

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI HİBRİT SİSTEMLERDE
ENERJİ YÖNETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FERHAT AYDIN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK

BİNGÖL-2024

**YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI HİBRİT SİSTEMLERDE
ENERJİ YÖNETİMİ**

Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK danışmanlığında, Ferhat AYDIN tarafından hazırlanan bu çalışma 06/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Abdulkerim KARABİBER	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Cem HAYDAROĞLU	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

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Bu tezin her aşamasında yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez süresince bilgilerini ve yardımlarını eksik etmeyen Öğr. Gör. Dr. Mehmet Ali KÖPRÜ'ye çok teşekkür ederim. Tez çalışmasında kullanılan verileri sağlayan Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı Müdürlüğü yönetimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

FERHAT AYDIN

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	13
3.1. Güneş Enerji.....	13
3.2. Rüzgar Enerji.....	15
3.3. Hidrolik Enerji.....	16
3.4. Biyokütle Enerji.....	17
3.5. Jeotermal Enerji.....	18
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
4.1. HOMER Pro Yazılımı.....	19
4.2. Sistem Bileşenlerinin Matematiksel Modelleri	19
4.2.1. FV'nin Modellenmesi.....	19
4.2.2. Elektrolizörün Modellenmesi.....	21
4.2.3. HT'nin Modellenmesi.....	21
4.2.4. FC'nin Modellenmesi.....	22
4.2.5. BDS'nin Modellenmesi.....	22
4.2.6. Dönüştürücünün Modellenmesi.....	23
4.2.7. RT'nin Modellenmesi.....	24
4.2.8. BG'nin Modellenmesi.....	26
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27

5.1. Uygulama-I: Kırsal Alanlar İçin Hibrit Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Tekno-Ekonomik Analizi: Bingöl	
Örneği.....	27
5.1.1. Sistem Tasarımı.....	27
5.1.2. Sistemde Kullanılan Veriler.....	29
5.1.2.1. Elektrik Yüğü Verileri.....	29
5.1.2.2. Termal Yüğü Verileri.....	31
5.1.2.3. Bölgenin Güneş Radyasyonu Verileri.....	32
5.1.2.4. Bölgenin Rüzgâr Hızı Verileri.....	33
5.1.2.5. Bölgenin Biyokütle Kaynakları.....	34
5.1.3. Optimizasyon Sonuçları.....	36
5.1.3.1. FV'nin Sisteme Etkisi.....	39
5.1.3.2. RT'nin Sisteme Etkisi.....	40
5.1.3.3. BG'nin Sisteme Etkisi.....	40
5.1.3.4. FC'nin Sisteme Etkisi.....	41
5.1.3.5. Elektrolizörün Sisteme Etkisi.....	42
5.1.3.6. BDS'nin Sisteme Etkisi.....	43
5.2. Uygulama-II: Şehir İçi Yolcu Taşımacılığında Elektrikli Araçlara Geçiş Sürecinin Teknik, Ekonomik ve Çevresel Yönlerden İncelenmesi: Diyarbakır	
Örneği.....	44
5.2.1. Sistem Tasarımı.....	44
5.2.2. Yüğü Profili.....	46
5.2.3. Bölgenin Meteorolojik Verileri.....	47

5.2.4. Simülasyon Sonuçları.....		48
5.2.4.1. FV'nin Sisteme Etkisi.....		49
5.2.4.2. RT'nin Sisteme Etkisi.....		49
5.2.4.3. Şebekenin Sisteme Etkisi.....		50
5.2.4.4. Ekonomik Analiz.....		52
5.2.4.5. Çevresel Analiz.....		53
6. SONUÇLAR	VE	55
ÖNERİLER.....		
KAYNAKLAR.....		57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
CHP	: Kombine Isı ve Güç Sitemleri
LCOE	: Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti
NPC	: Net Şimdiki Maliyet
MW	: Mega Watt
NREL	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
FV	: Fotovoltaik
PID	: Oransal-İntegral-Türev
kW	: Kilowatt
PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrolör
CO ₂	: Karbondioksit
kWh	: Kilowatt saat
REPA	: Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası
GEPA	: Güneş Enerji Potansiyeli Atlası
BEPA	: Biyokütle Enerji Potansiyeli Atlası
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
HT	: Hidrojen Tankı
FC	: Yakıt Hücresi
PEMFC	: Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
BDS	: Batarya Depolama Sistemi
RT	: Rüzgâr Türbini
BG	: Biyogaz Generatörü
DG	: Dizel Generatörü
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
EJ	: Eksajoule

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Türkiye'nin toplam güneş radyasyon dağılımı.....	14
Şekil 3.2.	Türkiye'nin aylık ortalama radyasyon değeri (kWh/m ²).....	14
Şekil 3.3.	Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı (100 m).....	16
Şekil 3.4.	Biyokütle enerjisi çevrim yöntemleri.....	17
Şekil 4.1.	Eocycle EO10 model rüzgâr türbinine ait güç eğrisi.....	25
Şekil 5.1.	Yiğit Harman Köyünün konumu.....	28
Şekil 5.2.	Önerilen mikro şebekenin konfigürasyonu.....	29
Şekil 5.3.	Yük-1 için elektriksel yük verileri.....	31
Şekil 5.4.	Yük-2 için elektriksel yük verileri.....	31
Şekil 5.5.	Yiğit Harman Köyü için termal yük verileri.....	32
Şekil 5.6.	Yiğit Harman Köyü için günlük güneş radyasyonu ve açıklık indeksi.....	33
Şekil 5.7.	Yiğit Harman Köyü için rüzgâr hızı grafiği.....	34
Şekil 5.8.	Yiğit Harman Köyü için biyokütle grafiği.....	36
Şekil 5.9.	Optimizasyon sonuçları.....	36
Şekil 5.10.	Tüm bileşenlere sahip model için yıllık üretim dağılımı a) Elektrik enerjisi b) Isı enerjisi.....	37
Şekil 5.11.	(a) Dizel generatörlü model (b) Doğal gaz generatörlü model.....	38
Şekil 5.12.	FV panellerin yıllık çıkış gücü değişimi.....	39
Şekil 5.13.	RT'nin yıllık çıkış gücü değişimi.....	40
Şekil 5.14.	BG'nin yıllık çıkış gücü değişimi.....	41
Şekil 5.15.	FC'nin yıllık çıkış gücü değişimi.....	42
Şekil 5.16.	Elektrolizörün yıllık giriş gücü değişimi.....	43
Şekil 5.17.	BDS'lerin yıllık şarj seviyesi değişimi.....	43
Şekil 5.18.	EA'lar için HOMER Pro yazılımında tasarlanan mikro şebeke modeli	46
Şekil 5.19.	Tasarlanan modelin yük	46

	profili.....	
Şekil 5.20.	Diyarbakır İline ait aylık güneş radyasyonu ve açıklık indeksi grafiği	47
Şekil 5.21.	Diyarbakır İline ait aylık rüzgâr hızı grafiği.....	48
Şekil 5.22.	Tasarlanan şebekenin üretim grafiği.....	48
Şekil 5.23.	FV panellerin yıllık çıkış gücü değişimi.....	49
Şekil 5.24.	RT'nin yıllık çıkış gücü değişimi.....	50
Şekil 5.25.	Şebekeden alınan ve şebekeye satılan enerjinin yıllık değişim grafiği.....	51



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Türkiye'nin toplam kurulu gücü içindeki YEK'lerin payının değişimi..	2
Tablo 3.1.	2013-2024 yılları arası dünyada YEK'lerin kurulum kapasite değerleri.	13
Tablo 3.2.	Türkiye'de güneş enerjisine dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%).	15
Tablo 3.3.	Türkiye'de rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%).	16
Tablo 3.4.	Türkiye'de hidroelektrik enerjiye dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%).	17
Tablo 3.5.	Türkiye'de biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%).	18
Tablo 3.6.	Türkiye'de jeotermal enerjiye dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%).	18
Tablo 4.1.	FV sistem denklemlerindeki semboller.	20
Tablo 4.2.	BDS denklemlerindeki semboller.	23
Tablo 4.3.	RT denklemlerindeki semboller.	25
Tablo 5.1.	Yiğit Harman Köyü'nün aylık enerji tüketim değerleri	30
Tablo 5.2.	Yiğit Harman Köyü ve Türkiye'nin günlük küresel radyasyon değerleri	33
Tablo 5.3.	Yiğit Harman Köyüne ait ortalama rüzgâr hızı değerleri.	34
Tablo 5.4.	Hayvan türlerine göre atık miktarı [55].	35
Tablo 5.5.	Yiğit Harman Köyü için ortalama biyokütle değerleri.	35
Tablo 5.6.	Tüm bileşenlere sahip modelde sistemin maliyet tablosu.	37
Tablo 5.7.	Tüm bileşenlere sahip modelde sistem bileşenlerinin enerji üretimindeki payları.	37
Tablo 5.8.	Tüm modeller için emisyon değerleri.	39
Tablo 5.9.	FV panel sistemlerinin değerleri.	39
Tablo 5.10.	RT sistemlerinin değerleri.	40

Tablo 5.11. BG'nin değerleri.....	41
Tablo 5.12. FC'nin değerleri.....	42
Tablo 5.13. Elektrolizörün değerleri.....	43
Tablo 5.14. BDS'lerin değerleri.....	44
Tablo 5.15. Diyarbakır ili şehir içi yolcu taşımacılığında mevcutta kullanılan araçların bilgileri	45
Tablo 5.16. Diyarbakır ili şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılması önerilen EA'ların bilgileri [58].....	45
Tablo 5.17. Diyarbakır İlinin şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılması önerilen EA'ların günlük enerji ihtiyacı	45
Tablo 5.18. Diyarbakır İlinin güneş, açıklık indeksi ve ortalama rüzgâr değerleri.....	47
Tablo 5.19. Tasarlanan şebekenin üretim-tüketim değerleri.....	48
Tablo 5.20. FV FV panel sistemlerinin değerleri.....	49
Tablo 5.21. RT sistemin değerleri.....	50
Tablo 5.22. Şebekeden alınan ve şebekeye satılan aylık enerji miktarları.....	51
Tablo 5.23. Sistemin maliyet tablosu.....	52
Tablo 5.24. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında mevcutta kullanılan araçların yakıt tüketim değerleri.....	53
Tablo 5.25. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında mevcutta kullanılan araçların CO ₂ emisyon değerleri.....	53

YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI HİBRİT SİSTEMLERDE ENERJİ YÖNETİMİ

ÖZET

Sanayi ve teknoloji alanındaki ilerlemeler, artan dünya nüfusu, şehirleşme ve insanların konfor seviyelerinin yükselmesi enerji talebini sürekli olarak artırmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının büyük kısmı kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların çıkarılması, işlenmesi ve yakılması atmosfere karbondioksit (CO₂) gibi büyük miktarlarda sera gazı salmaktadır. Bu gazlar küresel ısınma ve iklim değişikliğine katkıda bulunarak deniz seviyesinin yükselmesi, aşırı hava olayları ve habitat tahribatı gibi olumsuz çevresel etkilere yol açmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtlar milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler sonucunda oluşmuş sınırlı kaynaklardır ve bu nedenle yakın gelecekte tükenme riski taşımaktadır.

Fosil yakıtların olumsuz etkilerini azaltmak ve daha temiz, yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) geçiş yapmak, iklim değişikliğiyle mücadele etmek, kirliliği azaltmak ve sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek açısından büyük önem taşımaktadır. YEK'ler, fosil yakıtlara güçlü bir alternatif sunmakla birlikte, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kaynaklar hava koşullarına bağlı olarak kesintili ve değişken olabilir. Bu durum, enerji arzını sürekli olarak talebe uygun hale getirmeyi zorlaştırabilir. Dolayısıyla, tek bir YEK'e bağımlı kalmak yerine, çeşitli kaynakların entegre edildiği hibrit mikro şebekelerin kullanılması daha uygun bir çözüm olacaktır.

Bu tez çalışması, enerji ihtiyacını sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemlerle karşılamaya yönelik iki farklı uygulamayı incelemekte ve yenilenebilir enerji tabanlı çözümlerin ekonomik ve çevresel avantajlarını ortaya koymaktadır. İlk uygulama, Bingöl'ün Solhan ilçesine bağlı Yiğit Harman köyünün elektrik ve ısı enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla YEK'lerin etkili kullanımını incelemektedir. HOMER Pro yazılımı kullanılarak güneş, rüzgâr, biyokütle ve hidrojen enerjilerini içeren bir birleşik ısı ve güç sistemi (Combined Heat And Power-CHP) tasarlanmış ve köyün elektrik ihtiyacının tamamı ile ısı ihtiyacının yarısı bu sistemden sağlanmıştır. Ekonomik ve çevresel analizler sonucu seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Levelized Cost of Energy-LCOE) 0.271 \$/kWh, net bugünkü maliyet (Net Present Cost-NPC) değeri 739,772 \$ ve yıllık CO₂ emisyonu 37,958 kg olarak elde edilmiştir. Bu model, kırsal bölgelerde enerji bağımsızlığını artırmak için etkili bir örnek sunmaktadır. İkinci uygulama, Diyarbakır ilindeki şehir içi taşımacılıkta dizel ve doğal gazlı araçların elektrikli araçlara (EA) dönüştürülmesini ele almaktadır. Mevcut 933 aracın EA'lara dönüştürülmesi için tasarlanan yenilenebilir enerji tabanlı mikro şebekenin birkaç yıllık yakıt maliyetiyle kendini amorti edebileceğini ve yıllık CO₂ emisyonunun (14,137 ton/yıl) mevcut araçlardan (45,540 ton/yıl) üçte birinden daha az olacağını göstermektedir. Her iki çalışma, yenilenebilir enerji kullanımının ekonomik ve çevresel faydalarını vurgulamakta ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, hibrit güç sistemlerinin simülasyonu, kombine ısı ve güç sistemi (CHP), HOMER Pro, CO₂ emisyonu.

ENERGY MANAGEMENT IN RENEWABLE ENERGY BASED HYBRID SYSTEMS

ABSTRACT

Advancements in industry and technology, increasing global population, urbanization, and rising comfort levels of people continuously increase the demand for energy. Today, a significant portion of the world's energy needs is met from fossil fuels such as coal, oil, and natural gas. The extraction, processing, and combustion of fossil fuels release large amounts of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere. These gases contribute to global warming and climate change, leading to negative environmental impacts such as rising sea levels, extreme weather events and habitat destruction. In addition, fossil fuels are limited resources that have been formed over millions of years of geological processes and are therefore at risk of depletion soon.

Reducing the negative impacts of fossil fuels and transitioning to cleaner, renewable energy sources (RES) is crucial to combat climate change, reduce pollution, and build a sustainable future. While RESs offer a strong alternative to fossil fuels, resources such as solar and wind energy can be intermittent and variable depending on weather conditions. This can make it difficult to continuously match energy supply to demand. Therefore, rather than relying on a single RES, using hybrid microgrids that integrate various sources provides a more suitable solution.

This thesis examines two different applications to meet the energy demand with sustainable and environmentally friendly methods and demonstrates the economic and environmental advantages of renewable energy-based solutions. The first application examines the effective use of RESs to meet the electricity and heat energy needs of Yiğit Harman village in Solhan district of Bingöl. Using HOMER Pro software, a combined heat and power (CHP) system including solar, wind, biomass, and hydrogen energies was designed to meet the entire electricity and half of the heat demand of the village. As a result of the economic and environmental analyses, the levelized cost of energy (LCOE) was found to be \$0,271/kWh, the net present cost (NPC) was \$739.772 and the annual CO₂ emissions were 37.958 kg. This model provides an effective example for increasing energy independence in rural areas. The second application addresses the conversion of diesel and natural gas vehicles to electric vehicles (EVs) for urban transportation in Diyarbakır province. A renewable energy-based microgrid designed for the conversion of the existing 933 vehicles to EVs shows that the system can pay for itself within a few years with fuel cost savings, and the annual CO₂ emissions (14.137 tons/year) would be less than one-third of those from the current vehicles (45.540 tons/year). Both studies highlight the economic and environmental benefits of using renewable energy and offer sustainable solutions.

Keywords: Hybrid renewable energy systems, simulation of hybrid power systems, combined heat and power system (CHP), HOMER Pro, CO₂ emission.

1. GİRİŞ

Toplumların ve bireylerin elektrik enerjisine olan ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu artışın temel nedenleri arasında dünya nüfusundaki büyüme, sanayi sektörlerinin hızlı gelişimi ve evlerde kullanılan elektrikli cihazların sayısındaki artış öne çıkmaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmeler şehirleşme süreçlerini hızlandırmış, kırsal kesimden kentlere doğru göç dalgasını tetiklemiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2023 raporuna göre [1], günümüzde küresel toplam nihai enerji tüketimi 442 eksajoule (EJ) ulaşmıştır. Bu tüketim, farklı sektörler dağıtılmakta olup; sanayi 167 EJ, binalar 133 EJ, ulaşım 116 EJ ve diğer kullanım alanları 27 EJ'lik paya sahiptir. Hükümetlerin halihazırdaki politikalarına ve taahhütlerine dayanan bir projeksiyon olan mevcut politikalar senaryosunda, nihai enerji tüketiminin 2030 yılına kadar yıllık %1,1 oranında artması ve daha sonrasında 2050 yılına kadar daha yavaş bir hızla büyümeye devam etmesi öngörülmektedir.

Yine aynı rapora göre on yıllardır dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık %80'i fosil kaynaklardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların yakılması, kükürt dioksit, azot oksitler ve partikül madde de dahil olmak üzere çeşitli hava kirleticilerinin üretilmesine neden olur, bu kirleticiler duman oluşumuna ve asit yağmurlarına katkıda bulunur [2]. Aynı zamanda insan sağlığına zarar vererek solunum problemleri, kardiyovasküler hastalıklar ve diğer rahatsızlıklara yol açar [3]. Kömür, petrol ve doğal gaz dahil olmak üzere fosil yakıtlar, milyonlarca yıl süren bir süreçte oluşan sınırlı kaynaklardır. Bu kaynakların çıkarılması ve kullanılması, dünya rezervlerinin zamanla tükenmesine yol açacağından enerji güvenliği açısından gelecekte büyük bir tehdit oluşturma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda, bu yakıtlar jeopolitik çatışmalara ve enerji bağımsızlığının zayıflamasına neden olabilir. Ayrıca fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, ekonomileri kırılgan hale getirebilir ve küresel enerji piyasalarındaki kesintilere karşı savunmasız bırakabilir.

Güneş enerjisi ve EA'lar öncülüğünde gelişen yeni bir temiz enerji ekonomisinin ortaya çıkışı, geleceğe yönelik iyimser bir perspektif sunmaktadır. 2020 yılından bu yana temiz enerji yatırımları %40 oranında artış göstermiştir. Bu artışın temel motivasyonu sera gazı

emisyonlarını azaltma çabası olmakla beraber tek etken bu değildir. Gelişmiş temiz enerji teknolojilerinin ekonomik avantajları da giderek belirginleşmektedir. Özellikle yakıt ithalatına bağımlı ülkelerde enerji güvenliği, sanayi politikaları ve temiz enerji sektörü üzerinden istihdam yaratma arzusu, bu alandaki yatırımların artmasına neden olan diğer önemli faktörlerdir. Ayrıca, enerji dönüşümündeki hızın arttığına dair önemli göstergeler de mevcuttur. Örneğin, 2020 yılında satılan her 25 araçtan biri elektrikliken, 2023 itibarıyla bu oran her 5 araçtan birine yükselmiştir. Ayrıca, 2023 yılında küresel yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 500 giga watt'ın üzerinde artmış olup, bu durum yeni bir rekor anlamına gelmektedir. Güneş enerjisinin yaygınlaştırılması amacıyla günde 1 milyar ABD dolarından fazla yatırım yapılmakta ve fotovoltaik (FV) modülleri ile elektrikli araç bataryaları gibi temel temiz enerji bileşenlerinin üretim kapasitesi hızla artmaktadır [1].

Dünyadaki yönelime paralel olarak ülkemizde de YEK'lere yönelim her yıl artmaktadır. 2013-2023 yılları arası Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre gelişimi Tablo 1.1'de verilmiştir [4]. Türkiye'nin 2013 yılındaki kurulu gücü 64.007,5 Mega Watt (MW) iken bu değer 2023 yılında 110.914 MW'a yükselmiştir. Bu yıllar arasında termik santrallerin payı %60,38'den %44,94'e gerilerken YEK'lerin payı ise %39,62'den %55,06'ya yükselmiştir.

Tablo 1.1. Türkiye'nin toplam kurulu gücü içindeki YEK'lerin payının değişimi

		Kurulu Güç Değeri (MW)	Toplam Kurulu Güç İçindeki Payı (%)
Hidrolik	2013	22.289,0	34,82
	2023	31.962,4	28,82
Jeotermal	2013	310,8	0,49
	2023	1.691,3	1,52
Rüzgâr	2013	2.759,7	4,31
	2023	11.806,1	10,64
Güneş	2013	0,0	-
	2023	15.613,4	14,08

TÜİK'in yayınlamış olduğu 1990-2022 yıllarına ilişkin sera gazı emisyon istatistiklerine göre, Türkiye'nin 2022 yılı toplam sera gazı emisyonu 558,3 milyon ton CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu değer 2021 yılı değerinden (564,4 milyon ton CO₂ eşdeğeri) göre %2,4 daha düşüktür. Kişi başına düşen emisyon miktarı 1990, 2021 ve 2022 yılları için sırasıyla 4,1 ton, 6,8 ton ve 6,6 ton CO₂ eşdeğeri olarak gerçekleşmiştir. 2022 yılı

emisyon değerindeki en büyük pay %71,8 ile enerji kaynaklı emisyonlardır. Daha sonra %12,8 ile tarım, %12,5 ile endüstriyel işlemeler ve %2,9 ile atık sektörü gelmektedir [5]. YEK'lerin kullanımı, sera gazı emisyonlarını azaltmanın en etkili     mlerinden biridir.

Başta rüzgâr ve güneş olmak üzere YEK'ler doğası gereği sürekli değişken olduklarından enerji üretimi her zaman aynı değerde kalamamaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için kaynaklar hibrit olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hibrit enerji üretim sistemleri, birden fazla enerji kaynağını bir araya getirerek enerji üretimini optimize eden sistemlerdir. Bu sistemler, kaynakların birbirini tamamlayıcı şekilde etkileşim halinde çalışmasını sağlar ve böylece enerji üretiminde verimliliği artırmayı hedefler. Bir enerji kaynağında oluşan kesinti veya eksiklik, diğer kaynaklar tarafından telafi edilebilir, bu da daha güvenilir ve kesintisiz bir enerji üretimini mümkün kılar [6]. Bu tür hibrit sistemlerde, coğrafi konum, bölgenin enerji talebi ve teknolojik altyapı gibi faktörlere bağlı olarak YEK'lerin farklı kombinasyonları oluşturularak maksimum verimlilik sağlanabilir.

Yenilenebilir enerji tabanlı hibrit sistemlerin  ne çıkan bazı üstünlükleri şunlardır:

- Ülkelerin sahip olduğu YEK'ler ile üretim gerçekleştirildiği için enerjide dışa bağımlılığı azaltır.
- şebekeden beslenemeyen kırsal yerleşim bölgelerinin enerji ihtiya ını karşılamada önemli rol oynarlar.
- Yerleşim alanlarının dışında kalan ve şebekenin gitmediği yerlerde yapılan tarımsal, ticari vb. faaliyetler için gerekli enerji ihtiya ını güvenilir bir şekilde karşılayabilirler. Böylece kırsal bölgelerin sosyo-ekonomik gelişimine katkı sunarlar.
- CO₂ salınımını azaltarak  evre üzerinde olumlu bir etki sağlarlar.
- Elektrik  retim santrallerinin tüketicilere yakın yerlerde kurulması, iletim hatlarındaki kayıpları azaltacağından verimliliği artıracaktır.

Hibrit sistemlerin modellenmesinde birçok parametre göz önüne alındığından, işlem karmaşık ve zordur. Anlık hava olaylarına bağlı olarak üretim değerlerinde ani değişimler meydana gelebilmektedir. Bu değişim zamanlarında hangi üretim

kaynaklarının devreye alınacağına sistemin hızlıca karar vermesi gerekir. Üretim ve tüketim değerlerinin sistem tarafından dengelenmesi bir diğer zorluktur. Şayet üretilen enerji miktarı tüketilenden fazla olursa boşa üretilen enerji söz konusu olacaktır. Tersı durumunda ise enerji kesintileri meydana gelecektir. Hibrit sistemin şebekeye bağılı olup olmamasına göre farklı yöntemler ile bu problemin üstesinden gelinmektedir. Şebekeye bağılı sistemlerde üretimin tüketimi karşılayamadığı zamanlarda ihtiyaç duyulan miktar şebekeden sağlanırken üretimin fazla olduğı zamanlarda ise tüketimden artan enerji şebekeye verilmektedir. Şebeke bağlantısı olmayan sistemlerde ise depolama birimlerinin kullanılması iyi bir çözüm olabilir. Böylece enerji üretiminin fazla olduğı zamanlarda tüketimden arta kalan enerji depolanacak ve üretimin yetersiz olduğı zamanlarda ise kullanılabilir. Şebeke bağlantısı olmayan sistemlerde bir diğer çözüm, fazla enerjiyi elektrolizörlerde kullanarak hidrojen üretmektir. Bu şekilde üretilen hidrojen, enerji ihtiyacının arttığı zamanlarda yakıt pilleri ile elektrik enerjisine dönüştürölerek kullanılabilir.

Sistem maliyeti, modelleme yapılırken dikkate alınması gereken bir diğer önemli parametredir. Maliyet ölçümünde iki parametre öne çıkmaktadır. NPC, proje süresi boyunca sistem bileşenlerinin kurulumu ve işletimi için yapılan tüm harcamaların bugünkü değerinden, bu süre içinde kazanılan tüm gelirlerin bugünkü değerinden düşölerek elde edilen değere karşılık gelir [7]. LCOE ise kullanım ömrü boyunca sistemde 1 kWh faydalı enerji üretmenin (yani kayıplar hariç) ortalama maliyetidir. Tasarlanan sistemin kurulum maliyeti, sistemi oluştururken yapılan kaynak seçimine bağılıdır. İşletme maliyeti ise herhangi bir zamanda hangi kaynağın ne kadar üretim yapacağına bağılıdır. Tüm bu problemler, hibrit sistemlerin tasarımını zorlaştırmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, yukarıda bahsedilen zorlukları da dikkate alarak farklı amaçlar için hibrit üretim sistemlerini tasarlamak ve teknik, ekonomik ve çevresel analizlerini gerçekleştirmektir. Bu amaç doğrultusunda iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada Bingöl İli Solhan İlçesine bağılı 111 haneli Yiğit Harman Köyünün kendi kaynaklarını değerlendirmek ve enerji ihtiyaçlarını karşılamak için bir hibrit üretim sisteminin tasarımını gerçekleştirmektir. Tasarlanan sistem sayesinde köydeki tarımsal ve hayvansal atıklar elektrik ve ısı enerjisi

retiminde değerlendirilerek hem çevresel atıkların bertaraf edilmesi sağlanmış hem de hem de köyün enerji ihtiyaçı karşılanmıştır. Ayrıca rüzgâr ve güneş enerjilerinin fazla olduğu zamanlarda bu kaynaklar ile hidrojen üretimi yapılarak, üretimin az olduğu zamanlarda yakıt pilleri yardımıyla elektrik ve ısı enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci uygulamada ise çevresel ve ekonomik açıdan şehir içi taşımacılıkta EA'lara geçişin önemini ortaya koymak amacıyla Diyarbakır ilinde şehir içi yolcu taşımacılığında hizmet veren araçların EA'lara dönüştürülmesi süreci incelenmiştir. Fosil yakıtle çalışan mevcut 280 otobüs ve 653 minibüsün tamamının EA'lara çevrilmesi durumunda bu araçların enerji gereksinimlerini karşılayacak YEK tabanlı bir hibrit sistem tasarlanmış ve bu sistemin teknik, ekonomik ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada hazırlanan tez altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde; YEK'lerin önemi ve gerekliliği ile hibrit sistemlerinin önemi hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde hibrit enerji üretim sistemlerinin tasarımına yönelik yapılan çalışmalar üzerine kapsamlı bir literatür zeti sunulmuştur. nc bölümde YEK'ler ile Türkiye'nin YEK potansiyeli hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde öncelikle HOMER Pro yazılımı hakkında bilgi verilmiş daha sonra YEK'lerin bu yazılımda nasıl modellendiği açıklanmıştır. Beşinci bölümde yapılan uygulamalar ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Altıncı bölümde ise elde edilen tüm sonuçlar yorumlanarak yapılacak sonraki çalışmalar için öneriler paylaşılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Hibrit enerji sistemlerinin verimliliğini ve etkinliğini arttırmaya yönelik olarak literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Qiblawey ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [8], Kanarya takımadalarından Tenerife ve Gran Canaria için önerdikleri dört farklı senaryo yardımıyla YEK kullanımının arttırılmasına yönelik kapsamlı bir tekno-ekonomik değerlendirme sunulmuştur. HOMER Pro yazılımı yardımıyla tasarlanan sistem ile elektrik üretim maliyetinin her iki ada için sırasıyla %23 ve %25,3 azalacağı, CO₂ emisyonunda ise %70'e varan bir düşüş olacağı belirtilmiştir.

Ellabban ve Alassi 2021 yılında yaptıkları çalışma ile madencilik uygulamalarına yönelik bir hibrit mikro şebeke tasarımı sunmuşlardır. Çalışmada Avustralya'da üç vaka çalışması ele alınmış ve HOMER Pro yazılımı kullanılarak hibrit mikro şebekelerin optimizasyonları gerçekleştirilmiştir [9].

Demirören ve Yılmaz tarafından yapılan çalışmada [10], Türkiye'nin en büyük adası olan Gökçeada için YEK'ler yardımıyla elektrik üretiminin nasıl olacağı araştırılmıştır. Önerilen sistem FV, rüzgâr türbinleri (RT) ve batarya depolama sistemlerinden (BDS) oluşturulmuş ve HOMER Pro yazılımı ile tasarlanmıştır. Çalışmada, maliyet açısından rüzgâr enerji sistemlerinin Gökçeada için daha uygun olduğu ortaya konulmuştur.

Fikari ve arkadaşları, Kenya'da 100 kişilik nüfusa sahip kırsal bir bölge için bağımsız bir hibrit güç sistemi modelleyerek analiz etmişlerdir. FV, dizel generatör (DG), batarya depolama sistemleri (BDS), rüzgâr türbini (RT) ile temel yükler, su pompalama ve arıtma yükünden oluşan güç sistemi, MATLAB Simulink yardımı ile modellenmiştir [11].

Hafez ve Bhattacharya yaptıkları çalışmada; ekonomilerini, operasyonel performanslarını ve çevresel emisyonlarını karşılaştırmak için yalnızca dizel, tamamen yenilenebilir bazlı, dizel-yenilenebilir karma ve harici şebekeye bağlı olmak üzere dört farklı senaryo için mikro şebeke tasarlamışlardır. Çalışmada, hibrit sistemlerin modellenmesi için HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır [12].

Islam ve arkadaşları, Bangladeş'in kuzey bölgesindeki kırsal elektriksiz bölgeler için hibrit sistemler aracılığıyla elektrik sağlanmasına yönelik bir çalışma sunmuşlardır. FV, biyogaz generatörü (BG), DG ve BDS'lerin farklı kombinasyonları ile elektrik üretimi için üç farklı alternatif model geliştirilmiştir. Tekno-ekonomik analizin gerçekleştirilmesi ve optimum sistem konfigürasyonunun belirlenmesi için HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. Önerilen hibrit sistemin, mevcut yöntemlerden %75 daha az CO₂ üreteceği bulunmuştur [13].

He ve arkadaşları çalışmalarında, Pekin'deki bir yerleşim bölgesi için çeşitli yenilenebilir enerji tabanlı, şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı mikro şebeke senaryoları için tekno-ekonomik analizler yapmışlardır. Sistem bileşenlerinin teknik ve ekonomik performansını değerlendirmek ve en uygun maliyetli konfigürasyon modelini elde etmek için HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. Önerilen model ile, elektrik talebinin en az %90'ının karşılanabileceği ortaya konulmuştur [14].

Sigalo ve arkadaşları HOMER Pro yazılımını kullanarak Rivers State Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası için, FV, DG ve yedek şebekeden oluşan bir hibrit sistem tasarlamışlar ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir [15].

Shezan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; yük gereksinimlerini karşılamak üzere FV, RT, BDS ve DG'den oluşan bir hibrit sistem tasarlamışlardır. Bu amaca yönelik olarak çeşitli optimizasyon teknikleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Ayrıca, gerilim ve frekansı yönetmek için oransal-integral-türev (Proportional Integral Derivative, PID) ve fuzzy lojik kontrollerini (FLC) içeren bir kontrol yöntemi MATLAB Simulink'te uygulanmıştır [16].

Mbasso ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, balık çiftçiliğinin birincil faaliyet olduğu Manoka Adası'ndaki bir yerleşim bölgesi için şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemi tasarlamışlardır. Ele alınan konutun günlük elektrik tüketimi ortalama 9,28 kWh, en yüksek talep ise 0,88 kW'tır. HOMER Pro yazılımıyla hem balık yetiştiriciliği endüstrisini sürdürmek hem de seçilen binanın enerji gereksinimlerini karşılamak için en uygun enerji üretim modeli belirlenmiştir [17].

Sharma ve Mishra, Punjab Teknik Üniversitesi kampüsü için bir FV, BG ve BDS'den oluşan hibrit enerji sistemi geliştirmişlerdir. HOMER Pro yazılımı kullanılarak hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız sistemler analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, şebekeye bağlı sistemin daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır [18].

Ahmad, Kazem ve Hossein tarafından 2010 yılında yapılan bir çalışmada, güney İran'ın Şiraz kentinde elektrik tedarikinde sürekli sıkıntı yaşayan bir köy için FV, RT, hidrojen tankı (HT), yakıt hücresi (Fuel Cell, FC) ve BDS'lerden oluşan bir hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır. HOMER Pro yazılımıyla en uygun ve ekonomik çözüm analiz edilmiş ve şebekeden bağımsız bir sistem tasarlanmıştır [19].

Ashourian ve arkadaşları tarafından Malezya'da bulunan bir ada yerleşimi için yapılan çalışmada, optimum temiz enerji üretimi ve yönetimi konusunda bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemin sonuçları, DG'lerin kullanıldığı senaryolar ile karşılaştırılmıştır. Adadaki popülasyonun aylara göre değişiklik göstermesi nedeniyle, elektrik tüketimi yılın farklı aylarında simülasyona dahil edilmek üzere iki farklı yük profili oluşturulmuştur. Çalışmada FV, RT, BDS, FC ve inverter kullanılmıştır. Optimizasyon için HOMER Pro yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, dizel yakıt fiyatının 2,1 \$/L'yi aşması durumunda, temiz enerji sisteminin ekonomik olarak daha avantajlı olduğunu göstermiştir [20].

Anoune ve arkadaşları [21] hibrit enerji sistemlerinin boyutlandırma ve optimizasyon süreçlerinde sistem maliyeti, güvenilirlik, FV sistem boyutu, FV sistem açısı, depolama kapasitesi ve RT boyutu gibi kritik parametrelerin optimum kombinasyonda bir araya getirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu bağlamda,

literatürdeki optimizasyon algoritmalarını incelemişler ve hiçbir algoritmanın tüm problemler için evrensel bir çözüm sunamayacağını belirtmişlerdir. Ancak, yapay zekâ ve deneme yanılma yaklaşımlarının daha yüksek bir başarı oranına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Yazılımlar arasında ise, en fazla yenilenebilir enerji kaynağını bir araya getirme, optimizasyon sağlama ve duyarlılık analizi yapabilme yeteneği nedeniyle HOMER Pro yazılımının en yaygın kullanılan hibrit enerji sistemi optimizasyonu yazılımı olduğu belirtilmiştir.

Javed ve arkadaşları bir ada için FV, RT ve BDS bileşenlerinin optimizasyonunda genetik algoritmayı kullanarak bir matematiksel model geliştirmiş ve bu modelin sonuçlarını en yaygın kullanılan HOMER Pro yazılım sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Elde edilen veriler, geliştirilen modelin daha üstün olduğunu göstermiştir. Elektrik kesintisi olasılığı kavramının kullanıldığı bu metodolojide, kabul edilebilir küçük bir elektrik kesintisi olasılığının maliyetler üzerinde büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. %5'e kadar olan elektrik kesintisi olasılığı, ilk yatırım maliyetlerinde %25-30, işletme maliyetlerinde ise %15-17 oranında azalma sağlamaktadır [22].

Lipu ve arkadaşları Bangladeş'teki Saint Martin adası için gerçekleştirdikleri çalışmada, adanın elektrik ihtiyacının şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemleri ile karşılamayı hedeflemişlerdir. HOMER Pro yazılımı yardımıyla FV, RT ve DG bileşenlerini içeren çeşitli sistemler oluşturarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Enerji maliyeti açısından en uygun sistemin, FV-RT-DG hibrit sistemi olduğunu belirtmişlerdir. Bu kombinasyonu sırasıyla FV-DG, FV-RT, yalnızca RT ve yalnızca FV sistemleri takip etmiştir [23].

Ma ve arkadaşları yaptıkları çalışmada uzak bir ada için BDS barındıran FV-RT hibrit enerji sistemini HOMER Pro yazılımı kullanarak tasarlamışlardır. Birçok opsiyon değerlendirilmiş ve en uygun sistemin elde edilmesi için NPC LCOE değerleri analiz edilmiştir. Ayrıca, HOMER Pro yazılımı ile elektrik tüketimi ve YEK'ler için duyarlılık analizi yapılarak, bu iki değişkenden hangisinin sonuçlar üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. 145 kW FV, 10,4 kW gücünde 2 adet RT, 2V 3.000Ah kapasiteye sahip 168 adet batarya ve 30 kW

gücünde inverter kullanılarak gerçekleştirilen sistemde, elektrik ihtiyacının %84'ünün FV, %16'sının ise RT tarafından karşılandığını gösterilmiştir. Ancak, üretim ve tüketim zamanlarının uyuşmaması nedeniyle üretilmesine rağmen kullanılamayan enerjinin toplam üretimin %48,6'sına denk geldiği tespit edilmiştir. Bu enerji kaybını en aza indirmek, kapasiteleri düşürmek ve sistemin ekonomik performansını artırmak amacıyla belli bir düzeyde elektrik kesintisi olasılığının kabul edilebileceği önerilmiştir [24].

Baek ve arkadaşları, Güney Kore'nin Yeongjong Adası'ndaki elektrik tüketiminin tamamen YEK'lerden oluşan hibrit sistemler ile karşılanabileceğini belirtmişlerdir. Çalışma ile ortaya koyulan hibrit sistemin alternatif çözümlere oranla daha ekonomik olduğu ve aynı zamanda CO₂ salınımı ve diğer çevresel etkiler bakımından daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir [25].

Sharma ve Mishra, 2019 yılında yaptıkları çalışmada Punjab Teknik Üniversitesi kampüsü için bir hibrit enerji sistemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, BG ve FV gibi YEK'ler ile BDS'ler kullanılmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak hem şebekeden bağımsız hem de şebeke ile entegre durumlar analiz edilmiştir. Araştırma bulguları, şebeke ile entegre edilmiş sistemlerin uygulanabilir bir çözüm sunduğunu vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, hibrit enerji sistemlerinin sürdürülebilir enerji çözümleri arasında önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir [26].

EA'ların şarj edilmesi için gereken enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla hibrit enerji sistemleri tasarlanmıştır. Literatürde yer alan çalışmalardan bazıları şunlardır:

Kumar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EA'ları bir program dahilinde şarj eden FV sistemli şebekeye bağlı bir şarj istasyonu tasarlamışlardır. Çalışma ile yıllık maliyet tahminleri, enerji giderleri, elektrikli araç şarj programları ve şebeke gücü kullanımının azaltılması incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar, şebekeden uzak yerlerde kesintisiz enerji sağlama amacıyla FV sistemlerinin mevcut elektrik şebekesine entegre edilmesinin uygulanabilirliğini ve ekonomik üstünlüğünü vurgulamaktadır [27].

Singh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EA'lar için FV, BDS ve DG bileşenlerinden oluşan şebekeye bağlı bir şarj istasyonu tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemde EA, şarj için öncelikle FV ile BDS'yi kullanmak üzere tasarlanmıştır. Şayet bu iki bileşenin kullanılamaması durumunda, şarj istasyonu şebekeden ve DG'den güç almaktadır [28].

Ye ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Çin'in Shenzhen Şehrinde EA'ların güç talebini karşılamak amacıyla FV sistemli şarj istasyonları modeli önermekte ve tekno-ekonomik uygulanabilirliğini göstermektedir. Modelleme sonuçlarına göre, günlük 4500 kWh elektrik talebini karşılayan bir fotovoltaiik şarj istasyonunun NPC değeri 3.579.236 \$, LCOE değeri ise 0,098 \$/kWh olarak elde edilmiştir [29].

Kumari ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Güney Hindistan'daki Madurai Şehrinde bulunan TCE kampüsündeki EA'ların şarj ihtiyaçlarını karşılamak üzere farklı YEK'leri, HT ve BDS bileşenlerini içeren hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız şarj istasyonu modelleri tasarlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre FV-RT-HT-Şebeke bileşenli model, diğer şarj istasyonu modellerine üstünlük sağlamıştır. Rastgele, eşit ve periyodik olarak dağıtılan araç varış senaryoları incelendiğinde, minimum NPC değeri sırasıyla 157.709 \$, 276.996 \$ ve 425.366 \$ olarak elde edilmiştir [30].

Tahir ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Pakistan'ın Karaçi bölgesi için %100 yenilenebilir bazlı yedi adet otonom istasyon tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, FV ve BG bileşenlerinden oluşan istasyonun 0,31 \$/kWh'lik LCOE ve 8,3 yıllık geri ödeme süresiyle Karaçi için en uygun seçenek olduğunu göstermektedir. Önerilen istasyonun bileşen boyutları; 2.370 kW FV, 85 kW BG, 730 kW elektrolizör, 225 kWh BDS, 215 kg HT ve 165 kW konvertör olarak hesaplanmıştır. Ayrıca model sayesinde şebekeye göre yılda 2.455 ton, DG'ye göre ise 5.642 ton CO₂ salınımı azalmaktadır [31].

Roslan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Malezya'daki üç farklı bölge için, yenilenebilir enerji tabanlı, şebekeye bağlı EA şarj istasyonlarının tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. HOMER Pro yazılımı kullanılarak, bölgelerin coğrafi

ve meteorolojik koşullarına uygun olarak FV, RT, BDS , HT, FC ve elektrolizörler gibi bileşenleri içeren hibrit enerji depolama sistemi modellenmiş ve optimize edilmiştir. Tüm lokasyonlar için NPC değerleri 1,4-3,4 M\$ arasında değişirken LCOE değerleri ise 0,03-0,16 \$/kWh arasında değişmektedir [32].

Praveenkumar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Hindistan'daki beş farklı bölgesinde hem elektrik hem de hidrojen üretimi için bir FV santralini tekno-ekonomik ve çevresel analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre tüm lokasyonlar için LCOE değerleri 0,41-0,48 \$/kWh arasında değişmektedir. Beş bölgede üretilebilecek toplam elektriğin yılda yaklaşık 25 GWh olacağı hesaplanmıştır. Bu ise yılda 20.744,07 metrik ton CO₂ emisyonuna karşılık gelmektedir [33].

Literatürde yer alan ve yukarıda bazı örnekleri verilen çalışmalar, araştırmacıların dünya genelinde yenilenebilir enerji tabanlı hibrit sistemlerin modellenmesine yönelik yoğun bir çaba içerisinde olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalar, farklı coğrafyalarda ve çeşitli amaçlar doğrultusunda hibrit enerji sistemlerinin uygulanabilirliğini ve etkinliğini araştırmaktadır. Araştırmalardaki bu yönelim, hibrit enerji sistemlerinin hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji güvenliği açısından ne kadar önemli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle, EA'ların enerji talebini karşılamak amacıyla YEK'lerden oluşan hibrit mikro şebekelerin tasarımına yönelik kapsamlı araştırmalar dikkat çekmektedir. Bu tür sistemler hem fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakta hem de enerji üretiminde esneklik ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır.

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansının 2024 yılı raporuna göre 2014 yılında dünyadaki toplam YEK kapasitesi 1.698.298 MW, üretilen enerji miktarı ise 5.304.340 GWh olarak gerçekleşmiştir. 2024 yılında kurulum kapasitesi 3.864.522 MW'a ulaşırken üretilen enerji miktarı ise 8.439. 671 GWh olarak gerçekleşmiştir. Başlıca YEK'lerin dünyadaki kurulum kapasite değerlerinin değişimi Tablo 3.1'de sunulmuştur [34].

Tablo 3.1. 2013-2024 yılları arası dünyada YEK'lerin kurulum kapasite değerleri

	Hidroelektrik (MW)	Güneş (MW)	Rüzgar (MW)	Biyokütle (MW)	Jeotermal (MW)
2014	1.176.805	179.639	349.458	90.101	11.249
2015	1.211.410	228.081	416.435	96.110	11.847
2016	1.247.040	300.146	467.241	104.874	12.173
2017	1.270.901	395.854	514.930	110.589	12.754
2018	1.294.150	491.988	563.680	117.821	13.157
2019	1.313.093	595.027	622.730	124.098	13.824
2020	1.335.185	726.229	733.473	132.017	14.157
2021	1.362.416	870.643	824.321	138.338	14.432
2022	1.394.824	1.070.851	902.883	144.286	14.653
2023	1.406.863	1.418.016	1.017.390	148.840	15.026

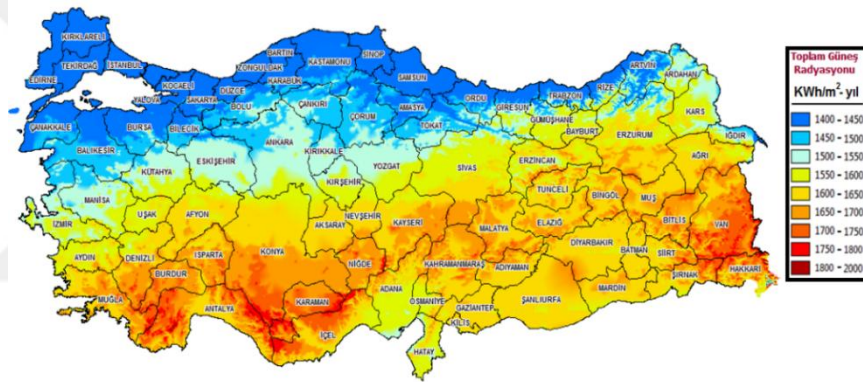
Enerji Bakanlığı'nın resmi verilerine göre 2023 yılında ülkemizdeki toplam elektrik üretiminin %19,3'ü hidrolik enerji, %10,3'ü rüzgâr enerjisi, %6,7'si güneş enerjisi ve %3,4'ü ise jeotermal enerji kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [35]. 2023 yılında ülkemizin toplam kurulu gücünün %55'i YEK'lerden oluşmasına rağmen, bu kaynakların elektrik üretimindeki payı %40 seviyelerinde kalmıştır.

3.1. Güneş Enerjisi

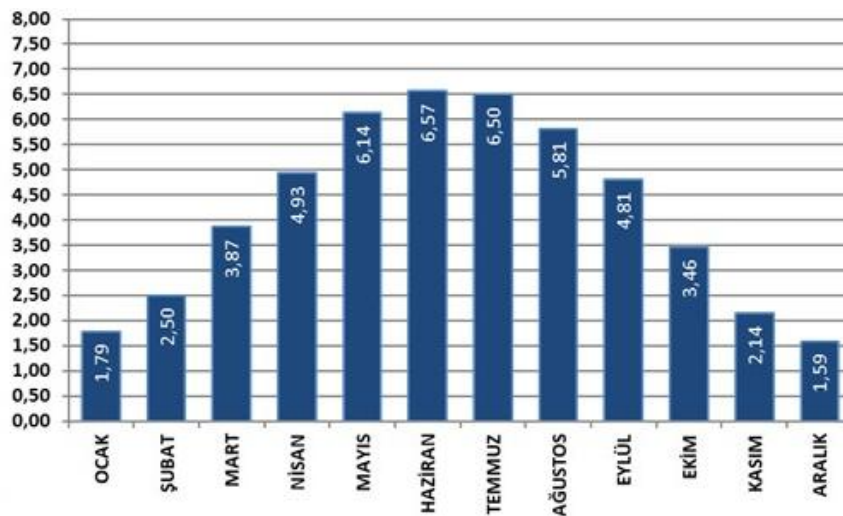
Güneş enerjisi, kurulum ve kullanım kolaylığına ek olarak, çevreyi kirletmemesi ve zararlı atık üretmemesi gibi özelliklere sahip, sürdürülebilir bir YEK türüdür. Güneş çekirdeğinde meydana gelen hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sonucu açığa çıkan enerjidir. Güneş ışınımı yoğunluğu atmosfer yüzeyinde her metrekarede ortalama 1.367 W iken yeryüzünde bu değer metrekare başına 1.000 W'a düşmektedir [36]. Atmosfere

gelen bu ışımanın bir bölümü X ışınları ve ultraviyole ışınlarından oluşmakta ve atmosfer tarafından emilirken bir kısmı yansıtılmaktadır.

Ülkemiz, coğrafi konumu dolayısıyla yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Enerji Bakanlığınca hazırlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ülkemizin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat, ortalama yıllık toplam ışıınım değeri ise 1.527,46 kWh/m²'dir. Türkiye'nin güneş radyasyonu potansiyel görünümü ile aylık ortalama global radyasyon değerleri sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir [37]. Bu veriler, Türkiye'nin güneş enerjisinden yararlanma konusundaki yüksek potansiyelini ortaya koymakta ve yenilenebilir enerji stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Türkiye'nin toplam güneş radyasyon dağılımı



Şekil 3.2. Türkiye'nin aylık ortalama radyasyon değeri (kWh/m²)

Ekim 2024 sonu itibarıyla, 114.362 MW olan toplam kurulu gücümüzün 18.855 MW'ı güneş enerjisi santrallerinden oluşmakta olup, bu değer toplam kurulu gücün %16,48'ine karşılık gelmektedir. Yıllara göre güneş enerjisinin kurulu güç değerleri ile toplam kurulu güç içerisindeki payı Tablo 3.2'de sunulmaktadır [37, 38].

Tablo 3.2. Türkiye'de güneş enerjisine dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
MW	0	40	249	833	3.421	5.063	5.995	6.667	7.816	8.479	15.613	18.855
%	0	0,06	0,34	1,06	4,01	5,72	6,57	6,95	7,83	8,35	14,08	16,48

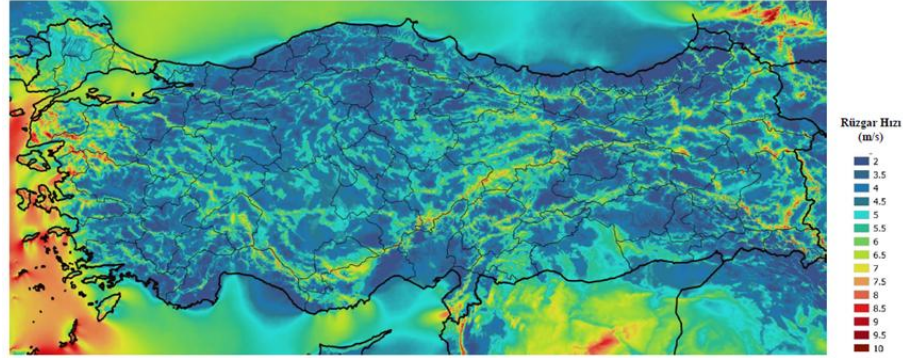
Fosil yakıtların çevreye verdiği zararları minimize etmek amacıyla ülkeler, YEK'lere geçiş süreçlerini hızlandırmıştır. Bu bağlamda, güneş enerjisinden ısı ve elektrik üretimi üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiş ve bu enerjinin kullanımı yıllar içinde önemli ölçüde yaygınlaşmıştır. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde çeşitli yöntemler mevcut olmakla birlikte, en yaygın eğilim, güneş ışığının doğrudan elektriğe dönüştürüldüğü FV sistemler üzerine yoğunlaşmaktadır. Güneş enerjisinin kullanımına yönelik çalışmalar, özellikle 1970'lerden sonra ivme kazanmış, güneş enerjisi sistemlerinde teknolojik ilerlemeler kaydedilmiş ve maliyetler önemli ölçüde azalmıştır. Çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olması ve kurulum sonrası düşük maliyetlerle işletilebilmesi, güneş enerjisinin önemini artıran başlıca faktörlerdir.

3.2. Rüzgâr Enerji

Rüzgâr, güneş kaynaklı radyasyonun yeryüzünü farklı oranlarda ısıtmasından kaynaklanır. Yeryüzünün farklı ısınması, havanın sıcaklık, nem ve basınç değerlerinin değişmesine neden olur; bu farklı basınçlar ise hava hareketini, yani rüzgârı oluşturur. Güneşten Dünya'ya gelen enerjinin yaklaşık %2'si, rüzgâr enerjisine dönüşür.

2006 yılında hazırlanan Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) verilerine göre, yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri yıllık ortalama rüzgâr hızına sahip bölgelerde 5 MW/km² gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği öngörülmüştür. Bu hesaplama göre, Türkiye'de kurulabilecek toplam rüzgâr enerji santrallerinin (RES)

47.849,44 MW kapasite değerinde olabileceği belirlenmiştir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelini gösteren harita şekil 3.3'te sunulmuştur [39].



şekil 3.3. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı (100 m)

Ekim 2024 sonu itibarıyla, RES'lerin kurulu gücü 12.369 MW'a ulaşmış ve toplam kurulu gücün %10,81'ini oluşturmuştur. Yıllara göre rüzgâr enerjisinin kurulu gücü değerleri ile toplam kurulu gücü içerisindeki payı Tablo 3.3'te sunulmaktadır [38, 39].

Tablo 3.3. Türkiye'de rüzgâr enerjisine dayalı kurulu gücü değerleri (MW) ve toplam kurulu gücü içerisindeki oranı (%)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
MW	2.760	3.630	4.503	5.751	6.516	7.005	7.591	8.403	10.607	10.976	11.697	12.369
%	4,31	5,22	6,16	7,33	7,65	7,91	8,32	9,21	10,63	10,81	10,63	10,81

3.3. Hidrolik Enerji

Hidroelektrik santrallerde (HES), su kütlesinin yerden yüksekliğine bağlı olarak sahip olduğu potansiyel enerji, önce kinetik enerjiye, ardından hidrolik türbinler aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. İnsanlık, suyun gücünden faydalanmayı çok eski zamanlardan beri sürdürmektedir. Tarih ncesi dönemlerde su değirmenleriyle kullanılan hidrolik enerji, günümüzde modern türbinler sayesinde elektrik enerjisi üretiminde etkin bir şekilde değerlendirilmektedir.

Türkiye'nin brt hidroelektrik potansiyeli 433 milyar kWh/yıl teknik değerlendirilebilir potansiyeli ise 216 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır [40].

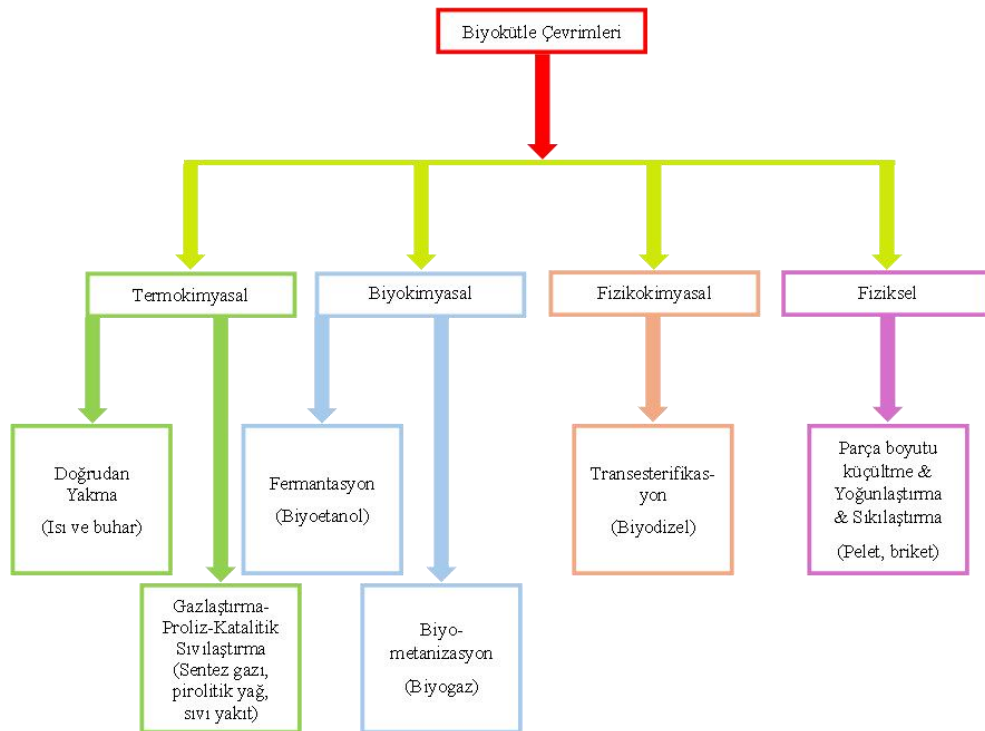
Ekim 2024 sonu itibarıyla, HES'lerin kurulu gücü 32.195 MW'a ulaşmış olup bu değer toplam kurulu gücün %28,15'ine karşılık gelmektedir. Yıllara göre HES'lerin kurulu güç değerleri ile toplam kurulu güç içerisindeki payı Tablo 3.4'te sunulmaktadır [38, 41].

Tablo 3.4. Türkiye'de hidroelektrik enerjiye dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
MW	22.289	23.643	25.868	26.681	27.273	28.291	28.503	30.984	31.493	31.558	31.780	32.195
%	35	34	35	34	32	32	31	32	32	31,09	29,8	28,15

3.4. Biyokütle Enerjisi

5346 sayılı Kanun'a göre biyokütle kavramı şu şekilde tanımlanır: İthal edilmemek koşuluyla belediye atıkları (çöp gazı dahil), atık bitkisel yağlar, gıda ya da yem olarak değerlendirilemeyen tarımsal üretimden elde edilen atıklar, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri, atık lastiklerin işlenmesiyle elde edilen yan ürünler, sanayi atık çamurları ve arıtma tesislerinden çıkan çamurlar [42]. Biyokütle kaynaklarından Şekil 3.4'te belirtilen çevrim yöntemleri uygulanarak farklı yakıt türleri üretilebilmektedir.



Şekil 3.4. Biyokütle enerji çevrim yöntemleri

Biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) verilerine göre, toplanabilir atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık olarak 3,9 MTEP/yıl'dır [42].

Ekim 2024 sonu itibariyle Türkiye'nin biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu güç değeri 2.109 MW olup, bu değer toplam kurulu gücün %1,84'ünü oluşturmaktadır. Yıllara göre kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı Tablo 3.5'te gösterilmektedir [38, 42].

Tablo 3.5. Türkiye'de biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
MW	224	288	362	489	634	811	1.163	1.485	2.035	2.172	2.420	2.430
%	0,35	0,41	0,50	0,62	0,74	0,92	1,27	1,55	2,04	2,14	2,21	2,12

3.5. Jeotermal Enerji

Yerin merkezinde bulunan magma katmanı nedeniyle, derinlere inildikçe sıcaklık her kilometrede yaklaşık 30-35 derece artmaktadır. Magma katmanının sokulum yaparak yeryüzüne yaklaştığı bölgelerde bu sıcaklık artışı daha da fazla olmaktadır. Jeotermal enerjinin temel kaynağı olan bu ısı enerjisi sayesinde, yeraltına ilerleyen yağmur suları sıcak suya veya kuru buhara dönüşür. Daha sonra uygun çatlaklar aracılığıyla veya sondaj çalışmaları yardımıyla tekrar yeryüzüne çıkan bu akışkanlar, jeotermal kaynak olarak adlandırılır.

Türkiye'nin jeotermal enerjiye dayalı kurulu güç değeri 2024 Ekim ayı itibariyle 1.691 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %1,47'dir. Türkiye'nin 2013-2024 yılları arası jeotermal enerjisi kurulu güç değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir [38, 43].

Tablo 3.6. Türkiye'de jeotermal enerjiye dayalı kurulu güç değerleri (MW) ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı (%)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
MW	311	405	624	821	1.064	1.283	1.515	1.613	1.676	1.686	1.691	1.691
%	0,49	0,58	0,85	1,05	1,25	1,45	1,66	1,68	1,68	1,66	1,54	1,47

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. HOMER Pro Yazılımı

HOMER Pro, Amerika Birleşik Devletleri'nde Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory, NREL) tarafından geliştirilen bir programdır. Bu yazılım, şebekeye bağlı veya izole hibrit enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için kullanıcıya kolay bir arayüz sunar. HOMER Pro, FV paneller, RES'ler, FC'ler, HES'ler, biyokütle güç kaynakları, rejeneratif jeneratörler, BDS'ler ve HT'ler gibi enerji depolama ünitelerini ve yükleri birlikte modelleme yeteneğine sahiptir [44]. HOMER Pro, girilen elektrik yük verileri, meteorolojik veriler ve kullanılacak sistem ekipmanlarının birim maliyet fiyatları gibi faktörleri kullanarak, farklı konfigürasyonları uygunluk sırasına göre sınıflandırır. Program aynı zamanda simülasyon, optimizasyon ve hassaslık analizi yapmak için kullanıcıya kolaylık sağlar. Bakım-onarım ve yenileme işlemleri gibi teknik ve ekonomik faktörleri göz önünde bulundurarak en iyi sistemi belirleme sürecini destekler. Bu yazılım, enerji sistemlerinin karmaşıklığına rağmen kullanıcıya kolaylık ve etkinlik sağlayarak tasarım sürecini optimize etmeye yardımcı olur [45].

4.2. Sistem Bileşenlerinin Matematiksel Modelleri

Bu bölümde, HOMER Pro yazılımında tasarlanan hibrit mikro şebekenin her bir bileşeninin uygulanmasına ilişkin açıklamalar ve matematiksel modeller sunulmaktadır.

4.2.1. FV'nin Modellenmesi

HOMER Pro yazılımı, FV dizisinin güç çıkışını Denklem 4.1'e göre hesaplamaktadır [46]. Bu bölümde sunulan FV sistem denklemlerindeki parametreler ve anlamları Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. FV sistem denklemlerindeki semboller

Sembol	Temsil ettiği ifade
P_{FV}	FV dizisinin çıkış gücü (W)
F_{fv}	FV'nin derecelendirme faktörü (%)
Y_{fv}	FV dizisinin nominal gücü (kW)
$G_{T,STC}$	Standart test koşullarındaki güneş ışıınımı (kW/m ²)
G_T	FV dizisine ulaşan mevcut güneş ışıınımı (kW/m ²)
α_p	Güç sıcaklık katsayısı (% / °C)
$T_{C,STC}$	Standart test koşullarındaki FV hücre sıcaklığı (25 °C)
T_C	FV hücre sıcaklığı (°C)
$T_{a,NOCT}$	Nominal çalışma hücre sıcaklığındaki ortam sıcaklığı (20 °C)
$T_{C,NOCT}$	Nominal çalışma hücre sıcaklığı (°C)
T_a	Ortam sıcaklığı (°C)
$G_{T,NOCT}$	Nominal çalışma hücre sıcaklığındaki güneş radyasyonu (0.8 kW/m ²)
τ	FV dizisinin üzerindeki her türlü kaplamanın güneş radyasyonu geçirgenliği (%)
$\eta_{mp,STC}$	Standart test koşullarındaki maksimum güç noktası verimliliği (%)
α	FV dizisinin güneş emme oranı (%)
$H_{0,avr}$	Ekstra atmosferik yatay radyasyon (kWh/m ² -gün)
H_{avr}	Dünya yüzeyindeki ortalama aylık güneş radyasyonu (kWh/m ² -gün)
K_T	Açıklık indeksi

Nominal kapasite (y_{fv}), FV modülünün alanını ve verimliliğini içerir. Zayıflama faktörü (f_{fv}), panel üzerindeki toz ve kablo kayıpları gibi standart koşullar altındaki beklenen çıkıştaki sapmaları düzelterek hesaba katar.

$$P_{FV} = y_{fv} * f_{fv} * \frac{G_T}{G_{T,STC}} * [1 + \alpha_p * (T_C - T_{C,STC})] \quad (4.1)$$

HOMER Pro yazılımı, FV hücre sıcaklığını (T_C) her zaman adımımda Denklem 4.2'ye göre dinamik olarak hesaplar ve FV dizisinin güç çıkışını belirlemede kullanır.

$$T_C = \frac{T_a + (T_{C,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right] \left[1 - \frac{\eta_{mp,STC}(1 - \alpha_p T_{C,STC})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (T_{C,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right] \left[\frac{\alpha_p \eta_{mp,STC}}{\tau \alpha} \right]} \quad (4.2)$$

Ortalama radyasyon değeri, yılın ayı ve enlem bilgileri temel alınarak HOMER Pro tarafından hesaplanan açıklık indeksi, atmosferin üst kısmına çarpan ve atmosferden geçerek dünya yüzeyine çarpan güneş ışınımının oranını gösteren, 0 ile 1 arasında boyutsuz bir sayıdır. Denklem 4.3, aylık ortalama açıklık indeksini tanımlar.

$$K_T = \frac{H_{avr}}{H_{0,avr}} \quad (4.3)$$

4.2.2. Elektrolizörün Modellenmesi

Elektrolizör, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretmek için elektrik enerjisi tüketen bir cihazdır. HOMER Pro yazılımında, kullanıcı elektrolizörün boyutunu yani maksimum elektrik giriş değerini bir karar değişkeni olarak belirler. Aynı zamanda kullanıcı elektrolizörün alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) güç mü tükettiğini ve bu gücün hidrojene dönüştürme verimliliğini belirtmesi gerekir. HOMER Pro yazılımı, elektrolizör verimliliğini üretilen hidrojenin enerji içeriğini (yüksek ısı değeri temel alınarak) tüketilen elektrik miktarına bölerek tanımlar.

Nominal koşullar altında suyun elektrolizi için 1.23 V gerilim yeterli olmakla beraber genellikle 2 V uygulanmaktadır [47]. Suya elektrik uygulandığında anotta oksijen, katotta ise hidrojen birikmeye başlar. Denklem 4.4'te görüldüğü gibi, hidrojenin hacmi oksijenin hacminin iki katı olacaktır.



4.2.3. HT'nin Modellenmesi

HT, elektrolizör tarafından üretilen hidrojeni daha sonra hidrojenle çalışan bir jeneratörde veya yakıt hücresinde kullanmak üzere depolar. HOMER Pro yazılımı ile modellenen sistemde tankın boyutu, kilogram cinsinden depolayabileceği hidrojenin kütlesi olarak ifade edilir.

Bir metreküp hidrojen üretimi için yaklaşık 3,9-4,5 kWh arası enerji tüketilmektedir [47]. Sistemde seçilen elektrolizin gücüne göre saatte yaklaşık kaç m³ hidrojen üretebileceği

hesaplanır. Daha sonra 1 kg hidrojenin 11,737 m³ olduğu göz önüne alınarak saatte yaklaşık bir kilo kadar hidrojen üretileceği hesaplanır. Tüm bu değerler dikkate alınarak tasarlanan sistem için HT'nin boyutu belirlenir.

4.2.4. FC'nin Modellenmesi

FC, hidrojen gazını yakıt olarak kullanarak doğrudan elektriğe dönüştüren bir sistemdir. Bu dönüşüm sırasında su ve ısı açığa çıkar. Hidrojen anot kutbuna, oksijen veya hava ise katot kutbuna beslenmektedir. Anot bölgesinde hidrojen molekülleri bir katalizör yardımıyla protonlar ve elektronlar şeklinde ayrılır (Denklem 4.5). Protonlar bir membran aracılığıyla geçerken, elektronlar dış bir devre üzerinden akarak elektrik enerjisini üretir. Protonlar katot bölgesinde oksijenle birleşerek su oluşumuna neden olur. Katot elektrodunda, oksijen, elektronlar ve iyonlarla reaksiyona girerek su üretir. Bu durum Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 ile gösterilmektedir [48].



HOMER Pro yazılımında, kullanıcı yakıt hücresinin boyutunu, yani maksimum elektrik üretimini bir karar değişkeni olarak tanımlar.

4.2.5. BDS'nin Modellenmesi

Hibrit sistemlerde, üretilen enerji miktarı anlık yük talebini aştığında, fazla enerji BDS'lerde depolanır. Talep edilen miktar, üretilen miktarı aştığı zaman ise bataryalarda depolanan enerji kullanılmaya başlanır. HOMER Pro, her bir zaman adımında depolama bankası tarafından absorbe edilecek veya depodan çekilebilecek enerji miktarını belirlemek için Kinetik Pil Modelini kullanır. İki tanklı depolama modelinde ilk tank DC elektriğe dönüşüm için hazır olan mevcut enerjiyi, ikinci tank ise kimyasal olarak bağlı olan ve bu nedenle hemen geri çekilmesi mümkün olmayan enerjiyi içermektedir.

HOMER Pro, şarj veya deşarj gücünü belirlemek için Denklem 4.8 ve Denklem 4.9'u kullanmaktadır. Ardından, şarj süresinin sonunda meydana gelen kullanılabilir ve bağlı enerji miktarını hesaplamak için Denklem 4.10 ve Denklem 4.11'i kullanır [46]. Bu denklemlerde kullanılan parametrelerin karşılıkları Tablo 4.2'de sunulmuştur.

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

$$P_{disch} = \frac{-k \cdot c \cdot Q_{max} + k \cdot Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})} \quad (4.9)$$

$$Q_{1,end} = Q_1 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(Q \cdot k \cdot c - P) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} + \frac{P \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k} \quad (4.10)$$

$$Q_{2,end} = Q_2 \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + Q(1 - c)(1 - e^{-k \cdot \Delta t}) + \frac{P \cdot (1 - c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k} \quad (4.11)$$

Tablo 4.2. BDS denklemlerindeki semboller

Sembol	Temsil ettiği ifade
P_{ch}	İki tanklı sistemin maksimum güç emme kapasitesi
P_{disch}	Depolama bankasının maksimum güç boşaltma kapasitesi
$Q_{1,end}$	Zaman adımının sonunda kalan enerji (kWh)
$Q_{2,end}$	Bağlı enerji miktarı (zaman adımının sonunda) (kWh)
Q_1	Zaman adımının başlangıcındaki mevcut enerji (kWh)
Q_2	Zaman adımının başlangıcındaki bağlı enerji (kWh)
Q_{max}	Depolama bankasının toplam kapasitesi (kWh)
Q	Zaman adımının başlangıcındaki depolamadaki toplam enerji (kWh)
k	Oran sabiti (iki tank arasındaki iletkenlik)
c	Kapasite oranı (mevcut enerji tankının boyutunun, her iki tankın toplam boyutuna oranı)
Δt	Zaman adımının uzunluğu (saat)

4.2.6. Dönüştürücünün Modellenmesi

Hem AC hem de DC bileşenler içeren sistemlerde dönüştürücülere ihtiyaç duyulur. Hibrit güç sistemlerinde, FV gibi sistemlerin ürettiği veya depolanmış DC gücü AC güce dönüştüren ya da DG, BG ve RT gibi bileşenler tarafından üretilen AC gücü depolamak amacıyla DC güce çeviren dönüştürücüler kullanılmaktadır.

HOMER Pro yazılımında dönüştürücü penceresi, dönüştürücü maliyetlerinin tanımlanmasına ve invertör ile doğrultucu parametrelerinin belirtilmesine olanak tanır. Maliyetler kutusu, dönüştürücünün ilk sermaye maliyetini, değiştirme maliyetini ve yıllık işletme ile bakım maliyetlerini içermektedir.

İnverterin nominal kapasitesi kW cinsinden girilir veya HOMER Pro yazılımı tarafından sistem optimizasyon sürecinde değerlendirilmesi için birden fazla değer tanımlanır. Eğer dönüştürücüsüz sistemlerin dikkate alınması istenirse, kapasite değeri sıfır olarak girilir. Doğrultucunun kapasitesi, invertöre göre "Göreceli Kapasite" parametresi aracılığıyla orantılı şekilde boyutlandırılır. Optimizasyon aracı etkinleştirildiğinde ise en uygun kapasite HOMER Pro yazılımı tarafından otomatik olarak belirlenir [46].

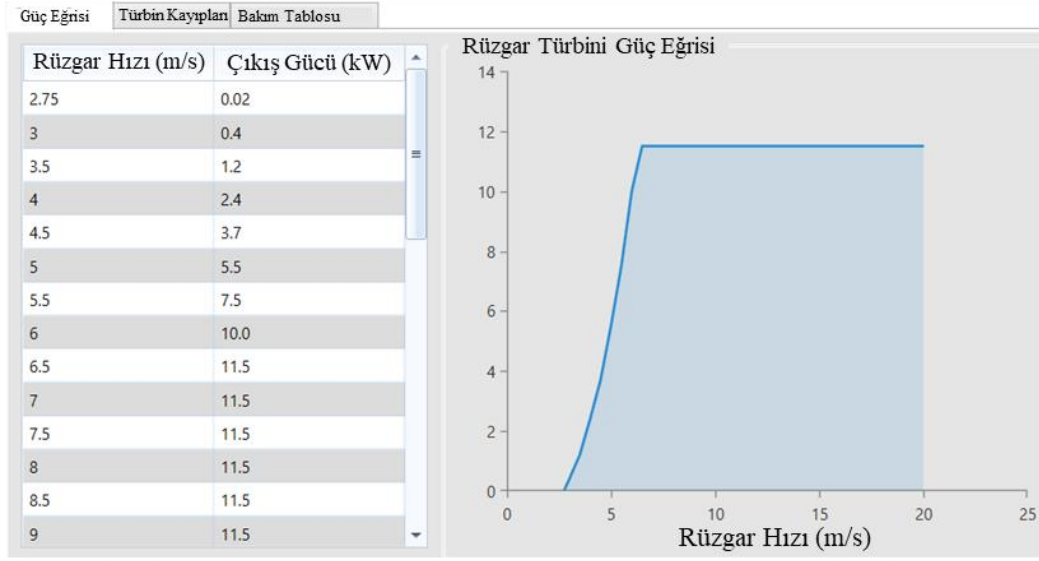
4.2.7. RT'nin Modellenmesi

HOMER Pro yazılımı, her zaman adımında RT'nin güç çıkışını üç aşamada hesaplamaktadır. İlk aşamada RT'nin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızı hesaplanır. Bu hesaplama için kullanıcının seçimine bağlı olarak iki farklı denklem kullanılır (Denklem 4.12 ve Denklem 4.13). RT'ye ait denklemlerde kullanılan parametrelerin karşılıkları Tablo 4.3'te sunulmuştur.

$$U_{hub} = U_{anem} \left(\frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right)^{\alpha} \quad (4.12)$$

$$U_{hub} = U_{anem} \frac{\ln\left(\frac{Z_{hub}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{anem}}{Z_0}\right)} \quad (4.13)$$

Rüzgâr hızını göbek yüksekliğinde hesapladıktan sonra, HOMER Pro ikinci aşamaya geçer ve hesaplanan hızda üretilen güç değerini belirlemek için RT'nin güç eğrisine başvurur (Şekil 4.1) [46].



Şekil 4.1. Eocycle EO10 model rüzgâr türbinine ait güç eğrisi

Tablo 4.3. RT denklemlerindeki semboller

Sembol	Temsil ettiği ifade
U_{anem}	Anemometre yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
U_{hub}	RT'nin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
Z_{anem}	Anemometre yüksekliği (m)
Z_{hub}	RT'nin göbek yüksekliği (m)
P_{RTG}	RT güç çıkışı (kW)
Z_0	Yüzey pürüzlülük uzunluğu (m)
ρ_0	Standart sıcaklık ve basınçta hava yoğunluğu (1.225 kg/m ³)
$P_{RTG,STP}$	Standart sıcaklık ve basınç altında RT güç çıkışı (kW)
ρ	Gerçek hava yoğunluğu (kg/m ³)

Güç eğrileri türbinin standart sıcaklık ve basınç koşulları altındaki performansını gösterir. Gerçek koşullarda değeri elde etmek için, HOMER Pro yazılımı üçüncü aşamada güç eğrisinden elde edilen güç değerini hava yoğunluğu oranı ile çarpar ve bu hesaplama için Denklem 4.14'ü kullanır.

$$P_{RTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot P_{RTG,STP} \quad (4.14)$$

4.2.8. BG'nin Modellenmesi

HOMER Pro yazılımında BG'ler yakıt kaynağı, kapasite, verimlilik ve maliyet gibi temel parametreler üzerinden modellenir. Biyogaz kaynağı olarak tarımsal atıklar, hayvansal gübre, gıda atıkları veya organik maddeler kullanılabilir ve üretim miktarı yazılıma girilir. Program, biyogaz üretim potansiyelini ve mevsimsel değişimleri analiz ederek sistemin kapasite gereksinimlerini belirler. BG'ler, generatörün maksimum üretim gücü ve minimum biyogaz miktarı gibi teknik parametrelere göre sabit kapasitede çalışır.

Yakıt tüketimi, çalışma ömrü ve bakım maliyetleri gibi faktörler ekonomik analiz yapılırken dikkate alınır. HOMER Pro yazılımı, üretim potansiyelini ve maliyet etkinliğini değerlendirmek için bu verileri kullanır. Yazılım, yıllık enerji üretimi ve yakıt tüketimi gibi teknik sonuçlar sunar. Bu sonuçlarla enerji üretiminin yıl boyunca nasıl değiştiği analiz edilebilir. Ayrıca, yatırım maliyeti, bakım giderleri ve enerji üretim maliyeti gibi ekonomik veriler sağlanır. Bu analizlerle BGG'nin teknik performansı ve finansal fizibilitesi değerlendirilir [38].

BG'nin çıkış gücü değeri Denklem 4.15 kullanılarak belirlenmektedir. [49,50]

$$P_{BG} = \frac{B \cdot Q_{LHV} \cdot \eta \cdot \eta_{gaz}}{3600} \quad (4.15)$$

Burada, B tüketilen biyokütle miktarını kilogram cinsinden temsil eder. Q_{LHV} biyogazın düşük ısı değerini kJ/m³ cinsinden ifade etmektedir. η BG'nin verimliliğini temsil ederken, η_{gaz} ise gazlaştırıcının gazlaştırma verimliliğini belirtir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, farklı amaçlara yönelik şebekeden bağımsız iki farklı hibrit mikro şebeke tasarımı HOMER Pro yazılımı kullanılarak, gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamalar şunlardır:

Birinci uygulamada kırsal bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak Bingöl ili Solhan İlçesine bağlı Yiğit Harman Köyünün sahip olduğu YEK'ler kullanılarak CHP sistemi içeren bir mikro şebeke tasarlanmıştır.

İkinci uygulamada ise Diyarbakır ilinin şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılan fosil yakıtlı araçların EA'lara dönüştürülmesi halinde, bu araçların enerji ihtiyacını karşılayacak YEK tabanlı bir mikro şebeke tasarlanmıştır.

Her iki uygulama da HOMER Pro yazılımı ile tasarlanarak teknik, ekonomik ve çevresel yönden analiz edilmiştir.

5.1. Uygulama-I: Kırsal Alanlar İçin Hibrit Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Tekno-Ekonomik Analizi: Bingöl Örneği

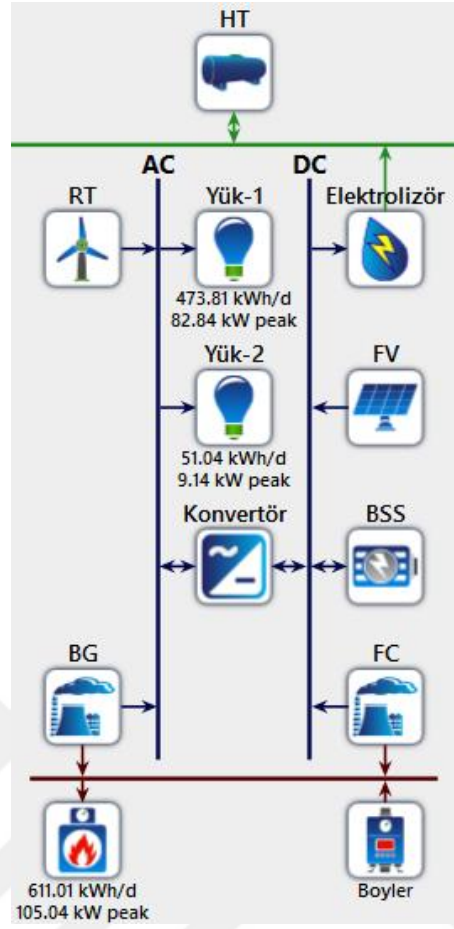
5.1.1. Sistem Tasarımı

Bu çalışmada lokasyonu Şekil 5.1'de gösterilen Bingöl il merkezine 61 km, Solhan ilçesine ise 15 km uzaklıkta olan 1052 nüfuslu Yiğit Harman Köyünün [51] enerji ihtiyacını karşılamak için mikro şebeke modellenmiştir.



Şekil 5.1. Yiğit Harman Köyünün konumu

Şekil 5.2’de gösterilen modelde, biyokütle, rüzgâr, güneş, hidrojen enerji kaynakları ile yakıt pili, depolama sistemleri ve boyler kullanılmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak farklı senaryolar için analizler gerçekleştirilmiştir. Önerilen enerji yönetimi modeli sayesinde yüklerin enerji gereksinimleri en verimli ve ekonomik şekilde karşılanmıştır. FV sistem ve yakıt hücresi tarafından üretilen DC enerji bir invertör aracılığıyla AC’ye dönüştürülerek baralar beslenir. Ayrıca, bu sistemler tarafından üretilen enerjinin bir kısmı, akülerde depolanır ve ihtiyaç duyulduğunda yine invertör vasıtasıyla dönüştürülerek AC baralarına yönlendirilir. Rüzgâr ve biyokütle kaynaklardan üretilen AC enerji ise doğrudan AC baralara aktarılmaktadır. Sistemin ürettiği fazla enerji, elektrolizör yardımcı ile hidrojen üretiminde kullanılmaktadır. Bir tankta depolanan hidrojen, ihtiyaç anında yakıt pilleri yardımıyla elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Hibrit sistemlerin tasarlanmasında fizibilite analizlerinin en iyi şekilde gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. HOMER Pro yazılımı teknik, ekonomik ve çevresel açıdan yaptığı değerlendirmelerle en uygun şekilde bütünleşmiş olan sistemi, simülasyon sonucu olarak göstermektedir [52].



Şekil 5.2. Önerilen mikro şebekenin konfigürasyonu

5.1.2. Sistemde Kullanılan Veriler

Farklı depolama sistemlerini YEK'ler ile birleştiren hibrit bir sistemin boyutlandırılmasında ilk kritik parametre, enerjinin sağlanacağı bölgenin günlük yük dağılım verisidir. Ayrıca bölgeye ait güneş ışınımı, rüzgâr hızı, sıcaklık gibi meteorolojik veriler ile hidrolik ve biyokütle gibi kaynak verileri de sistemde kullanılacak bileşenlerin seçiminde hayati öneme sahiptir.

5.1.2.1. Elektrik Yüğü Verileri

Bingöl ilinde elektrik dağıtımından sorumlu Fırat Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi'nden alınan Yiğit Harman Köyü'ne ait 2023 aylık tüketim verileri özeti Tablo 5.1'de sunulmaktadır. Dağıtım Şirketi, köyün aydınlatması için enerji tüketimini (Yük-2) ve

tüketilen toplam enerjiyi (Yük-1) kaydetmiştir. Her grubun aylık tüketim değerleri o aydaki gün sayısına bölünerek o grubun günlük tüketim ortalaması hesaplandı. Günlük tüketim ortalama değerleri 24'e bölünerek saatlik tüketim ortalama değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. Yiğit Harman Köyü'nün aylık enerji tüketim değerleri

	Toplam Tüketim (kWh)	Yük-1 Toplam Tüketimi (kWh)	Yük-2 Toplam Tüketimi (kWh)	Yük-1 Günlük Ortalama Tüketimi (kWh)	Yük-1 Saatlik Ortalama Tüketimi (kWh)	Yük-2 Günlük Ortalama Tüketimi (kWh)	Yük-2 Saatlik Ortalama Tüketimi (kWh)
Ocak	8.649	6.363	2.286	205	9	74	3
Şubat	7.476	5.759	1.717	206	9	61	3
Mart	12.284	10.493	1.791	338	14	58	2
Nisan	16.773	15.393	1.380	513	21	46	2
Mayıs	18.813	17.514	1.299	565	24	42	2
Haziran	17.424	16.262	1.162	542	23	39	2
Temmuz	19.978	19.203	775	619	26	25	1
Ağustos	25.156	23.764	1.392	767	32	45	2
Eylül	17.352	15.852	1.500	528	22	50	2
Ekim	17.391	15.732	1.659	507	21	54	2
Kasım	15.953	14.228	1.725	474	20	57	2
Aralık	14.332	12.418	1.914	401	17	62	3

Dağıtım Şirketinin iki ayrı tüketim grubu kaydına göre bölgenin toplam yükü iki farklı yük olarak modellenmiştir. Şekil 5.2'deki sistem konfigürasyonunda Yük-1 olarak tanımlanan ilk yük, bölgedeki tüm konutların toplam tüketimine karşılık gelmektedir. Bölgedeki sokak aydınlatması tüketimi Yük-2 olarak temsil edilmektedir. Her iki yük için de dağıtım şirketinden alınan gerçek veriler HOMER Pro yazılımına girilmiştir.

Girilen verilere göre HOMER Pro yazılımı tarafından Yük-1 ve Yük-2 için oluşturulan elektriksel yük profilleri sırasıyla Şekil 5.3 ve 5.4'te gösterilmektedir. Şekillerdeki verilerden de anlaşılacağı üzere birinci yük grubundaki tüketim mevsimsel olarak en yüksek değerlerine yaz aylarında ulaşmaktadır. Ancak ikinci yük grubunda yaz aylarında gündüz saatlerinin uzaması nedeniyle tüketim minimum değerlere düşmektedir.



Şekil 5.3. Yük-1 için elektriksel yük verileri



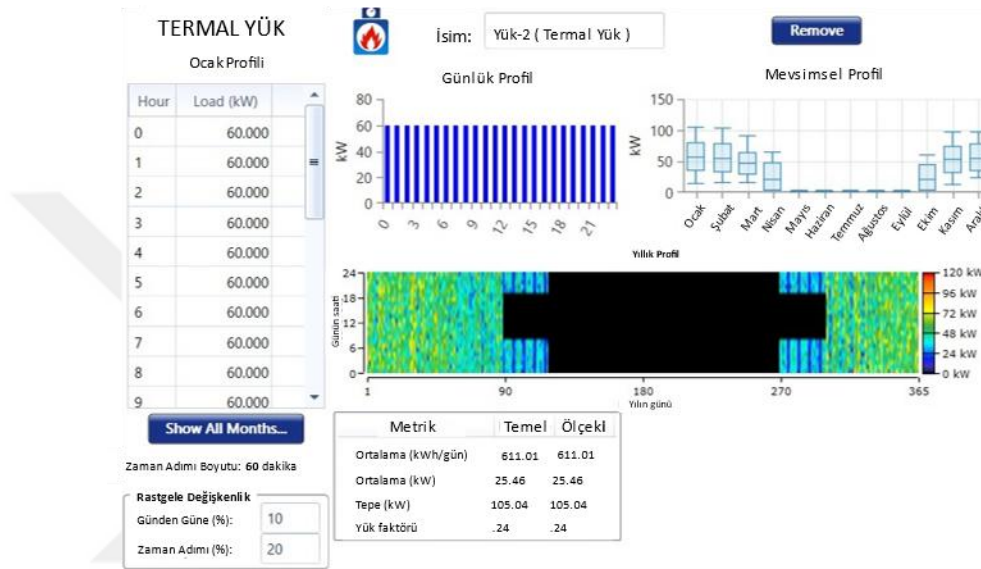
Şekil 5.4. Yük-2 için elektriksel yük verileri

5.1.2.2. Termal Yük Verileri

Bingöl ili sert karasal iklime sahip olduğundan, yılın yaklaşık yedi ayında ısıtma sistemlerine (radyatörler veya sobalar) ihtiyaç duyulmaktadır. Buna göre Yiğit Harman

köyü için HOMER Pro yazılımında oluşturulan termal yük eğrileri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Şekilde de görüldüğü gibi Kasım-Mart aylarında tam gün termal yük talebi söz konusu iken Nisan ile Ekim aylarında sadece akşam saatlerinde termal yük talebi girilmiştir. Diğer aylarda ise termal yük değeri sıfır olarak belirlenmiştir.



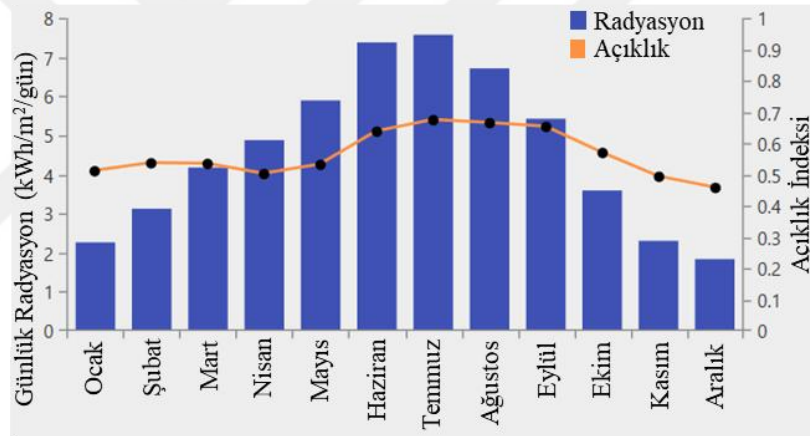
Şekil 5.5. Yiğit Harman Köyü için termal yük verileri

5.1.2.3. Bölgenin Güneş Radyasyonu Verileri

HOMER Pro yazılımı, girilen coğrafi konum için meteorolojik verileri NASA'nın Yüzey Meteorolojisi ve Güneş Enerjisi veri tabanından almaktadır. Karşılaştırma yapmak için, Türkiye ve Yiğit Harman Köyü için aylık güneş radyasyonu verileri Tablo 5.2'de sunulmuştur. Şekil 5.6'da, HOMER Pro tarafından NASA'dan elde edilen Yiğit Harman Köyü için güneş radyasyonunun açıklık indeksi ile değişimi gösterilmektedir. Tablo 5.2'de de görüldüğü gibi, Yiğit Harman Köyü için günlük güneş radyasyonu değeri, Türkiye ortalamasından önemli ölçüde daha yüksektir. Başka bir deyişle, seçilen bölge FV sistemleri için oldukça avantajlıdır.

Tablo 5.2. Yiğit Harman Köyü ve Türkiye'nin günlük küresel radyasyon değerleri

	Yeni Harman için Günlük Radyasyon (kWh/m ² /gün)	Türkiye için Günlük Radyasyon (kWh/m ² /gün) [53]
Ocak	2,25	1,79
Şubat	4,17	2,50
Mart	4,89	3,87
Nisan	5,88	4,93
Mayıs	7,38	6,14
Haziran	7,59	6,57
Temmuz	6,72	6,50
Ağustos	5,43	5,81
Eylül	3,58	4,81
Ekim	2,30	3,46
Kasım	1,82	2,14
Aralık	4,17	1,59



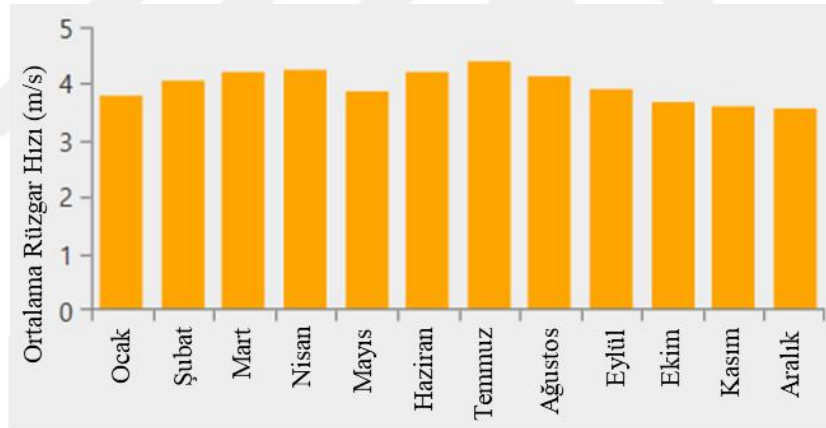
Şekil 5.6. Yiğit Harman Köyü için günlük güneş radyasyonu ve açıklık indeksi

5.1.2.4. Bölgenin Rüzgâr Hızı Verileri

Yeni Harman Köyü'nün HOMER Pro yazılımı tarafından NASA veri tabanından alınan ve yerden 50 m yükseklikteki 30 yıllık (Ocak 1984-Aralık 2013) aylık ortalama rüzgâr hızı verileri Tablo 5.3'te verilmiştir. Bu veriler Şekil 5.7'de grafiksel olarak gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Yiğit Harman Köyüne ait ortalama rüzgâr hızı değerleri

	Yeni Harman için Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
Ocak	3,800
Şubat	4,040
Mart	4,200
Nisan	4,230
Mayıs	3,860
Haziran	4,200
Temmuz	4,400
Ağustos	4,140
Eylül	3,900
Ekim	3,680
Kasım	3,590
Aralık	3,570



Şekil 5.7. Yeni Harman Köyü için rüzgâr hızı grafiği

5.1.2.5. Bölgenin Biyokütle Kaynakları

Bingöl ilinde hayvancılık faaliyetleri çoğunlukla küçükbaş hayvan yetiştiriciliğine yöneliktir. 2021 yılı verilerine göre Bingöl ilinde 521.512 koyun, 174.619 keçi ve 132.307 baş sığır bulunmaktadır [54].

Tablo 5.4'te, büyükbaş ve küçükbaş hayvanlardan elde edilebilen ortalama günlük atık miktarları gösterilmektedir. Tablodan görülebileceği gibi, büyükbaşlarda günlük olarak 10-20 kg ıslak atık elde edilebilirken küçükbaşlarda bu miktar yaklaşık olarak 2 kg/gün olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Hayvan türlerine göre atık miktarı [55].

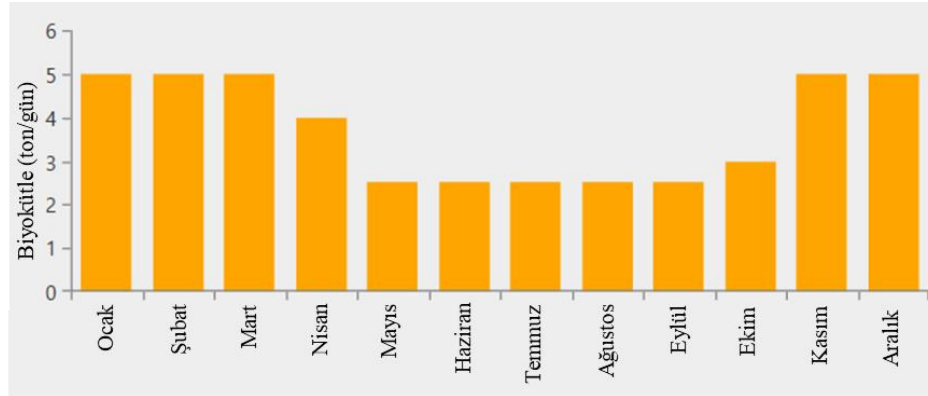
Hayvan Irkı	Canlı Ağırlık (kg)	Atık Miktarı	
		Ağırlık Yüzdesi	kg/gün
Büyükbaş	135-800	5-6	10-20
Küçükbaş	30-75	4-5	2

Bingöl İlinde meşe ormanları yaygın olduğundan zengin orman alanlarına sahip iller arasında yer almaktadır. Bingöl ilinin toplam yüzölçümü 812,537 hektar olup, bu alanın neredeyse üçte biri ormanlarla kaplıdır. Seçilen bölgenin ait olduğu Solhan ilçesinde ise toplam 28,417 hektar ormanlık alan bulunmaktadır [56].

Bölgedeki tüm biyokütle kaynakları, özellikle hayvan atıkları dikkate alındığında, HOMER Pro yazılımına girilen biyokütle verileri Tablo 5.5 ve Şekil 5.8'de sunulmuştur. Hayvanlar genellikle kış aylarında ahırlarda beslenirken yaz aylarında çayırarda ve meralarda otlamaktadır. Bu beslenme düzeni göz önünde bulundurularak, sisteme girilen biyokütle miktarı genellikle kış aylarında daha yüksek ve yaz aylarında daha düşük olarak kaydedilmektedir.

Tablo 5.5. Yiğit Harman Köyü için ortalama biyokütle değerleri

	Ocak	Şub.	Mart	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Ekim	Kas.	Ara.
Aylık Ortalama Biyokütle Verileri (ton/gün)	5	5	5	4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4	5	5



Şekil 5.8. Yiğit Harman Köyü için biyokütle grafiği

5.1.3. Optimizasyon Sonuçları

Bingöl İli Solhan İlçesine bağlı Yiğit Harman Köyü'nün termal ve elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla bölgenin mevcut kaynaklarını kullanarak bir hibrit mikro şebeke sistemi HOMER Pro yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Söz konusu yazılım, tasarlanan mikro şebeke için bileşenlerin farklı kombinasyonlarıyla birçok optimizasyon gerçekleştirir ve ekonomik olarak sıralar. Bu çalışma için elde edilen bazı optimizasyon sonuçları Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

	PV-Lexron	WT-Eocycle	BG-Generac (kW)	FC-Generac (kW)	Battery	Electrolyzer-Gen (kW)	HST (kg)	Converter	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)
	85.4	1	30.0		251			55.4	CC	\$707,931	\$0.258
	85.4	1	30.0		251	10.0		55.4	CC	\$722,668	\$0.264
	85.4	1	30.0		251		30.0	55.4	CC	\$722,931	\$0.264
	93.6		30.0		290			53.7	CC	\$729,477	\$0.267
	85.4	1	30.0	5.00	251	10.0		55.4	CC	\$734,749	\$0.269
	85.4	1	30.0		251	10.0	30.0	55.4	CC	\$737,668	\$0.270
	90.2	1	30.0	5.00	249	10.0	30.0	51.4	CC	\$739,772	\$0.271
	93.6		30.0		290	10.0		53.7	CC	\$744,214	\$0.273
	93.6		30.0		290		30.0	53.7	CC	\$744,477	\$0.273
	93.6		30.0	5.00	290	10.0		53.7	CC	\$756,294	\$0.278
	93.6		30.0		290	10.0	30.0	53.7	CC	\$759,214	\$0.279
	114		30.0	5.00	267	10.0	30.0	57.1	CC	\$760,653	\$0.280
		1	40.0		253			42.3	CC	\$887,989	\$0.331
		1	40.0		253	10.0		42.3	CC	\$902,726	\$0.337

Şekil 5.9. Optimizasyon sonuçları

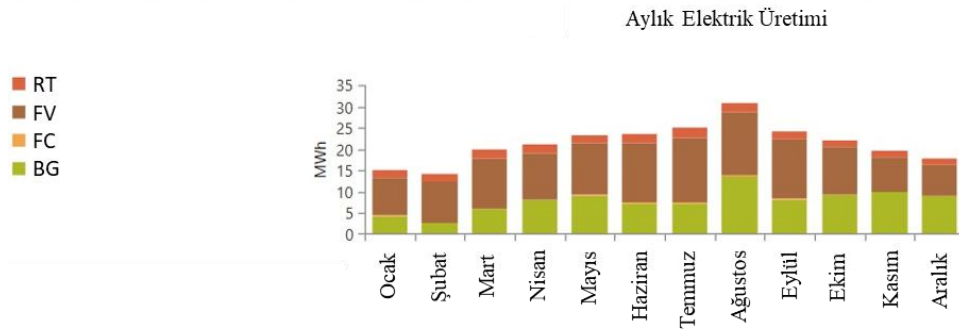
Tüm bileşenleri içeren model için sistemin maliyet değerleri Tablo 5.6'da, kaynakların üretim miktarları ve oranları ise Tablo 5.7'de sunulmuştur. Kaynaklara göre üretim grafiği Şekil 5.10'da gösterilmektedir.

Tablo 5.6. Tüm bileşenlere sahip modelde sistemin maliyet tablosu

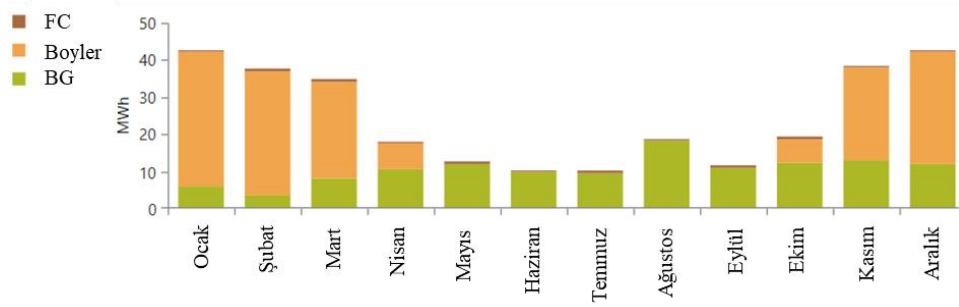
Bileşenler	Sermaye Maliyeti (\$)	Değişim Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$)	Geri Dönüşüm Maliyeti (\$)	Yakıt Maliyeti (\$)	Toplam Maliyet (\$)
FV	63.166,79	0	11.665,57	0	0	74.832,36
RT	29.000	7.970,18	646,38	4.491,71	0	33.124,85
BG	90.000	70.319,32	134.420,32	5.996,43	0	288.743,21
FC	15.000	0	328,36	2.233,88	0	13.094,48
Elektrolizör	10.000	4.242,74	1.292,75	798,53	0	14.736,96
Dönüştürücü	15.434,40	0	6.650,95	0	0	22.085,35
BDS	74.700	135.939,58	32.189,52	15.173,15	0	227.655,95
HT	15.000	0	0	0	0	15.000
Boylar	0	0	0	0	50.498,95	50.498,95
Sistem	312.301,19	218.471,83	187.193,84	28.693,69	50.498,95	739.772,11

Tablo 5.7. Tüm bileşenlere sahip modelde sistem bileşenlerinin enerji üretimindeki payları

	Bileşenler	FV	RT	BG	FC	Boiler
Elektrik Enerjisi Üretimi	Güç (kWh/yıl)	137.170	22.861	94.784	1.893	-
	Yüzde (%)	53,4	8,91	36,9	0,738	-
Isı Enerjisi Üretimi	Güç (kWh/yıl)	-	-	126.431	6.817	163.943
	Yüzde (%)	-	-	42,5	2,29	55,2



(a)



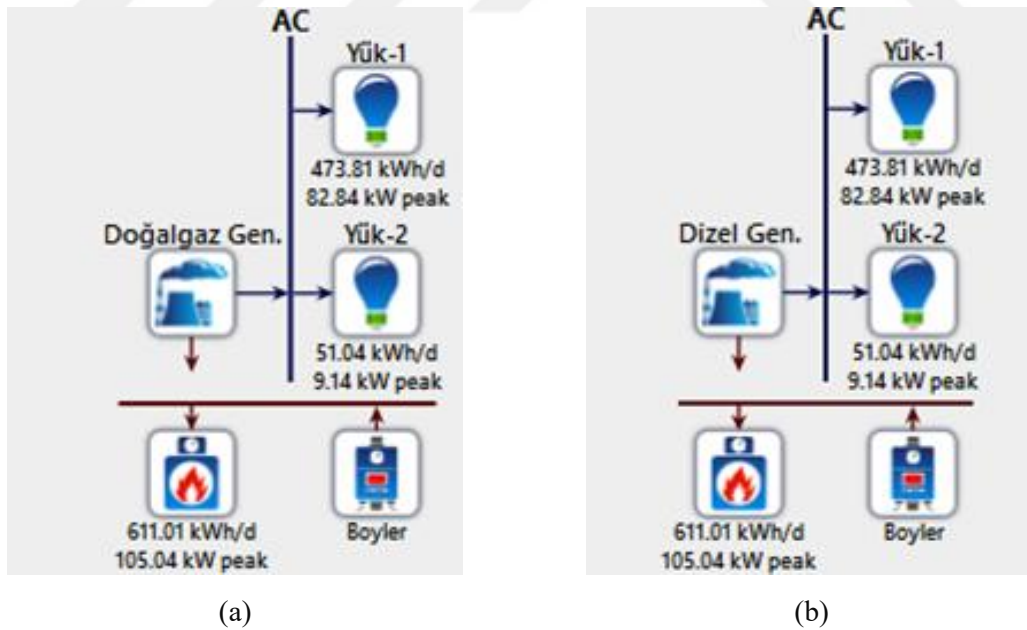
(b)

Şekil 5.10. Tüm bileşenlere sahip model için yıllık üretim dağılımı a) Elektrik enerjisi b) Isı enerjisi

Tablo 5.7’de verilen değerlere göre, elektrik enerjisinin %53,4’ü FV panellerinden, %36,9’u BG’den ve %9,91’i RT’lerden üretilmiştir. FC tarafından üretilen miktar en düşük oranla %0,738’dir. Termal enerjinin %55,2’si boylerden elde edilirken, BG ve FC’nin üretim payları sırasıyla %42,5 ve %2,29’dur. Sistemin çevresel etkilerini analiz etmek için emisyon değerlerini incelemek gerekmektedir.

Tasarlanan sistemin çevresel üstünlüğünü görmek amacıyla Şekil 5.11’de gösterildiği gibi iki ayrı simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyonlarda, aynı yükler başlangıçta yalnızca doğal gaz generatörüyle, ardından yalnızca dizel generatörüyle beslenmiştir. Her iki durum için emisyon değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tüm modeller için hesaplanan emisyon değerleri Tablo 5.8’de sunulmuştur.

Doğal gaz generatörü mevcut yükleri beslediğinde, yıllık CO₂ emisyon miktarı önerilen modele kıyasla 61 kat daha fazla olmaktadır. Bu değer dizel generatör için 117 katına çıkmaktadır. Bu sonuçlar, enerji üretimi için önerilen sistemin çevresel açıdan çok iyi bir çözüm olacağını göstermektedir.



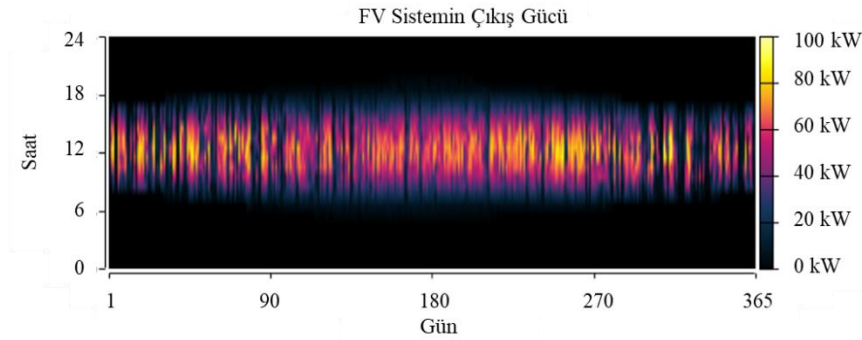
Şekil 5.11. (a) Doğal gaz generatörlü model (b) Dizel generatörlü model

Tablo 5.8. Tüm modeller için emisyon değerleri

	Önerilen Model (kg/yıl)	Doğal gaz generatörlü model (kg/yıl)	Dizel generatörlü model (kg/yıl)
CO ₂	37.958	2.330.223	4.444.353
CO	0,651	510.237	2.826
Yanmamış Hidrokarbonlar	0	0	437
Partikül Madde	0	0	488
SiO ₂	0	0	11.030
NO	0,365	102.047	24.994

5.1.3.1. FV'nin Sisteme Etkisi

FV paneller, HOMER Pro yazılımı tarafından hesaplanan hem tüm bileşenleri içeren modelde hem de en ekonomik modelde tutarlı bir performans sergilemiştir. Panellerin yıllık çıkış gücündeki değişim Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Şekilde görülebileceği gibi, paneller yaklaşık olarak sabah 6'dan akşam 6'ya kadar enerji üretmiştir. Birçok parametrenin, özellikle radyasyon miktarının değişkenliği nedeniyle, her gün sabit bir üretim sağlanamamıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, panellerin yıllık çalışma süresi 4.387 saat olup, bu süre zarfında toplamda 137.170 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. Panellerle ilgili tüm parametreler Tablo 5.9'da sunulmuştur.



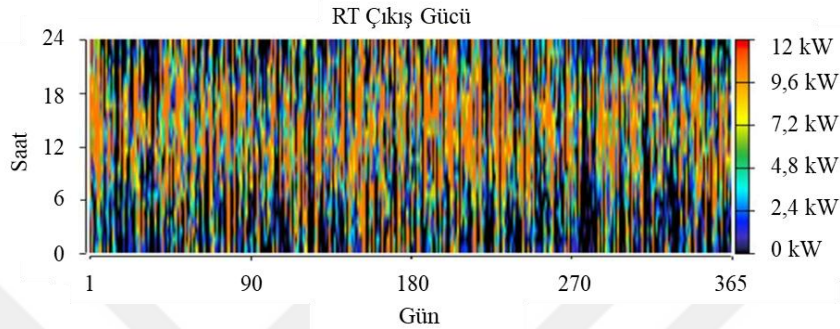
Şekil 5.12. FV panellerin yıllık çıkış gücü değişimi

Tablo 5.9. FV panel sistemlerinin değerleri

	Miktar	Birim
Nominal Kapasite	90,2	kW
Kapasite Faktörü	17,4	%
Toplam Üretim	137.170	kWh/yıl
FV Penetrasyonu	71,6	%
Çalışma Saatleri	4.387	saat/yıl
LCOE	0,0422	\$/kWh

5.1.3.2. RT'nin Sisteme Etkisi

Modelin simülasyonunda, bir rüzgâr türbini yıl boyunca 5.283 saat çalışarak 22.861 kWh enerji üretmiştir. Rüzgâr türbinlerinin çıkış gücü değişimleri Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Ayrıca, türbinle ilgili elde edilen parametreler Tablo 5.10'da sunulmuştur.



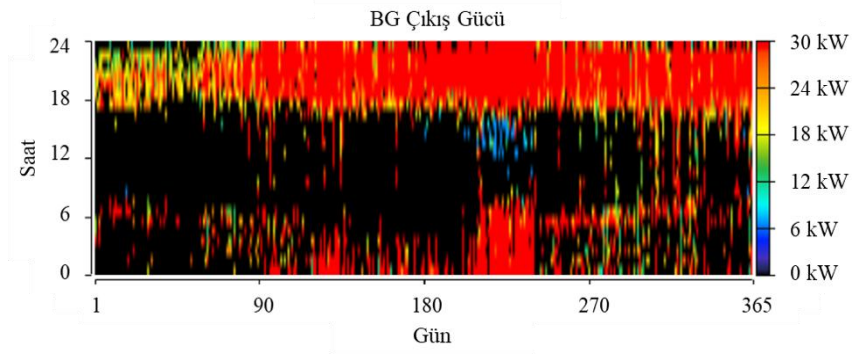
Şekil 5.13. RT'nin yıllık çıkış gücü değişimi

Tablo 5.10. RT sistemlerinin değerleri

	Miktar	Birim
Toplam Nominal Kapasite	10,0	kW
Kapasite Faktörü	26,1	%
Toplam Üretim	22.861	kWh/yıl
Rüzgâr Penetrasyonu	11,9	%
Çalışma Saatleri	5.283	hrs/yıl
LCOE	0,112	\$/kWh

5.1.3.3. BG'nin Sisteme Etkisi

BG bir yıl boyunca 3.466 saat çalışarak 94.784 (yüzde 36,9) kWh elektrik enerjisi ile 126.431 (yüzde 42,5) kWh termal enerji üretmiştir. Sistem maliyetini azaltmak amacıyla, BG'nin üretim kapasitesi artırılarak modeldeki RT'nin sayısı bir tane ile sınırlı tutulmuştur. Bu tercih, hayvan atıklarının yok edilme sürecine de katkı sağlamıştır. BG'nin her iki modeldeki güç değişimi Şekil 5.14'te gösterilmiştir; parametre değerleri ise Tablo 5.11'de sunulmuştur. Şekilde görülebileceği gibi, generatör akşam ve gece saatlerinde daha sık çalışmıştır. Diğer bir deyişle, BG, FV panellerin üretim yapmadığı dönemlerde devreye girerek yüklerin enerji taleplerini karşılamaktadır. BG'ler kesintisiz enerji sağlama konusunda önemli bir rol oynamaktadır.



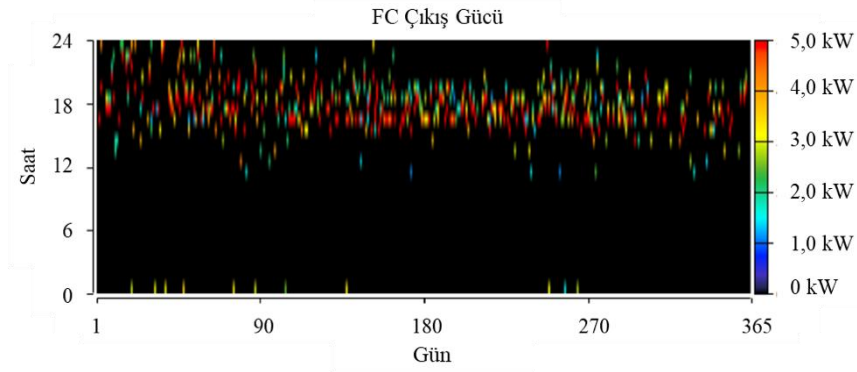
Şekil 5.14. BG'nin yıllık çıkış gücü değişimi

Tablo 5.11. BG'nin değerleri

	Miktar	Birim
Çalışma Saatleri	3.466	Saat/yıl
Sabit Üretim Maliyeti	4,88	\$/saat
Elektrik Üretimi	94.784	kWh/yıl
Isı Üretimi	126.431	kWh/yıl
Yakıt Tüketimi	286	Ton/yıl
Spesifik Yakıt Tüketimi	2,11	kg/kWh
Yakıt Enerji Girişi	305.503	kWh/yıl
Ortalama Elektrik Verimliliği	31	%

5.1.3.4. FC'nin Sisteme Etkisi

Simülasyon sonucunda elde edilen FC değerleri Tablo 5.12'de sunulmuştur. Tabloya göre, FC yıl boyunca 400 kez çalışmış ve 508 saat içinde 1.893 kWh (%0,738) elektrik enerjisi ile 6.817 kWh (%2,29) termal enerji üretmiştir. Şekil 5.15, FC'nin çıkış gücündeki değişimi göstermektedir. BG'de olduğu gibi FC de genellikle FV panellerin devrede olmadığı saatlerde çalışmakta ve bu dönemlerde enerji üretimine katkıda bulunmaktadır.



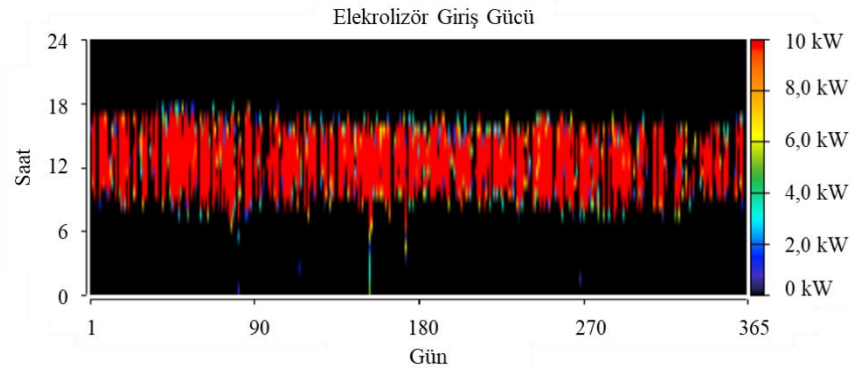
Şekil 5.15. FC'nin yıllık çıkış gücü değişimi

Tablo 5.12. FC'nin değerleri

	Miktar	Birim
Çalışma saatleri	508	Saat/yıl
Elektrik üretimi	1,893	kWh/yıl
Isı üretimi	6,817	kWh/yıl
Yakıt tüketimi	398	kg
Spesifik yakıt tüketimi	0.210	kg/kWh
Yakıt enerji girişi	13,254	kWh/yıl
Ortalama elektrik verimliliği	14.3	%

5.1.3.5. Elektrolizörün Sisteme Etkisi

FC'nin çalışma performansının yanı sıra hidrojen üretimi için kullanılan elektrolizörün performansı da önemlidir. Elektrolizör parametrelerine ilişkin simülasyon sonuçları Tablo 5.13'te sunulmuştur. Bu verilerden de açıkça görüldüğü gibi, elektrolizör yıl boyunca 4.566 saat çalışarak 398 kg hidrojen üretmiş ve bu üretim için 18.452 kWh enerji tüketmiştir. Elektrolizörün aylık enerji tüketimi Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi, elektrolizör FV panellerinin elektrik ürettiği dönemlerde hidrojen üretmiştir. Diğer bir deyişle, elektrolizörün ihtiyaç duyduğu enerji FV panelleri tarafından karşılanmaktadır.



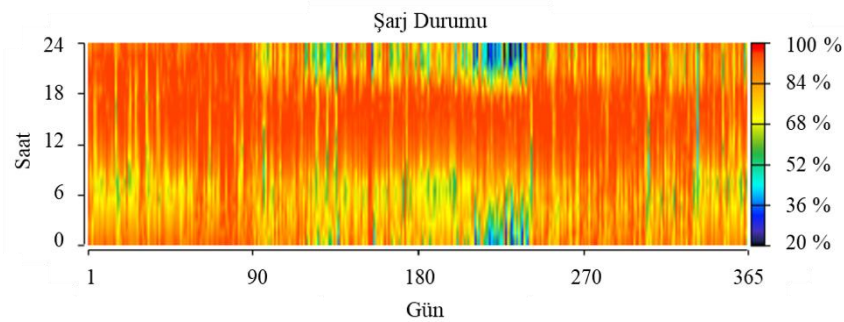
Şekil 5.16. Elektrolizörün yıllık giriş gücü değişimi

Tablo 5.13. Elektrolizörün değerleri

	Miktar	Birim
Nominal kapasite	10,0	kW
Toplam girdi enerjisi	18.452	kWh/yıl
Kapasite faktörü	21,1	%
Çalışma saatleri	4.566	Saat/yıl
Ortalama çıktı	0,0454	kg/saat
Toplam üretim	398	kg/yıl
Spesifik tüketim	46,4	kWh/kg

5.1.3.6. BDS'nin Sisteme Etkisi

Kullanılan BDS'lerin yıllık şarj seviyesi değişim grafiği Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları ise Tablo 5.14'te sunulmuştur. Kırmızı bölgelerin yoğun olduğu gündüz saatlerinde BDS'ler şarj olurken, gece saatlerinde ise yükleri beslemektedirler. 249 BDS'den oluşan sistem, bir yıl içinde 29.591 kWh enerji talebini karşılamıştır.



Şekil 5.17. BDS'lerin yıllık şarj seviyesi değişimi

Tablo 5.14. BDS'lerin değerleri

	Miktar	Birim
BDS'ler	249	Adet.
Ömür boyu toplam enerji	199.200	kWh
Beklenen ömür	6,02	Yıl
Enerji girişi	36.926	kWh/yıl
Enerji çıkışı	29.591	kWh/yıl
Depolama tükenmesi	56,5	kWh/yıl
Kayıplar	7.391	kWh/yıl
Yıllık toplam enerji	33.084	kWh/yıl

5.2. Uygulama-II: Şehir İçi Yolcu Taşımacılığında Elektrikli Araçlara Geçiş Sürecinin Teknik, Ekonomik ve Çevresel Yönlerden İncelenmesi: Diyarbakır Örneği

İkinci uygulamada şehir içi toplu taşıma araçlarının EA'lara dönüştürülmesi süreci ele alınarak bu amaca yönelik YEK tabanlı bir hibrit güç sistemi tasarlanmıştır. Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı Müdürlüğünden alınan verilere göre Diyarbakır ilinde şehir içi taşımacılıkta kullanılan 280 otobüsün 130'u dizel yakıt, 150'si sıkılaştırılmış doğal gaz (Compressed Natural Gas, CNG) tüketirken 653 minibüsün tamamı dizel yakıt ile çalışmaktadır. Bu verilerden yola çıkarak şehir içi taşımacılıkta kullanılacak toplam 1000 adet EA'nın enerji ihtiyacını karşılayabilecek ve Diyarbakır ilinin YEK kaynakları ile üretim yapabilecek bir mikro şebeke modellenerek teknik, ekonomik ve çevresel analizler gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Sistem Tasarımı

Şehir içi hatlarda güzergah uzunlukları farklılık gösterse de kısa mesafeli güzergahlarda hizmet veren araçlar, uzun mesafeli güzergahlarda çalışan araçlara göre daha fazla sefer yapacaktır. Bu nedenle, yaklaşık bir hesaplama yapabilmek amacıyla, her bir aracın günde ortalama aynı mesafeyi kat ettiği varsayılabilir. Bu uygulamada Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı Müdürlüğünden alınan bilgiler de dikkate alınarak her bir aracın ortalama 275 km yol kat ettiği varsayılmıştır. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılan araçların teknik bilgileri Tablo 5.15'te verilmiştir. Mevcut araçların yerine kullanılması önerilen EA'ların teknik özellikleri ise Tablo 5.16'da sunulmuştur.

Tablo 5.15. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında mevcutta kullanılan araçların bilgileri

	Minibüs	Belediye Otobüsü	
Araç sayısı	653	130	150
Yakıt cinsi	Dizel	Dizel	CNG
100 km’ de yaktığı yakıt	15 (lt)	27 (lt)	50 (m ³)
Günlük ortalama kat edilen mesafe (km)	275	275	275
Toplam yolcu sayısı	22	89	89

Tablo 5.16. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılması önerilen EA’ların bilgileri [57]

	Marka/Model	Motor Gücü (kWh)	Menzil (km)	Yolcu Kapasitesi	Batarya (kWh)
Minibüs	Karsan e-Jest	135	210	22	BMW Li-on 360V-88kWh
Otobüs	Karsan e-ATA 12	250	450	89	LFP - 449 kWh

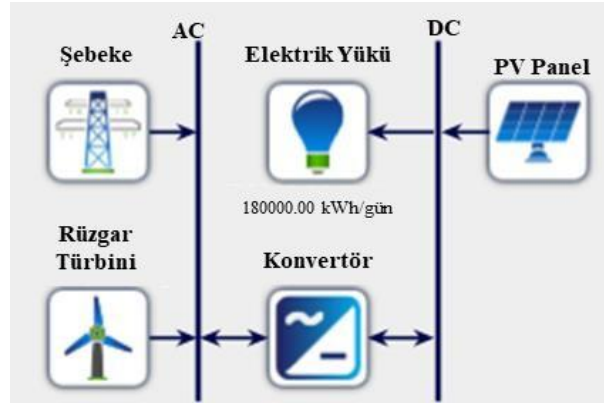
Önerilen otobüslerin batarya değeri 449 kWh, menzili ise 450 km’dir. Gün boyunca 275 km yol kat edeceği varsayıldığından her bir otobüsün günlük enerji gereksinimi 275 kWh olacaktır. Benzer şekilde minibüslerin batarya değeri 88 kWh, menzili ise 210 km olduğundan her bir minibüsün günlük enerji ihtiyacı yaklaşık 115 kWh’tir. Buna göre Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılması önerilen EA’ların toplam günlük enerji ihtiyacı Tablo 5.17’de gösterilmiştir.

Tablo 5.17. Diyarbakır İlinin şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılması önerilen EA’ların günlük enerji ihtiyacı

	Minibüs	Otobüs
Günlük kat edeceği yol (km)	275	275
Günlük şarj için gereken enerji (kWh)	115	275
Araç sayısı	653	280
Her bir araç grubu için gereken günlük enerji (kWh)	75.095	77.000
Tüm araçlar için gereken günlük enerji (kWh)	152.095	

Katalog değerleri test koşullarında elde edilen değerler olduğundan gerçek koşullardaki değerlerden bir miktar sapma göstermektedir. Bu nedenle araçlar şehir içi trafik koşullarında katalog değerlerinden daha fazla enerji tüketmektedir. Ayrıca, araç sayısındaki artışlar ve yeni yerleşim alanlarının ortaya çıkmasıyla birlikte oluşturulacak yeni güzergahlar da göz önünde bulundurularak, tasarlanan şebekenin kapasitesinin belirli bir oranda daha yüksek olması gerektiği öngörülmektedir. HOMER Pro

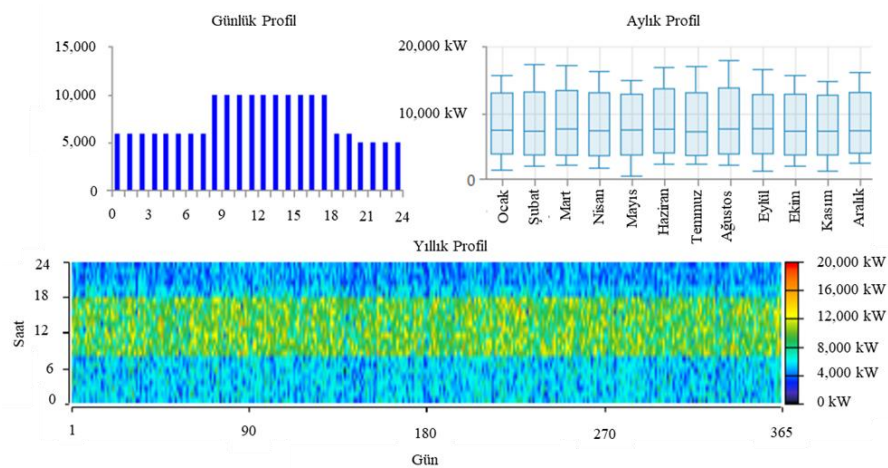
yazılımında tasarlanan ve günlük 180.000 kWh enerji sağlayacak Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. EA’lar için HOMER Pro yazılımında tasarlanan mikro şebeke modeli

5.2.2 Yük Profili

Yük profili oluşturulurken, günlük 180 MWh’lik enerji üretimini sağlayacak şekilde saatlik üretim değerleri Şekil 5.19’da gösterildiği şekilde HOMER Pro yazılımında girilmiştir. Burada, hem FV sistemlerden maksimum düzeyde yararlanabilmek hem de araçların gündüz saatlerinde daha yoğun çalışacak olmaları nedeniyle yük profilinde gündüz saatlerine ağırlık verilmiştir.



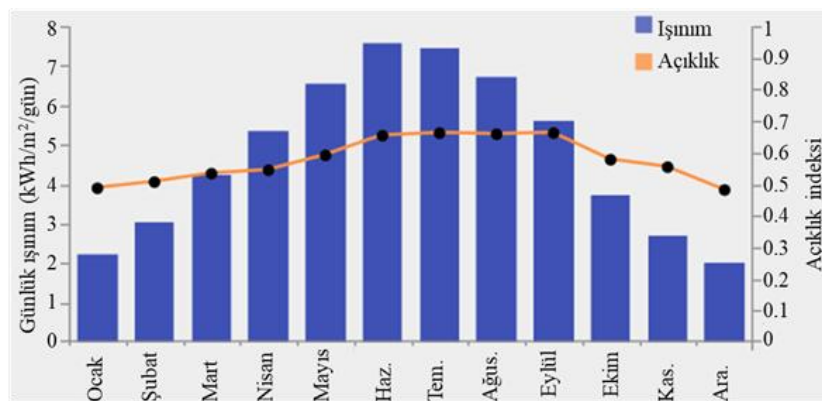
Şekil 5.19. Tasarlanan modelin yük profili

5.2.3. Bölgenin Meteorolojik Verileri

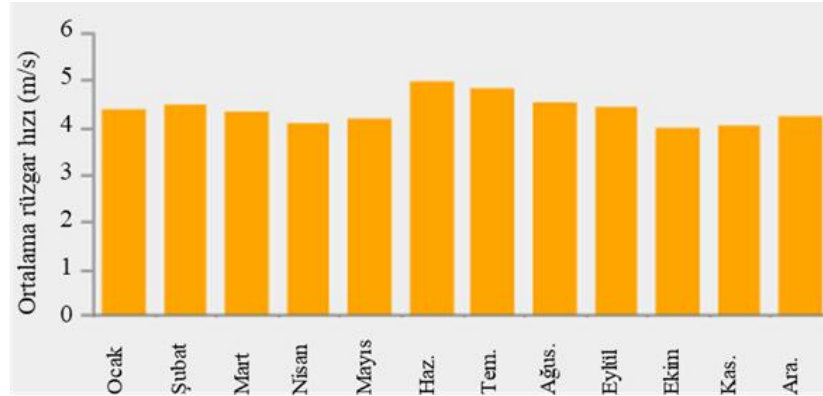
Diyarbakır ilinin aylık açıklık indeksi, aylık ortalama rüzgâr hızı değerleri ile günlük ortalama ışıınım değerleri meteorolojik verileri Tablo 5.18’de sunulmuştur. Söz konusu veriler HOMER Pro yazılımında mevcuttur. Tablodaki verilerin grafiksel gösterimi ise Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir.

Tablo 5.18. Diyarbakır İlinin güneş, açıklık indeksi ve ortalama rüzgâr değerleri

	Açıklık indeksi	Günlük ışıınım (kWh/m ² /gün)	Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
Ocak	0,487	2,40	4,40
Şubat	0,507	3,04	4,47
Mart	0,534	4,24	4,32
Nisan	0,545	5,35	4,09
Mayıs	0,591	6,56	4,18
Haziran	0,654	7,57	4,99
Temmuz	0,662	7,46	4,81
Ağustos	0,658	6,70	5,52
Eylül	0,662	5,59	4,42
Ekim	0,578	3,73	4,00
Kasım	0,554	2,69	4,02
Aralık	0,482	2,01	4,21



Şekil 5.20. Diyarbakır İline ait aylık güneş radyasyonu ve açıklık indeksi grafiği



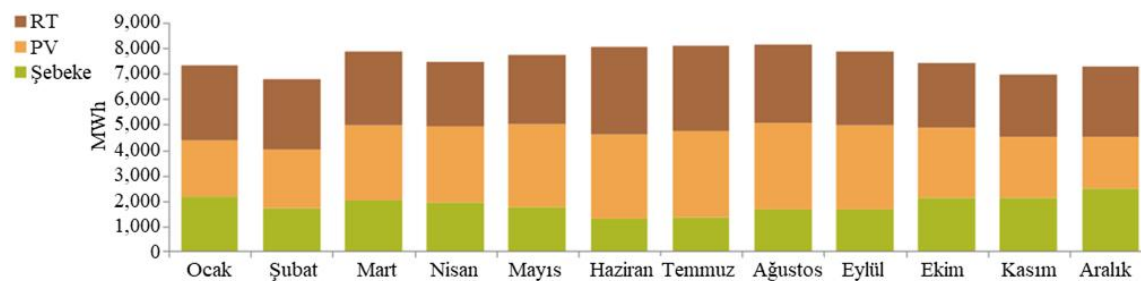
Şekil 5.21. Diyarbakır İline ait aylık rüzgâr hızı grafiği

5.2.4. Simülasyon Sonuçları

Yapılan çalışmada Diyarbakır ili şehir içi taşımacılık yapan ve fosil yakıt tüketen araçların yerine EA'ların kullanılması için yenilenebilir enerji tabanlı bir mikro şebeke HOMER Pro kullanılarak tasarlanmıştır. 180 MW'lık kurulu güce sahip olan mikro şebeke FV ve RT'lerden oluşmaktadır. Ayrıca üretim arzında kesinti yaşanmaması için şebeke bağlantısı sağlanmıştır. Üretim ve tüketim güç değerleri Tablo 5.19'da verilmiştir. Grafiksel gösterim ise Şekil 5.22'de sunulmuştur.

Tablo 5.19. Tasarlanan şebeke bileşenlerinin üretim-tüketim değerleri

Bileşenler	kWh/yıl	%
FV	34.377.830	37,8
RT	34.278.770	37,7
Şebekeden alınan	22.368.947	24,6
Şebekeye verilen	22.953.683	25,2

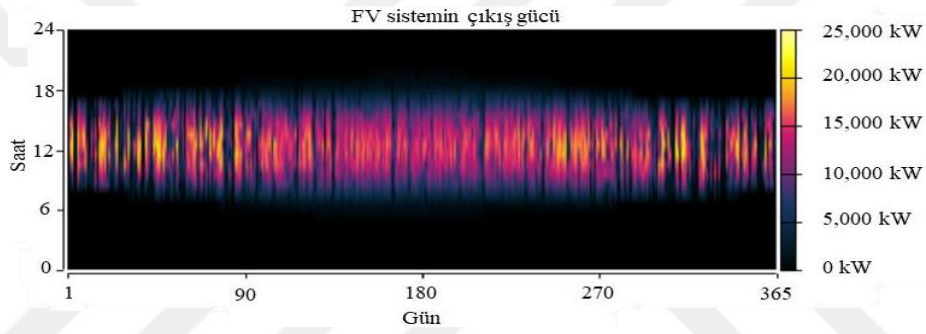


Şekil 5.22. Tasarlanan şebekenin üretim grafiği

Tablo 5.19’da sunulan simülasyon sonuçlarına göre FV paneller ile RT’nin ürettikleri enerji miktarı neredeyse aynı değerdedir. Benzer şekilde tasarlanan şebeke ile ulusal şebeke arasında alınıp verilen enerji miktarı birbirine oldukça yakındır.

5.2.4.1. FV’nin Sisteme Etkisi

Panellerin yıllık çıkış gücündeki değişim Şekil 5.23’te gösterilmiştir. Tasarlanan sistemin FV kapasitesi 23 000 kW olup simülasyon sonuçlarına göre yılda 4.386 saat çalışarak 34.377.830 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. Panellerle ilgili tüm parametreler Tablo 5.20’de sunulmuştur.



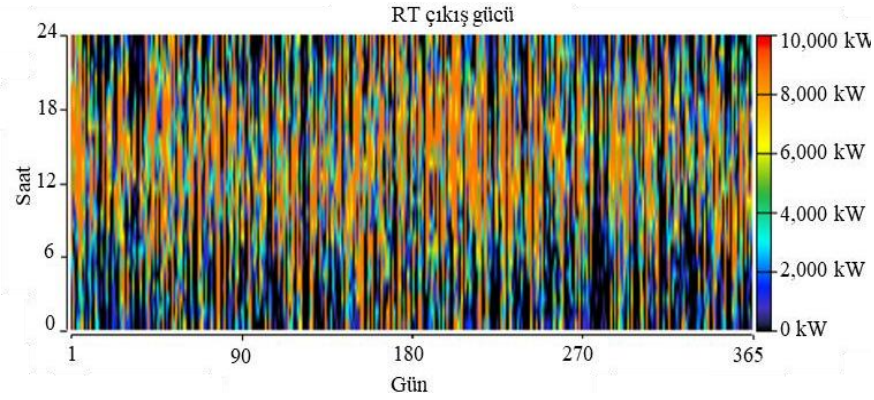
Şekil 5.23. FV panellerin yıllık çıkış gücü değişimi

Tablo 5.20. FV panel sistemlerinin değerleri

	Miktar	Birim
Nominal kapasite	23.000	kW
Kapasite faktörü	17,1	%
Toplam üretim	34.377.830	kWh/yıl
FV Penetrasyonu	52,3	%
Çalışma süresi	4.386	Saat/yıl
LCOE	0,0213	\$/kWh

5.2.4.2. RT’nin Sisteme Etkisi

RT sisteminin kurulu gücü 8000 kW olup simülasyon sonuçlarına göre yılda 6.665 saat çalışarak 34.278.770 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. RT’nin yıllık çıkış gücündeki değişim grafiği ise Şekil 5.24’te sunulmuştur. RT ilgili tüm parametreler Tablo 5.21’de verilmiştir.



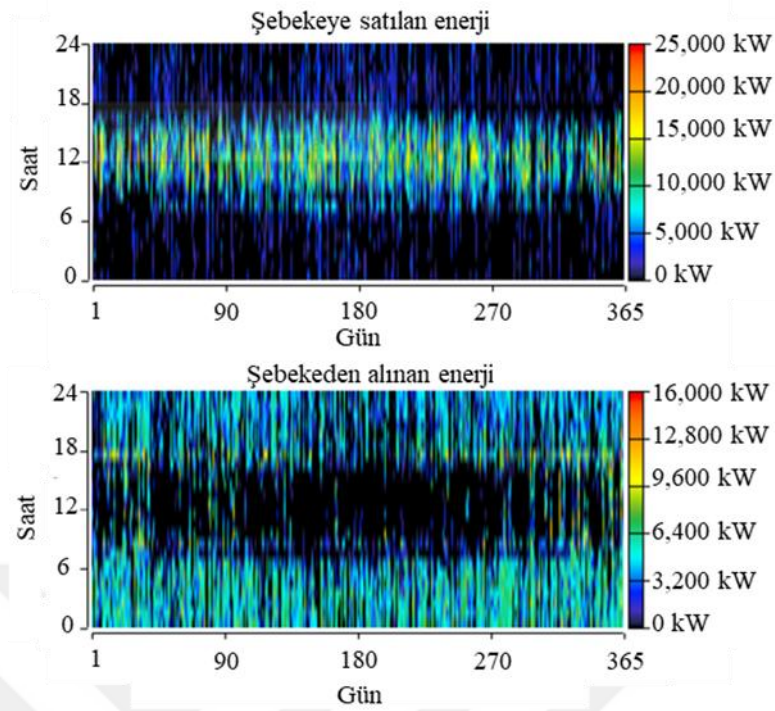
Şekil 5.24. RT'nin yıllık çıkış gücü değişimi

Tablo 5.21. RT sistemin değerleri

	Miktar	Birim
Nominal kapasite	8.000	kW
Kapasite faktörü	48,9	%
Toplam üretim miktarı	34.278.770	kWh/yıl
Rüzgâr Penetrasyonu	52,2	%
Çalışma Süresi	6 665	Saat/yıl
LCOE	0,0270	\$/kWh

5.2.4.3. Şebekenin Sisteme Etkisi

Şebekeden alınan ve şebekeye satılan enerji miktarlarına ait veriler aylık olarak Tablo 5.22'de yer almaktadır. Bu verilerin grafiksel gösterimi ise Şekil 5.25'te sunulmuştur.



Şekil 5.25. Şebekeden alınan ve şebekeye satılan enerjinin yıllık değişim grafiği

Tablo 5.22. Şebekeden alınan ve şebekeye satılan aylık enerji miktarları

Aylar	Şebekeden Alınan Miktar (kWh)	Şebekeye Satılan Miktar (kWh)	Net (kWh)
Ocak	2.190.097	1.589.939	600.158
Şubat	1.716.437	1.699.557	16.880
Mart	2.037.757	1.911.619	126.138
Nisan	1.944.132	1.848.868	95.264
Mayıs	1.760.307	2.110.668	-350.361
Haziran	1.294.158	2.383.658	-1.089.500
Temmuz	1.340.602	2.424.358	-1.083.756
Ağustos	1.690.720	2.176.992	-486.272
Eylül	1.665.160	2.194.050	-528.890
Ekim	2.139.638	1.671.786	467.852
Kasım	2.107.169	1.465.697	641.472
Aralık	2.482.769	1.476.490	1.006.279
Yıllık Toplam	22.368.947	22.953.683	-584.736

Tabloda görüldüğü üzere güneşlenme süresinin uzun olduğu Mayıs-Eylül aylarında şebekeye verilen enerji miktarı alınandan daha fazladır. Yıllık değişim grafiğine bakıldığında ise daha çok akşam ve gece saatlerinde şebekeden enerji alındığı, FV panellerin üretimde olduğu saatlerde ise genellikle şebekeye enerji verildiği görülmektedir. Bir yıl boyunca toplam alınan ve verilen enerji miktarları

karşılaştırıldığında, şebekeye sağlanan enerji miktarının, alınan enerjiden 584.736 kWh daha fazla olduğu gözlemlenmektedir.

Türkiye’de yürürlükte olan mevzuat gereği, şebekeye bağlı üretim sistemlerinde önce sistemin şebekeye verdiği enerji değerinde şebekeden çekilen enerji değeri çıkarılır. Kalan miktarın yürürlükteki değer üzerinden ödemesi yapılır. Türkiye’de 1 MWh enerji için 25.11.2024 tarihi piyasa takas fiyatı 2.568,86 TL/MWh’tir [58]. HOMER Pro yazılımında şebeke parametreleri girilirken alış ve satış fiyatı olarak 0.7032 \$/kWh girilmiştir.

5.2.4.4. Ekonomik Analiz

Diyarbakır ili şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılacak EA’ların enerji ihtiyacını karşılamak için tasarlanan şebekenin maliyet değerleri Tablo 5.23’te sunulmuştur. Simülasyon sonucunda şebekenin NPC değeri 47.775.930,46 \$, yenileme maliyeti 34.650.886,68 \$, kurulum maliyeti 43.691.887,50 \$, bakım-onarım maliyeti 4.519.849,71 \$ ve geri dönüşüm maliyeti 26.046.994 \$ olarak elde edilmiştir. Yakıt maliyeti bulunmayan sistemin LCOE değeri ise 0.01683 \$/kWh olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.23. Sistemin maliyet tablosu

	FV	RT	Şebeke	Konverter	Sistem
Kurulum maliyeti (\$)	16.100.000	23.200.000	-	4.391.887,50	43.691.887,50
Yenileme maliyeti (\$)	-	28.867.461,09	-	5.783.425,59	34.650.886,68
Bakım-onarım maliyeti (\$)	7.363.072,44	1.280.534,34	13.163.456,48	-	4.519.849,71
Yakıt (\$)	-	-	-	-	-
Geri dönüşüm maliyeti (\$)	-	23.730.915,93	-	2.316.078,07	26.046.994,00
Total (\$)	23.463.072,44	29.617.079,49	13.163.456,48	7.859.235,02	47.775.930,46

Diyarbakır İlinde hali hazırda şehir içi yolcu taşımacılığında hizmet veren araçların yakıt tüketim değerleri Tablo 5.24’te gösterilmiştir.

Tablo 5.24. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında mevcutta kullanılan araçların yakıt tüketim değerleri

	Minibüs	Belediye Otobüsü	
Araç sayısı	653	130	150
Yakıt cinsi	Dizel	Dizel	Doğal Gaz
Birim yakıt bedeli (\$) [59]	1,4	1,4	1,1
Günlük ortalama kat edilen mesafe (km)	275	275	275
Bir aracın 100 km’de tükettiği yakıt	15 (lt)	27 (lt)	50 (m ³)
Bir aracın günlük tükettiği yakıt	41,25 (lt)	74,25 (lt)	137,5 (m ³)
Bir aracın aylık (28 gün) tükettiği yakıt	1.155 (lt)	2.079 (lt)	3.850 (m ³)
Bir aracın yıllık tükettiği yakıt	13.860 (lt)	24.948 (lt)	46.200 (m ³)
Tüm araçların yıllık tükettiği toplam yakıt	9.050.580 (lt)	3.243.240 (lt)	6.930.000 (m ³)
Toplam yıllık yakıt bedeli (\$)	12.670.812	4.540.536	7.623.000

Tabloda sunulan hesaplamalara göre, şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılan mevcut araçların bir ayda 28 gün çalıştığı kabul edilmiş ve buna göre bir yıl boyunca toplamda 6.930.000 m³ doğal gaz ile 12.293.820 litre dizel yakıt tüketecekleri belirlenmiştir. Dizel yakıtın bedeli 1,4 \$/lt, doğal gazın ise 1,1 \$/m³ alınarak yıllık toplam yakıt maliyetinin 24.834.348 \$ olduğu hesaplanmıştır. Önerilen sistemin 25 yıllık ömre sahip olduğu ve toplam NPC değerinin 47.775.930,46 \$ olduğu dikkate alındığında, yakıt maliyetlerinin çok kısa bir süre içinde sistemin tüm maliyetini karşılayacağı beklenmektedir.

5.2.4.5. Çevresel Analiz

Ekonomik analizle birlikte, çevresel etki değerlendirmesi için CO₂ emisyon değeri hesaplanmıştır. Bir litre dizel yakıtın tüketilmesi durumunda 2,56 kg CO₂ açığa çıkarken 1 m³ doğalgaz için bu değer 2,03 kg olmaktadır [60]. Bu oranlar dikkate alınarak yapılan hesaplamalara göre mevcut araçların CO₂ emisyon değerleri Tablo 5.25’te sunulmuştur.

Tablo 5.25. Diyarbakır İli şehir içi yolcu taşımacılığında mevcutta kullanılan araçların CO₂ emisyon değerleri

	Minibüs	Belediye Otobüsü	
Araç sayısı	653	130	150
Yakıt cinsi	Dizel	Dizel	Doğal Gaz
Yakıtın birim CO ₂ emisyon değeri	2,56 (kg/lt)	2,56 (kg/lt)	2,03 (kg/ m ³)
Araçların yıllık tükettiği toplam yakıt	9.050.580 (lt)	3.243.240 (lt)	6.930.000 (m ³)
Araçların yıllık CO ₂ emisyon değeri (kg)	23.169.484,80	8.302.694,40	14.067.900
Toplam CO ₂ emisyon değeri (kg/yıl)	45.540.079,2		

Tasarlanan şebekedeki FV ve RT üretim kaynaklarının CO₂ emisyonu sıfır olmasına rağmen CO₂ emisyon değeri 14.137.174 kg/yıl olduğu görülmektedir. Şebeke nedeniyle ortaya çıkan bu emisyon değeri, mevcut araçların saldığı emisyon miktarının yine de üçte birinden daha düşüktür. Sera gazı etkileri dikkate alındığında, CO₂ emisyonlarındaki bu azalma çevresel açıdan büyük bir öneme sahiptir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında HOMER Pro yazılımı kullanılarak iki farklı bölge ve amaç için YEK tabanlı hibrit mikro şebekeler tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan bu sistemlerin teknik, ekonomik ve çevresel yönleri detaylı bir şekilde analiz edilerek elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

İlk uygulamada; Bingöl İli Solhan ilçesine bağlı Yiğit Harman köyünün elektrik ve termal enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere bölgenin rüzgâr, güneş ve biyokütle enerji kaynaklarını dikkate alarak, FV, RT, BG ve FC üretim kaynaklarını içeren bir mikro şebeke tasarlanmıştır. HOMER Pro yazılımı yardımıyla bu bileşenlerin farklı kombinasyonları için teknik, ekonomik ve çevresel analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, bu kaynaklar için elektrik enerjisi üretim değerleri ve oranları şu şekilde hesaplanmıştır: FV için 137.170 kWh/yıl (%53,4), BG için 94.784 kWh/yıl (%36,9), RT için 22.861 kWh/yıl (%8,91) ve FC için 1.893 kWh/yıl (%0,738). Termal enerji üretim değerleri ve oranları ise BG için 126.431 kWh/yıl (%42,5), FC için 6.817 kWh/yıl (%2,29) ve boyler için 163.943 kWh/yıl (%55,2) olarak bulunmuştur. Bu modelin NPC, LCOE ve CO₂ emisyon değerleri sırasıyla 739.772 \$, 0,271 \$/kWh ve 37.958 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle, hane başına yaklaşık 7.000 \$ yatırım yapılarak, bu model aracılığıyla o hanelerin 25 yıllık elektrik ve termal enerji ihtiyacının karşılanabileceği ortaya konulmuştur. Tasarımı yapılan mikro şebekenin tekno-ekonomik avantajlarının yanı sıra çevresel üstünlüğünü de göstermek için mevcut yüklerin sadece DG ve sadece doğalgaz jeneratörü ile çalıştırıldığı senaryolar ayrı ayrı simüle edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

İkinci uygulamada; nüfusu 1,8 milyon olan Türkiye'nin önde gelen büyük şehirlerinden Diyarbakır İlinin şehir içi yolcu taşımacılığında kullanılan fosil yakıtlı araçların EA'lara dönüştürülmesi süreci teknik, ekonomik ve çevresel etkileri bakımından analiz edilmiştir. Öncelikli olarak mevcutta kullanılan 280 otobüs ve 653 minibüsün eşdeğeri olan EA'lar belirlenmiş ve bu araçların elektrik enerjisini karşılayacak YEK tabanlı bir hibrit enerji santralinin boyutu hesaplanmıştır. Diyarbakır ilinin güneş ve rüzgâr enerjisi

potansiyelinin yüksek olması nedeniyle, RT ve FV bileşenlerini içeren, şebeke bağlantılı ve günlük 180.000 kWh enerji üretebilecek hibrit sistemin tasarımı, HOMER Pro yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Ekonomik analiz sonucu ömrü 25 yıl olarak tasarlanan sistemin NPC ve LCOE değerleri sırasıyla 47.775.930,46 \$ ve 0.01683 \$/kWh olarak elde edilmiştir. Mevcut araçların bir yıllık yakıt giderlerinin ise 24.834.348 \$ olacağı hesaplanmıştır. Bu değerler sistem maliyetinin birkaç yıl içerisinde yakıt masrafları ile karşılanabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca mevcut sistemdeki araçların CO₂ emisyonu ile tasarlanan şebekenin CO₂ emisyon değerleri hesaplanmış ve önerilen sistemin mevcut sisteme göre üçte biri kadar CO₂ salınımı yapacağı ortaya konulmuştur.

Her iki uygulama ile YEK tabanlı hibrit güç sistemlerinin ekonomik ve çevresel avantajları vurgulanarak bu sistemlere yönelim teşvik edilmektedir. Uygulamalar seçilen bölgeler için gerçekleştirilmiş olsa da benzer özelliklere sahip yerler için emsal teşkil etmektedir. Teknolojik ilerlemelerle birlikte, önümüzdeki yıllarda yenilenebilir enerji bileşenlerinin maliyetlerinin azalacağı öngörülmektedir. Bu durumda sistemlerin avantajları daha da artacaktır.

Gelecek çalışmalarda, MATLAB'da yazılmış bir kontrol algoritması kullanılarak bir analiz yapılabilir ve HOMER Pro yazılımı tarafından gerçekleştirilen analizle karşılaştırılabilir. Ayrıca, küçük akarsu kaynaklarına yakın yerleşim yerlerinden biri için mikro şebeke tasarımı yapılarak hidroelektrik enerjinin etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [2] Afgan NH., Al Gobaisi D., Carvalho MG., Cumo M. Sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1998; 2(3): 235–286.
- [3] Landrigan PJ., Fuller R., Acosta NJ., Adeyi O., Arnold R., Bald  AB., ... and Zhong M. The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*. 2018; 391(10119): 462-512.
- [4] <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [5] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [6] Allison J. Robust multi-objective control of hybrid renewable microgeneration systems with energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 114: 1498-1506.
- [7] G k ek M., Kale C. Techno-economical evaluation of a hydrogen refuelling station powered by Wind-PV hybrid power system: A case study for İzmir- eşme. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43(23): 10615-10625.
- [8] Qiblawey Y., Alassi A., Abideen MZ., Ba ales S. Techno-economic assessment of increasing the renewable energy supply in the Canary Islands: The case of Tenerife and Gran Canaria. *Energy Policy* 2022; 162: 112791.
- [9] Ellabban O., Alassi A. Optimal hybrid microgrid sizing framework for the mining industry with three case studies from Australia. *IET Renewable Power Generation*. 2021; 15(2): 409–423.
- [10] Demiroren A., Yilmaz U. Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in G kceada, Turkey: An island example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010; 14(1): 323-333.
- [11] Fikari SG., Sigarchian SG., Chamorro HR. (2017, Aug.). Modeling and simulation of an autonomous hybrid power system. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, Greece.
- [12] Hafez O., Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. *Renewable Energy*. 2012; 45: 7-15.
- [13] Islam MS., Akhter R., Rahman MA. A thorough investigation on hybrid

application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not?. *Energy*. 2018; 145: 338-355.

- [14] He L., Zhang S., Chen Y., Ren L., Li J. Techno-economic potential of a renewable energy-based microgrid system for a sustainable large-scale residential community in Beijing, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 93: 631-641.
- [15] Sigalo MB., Tee NB., Usman R. Comparative Analysis and Simulation of a Hybrid PV/Diesel Generator/Grid System for the Faculty of Engineering Main Building, Rivers State University, Port Harcourt Nigeria. *International Organization of Scientific Research Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2017;07: 37-44.
- [16] Shezan SA., Ishraque MF., Shafiullah GM. Kamwa I., Paul LC., Muyeen SM., Ramakrishna NSS, Saleheen MZ., Kumar PP. Optimization and control of solar-wind islanded hybrid microgrid by using heuristic and deterministic optimization algorithms and fuzzy logic controller. *Energy Reports*. 2023; 10: 3272-3288.
- [17] Mbasso WF., Naoussi SRD., Molu RJJ., Saatong KT., Kamel S. Technical assessment of a stand-alone hybrid renewable system for energy and oxygen optimal production for fishes farming in a residential building using HOMER pro. *Cleaner Engineering and Technology*. 2023; 17: 100688.
- [18] Sharma H., Mishra S. (2019, Oct.). Hybrid Optimization Model for Smart Grid Distributed Generation Using HOMER. 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE). Noida, India.
- [19] Rohani A., Mazlumi K., Kord H. (2010, May). Modeling of a Hybrid Power System for Economic Analysis and Environmental Impact in HOMER. 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, Isfahan, Iran.
- [20] Ashourian MH., Cherati SM., Zin AM., Niknam N., Mokhtar AS., Anwari M.. Optimal green energy management for island resorts in Malaysia. *Renewable Energy*. 2013; 51: 36-45.
- [21] Anoune K., Bouya M., Astito A., Abdellah AB. Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 93: 652-673.
- [22] Javed MS., Song A., Ma T. Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm. *Energy*. 2019; 176: 704-717.
- [23] Lipu MH., Hafiz MG., Ullah MS., Hossain A., Munia FY. Design optimization and sensitivity analysis of hybrid renewable energy systems: A case of Saint Martin Island in Bangladesh. *International journal of Renewable Energy Research*. 2017; 7(2): 988-998.

- [24] Ma T., Yang H., Lu L. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy*. 2014; 121: 149-158.
- [25] Baek S., Kim H., Chang HJ. Optimal hybrid renewable power system for an emerging island of South Korea: The case of Yeongjong Island. *Sustainability*. 2015; 7(10): 13985-14001.
- [26] Wang R., Lam C. M., Hsu SC., Chen, J H. Life cycle assessment and energy payback time of a standalone hybrid renewable energy commercial microgrid: A case study of Town Island in Hong Kong. *Applied Energy*. 2019; 250: 760-775.
- [27] Kumar P., Channi HK. (2024, January). Optimal Site Selection and Economic Scheduling of Electric Vehicle Charging Station using HOMER: A Case Study of TOHANA, Haryana. Fourth International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT). Bhilai, India.
- [28] Singh B., Verma A., Chandra A., Al-Haddad K. Implementation of solar PV-battery and diesel generator based electric vehicle charging station. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020; 56(4): 4007-4016.
- [29] Ye B., Jiang J., Miao L., Yang P., Li J., Shen B. Feasibility study of a solar-powered electric vehicle charging station model. *Energies* 2015; 8(11): 13265-13283.
- [30] Kumari DS., Manoharan PS., Vishnupriyan J. Designing a comprehensive charging infrastructure for environmentally friendly transportation: A proposal for evaluating viability and uncertainty modeling. *Energy Conversion and Management*. 2024; 322: 119185.
- [31] Tahir M., Hu S., Khan T., Zhu H. Sustainable hybrid station design framework for electric vehicle charging and hydrogen vehicle refueling based on multiple attributes. *Energy Conversion and Management*. 2024; 300: 117922.
- [32] Roslan MF., Ramachandaramurthy VK., Mansor M., Mokhzani AS., Jern KP., Begum RA., Hannan MA. Techno-economic impact analysis for renewable energy-based hydrogen storage integrated grid electric vehicle charging stations in different potential locations of Malaysia. *Energy Strategy Reviews*. 2024; 54: 101478.
- [33] Praveenkumar S., Agyekum EB., Ampah JD., Afrane S., Velkin VI., Mehmood U., Awosusi AA. Techno-economic optimization of PV system for hydrogen production and electric vehicle charging stations under five different climatic conditions in India. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(90): 38087-38105.
- [34] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_St

- [atistics_2024.pdf?rev=c1fd271e788d42d189fa1b1f625cf521](#) (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [35] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [36] Koç Ü. Güneş enerjisi ve ekonomik büyüme. Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi. 2021; 6(2), 515-533.
- [37] <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [38] Köprü MA. Yenilenebilir enerji tabanlı mikro şebekelerde enerji yönetim modelinin geliştirilmesi. Doktora tezi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 2024.
- [39] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [40] <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/759/1107/DosyaGaleri/dsi-2013-faaliyet-raporu.pdf> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [41] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [42] <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutle> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [43] <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [44] Jahangiri M., Haghani A., Heidarian S., Mostafaeipour A., Raiesi HA., Shamsabadi AA. Sensitivity analysis of using solar cells in regional electricity power supply of off-grid power systems in Iran. Journal of Engineering, Design and Technology. 2020; 18(6): 1849-1866.
- [45] Beyarslan S. Yenilenebilir enerji kaynakları ile mikro şebeke tasarımı ve optimum çözümünün homer ile incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. 2021.
- [46] <https://homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf> (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [47] Şenaktaş B. Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları. Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 2005.
- [48] Khadem T., Billah SB., Barua S., Hossain MS. (2017, September). Homer based hydrogen fuel cell system design for irrigation in bangladesh. 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE) Dhaka, Bangladesh.
- [49] Mudgal V., Reddy KS., Mallick TK. Techno-Economic Analysis of Standalone Solar Photovoltaic-Wind-Biogas Hybrid Renewable Energy System for Community Energy Requirement. Future Cities and Environment. 2019; 5(1): 11.

- [50] Liu G., Li M., Zhou B., Chen Y., Liao S. General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources. *Energy Conversion and Management*. 2018; 156: 416–426.
- [51] https://tr.wikipedia.org/wiki/Yi%C4%9Fitharman,_Solhan (Erişim tarihi: 23.11.2024)
- [52] Özkoca Mİ. Kojenerasyon ve güneş enerjisinin bütünleştirildiği hibrit sistemin ekonomik ve emisyon analizi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 2019.
- [53] <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (Erişim tarihi: 25.11.2024)
- [54] <http://turkiyekoyunkeci.org/tr/RakamlarlaKoyunKeci> (Erişim tarihi: 25.11.2024)
- [55] Salihoğlu NK., Teksoy A., Altan K. Büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarından biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi: Balıkesir ili örneği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2019; 8(1): 31-47.
- [56] <https://bingol.ktb.gov.tr/TR-56989/ilin-cografı-konumu.html> (Erişim tarihi: 25.11.2024)
- [57] <https://www.karsan.com/tr/e-jest-genel-bakis> (Erişim tarihi: 25.11.2024)
- [58] <https://www.epias.com.tr/wp-content/uploads/2024/11/epias-bulten-25.11.2024.pdf> (Erişim tarihi: 26.11.2024)
- [59] <https://www.petrolofisi.com.tr/akaryakit-fiyatlari> (Erişim tarihi: 10.06.2024)
- [60] Li P., Zhao P., Brand C. Future energy use and CO2 emissions of urban passenger transport in China: A travel behavior and urban form based approach. *Applied Energy*. 2018; 211: 820-842.