

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLI MİKRO ŞEBEKELERDE
ENERJİ YÖNETİM MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ
MEHMET ALİ KÖPRÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Burak YILDIRIM

BİNGÖL-2024

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLI MİKRO ŞEBEKELERDE ENERJİ
YÖNETİM MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK danışmanlığında, Mehmet Ali KÖPRÜ tarafından hazırlanan bu çalışma 30/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Mehmet CEBECİ	İmza :
Üye	: Doç. Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR	İmza :
Üye	: Doç. Dr. Ahmet GÜNER	İmza :
Üye	: Doç. Dr. Adem YAR	İmza :
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK	İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerini paylaşarak yol gösteren, her aşamada bana destek olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK'e ve ikinci danışman hocam Doç. Dr. Burak YILDIRIM'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez sürecimde akademik bilgi birikimlerini ve rehberliklerini esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet GÜNER ve Doç. Dr. Adem YAR'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması boyunca benim için her zaman sabır ve fedakârlık gösteren, desteğini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Aynı zamanda bu zorlu süreçte manevi varlıklarıyla bana güç veren değerli arkadaşlarıma da yürekten teşekkür ederim.

Mehmet Ali KÖPRÜ

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE MİKRO ŞEBEKELER.....	15
3.1. Yenilebilir Enerji Kaynakları	15
3.1.1. Güneş Enerjisi.....	17
3.1.2. Rüzgâr Enerjisi.....	19
3.1.3. Hidrolik Enerji.....	20
3.1.4. Biyokütle Enerjisi.....	21
3.1.5. Jeotermal Enerji.....	22
3.2. Mikro Şebekeler ve Bileşenleri.....	23
3.2.1. FV Sistemler.....	24
3.2.2. Rüzgâr Türbinleri.....	26
3.2.3. Hidrolik Türbinler.....	28
3.2.4. Biyogaz Generatörleri.....	30
3.2.5. Yakıt Hücreleri.....	31
3.2.6. Elektrolizör.....	32
3.2.7. Bataryalar	33
3.2.8. Hidrojen Tankı.....	34
3.2.9. Dönüştürücüler.....	34
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
4.1. HOMER Pro Yazılımı.....	35

4.1.1. Mikro Şebekelerin HOMER Pro Yazılımı ile Tasarımı	36
4.1.2. Proje Tanımlaması.....	36
4.1.3. Kaynak Verilerinin Girişi	37
4.1.4. Bileşenlerin Seçimi ve Ekonomik Parametrelerin Tanımlanması	37
4.1.5. Sistem Simülasyonu ve Optimizasyonu	38
4.1.6. Sonuçların Analizi.....	39
4.2. Mikro Şebekelerin HOMER Pro Yazılımı ile Tasarımı.....	42
4.2.1. Sistem Sınırlamaları.....	42
4.2.2. Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi	42
4.2.3. Hidrolik Sistemlerin Modellenmesi	44
4.2.4. Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi	46
4.2.5. Biyogaz Generatörlerinin Modellenmesi.....	49
4.2.6. Batarya Depolama Sistemlerin Modellenmesi	51
4.2.7. Elektrolizörün Modellenmesi.....	52
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
5.1. Uygulama-1: Hidrojen Depolamalı CHP Sisteminin Tasarımı ve Tekno- Ekonomik Analizi.....	54
5.1.1. Sistemin Modellenmesi.....	54
5.1.2. Bölgenin Meteorolojik Verileri ve Biyokütle Kaynakları.....	56
5.1.3. Yük Profili.....	57
5.1.4. Simülasyon Sonuçları.....	57
5.1.4.1. Elektrik Üretimi.....	59
5.1.4.2. Termal Enerji Üretimi.....	62
5.1.4.3. Ekonomik Analiz.....	63
5.2. Uygulama-2: Farklı Rüzgâr Hızı ve Güneş Radyasyon Oranına Sahip Bölgeler İçin Mikro Şebeke Tasarımı ve Karşılaştırmalı Analizi.....	64
5.2.1. Sistemin Modellenmesi.....	64
5.2.2. Bölgenin Meteorolojik Verileri	65
5.2.3. Yük Profili.....	68
5.2.4. Simülasyon Sonuçları.....	69
5.2.4.1. Elektrik Üretimi.....	70
5.3. Uygulama-3: Kırsal Alanlar İçin Hibrit Bir Sistemin Tekno-Ekonomik Analizi: Hidrojen ve Pil Depolama ile Elektrik ve Isı Üretimi.....	75

5.3.1. Sistemin Modellenmesi.....	75
5.3.2. Yük Profili.....	76
5.3.3. Bölgenin Meteorolojik Verileri.....	77
5.3.4. Biyokütle Kaynakları.....	78
5.3.5. Simülasyon Sonuçları.....	79
5.3.5.1. Elektrik Üretimi.....	80
5.3.5.2 Termal Enerji Üretimi.....	84
5.3.5.3. Ekonomik Analiz.....	85
5.3.5.4. Duyarlılık Analizi.....	87
5.4. Uygulama-4: Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Teknik, Ekonomik ve Çevresel Performansının Analizi için Bir Dağıtım Stratejisi.....	88
5.4.1. Sistemin Modellenmesi.....	88
5.4.2. Sevk Stratejisi.....	89
5.4.3. Simülasyon Sonuçları.....	91
5.4.3.1. Elektriksel Analiz.....	92
5.4.3.2. Ekonomik Analiz.....	97
5.4.3.3. Çevresel Analiz.....	98
5.4.3.4. Duyarlılık Analizi.....	99
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKLAR.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HOMER	: Hybrid optimization of multiple electric renewables
YEK	: Yenilenebilir enerji kaynakları
MŞ	: Mikro şebeke
FV	: Fotovoltaik
RT	: Rüzgâr türbini
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
DG	: Dizel generatör
BDS	: Batarya depolama sistemleri
FC	: Fuel cell
CHP	: Combined heat and power
LF	: Yük takibi
ML	: Matlab link
CC	: Döngü şarjı
GO	: Generatör siparişi
LCOE	: Levelized cost of electricity
NPC	: Net Present Cost
I_{sc}	: Kısa devre akımı
K_i	: Güneş pilinin kısa devre akımı
λ	: Güneş ışınlıması
T	: Sıcaklık
q	: Elektron yükü
k	: Boltzman sabiti
E _g	: Yarı iletken bant aralığı enerjisi
ρ	: Hava yoğunluğu
C _p	: Güç katsayısı
P	: Güç
CO ₂	: Karbondioksit
kWh	: Kilowatt saat

Q	: Su debisi
A	: Alan
η	: Verim
Δt	: Zaman aralığı
Q_1	: Bataryalardaki enerji miktarı
c	: Depolama kapasitesi oranı
Y_{FV}	: FV test koşulları altındaki güç çıkışı
$\overline{G_T}$	: FV dizisine düşen güneş ışıınımı miktarı
f_{FV}	: FV değer kaybı faktörü
$\overline{G_{T,STC}}$	: Standart test koşullarında gelen radyasyon miktarı
T_c	: FV hücre sıcaklığı
U_{hub}	: Göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı
U_{anem}	: Anemometre yüksekliğindeki rüzgâr hızı
z_{hub}	: Rüzgâr türbininin göbek yüksekliği
z_{anem}	: Anemometre yüksekliği
Z_0	: Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu
C_{VBG}	: Biyogaz kalorifik değeri
η_{BG}	: Biyogaz generatör verimi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı	16
Şekil 3.2.	Günlük elektrik üretim kaynaklarına göre dağılımı	17
Şekil 3.3.	Güneş enerjisi potansiyel haritası	18
Şekil 3.4.	Aylık ortalama global radyasyon dağılımı	18
Şekil 3.5.	Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi.....	19
Şekil 3.6.	Türkiye rüzgâr potansiyeli haritası.....	20
Şekil 3.7.	Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi	20
Şekil 3.8.	Türkiye'nin hidroelektrik enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi.....	21
Şekil 3.9.	Türkiye'nin biyokütle enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi	22
Şekil 3.10.	Türkiye'nin jeotermal enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi	23
Şekil 3.11.	MŞ'lerin gelen yapısı	24
Şekil 3.12.	Güneş pili, modül ve diziye ait görünüm	25
Şekil 3.13.	Eşdeğer hücre modeli.....	25
Şekil 3.14.	RT'nin yapısı	27
Şekil 3.15.	AST'nin genel yapısı	29
Şekil 3.16.	BGG'nin yapısı.....	30
Şekil 3.17.	FC'nin şematik diyagramı.....	31
Şekil 3.18.	PEM elektrolizörün çalışma prensibi.....	32
Şekil 4.1.	HOMER Pro yazılımının giriş ekranı.....	36
Şekil 4.2.	Yük ayarları giriş ekranı.....	36
Şekil 4.3.	Kaynak veri giriş ekranı.....	37
Şekil 4.4.	Bileşenlerin seçimi ve ekonomik parametrelerin giriş ekranı.....	38
Şekil 4.5.	Stratejilere ait giriş ekranı.....	39

Şekil 4.6.	Optimizasyon sonuçları ekranı.....	39
Şekil 4.7.	HOMER Pro yazılımı için optimizasyon akış şeması.....	41
Şekil 4.8.	FV panelin teknik ekonomik değerleri için giriş ekranı.....	43
Şekil 4.9.	Aylık ortalama güneş radyasyonu ve netlik indeksi giriş ekranı.....	43
Şekil 4.10.	Aylık ortalama su akış hızı giriş ekranı.....	45
Şekil 4.11.	Hidroelektrik türbininin mali ve teknik özellikleri giriş ekran.....	45
Şekil 4.12.	Aylık ortalama rüzgâr hızı giriş ekranı.....	46
Şekil 4.13.	RT güç çıkış eğrisi ekranı.....	47
Şekil 4.14.	RT'nin seçimi ve maliyet parametreleri giriş ekranı.....	47
Şekil 4.15.	Türbin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı güç eğrisi.....	48
Şekil 4.16.	Biyokütle giriş ekranı.....	49
Şekil 4.17.	BGG'lerin teknik özellikleri ve maliyet değerleri giriş ekranı.....	50
Şekil 4.18.	Batarya seçimi giriş ekranı.....	51
Şekil 4.19.	Elektrolizör seçimi, teknik ve ekonomik parametrelerin giriş ekranı.....	52
Şekil 5.1.	Uygulama-1 için HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli.....	56
Şekil 5.2.	Uygulama-1 için meteorolojik veriler ve biyokütle kaynakları a) Ortalama aylık güneş ışınlımı b) Ortalama aylık rüzgâr hızı c) Ortalama aylık biyokütle miktarı.....	57
Şekil 5.3.	Uygulama-1 için elektrik yük profili.....	58
Şekil 5.4.	Uygulama-1 için termal yük profili.....	58
Şekil 5.5.	Uygulama-1 için MŞ kaynaklarının aylık üretim miktarı.....	59
Şekil 5.6.	Uygulama-1'deki FV panellerin güç çıkış eğrisi.....	60
Şekil 5.7.	Uygulama-1'deki RT'nin güç çıkış eğrisi.....	61
Şekil 5.8.	Uygulama-1'deki BGG'nin güç çıkış eğrisi.....	61
Şekil 5.9.	Uygulama-1'deki elektrolizörün giriş gücü eğrisi.....	62
Şekil 5.10.	Uygulama-1'deki FC'nin güç çıkış eğrisi.....	62
Şekil 5.11.	Uygulama-1 için termal enerji kaynaklarının dağılımı.....	63
Şekil 5.12.	Uygulama-1'deki MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti.....	64
Şekil 5.13.	Uygulama-2 için HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli.....	64
Şekil 5.14.	Çanakkale ili için a) Aylık ortalama rüzgâr hızı b) Güneş radyasyonu ve netlik indeks.....	66
Şekil 5.15.	Diyarbakır ili için a) Aylık ortalama rüzgâr hızı b) Güneş radyasyonu ve netlik indeksi.....	67

Şekil 5.16.	Rize ili için a) Aylık ortalama rüzgâr hızı b) Güneş radyasyonu ve netlik indeksi.....	68
Şekil 5.17.	Uygulama-2 için örnek yük profili.....	69
Şekil 5.18.	Çanakkale için MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretim değerleri a) 6 kW'lık RT için b) 10 kW'lık RT için	71
Şekil 5.19.	Diyarbakır için MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretim değerleri a) 6 kW'lık RT için b) 10 kW'lık RT için.....	72
Şekil 5.20.	Rize için MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretim değerleri a) 6 kW'lık RT için b) 10 kW'lık RT için.....	74
Şekil 5.21.	Uygulama-3 için HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli.....	75
Şekil 5.22.	Uygulama-3 için ortalama aylık elektrik yük profili.....	77
Şekil 5.23.	Uygulama-3 için saatlik elektrik yük profili.....	77
Şekil 5.24.	Uygulama-3 için aylık ortalama güneş radyasyonu ve netlik indeksi değişimi.....	78
Şekil 5.25.	Uygulama-3 için aylık ortalama rüzgâr hızı grafiği.....	78
Şekil 5.26.	Uygulama-3 için bölgenin biyokütle potansiyeli.....	79
Şekil 5.27.	Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları.....	80
Şekil 5.28.	Uygulama-3 için AST'nin güç çıkış eğrisi.....	81
Şekil 5.29.	Uygulama-3 için BGG'nin güç çıkış eğrisi.....	82
Şekil 5.30.	Uygulama-3 için FV panellerinin güç çıkış eğrisi.....	82
Şekil 5.31.	Uygulama-3 için RT'nin güç çıkış eğrisi.....	83
Şekil 5.32.	Uygulama-3 için elektrolizörün güç giriş eğrisi.....	83
Şekil 5.33.	Uygulama-3 için FC'nin güç çıkış eğrisi.....	84
Şekil 5.34.	Uygulama-3 için BDS'nin aylara göre şarj ve deşarj durumu.....	84
Şekil 5.35.	Uygulama-3 için termal enerji kaynaklarının dağılımı.....	85
Şekil 5.36.	Uygulama-3 için MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti.....	86
Şekil 5.37.	Uygulama-3 için farklı enflasyon oranlarının NPC üzerindeki etkisi....	88
Şekil 5.38.	Uygulama-4 için tasarlanan MŞ modeli.....	89
Şekil 5.39.	Uygulama-4 için önerilen sevk stratejisi.....	91
Şekil 5.40.	LF stratejisine göre MŞ bileşenlerinin üretim miktarı.....	92
Şekil 5.41.	CC stratejisine göre MŞ bileşenlerinin üretim miktarı.....	92
Şekil 5.42.	ML stratejisine göre MŞ bileşenlerinin üretim miktarı.....	93
Şekil 5.43.	Dağıtım stratejilerine ait BDS giriş-çıkış enerjileri.....	94

Şekil 5.44.	Uygulama-4 için LF stratejisine ait BGG güç çıkış eğrisi.....	95
Şekil 5.45.	Uygulama-4 için CC stratejisine ait BGG güç çıkış eğrisi.....	95
Şekil 5.46.	Uygulama-4 için ML stratejisine ait BGG güç çıkış eğrisi.....	95
Şekil 5.47.	LF stratejisine ait elektrik üretimi ve tüketiminin günlük zaman serisi..	96
Şekil 5.48.	CC stratejisine ait elektrik üretimi ve tüketiminin günlük zaman serisi..	96
Şekil 5.49.	ML stratejisine ait elektrik üretimi ve tüketiminin günlük zaman serisi.	97
Şekil 5.50	Farklı enflasyon oranlarının NPC üzerindeki etkisi.....	100

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	MŞ'ler için literatürde yer alan bazı çalışmalar.....	14
Tablo 5.1.	Uygulama-1 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri	55
Tablo 5.2.	Uygulama-1 için MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri.....	59
Tablo 5.3.	Uygulama-2 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri.....	65
Tablo 5.4.	6 kW'lık RT için şehirlere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri	69
Tablo 5.5.	10 kW'lık RT için şehirlere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri .	70
Tablo 5.6.	Farklı RT seçimi için Çanakkale ilindeki MŞ'nin maliyet değerleri	70
Tablo 5.7.	Farklı RT seçimi için Diyarbakır ilindeki MŞ'nin maliyet değerleri	72
Tablo 5.8.	Farklı RT seçimi için Rize ilindeki MŞ'nin maliyet değerleri	73
Tablo 5.9.	Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri.....	76
Tablo 5.10.	Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri	79
Tablo 5.11.	Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin üretim değerleri.....	81
Tablo 5.12.	Her iki modelin ekonomik değerleri	86
Tablo 5.13.	CHP tabanlı MŞ'lerin LCOE değerlerinin karşılaştırması	87
Tablo 5.14.	Uygulama-3 için YEK'lerdeki dalgalanmaların sistemin ekonomik parametrelerine etkisi	87
Tablo 5.15.	Uygulama-4 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri	89
Tablo 5.16.	Uygulama-4 için stratejilere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri ..	92
Tablo 5.17.	LF, CC ve ML'nin ayrıntılı maliyet analizi	98
Tablo 5.18.	Uygulama-4 için YEK'lerdeki dalgalanmaların sistemin ekonomik parametrelerine etkisi	99

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLI MİKRO ŞEBEKELERDE ENERJİ YÖNETİM MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Endüstrideki ve teknolojiadaki ilerlemelere bağlı olarak artan yaşam konforu ve kentleşme beraberinde enerji tüketimini yükseltmektedir. Günümüzde elektrik enerjisinin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Ancak fosil yakıtların hem sınırlı kaynaklara sahip olması hem de çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı ülkeler alternatif kaynak arayışına yönelmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), temiz ve sınırsız kaynaklar olmaları nedeniyle fosil yakıtlara iyi bir alternatif olabilir. Ancak YEK'lerin doğası gereği kesintili ve öngörülemez olmaları nedeniyle birden çok YEK'lerin bir araya getirildiği mikro şebekeler (MŞ) daha uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı amaçlara yönelik MŞ sistemleri HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) programı kullanılarak tasarlanmış ve performansları analiz edilmiştir.

İlk uygulamada, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu açısından farklılık gösteren Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illerinde, aynı yükü besleyecek şekilde fotovoltaiik (FV) paneller, rüzgâr türbini (RT), dizel generatör (DG) ve batarya depolama sisteminden (BDS) oluşan hibrit bir mikro şebeke tasarımı gerçekleştirilmiştir. Rüzgar potansiyelinin yüksek olması nedeniyle, Çanakkale ili için tasarlanan mikro şebekede en düşük net bugünkü maliyet (Net Present Cost - NPC) ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Levelized Cost of Electricity - LCOE) değerleri elde edilmiştir. YEK'lerin üretim payı ise %94.8 olarak gerçekleşmiştir. İkinci uygulamada, hayvancılıkla uğraşan kırsal hanelerin enerji ihtiyacını karşılamak için FV paneller, RT, biyogaz generatörü (BGG), yakıt hücreleri (fuel cell – FC), boyler ve hidrojen tanklarını (HT) içeren bir sistem analiz edilmiştir. Hayvansal atıklar değerlendirilerek yeşil hidrojen üretilmiş, üretilen hidrojen elektrik üretiminde kullanılmış ve ortaya çıkan ısı ile hanenin termal ihtiyacı karşılanmıştır. Üçüncü uygulamada, ikinci uygulamadan farklı olarak bir hane yerine bir topluluğun elektrik ve ısı ihtiyacını karşılayan bir sistem tasarlanmıştır. Bingöl ili Doğanevler köyü için tasarlanan MŞ'de diğer kaynaklara ilave olarak Arşimet burgusu (Archimedes screw turbine- AST) kullanılmıştır. Dördüncü uygulamada ise bir hibrit MŞ sistemi, HOMER yazılımı ve MATLAB bağlantısı (ML) kullanılarak optimize edilmiştir. ML stratejisi ile elde edilen veriler, HOMER'ın döngü şarjı (CC) ve yük izleme (LF) optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve üstünlüğü ortaya konulmuştur.

Tüm bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar, MŞ sistemlerinin enerji arz güvenliğini sağlama, çevresel etkileri azaltma ve maliyet etkinliği açısından üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikro Şebekeler, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Sürdürülebilir Çevre, HOMER Pro, NPC, LCOE.

DEVELOPMENT OF AN ENERGY MANAGEMENT MODEL FOR RENEWABLE ENERGY-BASED MICROGRIDS

ABSTRACT

Increasing living comfort and urbanization due to advances in industry and technology increase energy consumption. Currently, most of the electrical energy is generated from fossil fuels. However, due to the limited resources of fossil fuels and their negative effects on the environment and human health, countries have been seeking alternative sources. Renewable Energy Sources (RES) can be a good alternative to fossil fuels, as they are clean and virtually unlimited. Nevertheless, due to the intermittent and unpredictable nature of RESs, microgrids (MGs), where multiple RESs are combined, are a more suitable solution. In this thesis, MG systems for different purposes are designed and their performances are analyzed using HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) software.

In the first application, a hybrid microgrid consisting of photovoltaic (PV) panels, wind turbine (WT), diesel generator (DG), and battery storage system (BSS) was designed to supply the same load in Çanakkale, Diyarbakır and Rize provinces, which differ in terms of wind speed and solar radiation. Due to its high wind potential, the microgrid designed for Çanakkale achieved the lowest Net Present Cost (NPC) and Levelized Cost of Electricity (LCOE) values. The share of RES in the total energy production was 94.8%. In the second application, a system consisting of PV panels, WT, a biogas generator (BGG), fuel cells (FC), a boiler, and hydrogen tanks (HT) was analyzed to meet the energy needs of rural households engaged in livestock farming. Animal waste was used to produce green hydrogen, which was then utilized for electricity generation and the resulting heat was used to meet the thermal needs of the household. In the third application, unlike the second application, the system was designed to meet the electricity and heat demands of a community instead of a single household. In addition to other sources, Archimedes screw turbine (AST) was used in the designed MG for Doğanevler village in Bingöl province. In the fourth application, a hybrid MG system was optimized using a combination of HOMER software and MATLAB link (ML). The results obtained with the ML strategy were compared with HOMER's cycle charging (CC) and load following (LF) optimization results and its superiority is demonstrated.

The results obtained from all these applications highlight the advantages of MG systems in ensuring energy supply security, reducing environmental impacts, and enhancing cost efficiency.

Keywords: Microgrids, Renewable Energy Sources, Environment, Biogas, Hydrogen, HOMER Pro, MATLAB, NPC, LCOE.

1. GİRİŞ

Ülkeler refah seviyelerini geliştirmek için sanayileşmeye büyük önem vermektedirler. Sanayinin gelişmesi teknolojinin ilerlemesini beraberinde getirmiştir. İlerleyen teknoloji insanların yaşam biçimlerinin değişmesine ve enerji talebinin artmasına neden olmuştur. Uluslararası Enerji Ajansının (International Energy Agency-IEA) 2023 yılı raporuna göre, enerji talebinin 2030 yılına kadar %0,7 oranında artacağı belirtilmiş olup bu değer son on yılın yaklaşık yarısıdır. Yine aynı rapora göre dünyada elektrik enerjisinin yaklaşık %80'i fosil yakıtlarla üretilmektedir [1]. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi birincil enerji kaynağı olan fosil yakıtlar tükenbilir kaynaklardır. Ayrıca fosil yakıtların kullanımı çevre ve insan sağlığı üzerine birçok olumsuz etkilere yol açmaktadır [2]. Ülkelerin enerji talebini karşılayabilmeleri için fosil yakıtlara bağımlı olmaları hem enerji güvenliği hem de çevresel sorunlar açısından ciddi zorluklara neden olmaktadır. Artan enerji talebinin karşılanması ve geleneksel yakıtların çevreye verdiği zararları en aza indirmek için YEK'lere olan talep artmıştır. Ayrıca savaşlar, doğal afetler, son dönemde uluslararası ilişkilerde yaşanan enerji krizleri ve koronavirüs salgınına takip eden ekonomik aksaklıklar, fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılmasını gerektiren tek güçlü nedenin küresel ısınma ve iklim değişikliği olmadığını göstermiştir [3]. Ülkeler enerjide dışa bağımlılığı azaltmak ve enerji talebini karşılamak için temiz ve sürdürülebilir kaynaklar olan YEK'lere yatırımları arttırmıştır. YEK'ler, güneş, rüzgâr ve biyokütle gibi doğada kolayca ulaşılabilen, sınırsız, doğal ve çevre dostu enerji kaynaklarıdır. Sürdürülebilir kalkınma için önem arz eden bu kaynaklar mevcut enerji talebini karşılamamanın yanı sıra birçok sosyo-ekonomik faydalar da sağlamaktadır [4].

Güneş ve rüzgâr gibi YEK'ler doğaları gereği kararsız ve öngörülemez olduklarından bu kaynaklar ile sabit ve sürekli güç üretimi pek mümkün değildir [5]. Bu durum enerji güvenilirliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle şebekeden uzak tüketiciler için enerji üretilirken iki veya daha fazla enerji üretim kaynağının birleşimine ihtiyaç duyulmaktadır [6]. Şebekeden bağımsız sistemlerde enerjinin sürekliliğini sağlamak için BDS'lere ihtiyaç duyulmaktadır. Üretilen enerjinin talebi aşması durumunda fazla enerji depolanarak üretimin tüketimi karşılamadığı zamanlarda kullanılmaktadır [7]. YEK'lerden oluşan

MŞ'lerde enerji üretiminin kısıtlı olduğu dönemler ile yük talepleri dikkate alınarak BDS'nin boyutu belirlenir ve sisteme entegre edilir. Sistemde kullanılacak BDS'lerin büyüklüğü maliyetlerin artmasına yol açmaktadır.

MŞ'lerde üretimin fazla olduğu dönemlerde fazla enerjiyi değerlendirmek için elektrolizörler yardımıyla hidrojen üretilerek tanklarda depolanmaktadır. HT'lerde depolanan hidrojen, yük talebinin arttığı zamanlarda FC'ler yardımıyla tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır [8, 9]. Yüksek enerji kapasitesine sahip olan hidrojen uzun süreli depolama esnekliği sunmaktadır. Böylece sistemdeki BDS kapasitesinin azalmasına yardımcı olmaktadır.

Enerji üretim güvenilirliğini sağlamak ve maliyetleri azaltmak amacıyla MŞ'lerde BGG veya DG gibi dağıtık enerji kaynakları kullanılabilir [10]. BGG'ler ve FC'ler elektrik enerjisi üretirken aynı zamanda ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Isıtma sistemleri ile güç sistemleri birleştirilerek (CHP) yakıt verimliliği ve temiz enerji bakımından önemli avantajlar sağlamaktadır [11, 12]. Küçük ölçekli CHP sistemleri, özellikle hastaneler, okullar, endüstriyel tesisler, binalar ile tek hane veya küçük tüketici gruplarının enerji talebini karşılamak için uygundur [13].

MŞ'lerin başlıca avantajları olarak şunlar sayılabilir;

- MŞ'ler birden fazla enerji kaynağıyla oluşturulduklarından olası herhangi bir olumsuz durumda tamamen enerjisiz kalma ihtimalini ortadan kaldırır. Bu durum enerji arzının güvenliği açısından hayati öneme sahiptir.
- Fosil yakıtların kullanımı sonucu ortaya çıkan sera gazları azaltılır. YEK'lerin yakıt olarak kullanılması, sıfır karbon hedefine bir adım daha yaklaştırabilir.
- Elektrik iletim ve dağıtım ağlarındaki enerji kayıplarını azaltarak enerji maliyetlerini azaltır [14].
- Kırsal bölgelerde hayvancılık ve tarımla uğraşan toplumların elektrik şebekelerine erişimi sınırlıdır. Özellikle kar yağışının fazla olduğu kış aylarında uzun süren elektrik kesintileri insanların yaşam kalitesini düşürmektedir. Başta bireylerin iletişim ve eğitim hizmetlerine erişimi olmak üzere birçok sosyo-ekonomik problemlere neden olabilmektedir. MŞ'ler enerji arzındaki sürekliliği nedeniyle kırsal kesimlerin ihtiyacını karşılamada iyi bir çözüm olabilir.

- Ayrıca, kırsal bölgelerde enerjiye erişim, tarım ve hayvancılık alanında elektrikli aletlerin kullanımını teşvik eder, işgücü kaybını azaltır ve verimliliği artırarak ekonomik kalkınmayı hızlandırır.
- Enerjide dışa bağımlılık, ülkelerin bağımsızlığını etkileyecek kadar önemli bir problemdir. Türkiye gibi enerjisinin önemli bir bölümünü ithal fosil yakıtlardan temin eden ülkeler için YEK'lerden oluşan MŞ'lerin yaygınlaşması stratejik öneme sahiptir. Bu şebekeler sayesinde hem dışa bağımlılık azaltılacak hem de enerji ihtiyacı temiz ve ekonomik olarak karşılanacaktır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, YEK'lerin etkin bir şekilde kullanımını teşvik ederek farklı amaçlara yönelik olarak şebekeden bağımsız MŞ'lerin tasarımını ve optimizasyonunu gerçekleştirmektir. Bu tez çalışması ile tartışılan ve vurgulanan temel noktalar aşağıda özetlenmiştir.

- Kırsal bölgelerin güneş, rüzgâr, hidrolik ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynak potansiyellerini belirleyerek HOMER Pro yazılımı ile uygun MŞ'ler tasarlamak,
- FV, RT, BGG, AST, FC, BDS ve elektrolizör gibi MŞ sistem bileşenlerinin enerji verimliliği açısından teknik performanslarını analiz etmek,
- HOMER Pro yazılımının sahip olduğu LF ve CC dağıtım stratejilerinden bağımsız olarak yeni bir strateji geliştirerek MŞ'lerin enerji yönetimini gerçekleştirmek,
- Sermaye maliyetleri, işletme bakım onarım maliyetleri, geri dönüşüm ve yakıt maliyetleri gibi maliyet bileşenlerini dikkate alarak tasarlanan MŞ'lerin ekonomik açıdan analizini gerçekleştirmek,
- Tasarlanan MŞ'lerin CO₂ emisyon değerleri üzerinden çevresel etkilerini değerlendirmek.

Sonuç olarak bu tez çalışması, hem enerji arz güvenliğini artırarak hem de çevresel etkiyi azaltarak sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada hazırlanan tez altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde YEK'lerin ve YEK'lerden oluşturulacak MŞ'lerin önemi vurgulanarak yapılan çalışmanın amaçları hakkında bilgi verilmiştir. Sonraki bölümler şu şekilde devam etmektedir. İkinci bölümde; MŞ'lerle ilgili literatürde yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Üçüncü bölümde,

YEK'ler ve MŞ'leri oluşturan bileşenler hakkında bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde, sistem tasarımı için kullanılan HOMER Pro yazılımı tanıtılarak, MŞ bileşenlerinin HOMER Pro yazılımında nasıl modellendiği açıklanmıştır. Beşinci bölümde, HOMER Pro yazılımında tasarlanan ve analiz edilen dört farklı MŞ'ye ait sonuçlar verilmiştir. Bu çalışmanın son kısmı olan 6. bölümde ise elde edilen tüm sonuçlar yorumlanarak gelecekte yapılacak çalışmalar için bazı öneriler sunulmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yenilenebilir enerji tabanlı hibrit MŞ'lerin tasarımına yönelik literatürde birçok çalışma mevcut olup bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

El-Maaroufi vd. [15] HOMER Pro yazılımı kullanarak Fas'ın Zoumi bölgesindeki konutların yıllık enerji talebini karşılayabilmek için FV, RT, BGG ve BDS'den oluşan MŞ tasarlamışlardır. Yapılan analizlere göre tasarlanan sistemin yıllık 11,14 GWh enerji üreteceği, DG'lere kıyasla yıllık yaklaşık 5.900 ton CO₂ emisyonunu azaltacağı ve LCOE değerinin 0,125 \$/kWh olacağı belirtilmiştir.

Nadeem vd. [16] Pakistan'da şebekeden bağımsız FV, BGG ve BDS bileşenlerini içeren bir MŞ'yi HOMER Pro yazılımı ile tasarlamışlardır. Yaptıkları optimizasyon sonucunda, tasarladıkları sistemin 15 kW BGG, 11,5 kW FV modülleri, 1 kWh kapasiteli BDS ve 10,8 kW dönüştürücüden oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sistemin NPC ve LCOE değerlerinin sırasıyla 95.858 \$ ve 0,104 \$/kWh olacağını ifade etmişlerdir.

Khalil vd. [17] yaptıkları çalışmada, Ürdün'ün Karak bölgesi için HOMER Pro yazılımı yardımıyla üç farklı MŞ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Birinci tasarımda FV, DG ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ'nin LCOE değeri 0,488 \$/kWh olarak hesaplanmış ve sistemin yıllık 610,73 kton CO₂ emisyonu üreteceği belirtilmiştir. İkinci tasarımda sisteme RT eklenmiş ve bu durumda LCOE değeri 0,489 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Son olarak sadece DG'nin olduğu bir sistem tasarlanmış ve bu durumda LCOE değerinin 0,727 \$/kWh olacağı ifade edilmiştir.

Santos vd. [18] HOMER Pro yazılımında ML ve AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) araçlarını kullanarak MŞ'lerin boyutlandırılması ve simülasyonu için yeni bir strateji sunmuşlardır. Campinas Üniversitesi kampüsünde kurulan MŞ'den aldıkları verilerle stratejilerini test ederek LF ve CC stratejilerine göre ekonomik avantajlar sağladığını ve ana şebekeye bağımlılığı azalttığını ifade etmişlerdir.

Miah vd. [19] Bangladeş koşullarında tasarladıkları şebeke bağlantılı FV sistemi için yeni bir strateji sunmuşlar. Tasarladıkları 3.000 kW'lık FV sisteminin maliyeti 493.469.200 taka ve LCOE değeri ise 5,31 taka/kWh olarak hesaplanmıştır.

Toopshekan vd. [20] İran'ın Tahran kentinde günlük enerji talebi 112,7 kWh olan bir konut bölgesi için HOMER Pro yazılımı ile FV, RT, DG ve BDS bileşenlerinden oluşan şebeke bağlantılı bir MŞ tasarlanmıştır. Tasarlanan şebeke için ML aracı kullanılarak yeni bir dağıtım stratejisi geliştirilmiştir. Önerilen stratejinin LF ve CC stratejilerine göre sırasıyla %9 ve %4 oranında ekonomik iyileşme sağladığı ifade edilmiştir. Ayrıca tasarlanan sistemin NPC ve LCOE değerleri sırasıyla 75.861\$ ve 0,128 \$/kWh olarak elde edilmiştir.

Yazhini vd. [21] Güney Hindistan'daki bir köy için şebekeye bağlı ve bağımsız beş farklı modeli tasarlamış ve analiz etmişlerdir. FV, DG, RT ve BDS kombinasyonundan oluşan modelin şebekeden bağımsız modeller arasında en düşük LCOE'ye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Şebeke bağlantılı sistemin ise tüm modeller içinde en düşük LCOE'ye sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Aziz vd. [22] tarafından yapılan çalışmada; RT, DG ve BDS bileşenlerinden oluşan şebekeden bağımsız bir MŞ tasarlanmış ve ML aracı kullanarak yeni bir sevk stratejisi geliştirilmiştir. Önerdikleri strateji ile HOMER Pro yazılımındaki LF ve CC stratejilerini karşılaştırmışlardır. Önerilen sevk stratejisinin NPC değeri 56.473 \$ olarak elde edilmiş ve bu değer LF stratejisinin NPC değerinden (63.681 \$) ve CC stratejisinin NPC değerinden (62.545 \$) daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Ishraque vd. [23] önerdikleri MŞ'nin teknik, çevresel ve ekonomik analizini HOMER Pro yazılımıyla, güç sistemi tepki analizini ise DIgSILENT PowerFactory yazılımıyla gerçekleştirmişlerdir. Değerlendirme sonucunda, CC stratejisinin hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız modellerde en kötü performansa sahip olduğu belirtilmiştir. Şebekeye bağlı modelde GO (Generator Order) stratejisi en iyi performansı sergilerken (NPC: 113.137 \$, LCOE: 0,166 \$/kWh), şebekeden bağımsız modelde ise LF stratejisi en iyi performansı göstermiştir (NPC: 141.448 \$, LCOE: 0,024 \$/kWh).

Melit vd. [24] Kuzey Cezayir'deki bir konutun elektrik ihtiyacını karşılamak için şebekeye bağlı enerji depolamalı ve depolamasız iki farklı FV sistem senaryosunu HOMER Pro yazılımı ile tasarlayıp ekonomik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ekonomik analiz sonuçlarına göre, enerji depolamasız şebekeye bağlı FV sistemin en düşük değere sahip olduğu belirtilmiştir.

Singh vd. [25] MANIT Bhopal Enerji Merkezi'nin kısmi yük ihtiyacını karşılamak için HOMER Pro yazılımını kullanarak BGG, FV, FC ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarlamışlardır. Merkez 101 kWh/gün enerji tüketimine sahip olup 5 kW maksimum yük talebi için MŞ'deki BGG, FV ve FC bileşenlerinin boyutları 5 kW olarak optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sistemin LCOE değeri 15.064 Rs/kWh (yaklaşık 0,18 \$/kWh) olarak hesaplanmıştır.

Isa vd. [26] Kebangsaan Üniversitesi Malezya Tıp Merkezi (UKMMC) binası için HOMER Pro yazılımıyla tasarladıkları CHP sisteminin beş farklı konfigürasyonunu incelemişlerdir. En uygun CHP sisteminin FC, FV ve BDS bileşenlerinden oluştuğu belirtilmiştir. Sistemin NPC değeri 98.318 \$, LCOE değeri ise 0,0841 \$/kWh olarak elde edilmiştir.

Kalancı Bozcaada için yaptığı çalışmada [27], şebekeye bağlı RT, FC ve FV bileşenlerinin olduğu altı farklı modeli HOMER Pro yazılımı yardımıyla oluşturarak karşılaştırmalı maliyet analizi gerçekleştirmiştir. Şebekeye bağlı RT'nin 0,103 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun model olduğu ve bu değer şebeke maliyetinden 0,17 \$/kWh daha ucuz olduğunu belirtmiştir. RT, FV ve FC bileşenlerinden oluşan modelin ise şebekeden bağımsız sistemler için en düşük LCOE değerine (0.836 \$/kWh) sahip olduğu ifade edilmiştir.

Kalamaras vd. [28] bir konutun ısı ve güç talebini karşılamak için YEK'lere dayalı şebekeden bağımsız bir sistem HOMER Pro yazılımı ile tasarlanmıştır. 3,35 kW FV, 3 kW RT, 2,9 kW FC, 6 kWh BDS, 4,2 kW elektrolizör ve 40 kg kapasiteli HT'den oluşan sistemin, yıl boyunca hem elektrik hem de ısı yükünü karşılayabileceği ifade edilmiştir. Sistemin başlangıç sermayesinin 66.650 €, yıllık işletme maliyetinin 1.802 € ve LCOE değerinin ise 1,20 €/kW olduğu belirtilmiştir. .

Odetoye vd. [29] Nijerya'da hızla ticarileşen bir yerleşim yeri için, HOMER Pro yazılımı ile FV, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, BDS ve küçük ölçekli bir hidroelektrik santralden oluşan şebekeden bağımsız bir MŞ tasarlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre geliştirdikleri modelin, dizel bazlı bir şebekeye kıyasla hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha üstün olduğunu ifade etmişlerdir.

Nasab vd. [30] Yeni Zelanda'daki Stewart Adası'nın elektrik talebini karşılamak amacıyla mevcut DG sistemine alternatif olarak bir MŞ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan şebekenin simülasyonları HOMER ve WRPLOT (Wind Rose Plot) yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, sera gazı emisyonlarını azaltmak, yenilenebilir enerji payını artırmak ve NPC değerini düşürmek için iki adet RT, dört adet gelgit türbini ve bir adet DG bileşeninden oluşan sistemin en uygun çözüm olduğu belirtilmiştir.

Jahangiri vd. [31] HOMER Pro yazılımı ile, İran'ın Abadan bölgesinde bir konutun ısı ve güç ihtiyacını karşılamak amacıyla RT, FV, BGG, FC ve boyler bileşenlerinden oluşan bir CHP sistemini tasarlayıp analiz etmişlerdir. Analiz sonuçları BGG ve FC bileşenlerinde elektrik üretilirken aynı zamanda açığa çıkan ısı enerjisinin sistemi kazançlı hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Sistemin LCOE değeri 1,16 \$/kWh olarak elde edilmiştir.

John vd. [32] FV, FC, elektrolizör ve HT bileşenlerinden oluşan bir MŞ'nin tasarımını HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Sistemin çalışma ömrü baz alınarak yapılan analizde, NPC değeri 1.030.406 \$, LCOE değeri ise 0,6050 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Önerilen sistemin kWh başına enerji maliyetinin şebeke değerine kıyasla daha yüksek olmasına rağmen çevre dostu temiz bir enerji kaynağı olduğu için tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Kapen vd. [33] birinci senaryoda FV, FC, elektrolizör ve BGG bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarlamışlardır. İkinci senaryoda ise birinci modele BDS eklenmiş ve her iki modelin analizleri sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 0.139 \$/kWh LCOE değerine sahip ikinci modelin, Kamerun'un Maroua şehrindeki topluluğun elektrik ihtiyacını karşılamak için daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

Manoo vd. [34] Pakistan'daki bir eğitim kurumunun enerji ihtiyacını karşılamak için şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız FC, RT ve FV bileşenlerinden oluşan farklı MŞ'ler modelleyerek analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre şebekeye bağlı FV sistemin 0,155 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun model olduğu belirtilmiştir.

Ennemiri vd. [35] Fas'taki bir ticari platformun elektrik talebi için HOMER Pro yazılımı ile FV, BGG ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bileşenlerin optimum boyutları; FV için 231 kW, BGG için 170 kW, dönüştürücü için 140 kW ve BDS için 201 kWh olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sistemin LCOE değeri 0,280 \$/kWh olarak elde edilmiştir.

Odoi-Yorke ve Woenagnon [36] Gana'daki uzak bir baz istasyonunun enerji talebini karşılamak için HOMER Pro yazılımı ile FV ve FC bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarlayıp analizini gerçekleştirmişlerdir. Tasarladıkları MŞ'nin LCOE değerinin (0,222 \$/kWh) ortalama şebeke birim fiyatından (0,25 \$/kWh) daha düşük olduğunu vurgulamışlardır.

Mishref ve Tanaka [37] Mısır'ın Doğu Owienat kenti için, şebekeden bağımsız FV, RT, BDS, mikro hidroelektrik santrali ve gri hidrojen üreten buhar dönüştürücülerinden oluşan bir MŞ tasarlamışlardır. Tasarladıkları MŞ modeli için hidrojen üretim maliyetinin 2,1-2,8 \$/kg arasında değiştiğini ve sistemin NPC değerinin elektrikli boylere göre %13,6 daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Tayyab vd. [38] Afganistan'ın Kandahar şehrinin kuzeyinde yer alan bir bölge için HOMER yazılımı ile DG, RT, FV ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarımı gerçekleştirmiş ve altı farklı kombinasyon üzerinde analizler yapmışlardır. Analizler sonucunda elde edilen en uygun konfigürasyonun NPC değeri 10.108 \$, LCOE değeri ise 0,190 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Yadav vd. [39] Hindistan'ın 277 haneli Kanur köyü için, HOMER Pro yazılımı ile şebekeden bağımsız RT, FV, FC, elektrolizör, HT ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarlayarak tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda BDS'nin %100 ve %99 kapasite seviyeleri için NPC değerlerinin sırasıyla 83,8832 \$ ve

67,9605 \$ olduğu, LCOE değerlerinin ise 0,232 \$/kWh ve 0,189 \$/kWh olarak elde edildiği belirtilmiştir.

Farah vd. [40] Endonezya'nın Sebira adası için iki farklı MŞ modelini HOMER Pro yazılımı ile tasarlamışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre; BDS, DG ve FV bileşenlerinden oluşan birinci modelin LCOE değeri 0,128 \$/kWh olup 0,6577 \$/kWh LCOE değerine sahip ikinci modele göre ekonomik açıdan daha uygundur.

Yusupov ve Almagrahı [41] Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin enerjiyi ihtiyacını karşılaması amacıyla şebekeye bağlı DG, FV ve BDS bileşenlerinden oluşan dört farklı MŞ modelini HOMER Pro yazılımı ile tasarlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre 0,284\$/kWh LCOE değerine sahip şebekeye bağlı DG ve FV bileşenlerinden oluşan MŞ'nin en uygun model olduğu görülmektedir.

Araoye vd. [42] Nijerya'nın Agu-Amede köyünün elektrik ihtiyacını karşılamak için HOMER Pro yazılımıyla, şebekeden bağımsız FV, BGG ve BDS bileşenlerini içeren bir MŞ tasarlamış ve tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Günlük üç ton biyokütle kullanılması durumunda BGG'nin enerji talebinin karşılanabileceği ifade edilmiştir. En uygun sistemde FV 98.714 kWh (%20,50), BGG ise 381.979 kWh (%79,50) enerji üretmekte olup sistemin NPC değeri 30.331,25 \$ ve LCOE değeri ise 0,066 \$/kWh olarak hesaplanmıştır.

Jenkins ve Sonar [43] New Mexico'daki Navajo topluluğu için HOMER Pro yazılımı ile FV, RT, DG ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ'nin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon sonucunda, 164.048 \$ NPC değerine ve 0,16 \$/kWh LCOE değerine sahip tüm bileşenlerin yer aldığı modelin en uygun seçenek olduğu belirtilmiş ve sadece DG'nin olduğu sisteme kıyasla maliyetin %75 azaldığı ifade edilmiştir.

Belmahdi ve Bouardi [44] Fas'ın Abdelmalek Essaâdi Üniversitesi için HOMER Pro yazılımı ile şebekeye bağlı FV ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ'nin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. HOMER Pro yazılımı ile, oluşturulan MŞ için dört farklı senaryo analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, tüm bileşenlerin dahil olduğu sistemin LCOE

değeri 0,187 \$/kWh ve NPC değeri 9,41 milyon \$ ile en uygun çözüm olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca toplam enerjinin %73'ü FV paneller tarafından üretilmektedir.

Pal ve Bhattacharjee [45] Hindistan'ın Patharpratima adasının kırsal bölgesi için hayvansal gübreyi değerlendirmek amacıyla FV ve BGG bileşenlerinden oluşan bir MŞ'nin tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Sistem bileşenlerinin uygun boyutlandırılması ve NPC değerinin azaltılması için parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) kullanmışlardır. FV ile BGG'nin birlikte kullanıldığı sistemde, LCOE değerinin %54,26 azaldığını belirtmişlerdir.

Mehta ve Basak [46] Hindistan'daki Patiala Thapar Mühendislik ve Teknoloji Enstitüsü'nde bulunan bir MŞ sistemi için bir vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. MŞ sistemi, şebekeye bağlı FV ve BDS bileşenlerinden oluşmaktadır. Çalışmada iki farklı güneş ışıyım değeri dikkate alınmıştır. Ortalama güneş ışıyımı 5,44 kWh/m²/gün olan sistem için LCOE değeri 3,03 Rs/kWh ve 5,17 kWh/m²/gün ortalama güneş ışıyımı için ise LCOE değeri 3,16 Rs/kWh olarak elde edilmiştir.

Islam vd. [47] Bangladeş'in Cumilla kentinin elektrik talebi için HOMER Pro yazılımı ile şebekeden bağımsız DG, FV ve RT bileşenlerinden oluşan bir MŞ'nin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon sonucunda tüm bileşenlerden oluşan sistemin 791.531 \$ NPC ve 1,01 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun seçenek olduğunu ifade etmişlerdir.

Peláez-Peláez vd. [48] FV, FC, elektrolizör ve HT bileşenlerinden oluşan bir CHP sistemin analizini HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Sistemin NPC değerinin 1.006.293 \$ ve LCOE değerinin ise 0,8399 \$/kWh olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca tasarladıkları sistemin ekonomik açıdan uygun olmamakla beraber teknik açıdan uygulanabilir olduğunu ifade etmişlerdir.

Elsaraf vd. [49] uzak bir topluluğun enerji ihtiyacını karşılamak üzere solar termal (ST), FV, RT, hidroelektrik tübin, FC, HT ve boyler bileşenlerinden oluşan CHP tabanlı bir MŞ tasarlamışlardır. Oluşturulan sistem ile elektrik talebinin tamamı ve termal talebin %63,5'i YEK'lerden karşılanmaktadır. Bu sistem sayesinde %71 dizel tüketimi ve 9.000 ton CO₂ emisyonu azaltılmıştır.

Sattar vd. [50] HOMER Pro yazılımı ile şebekeye bağlı hidroelektrik türbin ve FV bileşenlerinin olduğu farklı modellerin analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, yalnızca şebekeye bağlı hidroelektrik türbin içeren modelin, hidroelektrik türbin ile FV bileşenlerinin bir arada bulunduğu modele kıyasla %23 daha düşük NPC değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, hidroelektrik türbin ve FV bileşenlerinin bir arada olduğu modelin NPC değerinin, yalnızca şebekeye bağlı FV modeline göre %40 daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır.

Rohani ve Nour [51] Abu Dabi'nin batı bölgesinde bulunan Ras Musherib'deki kırsal bir bölgenin elektrik talebi için HOMER Pro yazılımı ile FV, RT, BDS ve DG bileşenlerinden oluşan bir MŞ sistemini analiz etmişlerdir. 500 kW yük talebi için optimum sistemin, %15 FV ve %30 RT üretim oranına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sadece DG'lerden oluşan sisteme kıyasla oluşturdukları MŞ'nin %37 oranında CO₂ emisyonu azalttığını ifade etmişlerdir.

Tsuanyo vd. [52] HOMER Pro yazılımı ile FV ve DG bileşenlerinden oluşan şebekeden bağımsız bir MŞ sistemini iki senaryo halinde tasarlamıştır. Birinci senaryo 120 kW'lık PV ve 26 kW'lık yedi adet özdeş DG'den oluşurken ikinci senaryo 150 kW'lık PV ve farklı boyutlarda (35 kW, 54 kW, 75 kW) üç adet DG'den oluşmaktadır. Her iki modelin LCOE değerleri sırasıyla 0.289 €/kWh ve 0.284 €/kWh olarak hesaplanmış olup bu değerlerin şebekeden bağımsız DG sistemlerine kıyasla düşük olduğu ifade edilmiştir.

Khiareddine vd. [53] Tunus'ta santrifüj pompaya bağlı asenkron motorun enerji talebi için FV, RT, FC, elektrolizör, HT ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarlamışlardır. Enerji yönetimi stratejisi için boyutlandırma algoritması kullanarak tekno-ekonomik analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada; bağımsız sistemlerde kullanılan FC'lerin hala pahalı ve henüz ekonomik olarak uygun olmadığı fakat optimum şekilde boyutlandırılması durumunda kapasitelerinde keskin bir düşüş sağlanarak sistemin toplam maliyetinin azalabileceği ifade edilmiştir. Optimize edilmiş boyutlandırma algoritmasının yalnızca bir pompalama sistemi için değil herhangi bir otonom yük için hibrit sistemin tüm olası konfigürasyonlarını verebileceği vurgulanmıştır.

Mehrjerdi vd. [54] GAMS yazılımı ile şebekeden bağımsız FV, hidroelektrik türbin ve HT'den oluşan bir MŞ tasarlayıp simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonda kullanılan bileşenlerin kapasite değerlerini FV için 73 kW, hidroelektrik türbin için 5 kW ve HT için 12,3 kg olarak belirlemişlerdir. Hidroelektrik sistemin düşük üretim yaptığı yaz aylarında FV paneller ile enerji açığı kapatılırken, FV panellerin üretiminin azaldığı kış aylarında ise hidroelektrik türbinlerin daha çok üretim gerçekleştirdiği ifade edilmiştir. Ayrıca önerilen sistem sayesinde karbon emisyonunun 39.546 kg azaldığı ve sistem maliyetinin şebekeye bağlı bir sisteme göre %50,3 daha düşük olduğu vurgulanmıştır.

Mohseni vd. [55] Yeni Zelanda'da hidrojen yakıt ikmal istasyonu içeren şebekeden bağımsız bir MŞ'yi altı farklı algoritma ile optimize ederek karşılaştırmışlardır. Güve-alev algoritmasının (GAA) genetik algoritmaya (GA) göre %2,1, PSO'ya göre ise %3,2 oranında daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. GAA ile optimize edilen sistemin NPC değerinin diğer algoritmalarla göre sırasıyla 123.910 \$ ve 188.129 \$ daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca sistemin LCOE değerinin 0,09 \$/kWh, hidrojen maliyetinin ise 4,61 \$/kg olduğu ve bu değerlerin mevcut tarifelerden daha uygun olduğu vurgulanmıştır.

Dayıoğlu ve Rıdvan [56] ABD'nin Duquesne şehri için güneş ve rüzgâr kaynaklı bir MŞ tasarlayarak üç farklı senaryo (şebeke bağlantılı, sınırlı şebeke ve şebekeden bağımsız) için tekno-ekonomik analizler gerçekleştirmişlerdir. NPC, LCOE, kurulum maliyeti ve yenilenebilir enerji penetrasyonu açısından senaryoları değerlendirmişlerdir. LCOE'yi yaklaşık %33 oranında azaltan şebeke bağlantılı senaryonun en ekonomik seçenek olduğu belirtilmiştir.

Nsengimana vd. [57] Ruanda'da hem tek bir konut hem de 200 haneden oluşan bir bölge için şebekeden bağımsız FV ve BDS bileşenlerini içeren iki ayrı MŞ tasarımını HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirerek analiz etmişlerdir. Yaptıkları analiz sonuçlarına göre, tek bir konut için tasarlanan MŞ'nin NPC değeri 5.625 \$, LCOE değeri ise 1,51 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Bölge için tasarlanan MŞ için bu değerler sırasıyla 1.079.210 \$ ve 1,45 \$/kWh olarak elde edilmiştir. Yazarlar yük paylaşımına dayalı grup modelinin, Ruanda'daki orta ve düşük gelirli kırsal nüfus için yeşil enerji çözümleri sunmada etkili bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır.

Bekçi ve Koca [58] Kayseri’deki tramvayların enerji taleplerini YEK’lerle karşılamak için HOMER Pro yazılımı ile RT, FV, BGG ve BDS bileşenlerinden oluşan bir MŞ tasarlayıp analiz etmişlerdir. Oluşturdukları MŞ’de talebin %95’inin RT ve FV tarafından karşılandığı, sistemin NPC değerinin 179 milyon \$ ve LCOE değerinin ise 0,591\$/kWh olduğu ifade edilmiştir.

Literatürde farklı enerji yönetim sistemleriyle yapılan bazı çalışmaların karşılaştırılması Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1. MŞ’ler için literatürde yer alan bazı çalışmalar

MŞ	Bağlantı Tipi	Depolama Tipi	Enerji Yönetim Sistemi	Performans Parametreleri
FV, FC [59]	Şebeke bağlantılı	BDS	PSOAIW -PSOCF	NPC, LCOE
FV, RT, BGG [60]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	NPC, LCOE
FV, RT, FC [61]	Şebekeden Bağımsız	BDS /HT	-	LCOE
FV, Hidrokinetik, FC [62]	Şebekeden Bağımsız	BDS /HT	HOMER	NPC, LCOE
FV, RT [63]	Şebeke Bağımsız	BDS	HOMER	NPC,L COE
BGG [64]	Şebekeden Bağımsız	HT	HOMER	H2
FV, RT, BGG [65]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	LCOE
FV, ICE-FV, MGT [66]	Şebekeden Bağımsız	BDS	Matlab-GA	LCOE, η CHP
FV, CHP [67]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	TEKNİK
RT, DG [68]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	LCOE, NPC
FV, RT [69]	Şebekeden Bağımsız	BDS	Matlab	LCOE, LPSP
FV [70]	Şebeke bağlantılı	BDS	HOMER- Matlab	Teknik-LCOE
FV [71]	Şebeke bağlantılı	BDS	HOMER-ML	NPC, LCOE
FV, DG [72]	Şebeke bağlantılı	-	HOMER-ML	NPC, LCOE
FV [73]	Şebekeden Bağımsız	BDS-HT	HOMER-Matlab	NPC

Literatürdeki çalışmalar YEK’lerden oluşan MŞ’lerin tasarımı ve optimizasyonunun önemini ortaya koymaktadır. Bu sistemler tasarlanırken teknik, ekonomik ve çevresel birçok parametre dikkate alındığından süreç oldukça karmaşıktır. Araştırmacılar, bu zorlukları aşmak için sürekli olarak farklı araçlar ve yöntemler geliştirme çabası içerisinde olmuşlardır.

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE MİKRO ŞEBEKELER

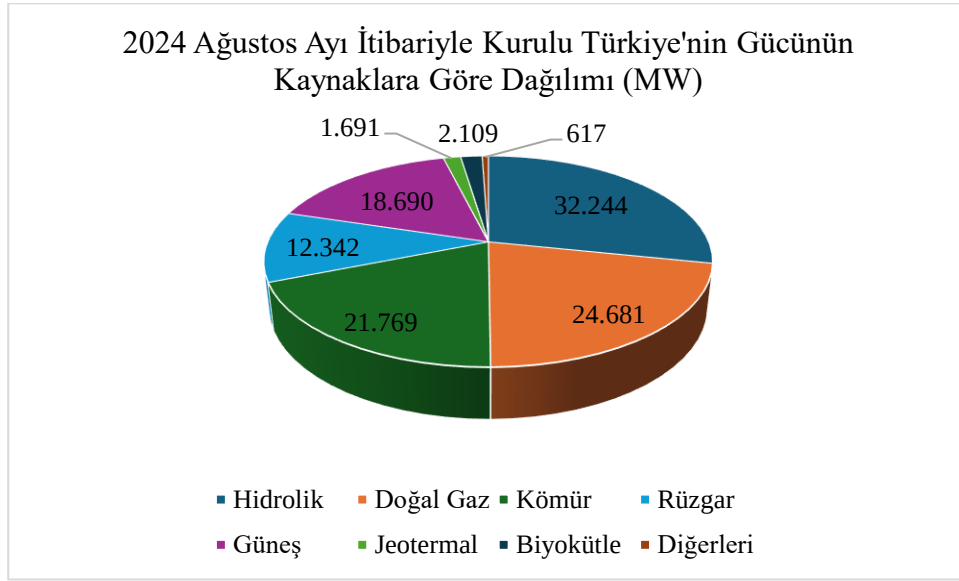
3.1. Yenilebilir Enerji Kaynakları

YEK'ler, doğada kendini yenileyebilen ve tükenmeyen enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir [74]. YEK'ler, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir enerji arzının sağlanması ihtiyacından hareketle, fosil yakıtlara önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Güneş, rüzgâr, biokütle, hidroelektrik ve jeotermal enerji kaynakları, çevre dostu yapılarıyla sürdürülebilir enerji çözümleri sunmaktadır [75]. YEK'lerden üretilen enerji günümüzde elektrik ve ısıtma taleplerinin karşılanması başta olmak üzere birçok alanda kullanılmakta ve her geçen gün yaygınlaşmaktadır. YEK'ler, fosil yakıtların havayı kirletici sera gazları emisyonlarını azaltmada katkıda bulunduğundan dolayı insan sağlığı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir [76]. Bu kaynakların fosil yakıtlara göre her yerde bulunmaları ve kolay erişilebilir olmalarından dolayı enerji güvenirliliği açısından önemli bir yere sahiptirler.

IRENA'nın (International Renewable Energy Agency) 2024 yılında yayınladığı rapora göre [77] küresel çapta YEK'lerin kapasitesi 2014 yılında 1.698.295 MW iken bu değer 10 yıl içerisinde iki katından daha fazla artarak 2023 yılında 3.864.522 MW'a ulaşmıştır. Özellikle Çin, sahip olduğu 1.453.701 MW'lık YEK kapasitesiyle küresel yenilenebilir enerjinin büyümesine önemli katkı sağlamaktadır. 2023 yılında en yüksek kapasite artışı FV sistemler ve RT enerjisinde gözlemlenmiştir. Küresel FV kapasitesi 1.418.016 MW seviyesine ulaşarak enerji üretiminde önemli bir paya sahip olmuştur. Rüzgâr enerjisi ise toplamda 1.017.390 MW'a ulaşmış olup, bunun %92,8'i kara üstü, %7,2'si ise deniz üstü rüzgâr santrallerinden elde edilmiştir

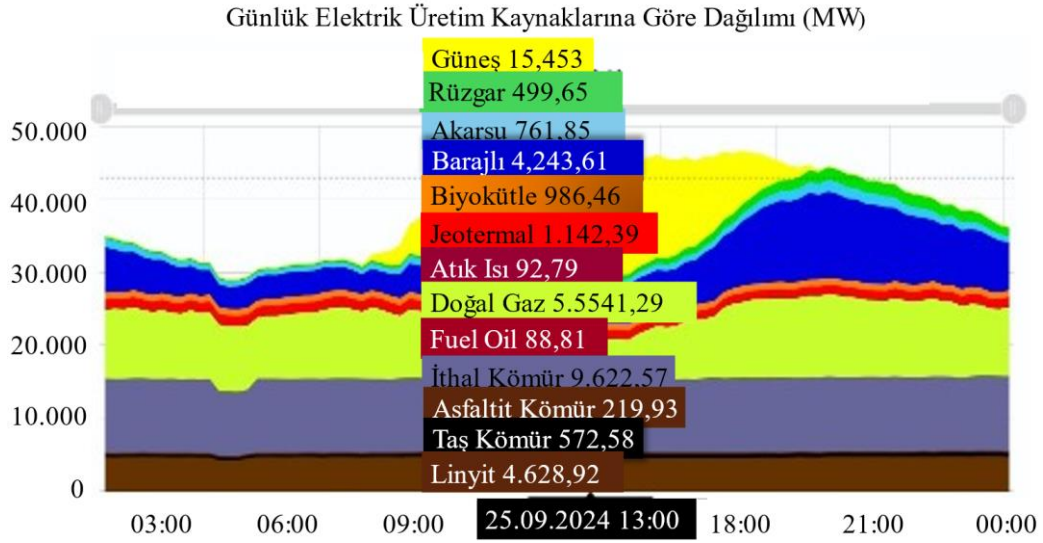
Türkiye, konumu ve coğrafi yapısı sayesinde güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle potansiyeli bakımından oldukça avantajlıdır. Türkiye'de YEK'lerin, toplam kurulu güç içerisindeki payı 2000 yılında %41,2 iken bu değer 2024 yılı Ağustos ayında %56,8'e yükselmiştir [78]. Ayrıca Enerji Bakanlığının resmi verilerine göre 2023 yılında

elektrik üretiminin %36,3'ü kömürden, %21,4'ü doğal gazdan, %19,6'sı hidrolik enerjiden, %10,4'ü rüzgardan, %5,7'si güneşten, %3,4'ü jeotermal enerjiden ve %3,2'si ise diğer kaynaklardan karşılanmıştır [79]. Son yıllarda YEK'lerin payı artsa da Türkiye'nin enerji üretiminde fosil kaynakların payı hala önemli bir seviyededir. Türkiye 2024 Ağustos ayı itibariyle kurulu gücü 114.143 MW olup [80] kaynaklara göre dağılımı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı

Yük Tevzi Bilgi Sisteminin verilerine göre, 25.09.2024 günü saat 13:00 itibariyle Türkiye'de anlık olarak tüm kaynaklardan üretilen güç değerleri ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

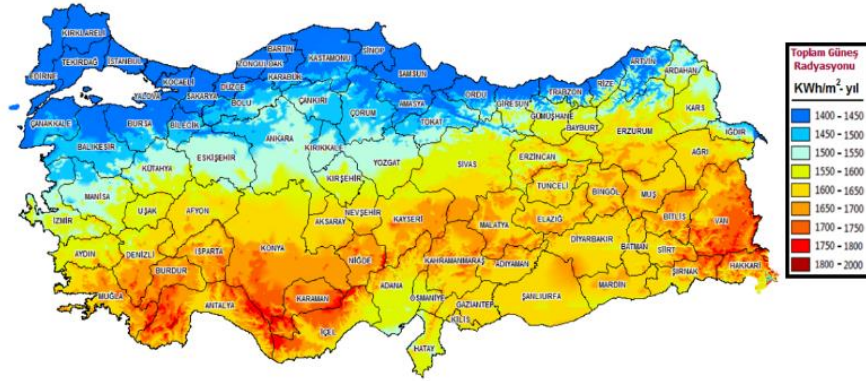


Şekil 3.2. Günlük elektrik üretim kaynaklarına göre dağılımı [81]

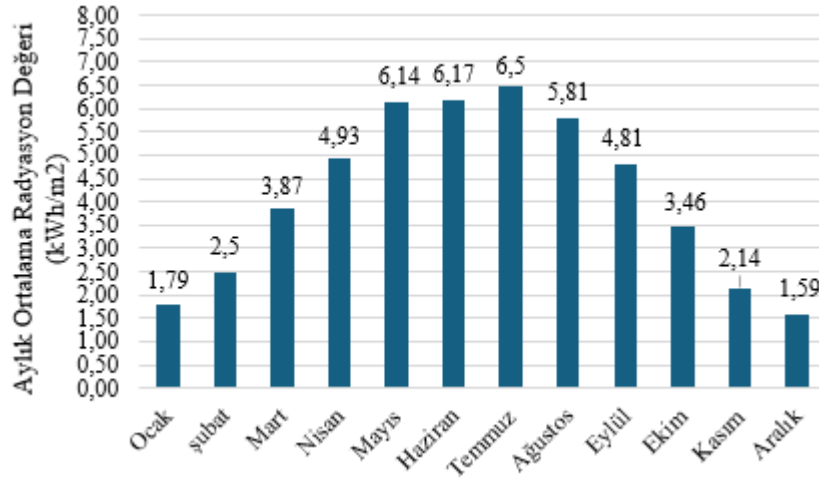
3.1.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde gerçekleşen füzyon süreci sonucunda ortaya çıkan ışıma enerjisidir. Atmosfer yüzeyindeki güneş ışıınımı yoğunluğu 1367 W/m^2 iken bu değer yer yüzeyinde 1000 W/m^2 'ye düşmektedir [82]. Güneşten Dünya'ya ulaşan enerjinin küçük bir kısmı bile, dünya genelinde tüketilen enerji miktarını fazlasıyla aşmaktadır. 1970'lerden itibaren güneş enerjisi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve teknolojinin gelişimiyle birlikte güneş enerjisi sistemlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Son yıllarda ise güneş enerjisi, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [83].

Türkiye, bulunduğu coğrafi konumundan dolayı güneş enerjisi bakımından önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre ülkemiz $1.527,46 \text{ kWh/m}^2$ ortalama yıllık toplam ışıınım değerine ve 2,741 saat ortalama yıllık toplam güneşlenme süresine sahiptir. Güneş enerjisi potansiyel görünümü ve aylık ortalama global radyasyon dağılımı Şekil 3.3 ve 3.4'te verilmiştir [84].

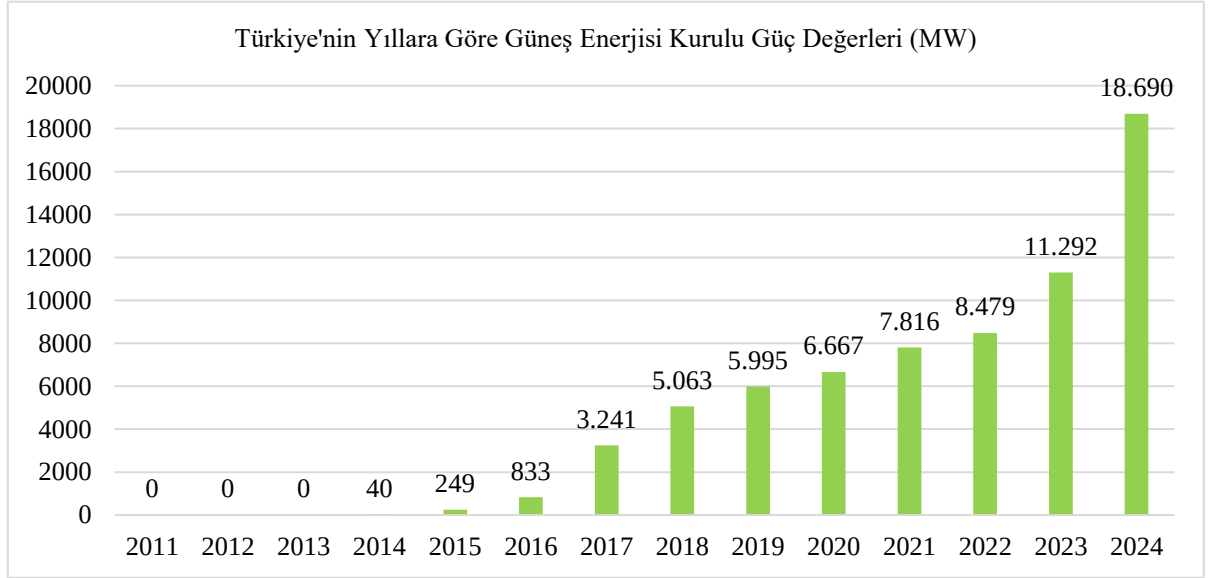


Şekil 3.3. Güneş enerjisi potansiyel haritası [84]



Şekil 3.4. Aylık ortalama global radyasyon dağılımı [84]

Türkiye’de güneş enerjisine yapılan yatırımlar her geçen gün artmaktadır. Türkiye’nin 2024 Ağustos ayı itibariyle güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 18.690 MW ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı %16,37’dir [80]. Türkiye'nin 2011-2024 yılları arası güneş enerjisi kurulu güç değerleri Şekil 3.5’te verilmiştir.

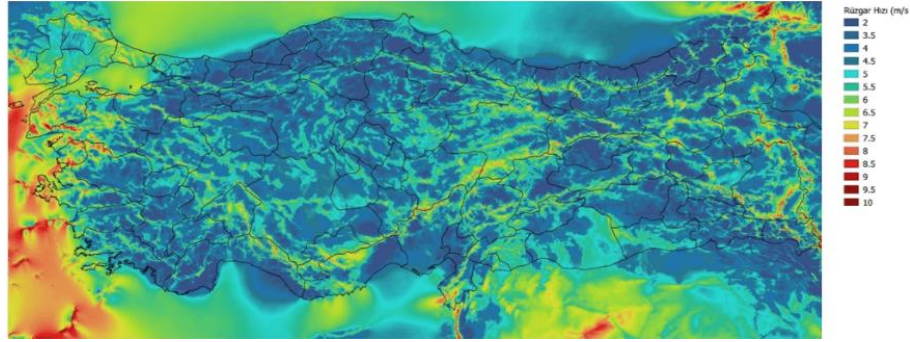


Şekil 3.5. Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi [84]

3.1.2. Rüzgâr Enerjisi

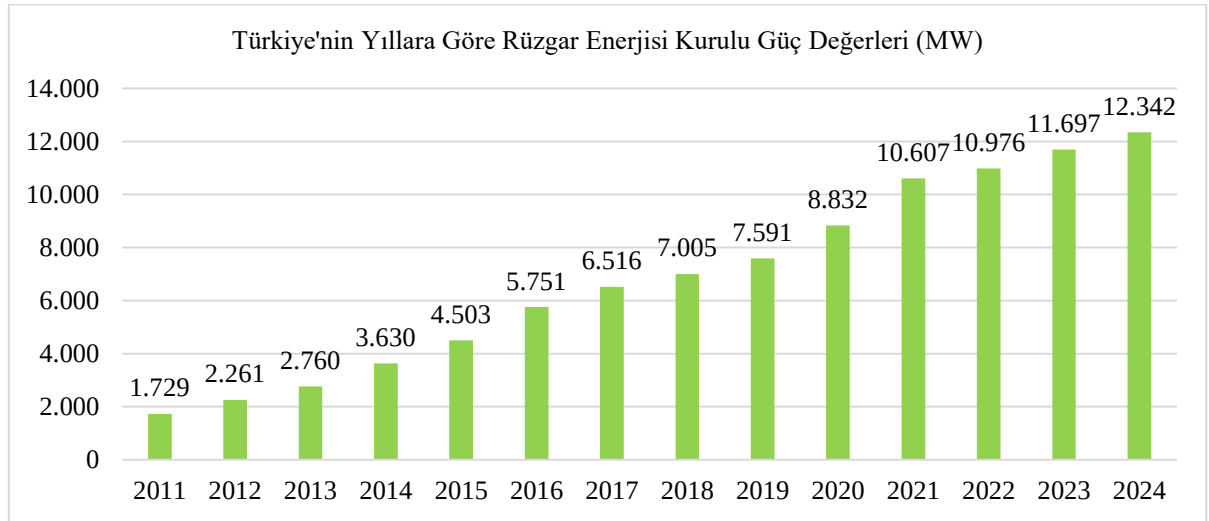
Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi gibi doğada bulunan temiz bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr, yeryüzünün farklı bölgelerde eşit şekilde ısınmaması ve soğumaması sonucu oluşan kuvvetlerin etkisiyle meydana gelen hava hareketleridir [85]. Yer yüzeyinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına ve sonuç olarak havanın hareketine neden olmaktadır. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %2'si rüzgâr enerjisine dönüşmektedir [79]. Rüzgâr enerjisi, RT teknolojisindeki gelişmeler ve temiz enerjiye yönelik küresel talebin artmasıyla birlikte önemli ve hızla büyüyen bir YEK olmuştur. Rüzgâr enerjisi dünyanın her yerinde mevcuttur ve bu potansiyelin kullanılması durumunda enerji üretimine ve güvenliğine önemli katkılar sağlayabilir [86].

Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) verilerine göre, yerden 50 metre yükseklikte ve yıllık ortalama rüzgâr hızının 7,5 m/s'nin üzerinde olduğu alanlarda kilometrekare başına 5 MW kapasiteli rüzgâr enerjisi santrali (RES) kurulabileceği ön görülmüştür. Bu doğrultuda, Türkiye'de inşa edilebilecek toplam RES kapasitesi 47.849,44 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyel için gerekli toplam alan, Türkiye yüz ölçümünün %1,30'u kadardır. Rüzgâr enerjisi potansiyeline ilişkin genel görünüm Şekil 3.6'da sunulmuştur [84].



Şekil 3.6. Türkiye rüzgâr potansiyeli haritası [84]

2024 Ağustos ayı itibariyle Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu güç değeri 12.342 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise % 10,81'dir [80]. Türkiye'nin 2011-2024 yılları arası rüzgar enerjisi kurulu güç değerleri Şekil 3.7'de verilmiştir.

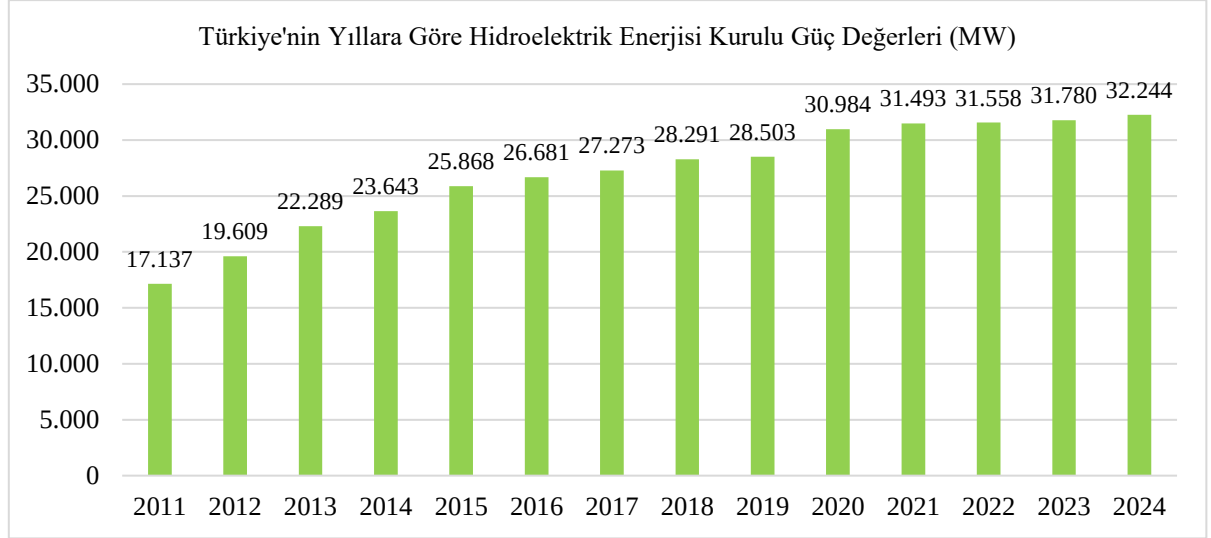


Şekil 3.7. Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi [84]

3.1.3. Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji, suyun kinetik ve potansiyel enerjisinden yararlanılarak elde edilen bir enerji türüdür. Hidrolik enerji için su akıntılarının hareket gücü veya nehir suları önünde setler yapılarak oluşturulan barajlardaki suyun potansiyel gücü kullanılır. Su, belirli bir yükseklikten aşağı doğru akarken potansiyel enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür ve bu enerji önce türbinler aracılığıyla mekanik enerjiye sonra da generatörlerde elektrik

enerjisine dönüştürülür [87]. Hidrolik enerji, yaygın bir şekilde kullanılan temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Türkiye'nin Ağustos 2024 sonu itibariyle hidrolik enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 32.244 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %28,25'dir [80]. Türkiye'nin 2011-2024 yılları arası rüzgâr enerjisi kurulu güç değerleri Şekil 3.8'de verilmiştir.



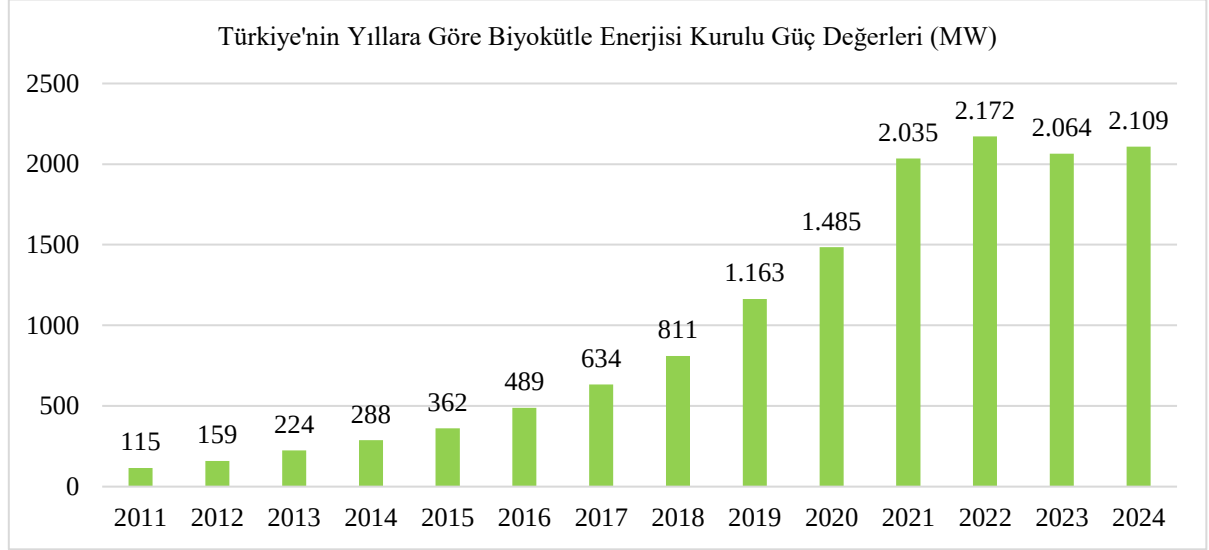
Şekil 3.8. Türkiye'nin hidroelektrik enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi [84]

3.1.4. Biyokütle Enerjisi

Biokütle, yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez aracılığıyla kimyasal enerjiye dönüştürüp depolaması sonucu oluşan ve canlı organizmaların kökenini oluşturan organik madde kaynaklarıdır [88]. Dünyanın her yerinde biyokütlenin sürekli oluşması, erişilebilir olması ve doğal bir enerji kaynağı olmasından dolayı önemli bir değere sahiptir [89]. Biyokütle, biyoyakıt ve biyoenerji kavramları biyolojik atıklardan oluşmalarından dolayı birbirleriyle etkileşim halindedir ve çok geniş alana sahip YEK'lerdir [90]. Her yerde üretilebilen bu kaynaklar elektrik, ısınma ve ulaşım gibi alanlarda kullanılabilirler [91].

Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre toplanabileceği değerlendirilen atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3,9 MTEP/yıl'dır (MTEP-Mega Ton Eşdeğer Petrol). Türkiye'nin biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç değeri 2024 Ağustos ayı itibariyle 2.109 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %

1,85'dir [80]. Türkiye'nin 2011-2024 yılları arası biyokütle enerjisi kurulu güç değerleri Şekil 3.9'da verilmiştir.

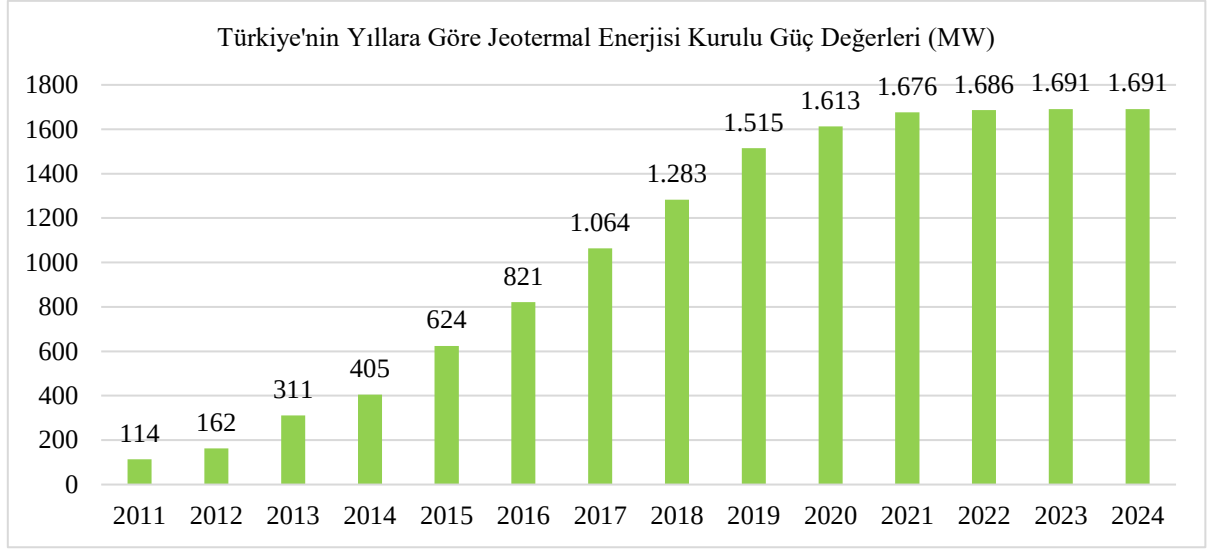


Şekil 3.9. Türkiye'nin biyokütle enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi [84]

3.1.5. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun farklı derinliklerinde biriken ısı ve basıncın etkisiyle oluşan; sıcak su, buhar ve gazlar aracılığıyla yüzeye ulaşan, bölgenin ortalama atmosferik sıcaklığının daima üzerinde olan bir ısı enerjisidir. Bu enerji, çevresindeki normal yerüstü ve yeraltı sularına kıyasla daha fazla mineral, tuz ve gaz içermektedir [92, 93]. Jeotermal enerjinin tespiti ve üretimi kolaydır. Sağlık, tarımsal üretim ve elektrik üretimi gibi bir çok alanda kullanılabilir kaynaktır [94].

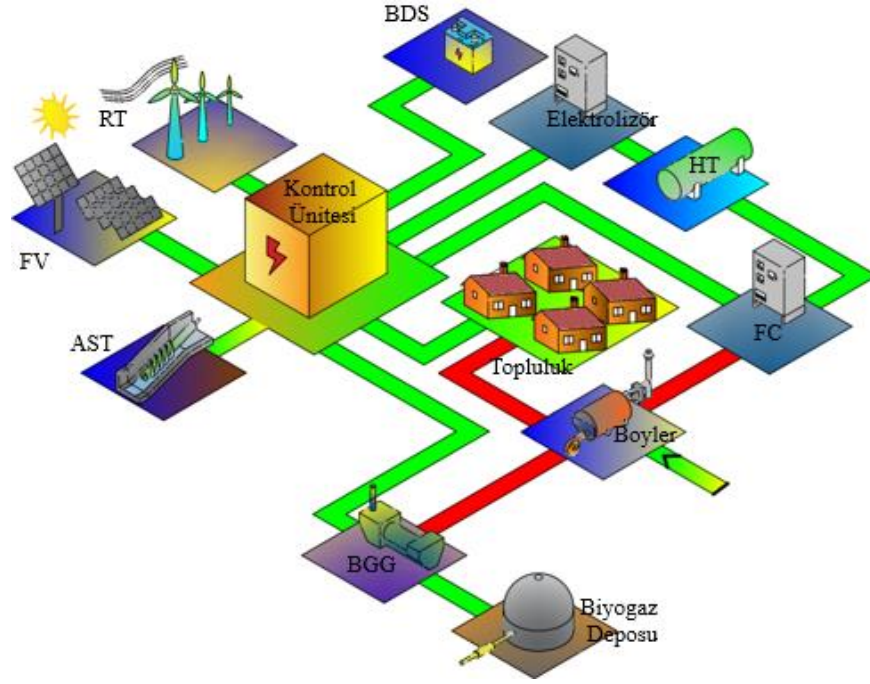
Türkiye'nin jeotermal enerjisine dayalı kurulu güç değeri 2024 Ağustos ayı itibarıyla 1.691 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise % 1,48'dir [80]. Türkiye'nin 2011-2024 yılları arası jeotermal enerjisi kurulu güç değerleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Türkiye'nin jeotermal enerjisi kurulu güç değerlerinin yıllara göre değişimi [84]

3.2. Mikro Şebekeler ve Bileşenleri

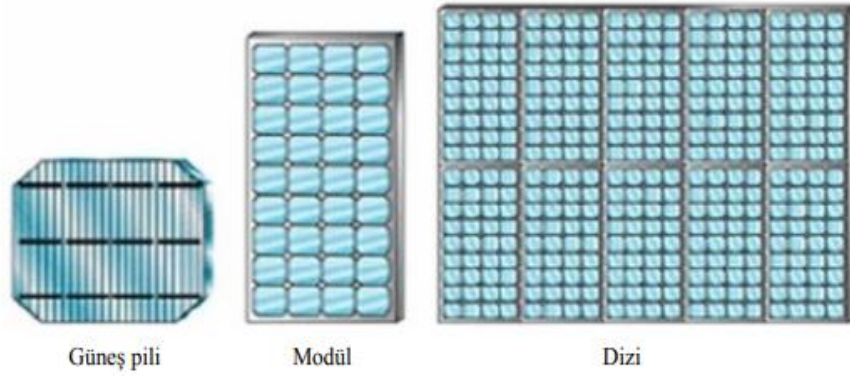
MŞ'ler, birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanıldığı ve optimize edildiği sistemlerdir. Birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanılması, herhangi bir kaynağın yetersiz kaldığı ya da devre dışı olduğu durumlarda diğer kaynakların devreye girerek enerji talebini karşılaması ve böylece güç istikrarını sağlaması amacıyla tercih edilir [95]. Şebekeden bağımsız MŞ'ler, kuruldukları bölgenin mevcut YEK'lerini kullanarak enerji ihtiyaçlarını karşılayan çevre dostu sistemlerdir. Dünya genelinde güvenilir ve sürdürülebilir MŞ sistemlerine geçiş, hibrit sistemlerin sunduğu teknik ve ekonomik avantajlar ile fosil kaynakların hızla tükenmesi nedeniyle önem kazanmaktadır [96]. MŞ'lerin yapısal şeması Şekil 3.11'de sunulmuştur.



Şekil 3.11. MŞ'lerin gelen yapısı

3.2.1. FV Sistemler

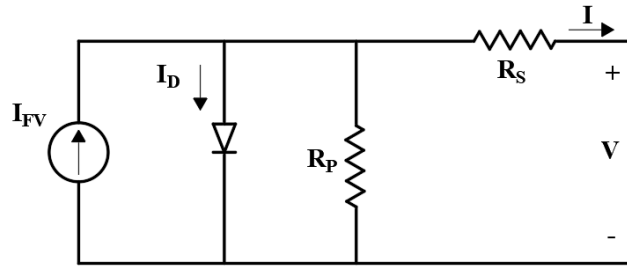
FV paneller güneş enerjisini fotovoltaiik etkiye dayanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. FV paneller, yaklaşık 25-30 cm² büyüklüğünde kare alanlara sahip hücrelerden oluşur. Standart test koşulları altında bir FV hücresi yaklaşık 1W güç üretir [97]. Güneş pillerinin güç çıkışını artırmak amacıyla, piller birbirine paralel veya seri bağlanarak bir yüzeye monte edilir; bu yapıya güneş pili modülü veya FV modülü denir. İhtiyaç duyulan güç miktarına bağlı olarak, modüller paralel veya seri bağlantılarla birleştirilerek birkaç watt'tan mega watt'lara kadar diziler oluşturulabilir [98]. Şekil 3.12'de güneş pili, modül ve dizi görünümü verilmiştir.



Şekil 3.12. Güneş pili, modül ve diziye ait görünüm [98]

FV paneller, güneş enerjisi potansiyelinden faydalanmak için her yerde kolaylıkla kurulabilen çevre dostu ekonomik sistemlerdir. FV teknolojisindeki son gelişmeler, güneş enerjisi sistemlerinin (GES) verimliliğini ve uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmıştır [99].

Bir FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi, birbirlerine paralel bağlı akım kaynağı, direnç ve diyot ile bunlara seri bağlı bir dirençten oluşmaktadır [83]. Bir fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Eşdeğer hücre modeli

Eşdeğer güneş hücresi devresinde I_{FV} güneş ışığı tarafından üretilen elektrik akımını, I_D diyot üzerinden geçen akımı, R_S yarı iletken ile metal kontaklar arasındaki temas yüzeyinden kaynaklanan direnç değerini ve R_P ise yarı iletken malzemedeki yapısal mikroskobik kusurları (çatlak, kırılma, vb.) ifade eden direnç değerini temsil etmektedir.

Güneş hücresinde üretilen toplam elektrik akımı (I_{FV}) ise, bu parametreler dikkate alınarak Denklem 3.1 ile ifade edilir.

$$I_{FV} = \left(I_{SC} + K_i(T - T_{ref}) \right) \cdot \lambda / 1000 \quad (3.1)$$

Bu denkleme göre, güneş hücresinin performansı ve akım-gerilim karakteristiği, hücredeki ışıyım düzeyi, sıcaklık ve devredeki direnç elemanlarının etkisine bağlı olarak değişir. Burada, λ (kW/m²) ışıyımı, I_{SC} güneş pilinin 25°C'deki kısa devre akımını, K_i güneş pilinin kısa devre akımı sıcaklık katsayısını ve T ise güneş pilinin Kelvin cinsinden çalışma sıcaklığını temsil etmektedir. Ters doyum akımı (I_{rs}) Denklem 3.2'deki gibidir.

$$I_{rs} = I_{SC} / \left(e^{\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{N_s \cdot k \cdot A \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Burada, V_{oc} güneş pilinin açık devre gerilimini, q elektron yükünü, N_s ise güneş pili modülündeki seri bağlı modüllerin sayısını temsil etmektedir. Ayrıca k Boltzmann sabitini ve A güneş pilinde kullanılan malzemenin ideallik katsayısını belirtir. Pile uygulanan sıcaklık değeri, doyum akımının değerini etkiler. Doyum akımının (I_S) hesaplanması Denklem 3.3'teki gibidir. Bu denklemde, T_{ref} güneş pilinin referans sıcaklığını ve E_g ise güneş pilinde kullanılan yarı iletkenin bant aralığı enerjisini ifade eder.

$$I_S = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{(q \cdot E_g)}{A \cdot k (1/T_{ref} - 1/T)}} \quad (3.3)$$

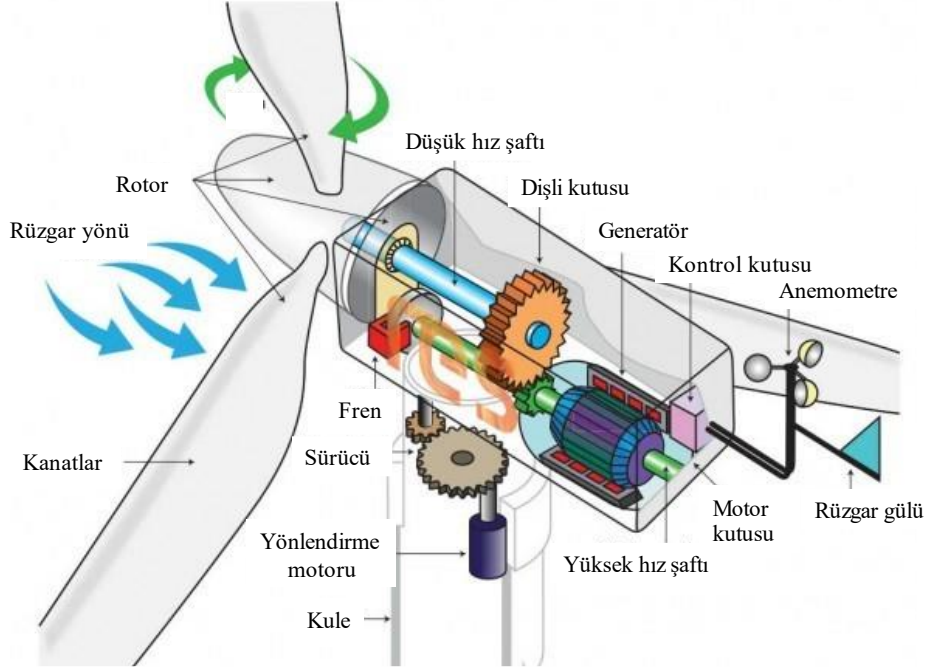
FV hücresinin toplam akımı (I) Denklem 3.4'teki gibi ifade edilir.

$$I = I_{PV} - I_S \left[e^{\left(\frac{q(V + I \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (3.4)$$

3.2.2. Rüzgâr Türbinleri

RT'ler, rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek generatöre ileten sistemlerdir. Rüzgârın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye dönüştürülür.

Rotor milinin dönme hareketi yardımcı teçhizatlar aracılığıyla hızlandırılarak generatöre iletilir. Generatörden üretilen elektrik enerjisi ise akülerde depolanabilir veya doğrudan alıcılara iletilir [85]. Kapasiteleri 8 MW'a ulaşan büyük RT'ler artık hem karada hem de denizde yaygın olarak kurulmakta ve enerji dağıtım ağlarına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [100]. RT'nin yapısı Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. RT'nin yapısı [101]

RT'lerin verimli çalışabilmesi ve uygun kapasite ile enerji üretmesi için öncelikle kurulacak yerin doğru seçilmesi ve rüzgâr potansiyelinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu süreçte, türbinin kapasitesini ve verimliliğini belirlemek, ne kadar enerji üretileceğini hesaplamak ve yıllık kullanım süresini öngörmek için rüzgâr hızına bağlı olarak kinetik enerji ve rüzgâr gücünün doğru bir şekilde hesaplanması oldukça önemlidir. Rüzgârın sahip olduğu enerji, hava ile rotor kanatları arasındaki sürtünme etkileri göz ardı edilerek Denklem 3.5'e göre hesaplanır.

$$E_R = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3 \cdot t \quad (3.5)$$

Burada A akışa dik alanı (m^2), ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3), v havanın hızını (m/s), t ise zamanı temsil etmektedir. Rüzgâr gücü ise Denklem 3.6'ya göre hesaplanır.

$$P_R = \frac{E_R}{t} = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3.6)$$

Rüzgârın sahip olduğu gücün tamamı türbin tarafından kullanılamaz. Türbin tarafından kullanılabilen güç miktarı (P_T), toplam rüzgâr gücünün (P_R) Betz Limiti olarak bilinen bir katsayıyla (C_p) çarpılması ile hesaplanır (Denklem 3.7). C_p değeri maksimum 0.593 değerine sahip olabilir.

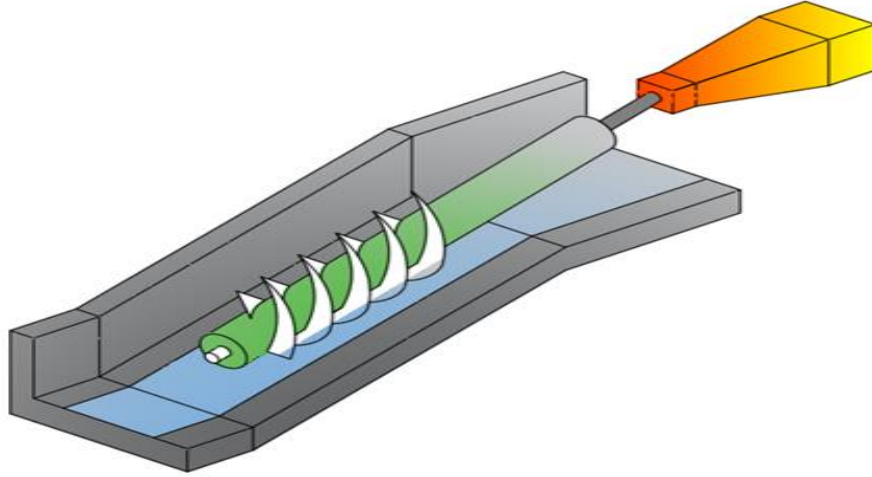
$$P_T = C_p \cdot P_R \quad (3.7)$$

3.2.3. Hidrolik Türbinler

Hidroelektrik teknolojileri, nehirler, akıntılar, göller veya diğer su kütlelerinin doğal akışını kontrol etmek ve enerji üretmek amacıyla barajlar veya yönlendirme yapıları gibi mühendislik çözümleri kullanır. Bu süreç, suyun potansiyel enerjisini kinetik enerjiye dönüştürerek elektrik üretmeyi sağlar ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutar. En yaygın olarak kullanılan üç tür hidroelektrik santrali (HES) vardır: depolamalı sistemler, nehir tipi sistemler ve pompalı rezervuar sistemlerdir [102].

Hidrolik türbinler, suyun etkisiyle çalışma şekillerine göre iki ana kategoriye ayrılabilir: Etki (aksiyon) ve tepki (reaksiyon) türbinleri. Aksiyon tipi türbinler genellikle yüksek düşüler için tercih edilir ve yaygın olarak kullanılan türleri arasında Pelton, Turgo ve Crossflow (Michell-Banki) türbinleri bulunur. Reaksiyon tipi türbinlere örnek olarak ise Francis, Kaplan ve Water Wheel gibi türbinler verilebilir [103]. Son yıllarda düşük düşü ve düşük akış koşullarında verimli çalışan Arşimet burğu türbinleri de (Archimedes Screw Turbine, AST) yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır [104].

Genel yapısı Şekil 3.15'te gösterilen AST'ler hidroelektrik enerjisi üretimi için başta Avrupa olmak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. AST'ler, 0,1-10 m³/s su debisine ve 1-10 m kot farkına sahip tüm dere ve nehirlerde kullanılabilir [105]. AST'lerin kaplan türbinlerine kıyasla maliyeti yaklaşık %10 daha az, yıllık sermaye maliyeti %22 daha ucuz, enerji üretim kapasitesi ise %15 daha fazladır [106].



Şekil 3.15. AST'nin genel yapısı

Bir HES'ten elde edilebilecek güç, suyun net hidrolik yüksekliğine, debisine ve yoğunluğuna bağlıdır. Net hidrolik yükseklik kavramı, türbin öncesindeki suyun yüksekliği ile türbin sonrasındaki yükseklik arasındaki farkı ifade eder. Bu fark, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümünde kritik bir rol oynar. Suyun debisi, belirli bir zamanda santraldan geçen su miktarını belirtir ve enerji üretim kapasitesini doğrudan etkiler. Ayrıca suyun yoğunluğu, kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşüm verimliliğini etkiler. Bu üç faktör, HES'lerin toplam enerji üretim kapasitesini belirleyen temel unsurlardır. Su debisi ile türbin giriş ve çıkış gücü büyüklükleri sırasıyla Denklem 3.8, 3.9 ve 3.10'a göre hesaplanır.

$$Q=V.A \quad (3.8)$$

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

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

Burada Q su debisini (m^3/s), V suyun hızını (m/s), A suyun geçtiği yüzey alanını (m^2), $P_{\text{giriş}}$ türbin giriş gücünü (watt), ρ suyun yoğunluğunu (kg/m^3), g yer çekim ivmesini (9.81 m/s^2), H net hidrolik yüksekliğini (m), $P_{\text{çıkış}}$ türbin çıkış gücünü (watt), η ise verimi ifade eder [107].

3.2.4. Biyogaz Generatörleri

Dizel, benzin, doğalgaz, biyogaz gibi yakıtlarla çalışan generatörler, kullanılan yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisini önce mekanik enerjiye, ardından da elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu generatörlerin her biri belirli uygulamalar ve ihtiyaçlar için tasarlanmıştır. BGG’de yakıt olarak biyogazın kullanılmasıyla elektrik enerjisi elde edilir. BGG, gaz motoru, generatör ve otomasyon panoları olmak üzere 3 ana bölümden oluşur [108]. BGG görsel olarak Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. BGG’nin yapısı [109]

Gübre toplama verimliliği %70, bir kg ıslak gübre gaz verimi 0,036 m³, biyogaz kalofirik değeri 4700 kcal/m³, dönüşüm faktörü 860, BGG motor verimi %28 ve generatör verimi %95 olarak alınmıştır [31]. Toplam gaz verimi ve enerji verimi Denklem 3.11 ve 3.12’ye göre hesaplanır.

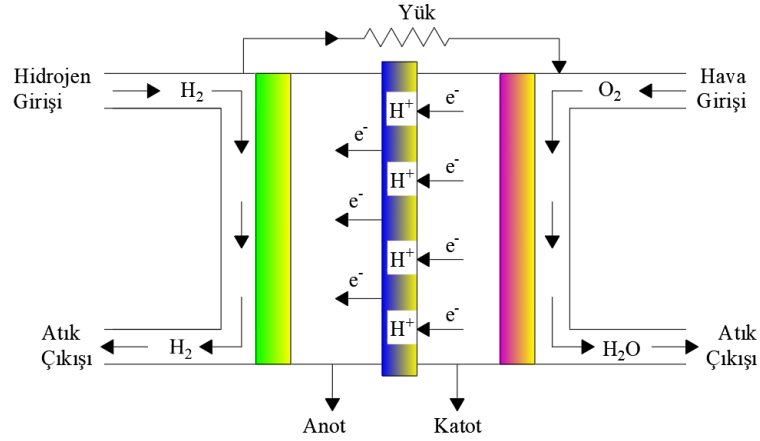
BGG’lerde toplam gaz verimi ve enerji verimi Denklem 3.11 ve 3.12’ye göre hesaplanır.

$$\text{Toplam Gaz Verimi (m}^3\text{)} = (\text{Islak gübre verimi}) \times (\text{Toplam gübre miktarı (kg/gün)}) \quad (3.11)$$

$$\text{Enerji Verimi (kWh/yıl)} = (\text{Toplam gaz verimi}) \times (\text{Biyogaz kalofirik değeri}) \times (\text{Generatör verimi}) / (\text{Dönüşüm faktörü}) \quad (3.12)$$

3.2.5. Yakıt Hücreleri

FC hidrojen gazından kimyasal reaksiyonla elektrik enerjisi üreten cihazlardır. FC'lerin verimliliği yüksek olmakla beraber maliyetleri oldukça fazladır. Şekil 3.17'de FC hücresinin şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.17. FC'nin şematik diyagramı

Hidrojen gazı, anot üzerinde elektron ve iyonlarına ayrılır. Elektronlar harici bir elektrik devresinde hareket ederek elektrik enerjisine dönüşür. İyonlar ise elektrolitten geçerek katotta oksijenle birleşir ve su oluşur. Anot ve katot arasında meydana gelen bu kimyasal reaksiyon Denklem 3.13, 3.14 ve 3.15'te verilmiştir [110].

Anot Reaksiyonu:



Katot Reaksiyonu:

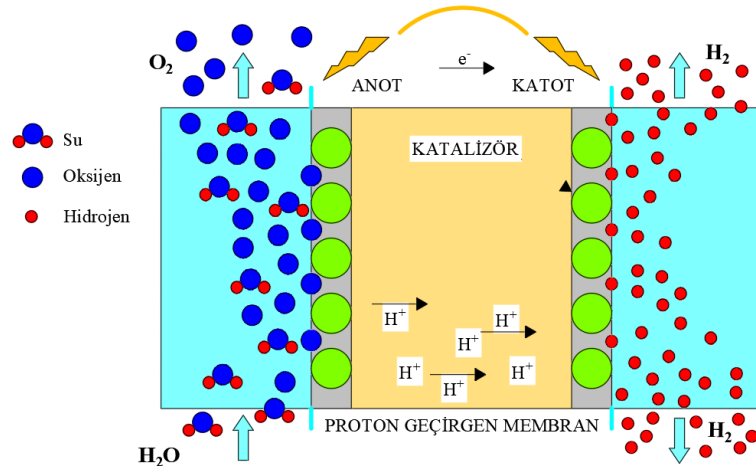


Proton değişim membranlı (Proton Exchange Membrane, PEM), fosforik asitli, erimiş karbonatlı, alkali ve katı oksitli yakıt hücreleri birbirinden farklı özelliklere sahip FC

türleridir. Bu teknolojiler arasındaki temel fark, tasarımını ve çalışma karakteristiklerini büyük ölçüde etkileyen elektrolit malzemesidir. Tüm FC'ler, doğru akım üretir ve hücre sayısına bağlı olarak belirli bir hücre gerilimi sağlar. Bununla birlikte gerilim, yük koşullarına ve FC'nin zamanla aşınmasına bağlı olarak değişiklik gösterebilir [95].

3.2.6. Elektrolizör

Elektroliz, elektrik enerjisi kullanarak suyu hidrojen ve oksijene ayırma işlemidir [111]. Elektrolizörler, elektroliz işlemi yoluyla hidrojen üretir. PEM elektrolizörler, protonların geçişine izin veren polimer bir membran aracılığıyla çalışır. Sistemde, membranın bir tarafında suyun elektrolizi gerçekleşir. Bu süreçte suyun bileşenlerine ayrışmasıyla anotta oksijen, katotta ise hidrojen oluşur. Ayrıca membran üzerinden geçen suyun bir kısmı katot bölgesinde serbest hale gelir [112]. PEM elektrolizörlerinin şematik diyagramı Şekil 3.18'de verilmiştir [112].



Şekil 3.18. PEM elektrolizörün çalışma prensibi

PEM elektrolizörlerde hidrojen ve oksijen üretimi esnasında gerçekleşen reaksiyonlar Denklem 3.16, 3.17 ve 3.18'de verilmiştir [113].

Anot reaksiyonu;



Katot reaksiyonu;



Toplam reaksiyon;



3.2.7. Bataryalar

Kimyasal enerjiyi depolayarak gerektiğinde elektrik enerjisine dönüştüren depolama birimlerine pil denir. Birden fazla pilin bir araya gelmesiyle oluşan gruplara ise batarya adı verilmektedir [114]. Bataryaların özellikleri, kullanılan hücrelerin türü, hücrelerin sayısı, hücrelerin seri-paralel bağlantı yapısı ve bataryadaki diğer donanımsal bileşenler tarafından belirlenir. Bataryalar, kullanılan elektrot ve/veya elektrolit türüne göre; kurşun-asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit, lityum-iyon ve lityum-sülfür bataryaları olarak sınıflandırılır [115]. Bataryaların şarj veya deşarj gücünü belirlemek için Denklem 3.19 ve 3.20 kullanır. Şarj periyodunun sonunda mevcut ve bağlı enerji değerleri, Denklem 3.21 ve 3.22 yardımıyla hesaplanır [116].

$$P_{\text{şarj}} = \frac{k \cdot Q_1 \cdot e^{-k\Delta t} + Q \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (3.19)$$

$$P_{\text{deşarj}} = \frac{-k \cdot c \cdot Q_{\text{mak}} + k \cdot Q_1 \cdot e^{-k\Delta t} + Q \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (3.20)$$

$$Q_{1,\text{son}} = Q_1 \cdot e^{-k\Delta t} + \frac{(Q \cdot k \cdot c \cdot P)(1 - e^{-k\Delta t})}{k} + \frac{P \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k} \quad (3.21)$$

$$Q_{2,\text{son}} = Q_2 \cdot e^{-k\Delta t} + Q(1 - c)(1 - e^{-k\Delta t}) + \frac{P \cdot (1 - c)(k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k} \quad (3.22)$$

Burada $P_{\text{şarj}}$ ile $P_{\text{deşarj}}$ bataryaların şarj ve deşarj gücünü, Q_{mak} bataryaların toplam depolama kapasitesini, Q_1 başlangıçta bataryalardaki uygun enerji miktarını (kWh), Q_2 başlangıçta

bataryalardaki bağılı enerji miktarını (kWh), $Q_{1, \text{son}}$ zaman sonundaki bataryalarda uygun enerji miktarını (kWh), $Q_{2, \text{son}}$ zaman sonundaki bataryalarda bağılı enerji miktarını (kWh), Q toplam enerji miktarını (kWh), c depolama kapasitesi oranını, k depolama hızı sabitini ve Δt zaman aralığını (saat) ifade etmektedir.

3.2.8. Hidrojen Tankı

Hidrojen tankı, elektrolizörler aracılığıyla elde edilen hidrojenin depolanması için kullanılan depolama birimidir. Hidrojenin depolanacağı basınç, tankların duvar kalınlığını, boyutunu, ağırlığını, malzeme seçimini ve maliyetleri doğrudan etkiler. Hidrojen depolama tanklarının üretiminde genellikle metal (alüminyum ve çelik), polimer (yüksek yoğunluklu polietilen ve poliamid) ve karbon fiberler olmak üzere üç tür malzeme kullanılır [117].

3.2.9. Dönüştürücüler

Dönüştürücüler, alternatif akımı doğru akıma veya doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen ve gerilim ile frekans değerlerini değiştirebilen cihazlardır. Günümüzde, farklı yük profillerinin gereksinimlerini karşılamak ve güneş, rüzgâr gibi YEK'leri şebekeye entegre etmek için transformatörler tek başına yeterli olmamaktadır. Gerilim dalgalanmaları ve harmonik gibi güç kalitesi sorunlarını çözmek için ek dönüştürücüler gerekmektedir [118]. Dönüştürücüler, güç elektroniği, yenilenebilir enerji sistemleri, taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar gibi alanlarda kritik bir rol oynar [119].

MŞ'lerde DA (doğru akım) ile AA (alternatif akım) baraları arasına invertör ve doğrultuculardan oluşan DA/AA dönüştürücüleri kullanılır. Invertör ve doğrultucu çıkış gücü denklemleri sırasıyla Denklem 3.23 ve 3.24'te verilmiştir [120].

$$P_{\text{invertör}} = P_{\text{DA}} \cdot \eta_{\text{invertör}} \quad (3.23)$$

$$P_{\text{doğrultucu}} = P_{\text{AA}} \cdot \eta_{\text{doğrultucu}} \quad (3.24)$$

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. HOMER Pro Yazılımı

Literatürde, MŞ tasarımı ve optimizasyonu için çeşitli yazılım programları kullanılmaktadır. Bu tezde, literatürde MŞ tasarımı ve optimizasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan yazılımlardan biri olan HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables) Pro yazılımı tercih edilmiştir. HOMER Pro yazılımı, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız MŞ'lerin planlanması ve tasarımı için sıkça kullanılmaktadır [121].

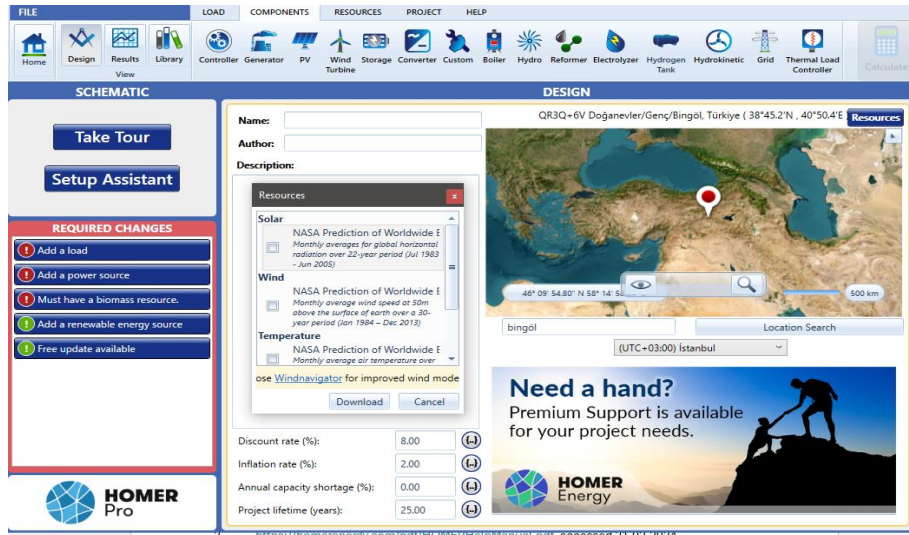
Bu yazılım, yılın her dönemi için enerji dengesi programları yaparak bir sistemin çalışmasını simüle eder. Her dönemde, mevcut elektrik ve termal talebi sistemin o an üretebileceği enerji ile karşılaştırır ve sistemdeki her bileşen için enerji akışlarını hesaplar. Batarya veya yakıtla çalışan generatörlerin yer aldığı sistemlerde, HOMER Pro yazılımı generatörlerin nasıl çalıştırılacağını ve bataryaların şarj edilip edilmeyeceğini de belirler. Bu enerji dengesi programları, değerlendirmek istenilen sistemlerin yapılandırılması için kullanılır. Ayrıca, bir bileşenin istenilen şartlar altında elektrik talebini karşılayıp karşılayamayacağını yani uygulanabilirliğini belirler ve sistemin ömrü boyunca kurulum ve işletim maliyetlerini tahmin eder. Sistem maliyeti programları, sermaye, değiştirme, işletme, bakım, yakıt ve faiz gibi maliyet kalemlerini kapsar [122].

4.1.1. Mikro Şebekelerin HOMER Pro Yazılımı ile Tasarımı

HOMER Pro yazılımında MŞ'lerin tasarımı bir süreç olarak gerçekleştirilir. Sistem tasarımı için proje tanımlaması, kaynak verilerinin girişi, bileşenlerin seçimi, ekonomik parametrelerin tanımlanması, sistem simülasyonu, optimizasyon, sonuçların analizi ve raporlama gibi temel adımlar izlenir.

4.1.2. Proje Tanımlaması

HOMER Pro yazılımı ilk açıldığında yeni bir projenin yükleneceği ana sayfa görüntülenir. Burada projenin ismi ve konumu gibi temel bilgiler girilir. Oluşturulacak sistemin yük talebi belirlenir ve sisteme yük girişi yapılır. Sistem tasarımında kullanılacak olan elektrik, termal veya hidrojen yükleri “LOAD” menüsünden seçilir. Yük bileşenlerinin günlük veya yıllık yük profilleri manuel olarak girilebilir veya sistemde mevcut olan yükler seçilebilir. Şekil 4.1’de HOMER Pro yazılımının giriş ekranı, Şekil 4.2’de ise yük ayarlarının yapıldığı pencere verilmiştir.



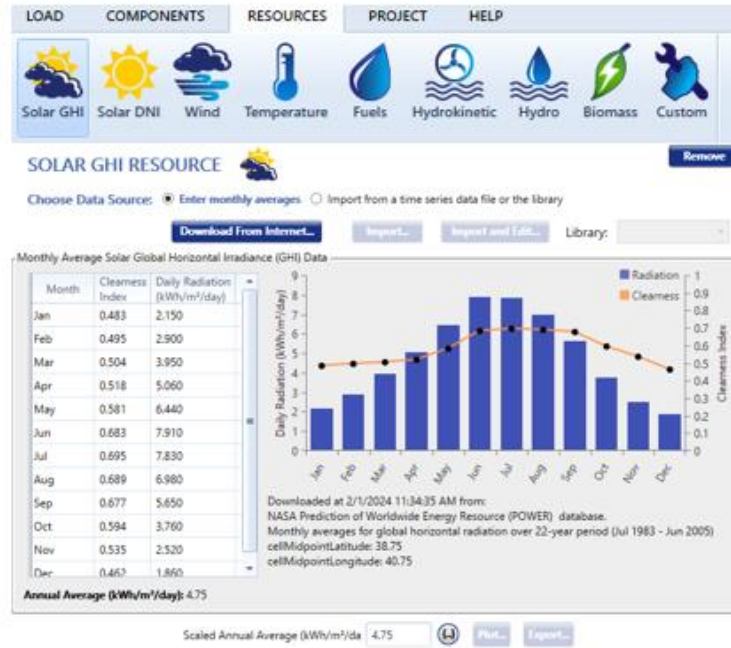
Şekil 4.1. HOMER Pro yazılımının giriş ekranı



Şekil 4.2. Yük ayarları giriş ekranı

4.1.3. Kaynak Verilerinin Girişi

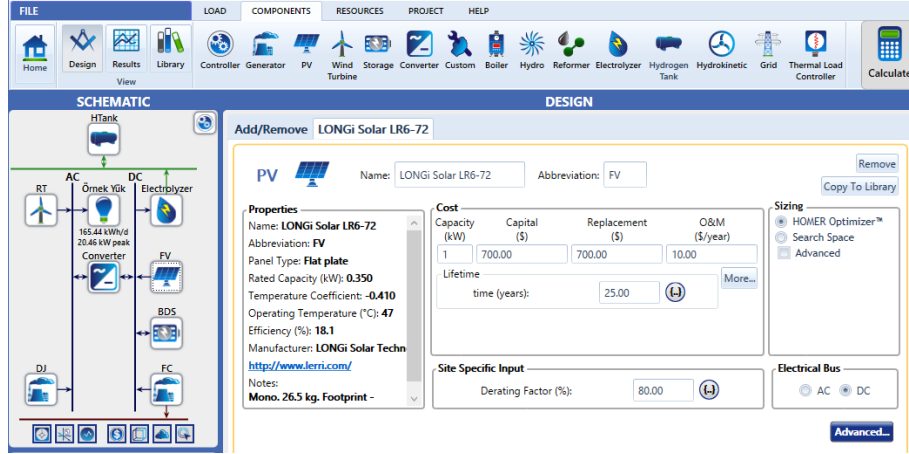
“RESOURCES” menüsünden çalışmanın yapılacağı lokasyona ait güneş radyasyonu ve rüzgâr verileri, HOMER Pro yazılımına entegre edilen NASA veri tabanından temin edilebilir veya manuel olarak girilebilir. Benzer şekilde hidrolik, yakıt ve biyokütle kaynak verileri bu menü altında manuel olarak girilir. Kaynak veri giriş penceresi Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Kaynak veri giriş ekranı

4.1.4. Bileşenlerin Seçimi ve Ekonomik Parametrelerin Tanımlanması

Şekil 4.4’te sistem bileşenlerinin seçimi ve ekonomik parametrelerin girildiği ekran görülmektedir. Bu kısımda enerji üretim bileşenleri olarak FV, RT, FC, elektrik şebekesi, hidroelektrik türbinler, generatörler ve mikro türbinler bulunmaktadır. Enerji depolama birimleri ise volanlar, aküler, hidrojen tankı vb. bileşenlerden oluşmaktadır. Sisteme eklenmek istenilen bileşen seçilir ve “COST” menüsü altında seçilen bileşene ait sermaye, dönüştürme, bakım ve onarım değerleri girilir.



Şekil 4.4. Bileşenlerin seçimi ve ekonomik parametrelerin giriş ekranı

4.1.5. Sistem Simülasyonu ve Optimizasyonu

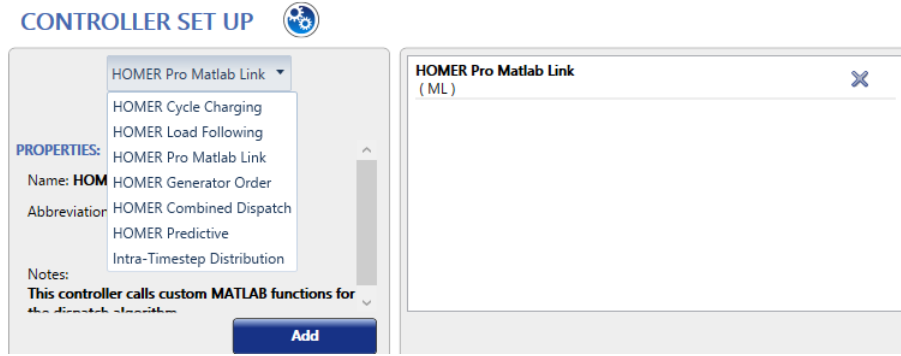
HOMER Pro yazılımı, tasarlanan MŞ'ler için farklı stratejiler kullanarak simülasyonları gerçekleştirebilir. Her bir stratejinin izlediği metot farklıdır ve sistemin ayrı yönlerini optimize etmeye çalışmaktadır. HOMER Pro yazılımında simülasyon için kullanılan bazı stratejiler şunlardır [122, 123].

Yük Takibi (Load Following, LF): Bu stratejinin amacı, yenilenebilir kaynakların kullanımına öncelik vermek, yük talebini mümkün olduğunca uzun süre karşılamak ve sistemdeki kesinti süresini en aza indirmektir. Bu stratejiye göre, bir generatör çalışması gerektiğinde minimum yük koşullarında çalışacaktır. Bataryalar ise YEK'lerden elde edilen enerji ile şarj edilir.

Döngü Şarjı (Cycle Charging, CC): Bu strateji kapsamında, bir generatör devreye girdiğinde tam kapasite ile çalışacak ve fazla güç bataryaları şarj etmek için kullanılacaktır.

Generatör Siparişi (Generator Order, GO): HOMER Pro yazılımı bu strateji ile tanımlanmış bir generatör kombinasyonları sırasını izler ve işletme kapasitesini karşılayan listedeki ilk kombinasyonu kullanır. Bu strateji, FV, RT, dönüştürücü ve depolama bileşenlerini içeren sistemleri destekler.

MATLAB Bağlantısı (MATLAB Link, ML): Bu strateji, kullanıcı tarafından MATLAB ortamında oluşturulan stratejiyi okur ve uygular. Programda kullanılan stratejilere ait giriş ekranı Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.5. Stratejilere ait giriş ekranı

HOMER Pro yazılımı belirlenen parametreler girildikten sonra optimizasyon için çeşitli sistem yapılandırmalarını karşılaştırır. Belirlenen stratejiye göre teknik açıdan verimli ve en uygun maliyetli sistem yapılandırmasını belirler.

4.1.6. Sonuçların Analizi

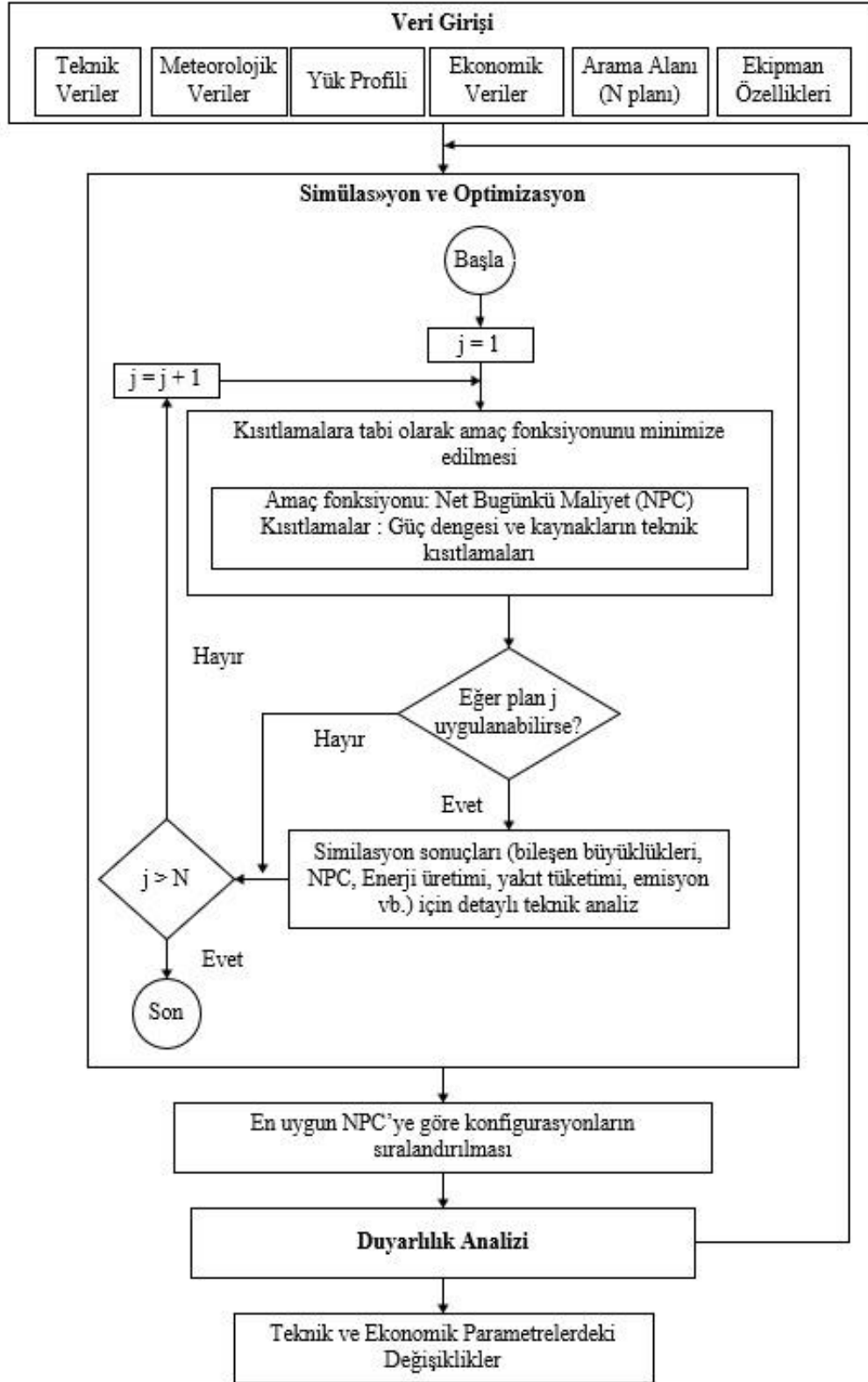
HOMER Pro yazılımında simülasyon çalıştırılarak, farklı performans verileri hesaplanmakta ve bu veriler ışığında enerji sistemlerinin kapsamlı bir analizi yapılmaktadır. HOMER Pro yazılımı simülasyon sonuçlarını ayrıntılı raporlar şeklinde sunar. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi oluşturulabilecek farklı senaryoların karşılaştırmasını yaparak en uygun senaryoyu belirler.

Optimization Results														
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.														
Architecture									Cost			System		
LR6-72 (kW)	Wind	Gen (kW)	1kWh LA	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total (L/y)			
33.4	1	23.0	101	11.7	LF	\$228,718	\$0.293	\$10,134	\$97,705	84.9	3,384			
121	1	23.0	59	12.6	CC	\$310,398	\$0.398	\$19,217	\$61,972	52.3	9,367			
96.8	1	23.0	266	21.2	CC	\$316,485	\$0.406	\$9,048	\$199,523	100	0			
96.8	1	23.0		11.6	CC	\$486,958	\$0.624	\$29,022	\$111,771	37.3	16,36			
	1	23.0			CC	\$542,002	\$0.694	\$38,793	\$40,500	12.4	22,71			

Şekil 4.6. Optimizasyon sonuçları ekranı

Simülasyon sonucunda sistemin yıllık enerji üretimi, enerji tüketimi, yakıt tüketimi, karbondioksit emisyonları ve bu süreçte oluşan toplam maliyetler gibi kritik parametreler elde edilerek ayrı ayrı analizler yapılmaktadır. Bu analizler, enerji sisteminin ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilirliğini belirlemek, farklı tasarım ve işletme senaryolarını karşılaştırmak ve yatırımın geri dönüş süresini hesaplamak için önemli veriler sağlar. Ayrıca, bu sonuçlar, projenin teknik ve ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesi açısından büyük öneme sahip olup gelecekteki yatırım kararlarının optimize edilmesine katkıda bulunur.

Yukarıda belirtilen adımlar izlenerek, HOMER Pro yazılımı ile bir MŞ'in tasarımı ve optimizasyonu sağlanabilir. HOMER Pro yazılımı için optimizasyon akış şeması Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. HOMER Pro yazılımı için optimizasyon akış şeması [22]

4.2. Mikro Şebekelerin HOMER Pro Yazılımı ile Tasarımı

4.2.1. Sistem Sınırlamaları

MŞ tasarımının doğruluğu ve güvenilirliği büyük ölçüde bileşenlerinin matematiksel hesaplamalarındaki hata payına bağlıdır. Bu hata payı, çeşitli bileşenlerin performans ve maliyet değerlendirmelerini etkileyen belirsizliklerden kaynaklanabilir. Hava koşullarına bağlı dalgalanmalar güneş ve rüzgâr gibi YEK’lerde enerji üretiminde istikrarsızlığa yol açabilir. Şebekeden bağımsız MŞ’ler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli kaynaklara ve depolama kapasitesine sahip olmalıdır. Ancak maliyet kısıtlamaları nedeniyle BDS’nin kapasitesi kısıtlanabilir ve bu da enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde potansiyel olarak kesintilere yol açabilir. Bu sistemler, sistem karmaşıklığını artıran birden fazla enerji kaynağı ve depolama birimi içerebilir. MŞ içindeki bileşen arızaları, enerji üretiminde kesintilere neden olabilir. Ayrıca yanlış yük talebi tahminleri veya tasarım aşamasında kapasite planlamasındaki hatalar yetersiz enerji arzına yol açabilir.

Bu sınırlamalar ve potansiyel hatalar, MŞ’lerin tasarımı ve işletimi sırasında ele alınması gereken zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Etkili enerji yönetim sistemleri ve stratejilerinin uygulanması bu sorunların hafifletilmesine yardımcı olabilir.

4.2.2. Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi

FV sistemlerin modellenmesi, HOMER Pro yazılımının sunduğu kapsamlı veri tabanı ve kullanıcı dostu arayüzü sayesinde oldukça kolaydır. FV sistemlerin modellenmesi sırasında, güneş enerjisi verileri, yük profilleri, bileşen maliyetleri ve teknik parametreler dikkate alınarak detaylı bir analiz yapılır.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, HOMER Pro yazılımında FV sistemin teknik özelliklerini girmek için öncelikle panel kapasitesi ve panel ömrü gibi veriler girilmelidir. Bununla birlikte, sistemin kurulum maliyeti, yıllık bakım maliyeti ve diğer ekonomik parametreler de modele dahil edilir. Şekil 4.9’daki gibi güneş enerjisi kaynakları için bölgesel veriler, yazılım tarafından otomatik olarak NASA ve NREL veri tabanlarından çekilebilmekte ya da manuel olarak kullanıcı tarafından eklenebilmektedir.

PV  Name: Abbreviation:

Properties

Name: **PV**
 Abbreviation: **PV**
 Panel Type: **Flat plate**
 Rated Capacity (kW): **20**
 Temperature Coefficient: **-0.410**
 Operating Temperature (°C): **47**
 Efficiency (%): **18.1**
 Manufacturer: **LONGi Solar Techn**
<http://www.lerri.com/>
 Notes:
Mono. 26.5 kg. Footprint -

Cost

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	700.00	700.00	10.00

Lifetime time (years):   [More...](#)

Site Specific Input

Derating Factor (%):  

Electrical Bus

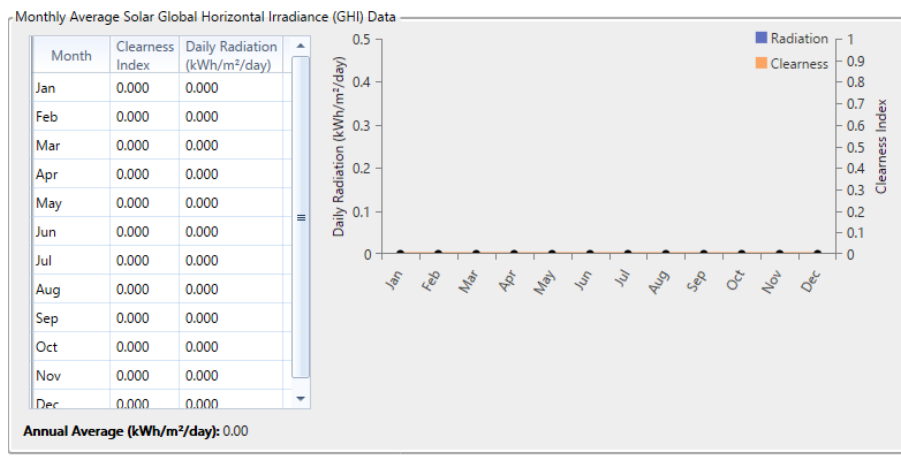
☐ AC ☒ DC

Sizing

☒ HOMER Optimizer™
☐ Search Space
☐ Advanced

[Remove](#) [Copy To Library](#)

Şekil 4.8. FV panelin teknik ekonomik değerleri için giriş ekranı



Şekil 4.9. Aylık ortalama güneş radyasyonu ve netlik indeksi giriş ekranı

FV sistemin modellenmesi sonrasında, HOMER Pro yazılımı simülasyonu çalıştırarak çeşitli performans verilerini hesaplar. Simülasyon sonucunda sistemin yıllık enerji üretim analiz sonuçları elde edilir. Bu analizler, projenin fizibilitesini değerlendirmek için büyük önem taşımaktadır.

HOMER Pro yazılımı, bir FV dizisinin güç çıkışını çeşitli çevresel ve sistem parametrelerine bağlı olarak hesaplamaktadır. Bu hesaplama, Denklem 4.1’de verilen formüle göre hesaplanmaktadır [34].

$$P_{FV} = Y_{FV} \cdot f_{FV} \left(\frac{\overline{G_T}}{\overline{G_{T,STC}}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (4.1)$$

Burada Y_{FV} test koşulları altındaki güç çıkışı (kW), f_{FV} FV değer kaybı faktörünü (%), $\overline{G_T}$ geçerli zaman adımıda FV dizisine düşen güneş ışıınımı miktarını (kW/m²), $\overline{G_{T,STC}}$ standart test koşullarında gelen radyasyon miktarını (kW/m²), α_p güç sıcaklık katsayısını (%/°C), T_c geçerli zaman adımıdaki FV hücre sıcaklığını (°C), $T_{c,STC}$ ise standart test koşulları altında FV hücre sıcaklığını (25°C) ifade etmektedir.

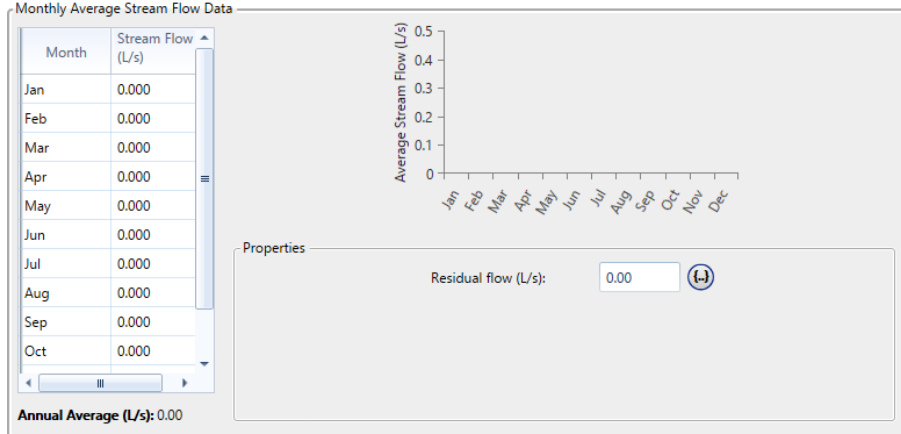
Bu formül, FV sistemlerinin çevresel koşullara, özellikle de sıcaklık ve güneş ışıınımı seviyelerine olan duyarlılığını göz önünde bulundurarak, enerji üretim miktarını daha doğru bir şekilde hesaplamaya olanak sağlar.

Bu parametreler dikkate alınarak yapılan hesaplamalar, FV sistemlerinin farklı iklim koşullarındaki performansını değerlendirmek ve enerji üretimi ile ilgili tahminlerde bulunmak açısından önem taşımaktadır. Böylece, FV sisteminin verimliliği optimize edilerek ekonomik ve teknik fizibilite analizleri daha sağlıklı bir şekilde yapılabilir.

4.2.3. Hidrolik Sistemlerin Modellenmesi

HOMER Pro yazılımı, su kaynağı, debi, düşü yüksekliği, türbin verimliliği ve maliyet gibi birçok parametreyi dikkate alarak hidroelektrik sistemlerin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirir.

Hidroelektrik sistemin modellenmesi için ilk adım, su kaynağının belirlenmesidir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, bölgedeki su kaynağının mevsimsel değişiklikleri de dikkate alınarak su akış hızı verileri HOMER Pro yazılımına girilir. Debi ve düşü yüksekliği, hidroelektrik sistemin üretim kapasitesini belirleyen temel unsurlardır. Bu veriler, suyun yıl boyunca ne kadar enerji üretebileceğini ve hangi dönemlerde enerji üretiminde artış ya da azalma olacağını simüle etmek için kullanılır. HOMER Pro yazılımı, su akışındaki mevsimsel farklılıkları göz önünde bulundurarak sistemin enerji üretimini optimize eder.



Şekil 4.10. Aylık ortalama su akış hızı giriş ekranı

Şekil 4.11’de hidroelektrik türbinin ekonomik ve teknik özelliklerinin girildiği ekran görülmektedir. Türbin kapasitesi, maksimum ve minimum akış oranı, türbin ömrü ve bakım gereksinimleri gibi parametreler sisteme dahil edilir. HOMER Pro yazılımı, su akışına bağlı olarak enerji üretimini maksimuma çıkarmak için bu verileri kullanır ve türbinin performansını analiz eder. Ayrıca türbin verimi ve ekonomik parametreler dikkate alınarak detaylı bir maliyet analizi yapılır.

HYDRO

Name: AST Abbreviation: AST Remove Copy To Library

Economics

Capital Cost (\$): 15,000.00

Replacement Cost (\$): 10,000.00

O&M Cost (\$/yr): 50.00

Lifetime (years): 25.00

Electrical Bus

AC DC

Intake Pipe

Pipe head loss (%): 15.00

Turbine

Available head (m): 4.00

Design flow rate (L/s): 172.00

Minimum flow ratio (%): 50.00

Maximum flow ratio (%): 100.00

Efficiency (%): 80.00

Nominal Capacity: 5.399 kW

Systems to consider

Simulate systems with and without the hydro turbine.

Include the hydro turbine in all simulated systems.

Şekil 4.11. Hidroelektrik türbininin mali ve teknik özellikleri giriş ekran

HOMER Pro yazılımı hidroelektrik sistemin yıllık enerji üretimi, maliyetleri ve fizibilitesi hakkında kapsamlı sonuçlar sunar. Hidroelektrik sistemin yıllık enerji üretim kapasitesi, su debisine bağlı olarak değişiklik gösteren enerji üretim grafikleriyle analiz edilmektedir. Bu grafikler, su kaynağının enerji talebini karşılamada ne kadar yeterli olduğunu anlamak için

önemli bir referans sağlar. Özellikle suyun azaldığı kurak dönemlerde sistem performansının dikkatlice analiz edilmesine yardımcı olur.

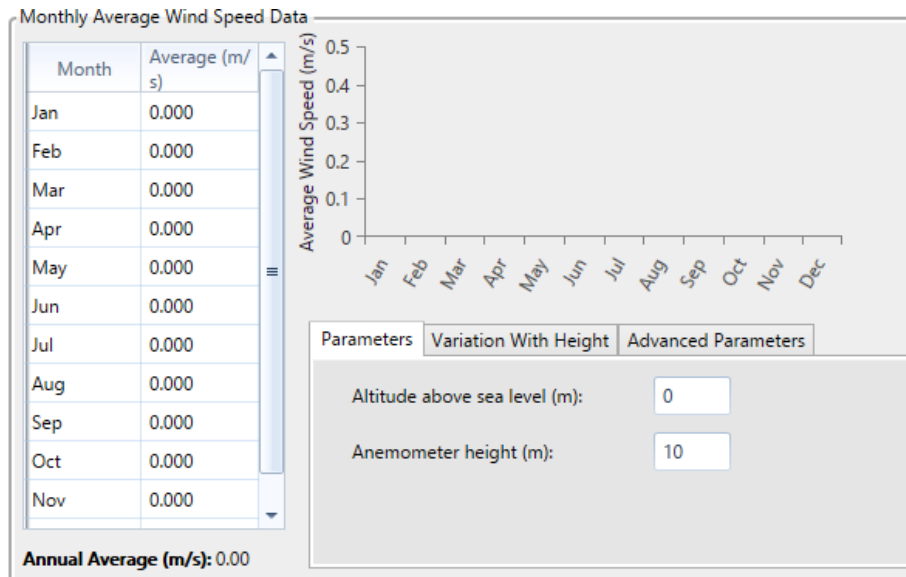
HOMER Pro yazılımı her zaman adımında, Denklem 4.2'yi kullanarak hidroelektrik türbinin elektrik güç çıkışını hesaplar.

$$P_{\text{türbin}} = \frac{\eta_{\text{türbin}} \cdot \rho_{\text{su}} \cdot g \cdot h \cdot Q_{\text{türbin}}}{1000} \quad (4.2)$$

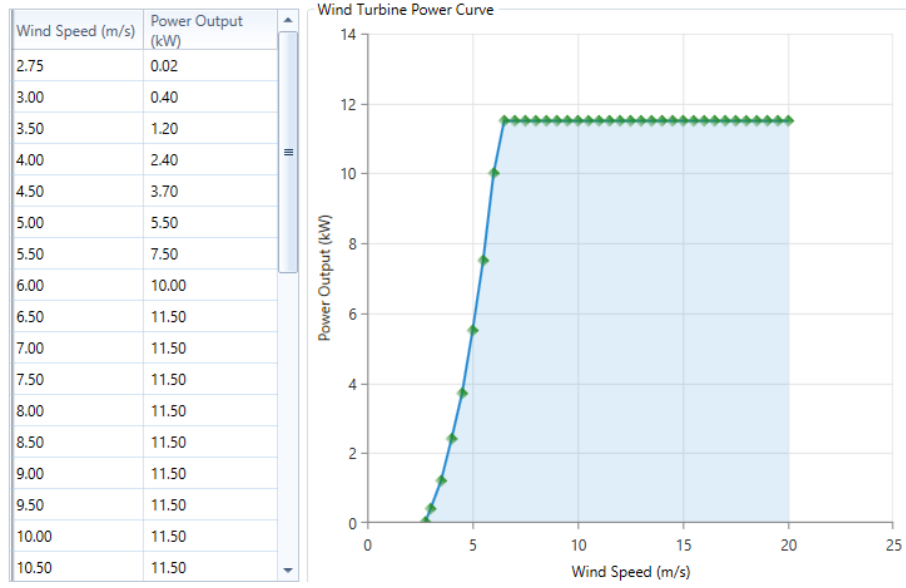
Burada P_{hid} hidroelektrik türbininin çıkışı gücünü (kW), $\eta_{\text{türbin}}$ türbin verimliliğini (%), ρ_{su} suyun yoğunluğunu (1000 kg/m^3), g yer çekimi ivmesini ($9,81 \text{ m/s}^2$), h düşüyü (m) ve $Q_{\text{türbin}}$ türbin akış hızını (m^3/s) ifade etmektedir.

4.2.4. Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi RT'lerin modellenmesi için rüzgâr hızı verileri HOMER Pro yazılımının veri tabanından otomatik olarak çekilebildiği gibi, manuel olarak da eklenebilir. Şekil 4.13'te RT güç çıkış eğrisi ekranı görülmektedir. Bu grafik, MŞ'nin bulunduğu bölgedeki rüzgâr kaynağının ne kadar enerjiye dönüşebileceğini analiz etmek açısından önemlidir. Şekil 4.14'te RT'nin teknik özellikleri ve maliyet parametreleri tanımlanır.



Şekil 4.12. Aylık ortalama rüzgâr hızı giriş ekranı



Şekil 4.13. RT güç çıkış eğrisi ekranı

WIND TURBINE

Name: WT Abbreviation: WT

Properties

Name: WT
Abbreviation: WT
Rated Capacity (kW): 3.3
Manufacturer: AWS

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$15,000.00	\$10,000.00	\$20.00

Click here to add new item

Multiplier: [] [] []

Site Specific Input

Lifetime (years): 20.00 [] Hub Height (m): 12.00 []

☐ Consider ambient temperature effects?

Quantity Optimization

☒ HOMER Optimizer™
☐ Search Space
☐ Advanced

Electrical Bus

☒ AC ☐ DC

Şekil 4.14. RT seçimi ve maliyet parametreleri giriş ekranı

HOMER Pro yazılımı, RT'nin her zaman dilimindeki güç çıkışını üç adımda hesaplar. İlk adımda, türbinin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı belirlenir. Ardından, bu rüzgâr hızında ve standart hava yoğunluğunda türbinin üretebileceği güç hesaplanır. Son olarak, bu güç değeri gerçek hava yoğunluğuna göre ayarlanarak nihai güç çıkışı elde edilir.

HOMER Pro yazılımı göbek yüksekliği rüzgâr hızını Denklem 4.3'e göre hesaplamaktadır.

$$U_{hub} = U_{anem} \frac{\ln(z_{hub}/Z_0)}{\ln(z_{anem}/Z_0)} \quad (4.3)$$

Burada U_{hub} RT'nin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını (m/s), U_{anem} anemometre yüksekliğindeki rüzgâr hızını (m/s), z_{hub} RT'nin göbek yüksekliğini (m), z_{anem}

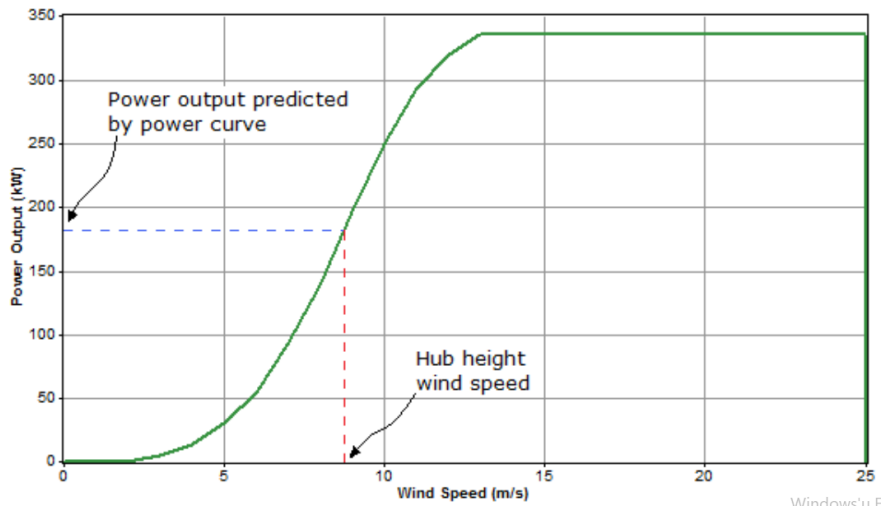
anemometre yüksekliğini (m), Z_0 yüzey pürüzlülüğü uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Eğer göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını hesaplamak için güç yasası seçilirse, HOMER Pro yazılımı Denklem 4.4'e göre hesaplama yapar.

$$U_{hub} = U_{anem} \left(\frac{z_{hub}}{z_{anem}} \right)^\alpha \quad (4.4)$$

Burada α güç yasası üssünü ifade etmektedir.

HOMER Pro yazılımı, göbek yüksekliği rüzgâr hızını belirledikten sonra, standart sıcaklık ve basınç koşulları altında belirli bir rüzgâr hızında türbinden beklenen güç çıkışını hesaplamak için Şekil 4.15'te verilen RT güç eğrisine başvurur. Kırmızı noktalı çizgi göbek yüksekliği rüzgâr hızını, mavi noktalı çizgi ise güç eğrisinin o rüzgâr hızı için öngördüğü RT çıkış gücü değerini gösterir.

Türbin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı, güç eğrisinde tanımlanan aralıkta değilse güç üretmeyecektir. Bu durum rüzgâr türbinlerinin minimum kesme değerinin altındaki veya maksimum kesme rüzgâr hızlarının üzerindeki rüzgâr hızlarında güç üretmediği varsayımına uyar.



Şekil 4.15. Türbin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı güç eğrisi

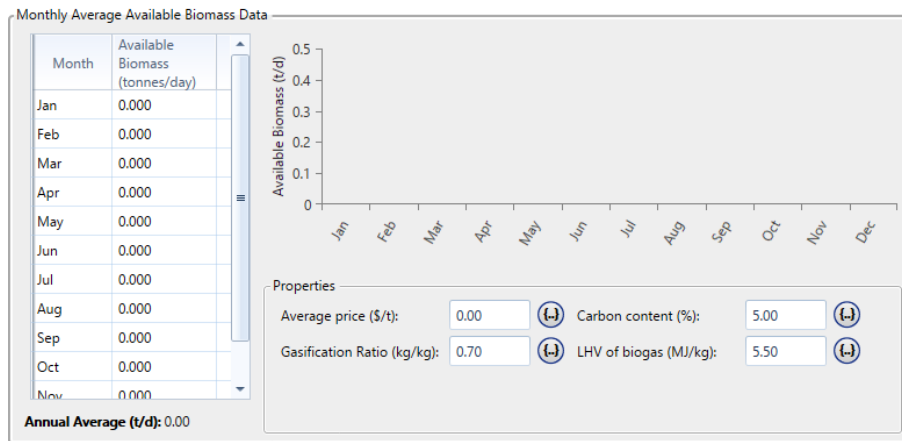
Güç eğrileri genellikle standart sıcaklık ve basınç koşulları altında RT performansını belirtir. Gerçek koşullara uyum sağlamak için HOMER Pro yazılımı, güç eğrisi tarafından tahmin edilen güç değerini aşağıdaki Denklem 4.5'e göre hava yoğunluk oranıyla çarpar.

$$P_{RT} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) P_{RT,SSB} \quad (4.5)$$

Burada P_{RT} RT güç çıkışı (kW), $P_{RT,SSB}$ standart sıcaklık ve basınçtaki RT güç çıkışı (kW), ρ gerçek hava yoğunluğu (kg/m^3) ve ρ_0 standart sıcaklık ve basınçtaki hava yoğunluğudur (kg/m^3).

4.2.5. Biyogaz Generatörlerinin Modellenmesi

HOMER Pro yazılımında BGG'lerin modellenmesi, yakıt kaynağı, generatör kapasitesi, verimlilik ve maliyet gibi temel parametreler dikkate alınarak yapılır. Öncelikle, biyogaz kaynağının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, biyokütle kaynağının üretim miktarı HOMER Pro yazılımına girilir. Bu kaynaklar; tarımsal atıklar, hayvansal gübre, gıda atıkları veya diğer organik maddelerden elde edilebilir. Program, biyogaz üretim potansiyelini analiz ederek, biyogazın yıl boyunca ne kadar verimli bir şekilde kullanılabileceğini simüle eder. Ayrıca, biyogaz üretimindeki mevsimsel değişiklikler de dikkate alınarak sistemin kapasite gereksinimini belirler.



Şekil 4.16. Biyokütle giriş ekranı

Şekil 4.17’de BGG’nin teknik özellikleri ve maliyet değerlerinin girildiği ekran verilmiştir. BGG’ler genellikle sabit bir kapasitede çalışır ve bu kapasite generatörün maksimum üretim gücü, verimliliği ve çalışabileceği minimum biyogaz miktarı gibi teknik detaylarla birlikte belirlenir. Ayrıca, generatörün yakıt tüketimi, bakım maliyetleri ve ömrü gibi parametreler de ekonomik analiz için önemlidir. HOMER Pro yazılımı, bu bilgileri kullanarak generatörün hem enerji üretim potansiyelini hem de maliyet etkinliğini değerlendirir.

GENERATOR Name: BGG Abbreviation: BGG

Properties
 Name: BGG
 Abbreviation: BGG
 Manufacturer: Generic
www.homerenergy.com
 Notes: Generic Biogas with 500kW default size

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/op. hr)
1	\$2,000.00	\$1,250.00	\$0.010

Click here to add new item

Multiplier: [] [] []

Site Specific Input
 Minimum Load Ratio (%): 25.00 [] CHP Heat Recovery Ratio (%): 60.00 []
 Lifetime (Hours): 20,000.00 [] Minimum Runtime (Minutes): 0.00 []
 Biogas Fuel Price (\$/kg): 1.000 [] ☐ Initial Hours 0.00

Sizing
 Size (kW): 0, 10, 20
 Electrical Bus: ☒ AC ☐ DC
 Advanced...

Şekil 4.17. BGG’lerin teknik özellikleri ve maliyet değerleri giriş ekranı

HOMER Pro yazılımı BGG’nin yıllık enerji üretimi, yakıt tüketimi ve sistemin ekonomik fizibilitesi üzerine çeşitli sonuçlar sunar. BGG’nin enerji üretimi ve yakıt tüketimi gibi teknik parametrelerin olduğu sonuç ekranı incelenerek, enerji üretiminin yıl boyunca nasıl değiştiği ve enerji tüketim ihtiyacının nasıl karşıladığı görülebilir. Son olarak, HOMER Pro yazılımı, BGG’nin ekonomik analizini de yaparak yatırım maliyeti, bakım giderleri, enerji üretim maliyeti gibi finansal verileri sunar.

BGG’nin güç çıkışı (P_{biyo}) Denklem 4.6’ya göre hesaplanır [124, 125].

$$P_{BGG} = \frac{B \cdot C_{VBG} \cdot \eta_{BGG} \cdot \eta_{Gaz}}{3600} \quad (4.6)$$

Burada B biyokütle miktarını (kg), C_{VBG} biyogazın kalorifik değerini (kJ/kg), η_{BGG} BGG verimini, η_{Gaz} ise gazlaştırıcının gazlaştırma verimini temsil eder.

4.2.6. Batarya Depolama Sistemlerin Modellenmesi

BDS'ler, YEK'lerin kesintili doğasını dengelemek ve enerji talebi ile üretim arasındaki uyumsuzluğu gidermek amacıyla kullanılır. HOMER Pro yazılımı, bataryaların kapasitesi, ömrü, şarj-deşarj döngüleri ve maliyet parametreleri gibi birçok faktörü dikkate alarak bu sistemlerin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirir.

BDS'lerin modellenmesi sırasında ilk adım, batarya kapasitesi ile teknik özelliklerinin belirlenmesidir. Bataryanın nominal kapasitesi, maksimum ve minimum şarj seviyesi, şarj vedeşarj verimlilikleri gibi veriler dikkate alınıp Şekil 4.18'de görüldüğü gibi uygun batarya seçimi yapılarak batarya sisteminin başlangıç maliyeti, ömrü boyunca oluşacak bakım maliyetleri ve bataryaların değiştirilme periyotları gibi ekonomik parametreler girilir. HOMER Pro yazılımı, bu bilgileri kullanarak bataryanın farklı yük profilleri ve enerji üretim senaryoları altında nasıl performans göstereceğini analiz eder.

STORAGE

Name: BSS Abbreviation: BSS

Properties
Kinetic Battery Model
 Nominal Voltage (V): 12
 Nominal Capacity (kWh): 1
 Maximum Capacity (Ah): 83.4
 Capacity Ratio: 0.403
 Rate Constant (1/hr): 0.827
 Roundtrip efficiency (%): 80
 Maximum Charge Current (A): 16.7
 Maximum Discharge Current (A): 24.3
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 1
www.homerenergy.com
 This is a generic 12 volt lead acid battery with 1 kWh of energy storage.

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	300.00	300.00	10.00

Lifetime
 time (years): 10.00
 throughput (kWh): 800.00

Sizing
☒ HOMER Optimizer™
☐ Search Space
☐ Advanced

Site Specific Input
 String Size: 1 Voltage: 12 V
 Initial State of Charge (%): 100.00
 Minimum State of Charge (%): 20.00

Şekil 4.18. Batarya seçimi giriş ekranı

MŞ'ler tarafından üretilen enerji miktarı, yük talebinden fazla olduğunda bataryalar şarj edilir. BDS'lerde depolanan enerji, üretimin yüklerdeki tüketimi karşılamadığı zamanlarda kullanılmaktadır. Denklem 4.7, BDS'nin belirli bir sürede depolayabileceği güç miktarını ifade etmektedir

$$P_d(t) = \frac{k \cdot Q_1(t) e^{-k} + Q(t) k \cdot c (1 - e^{-k \Delta t})}{1 - e^{-k \Delta t} + c(k \Delta t - 1 + e^{-k \Delta t})} \quad (4.7)$$

BDS'nin belirli bir sürede boşaltılabileceği maksimum güç miktarı ise Denklem 4.8'e göre hesaplanmaktadır.

$$P_b(t) = \frac{-k \cdot Q_{\max} + k \cdot Q_1(t) e^{-k \Delta t} + Q(t) k \cdot c (1 - e^{-k \Delta t})}{1 - e^{-k \Delta t} + c(k \Delta t - 1 + e^{-k \Delta t})} \quad (4.8)$$

Burada $Q_{\max}$ toplam depolama kapasitesini, Q_1 akülerdeki enerji miktarını (kWh), Q toplam enerji miktarını (kWh), c depolama kapasite oranını; k depolama hız sabitini, Δt ise zaman aralığını (sa) ifade eder.

4.2.7. Elektrolizörün Modellenmesi

HOMER Pro yazılımında elektrolizörlerin kapasitesi, verimliliği, enerji tüketimi ve maliyeti gibi parametreler Şekil 4.19'da görülen ekran yardımıyla sisteme girilir. HOMER Pro yazılımında kayıtlı bir elektrolizör seçilebilir veya yeni bir elektrolizör oluşturabilir.

ELECTROLYZER

Name: Electrolyzer Abbreviation: Electrolyzer Remove Copy To Library

Properties

Name: **Electrolyzer**
 Abbreviation: **Electrolyzer**
 Manufacturer: **Generic**
www.homerenergy.com
 Notes: **This is a generic electrolyzer.**

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$1,000.00	\$1,000.00	\$0.10

Click here to add new item

Multiplier: (1) (1) (1)

Capacity Optimization

Size (kW)
0
10

Electrolyzer Schedule

Step 1: Select a mode: 00:00
☐ Forced On ☒ Optimize

Step 2: Select a time period:
☒ All Week
☐ Weekdays
☐ Weekends

Step 3: Click on the chart to 23:00 when the selected operating

Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec

Şekil 4.19. Elektrolizör seçimi, teknik ve ekonomik parametrelerin giriş ekranı

Elektrolizörün anot ve katodunda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, HOMER Pro yazılımında sırasıyla Denklem 4.9 ve 4.10'a göre hesaplanır.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, HOMER Pro yazılımı kullanılarak, farklı tüketici gruplarının elektrik talebini karşılamaya yönelik şebekeden bağımsız dört farklı MŞ uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan uygulamalar şu şekildedir:

Birinci Uygulama; kırsal bir bölgede bulunan çiftlik evinin enerji talebini karşılamak amacıyla, CHP sistemi içeren bir MŞ modeli geliştirilmiştir.

İkinci Uygulamada; YEK'lerin bölgesel farklılıkları dikkate alınarak Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illerinde yer alan örnek bir tüketici grubu için MŞ modeli tasarlanmıştır.

Üçüncü Uygulamada; Bingöl ili Doğanevler köyü için, bölgedeki doğal kaynaklar dikkate alınarak CHP sistemi içeren bir MŞ modeli oluşturulmuştur.

Dördüncü Uygulama: Bingöl ili Doğanevler köyü için tasarlanan MŞ'ye yönelik HOMER Pro yazılımındaki ML bağlantısı kullanılarak yeni bir enerji dağıtım stratejisi geliştirilmiştir. Bu strateji, HOMER Pro yazılımında bulunan diğer stratejilerle karşılaştırılmıştır.

Her bir uygulama teknik, ekonomik ve çevresel açılardan detaylı bir şekilde analiz edilerek sonuçlar tablolar ve şekiller yardımıyla sunulmuştur.

5.1. Uygulama-1: Hidrojen Depolamalı CHP Sisteminin Tasarımı ve Tekno-Ekonomik Analizi

5.1.1. Sistemin Modellenmesi

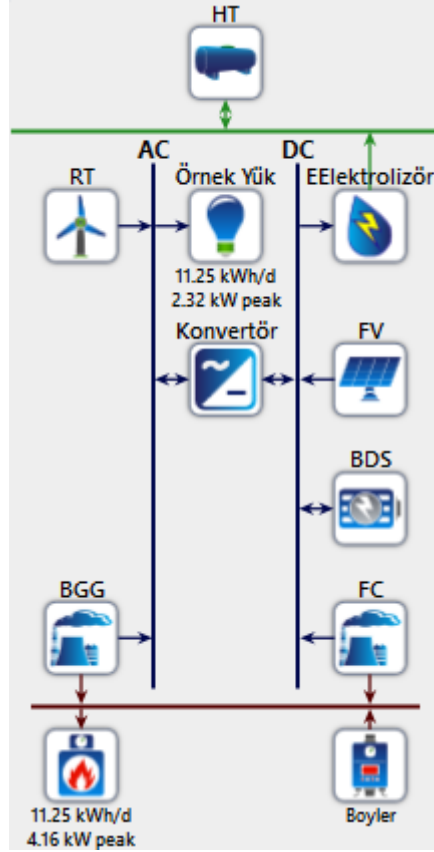
Bu uygulama kapsamında; 10 büyükbaş hayvana sahip küçük bir çiftlik evinin enerji ihtiyacını karşılamak üzere YEK'lere dayalı, batarya ve hidrojen depolamalı, şebekeden bağımsız bir MŞ, HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve optimizasyonu

gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan MŞ ile çiftlik evinin hem elektrik hem de ısıtma ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir. Çiftliğin enerji talebine uygun olarak çeşitli YEK bileşenleri sisteme entegre edilmiştir. Ayrıca bu uygulamada hayvan gübresinde bulunan gaz potansiyelinden yararlanmak için MŞ'ye bir BGG eklenmiştir. Bingöl ilindeki kırsal bir aile için örnek yük tüketim değerleri ve bölgenin meteorolojik koşulları dikkate alınarak sistemin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan MŞ; FV, RT, BGG, FC, BDS, HT ve boyler bileşenlerinden oluşmaktadır. MŞ'yi oluşturan bileşenlerin birim maliyet değerleri Tablo 5.1'de ve şematik gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Uygulama-1 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri

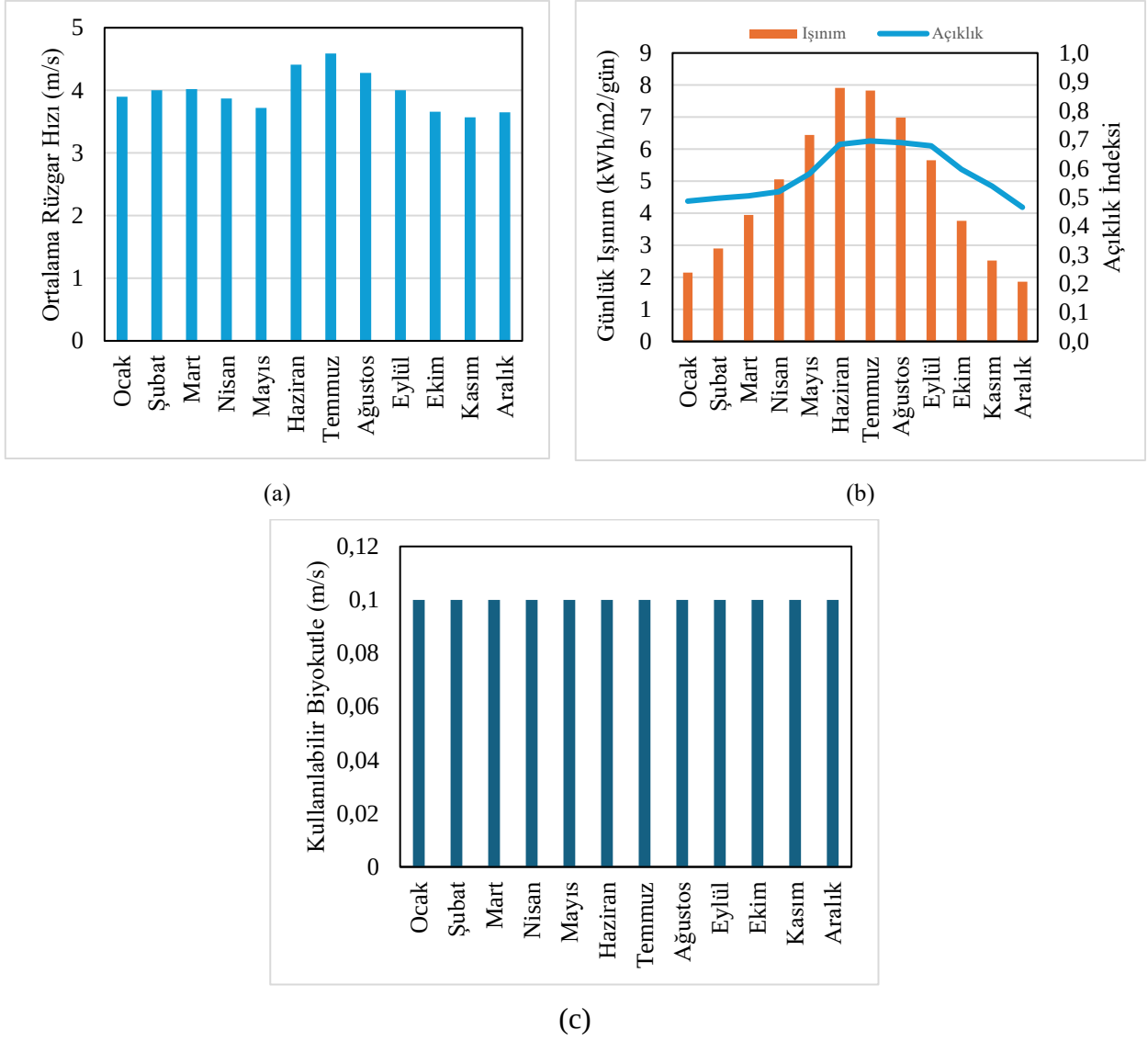
Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti (\$/kW)	Geri dönüşüm maliyeti (\$/kW)	Bakım ve onarım maliyeti (\$/kW/yıl)	Çalışma ömrü
FV	700	700	10	25
RT	1000	800	30	20
BGG	2000	1250	0,01/h	20000 h
Elektrolizör	1000	1000	10	15
HT	500/kg	500/kg	0/kg	25
FC	3000	2500	0,01/h	50000h
BDS	300/batarya	300/ batarya	10/ batarya	10
Konvertör	300	300	0	15



Şekil 5.1. Uygulama-1 için HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli

5.1.2. Bölgenin Meteorolojik Verileri ve Biyokütle Kaynakları

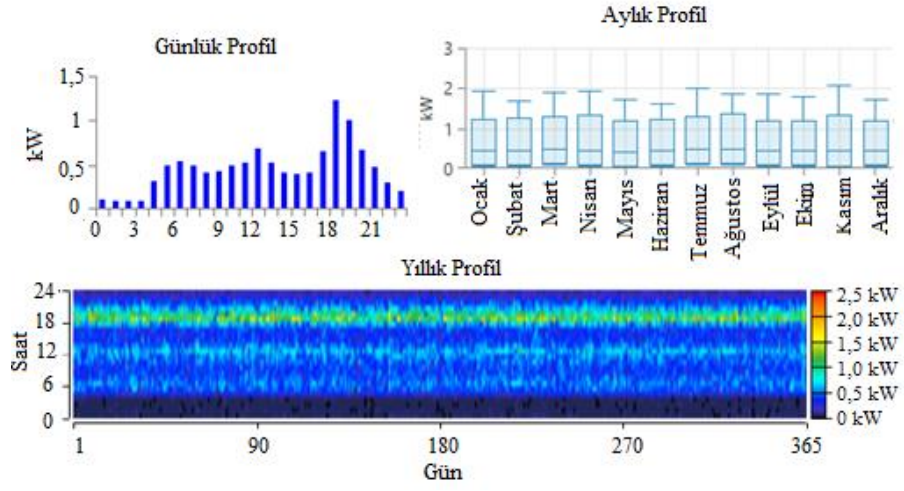
Bingöl iline ait güneş radyasyonu ile rüzgâr hızı verileri HOMER Pro yazılımına entegre edilen NASA veri tabanından temin edilmiştir. Ayrıca çiftlik evindeki hayvanlardan elde edilen biyokütle kaynaklarına ait değerler HOMER Pro yazılımına girilmiştir. Bu verilere ilişkin grafikler Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



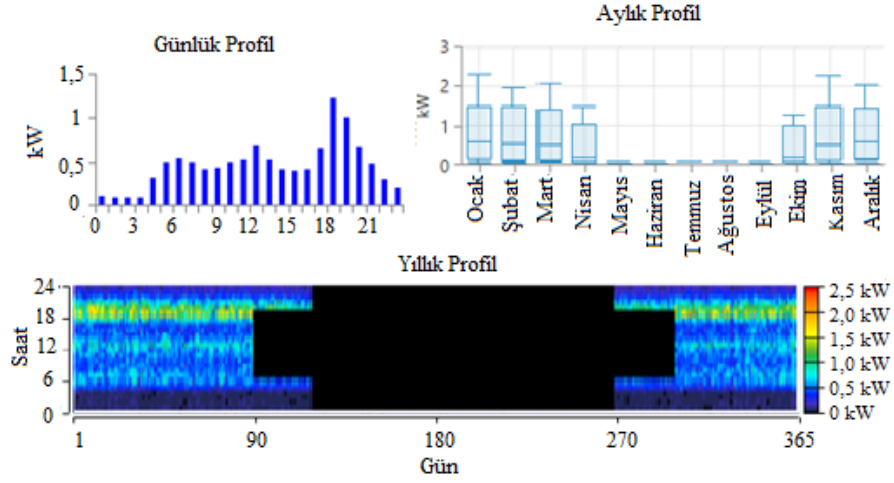
Şekil 5.2. Uygulama-1 için meteorolojik veriler ve biyokütle kaynakları a) Ortalama aylık güneş ışınnımı b) Ortalama aylık rüzgâr hızı c) Ortalama aylık biyokütle miktarı

5.1.3. Yük Profili

Uygulama-1 için oluşturulan MŞ'ye ait elektrik ve termal yük profilleri sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3.Uygulama-1 için elektrik yük profili



Şekil 5.4. Uygulama-1 için termal yük profili

5.1.4. Simülasyon Sonuçları

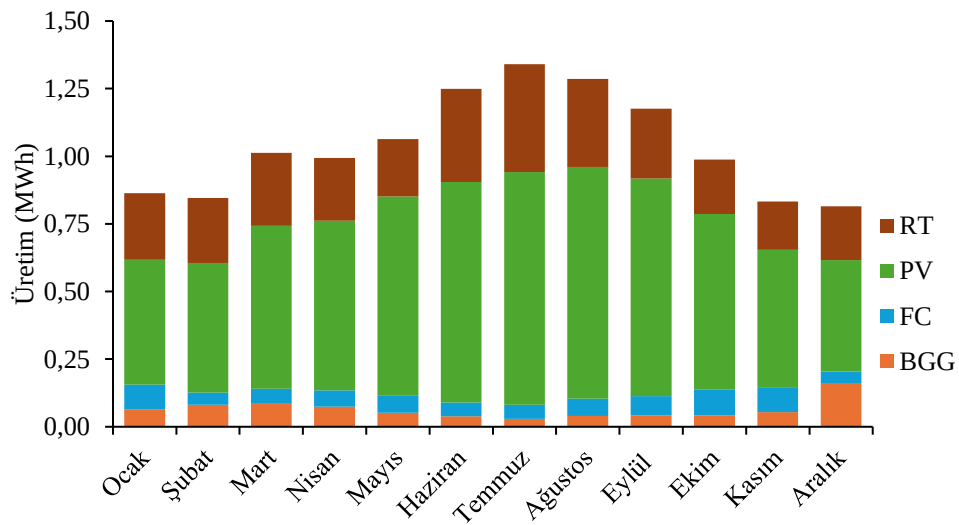
Simülasyon sonuçlarına göre bir çiftlik evi için oluşturulan MŞ bileşenlerinin optimum kapasite değerleri Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Uygulama-1 için MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

Bileşenler	Kapasite
RT (kW)	3
FV (kW)	5
BGG (kW)	2
FC (kW)	2
BDS (kWh)	2
Elektrolizör (kW)	3
Konverter (kW)	0,995
HT (kg)	20

5.1.4.1. Elektrik Üretimi

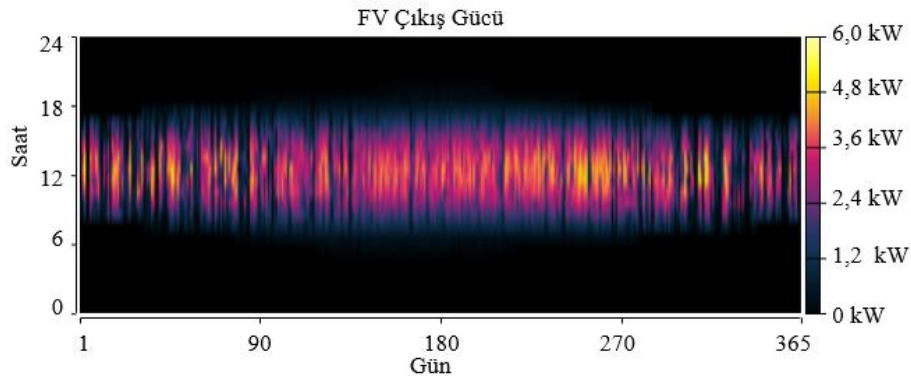
Önerilen MŞ, günlük 31 kWh enerji üretecek ve 4,160 kW pik talebini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. MŞ bileşenlerinin enerji üretim miktarları Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Enerji üretiminin yük talebini aşması durumunda, fazla enerji önce BDS'de depolanmaktadır. BDS tamamen şarj olduktan sonra, kalan fazla enerji elektrolizör aracılığıyla hidrojen olarak depolanmaktadır. FV ve RT tarafından üretilen enerji, yük talebini karşılamada yetersiz kaldığında, öncelikli olarak BDS deşarj edilerek gerekli enerji sağlanır. Şayet yük talebi tam olarak karşılanamazsa, FC devreye girerek ilave elektrik üretimine katkıda bulunur. Enerji talebi yine karşılanmazsa, BGG yük talebini karşılamak amacıyla aktif hale gelir. Bu uygulamada enerji üretimi ve talep arasındaki denge, YEK ve depolama sistemleri arasındaki iş birliği ile sağlanmaktadır.



Şekil 5.5. Uygulama-1 için MŞ kaynaklarının aylık üretim miktarı

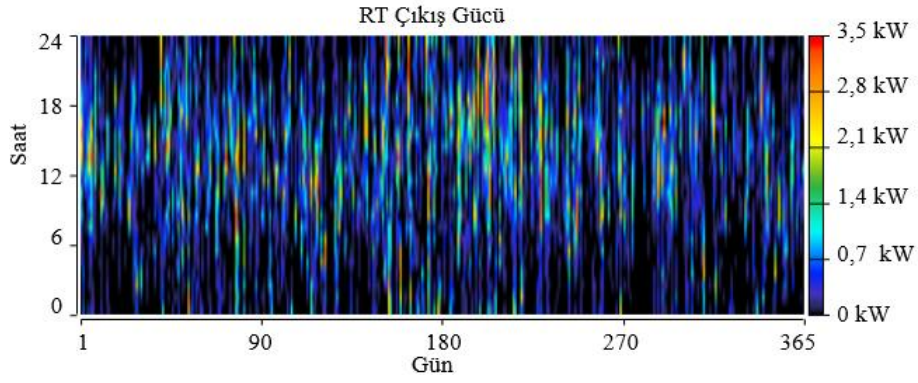
MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretimi analiz edildiğinde, enerjinin büyük bölümünün FV ve RT bileşenleri tarafından karşılandığı görülmektedir. Güneş radyasyonu ve rüzgâr hızındaki mevsimsel dalgalanmalara bağlı olarak, belirli aylarda FV ve RT'nin ürettiği enerji miktarında düşüş yaşanmaktadır. Bu dönemlerde, BGG devreye girerek elektrik üretim kapasitesini artırmakta ve enerji talebinin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Üretilen enerjinin %61,8'i FV'den, %25,7'i RT'den, %6,45'i FC'den ve %6,02'si BGG'den karşılanmaktadır.

FV panellerin nominal kapasitesi 5 kW olup, yıllık 7.811 kWh enerji üretimi gerçekleştirmektedir. FV sistem özellikle yaz aylarında maksimuma yakın güç üretirken, sonbahar ve kış aylarında bulutlu günlerin fazlalığı nedeniyle enerji üretiminde düşüş yaşanmaktadır. Günlük ortalama 21,4 kWh enerji üreten FV sistemi, toplam üretimin %61,8'ini sağlayarak önemli bir katkı sunmaktadır. FV panellerinin güç çıkış grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir.



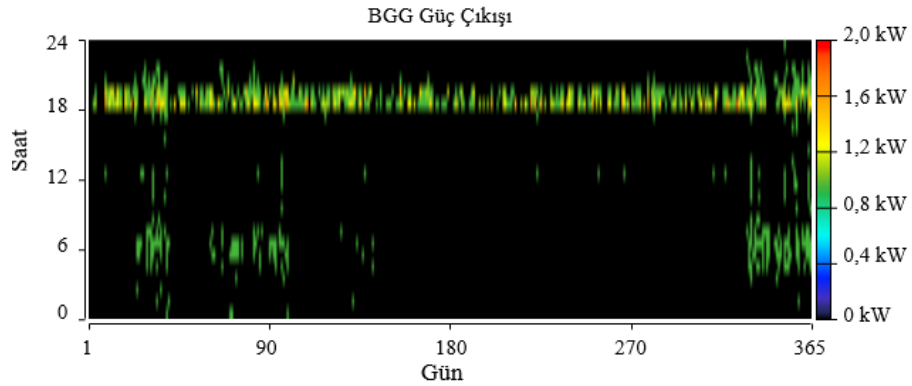
Şekil 5.6. Uygulama-1'deki FV panellerin güç çıkış eğrisi

Kesintili dönemlere rağmen, nominal kapasitesi 3 kW olan RT, yıl boyunca 3.243 kWh enerji üretmekte ve toplam üretimin %25,7'sini sağlamaktadır. RT'nin güç çıkış eğrisi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



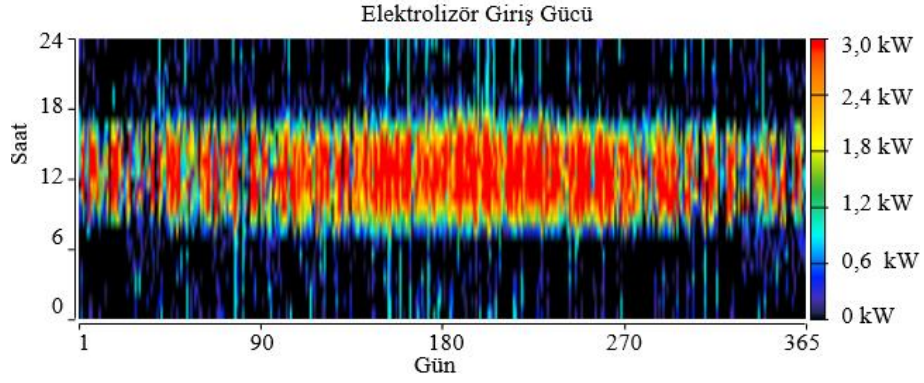
Şekil 5.7. Uygulama-1'deki RT'nin güç çıkış eğrisi

BGG yıllık 2,37 ton yakıt tüketerek 761 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. BGG'nin güç çıkış eğrisi Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yıl boyunca özellikle yük talebinin en yüksek olduğu akşam saatlerinde BGG devreye girmiştir.



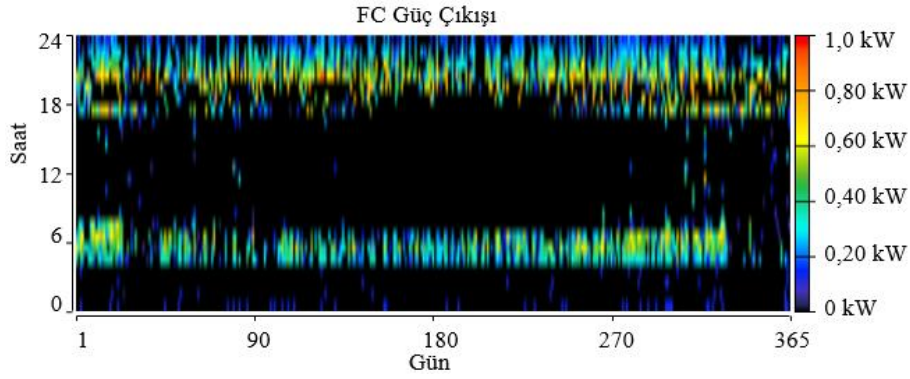
Şekil 5.8. Uygulama-1'deki BGG'nin güç çıkış eğrisi

Elektrolizör, genellikle YEK'lerin tam kapasite elektrik ürettiği ve enerji talebinin düşük olduğu zaman dilimlerinde devreye girmektedir. Özellikle gün ortasında, elektrolizörün tam kapasiteyle çalıştığı görülmektedir. Nominal kapasitesi 3 kW olan elektrolizör yıllık toplam 156 kg hidrojen üretmiştir. Elektrolizörün giriş gücü grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Uygulama-1'deki elektrolizörün giriş gücü eğrisi

Üretilen hidrojen, YEK'lerin enerji üretiminin yetersiz olduğu dönemlerde sistemin yük talebini karşılamak için FC tarafından kullanılır. FC 2.203 saat/yıl çalışma süresi boyunca 815 kWh/yıl elektrik üretimine ve 2.933 kWh/yıl termal enerji üretimine katkıda bulunmuştur. Şekil 5.10'da görüldüğü üzere, yakıt hücresinin daha aktif olduğu dönemler özellikle sabah ve akşam saatlerinde yoğunlaşmıştır. Bu durum, enerji talebinin günün belirli saatlerinde arttığını ve yakıt hücresinin bu talebi karşılamak için daha yüksek kapasitede çalıştığını göstermektedir. Ayrıca mevsimsel değişimlere bağlı olarak yılın farklı zamanlarında farklı üretim düzeyleri gözlemlenmiştir.

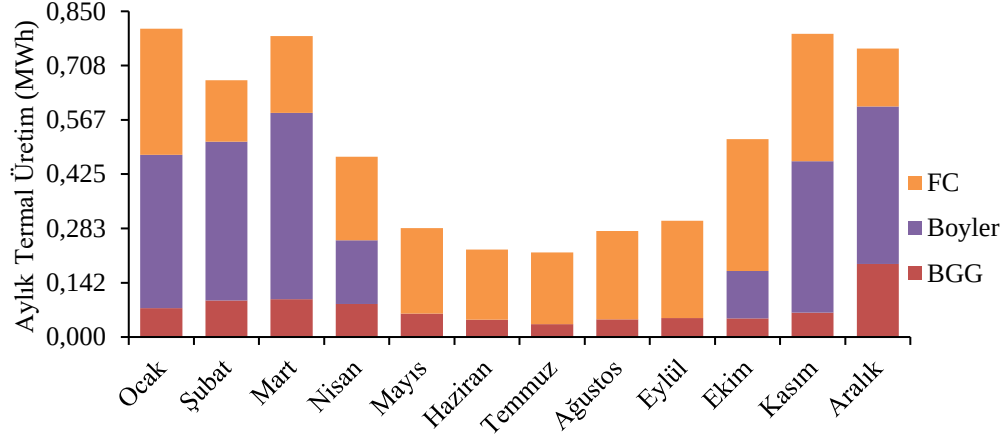


Şekil 5.10. Uygulama-1'deki FC'nin güç çıkış eğrisi

5.1.4.2. Termal Enerji Üretimi

Isıtma için günlük 11 kWh'lik termal enerji talebi gereklidir ve termal yük için 4.156 kW'lık bir tepe değeri söz konusudur. Bu uygulamada termal yükün %46,7'si FC, %39,2'si boyler ve %14,1'i BGG tarafından karşılanmaktadır. Çiftliğin termal enerjisinin önemli bir

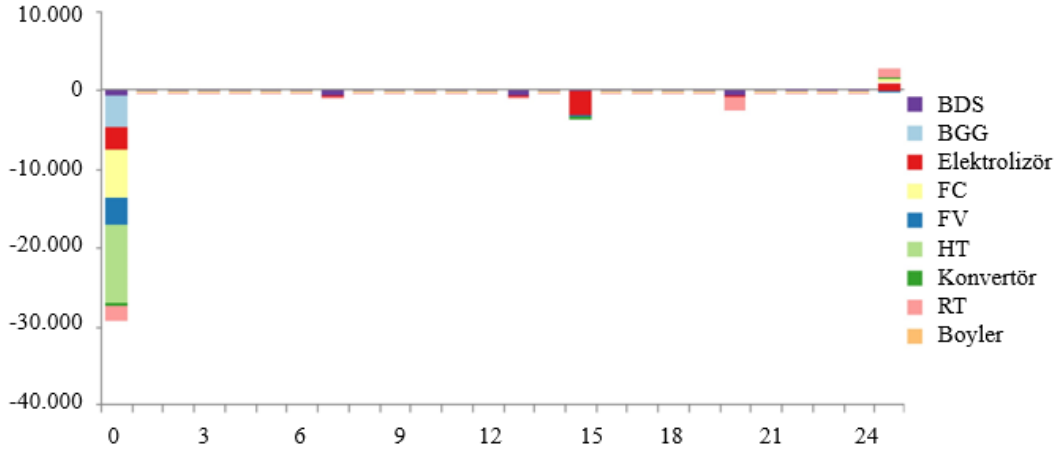
kısmı FC tarafından üretilmektedir. Termal yükü karşılayan üretim kaynakları Şekil 5.11’de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Uygulama-1 için termal enerji kaynaklarının dağılımı

5.1.4.3. Ekonomik Analiz

Sistemin sermaye maliyeti 26.398 \$, işletme maliyetleri 3.432 \$, bakım maliyetleri 3.915 \$ ve yakıt maliyetleri 378,83 \$ olarak hesaplanmıştır. NPC 32.757 \$ ve LCOE ise 0,605 \$/kWh olarak belirlenmiştir. Başlangıçta MŞ’nin sermaye maliyeti öne çıkmaktadır. İşletme ve yakıt maliyetleri ise zaman içinde sabit kalmaktadır. Süreç içerisinde BGG, BDS, RT, elektrolizör ve dönüştürücü gibi bileşenlerin ömürlerinin sona ermesiyle ekipman yenileme maliyetleri ortaya çıkmakta ve bu durum NPC değerini etkilemektedir. En yüksek bakım, onarım ve yenileme maliyeti, 1.974 \$ ile BGG’ye aittir. BGG’yi sırasıyla 1.659 \$ ile elektrolizör, 1.215 \$ ile RT, 789 \$ ile BDS ve 646 \$ ile FV sistemleri takip etmektedir. Bununla birlikte 25. yıl sonunda sistemin hurda değeri olarak ek bir gelir elde edilmektedir. Projenin 25 yıllık ekonomik performansı Şekil 5.12’de görsel olarak özetlenmiştir.

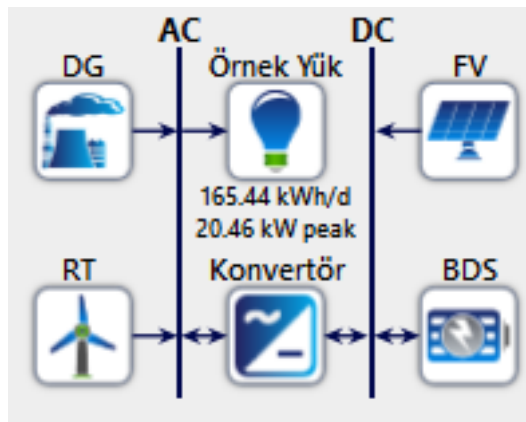


Şekil 5.12. Uygulama-1'deki MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti

5.2. Uygulama-2: Farklı Rüzgâr Hızı ve Güneş Radyasyon Oranına Sahip Bölgeler İçin Mikro Şebeke Tasarımı ve Karşılaştırmalı Analizi

5.2.1. Sistemin Modellenmesi

Günlük 165,44 kWh enerji tüketen referans bir topluluğun elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla şebekeden bağımsız FV, RT, DG ve BDS'den oluşan bir MŞ modellenmiştir. HOMER Pro yazılımı ile tasarlanan bu MŞ'nin yapısı Şekil 5.13'te ve sistem bileşenlerine ait maliyet değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir. Oluşturulan model; Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illerinin meteorolojik verileri baz alınarak ayrı ayrı optimize edilmiş ve teknolojik analizleri gerçekleştirilmiştir.



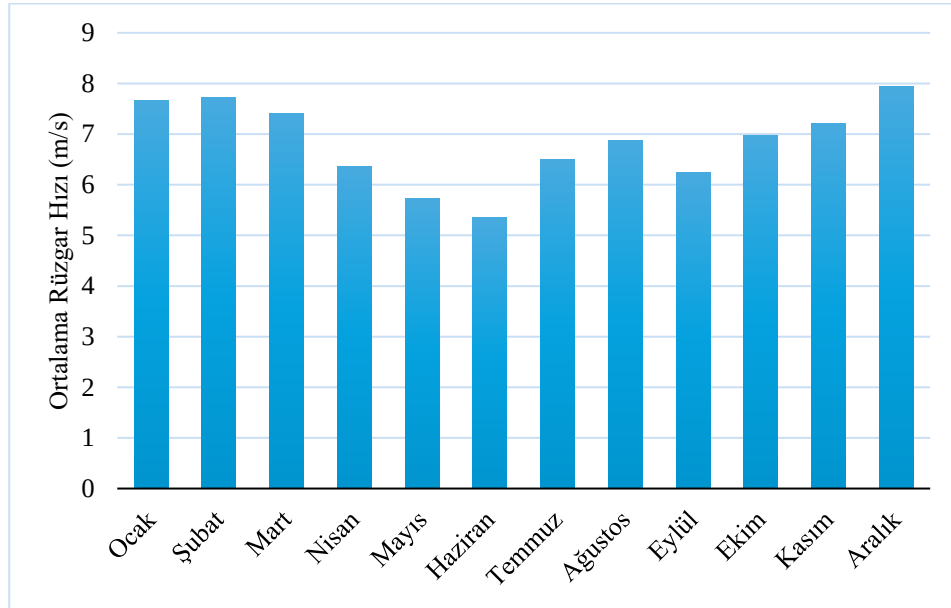
Şekil 5.13. Uygulama-2 için HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli

Tablo 5.3. Uygulama-2 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri.

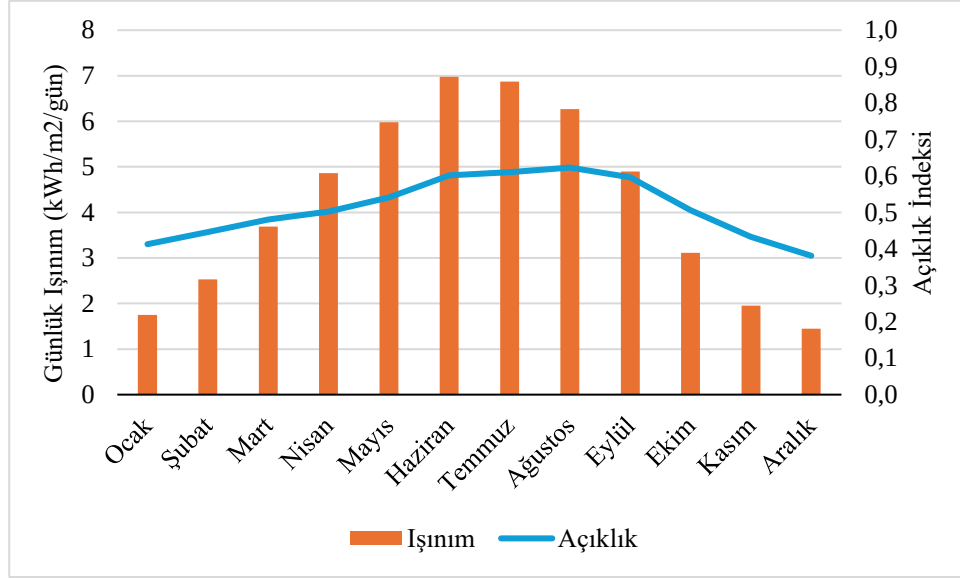
Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti (\$/kW)	Geri dönüşüm maliyeti (\$/kW)	Bakım ve onarım maliyeti (\$/kW/yıl)	Çalışma ömrü
FV	700	700	10	25 yıl
RT (10 kW)	29000	25000	30	20 yıl
RT (6 kW)	20000	15000	30	20 yıl
DG	500	500	0,030	15000 saat
BDS	300	300	300	10 yıl
Konverter	300	300	0	15 yıl

5.2.2. Bölgelerin Meteorolojik Verileri

Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illerine ait güneş radyasyonu ve rüzgâr hızı verileri, HOMER Pro yazılımına entegre edilen NASA veri tabanından temin edilmiştir. Bu verilere ilişkin grafikler sırasıyla Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da sunulmuştur.

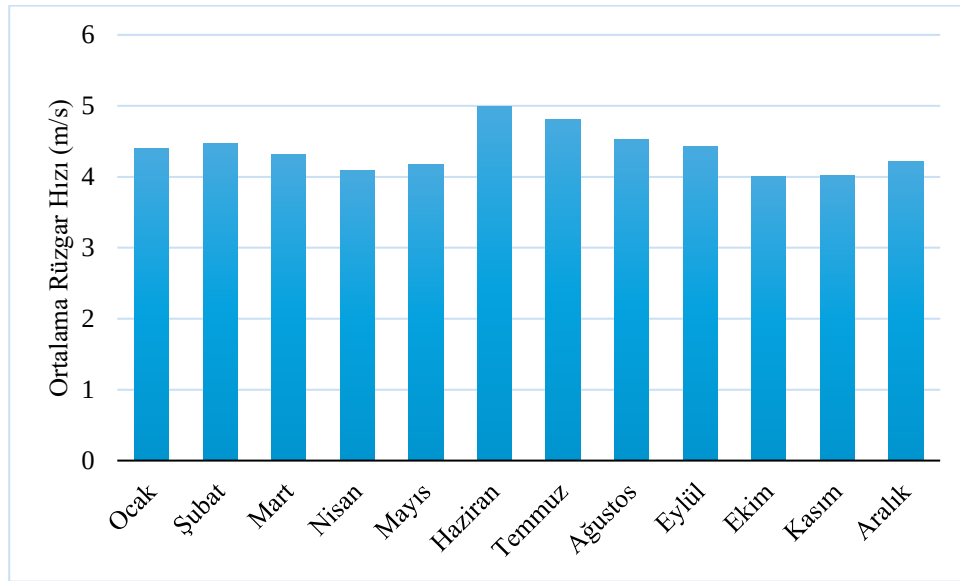


(a)

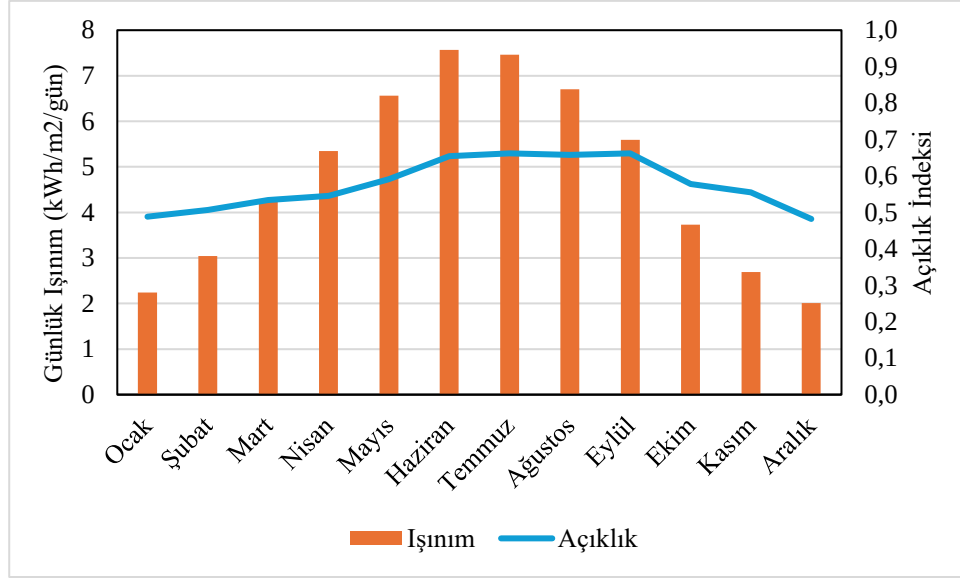


(b)

Şekil 5.14. Çanakkale ili için a) Aylık ortalama rüzgâr hızı b) Güneş radyasyonu ve netlik indeksi

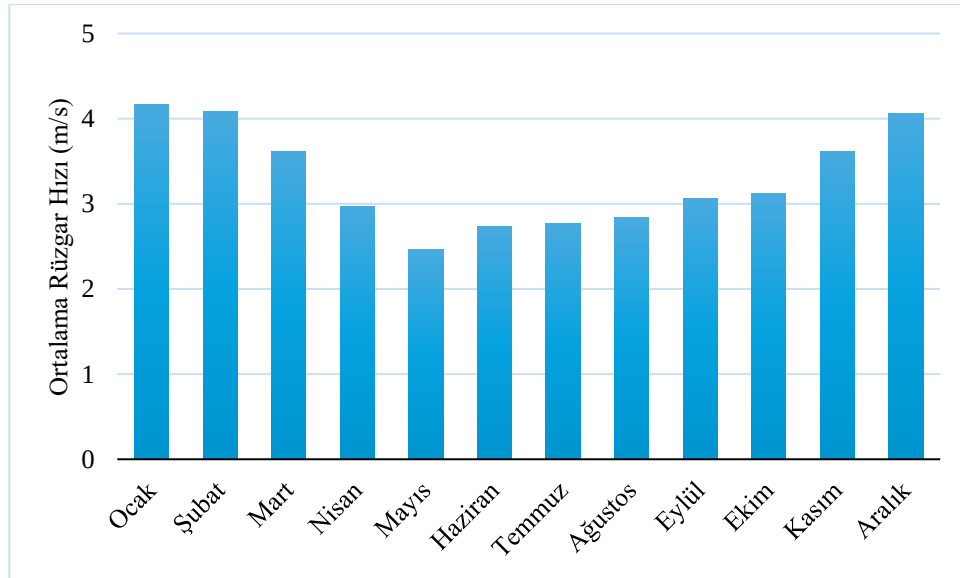


(a)

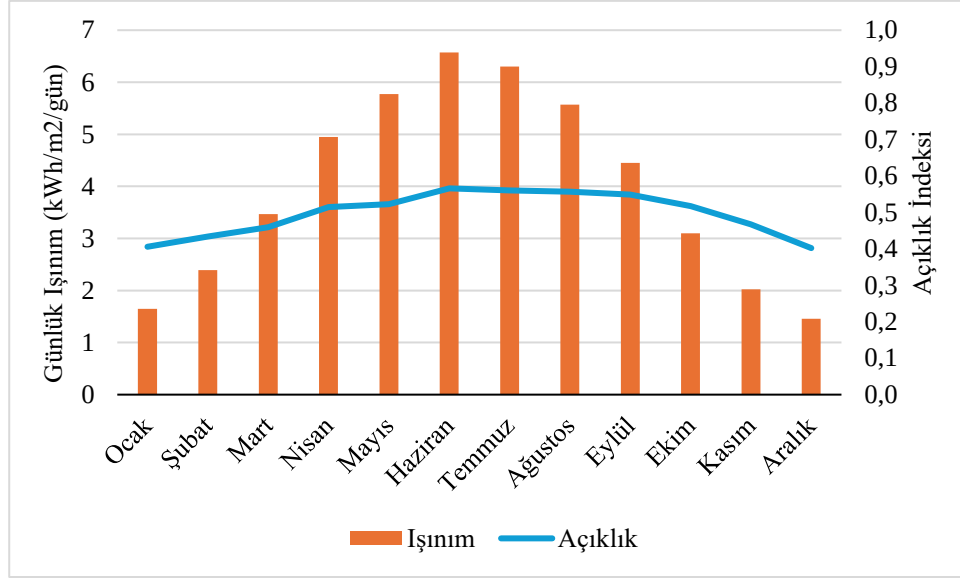


(b)

Şekil 5.15. Diyarbakır ili için a) Aylık ortalama rüzgâr hızı b) Güneş radyasyonu ve netlik indeksi



(a)



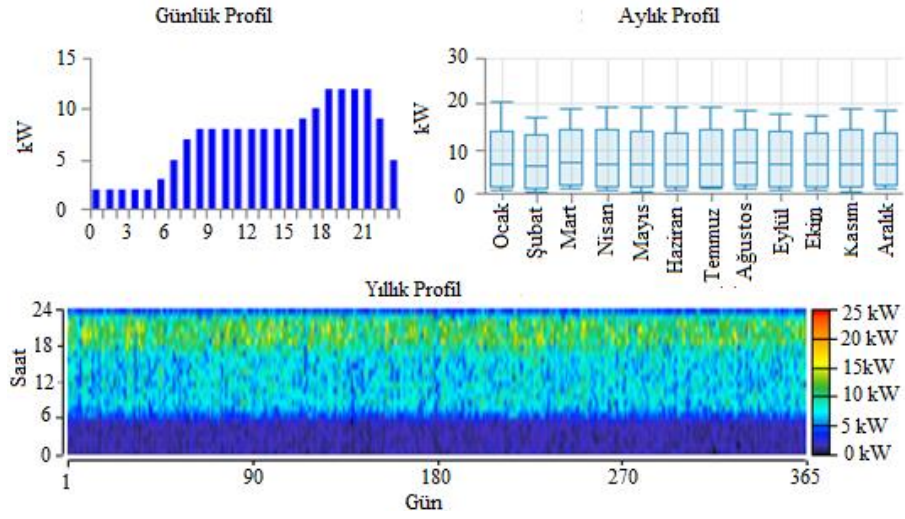
(b)

Şekil 5.16. Rize ili için a) Aylık ortalama rüzgâr hızı b) Güneş radyasyonu ve netlik indeksi

Çanakkale’de güneş radyasyonu $4,62 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$, ortalama rüzgâr hızı $6,93 \text{ m/s}$ seviyesindedir. Diyarbakır’da güneş radyasyonu $4,77 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$, ortalama rüzgâr hızı $5,25 \text{ m/s}$ olarak kaydedilmiştir. Rize’de ise güneş radyasyonu $3,98 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$, ortalama rüzgâr hızı $3,29 \text{ m/s}$ ’dir.

5.2.3. Yük Profili

HOMER Pro yazılımında, uygulama 2 için düşünülen örnek topluluğa ait yük profili Şekil 5.17’de sunulmuştur.



Şekil 5.17. Uygulama-2 için örnek yük profili.

Türkiye’de farklı coğrafi konumlara ve meteorolojik koşullara sahip olan Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için HOMER Pro yazılımı kullanılarak oluşturulan MŞ’nin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir.

5.2.4. Simülasyon Sonuçları

RT’lerin optimum boyutunun seçiminin önemini göstermek amacıyla, 6 kW ve 10 kW kapasiteli iki farklı RT için MŞ simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlardan elde edilen bileşen kapasite değerleri Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te sunulmaktadır.

Tablo 5.4. 6 kW’lık RT için şehirlere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

Bileşenler	Çanakkale	Diyarbakır	Rize
	Kapasite Değeri		
RT (kW)	18	18	6
FV (kW)	25,4	38,7	69,2
DG (kW)	23	23	23
BDS (kWh)	90	113	146
Konverter (kW)	12	12	12,7

Tablo 5.5. 10 kW’lık RT için şehirlere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

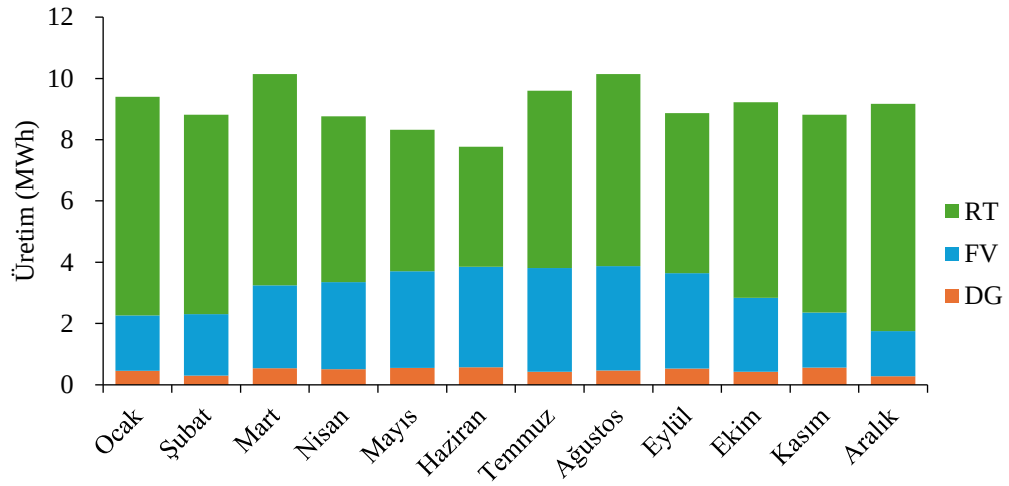
Bileşenler	Çanakkale	Diyarbakır	Rize
	Kapasite Değeri		
RT (kW)	10	10	10
FV (kW)	14,7	33,4	47,1
DG (kW)	23	23	23
BDS (kWh)	66	101	124
Konverter (kW)	12	11,7	12,1

5.2.4.1. Elektrik Üretimi

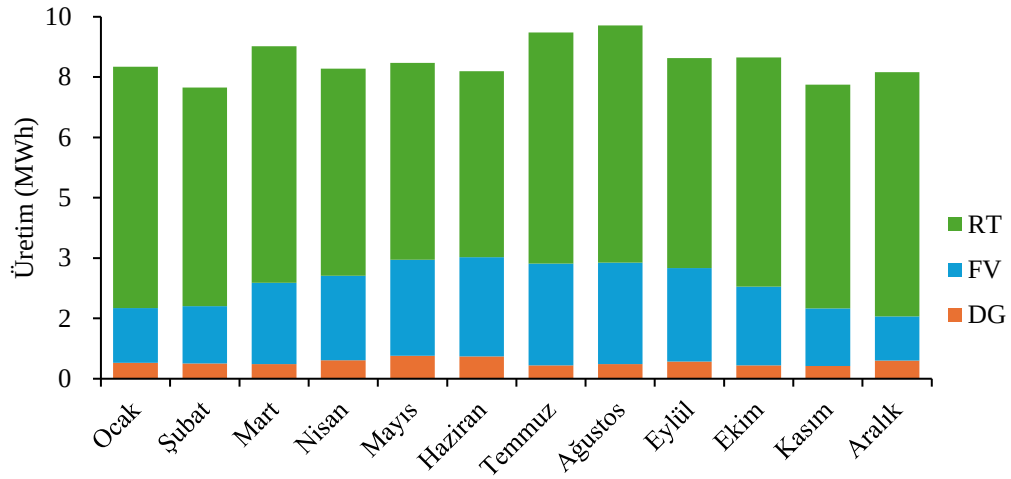
Çanakkale için tasarlanan MŞ’de 6 kW’lık “Bergey Excel 6R” RT modeli seçilmesi durumunda HOMER Pro yazılımı 3 adet RT kullanarak sistemin toplam rüzgâr kurulu gücünü 18 kW olarak belirlemektedir. Toplam üretimin %64,8’i RT, %30,1’i FV ve %5,09’u DG tarafından sağlanırken toplam aşırı elektrik üretim değeri ise 46.366 kW olarak elde edilmektedir. 10 kW’lık “Eocycle EO10” RT modelinin seçilmesi durumunda ise HOMER Pro yazılımı sadece bir adet türbin kullanmakta yani toplam rüzgâr kurulu gücü 10 kW olarak belirlemektedir. Bu durumda üretimin %74,4’ü RT, %20,3’ü FV ve %5,28’i DG tarafından karşılanırken toplam aşırı elektrik üretim değeri ise 31.579 kW olarak gerçekleşmektedir. Her iki RT modeli için MŞ maliyet değerleri ise Tablo 5.6’da ve kaynaklara göre aylık elektrik üretim miktarları Şekil 5.18’de verilmiştir.

Tablo 5.6. Farklı RT seçimi için Çanakkale ilindeki MŞ’nin maliyet değerleri

	6 kW RT Seçilmesi Durumunda	10 kW RT Seçilmesi Durumunda
NPC Değeri (\$)	216.289,60	153.560,53
Başlangıç Sermaye Maliyeti (\$)	119.861,79	74.223,20
Yenileme Maliyeti (\$)	56.533,03	38.773,06
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	21.255,12	16.158,32
Yakıt Maliyeti (\$)	32.950,74	30.204,69
Geri Dönüşüm Maliyeti (\$)	14.311,07	5.798,73
LCOE (\$/kWh)	0,277	0,196



(a)



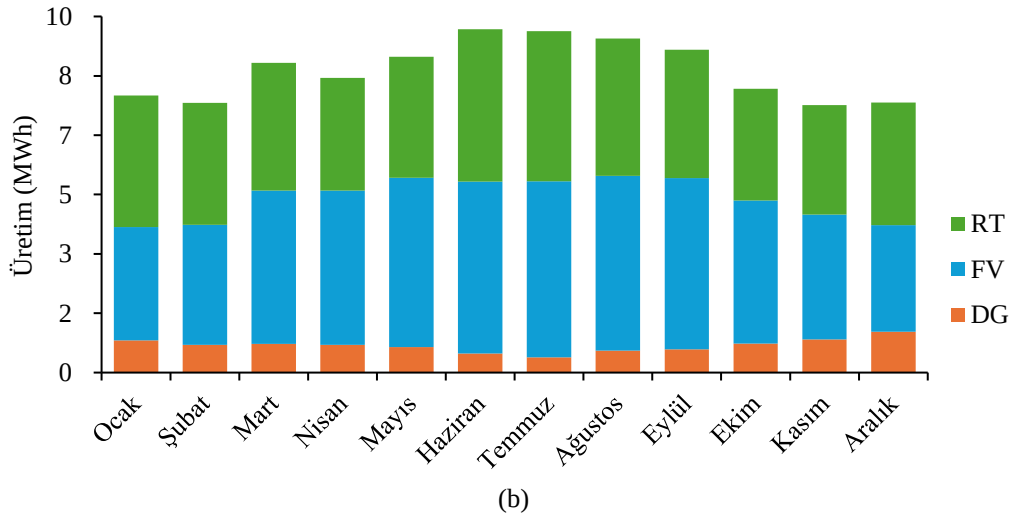
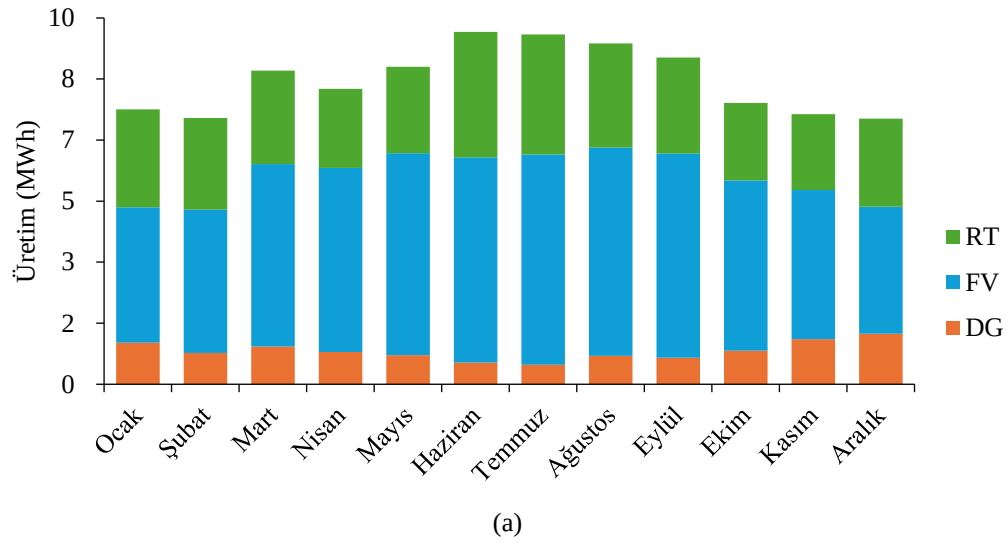
(b)

Şekil 5.18. Çanakkale için MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretim değerleri a) 6 kW'lık RT için b) 10 kW'lık RT için

Diyarbakır için tasarlanan MŞ'de 6 kW'lık "Bergey Excel 6R" RT modeli seçilmesi durumunda HOMER Pro yazılımı 3 adet RT kullanarak sistemin toplam rüzgâr kurulu gücünü 18 kW olarak belirlemektedir. Toplam üretimin %58,1'i FV, %31'i RT ve %10,9'u DG tarafından sağlanırken toplam aşırı elektrik üretim değeri ise 34.687 kW olarak elde edilmektedir. 10 kW'lık "Eocycle EO10" RT modelinin seçilmesi durumunda ise HOMER Pro yazılımı sadece bir adet türbin kullanmakta yani toplam rüzgâr kurulu gücü 10 kW olarak belirlemektedir. Bu durumda üretimin %49'u FV, %42'si RT ve %8,93'ü DG tarafından karşılanırken toplam aşırı elektrik üretim değeri ise 37.551 kW olarak gerçekleşmektedir. Her iki RT modeli için MŞ maliyet değerleri ise Tablo 5.7'de ve kaynaklara göre aylık elektrik üretim miktarları Şekil 5.19'da verilmiştir.

Tablo 5.7. Farklı RT seçimi için Diyarbakır ilindeki MŞ'nin maliyet değerleri

	6 kW RT Seçilmesi Durumunda	10 kW RT Seçilmesi Durumunda
NPC Değeri (\$)	293.256,33	228.718,34
Başlangıç Sermaye Maliyeti (\$)	136.118,51	97.705,31
Yenileme Maliyeti (\$)	72.919,78	59.292,74
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	30.84,11	26.336,49
Yakıt Maliyeti (\$)	62.553,35	52.493,16
Geri Dönüşüm Maliyeti (\$)	8.931,59	7.109,36
LCOE (\$/kWh)	0,376	0,293



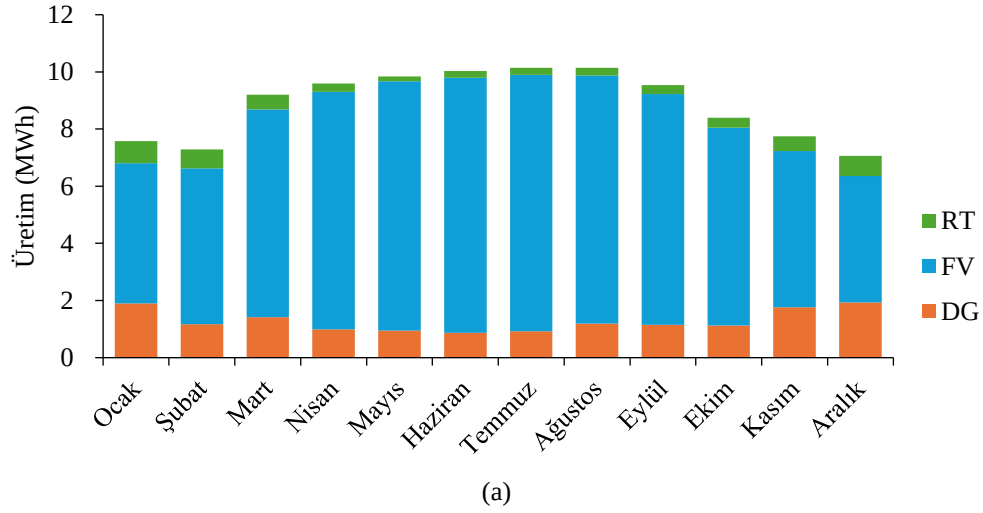
Şekil 5.19. Diyarbakır için MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretim değerleri a) 6 kW'lık RT için b) 10 kW'lık RT için

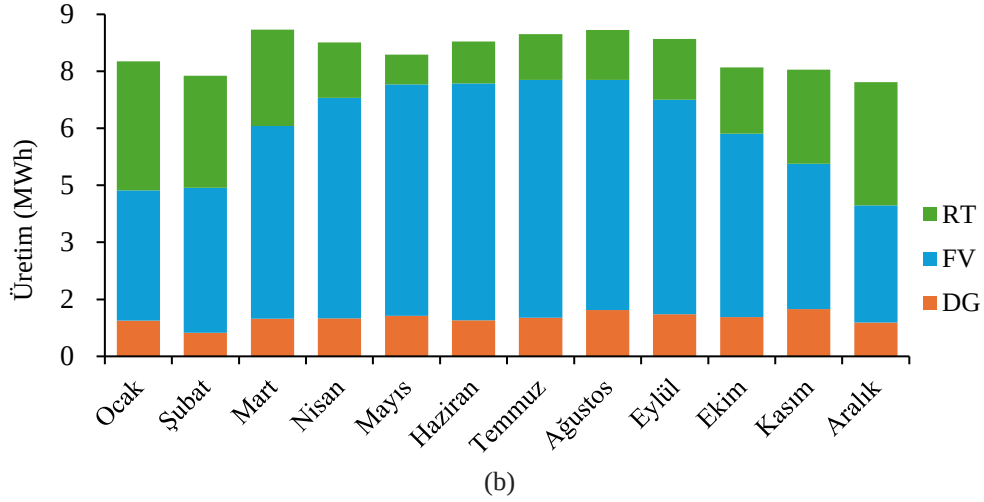
Rize için tasarlanan MŞ'de 6 kW'lık "Bergey Excel 6R" RT modeli seçilmesi durumunda HOMER Pro yazılımı bir adet RT kullanarak sistemin toplam rüzgâr kurulu gücünü 6 kW

olarak belirlemektedir. Toplam üretimin %81,3'ü FV, %4,62'i RT ve %14'ü DG tarafından sağlanırken toplam aşırı elektrik üretim değeri ise 41.763 kW olarak elde edilmektedir. 10 kW'lık "Eocycle EO10" RT modelinin seçilmesi durumunda ise HOMER Pro yazılımı bir adet türbin kullanmakta yani toplam rüzgar kurulu gücü 10 kW olarak belirlemektedir. Bu durumda üretimin %62,6'sı FV, %24,8'si RT ve %12,6'sı DG tarafından karşılanırken toplam aşırı elektrik üretim değeri ise 30,371 kW olarak gerçekleşmektedir. Her iki RT modeli için MŞ maliyet değerleri ise Tablo 5.8'de ve kaynaklara göre aylık elektrik üretim miktarları Şekil 5.20'de verilmiştir.

Tablo 5.8. Farklı RT seçimi için Rize ilindeki MŞ'nin maliyet değerleri

	6 kW RT Seçilmesi Durumunda	10 kW RT Seçilmesi Durumunda
NPC Değeri (\$)	340.230,30	285.946,32
Başlangıç Sermaye Maliyeti (\$)	127.561,89	114.316,28
Yenileme Maliyeti (\$)	96.107,28	84.620,98
İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	42.391,60	33.671,44
Yakıt Maliyeti (\$)	87.499,88	69.167,81
Geri Dönüşüm Maliyeti (\$)	13.330,33	15.830,18
LCOE (\$/kWh)	0,435	0,366





Şekil 5.20. Rize için MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretim değerleri a) 6 kW'lık RT için b) 10 kW'lık RT için

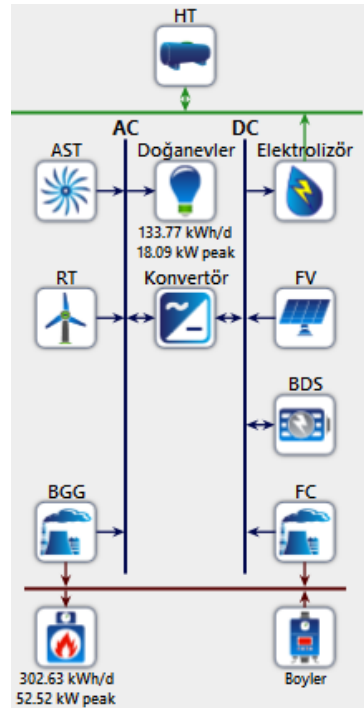
Yukarıdaki veriler incelendiğinde; Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için tasarlanan MŞ sistemlerinde RT ve FV üretim oranlarının önemli ölçüde farklılık gösterdiği görülmektedir. Çanakkale, yüksek rüzgar potansiyeli sayesinde RT'nin üretim payının en yüksek olduğu il olmuştur. Ayrıca 10 kW'lık RT seçiminin yapıldığı MŞ modeli, tüm modeller içerisinde en ekonomik model olmuştur. Diyarbakır'da FV ve RT'nin üretim payları diğer iki şehire göre daha dengeli gerçekleşmiştir. Rize'de ise nispeten daha düşük rüzgâr ve güneş potansiyeli nedeniyle DG'nin üretimdeki payı diğer illere kıyasla daha yüksektir. Ayrıca depolama boyutunun büyüklüğüne bağlı olarak toplam MŞ maliyeti en yüksek bu ilde elde edilmektedir.

Çanakkale ve Diyarbakır illerine ait maliyet tabloları incelendiğinde, RT kapasitesinin küçük seçilmesi (6 kW) durumunda türbin sayısının artmasına bağlı olarak maliyetin arttığı görülmektedir. Bu veriler, RT kapasitesinin doğru seçilmesinin hem ekonomik açıdan hem de verimlilik açısından ne kadar kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

5.3. Uygulama-3: Kırsal Alanlar İçin Hibrit Bir Sistemin Tekno-Ekonomik Analizi: Hidrojen ve Pil Depolama ile Elektrik ve Isı Üretimi

5.3.1. Sistem Modellenmesi

Bu uygulamada, Bingöl ilinin kırsal kesiminde bulunan ve olumsuz hava koşullarından dolayı sık sık elektrik kesintilerinin meydana geldiği 53 hanelik Doğaneyler köyü incelenmiştir. Olumsuz hava şartlarından kaynaklanan elektrik kesintileri ve bölgenin zorlu arazi yapısı nedeniyle oluşan arızaların onarılması işleminin uzun sürmesi köy halkının yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu uygulamada; Bingöl ili Doğaneyler köyü için bölgenin mevcut YEK'lerini kullanarak elektrik ve ısı enerjisi üreten bir MŞ modeli HOMER Pro yazılımı ile tasarlanmıştır. HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Bu model; FV, RT, AST, BGG, FC, BDS, HT ve boyler bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.21. Uygulama-3 için HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ modeli

YEK'ler tarafından üretilen fazla enerjinin bir kısmı BDS'de depolanırken, diğer kısmı hidrojen üretmek için elektrolizörde kullanılır. BGG ve FC bileşenlerinde elektrik üretilirken aynı zamanda açığa çıkan termal enerji, termal yükü karşılamak için kullanılır.

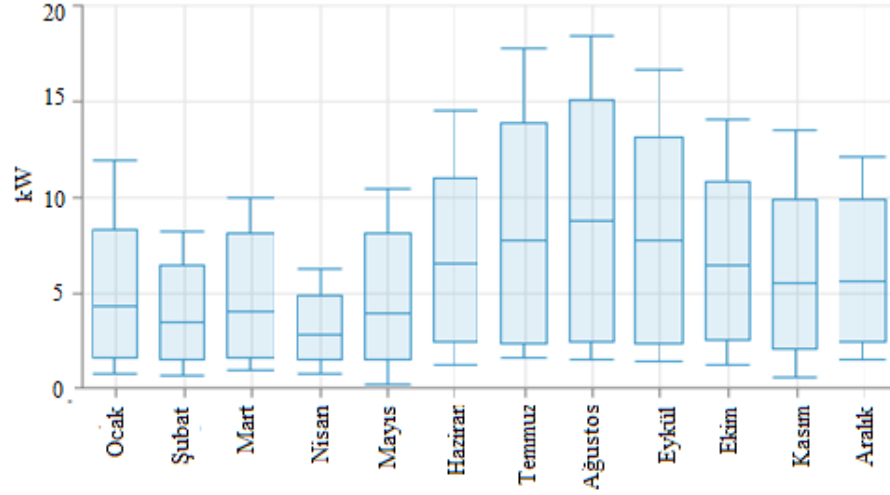
Talebin geri kalanı boyler tarafından karşılanır. MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri Tablo 5.9’da sunulmuştur.

Tablo 5.9. Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri

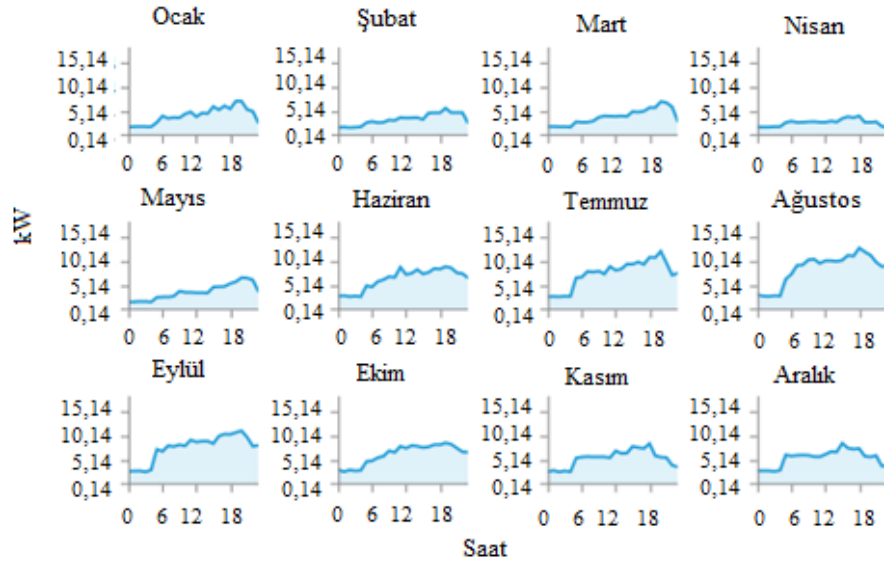
Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti (\$/kW)	Geri dönüşüm maliyeti (\$/kW)	Bakım ve onarım maliyeti (\$/kW/yıl)	Çalışma ömrü
FV [116]	700	700	10	25
RT	10000	8000	30	20
AST	15000	10000	50	25
BGG [122]	2000	1250	0,01/h	20000 h
Elektrolizör [116]	1000	1000	0,1	15
HT [116]	500/kg	500/kg	0/Kg	25
FC [122]	3000	2500	0,01/h	50000h
BDS [122]	300/batarya	300/batarya	10/batarya	10
Konvertör [122]	300	300	0	15

5.3.2. Yük Profili

HOMER Pro yazılımında, Doğanevler köyü için aylık gerçek tüketim değerleri kullanılmıştır. Oluşturulan ortalama aylık ve saatlik yük profilleri Şekil 5.22 ve 5.23’te verilmiştir. Yaz aylarında köyün göç alması nedeniyle hane sayısının artması, tarımsal sulamanın yapılması ve hayvansal ürünlerin üretilmesi gibi etkenlerden dolayı elektrik talebi artmaktadır. Kış aylarında ise tersine göçten dolayı hane sayısı ile kullanılan elektrikli cihazların azalmasından dolayı elektrik talebi düşmektedir. Topluluğa ait gerçek veriler kullanıldığı için bazı tüketim farklılıkları, kış aylarında meydana gelen uzun süreli elektrik kesintilerinden kaynaklanmaktadır.



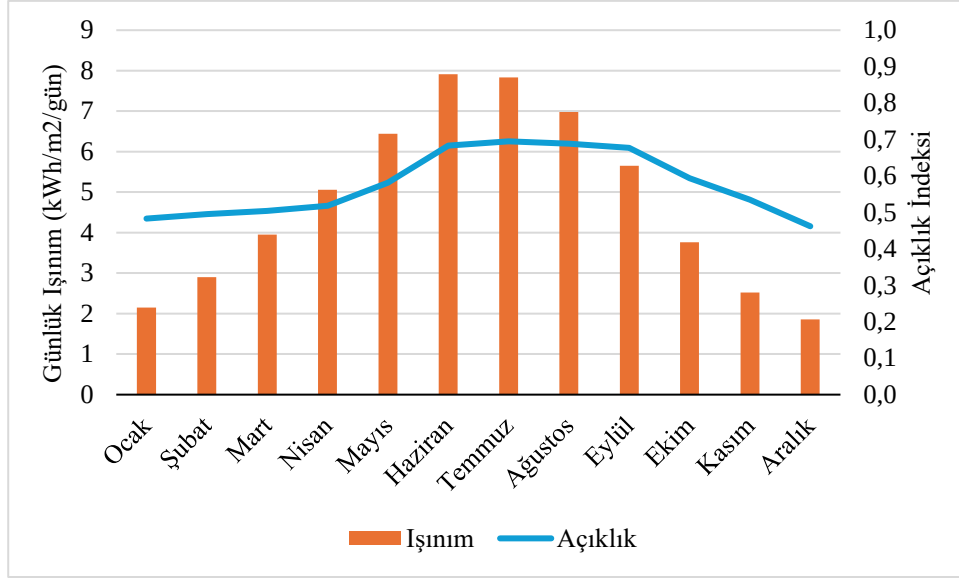
Şekil 5.22. Uygulama-3 için ortalama aylık elektrik yük profili



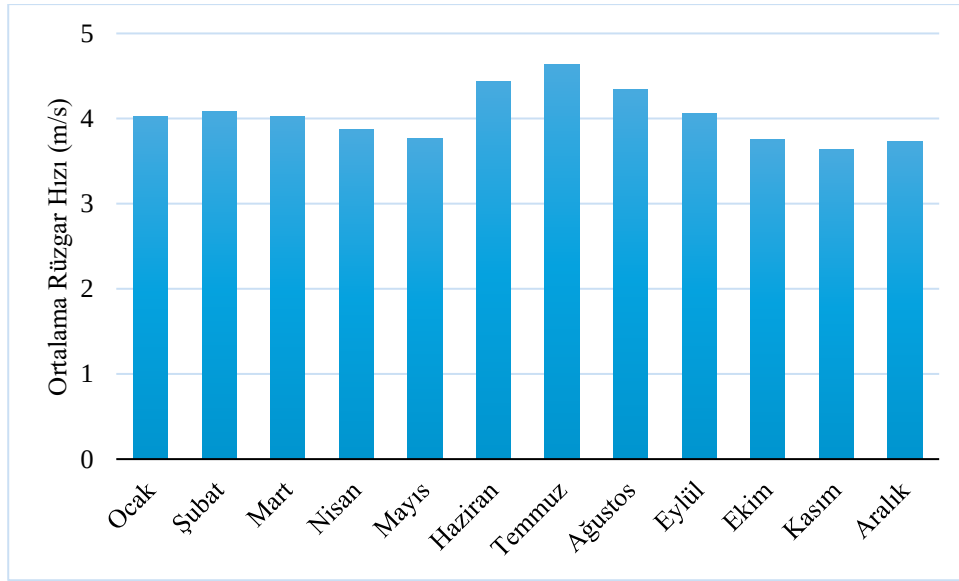
Şekil 5.23. Uygulama-3 için saatlik elektrik yük profili

5.3.3. Bölgenin Meteorolojik Verileri

Bu uygulamada seçilen bölgeye ait güneş ışıınımı ve rüzgâr verileri HOMER Pro yazılımına entegre edilmiş NASA veri tabanından alınmıştır. Yıllık ortalama güneş ışıınım değeri 4,75 kWh/m²/gün, ortalama rüzgâr hızı ise 4,03 m/s'dir. Bölgeye ait aylık ortalama güneş ışıınım verileri Şekil 5.24'te, aylık ortalama rüzgâr hızı verileri ise Şekil 5.25'te verilmiştir.



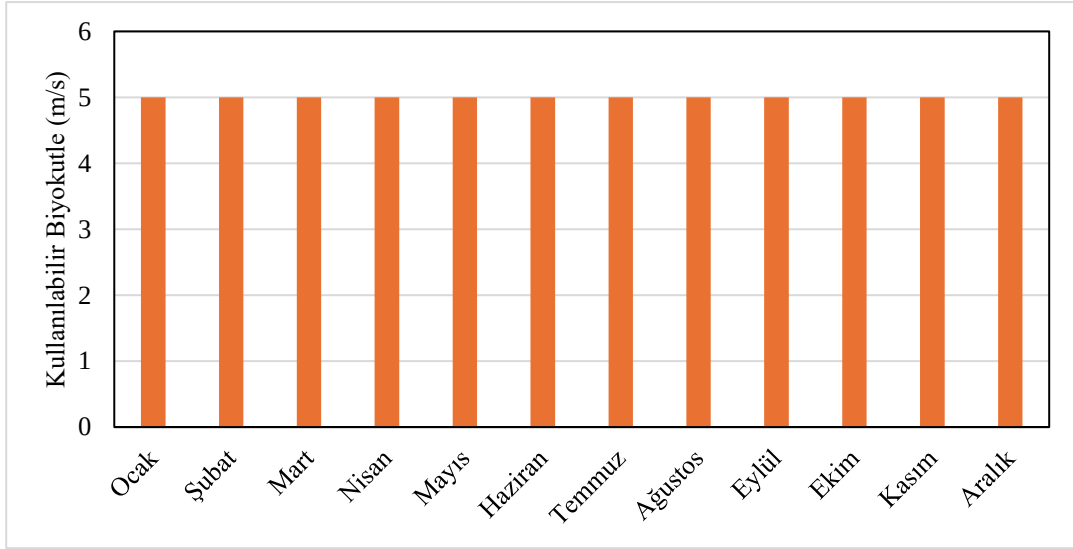
Şekil 5.24. Uygulama-3 için aylık ortalama güneş radyasyonu ve netlik indeksi değişimi



Şekil 5.25. Uygulama-3 için aylık ortalama rüzgâr hızı grafiği

5.3.4. Biyokütle Kaynakları

Tarım ve hayvancılık ile uğraşan insanların yaşadığı bölgede halkın çoğunluğu keçi ve inek yetiştiriciliği yapmaktadır. Bu uygulamada DG'ler yerine mevcut hayvansal atıkların enerjisinden faydalanmak amacıyla sisteme BGG entegre edilmiştir. Böylece hayvansal atıklardaki biyogaz enerjisi elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Topluluğa ait biyokütle değerleri Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5.26. Uygulama-3 için bölgenin biyokütle potansiyeli

Büyükbaş hayvanlar günde ortalama 10kg yaş gübre üretirken bu değer küçükbaş hayvanlarda 1 kg'dır [126]. 53 haneden oluşan topluluğun hayvan varlığı 300 inek ve 2000 keçiden oluşmaktadır. Bu bilgiler dikkate alınarak bölgenin biokütle kaynağı HOMER Pro yazılımına girilmiştir.

5.3.5. Simülasyon Sonuçları

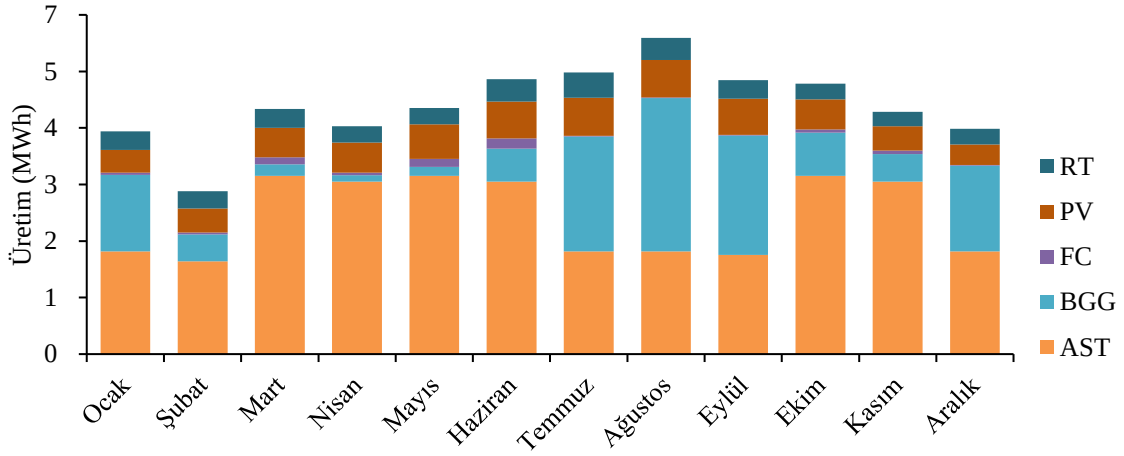
Simülasyon sonuçlarına göre MŞ bileşenlerinin optimum kapasite değerleri Tablo 5.10'da sunulmuştur.

Tablo 5.10. Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

Bileşen	Boyut	Birim
BGG	10	kW
FC	5	kW
FV	4,58	kW
BDS	15	kWh
RT	3,3	kW
Konvertör	4,39	kW
Boiler	1	Adet
AST	5,40	kW
Elektrolizör	10	kW
HT	30	kg

5.3.5.1. Elektrik Üretimi

Tasarlanan MŞ'nin günlük elektrik enerjisi üretim değeri 198 kWh, puant üretim değeri ise 24 kW'tir. MŞ bileşenlerinin üretim miktarları Şekil 5.27'de verilmiştir. Enerji üretimi temel olarak AST, BGG, FV ve RT tarafından sağlanmaktadır. Enerji üretimi yük talebini aştığında, fazla enerji BDS'de depolanır. BDS şarj olduktan sonra fazla enerji elektrolizör aracılığıyla hidrojen olarak depolanmaktadır. FV, AST ve RT tarafından üretilen enerji yük talebini karşılamadığında öncelikle BDS devreye girmektedir. Şayet talep henüz karşılanmadıysa FC elektrik üretimine katkıda bulunur. Enerji talebi hala karşılanmıyorsa, BGG sistemi yük talebini karşılamak için devreye girmektedir.



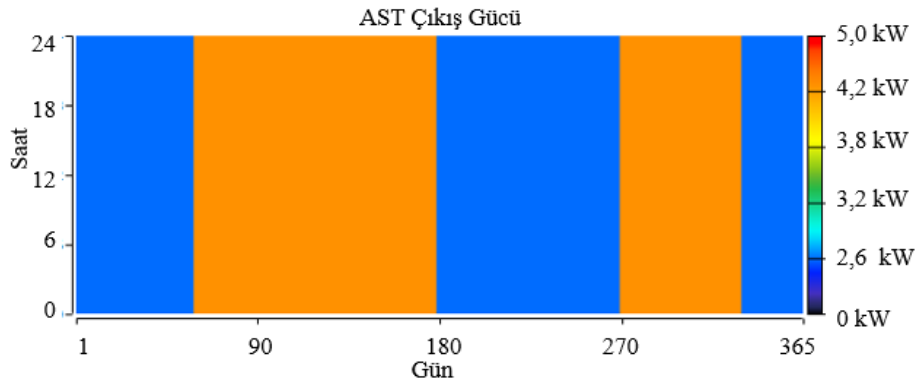
Şekil 5.27. Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları

MŞ bileşenlerinin aylık elektrik üretimi incelendiğinde, üretilen enerjinin büyük kısmının AST, BGG ve FV tarafından üretildiği görülmektedir. Yıl boyunca güneş radyasyonu ve yağış miktarının değişkenliğine bağlı olarak, FV ve AST tarafından üretilen enerji miktarı belirli aylarda azalmaktadır. BGG, elektrik üretim kapasitesini artırarak bu aylardaki enerji talebinin karşılanmasına önemli katkı sağlamaktadır. MŞ'yi oluşturan bileşenlerin üretim miktarları Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11. Uygulama-3 için MŞ bileşenlerinin üretim değerleri

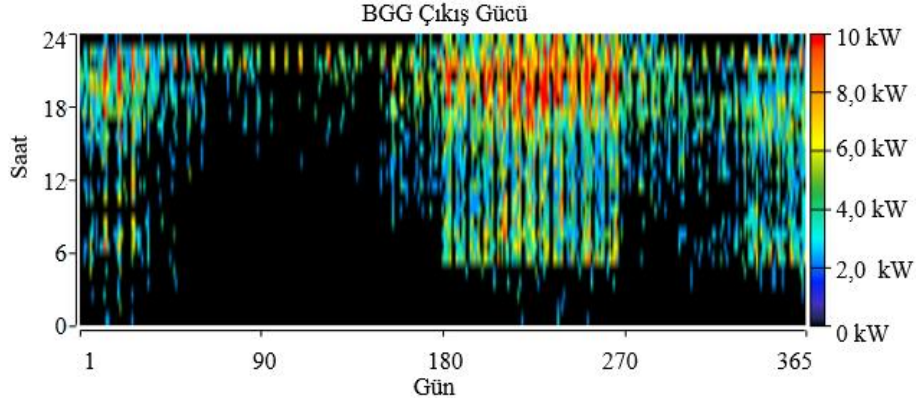
Bileşen	Üretim Miktarı (kWh/yıl)	Oran (%)
AST	31.694	55,3
BGG	13.573	23,7
FV	6.968	12,2
RT	4.257	7,43
FC	797	1,39
Toplam	57.288	100

Üretilen enerjinin %55,3'ünü tek başına üreten AST sistemi, en fazla üretim yapan bileşendir. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde yağmurun artmasıyla birlikte AST güç üretimi maksimum güç değeri olan 4,59 KW'a ulaşmaktadır. Yaz ve kış mevsimlerinde ise elektrik üretimi azalmaktadır. AST yıl boyunca toplam 31.694 kWh enerji üretmektedir. AST'nin güç çıkış eğrisi Şekil 5.28'de verilmiştir.



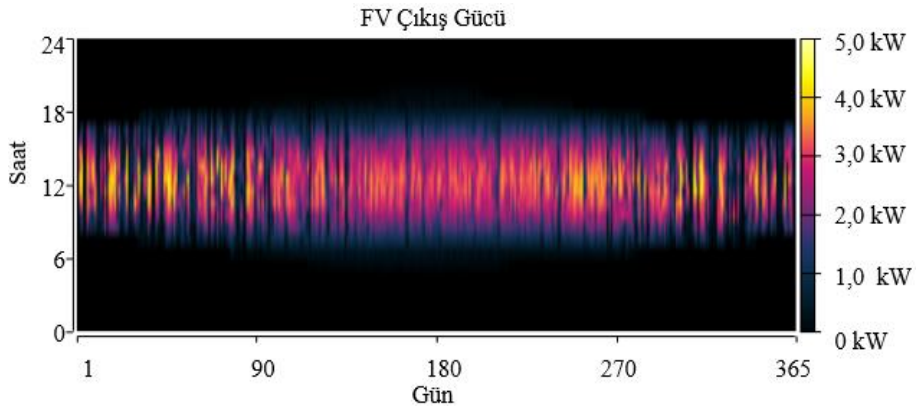
Şekil 5.28. Uygulama-3 için AST'nin güç çıkış eğrisi

BGG, diğer enerji kaynaklarının elektrik tüketimini karşılayamadığı durumlarda devreye girerek elektrik üretmektedir. Özellikle AST'nin daha az elektrik ürettiği yaz ve kış mevsimlerinde, gerekli yük talebini karşılamak için daha fazla elektrik ürettiği görülmektedir. BGG, yılda 42,9 ton biyokütle bazlı yakıt tüketerek 2.856 saat çalışma ile 13.573 kWh elektrik enerjisi ve 19.358 kWh termal enerji üretmektedir. BGG'nin güç çıkış eğrisi Şekil 5.29'da verilmiştir



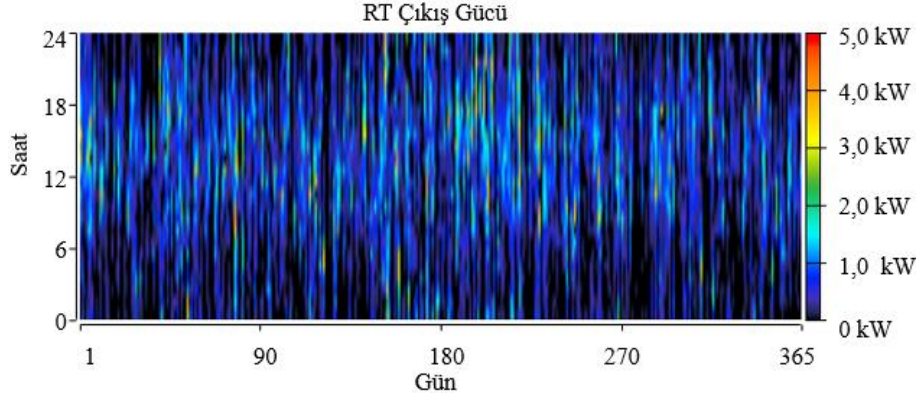
Şekil 5.29. Uygulama-3 için BGG'nin güç çıkış eğrisi

FV sistemin nominal kapasitesi 4,58 kW ve yıllık enerji üretim miktarı 6.968 kWh'dir. FV sistem gün ortasında neredeyse maksimum güç üretmektedir. Sonbahar ve kış aylarında kapalı gün sayısının fazla olması nedeniyle enerji üretiminin düşük olduğu görülmektedir. FV sistemi, günde ortalama 19,1 kWh enerji üreterek toplam enerji üretiminin %14,2'sini karşılamaktadır. FV panellerinin güç çıkış eğrisi Şekil 5.30'da gösterilmektedir.



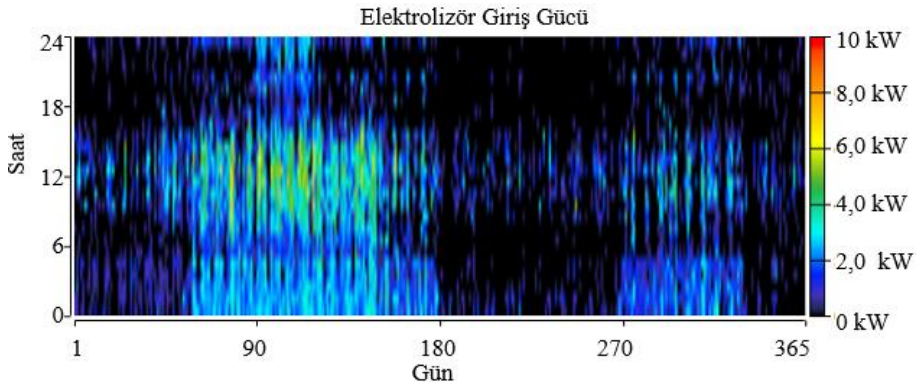
Şekil 5.30. Uygulama-3 için FV panellerinin güç çıkış eğrisi

RT'nin nominal kapasitesi 3,3 kW, yıllık enerji üretimi 4.257 kWh ve toplam üretimdeki payı %7,43'tür. RT yıl boyunca değişken rüzgâr koşulları nedeniyle genellikle nominal kapasitesinin altında üretim yapmaktadır. RT'nin güç çıkış eğrisi Şekil 5.31'de verilmiştir.



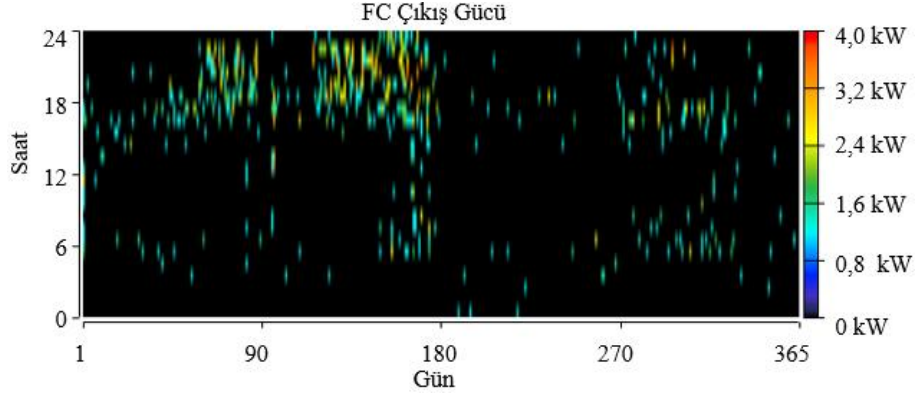
Şekil 5.31. Uygulama-3 için RT'nin güç çıkış eğrisi

MŞ tarafından üretilen fazla enerji bir elektrolizör aracılığıyla hidrojene dönüştürülür ve gerektiğinde FC tarafından kullanılmak üzere bir HT'de depolanır. Elektrolizör genellikle YEK'lerin tam kapasitede elektrik ürettiği ve yük talebinin düşük olduğu dönemlerde devreye girer. Nominal kapasitesi 10 kW olan elektrolizör, bir kg hidrojen üretmek için 46,4 kWh enerji tüketmiş ve yılda 165 kg hidrojen üretmiştir. Elektrolizörün güç giriş eğrisi Şekil 5.32'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde elektrolizörün özellikle gün ortasında tam kapasite çalıştığı görülmektedir.



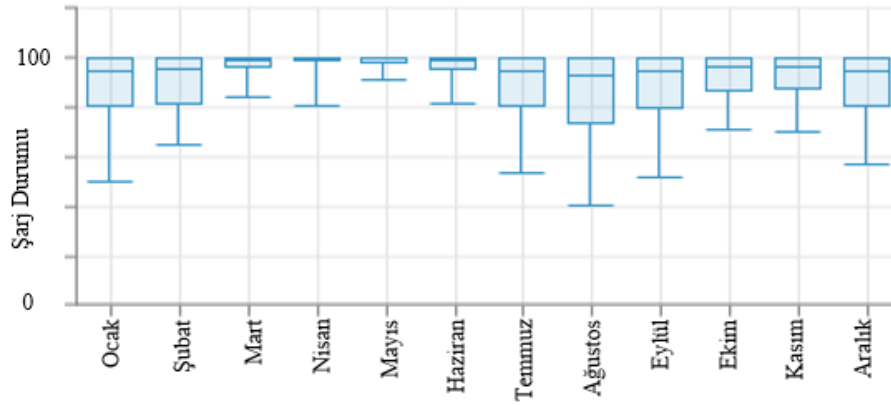
Şekil 5.32. Uygulama-3 için elektrolizörün güç giriş eğrisi

Çıkış gücü 5KW olan FC, bir yılda yakıt olarak 167 kg hidrojen kullanarak 797 kWh elektrik enerjisi ve 2.869 kWh termal enerji üretmektedir. FC'nin güç çıkış eğrisi Şekil 5.33'te verilmiştir.



Şekil 5.33. Uygulama-3 için FC'nin güç çıkış eğrisi

MŞ sistemlerinde BDS'ler, talep arttığında gerekli gücü sağlamak üzere güç kaynaklarından üretilen fazla enerjiyi depolamak için kullanılır. BDS'lerin uygun şekilde boyutlandırılması, sistemin teknik ve ekonomik fizibilitesini önemli ölçüde artırabilir. Bir BDS'nin ömrünü en çok etkileyen faktör yıllık şarj-deşarj döngü sayısıdır. Bu çalışmada 12V, 83 Ah'lık kinetik akü kullanılmıştır. Yıllık enerji girişi 1.337 kWh, enerji çıkışı 1.070 kWh ve kullanım ömrü 10 yıldır. BDS'nin aylık bazda şarj vedeşarj durumu Şekil 5.34'te gösterilmektedir.

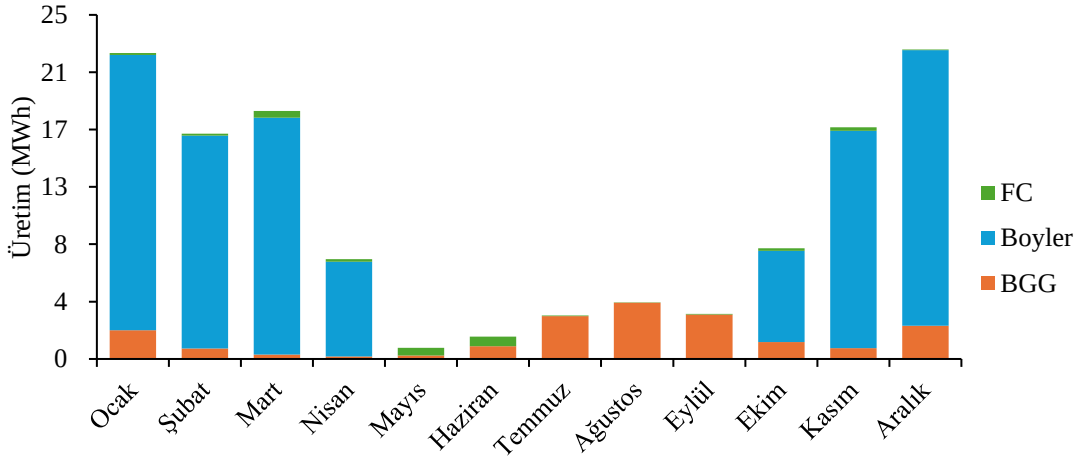


Şekil 5.34. Uygulama-3 için BDS'nin aylara göre şarj vedeşarj durumu

5.3.5.2. Thermal Energy Production

BGG ve FC'nin elektrik ürettiği dönemlerde, bu işlemler sonucunda ortaya çıkan atık ısı termal yükü desteklemek için kullanılır. Bu atık ısı, ısıtma ihtiyacını karşılayarak enerji sisteminin genel verimliliğini artırmaktadır.

Tasarlanan MŞ'nin üretmesi gereken günlük termal enerji 304 kWh'dir. Yıllık termal yükün 19.358 kWh'si (%15,6) BGG tarafından, 2.869 kWh'si (%2,31) FC tarafından karşılanmaktadır. Yıllık toplam ısı talebinin %82,1'i 12.153 m³ doğal gaz tüketilerek karşılanmaktadır. Bölgenin biyokütle kaynaklarını değerlendirmek amacıyla BGG'de yakıt olarak biyogaz kullanılmıştır. Termal yük için kullanılan kaynaklar Şekil 5.35'teki gibidir.



Şekil 5.35. Uygulama-3 için termal enerji kaynaklarının dağılımı

5.3.5.3. Ekonomik Analiz

Yapılan çalışmada ele alınan iki model, HOMER Pro yazılımı tarafından önerilen en ekonomik model ile tüm bileşenleri içeren modeldir. En ekonomik model FV, BGG ve AST üretim kaynakları ile BDS, dönüştürücü ve boyler bileşenlerini içermektedir. Bu modelin NPC değeri 110.621 \$, ilk sermaye maliyeti 46.736 \$, işletme ve bakım maliyeti 4.942 \$ ve LCOE değeri 0,121 \$/kWh'dir. Tüm bileşenlerin olduğu model, ekonomik modele ek olarak, FC, HT, elektrolizör ve RT bileşenlerini içermektedir. Bu bileşenlerin ilk sermaye maliyeti ile işletme ve bakım maliyetleri, sistemin NPC ve LCOE değerlerini etkilemiştir. Tüm bileşenlerin yer aldığı modelde NPC değeri 160.753 \$, ilk sermaye maliyeti 99.026 \$, işletme ve bakım maliyeti 7.433 \$ ve LCOE değeri 0,200 \$/kWh'dir.

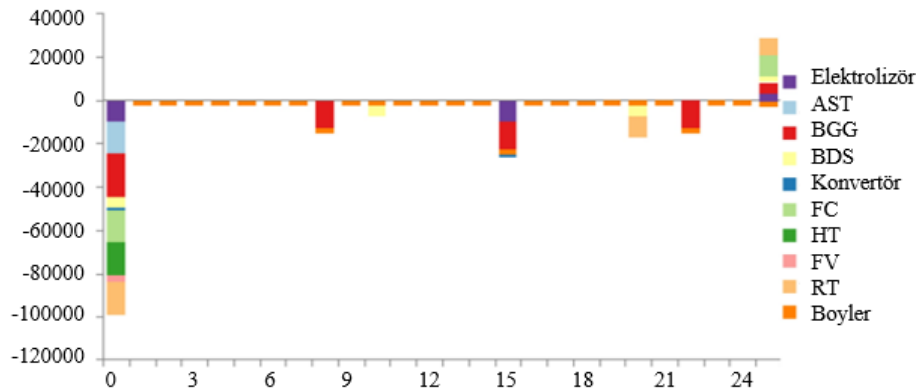
Tüm bileşenli modelde daha fazla bileşen olduğu için ilk sermaye maliyeti yüksektir. Bu maliyetler NPC ve LCOE değerlerini artırmakla beraber enerji arz güvenliği ve sistemin sürdürülebilirliği açısından daha avantajlıdır. En ekonomik modelde FC, HT, elektrolizör ve RT gibi bileşenler yerine FV, BDS ve dönüştürücü kapasiteleri artırılarak sistem

basitleştirilmiştir. Bu durumda başlangıç maliyetleri azalırken, enerji üretimi yalnızca sınırlı kaynaklara bağlı kalacağından sistemin esnekliği azalmaktadır. Her iki modelin ekonomik değerleri Tablo 5.12’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.12. Her iki modelin ekonomik değerleri
(EM: Ekonomik Model, TBM: Tüm Bileşenlerin olduğu Model)

	Kapasite (kW)		Sermaye Maliyeti (\$)		Bakım ve Onarım Maliyeti (\$)		Değiştirme Maliyeti (\$)		Dönüşüm Maliyeti (\$)		Toplam (\$)	
	EM	TBM	EM	TBM	EM	TBM	EM	TBM	EM	TBM	EM	TBM
Elekt.		10		10.000		13		4.242		799		13.457
BDS	18	15	5.400	4.500	2.326	1.939	5.150	39.75	295	539	12.581	9.876
AST	5,40	5,40	15.000	15.000	646	646	0	0	0	0	15.646	15.646
BGG	10	10	20.000	20.000	4.131	3.692	19.128	17.752	15	1.288	43.244	40.156
FV	6,74	4,58	4.715	3.208	870	592	0	0	0	0	5.587	3.801
RT		3,3		15.000		258		2.188		1797		16.650
Konv	5,4	4,39	1.620	1.318	0	0	687	559	129	105	2.178	1.772
FC		5		15.000	291	0		0		2319		12.972
HT		30		15.000	0	0		0		0		1.500
Yakıt											31.382	31.382
Sistem			24.965	29.717	7.975	7.433	24.965	2.978	439	6.845	110.620	160.753

Projenin 25 yıllık ekonomik performansı Şekil 5.36’da görsel olarak özetlenmiştir. Süreç içerisinde BGG, BDS, RT, elektrolizör ve dönüştürücü gibi bileşenlerin kullanım ömürlerine bağlı olarak değiştirme maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Bu değiştirme işlemi sistemin toplam maliyetini etkilemektedir. En yüksek bakım, onarım ve değiştirme maliyetine sahip bileşen 13.535 \$ ile BGG’dir. Bunu 6.383,35 \$ ile elektrolizör, 3.446,55 \$ ile RT, 3.154 \$ ile BDS ve 2.586 \$ ile FV takip etmektedir. Ayrıca proje ömrü olan yirmi beş yılın sonunda, sistemin hurda değeri olarak bir gelir elde edilmektedir.



Şekil 5.36. Uygulama-3 için MŞ'nin 25 yıllık nakit akışı özeti

Gerçekleştirilen uygulama ile literatürdeki bazı CHP tabanlı çalışmalar Tablo 5.13'te karşılaştırılmıştır. Tablo 5.13, enerji sistemlerinin tasarımında bileşen seçimi ve ekonomik performans açısından hangi yaklaşımların daha etkin ve verimli olduğunu göstermektedir. Bu uygulamada diğer birçok çalışmadan farklı olarak AST ve BGG kullanılmıştır. BGG için yakıt olarak bölgenin mevcut biyokütle kaynaklarından elde edilen biyogaz kullanımı tercih edilmiştir. Ayrıca enerji üretimi için mevcut su kaynaklarından faydalanmak amacıyla sisteme AST entegre edilmiştir. Bu iki tercih sistemin LCOE'sini önemli ölçüde etkilemiştir. Tablodaki değerler, bu uygulamada tasarlanan sistemin ekonomik üstünlüğünü göstermektedir.

Tablo 5.13. CHP tabanlı MŞ'lerin LCOE değerlerinin karşılaştırması

MŞ	Şebeke Bağlantısı	Depolama Tipi	Metot	LCOE (\$/kWh)
FV, BGG, CHP [127]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	0,393
FV, RT, DG, CHP [128]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER, TOPSIS	0,143
FV, RT, DG, FC, CHP [129]	Şebekeden Bağımsız	BDS, HT	HOMER	0,120
FV, DG, CHP [130]	Şebekeden Bağımsız	-	HOMER	0,166
FV, RT, DG, CHP [131]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	0,236
FV, BGG, DG, CHP [132]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	0,275
FV, FC, CSP, CHP [133]	Şebekeden Bağımsız	HT	MATLAB	0,321
FV, RT, DG, CHP [134]	Şebekeden Bağımsız	BDS	HOMER	0,540
FV, AST, BGG, CHP (Uygulama-3)	Şebekeden Bağımsız	BDS, HT	HOMER	0,121

5.3.5.4. Duyarlılık Analizi

Önerilen MŞ sisteminin değişen koşullar altında dayanıklılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Kritik parametrelerdeki değişimlerin sistem performansını nasıl etkilediği analiz edilerek potansiyel riskler belirlenmiştir. Güneş radyasyonu ve rüzgâr hızındaki değişimlere bağlı olarak FV ve RT sistemlerinin NPC ve LCOE üzerindeki etkisi Tablo 5.14'te sunulmuştur.

Tablo 5.14. Uygulama-3 için YEK'lerdeki dalgalanmaların sistemin ekonomik parametrelerine etkisi

Güneş Radyasyonu (kWh/m ² /gün)	Rüzgâr Hızı (m/s)	FV (10 kW)	RT (3.3 kW)	BGG (10 kW)	AST (10 kW)	FC (5 kW)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)
1,860	4,590	2.956	5.579	15.097	31.694	664	163.290	0,204
7,910	4,590	10.160	5.579	11.911	31.694	1.029	158.230	0,196
7,910	3,650	10.160	3.383	12.899	31.694	1.59	159.821	0,199

Tablo 5.14 üç farklı senaryo sunmaktadır. İlk senaryoda güneş radyasyonu düşükken rüzgâr hızı yüksektir; ikinci senaryoda her ikisi de yüksektir. Üçüncü senaryoda ise güneş radyasyonu yüksek ancak rüzgâr hızı düşüktür. İkinci senaryonun diğerlerine kıyasla en uygun maliyetli senaryo olduğu görülmüştür. Bu durum, güneş radyasyonu ve rüzgâr hızındaki artışın FV ve RT sistemlerinin üretimini artırması, bu sayede BGG'nin çalışma süresinin azalması ve dolayısıyla maliyetlerin düşmesi ile açıklanabilir. İlk senaryoda BGG'nin işletme ve bakım maliyetleri sırasıyla 3.922 \$ ve 18.495 \$ iken, ikinci senaryoda bu maliyetler 3.284 \$ ve 16.296 \$'a düşmektedir.

Bir diğer duyarlılık analizinde enflasyon dalgalanmalarının sistem maliyetleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5.37'de gösterildiği gibi, yıllık enflasyon oranındaki bir artış, sistemin NPC değerinde bir artışa yol açmaktadır.

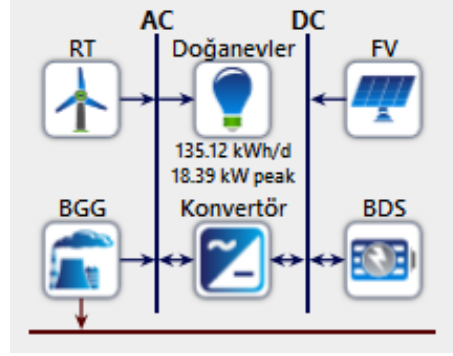
Sensitivity		Architecture																						
ExpectedInflation (%)														FV (kW)	RT	BGG (kW)	FC (kW)	BDS	AST (kW)	Elekt (kW)	HT (kg)	Konv (kW)	NPC (\$)	
10.0														4.58	1	10.0	5.00	15	5.40	10.0	30.0	4.39	CC	\$247,029
2.00														4.58	1	10.0	5.00	15	5.40	10.0	30.0	4.39	CC	\$160,753
5.00														4.58	1	10.0	5.00	15	5.40	10.0	30.0	4.39	CC	\$184,436

Şekil 5.37. Uygulama-3 için farklı enflasyon oranlarının NPC üzerindeki etkisi

5.4. Uygulama-4: Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Teknik, Ekonomik ve Çevresel Performansının Analizi için Bir Dağıtım Stratejisi

5.4.1. Sistemin Modellenmesi

Uygulama-3'te verilen Doğanevler köyünün yük profilleri ile meteorolojik ve biyokütle kaynak verileri bu uygulama için de kullanılmıştır. Bölgenin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla şebekeden bağımsız FV, RT, BGG ve BDS'den oluşan bir MŞ tasarlanmıştır. HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ'nin yapısı Şekil 5.38'de ve bileşenlerin maliyet değerleri Tablo 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.38. Uygulama-4 için tasarlanan MŞ modeli

Tablo 5.15. Uygulama-4 için MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri

Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti (\$/kW)	Geri dönüşüm maliyeti (\$/kW)	Bakım ve onarım maliyeti (\$/kW/yıl)	Çalışma ömrü
FV sistem	700	700	10	25
RT	290000	25000	20	20
BGG	2000	1250	0,01/h	20000 h
Batarya	300/batarya	300/batarya	10/batarya	10
Konvertör	300	300	0	15

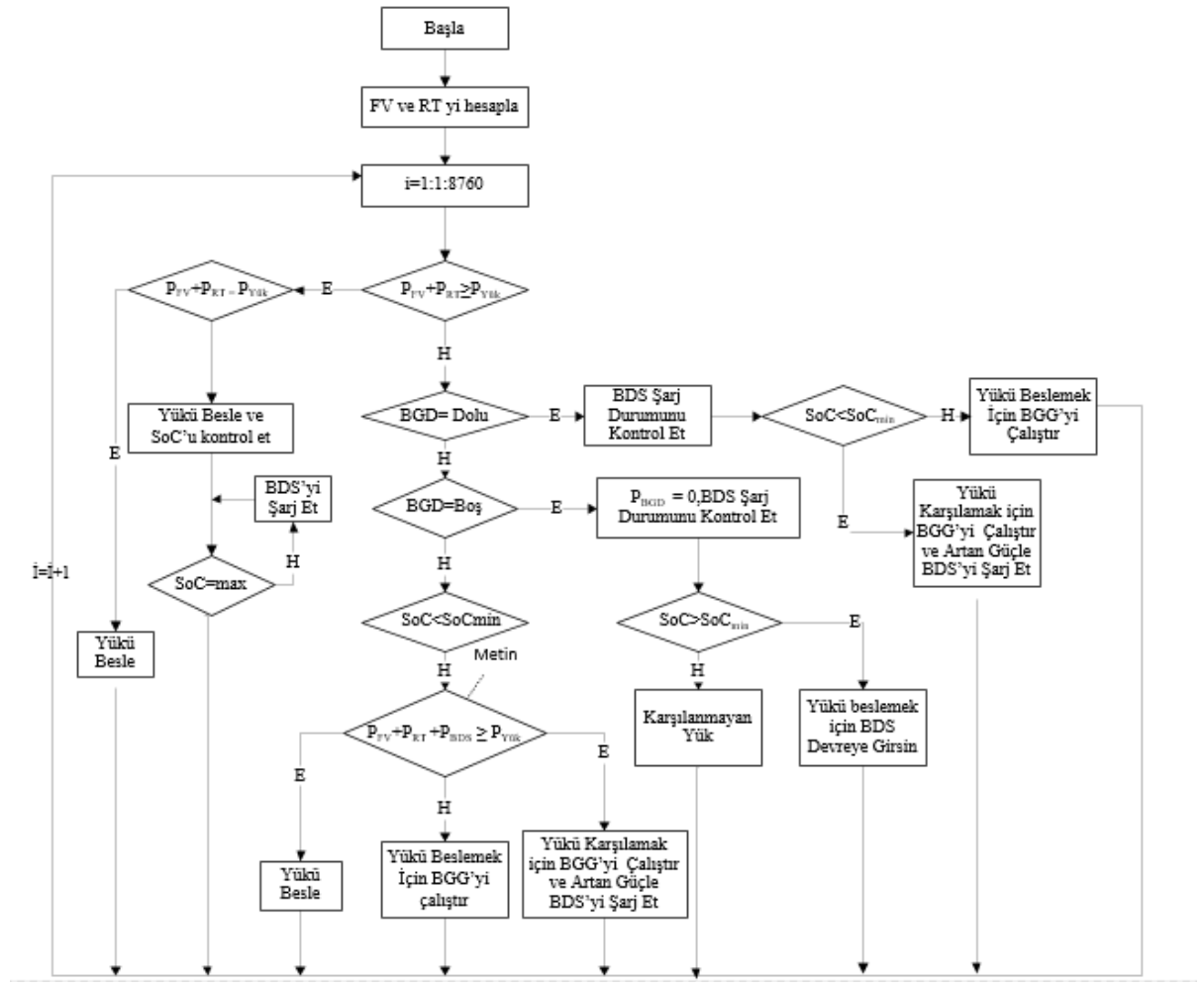
Bileşenlerin birim maliyetlerinin belirlenmesi karmaşık bir analiz sürecini içerir. Bu hesaplamalarda kullanım ömrü, verimlilik, yerel enerji üretim potansiyeli gibi teknik ve ekonomik varsayımlar dikkate alınır. Birim maliyet, her bir bileşenin toplam maliyetinin ürettiği enerji miktarına bölünmesiyle hesaplanır. Kurulum maliyeti; bileşenlerin başlangıç maliyeti ile montaj ve işçilik maliyetlerinden oluşmaktadır. Bakım ve onarım maliyeti, bir sistemin düzgün çalışmasını sağlamak, arızaları önceden tespit etmek ve tesisin ömrünü uzatmak için yapılan hizmet ve işçilik maliyetleridir. Değiştirme maliyeti, çalışma ömrünün sonuna ulaşan bir bileşenin değiştirilmesinin maliyetidir.

5.4.2. Sevk Stratejisi

Bu uygulama ile tasarlanan MŞ'nin çalışması için önerilen sevk stratejisine ait akış şeması Şekil 5.39'da verilmiştir. Önerilen strateji ile MŞ'ler için daha etkili bir enerji yönetimi amaçlanmaktadır. Bu stratejinin işleyişi aşağıdaki gibidir:

- Eğer FV ve RT tarafından üretilen güç, yük talebine eşitse, YEK'ler yalnızca yükü besleyecektir. Bu durumda, akü şarj edilmeyecek ve BGG çalışmayacaktır.

- Eğer FV ve RT'nin ürettiği güç, yük talebinden fazla ise, YEK'ler yükü besleyecek ve fazla enerji, BDS'yi şarj etmek için kullanılacaktır.
- Eğer FV ve RT yük talebini karşılayamıyorsa, biyogaz deposu (BioSt) kontrol edilir. Eğer BioSt dolu ve batarya şarjı durumu (SOC) belirtilen minimum seviyenin altındaysa ($SOC < SOC_{min}$), BGG kalan yükü karşılamak üzere çalıştırılır ve fazla enerji BDS'ye yönlendirilir. Ancak, eğer SOC belirtilen minimum seviyenin altında değil ise ($SOC > SOC_{min}$) BGG sadece yükü besleyecektir.
- Eğer biyogaz deposu boşsa (BioStEmpty) ve SOC belirtilen minimum seviyenin üzerindeyse ($SOC > SOC_{min}$), yük BDS tarafından karşılanacaktır.
- Eğer FV ve RT yük talebini karşılayamıyorsa ve BioSt boş değilse, BGG çalışarak kalan yükü karşılayacaktır.
- Eğer SOC belirtilen minimum seviyenin altındaysa ($SOC < SOC_{min}$) ve FV ile RT yük talebini karşılayacak yeterli güç üretmiyorsa, BGG yük talebini karşılamak üzere çalışacaktır.



Şekil 5.39. Uygulama-4 için önerilen sevk stratejisi

Bu uygulamada Bingöl ilinin kırsal kesiminde bulunan Doğanevler köyü için FV, RT, BGG ve BDS'den oluşan bir MŞ tasarlanarak yeni bir dağıtım stratejisi önerilmiştir. Önerilen MŞ için HOMER Pro yazılımının kendi LF ve CC stratejileri ile bu çalışmada geliştirilen strateji teknik, ekonomik ve çevresel etkileri bakımından analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

5.4.3. Simülasyon Sonuçları

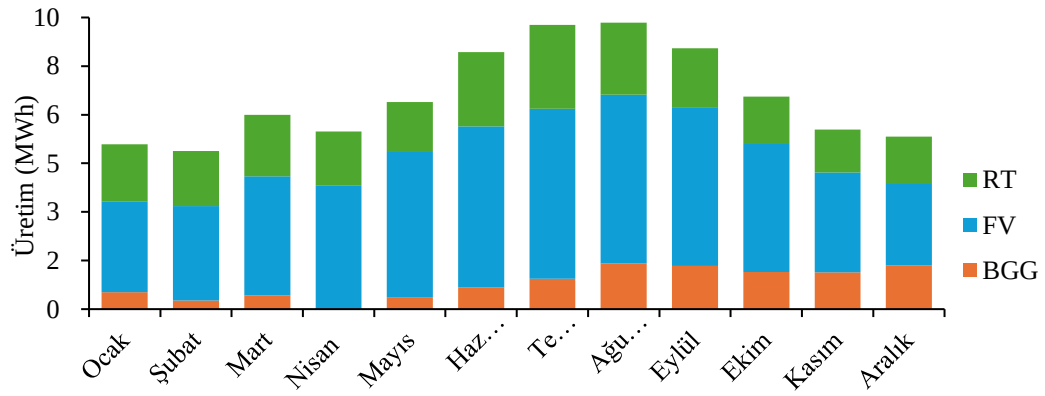
Yapılan simülasyon sonucunda, stratejilere göre oluşan MŞ bileşenlerinin optimum kapasite değerleri Tablo 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5.16. Uygulama-4 için stratejilere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

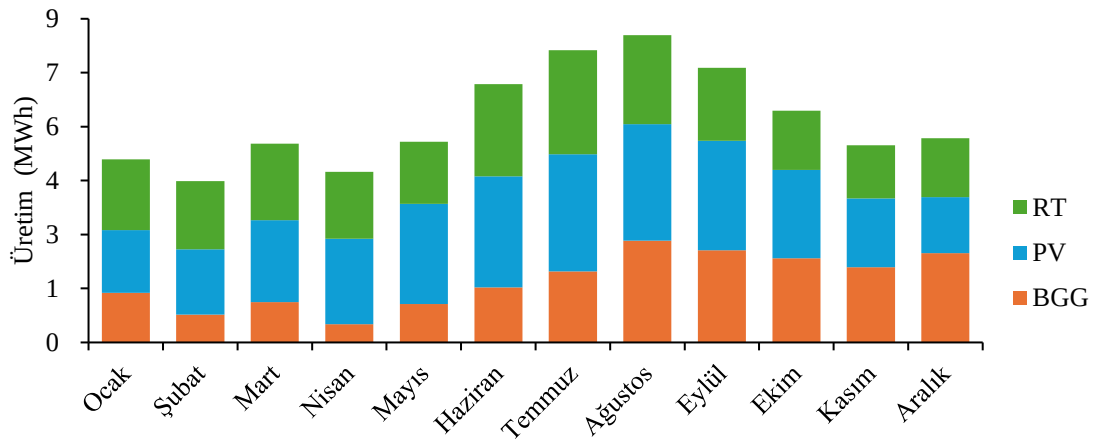
Bileşen	Önerilen Sevk Stratejisi	LF Sevk Stratejisi	CC Sevk Stratejisi
RT (kW)	10	10	10
FV (kW)	10	31	17,2
BDG (kW)	8	8	8
BDS (kWh)	12	54	33
Konvertör (kW)	12	13	11,2

5.4.3.1. Elektriksel Analiz

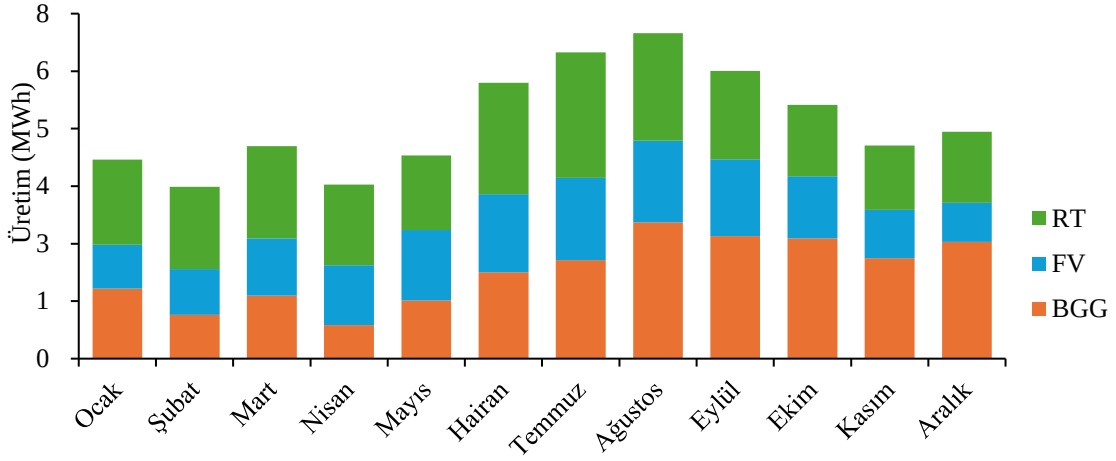
Doğanevler köyü için tasarlanan MŞ'nin günlük yük talebi 135 kWh'dir. LF, CC ve ML stratejilerine göre ayrı ayrı yapılan simülasyon sonucu MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları sırasıyla Şekil 5.40, 5.41 ve 5.42'de verilmiştir.



Şekil 5.40. LF stratejisine göre MŞ bileşenlerinin üretim miktarı



Şekil 5.41. CC stratejisine göre MŞ bileşenlerinin üretim miktarı



Şekil 5.42. ML stratejisine göre MŞ bileşenlerinin üretim miktarı

LF dağıtım stratejisine göre FV yılda 50.196 (%60,3) kWh enerji üretirken, RT ve BGG'nin ürettikleri değerler sırasıyla 22.927 kWh (%27,6) ile 10.085 (%12,1) kWh'dir. CC dağıtım stratejisine göre FV, RT ve BGG'nin ürettikleri enerji miktarları sırasıyla 27.927 kWh (%39,7), 22.927 (%32,6) kWh ve 19.523 (%27,7) kWh'dir. Önerilen dağıtım stratejisine göre ise üretilen yıllık enerji miktarları FV için 16.205 (%26,2) kWh, RT için 22.927 (%37) kWh ve BGG için 22.817 (%36,8) kWh olarak gerçekleşmiştir.

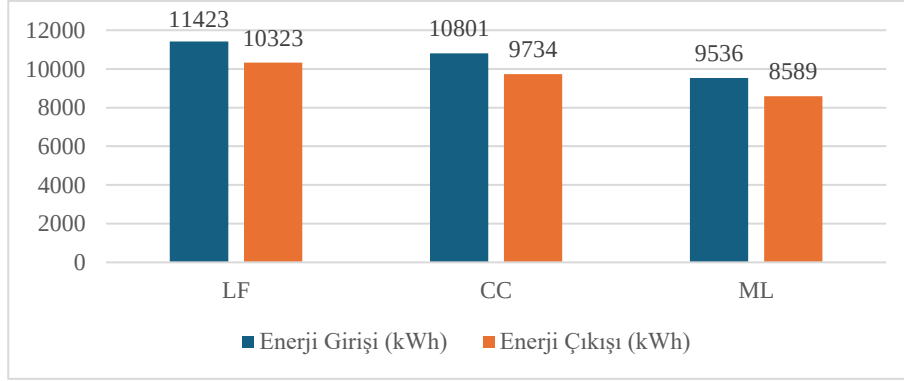
ML ile LF ve CC stratejileri karşılaştırıldığında başta BDS olmak üzere kaynakların kullanımında önemli farklar olduğu açıkça görülmektedir. ML stratejisi ile üretim dengelenerek her üç kaynak etkin bir şekilde kullanılmıştır.

ML stratejisinde 12 kWh kapasiteli daha küçük bir BDS kullanılması ve FV ile RT bileşenlerinin verimli şekilde çalışması, enerji üretiminin LF ve CC stratejilerine göre daha dengeli olmasını sağlamaktadır. ML stratejisinde gündüz saatlerinde enerji talebi ağırlıklı olarak FV ve RT bileşenleri tarafından karşılanmakta, gece saatlerinde ise enerji üretimine BGG destek olmaktadır. Bu yöntem, enerji üretimindeki dalgalanmaların azaltılmasına ve enerji tüketiminin tutarlı bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır.

Enerji üretiminin talebi aşması durumunda, fazla enerjinin depolanması gerekmektedir. Aksi takdirde enerji israfı oluşabilir ve bu durum sistemin maliyet etkinliği ile istikrarını olumsuz yönde etkileyebilir. LF, CC ve ML stratejilerinde fazla elektrik üretimi sırasıyla 31.527 kWh, 18.674 kWh ve 10.558 kWh olarak kaydedilmiştir. Her ne kadar LF ve CC

stratejileri ML'ye kıyasla daha büyük BDS kapasitelerine sahip olsa da daha yüksek FV kapasiteleri nedeniyle enerji israfı bu stratejilerde daha fazla gerçekleşmektedir.

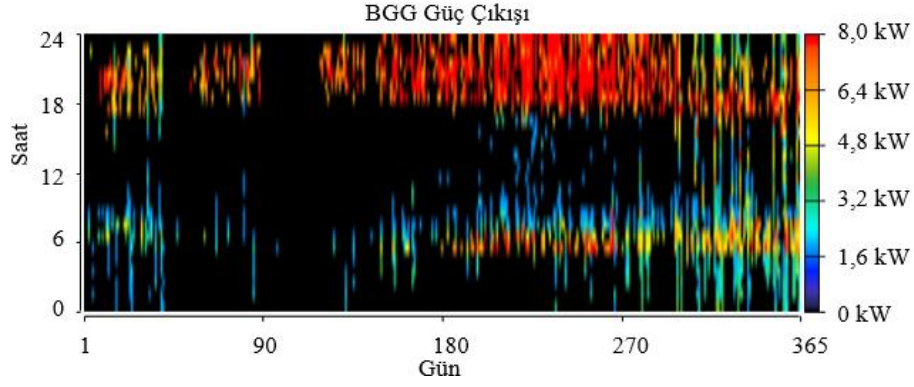
Dağıtım stratejilerine ait batarya giriş ve çıkış enerjileri Şekil 5.43'te verilmiştir.



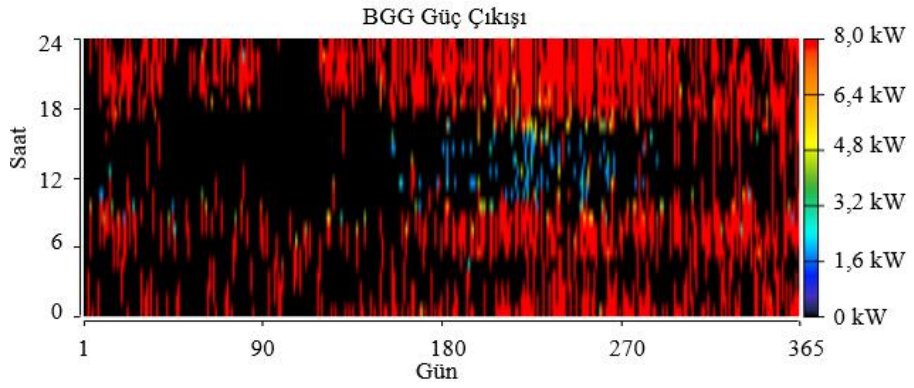
Şekil 5.43. Dağıtım stratejilerine ait BDS giriş-çıkış enerjileri

ML stratejisinde 12 kWh kapasiteli bir BDS kullanılırken, LF ve CC stratejilerinde sırasıyla 54 kWh ve 33 kWh kapasiteli BDS'ler kullanılmıştır. ML, en küçük BDS kapasitesine sahip strateji olup, bu durum maliyetlerin azalmasında önemli bir rol oynamaktadır.

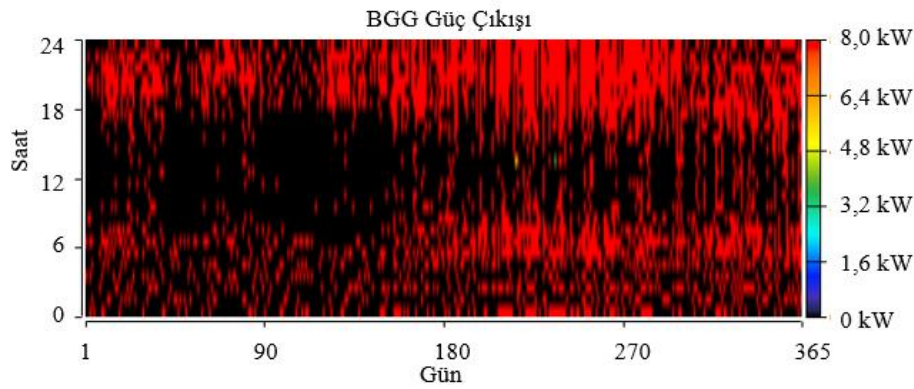
LF, CC ve ML stratejilerine ait güç çıkış eğrileri sırasıyla Şekil 5.44, 5.45 ve 5.46'da gösterilmiştir. ML stratejisinde BGG, yılda 2.853 saat çalışarak 10.594 kg yakıt tüketmiş ve 22.817 kWh enerji üretmiştir. CC stratejisinde ise BGG, yıllık 2.541 saat çalışma süresi ile 9.111 kg yakıt tüketmiş ve 19.523 kWh enerji üretmiştir. LF stratejisinde BGG, yılda 1.854 saat çalışarak 4.962 kg yakıt tüketmiş ve 10.085 kWh enerji üretmiştir. Bu veriler, ML stratejisinde BGG'nin daha uzun süre çalışarak daha fazla enerji ürettiğini göstermektedir.



Şekil 5.44. Uygulama-4 için LF stratejisine ait BGG güç çıkış eğrisi



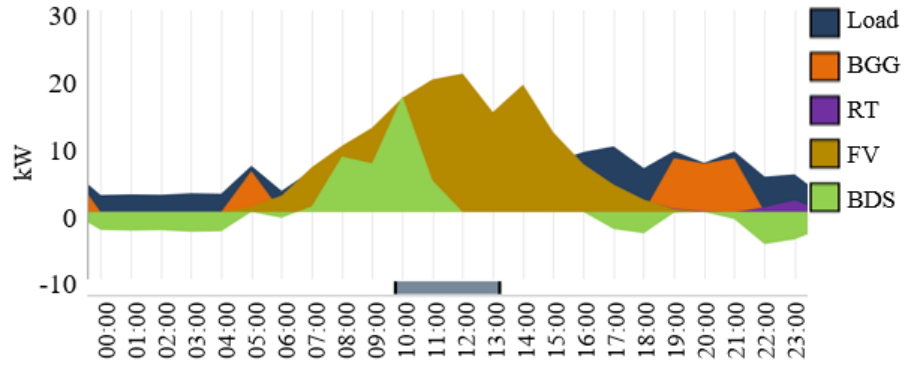
Şekil 5.45. Uygulama-4 için CC stratejisine ait BGG güç çıkış eğrisi



Şekil 5.46. Uygulama-4 için ML stratejisine ait BGG güç çıkış eğrisi

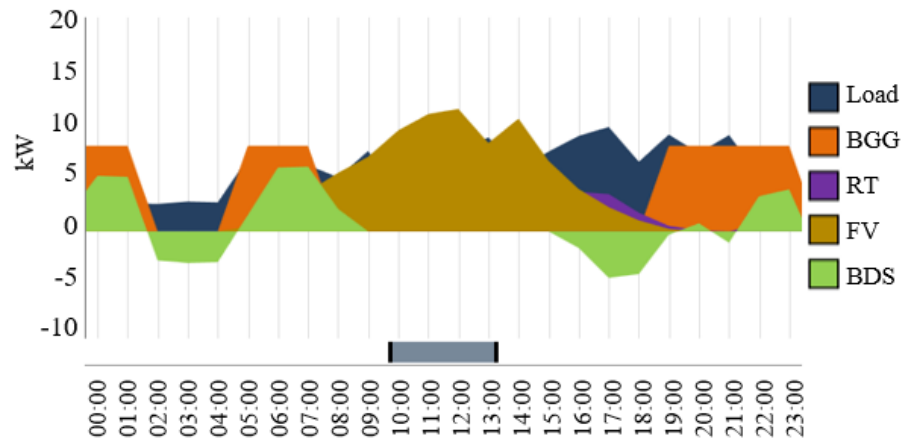
BGG'nin güç çıkış eğrileri incelendiğinde, ML ve CC stratejilerinde BGG'nin yıl boyunca yoğun bir şekilde enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, LF stratejisinde BGG, özellikle yaz aylarında FV üretiminin olmadığı dönemlerde, 18 ila 24 saatleri arasında yoğun bir şekilde çalışmaktadır. FV panellerinden enerji üretiminin öncelikli olarak

gündüz saatlerinde gerçekleşmesi, BGG'nin çalışma süresini azaltmaktadır. LF'de daha yüksek kapasiteli FV ve BDS kullanılması, BGG ile enerji üretimini diğer iki stratejiye kıyasla daha düşük seviyede tutmaktadır. Sistemin MŞ bileşenleri arasındaki elektrik üretimi ve tüketim dengesini stratejilere göre değerlendirmek amacıyla 2 Temmuz tarihi (24 saat) seçilmiştir. Şekil 5.47, 5.48 ve 5.49 stratejilere ait 24 saatlik elektrik üretim ve tüketim zaman serilerini göstermektedir.



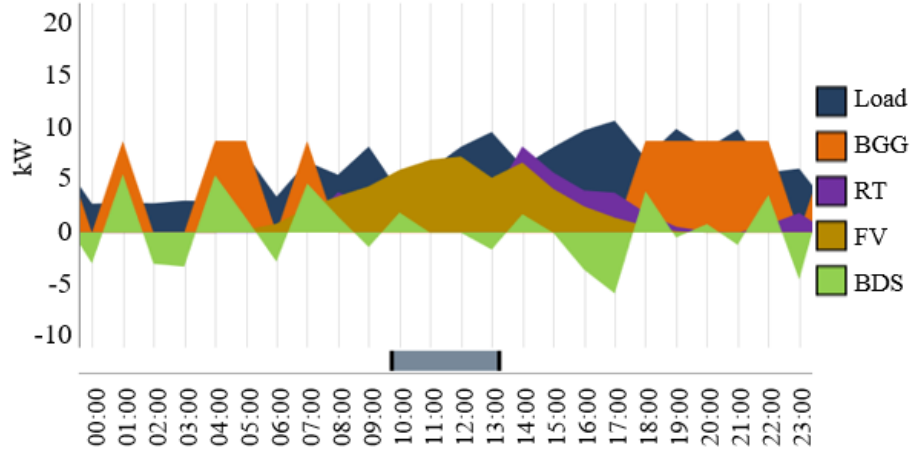
Şekil 5.47. LF stratejisine ait elektrik üretimi ve tüketiminin günlük zaman serisi

Şekil 5.47'de görülen LF stratejisinde; 00:00 ile 04:00 saatleri arasında yük sadece BDS tarafından beslenmektedir. 04:00'ten itibaren BGG ve kısmen FV devreye girmektedir. 06:00'dan itibaren saat 16:00'a kadar talep edilen yük tamamen FV ve RT'den karşılanmaktadır. 16:00'dan sonra tekrar BDS devreye girmekte ve 18:00'den sonra FV sistemin devre dışı kalmasıyla ağırlıklı olarak BGG ve BDS yükü beslemektedir.



Şekil 5.48. CC stratejisine ait elektrik üretimi ve tüketiminin günlük zaman serisi

Şekil 5.48’de görülen CC stratejisinde; 00:00-06:00 arasında BDS’nin yükü karşılayabildiği zamanlarda besleme yaparken, karşılayamadığı zamanlarda BGG tam kapasite çalışarak hem yükü beslemiş hem de BDS’leri şarj etmiştir. Saat 15:00’a kadar FV ve RT sistemleri yükü beslerken bu saatten itibaren BDS devreye girmiştir. 18:00’dan sonra ise ağırlıklı olarak BGG, kısmen ise BDS ve RT yükü beslemiştir.



Şekil 5.49. ML stratejisine ait elektrik üretimi ve tüketiminin günlük zaman serisi

Şekil 5.49’da görülen ML stratejisinde ise; 00:00-06:00 saatleri ile 18:00-00:00 saatleri arasında BDS’nin yükü tam karşılayamadığı zamanlarda BGG tam kapasite çalışarak hem yükü beslemiş hem de BDS’leri şarj etmiştir. Gündüz saatlerinde ise FV ve RT sistemleri hem yükü beslemiş hem de BDS’leri şarj etmiştir. FV ve RT’nin yetersiz olduğu gündüz saatlerinde yine BDS’lerin devreye girdiği görülmüştür.

5.4.3.2. Ekonomik Analiz

Üç stratejiye ait ayrıntılı maliyet özeti Tablo 5.17’de sunulmuştur.

Tablo 5.17 LF, CC ve ML'nin ayrıntılı maliyet analizi

	Sevk Stratejisi	BGG	BDS	RT	FV	Konvertör	Sistem
Sermaye Maliyeti (\$)	ML	16.000	6600	29.000	7000	3600	62.200
	LF	16.000	29.700	29.000	21.683,76	3890,41	100.274,17
	CC	16.000	18.150	29.000	12.063,75	3.371,96	78.585,72
Değiştirme Maliyeti (\$)	ML	14.191,39	19.250,64	7.970,18	0	1.527,39	42.939,59
	LF	8.311,40	12.681,71	7.970,18	0	1.650,60	30.613,89
	CC	13.036,85	16.479,23	7.970,18	0	1.430,63	38.916,90
Bakım ve Onarım Maliyeti (\$)	ML	29.505,76	1.551,30	129,28	1.292,75	0	32.479,09
	LF	19.174,09	6.980,86	129,28	4.004,53	0	30.288,76
	CC	26.279,06	4.266,08	129,28	2.227,92	0	32.902,33
Geri Dönüşüm Maliyeti (\$)	ML	1.039,08	1.126,51	4.491,71	0	287,47	6.944,71
	LF	1.634,98	2.282,58	4.491,71	0	310,66	8.719,94
	CC	1.973,36	1.778,34	4.491,71	0	269,26	8.512,67
Toplam (\$)	ML	58.658,07	26.275,42	32.607,75	8.292,75	4.839,92	130.673,91
	LF	41.850,51	47.079,98	32.607,75	25.688,29	5.230,35	152.456,89
	CC	53.342,55	37.116,97	32.607,75	14.291,67	4.533,34	141.892,28

Sistemin maliyet özetini sunan tablo incelendiğinde, ML stratejisinin 130.673,91 \$ ile en düşük NPC değerine sahip olduğu görülmektedir. LF ve CC stratejilerinin NPC değerleri sırasıyla 152.456,89 \$ ve 141.892,28 \$'dır. FV panellerinin kurulum maliyetleri ML, LF ve CC stratejileri için sırasıyla 7000 \$, 21.683,76 \$ ve 12.063,75 \$'dır. Benzer şekilde, BDS'nin ilk kurulum maliyetleri ML'de 6600 \$, LF'de 29.700 \$ ve CC'de 18.150 \$'dır. ML'nin NPC değerinin diğer iki stratejiye göre daha düşük olmasının temel nedeni, BDS ve FV bileşenlerinin kurulum maliyetlerinin önemli ölçüde düşük olmasıdır. ML stratejisinde BGG gücünün daha fazla kullanılması sonucu BDS ve FV kapasiteleri küçülmüştür.

Ekonomik analizde dikkate alınan bir diğer parametre olan LCOE değerleri ise ML, LF ve CC stratejileri için sırasıyla 0,207 \$/kWh, 0,239 \$/kWh ve 0,223 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ML'nin LCOE değeri bakımında da en ekonomik strateji olduğunu göstermektedir.

5.4.3.3. Çevresel Analiz

Bu uygulamada DG'ler yerine BGG tercih edilmiştir. Biyogazın CO₂ emisyon değeri 26 gr/kWh olup, bu değer dizel yakıtların emisyon değerine (1,27 kg/kWh) göre oldukça düşüktür [138, 139]. Bu nedenle, BGG'ler sürdürülebilir çevre ve enerji üretimi açısından DG'lere kıyasla daha avantajlıdır. ML sisteminin çevresel üstünlüğünü göstermek

amacıyla BGG çıkarılıp yerine DG eklenmiş ve hesaplamalar tekrarlanmıştır. BGG’li sistemin yıllık CO₂ emisyonu 480 kg iken, DG’li sistemde bu değer yaklaşık 57 kat artarak 27.709 kg/yıla ulaşmıştır. Türkiye’de elektrik üretimi ve tüketimi başına salınan sera gazı emisyonlarını gösteren "Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketimi Nokta Emisyon Faktörleri", karbon ayak izi hesaplamaları ve enerji verimliliği iyileştirmeleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Türkiye’de 1 MWh brüt elektrik üretimi başına ortalama 0,439 ton CO₂ eşdeğer sera gazı emisyonu salındığı hesaplanmıştır [140]. ML için elde edilen değerler, önerilen sistemin yalnızca teknik ve ekonomik açıdan değil, çevresel açıdan da üstün olduğunu göstermektedir.

5.4.3.4. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, değişen koşullar altında önerilen hibrit enerji sisteminin dayanıklılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek için yapılmaktadır. Anahtar parametrelerdeki değişimlerin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenerek potansiyel riskler tespit edilir ve sistemin farklı senaryolarda uygulanabilirliği garanti altına alınır. Güneş radyasyonu ve rüzgâr hızındaki değişimlerin FV ve RT sistemlerinin NPC ve LCOE üzerindeki etkileri Tablo 5.18’de sunulmuştur.

Tablo 5.18. Uygulama-4 için YEK’lerdeki dalgalanmaların sistemin ekonomik parametrelerine etkisi

Güneş Işınımı (kWh/m ² /gün)	Rüzgâr Hızı (m/s)	FV (kWh)	RT (kWh)	BGG (kWh)	Yakıt Fiyatı (\$)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)
1,860	3,650	6.565	18.116	30.560	-	149.201	0,239
					1	332.618,70	0,533
1,860	4,590	6.565	32.109	23.048	-	130.267,80	0,207
					1	268.599,30	0,428
7,910	4,590	23.779	32.109	16.757	-	114.204,30	0,180
					1	214.777,80	0,340
7,910	3,650	23.779	18.116	21.758	-	127.281,60	0,203
					1	257.873	0,411

Tablo 5.18’de dört farklı senaryo yer almaktadır. Birinci senaryoda hem güneş radyasyonu hem de rüzgâr hızı düşük seviyedeysen, üçüncü senaryoda her ikisi de yüksektir. İkinci senaryoda güneş radyasyonu düşük, ancak rüzgâr hızı yüksektir. Dördüncü senaryoda ise güneş radyasyonu yüksek, rüzgâr hızı düşüktür. Üçüncü senaryo, diğer senaryolara kıyasla en düşük maliyeti sunmaktadır. Bunun nedeni, FV ve RT sistemlerinin yüksek enerji üretimi sayesinde BGG’nin enerji üretim ihtiyacının azalması ve dolayısıyla maliyetlerin

düşmesidir. Örneğin, birinci senaryoda BGG'nin işletme ve bakım maliyeti 39.506 \$, iken, üçüncü senaryoda bu değer 21.666 \$'a düşmektedir.

İkinci duyarlılık analizinde, BGG'nin yakıt maliyetindeki değişimlerin sistem maliyeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu analizde, BGG'de kullanılan yakıtın mevcut biyokütle kaynaklarından ücretsiz olarak üretildiği (0 \$) ve satın alındığı (1 \$) iki durum karşılaştırılmıştır. Yakıt fiyatı 1 \$ olduğunda sistemin NPC ve LCOE değerlerinin yaklaşık iki kat arttığı görülmüştür.

Bir başka duyarlılık analizinde ise enflasyon oranındaki değişimlerin sistem maliyeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5.50 yıllık enflasyon oranındaki artışın, sistemin NPC değerini de artıracaklarını göstermektedir.

Sensitivity		Architecture												
ExpectedInflationRate (%)								FV (kW)	RT	BGG (kW)	BDS	Konvertör (kW)	Dispatch	NPC (\$)
10.0								10.0	1	8.00	12	12.0	ML	\$228,125
2.00								10.0	1	8.00	12	12.0	ML	\$130,674
5.00								10.0	1	8.00	12	12.0	ML	\$156,633

Şekil 5.50. Farklı enflasyon oranlarının NPC üzerindeki etkisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin farklı bölgeleri için YEK'leri en verimli şekilde kullanacak, şebekeden bağımsız MŞ modelleri geliştirilmiştir. Söz konusu MŞ modelleri, çalışılan bölgenin coğrafi, iklimsel ve enerji ihtiyaçlarına uygun olarak tasarlanmış, bu sayede bölgesel enerji taleplerini karşılayacak optimal çözümler elde edilmiştir. Oluşturulan bu modellerin teknik performansları ile çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlikleri HOMER Pro yazılımı kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde enerji üretim maliyetleri, yatırım geri dönüş süreleri ve sistem güvenilirliği gibi parametreler değerlendirilmiş; böylece her bölge için en uygun modelin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Birinci uygulamada; Bingöl'deki kırsal bir çiftlik evi için şebekeden bağımsız, YEK'lere dayalı bir MŞ tasarlanmış ve HOMER Pro yazılımı ile analiz edilmiştir. Tasarlanan MŞ; 5 kW'lık FV paneller, 3 kW'lık RT, 2 kW'lık BGG, 2 kW'lık FC, 2 kW'lık BDS, 3 kW'lık elektrolizör, 1 kW'lık konvertör ve 20 kg'lık HT bileşenlerinden oluşmaktadır. Yıllık enerji üretimi %63,8 FV, %25,4 RT, %6,01 FC ve %4,87 BGG'den sağlanmıştır. Sistem günlük 31 kWh enerji üretmekte ve 4,160 kW pik talebi karşılamaktadır. Toplam sermaye maliyeti 29.400 \$, işletme maliyeti 2.817 \$, bakım maliyeti 4.411 \$, yakıt maliyeti ise 11.130 \$ olarak hesaplanmıştır. NPC değeri 37.043 \$ ve LCOE değeri 0,661 \$/kWh olarak belirlenmiştir.

İkinci uygulamada; Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için günlük 165,44 kWh enerji tüketen referans bir topluluğun elektrik ihtiyacını karşılamak üzere şebekeden bağımsız FV, RT, DG ve BDS bileşenlerinden oluşan MŞ sistemleri tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Çanakkale'deki sistemin %74,4'ü RT, %20,3'ü FV ve %5,28'i DG ile, Diyarbakır'daki sistemin %49'u FV, %42'si RT ve %8,93'ü DG ile, Rize'deki sistemin ise %62,6'sı FV, %24,8'i RT ve %12,6'sı DG ile enerji ihtiyacını karşıladığı görülmüştür. Çanakkale, %94,7 YEK payı ile en verimli sistem olarak öne çıkarken, maliyet açısından da en uygun model olmuştur. Çanakkale için tasarlanan sistemin NPC değeri 153.560,53 \$ ve LCOE değeri 0,196 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Diyarbakır'da bu değerler sırasıyla 228.718,34 \$ ve 0,293 \$/kWh iken, Rize'de 285.946,32 \$ ve 0,366 \$/kWh olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, Çanakkale'de rüzgâr potansiyelinin,

Diyarbakır'da güneş enerjisi potansiyelinin ve Rize'de ise düşük YEK verimliliği nedeniyle DG'nin daha fazla ön plana çıktığı, ekonomik açıdan ise Çanakkale'nin en uygun model olduğu tespit edilmiştir.

Üçüncü uygulamada; Bingöl'ün kırsal kesiminde yer alan 53 hanelik Doğanevler köyü için YEK'lere dayalı, şebekeden bağımsız bir MŞ tasarlanmış ve tekno-ekonomik performansı analiz edilmiştir. FV, RT, AST, BGG, FC, BDS, elektrolizör, konvertör, HT ve boyler bileşenlerinin entegre edildiği modelin günlük enerji üretimi 198 kWh, puant gücü 24 kW olarak belirlenmiştir. MŞ'nin yıllık enerji üretimi büyük oranda AST (%55,3), FV (%14,2) ve RT (%7,43) bileşenleri tarafından karşılanırken, BGG'nin enerji üretimi özellikle yaz ve kış aylarında devreye girerek enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Ekonomik analizlerde, tüm bileşenleri içeren sistemin NPC değeri 160.753 \$, LCOE değeri 0,200 \$/kWh iken, en ekonomik modelin NPC değeri 110.621 \$ ve LCOE değeri 0,121 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Duyarlılık analizleri sonucunda, güneş radyasyonu ve rüzgâr hızındaki değişimlerin, enflasyon oranlarının ve bileşenlerin kullanım ömrü ile bakım maliyetlerinin sistem maliyetlerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Tüm bileşenlerin kullanımında başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, enerji arz güvenliği ve sistemin sürdürülebilirliği açısından daha avantajlı olduğu, ancak başlangıç maliyetlerini düşürmek isteyen uygulamalar için sadeleştirilmiş bir modelin tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Dördüncü uygulamada; Bingöl Doğanevler köyü için şebekeden bağımsız bir MŞ tasarlanmış ve üç farklı dağıtım stratejisi (LF, CC, ML) ile teknik, ekonomik ve çevresel açıdan karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, önerilen ML stratejisinin en düşük NPC (130.673,91 \$) ve LCOE (0,207 \$/kWh) değerleri ile en ekonomik seçenek olduğu belirlenmiştir. ML stratejisinde daha az batarya kapasitesi kullanılarak enerji dengesi sağlanmış, FV ve RT bileşenlerinin verimli kullanımı ile fazla enerji israfı minimize edilmiştir. Ayrıca, BGG'nin biyogaz kullanımı sayesinde yıllık CO₂ emisyonu 480 kg ile sınırlı kalırken, DG kullanılması durumunda bu değer 27.709 kg'a çıkacağı öngörülmüştür. Duyarlılık analizleri, sistemin güneş ve rüzgar potansiyelindeki değişimlere duyarlı olduğunu ve yakıt maliyeti ile enflasyon değişimlerinin de toplam maliyetleri önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, ML stratejisi ile optimize edilen MŞ

sistemi, kırsal bölgelerde güvenli, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji çözümü sunmaktadır.

Sonuç olarak analizler, her bölge için uygun YEK'lerin ve dağıtım stratejilerinin belirlenmesinin enerji arz güvenliği ve maliyet etkinliği açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur. Ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından yapılan karşılaştırmalarda, düşük başlangıç maliyetleri ve çevre dostu yaklaşımların, sistem verimliliğini ve uzun vadeli performansı artırdığı görülmüştür. Özellikle BGG kullanımının DG'lere kıyasla emisyonları önemli ölçüde düşürdüğü ve maliyet avantajı sağladığı tespit edilmiştir. Uygulamalarda farklı dağıtım stratejilerinin (LF, CC, ML) karşılaştırılması sonucunda, önerilen ML stratejisinin düşük maliyet, enerji dengesi ve çevresel etkinlik açısından en uygun strateji olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, YEK'lerin optimum kombinasyonunun, kırsal alanlarda enerji bağımsızlığını artırmak ve karbon ayak izini azaltmak için güçlü bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalar, farklı iklim koşullarına sahip bölgelerde yenilenebilir enerji sistemlerinin performansını analiz ederek, bölgeye özgü stratejiler geliştirmeye odaklanabilir. Daha düşük maliyetli ve verimli enerji depolama teknolojilerinin entegrasyonu, sistemlerin uzun vadeli sürdürülebilirliğini artırabilir. Yeni nesil hibrit enerji sistemleri ve akıllı şebeke uygulamaları ile enerji yönetimi daha etkin hale getirilebilir. Karbon ayak izini azaltmak amacıyla biyokütle ve hidrojen gibi çevre dostu yakıtlarla çalışan jeneratörlerin kullanımı incelenebilir. Ayrıca, tarım ve sanayi gibi farklı sektörlerde yenilenebilir enerji çözümlerinin uygulanabilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. Access date: 03.06.2024 Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- [2] Caliskan, H., and Hepbasli, A. (2010). Energy and exergy prices of various energy sources along with their CO₂ equivalents. *Energy Policy*, 38(7), 3468-3481.
- [3] Odetoye, O. A., Ibikunle, F. A., Olulope, P. K., Onyemenam, J. O., and Okeke, U. N. (2022). Large-scale solar power in Nigeria: the case for floating photovoltaics. In *2022 IEEE Nigeria 4th international conference on disruptive technologies for sustainable development (NIGERCON)* (1-5).
- [4] Zia, M. F., Elbouchikhi, E., and Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied energy*, 222, 1033-1055.
- [5] Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., and Bahramirad, S. (2015). State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE access*, 3, 890-925.
- [6] Islam, M. S., Das, B. K., Das, P., and Rahaman, M. H. (2021). Techno-economic optimization of a zero emission energy system for a coastal community in Newfoundland, Canada. *Energy*, 220, 119709
- [7] Das, B. K., Tushar, M. S. H., and Hassan, R. (2021). Techno-economic optimisation of stand-alone hybrid renewable energy systems for concurrently meeting electric and heating demand. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102763
- [8] Abdolmaleki, L., and Berardi, U. (2021). Comparative analysis among three solar energy-based systems with hydrogen and electrical battery storage in single houses. *Energy Proc*, 19, 321.
- [9] Avci, A. C., and Toklu, E. (2022). A new analysis of two phase flow on hydrogen production from water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), 6986-6995.
- [10] Tazvinga, H., and Dzobo, O. (2019). Feasibility Study of a Solar-Biogas System for Off-Grid Applications. In *2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)* (1-5).
- [11] Bagherian, M. A., and Mehranzamir, K. (2020). A comprehensive review on renewable energy integration for combined heat and power production. *Energy Conversion and Management*, 224, 113454.

- [12] Zheng, C., Yang, G., Wang, R., and Zhai, X. (2017). Integration of CCHP with renewable energy. *Handbook of Energy Systems in Green Buildings*, 1-36.
- [13] Maghanki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., and Galogah, R. J. (2013). Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 510-524.
- [14] Hawkes, A. D., and Leach, M. A. (2007). Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power. *Energy*, 32(5), 711-723.
- [15] El-Maaroufi, A., Daoudi, M., and Laamara, R. A. (2024). Techno-economic analysis of a PV/WT/biomass off-grid hybrid power system for rural electrification in northern Morocco using HOMER. *Renewable Energy*, 231, 120904.
- [16] Nadeem, T. B., Ahmed, A., Saad, M., and Naqvi, A. A. (2024). 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*, 1-29.
- [17] Khalil, H., and Abd El-Hamied, R. (2024). Comparative Analysis and Assessment of Economic Profitability of a Hybrid Renewable Energy Framework via HOMER Optimization in Jordan. *International Journal of Heat and Technology*, 42(3).
- [18] Santos, L. H. S., Silva, J. A. A., López, J. C., Arias, N. B., Rider, M. J., and Da Silva, L. C. P. (2021). Integrated optimal sizing and dispatch strategy for microgrids using HOMER Pro. In *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)* (1-5).
- [19] Miah, M. S., Swazal, M. A. M., Mittro, S., and Islam, M. M. (2020). Design of a grid-tied solar plant using homer pro and an optimal home energy management system. In *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)* (1-7).
- [20] Toopshekan, A., Yousefi, H., and Astaraei, F. R. (2020). Technical, economic, and performance analysis of a hybrid energy system using a novel dispatch strategy. *Energy*, 213, 118850.
- [21] Yazhini, K., and Aarthi, N. (2022). Optimal Sizing of Rural Microgrid using HOMER Pro Software. In *2022 IEEE 7th International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 7, 455-460.
- [22] Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Hussain, M. K., Adzman, M. R., Ghazali, N. H., Ramli, M. A., and Zidane, T. E. K. (2022). A new optimization strategy for wind/diesel/battery hybrid energy system. *Energy*, 239, 122458.
- [23] Ishraque, M. F., Rahman, A., Shezan, S. A., and Shafiullah, G. M. (2022). Operation and assessment of a microgrid for maldives: Islanded and grid-tied mode. *Sustainability*, 14(23), 15504.

- [24] Melit, A., Chekired, F., and Meflah, A. (2023). Optimal Sizing of a Hybrid Microgrid System in a Mediterranean Climate. In *2023 14th International Renewable Energy Congress (IREC)* (1-5).
- [25] Singh, A., Baredar, P., and Gupta, B. (2015). Computational simulation and optimization of a solar, fuel cell and biomass hybrid energy system using HOMER pro software. *Procedia Engineering*, 127, 743-750.
- [26] Isa, N. M., Das, H. S., Tan, C. W., Yatim, A. H. M., and Lau, K. Y. (2016). A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy*, 112, 75-90.
- [27] Kalinci, Y. (2015). Alternative energy scenarios for Bozcaada island, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 468-480.
- [28] Kalamaras, E., Belekoukia, M., Lin, Z., Xu, B., Wang, H., and Xuan, J. (2019). Techno-economic assessment of a hybrid off-grid DC system for combined heat and power generation in remote islands. *Energy Procedia*, 158, 6315-6320.
- [29] Odetoye, O. A., Olulope, P. K., Olanrewaju, O. M., Alimi, A. O., and Igbinsola, O. G. (2023). Multi-year techno-economic assessment of proposed zero-emission hybrid community microgrid in Nigeria using HOMER. *Heliyon*, 9(9).
- [30] Majdi Nasab, N., Kilby, J., and Bakhtiaryfard, L. (2021). Case study of a hybrid wind and tidal turbines system with a microgrid for power supply to a remote off-grid community in New Zealand. *Energies*, 14(12), 3636.
- [31] Jahangiri, M., Karimi Shahmarvandi, F., and Alayi, R. (2021). Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: trigeneration of heat, power, and hydrogen. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(4), 67-76.
- [32] John, A., Basu, S., and Kumar, A. (2021). Design and evaluation of stand-alone solar-hydrogen energy storage system for academic institute: A case study. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5918-5922.
- [33] Kapen, P. T., Nouadje, B. A. M., Chegnimonhan, V., Tchuen, G., and Tchinda, R. (2022). Techno-economic feasibility of a PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas hybrid system for energy and hydrogen production in the far north region of cameroon by using HOMER pro. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100988.
- [34] Manoo, M. U., Shaikh, F., Kumar, L., and Arıcı, M. (2024). Comparative techno-economic analysis of various stand-alone and grid connected (solar/wind/fuel cell) renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 397-414.
- [35] Ennemiri, N., Berrada, A., Emrani, A., Abdelmajid, J., and El Mrabet, R. (2024). 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: X*, 21, 100508.

- [36] Odoi-Yorke, F., and Woenagnon, A. (2021). Techno-economic assessment of solar PV/fuel cell hybrid power system for telecom base stations in Ghana. *Cogent Engineering*, 8(1), 1911285.
- [37] Mishref, M. M., and Tanaka, M. (2024). Techno-economic and environmental analysis of heat sources for steam methane reforming in microgrids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 53, 1387-1395.
- [38] Tayyab, Q., Qani, N. A., Elkholy, M. H., Ahmed, S., Yona, A., and Senjyu, T. (2024). Techno-economic configuration of an optimized resident microgrid: A case study for Afghanistan. *Renewable Energy*, 224, 120097.
- [39] Yadav, S., Kumar, P., and Kumar, A. (2024). Techno-economic assessment of hybrid renewable energy system with multi energy storage system using HOMER. *Energy*, 297, 131231.
- [40] Farah, L., Akhmad, Y. R., Saryadi, R. M., Mardha, A., Mudjiono, M., Nuryanti, N., ... and Handayani, A. H. (2024). Techno-Economic Assessment and Optimization of a Standalone System in Sebira Island, Indonesia. *JURNAL TEKNOLOGI REAKTOR NUKLIR TRI DASA MEGA*, 26(1), 33-44.
- [41] Yusupov, Z., and Almagrahı, N. (2023). Techno-economic and environmental analysis of microgrid: A case study of Karabuk University. *Sigma: Journal of Engineering and Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 41(4).
- [42] Araoye, T. O., Ashigwuike, E. C., Umar, S. A., Eronu, E. M., Ozue, T. G. I., Egoigwe, S. V., ... and Ajah, N. G. (2023). Modeling and optimization of PV-diesel-biogas hybrid microgrid energy system for sustainability of electricity in Rural Area. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 14(3), 1855-1864.
- [43] Jenkins, P., and Sonar, A. C. (2020). Feasibility analysis of an islanded microgrid in tohatchi, new mexico using homer pro. *Energy and Power Engineering*, 12(06), 357-374.
- [44] Belmahdi, B., and El Bouardi, A. (2020). Simulation and optimization of microgrid distributed generation: a case study of University Abdelmalek Essaâdi in Morocco. *Procedia Manufacturing*, 46, 746-753.
- [45] Pal, A., and Bhattacharjee, S. (2020). Effectuation of biogas based hybrid energy system for cost-effective decentralized application in small rural community. *Energy*, 203, 117819.
- [46] Mehta, S., and Basak, P. (2020). A case study on PV assisted microgrid using HOMER pro for variation of solar irradiance affecting cost of energy. In *2020 IEEE 9th power india international conference (PIICON)*, (1-6).
- [47] Islam, M. K., Akanto, J. M., Zeyad, M., and Ahmed, S. M. (2021). Optimization of microgrid system for community electrification by using HOMER pro. In *2021 IEEE 9th region 10 humanitarian technology conference (R10-HTC)*, (1-5).

- [48] Peláez-Peláez, S., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., Rosales, A. E., and Rosales-Asensio, E. (2021). Techno-economic analysis of a heat and power combination system based on hybrid photovoltaic-fuel cell systems using hydrogen as an energy vector. *Energy*, 224, 120110.
- [49] Elsaraf, H., Jamil, M., and Pandey, B. (2021). Techno-economic design of a combined heat and power microgrid for a remote community in Newfoundland Canada. *IEEE Access*, 9, 91548-91563.
- [50] Sattar, M., Azeem, F., Memon, Z., Zidan, H., and Baig, S. (2022). Feasibility Assessment of Rural Hybrid Microgrid Using Canal-Based Microhydel Resources: A Case Study of Renala Khurd Pakistan. *Sustainability*, 14(22), 15417.
- [51] Rohani, G., and Nour, M. (2014). Techno-economical analysis of stand-alone hybrid renewable power system for Ras Musherib in United Arab Emirates. *Energy*, 64, 828-841.
- [52] Tsuanyo, D., Azoumah, Y., Aussel, D., and Neveu, P. (2015). Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy*, 86, 152-163.
- [53] Khiareddine, A., Salah, C. B., Rekioua, D., and Mimouni, M. F. (2018). Sizing methodology for hybrid photovoltaic/wind/hydrogen/battery integrated to energy management strategy for pumping system. *Energy*, 153, 743-762.
- [54] Mehrjerdi, H., Iqbal, A., Rakhshani, E., and Torres, J. R. (2019). Daily-seasonal operation in net-zero energy building powered by hybrid renewable energies and hydrogen storage systems. *Energy conversion and management*, 201, 112156.
- [55] Mohseni, S., Brent, A. C., and Burmester, D. (2020). A comparison of metaheuristics for the optimal capacity planning of an isolated, battery-less, hydrogen-based micro-grid. *Applied Energy*, 259, 114224.
- [56] DAYIOĞLU, M., and Rıdvan, Ü. N. A. L. (2024). Design and Economic Analysis of a Grid-Tied Microgrid Using Homer Software. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 10(3).
- [57] Nsengimana, C., Kai, L., Yuhao, C., and Li, L. (2022). Standalone photovoltaic and battery microgrid design for rural areas. *Energy Exploration and Exploitation*, 40(6), 1617-1633.
- [58] Bekçi, E., and Koca, K. (2024, May). Hybrid Renewable Energy to Greener and Smarter Cities: A Case Study of Kayseri Province. In *International Conference" Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience"* (pp. 218-227). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [59] Maleki, A., Khajeh, M. G., and Rosen, M. A. (2017). Two heuristic approaches for the optimization of grid-connected hybrid solar–hydrogen systems to supply residential thermal and electrical loads. *Sustainable cities and society*, 34, 278-292.

- [60] Khan, M. U., Hassan, M., Nawaz, M. H., Ali, M., and Wazir, R. (2018). Techno-economic Analysis of PV/wind/biomass/biogas hybrid system for remote area electrification of Southern Punjab (Multan), Pakistan using HOMER Pro. In *2018 International conference on power generation systems and renewable energy technologies (PGSRET)* (1-6).
- [61] Hosseinalizadeh, R., Shakouri, H., Amalnick, M. S., and Taghipour, P. (2016). Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 139-150.
- [62] Lata-García, J., Jurado, F., Fernández-Ramírez, L. M., and Sánchez-Sainz, H. (2018). Optimal hydrokinetic turbine location and techno-economic analysis of a hybrid system based on photovoltaic/hydrokinetic/hydrogen/battery. *Energy*, 159, 611-620.
- [63] Atik, I., and Sekin, A. (2022). Hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Balıkesir örneği. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13(3), 517-529.
- [64] Chowdhury, S., Hossan, A., Semel, S. A., and Zhou, M. (2022). Hydrogen Energy Storage Based Biogas Power Plant in Bangladesh: Design and Optimal Cost Analysis. In *2022 10th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)* (35-39).
- [65] Yimen, N., Monkam, L., Tcheukam-Toko, D., Musa, B., Abang, R., Fombe, L. F., ... and Dagbasi, M. (2022). Optimal design and sensitivity analysis of distributed biomass-based hybrid renewable energy systems for rural electrification: Case study of different photovoltaic/wind/battery-integrated options in Babadam, northern Cameroon. *IET Renewable Power Generation*, 16(14), 2939-2956.
- [66] Das, B. K., and Al-Abdeli, Y. M. (2017). Optimisation of stand-alone hybrid CHP systems meeting electric and heating loads. *Energy Conversion and Management*, 153, 391-408.
- [67] Shah, K. K., Mundada, A. S., and Pearce, J. M. (2015). Performance of US hybrid distributed energy systems: Solar photovoltaic, battery and combined heat and power. *Energy Conversion and Management*, 105, 71-80.
- [68] Li, C., Zhou, D., Wang, H., Lu, Y., and Li, D. (2020). Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy*, 192, 116702.
- [69] Ma, T., and Javed, M. S. (2019). Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource. *Energy conversion and management*, 182, 178-190.
- [70] Nouh, A., and Khatab, M. F. (2020). Partitioning Street Lights Load on Grid-Photovoltaic System as an Alternative Solution for Illuminating Al-Bayda City Roads. In *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, (1-6).

- [71] Qhadafhi, M., Raharjo, J., and Adam, K. B. (2023). Implementation of Home Energy Management System for Indonesia Homes with Hybrid Power Plant. In *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)* (118-122).
- [72] Alghamdi, A. H. S. (2019). *Technical and Economic Analysis of Solar Energy Application for a Hospital Building in Dammam, Saudi Arabia* (Doctoral dissertation, Auckland University of Technology).
- [73] Ammari, C., Belatrache, D., Makhoulfi, S., and Saifi, N. (2021). Techno-economic analysis of a stand-alone photovoltaic system with three different storage systems for feeding isolated houses in south Algeria. *Energy Storage*, 3(1), e211.
- [74] Halkos, G. E., and Gkampoura, E. C. (2020). Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources. *Energies*, 13(11), 2906.
- [75] Koroneos, C., Spachos, T., and Moussiopoulos, N. (2003). Exergy analysis of renewable energy sources. *Renewable energy*, 28(2), 295-310.
- [76] Pablo-Romero, M. D. P., Román, R., Sánchez-Braza, A., and Yñiguez, R. (2016). Renewable energy, emissions, and health. *Renewable Energy: Utilisation and System Integration*, 173.
- [77] IRENA. (2024). Renewable energy statistics 2024. Access date: 06.10.2024. Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf?rev=c1fd271e788d42d189fa1b1f625cf521
- [78] TEİAŞ. (2024). Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri. Erişim tarihi: 03.02.2024. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- [79] T. E. T. K. Bakanlığı. (2024). Elektrik. Erişim tarihi: 01.03.2024. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- [80] Enerjiajansı. (2024) 2024 Ağustos Ayı Türkiye'nin Kurulu Güç Tablosu. Erişim tarihi: 06.10.2024. <https://enerjiajansi.com.tr/turkiyenin-kurulu-gucu/>
- [81] TEİAŞ. (2024) Türkiye Elektrik İstatistikleri. Erişim tarihi: 05.10.2024. https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf
- [82] Koç, Ü. (2021). Güneş enerjisi ve ekonomik büyüme. *Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 515-533.
- [83] Köprü, M. A. (2016) Fotovoltaik Sistemlerde Kablo Kayıplarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [84] T. E. T. K. Bakanlığı. (2024). Enerji. Erişim tarihi: 08.09.2024. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji>

- [85] Elibüyük, U., and Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. *Yekarum*, 2(3).
- [86] Owusu, P. A., and Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990.
- [87] Koç, E., and Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47.
- [88] Kapluhan, E. (2014). Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye’deki Kullanım Durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (30).
- [89] Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü., and Şenol, M. (2017). Türkiye’de biyogaz üretimi için başlıca biyokütle kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92.
- [90] Sözen, E., Gündüz, G., Aydemir, D., and Güngör, E. (2017). Biyokütle kullanımının enerji, çevre, sağlık ve ekonomi açısından değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 148-160.
- [91] Bildirici, M. E. (2013). Economic growth and biomass energy. *Biomass and bioenergy*, 50, 19-24.
- [92] Kendirli, B., and Çakmak, B. (2010). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sera Isıtmasında Kullanımı. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2(1), 95-103.
- [93] Zaim, A., and Çavşi, H. (2018). Türkiye’deki jeotermal enerji santrallerinin durumu. *Mühendis ve Makina*, 59(691), 45-58.
- [94] Külekçi, Ö. C. (2009). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 83-91.
- [95] Kocaman, B. (2014). Mikro şebekeler için örnek bir enerji yönetimi uygulaması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 35-52.
- [96] Sawle, Y., Gupta, S. C., and Bohre, A. K. (2018). Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2217-2235.
- [97] Karaca, Ü. B., and Uçar, S. (2018). Konut Çatı ve Cephelerinde Farklı Fotovoltaik Sistem Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 65-76.
- [98] C. Yapıcı, Aslantaş N. (2008) . Amorf Yarı İletkenler. Erişim tarihi: 18.08.2024. <https://www.yumpu.com/tr/document/read/6043258/amorf-malzemeler-sakarya-universitesi>

- [99] Mills, D. (2004). Advances in solar thermal electricity technology. *Solar energy*, 76(1-3), 19-31.
- [100] Blaabjerg, F., and Ma, K. (2017). Wind energy systems. *Proceedings of the IEEE*, 105(11), 2116-2131.
- [101] CAGIN. (2024). Rüzgar Santrali Nasıl Çalışır. Erişim tarihi: 07.10.2024. <https://www.electricistanbul.com/tag/ruzgar/>
- [102] Bayındır, H., Deviren, H., and Akbalık, F. Şırnak İli ve Çevresi Hidro Enerji Potansiyeli. *Şırnak Enerji ve Maden Potansiyeli*, 111.
- [103] E. Üstün. (2018). Arşimet Vidalı Hidroelektrik Santralin Teorik ve Deneysel İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [104] Lashofer, A., Hawle, W., and Pelikan, B. (2012). State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine. *Proceedings of the Hydro*, 14, 1-35.
- [105] Üstün, E., Akçamur, E. S., and Yeğin, E. M. (2018). Arşimet Burgu Türbini İle Çalışan Hidroelektrik Santralin Nümerik Analizleri İle Deneysel Verilerinin Karşılaştırılması. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 38-46.
- [106] Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Gohari, S., Marofi, S., and Bellos, E. (2020). Numerical optimization study of Archimedes screw turbine (AST): a case study. *Renewable Energy*, 145, 2130-2143.
- [107] Bedadi, L. A., and GebreMichael, M. G. (2021). Design and optimization of off-grid hybrid renewable power plant with storage system for rural area in Rwanda. *IET Renewable Power Generation*, 15(15), 3715-3731.
- [109] Ciniviz, M., and Karcı, H. (2024). Şanlıurfa İlinde Bir Biyogaz Santralının Üretim Kayıplarını Telfi Etmek için Fotovoltaik Tabanlı Yardımcı Kaynak ve Sistemlerin Kullanımı. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 9(1), 1-9.
- [109] <https://tr.mondesbioenergy.com/biogas-generator/50kw-to-1000kw-biogas-generator/biogas-generator-electricity.htm> (accessed 25.09.2024).
- [110] Bilhan, A. (2020). Yakıt pili uygulamaları için kademeli yükseltici da/da dönüştürücü devresinin tasarımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 29-37.
- [111] Khadem, T., Billah, S. B., Barua, S., and Hossain, M. S. (2017). Homer based hydrogen fuel cell system design for irrigation in bangladesh. In *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)* (445-449).
- [112] Yiğit, T. (2017). Bir Evin Elektrik Enerjisi İhtiyacının Şebekeden Bağımsız Olarak Karşlanması: Güneş Pili, PEM Elektrolizör ve PEM Yakıt Pili Bütünleşik Sistem Modeli Geliştirilmesi. Master's thesis, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [113] Genç, Ö., and Kallioğlu, M. A. (2018). Proton Elektrolit Membranlı (Pem) Elektrolizörün Sayısal İncelenmesi ve Deneysel Doğrulanması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 370-380.
- [114] Güven, E. C., and Gedik, K. (2019). Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 726-737.
- [115] Efe, Ş., and Güngör, Z. A. (2021). Geçmişten Günümüze Batarya Teknolojisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 947-955.
- [116] Aydın, F., and Öztürk, D. (2024). Design and Techno-Economic Analysis of Hybrid Power Systems for Rural Areas: A Case Study of Bingöl. *Electricity*, 5(3), 562-584.
- [117] Altınsoy, Y. (2024) Hidrojen Taşıma ve Depolama. Erişim tarihi: 07.10.2024. https://www.researchgate.net/profile/Yelda-Altinsoy/publication/377268487_hidrojen_depolama_ve_tasima/links/659e0dd33c472d2e8ec1e550/hidrojen-depolama-ve-tasima.pdf
- [118] Alkul, O., and Demirbaş, Ş. (2019). Güç Elektroniği Transformatörlerinin İncelenmesi ve Bir DA/DA Dönüştürücü Uygulaması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(2), 450-471.
- [119] Karagül, A. B., Başol, D., and Yücedağ, İ. (2014). Güç elektroniği dönüştürücü modelleri eğitim modülü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), 79-87.
- [120] Z. Öztürk. (2022). Güç Sistemlerinde Enerji Yönetimi Analizi ve Uygulaması. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [121] Akan, A. E. (2023). Techno-Economic Analysis of a Farm's Hybrid Energy System: The Case of Konya Rural. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences*, 10(29), 1-27.
- [122] HOMER. (2016). HOMERHelpManual. Access date: 21.02.2024. Retrieved from <https://homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf>
- [123] Tineo, A. I. (2017). Energy Management System Benchmarking for a Remote Microgrid. *Energy Management System Benchmarking for a Remote Microgrid*, Universidad Carlos III de Madrid.
- [124] Liu, G., Li, M., Zhou, B., Chen, Y., and Liao, S. (2018). General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources. *Energy conversion and management*, 156, 416-426.
- [125] Mudgal, V., Reddy, K. S., and Mallick, T. K. (2019). Techno-economic analysis of standalone solar photovoltaic-wind-biogas hybrid renewable energy system for community energy requirement. *Future Cities and Environment*, 5, 11-11.

- [126] Bhatt, A., Sharma, M. P., and Saini, R. P. (2016). Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro–photovoltaic–biomass and biogas–diesel–battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 53-69.
- [127] Mohamadi Janaki, D., Pishkar, I., Mohamadi Janaki, M., Alayi, R., Sediqi Samani, M. H., and Tahmasebi, A. (2022). Optimal selection and economical ranking of isolated renewable-based CHP microgrid in cold climate, a case study for a rural healthcare center. *Journal of Solar Energy Research*, 7(4), 1143-1158.
- [127] Murty, V. V. S. N., and Kumar, A. (2022). Retraction Note: Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(11).
- [128] Toopshekan, A., Rahdan, P., Rad, M. A. V., Yousefi, H., and Astaraei, F. R. (2022). Evaluation of a stand-alone CHP-Hybrid system using a multi-criteria decision making due to the sustainable development goals. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104170.
- [129] Recioui, A., and Dekhandji, F. Z. (2022). Hydrogen-based Hybrid Renewable Energy System Sizing Optimization using HOMER. In *2022 13th International Renewable Energy Congress (IREC)*, (1-6)
- [130] Tran, Q. T., Roose, L., Nguyen, N. Q., Van, B. D., Zizzo, G., and Sanseverino, E. R. (2023). The possibility of applying combined heat and power microgrid model for industrial parks. A case study for Dong Nam industrial park in Vietnam. In *2023 IEEE/IAS 59th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)* (1-5).
- [131] Shahsavari, A., Rad, M. A. V., Pourfayaz, F., and Kasaeian, A. (2022). Optimal sizing of an integrated CHP and desalination system as a polygeneration plant for supplying rural demands. *Energy*, 258, 124820.
- [132] Ji, L., Liang, X., Xie, Y., Huang, G., and Wang, B. (2021). Optimal design and sensitivity analysis of the stand-alone hybrid energy system with PV and biomass-CHP for remote villages. *Energy*, 225, 120323.
- [133] J. Assaf and B. Shabani, "A novel hybrid renewable solar energy solution for continuous heat and power supply to standalone-alone applications with ultimate reliability and cost effectiveness," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 509-520, 2019/08/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.099>.
- [134] Xu, Z., Nthontho, M., and Chowdhury, S. (2016). Rural electrification implementation strategies through microgrid approach in South African context. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 82, 452-465.
- [135] Murty, V. V. S. N., and Kumar, A. (2022). Retraction Note: Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(11).

- [136] Abdulgalil, M. A., Khalid, M., and Alismail, F. (2019). Optimal sizing of battery energy storage for a grid-connected microgrid subjected to wind uncertainties. *Energies*, 12(12), 2412.
- [137] Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A., and Mekhilef, S. (2019). Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability*, 11(3), 683.
- [138] Tırınk, S. (2022). Hayvansal atıkların biyogaz üretim potansiyelinin hesaplanması: Iğdır ili örneği. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(1), 152-163.
- [139] Jakhrani, A. Q., Rigit, A. R. H., Othman, A. K., Samo, S. R., and Kamboh, S. A. (2012). Estimation of carbon footprints from diesel generator emissions. In *2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology* (78-81).
- [140] T. E. T. K. Bakanlığı. (2024). Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri. Erişim tarihi: 24.08.2024. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri>