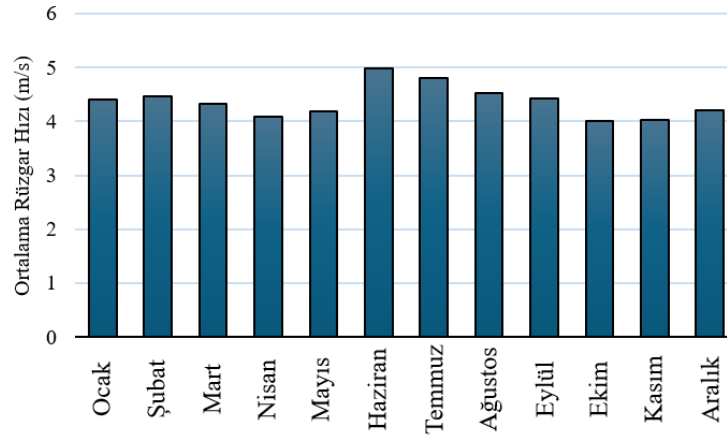
Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti	Geri dönüşüm maliyeti	Bakım ve onarım maliyeti	Çalışma ömrü
FV	700 \$/kW	700 \$/kW	10 \$/kW	25 yıl
RT	50000 \$	30000 \$	30 \$/kW	20 yıl
FC	3000 \$/kW	2500 \$/kW	0,01 \$/hr	50000 saat
BDS	300 \$/kW	300 \$/kW	10 \$/kW	10 yıl
HT	500 \$/kg	500 \$/kg	-	25 yıl
Şebeke	8,000 \$/km	-	160 \$/yr/km	25 yıl
Konvertör	300 \$/kW	300 \$/kW	-	15 yıl
Elektrolizör	1000 \$/kW	1000 \$/kW	10 \$/kW	15 yıl

5.2.2. Bölgenin Meteorolojik Verileri

Çalışmada kullanılan meteorolojik veriler HOMER Pro yazılımına entegre edilmiş NASA'nın küresel veri tabanından elde edilmiştir. Diyarbakır ilinin yıllık ortalama güneşlenme potansiyeli 4,77 kWh/m²/gün ve ortalama rüzgâr hızı 4,37 m/s'dir. Bölgenin aylık güneşlenme süresi ve bulutsuzluk ortalamaları Şekil 5.13'te, aylık rüzgâr hızı ortalamaları ise Şekil 5.14'te sunulmuştur.



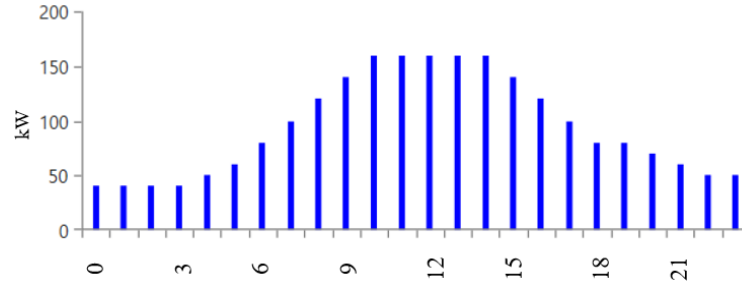
Şekil 5.13. Diyarbakır İli güneş radyasyonu ve açıklık indeksi



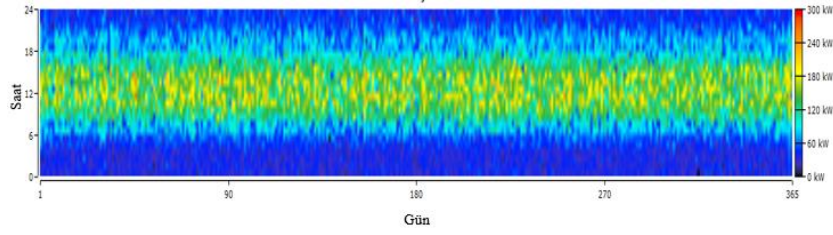
Şekil 5.14. Diyarbakır İli için aylık rüzgâr hızı grafiği

5.2.3. Yük Profili

HOMER Pro yazılımında, Bağlar İlçesi'ne ait aylık gerçek elektrik tüketim verileri kullanılmıştır. Bu verilere dayanarak oluşturulan günlük ve yıllık yük profilleri sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sunulmuştur.



Şekil 5.15. Örnek hastanenin günlük elektrik yük profili



Şekil 5.16. Örnek hastanenin yıllık elektrik yük profili

5.2.4. Simülasyon Sonuçları

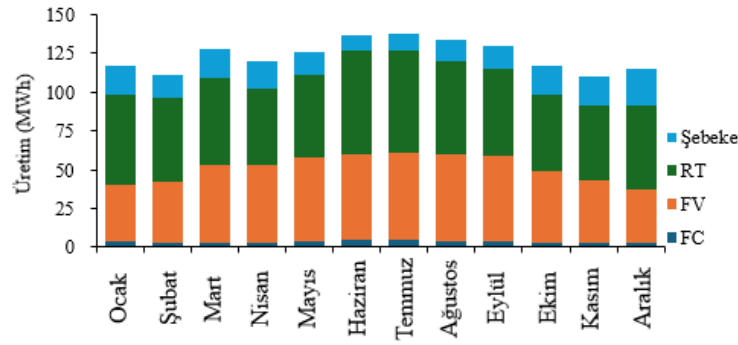
Simülasyon çalışmaları sonucunda MŞ bileşenlerinin optimum kapasite değerleri belirlenmiş olup ilgili veriler Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.5. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

Bileşenler	Kapasite	Birim
FV	350	kW
RT	200	kW
FC	50	kW
BDS	84	kWh
HT	200	Kg
Konvertör	171	kW
Elektrolizör	110	kW

Tasarlanan MŞ'nin günlük elektrik enerjisi üretim kapasitesi 3.984 kWh olarak belirlenmiştir. MŞ bileşenlerine ait aylık üretim miktarları Şekil 5.17'de sunulmuştur. Veriler incelendiğinde en fazla üretim RT tarafından gerçekleştirilirken sonrasında sırasıyla FV, şebeke ve FC gelmektedir. Üretilen enerjinin talep edilenden fazla olması durumunda fazla enerji öncelikle BDS'lerde depolanmaktadır. BDS'ler tamamen şarj olduğunda, fazla enerji elektrolizör aracılığıyla hidrojen formunda depolanmaktadır.

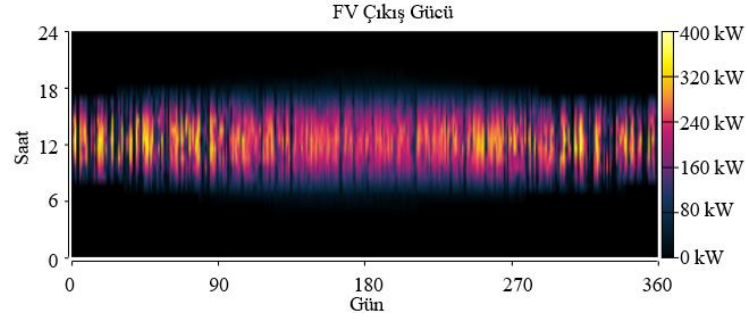
Şayet depolama işlemi tamamen gerçekleşmişse bu durumda fazla enerji şebekeye verilmektedir. MŞ bileşenlerinin yük talebini karşılamakta yetersiz kaldığı durumlarda ise öncelikle depolanan enerji kullanılmaktadır. Depolanan enerjinin yetersiz kaldığı zamanlarda ise yük talebi şebekeden karşılanmaktadır. Güneş radyasyonu ve yağış miktarındaki mevsimsel değişkenliğe bağlı olarak, belirli aylarda FV bileşeninden elde edilen elektrik üretiminde azalmalar meydana gelmektedir. Bu dönemlerde BDS ve FC sistemin enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir dengeleme rolü üstlenmektedir.



Şekil 5.17. MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları

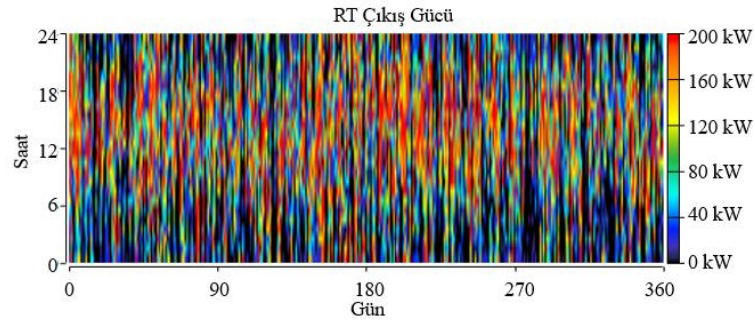
FV, RT ve FC bileşenlerinin yıllık üretim değerleri sırasıyla 574,774 kWh, 671,474 kWh ve 40,339 kWh olarak gerçekleşmiştir. Sistem şebekeden yılda 195,406 kWh enerji çekerken ürettiği 180.711 kWh fazla enerjiyi ise tekrar şebekeye geri vermiştir. Bu değerler şebekeden çekilen enerjinin tamamına yakınının tekrar şebekeye geri verildiğini göstermektedir. Yani önerilen model ihtiyacın tamamını karşılayabilme özelliğini taşımaktadır.

FV sistemin nominal kapasitesi 350 kW, yıllık toplam enerji üretimi ise 574.774 kWh olarak hesaplanmıştır. Sistem, özellikle gün ortasında nominal kapasitesine yakın bir seviyede enerji üretmektedir. Ancak, sonbahar ve kış mevsimlerinde bulutlu gün sayısının artması nedeniyle enerji üretiminde düşüşler gözlemlenmektedir. FV sistemi, günlük ortalama 1.575 kWh enerji üreterek toplam yıllık üretimin yaklaşık %38,8'ini karşılamaktadır. FV panellerine ait güç çıkış profili Şekil 5.18'de sunulmuştur.



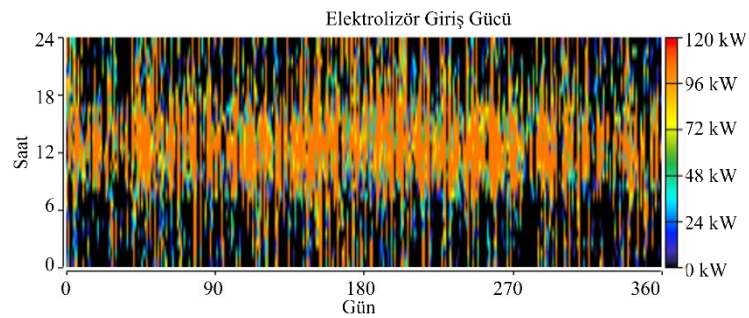
Şekil 5.18. FV panellerinin güç çıkış eğrisi

RT'lerin toplam kapasitesi 200 kW, yıllık toplam enerji üretimi ise 671.474 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer, MŞ'nin toplam enerji üretiminin yaklaşık %45,3'üne karşılık gelmektedir. RT'lere ait güç çıkış eğrisi Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19. RT'nin güç çıkış eğrisi

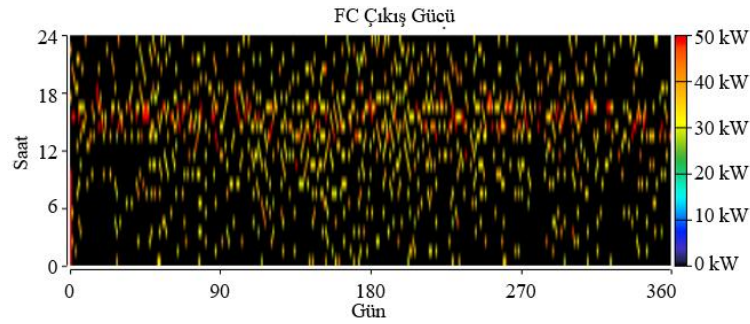
Elektrolizör, sistemdeki YEK'lerin yük talebinden daha fazla enerji ürettiği zaman dilimlerinde devreye girmektedir. Özellikle güneşlenmenin en yüksek düzeyde gerçekleştiği öğle saatlerinde, elektrolizörün tam kapasiteyle çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Şekil 5.20'de sunulan elektrolizörün güç giriş eğrisinde açıkça görülmektedir.



Şekil 5.20. Elektrolizörün giriş gücü eğrisi

Nominal gücü 110 kW olan bu bileşen, yıl boyunca toplam 8.372 kg hidrojen gazı (H_2) üretmiştir. 2 mol suyun elektrolizi sonucunda 2 mol H_2 ve 1 mol oksijen gazı (O_2) açığa çıkmaktadır. Mol kütleleri dikkate alındığında (H_2 : 2.016 g/mol, O_2 : 32 g/mol), üretilen 8.372 kg H_2 karşılığında sistemde yaklaşık olarak 66.460 kg O_2 yan ürün olarak elde edilmiştir. Önerilen MŞ'nin hastane için kurulmuş olması, açığa çıkan O_2 'nin ayrı bir önem kazanmasını sağlamaktadır. Çünkü bu O_2 , doğrudan hastanenin medikal gaz ihtiyacını karşılamak üzere değerlendirilmiştir. Bu sayede, sistem sadece sürdürülebilir enerji üretimi sağlamakla kalmayıp aynı zamanda hastanenin O_2 tedarikine katkı sağlamaktadır.

Nominal kapasitesi 50 kW olan FC bileşeni, yıllık 1.052 saatlik çalışma süresi boyunca 8.471 kg H_2 tüketerek 40.339 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. FC'nin çıkış gücü grafiği Şekil 5.21'de sunulmuştur.

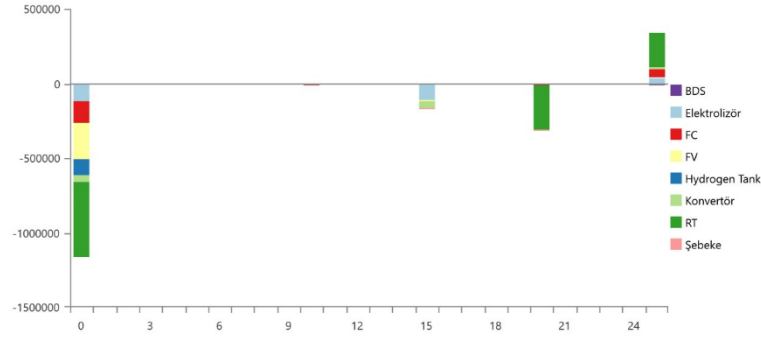


Şekil 5.21. FC'nin güç çıkış eğrisi

5.2.5. Ekonomik Analiz

Yapılan simülasyon sonucunda tasarlanan sistemin sermaye maliyeti 1.162.628 \$, yıllık işletme maliyeti 13.907 \$, bakım giderleri 18.997 \$, NPC değeri 1.342.409 \$ ve LCOE değeri ise 0,09745 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Sistemi oluşturan BDS, RT, elektrolizör ve dönüştürücü gibi bazı bileşenlerin ekonomik ömürleri, sistem ömrü olarak belirlenen 25 yıldan daha kısadır. Dolayısıyla söz konusu bileşenler için yenileme maliyetleri oluşmakta ve toplam NPC değeri artmaktadır. Bakım ve onarım maliyetleri açısından en yüksek gider, 45.246 \$ ile FV panellere aittir. Bunu sırasıyla 18.997 \$ ile elektrik şebekesi, 14.220 \$ ile elektrolizör, 6.800 \$ ile FC, 3.878 \$ ile RT ve 2.715 \$ ile BDS takip etmektedir. Ayrıca, sistemin 25. yıl sonunda sahip olduğu hurda değeri ekonomik

performansa olumlu katkı sağlamaktadır. Projenin 25 yıllık ekonomik performansı, Şekil 5.22’de grafiksel olarak özetlenmiştir.



Şekil 5.22. MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti

5.2.6. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, önerilen hibrit enerji sisteminin değişken çevresel ve ekonomik koşullar altında gösterdiği performans istikrarını değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu analiz, sistem tasarımında belirleyici rol oynayan temel parametrelerdeki olası dalgalanmaların genel sistem davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, risk faktörlerinin tanımlanmasına ve sistemin farklı senaryolar altında da sürdürülebilirliğinin sağlanmasına katkı sunar [62].

Hastane uygulaması özelinde planlanan yenilenebilir enerji tabanlı MŞ'nin ekonomik fizibilitesini etkileyen başlıca değişkenler dikkate alınarak yürütülen duyarlılık analizinde, NPC ve LCOE üzerindeki güneş ışıınımı ($\text{kWh/m}^2/\text{gün}$) ile rüzgâr hızı (m/s) değişimlerinin etkileri Tablo 5.6'da detaylı olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular, sistemin ekonomik performansının büyük ölçüde YEK'lerin sürekliliğine ve verimliliğine bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle güneş ışıınımı ve rüzgâr hızındaki değişimler, yatırımın geri dönüş süresi ve maliyet etkinliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Tablo 5.6. YEK'lerdeki dalgalanmaların sistemin ekonomik parametrelerine etkisi

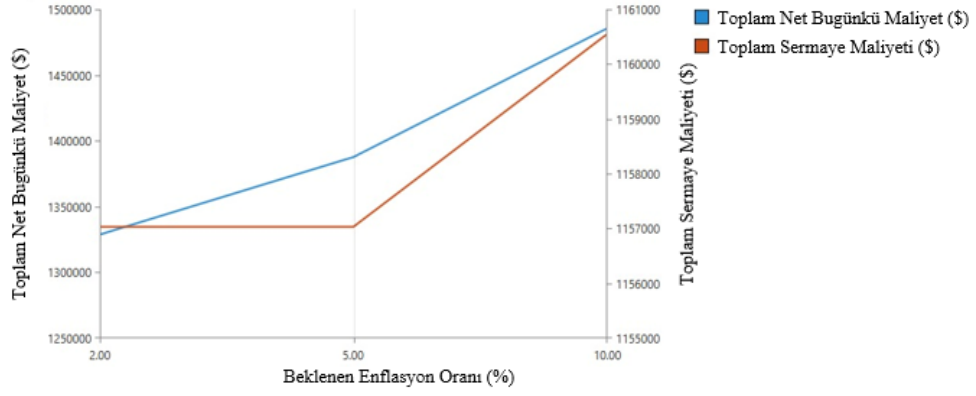
Güneş Işınımı (kWh/m ² /gün)	Rüzgâr Hızı (m/s)	FV (kWh)	RT (kWh)	Şebekeden Alınan (kWh)	Şebekeye Satılan (kWh)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)
2,010	4,000	263.203	575.472	384.659	102.284	\$1.621.615,91	0,127
2,010	4,990	263.203	819.320	303.513	289.914	\$1.255.854,52	0,082
7,570	4,990	849.273	819.320	122.356	385.832	\$1.004.589,27	0,061
7,570	4,000	849.273	575.472	165.898	284.355	\$1.190.313,67	0,078

Tablo 5.6'da verilen ve dört farklı senaryo çerçevesinde yürütülen analiz sonuçları, güneş ışınlamı ile rüzgâr hızı değişkenlerinin hibrit enerji sisteminin ekonomik performansı üzerindeki belirleyici etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. En olumsuz koşulları yansıtan düşük güneş ışınlamı (2.010 kWh/m²/gün) ve rüzgâr hızı (4.000 m/s) senaryosunda, sistemin NPC değeri en yüksek seviyeye (1.621.615,91 \$) ulaşmıştır. Bu koşullardaki LCOE değeri ise en yüksek değerine (0,127 \$/kWh) çıkmıştır. Yüksek güneş ışınlamı (7.570 kWh/m²/gün) ile yüksek rüzgâr hızının (4.990 m/s) bir arada olduğu en avantajlı senaryoda; NPC değeri 1.004.589 \$, LCOE değeri ise 0,061 \$/kWh ile en küçük değerlerine inmiştir. İki değişkenden birinin yüksek, diğerinin ise düşük olduğu ara senaryolarda, NPC ve LCOE değerleri, en yüksek ve en düşük senaryolar arasında kalan bir aralıkta gerçekleşmiştir.

Yapılan duyarlılık analizi genel olarak değerlendirildiğinde, güneş ve rüzgâr enerjisinin ekonomik göstergeler üzerinde doğrudan ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Bu nedenle bölgesel YEK'lerin doğru şekilde analizi ve sisteme entegrasyonu, projenin uzun vadeli sürdürülebilirliği ve maliyet etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca YEK'lerin üretim kapasitesindeki artış, şebekeden alınan enerji miktarını azaltırken şebekeye satılan enerji miktarını arttırmakta ve böylece sistemin finansal dengesine olumlu katkı sağlamaktadır.

Yapılan ikinci duyarlılık analizinde, yıllık enflasyon oranının sistemin toplam maliyeti üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Bu analiz, özellikle uzun vadeli enerji projelerinde, enflasyonun NPC üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

Yapılan duyarlılık analizi, enflasyon oranındaki artışların sistemin NPC değerinde anlamlı bir yükselişe neden olduğunu göstermektedir (Şekil 5.23). Bu artışın temel nedeni, enflasyonun zamanla operasyonel maliyetler üzerinde baskı oluşturmalarıdır. Özellikle bakım, onarım ve ekipman yenileme gibi sürekli harcamalar, enflasyonun etkisiyle reel anlamda daha yüksek bir maliyet yükü haline gelmektedir. Bu durum, gelecekteki nakit çıkışlarının bugünkü değerinin artmasına ve dolayısıyla toplam yatırım maliyetlerinin büyümesine neden olmaktadır. Sonuç olarak; enflasyon oranındaki değişimler, hibrit enerji sisteminin ekonomik fizibilitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametre olup, uzun vadeli planlamalarda dikkate alınması gereken temel bir risk faktörüdür.



Şekil 5.23. Farklı enflasyon oranlarının NPC üzerindeki etkisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, YEK'lere dayalı hibrit MŞ sistemlerinin, farklı kullanım senaryolarında teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliği HOMER Pro yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir. Şebekeden bağımsız kırsal bir bölge ve şebekeye bağlı bir hastane olmak üzere iki farklı uygulama analiz edilmiştir.

Kırsal alan uygulamasında, FV, RT, FC, BDS, HT ve elektrolizör bileşenlerinden oluşan bir sistem tasarlanmıştır. Sistem, Şanlıurfa ilinin kırsal bir bölgesine ait meteorolojik veriler ve elektrik tüketim profiline göre modellenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre yıllık toplam enerji üretimi 117.240 kWh olup, bunun %49,2'si FV, %46,8'i RT ve %4'ü FC tarafından sağlanmıştır. Üretilen enerjinin fazlası öncelikle bataryalarda, daha sonra hidrojen formunda depolanmaktadır. Ekonomik analizde sistemin sermaye maliyeti 254.800 \$, NPC değeri 361.922 \$ ve LCOE değeri ise 0,464 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, şebekeye uzak bölgelerde enerji arzının güvence altına alınması açısından bu tür sistemlerin önemli bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

Hastane uygulamasında ise, enerji üretiminin yanı sıra medikal oksijen ihtiyacının da karşılandığı çok amaçlı bir hibrit sistem kurgulanmıştır. Güneş ışınımının en yüksek olduğu öğle saatlerinde elektrolizör tam kapasiteyle çalışarak hidrojen ve yan ürün olarak oksijen üretmiştir. Üretilen hidrojen, yakıt hücresinde elektrik üretimi için kullanılırken; oksijen, hastanenin medikal gaz ihtiyacını karşılamak amacıyla depolanmıştır. Yıllık toplamda 8.372 kg H₂ ve yaklaşık 66.460 kg O₂ üretimi gerçekleştirilmiştir. Ekonomik olarak sistemin sermaye maliyeti 1.162.628 \$, NPC değeri 1.342.409 \$ ve LCOE değeri 0,09745 \$/kWh olarak belirlenmiştir.

Bu uygulama için gerçekleştirilen duyarlılık analizleri, güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve enflasyon oranı gibi parametrelerin sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. En olumsuz senaryoda NPC 1.621.615 \$ ve LCOE 0,127 \$/kWh'a yükselmiş; en avantajlı senaryoda ise bu değerler sırasıyla 1.004.589 \$ ve 0,061 \$/kWh'a

düşmüştür. Bu bulgular, sistemin ekonomik fizibilitesinin büyük ölçüde YEK'lerin sürekliliğine ve makroekonomik koşullara bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle FV ve RT üretimindeki artış, şebekeden enerji alımını azaltırken şebekeye satış miktarını artırarak sistemin mali dengesine olumlu katkı sağlamaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, hibrit MŞ sistemlerinin performansını artırmaya yönelik ileri düzey enerji yönetim stratejileri ve optimizasyon algoritmaları geliştirilebilir. Özellikle değişken YEK'lerin neden olduğu üretim-tüketim dengesizliklerinin en aza indirilmesi amacıyla yapay zekâ yaklaşımların sisteme entegrasyonu araştırılabilir. Ayrıca karbon emisyonu azaltımı ve çevresel etkilerin sayısal olarak analiz edilmesi, yalnızca ekonomik değil aynı zamanda ekolojik performansın da değerlendirilmesine katkı sunacaktır.

Sonuç olarak, HOMER Pro ile yapılan bu kapsamlı modelleme ve analizler hem şebekeden bağımsız kırsal alanlar hem de kritik altyapılar (hastaneler gibi) için hibrit MŞ sistemlerinin uygulanabilirliğini ve sürdürülebilirliğini ortaya koymaktadır. Özellikle hastane senaryosunda enerji ve oksijen üretiminin entegre edilmesi, sistemin çok işlevli bir yapıya kavuştuğunu ve lojistik bağımlılığı azalttığını göstermektedir. Bu tür sistemlerin yaygınlaştırılması hem enerji güvenliğini artırmakta hem de karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0f028d5f-26b1-47ca-ad2a-5ca3103d070a/Electricity2025.pdf> (Erişim tarihi: 19.06.2025)
- [2] Sayed ET., Olabi AG., Alami AH., Radwan A., Mdallal A., Rezk A., and Abdelkareem MA. Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, (2023); 16(3), 1415.
- [3] Hassan Q., Viktor P., J. Al-Musawi T., Mahmood Ali B., Algburi S., Alzoubi HM., . . . and Jaszczur M. The renewable energy role in the global energy transformations. *Renewable Energy Focus*, (2024); 48, 100545. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>
- [4] Köprü MA., Öztürk D., ve Yıldırım B. Farklı rüzgâr hızı ve güneş radyasyon oranına sahip bölgeler için mikro şebeke tasarımı ve karşılaştırmalı analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, (2024); 15(3), 607-613.
- [5] Lidula NWA., and Rajapakse AD. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2011); 15(1), 186-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>
- [6] Odetoye O., Olulope P., Olanrewaju O., Alimi A., and Igbinsosa O. Multi-year techno-economic assessment of proposed zero-emission hybrid community microgrid in nigeria using homer. *Heliyon*, (2023); 9(9).
- [7] Yadav S., Kumar P., and Kumar A. Hybrid renewable energy systems design and techno-economic analysis for isolated rural microgrid using homer. *Energy*, (2025); 327, 136442. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136442>
- [8] Benchenina Y., Zemmit A., Bouzaki MM., Loukriz A., Elsayed SK., Alzaed A., ... and Ghoneim SS. Advancing green hydrogen production in algeria with opportunities and challenges for future directions. *Scientific Reports*, (2025); 15(1), 5559.
- [9] Obileke K., and Mukumba P. Techno-economic evaluation of wind and bio-energy systems for sustainable development: A systematic review. *Energy Science & Engineering*, (2025); 13(4), 2179-2202.

- [10] Ba-swaimi S., Verayiah R., Ramachandaramurthy VK., and Alahmad AK. An integrated and optimized framework for hybrid renewable and hydrogen energy systems in the healthcare sector: Economic, technical, and environmental assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, (2025); 115, 361-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.102>
- [11] Mishref MM., and Tanaka M. Techno-economic and environmental analysis of heat sources for steam methane reforming in microgrids. *International Journal of Hydrogen Energy*, (2024); 53, 1387-1395.
- [12] Ennemiri N., Berrada A., Emrani A., Abdelmajid J., and El Mrabet R. Optimization of an off-grid pv/biogas/battery hybrid energy system for electrification: A case study in a commercial platform in morocco. *Energy Conversion and Management*: (2024); X, 21, 100508.
- [13] Manoo MU., Shaikh F., Kumar L., and Arıcı M. Comparative techno-economic analysis of various stand-alone and grid connected (solar/wind/fuel cell) renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, (2024); 52, 397-414.
- [14] Khalil H., and Abd El-Hamied R. Comparative analysis and assessment of economic profitability of a hybrid renewable energy framework via homer optimization in jordan. *International Journal of Heat & Technology*, (2024); 42(3).
- [15] Nadeem TB., Ahmed A., Saad M., and Naqvi AA. Design and optimization of off-grid solar pv and biomass-based hybrid renewable energy system (hres) for electrification of a rural community in tharparkar, pakistan. *Environment, Development and Sustainability*, (2024); 1-29.
- [16] El-Maaroufi A., Daoudi M., and Laamara RA. "Techno-economic analysis of a PV/WT/biomass off-grid hybrid power system for rural electrification in northern Morocco using HOMER," *Renewable Energy*, (2024); vol. 231, p. 120904.
- [17] Araoye TO., Ashigwuike EC., Umar SA., Eronu EM., Ozue T., Egoigwe SV., . . . and Ajah NG. Modeling and optimization of PV-diesel-biogas hybrid microgrid energy system for sustainability of electricity in rural areas. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, (2023); 14(3), 1855-1864.
- [18] Yusupov Z., and Almagrahi N. Techno-economic and environmental analysis of microgrid: A case study of karabuk university. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, (2023); 41(4).
- [19] Qiblawey Y., Alassi A., Abideen MZ., and Banales S. Techno-economic assessment of increasing the renewable energy supply in the canary islands: The case of tenerife and gran canaria. *Energy Policy*, (2022); 162, 112791.

- [20] Fikari SG., Sigarchian SG., and Chamorro HR. Modeling and simulation of an autonomous hybrid power system. Paper presented at the (2017); 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC).
- [21] Serat Z., Danishmal M., and Mohammad Mohammadi F. Optimizing hybrid pv/wind and grid systems for sustainable energy solutions at the university campus: Economic, environmental, and sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management*: (2024); X, 24, 100691. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100691>
- [22] Shezan SA., Ishraque MF., Shafiullah G., Kamwa I., Paul LC., Muyeen S., . . . and Kumar PP. Optimization and control of solar-wind islanded hybrid microgrid by using heuristic and deterministic optimization algorithms and fuzzy logic controller. *Energy Reports*, (2023); 10, 3272-3288.
- [23] Ali MF., Sheikh MRI., Al Mamun A., and Hossen MJ. Techno-economic, predictive modeling, and demand response analysis of a renewable energy-based microgrid for residential applications. *IEEE Access*, (2025); 13, 53748-53771, 53748-53771.
- [24] Asghar F., Hussain MI., Alshahrani FA., Akhtar MI., Amjad W., Shahzad M., ... and Lee GH. Technoeconomic analysis of standalone hybrid renewable energy systems for telecommunication sector under different climatic conditions in saudi arabia. *Energy Reports*, (2024); 11, 4067-4084. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.055>
- [25] Chowdhury T., Chowdhury H., Hasan S., Rahman MS., Bhuiya MMK., and Chowdhury P. Design of a stand-alone energy hybrid system for a makeshift health care center: A case study. *Journal of Building Engineering*, (2021); 40, 102346. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102346>
- [26] Singh S., Kanwar N., Zindani D., and Jadoun VK. Decision making approach for assessing the suitable hybrid renewable energy based microgrid system for rural electrification in india. *Materials Today: Proceedings*, (2022); 51, 21-25. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.186>
- [27] Rezk H., and Dousoky GM. Technical and economic analysis of different configurations of stand-alone hybrid renewable power systems—a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2016); 62, 941-953.
- [28] Shezan SA., Julai S., Kibria M., Ullah K., Saidur R., Chong W., and Akikur R. Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas. *Journal of Cleaner Production*, (2016); 125, 121-132.
- [29] Türkay BE., and Telli AY. Economic analysis of standalone and grid connected hybrid energy systems. *Renewable Energy*, (2011); 36(7), 1931-1943.

[30] Kocaman B. Mikro şebekeler için örnek bir enerji yönetimi uygulaması. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, (2014); 3(1), 35-52.

[31] Sawle Y., Gupta S., and Bohre AK. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2018); 81, 2217-2235.

[32] <http://www.eud.org.tr/TR/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFFA79D6> (Erişim tarihi: 05.06.2025)

[33] Köprü MA., Öztürk D., and Yıldırım B. A dispatch strategy for the analysis of the technical, economic, and environmental performance of a hybrid renewable energy system. Sustainability, (2024); 16(17), 7490.

[34] <https://turkish.biogas-projects.com/sale-15398485-100kw-biomass-engine-driven-generators-biogas-electric-generator-for-home.html> (Erişim tarihi: 05.06.2025)

[35] Dallan BDS., Poço D., Ferreira MTO., and Bento MFDSS. Desenvolvimento de um sistema de controle de carga para um banco de baterias supridas por um gerador fotovoltaico. Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. (2017).

[36] Garimella N., and Nair NKC. Assessment of battery energy storage systems for small-scale renewable energy integration. in TENCON 2009-2009 IEEE region 10 conference, 2009; IEEE, pp. 1-6.

[37] <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunumuzun-elektrikli-araclarinin-en-onemli-sorunlari-menzil-ve-sarj-suresi> (Erişim tarihi: 05.06.2025)

[38] Alkul O., ve Demirbaş Ş. Güç elektroniği transformatörlerinin incelenmesi ve bir DA/DA dönüştürücü uygulaması. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, (2019) ; 7(2), 450-471.

[39] Karagül AB., Başol D., ve Yücedağ İ. Güç elektroniği dönüştürücü modelleri eğitim modülü. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, (2014); 2(1), 79-87.

[40] Akhtari MR., and Baneshi M. Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co-supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer. Energy Conversion and Management, (2019); 188, 131-141.

[41] Karaca ÜB., ve Uçar S. Konut çatı ve cephelerinde farklı fotovoltaik sistem uygulamalarının değerlendirilmesi. Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, (2018); 19(2), 65-76.

- [42] Brodsky MH., and Scott BA. Chemistry and physics of silicon-based amorphous semiconductors (No. SERI/STR-211-2450). International Business Machines Corp., Yorktown Heights, NY (USA). Thomas J. Watson Research Center. (1984).
- [43] Özcan Ö., ve İzgi E. Şebekeye bağlı fotovoltaik çatı sisteminin karşılaştırmalı performans analizi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, (2020); 23(3), 127-140.
- [44] Mills D. Advances in solar thermal electricity technology. Solar energy, (2004); 76(1-3), 19-31.
- [45] Köprü MA. Fotovoltaik sistemlerde kablo kayıplarının incelenmesi. Yüksek Lisans, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (2016).
- [46] Yavuz A., Başol D., Ertay M., and Yücedağ İ. Fotovoltaik eşdeğer devrelerinin analizi için bir eğitim aracı. ISITES, (2013); 7-9.
- [47] Beşer BH., Yeşil dönüşümde hidrojen etkisi: Türkiye’de son gelişmelere ilişkin bir inceleme. Bozok İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, (2024); 1(1), 84-96.
- [48] Lymberopoulos N., and Zoulias E. Hydrogen-based autonomous power systems: Techno-economic analysis of the integration of hydrogen in autonomous power systems: Springer Science and Business Media. (2008).
- [49] KÖPRÜ MA. Yenilenebilir enerji kaynaklı mikro şebekelerde enerji yönetim modelinin geliştirilmesi. Doktora, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (2024).
- [50] Momirlan M., and Veziroglu TN. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. International journal of hydrogen energy, (2005); 30(7), 795-802.
- [51] Genç Ö., ve Kallioğlu MA. Proton elektrolit membranli (PEM) elektrolizörün sayısal incelenmesi ve deneysel doğrulanması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, (2018); 7(1), 370-380.
- [52] Shiva Kumar S., and Himabindu V. Hydrogen production by pem water electrolysis – a review. Materials Science for Energy Technologies, (2019); 2(3), 442-454. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- [53] http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx (Erişim tarihi: 25.05.2025)

- [54] Bayındır H., Deviren H., ve Akbalık F. Şırnak ili ve çevresi hidro enerji potansiyeli. (2019); (pp. 111-132). Konya, Eğitim yayın evi.
- [55] Üstün E. Arşimet vidalı hidroelektrik santralin teorik ve deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. (2018).
- [56] <https://muhendis.web.tr/hidroelektrik-santrali-calisma-prensibi/> (Erişim tarihi: 30.06.2025)
- [57] Bedadi LA., and GebreMichael MG. Design and optimization of off-grid hybrid renewable power plant with storage system for rural area in rwanda. IET renewable power generation, (2021); 15(15), 3715-3731.
- [58] Rezzouk H., and Mellit A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic–diesel–battery hybrid energy system in the north of algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2015); 43, 1134-1150.
- [59] Liu G., Li M., Zhou B., Chen Y., and Liao S. General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources. Energy conversion and management, (2018); 156, 416-426.
- [60] Mudgal V., Reddy K., and Mallick T. Techno-economic analysis of standalone solar photovoltaic-wind-biogas hybrid renewable energy system for community energy requirement. Future Cities and Environment, (2019); 5, 11-11.
- [61] Mbasso WF., Naoussi SRD., Molu RJJ., Saatong KT., and Kamel S. Technical assessment of a stand-alone hybrid renewable system for energy and oxygen optimal production for fishes farming in a residential building using HOMER pro. Cleaner Engineering and Technology, (2023); 17, 100688.
- [62] <https://homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf> (Erişim tarihi: 25.05.2025)
- [63] Köprü MA., Öztürk D., and Yıldırım B. Techno-economic analysis of a hybrid system for rural areas: Electricity and heat generation with hydrogen and battery storage. International Journal of Hydrogen Energy, (2025); 143, 882-897. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.394>