

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DOĞAL GAZ, GÜNEŞ VE RÜZGÂR HİBRİT ENERJİ ÜRETİMİNİN
TEKNOEKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ: EGE BÖLGESİ İÇİN ÖRNEK UYGULAMA**

HAZIRLAYAN

ASLI AVCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DOĞAL GAZ, GÜNEŞ VE RÜZGÂR HİBRİT ENERJİ ÜRETİMİNİN
TEKNOEKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ: EGE BÖLGESİ İÇİN ÖRNEK UYGULAMA**

HAZIRLAYAN

Aslı AVCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğretim Üyesi Levent Çolak

ANKARA - 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Aslı AVCI tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 09 / 09 / 2022

**Tez Adı: DOĞAL GAZ, GÜNEŞ VE RÜZGÂR HİBRİT ENERJİ
ÜRETİMİNİN TEKNOEKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN
DEĞERLENDİRİLMESİ: EGE BÖLGESİ İÇİN ÖRNEK UYGULAMA**

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı)

İmza

Prof. Dr. Tahir YAVUZ	
Prof. Dr. Oğuz TURGUT	
Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK	

ONAY

Prof. Dr. Faruk Elaldı

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 22 / 09 / 2022

Öğrencinin Adı, Soyadı: Aslı AVCI

Öğrencinin Numarası: 21920189

Anabilim Dalı: Enerji Mühendisliği

Programı: Enerji Mühendisliği Tezli Yüksek lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK

Tez Başlığı: Doğal Gaz, Güneş ve Rüzgâr Hibrit Enerji Üretiminin Teknoekonomik Ve Çevresel Açıdan Değerlendirilmesi: Ege Bölgesi İçin Örnek Uygulama

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 97 sayfalık kısmına ilişkin, 22 / 09 / 2022 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 17'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası.....

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı

Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın yazım sürecinde benden manevi desteğini esirgemeyen sevgili annem Hatice AVCI' ya ve bana yapmış olduğu büyük katkılar ve çalışma sırasındaki önerileri için araştırmanın her aşamasında yardımcı olan, tez danışmanım ve hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK' a, teşekkür ederim.



ÖZET

Aslı AVCI

DOĞAL GAZ, GÜNEŞ VE RÜZGÂR HİBRİT ENERJİ ÜRETİMİNİN TEKNOEKONOMİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ: EGE BÖLGESİ İÇİN ÖRNEK UYGULAMA

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

2022

Dünya nüfusunun artması ve beraberinde gelen enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtlardan yararlanılması sonucunda sera gazı emisyonları artmıştır. Yakın zamanda tükenmek üzere olan fosil yakıtlardaki fiyat artışları dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla tercih edilmesine yol açmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları sistemlerinde gerek kurulum maliyetlerinin yüksek olması gerekse sürekli aynı potansiyelde enerji üretimi sağlanamaması sebebiyle, maliyet etkin biçimde kullanılamamaktadır. Enerji üretiminde yıl boyunca ihtiyaç duyulan baz yüklerin yenilenebilir enerji kaynakları, pik yüklerin ise fosil yakıtlarla karşılanması uygun maliyet ve sürekli üretim için en elverişli uygulamalardır. Bu çalışmada HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) programı en uygun kombinasyonun bulunması için kullanılarak bir hibrit sistem modellenmiş, simülasyon ve optimizasyon süreçlerinden sonra değerlendirilmiştir. Örnek bir uygulama olarak Ege bölgesi Denizli ilinde kurulu gücü 12 MW olan doğal gazla çalışan kojenerasyon santralinin elektrik ve termal yük ihtiyacını karşıladığı tesis için bölgedeki rüzgâr ve güneş enerjisinin dahil edildiği hibrit sistem modellenerek, şebekenin dahil olduğu ve olmadığı sistemler için teknoekonomik ve çevresel analizleri yapılmıştır. Net şimdiki maliyet değeri, CO₂ salımı değerlemeleri alınarak enerji kaynaklarının optimum kullanım oranlarıyla en uygun sistem tasarımı bulunmuştur. Şebekeye bağlı hibrit sistemde en iyi geri ödeme süresi 11,1 yıl ve en iyi net şimdiki maliyet 30,3 milyon dolar, güneş radyasyonunun 7,8kWh/m², rüzgâr hızı 4,56 m/s olduğunda yakalanmıştır. Bu değerlerin uygulandığı simülasyonda en az CO₂ emisyon değeri 8.480.163 kg/yıl elde edilmiştir. Şebekeden bağımsız olarak tasarlanan simülasyonda da aynı simülasyon değerlerinde net şimdiki maliyet 117 milyon dolarken geri ödeme süresi 8,13 yıl bulunmuştur. Geri ödeme süresi 5,6

bulunan diğ er simülasyon analizinde net Şimdiki maliyet artarak 135 milyon dolara çıkmıştır. Bu simülasyonda en az CO₂ 7.240.802 kg/yıl olmuştur.

ANAHTAR KEL İMELE ER: Yenilenebilir Enerji, Hibrit enerji sistemleri, Doğ al gaz, Güneş, R zɡ r, HOMER, Enerji Maliyeti, Optimizasyon.

DanıŐman: Dr.  ğr.  yesi Levent  OLAK, Başkent Üniversitesi, Makina M hendisliđi B l m .



ABSTRACT

Ash AVCI

**TECHNOECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EVALUATION OF NATURAL
GAS, SOLAR AND WIND HYBRID ENERGY GENERATION: SAMPLE
APPLICATION FOR AEGEAN REGION**

Baskent University Institute of Science Engineering

Department of Energy Engineering

2022

As a result of the use of fossil fuels to meet the energy need that comes with the increase in the world population, greenhouse gas emissions have increased. The price increases in fossil fuels, which are about to be depleted in the near future, have led to more preference for renewable energy sources around the world. Renewable energy sources cannot be used in a cost-effective manner in systems due to the high installation costs and the inability to continuously produce energy at the same potential. Meeting the base loads needed throughout the year with renewable energy sources and peak loads with fossil fuels are the most convenient applications for cost-effective and continuous production. In this study, a hybrid system was modeled and evaluated after simulation and optimization processes by using the HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) program to find the most suitable combination. As an exemplary application, for the facility where a natural gas-fired cogeneration power plant with an installed power of 12 MW in Denizli province in the Aegean region meets the electrical and thermal load needs, a hybrid system in which wind and solar energy is included in the region is modeled, and for systems with or without the grid, techno-economic and environmental analyzes were made. By taking the net present cost value and CO₂ emission valuations, the most appropriate system design with the optimum utilization rates of energy resources has been found. In the grid-connected hybrid system, the best payback period is 11.1 years and the best net present cost is 30.3 million dollars, solar radiation is 7.8kWh/m² and wind speed is 4.56 m/s. The minimum CO₂ emission value of 8.480.163 kg/year was obtained at these sensitivity values. In the simulation designed independently of the network, the net present cost was found to be 117 million dollars and the payback period was 8.13 years at the same sensitivity values. In the

other sensitivity analysis, which had a payback period of 5.6, net present cost increased to \$135 million. In this simulation, the minimum CO₂ was 7,240,802 kg/year.

KEYWORDS: Renewable Energy, Hybrid energy systems, Natural gas, Solar, Wind, HOMER, Energy Cost, Optimization.

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Levent ÇOLAK, Baskent University, Department of Mechanical Engineering.



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GENEL BİLGİLER-TEZİN AMAÇ VE KAPSAMI.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Taraması	3
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	14
1.4. Enerji kaynaklarının seçilmesi.....	16
2. HOMER PROGRAMI	23
2.1 Simülasyon Süreci	25
2.2 Optimizasyon Süreci	26
2.2.1 Sevk stratejisi	28
2.2.2 Meteorolojik veriler.....	29
2.2.3 Yük profilleri	29
2.2.4 Ekonomik veri.....	31
2.2.5 Arama alanı.....	32
2.2.6 Ekipman özellikleri	32
2.3. Duyarlılık Değişkeni ve Analiz Süreci.....	35
2.4. Çıktılar ve HOMER Raporlama.....	36
3. MATEMATİKSEL MODELLEME.....	38
3.1. Mevcut Sistemin Matematiksel Modellemesi	40
3.2. Yenilenebilir Enerji Bileşenlerinin Matematiksel Modellemesi	52
3.2.1 Güneş paneli modellemesi.....	53
3.2.2 Rüzgâr türbini modellemesi	60
4. UYGULAMA	66
4.1. Sistem Girdileri	66
4.1.1 Sistemin uygulama yeri ve meteorolojik verileri	66

4.1.2. Sistemin yük profilleri.....	71
4.1.3. Seçilen güneş paneli özellikleri.....	72
4.1.4. Seçilen rüzgâr türbini özellikleri.....	74
4.1.5. Kojenerasyon santrali	75
4.1.6. Batarya	76
4.1.7. Doğrultucu ve dönüştürücü	77
4.1.8. Kazan	77
4.1.9. Şebeke	77
4.2. Modelleme	77
4.3. Simülasyonu Yapılan Hibrit Sistem Modelleri.....	78
4.4. Doğrulama.....	82
4.5. Bulgular.....	84
4.5.1. Şebekeye Bağlı Hibrit Enerji Üretim Sistemi	84
4.5.2 Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Üretim Sistemi	90
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR.....	98

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli [38], [39].	20
Tablo 3.1. Optimizasyondan sonra seçilen sistemlerin mevcut sistemle karşılaştırılmasında amaçlanan sonuçlar.	39
Tablo 3.2. Jeneratör, kazan ve ikinci simülasyon için şebekenin dahil olduğu mevcut olarak tanımlanan sistemin girdileri.	41
Tablo 3.3. Jeneratör, kazan ve ikinci simülasyon için şebekenin dahil olduğu mevcut olarak tanımlanan sistemin çıktıları.	42
Tablo 3.4. PV sistem modellemesinde sistem girdileri ve çıktıları	59
Tablo 3.5. Rüzgâr Türbini modellemesinde sistem girdileri ve çıktıları.	65
Tablo 4.1. HOMER aylık rüzgâr hızları	67
Tablo 4.2. Denizli RES yıllık elektrik üretimi [62].	68
Tablo 4.3. Denizli iline kurulabilecek rüzgâr enerjisi santrali güç kapasitesi [63].	68
Tablo 4.4. HOMER-Denizli ili global radyasyon değerleri ve bulutsuzluk indeksi (kWh/m ² -gün) (NASA'nın dünya çapındaki enerji kaynakları veri tabanı tahmini 06.03.2021).	69
Tablo 4.5. Tesise ait elektrik ve termal yük ihtiyaçları mevcut sistem baz alınarak hesaplanmıştır.	71
Tablo 4.6. Tek kristalli silisyum yapıdaki fotovoltaik panel için sisteme girilen değerler .	73
Tablo 4.7. Sisteme girilen güneş paneli (PV) mali bilgileri.	74
Tablo 4.8 Sisteme girilen rüzgâr türbin teknik bilgileri.	75
Tablo 4.9 Sisteme girilen rüzgâr türbin mali bilgileri.	75
Tablo 4.10 Sistemde 12 MW kurulu gücü olan doğal gaz kojenerasyon santrali mali bilgileri.	76
Tablo 4.11 Sistemde tanımlı bataryanın mali bilgileri.	76
Tablo 4.12 Sistemde tanımlı doğrultucu ve dönüştürücü mali bilgileri.	77
Tablo 4.13. Ekonomik analizde sistem girdi değerleri bütün.	81
Tablo 4.14. Karşılaştırma yapılan sistem bileşenleri.	82

Tablo 4.15 MS Excel ve HOMER sonuçlarının karşılaştırılması	83
Tablo 4.16. Simülasyonda en küçük net şimdiki maliyete göre hibrit enerji modelinin bileşenleri.....	85
Tablo 4.17. Simülasyonun ekonomik sonuçlarının ve emisyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	87
Tablo 4.18. Simülasyonun ekonomik sonuçlarının ve emisyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	89
Tablo 4.19. Simülasyonun en küçük net şimdiki maliyete göre hibrit enerji modelinin bileşenleri.....	91
Tablo 4.20. Simülasyonun ekonomik ve emisyon sonuçlarının karşılaştırılması	92
Tablo 4.21. Güneş radyasyonu ve rüzgar hızına bağlı simülasyon-2 sonuçları	94



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. En fazla doğal gaz rezervine sahip ilk 10 ülke (2020) [35].....	17
Şekil 1.2. Türkiye'nin doğal gaz arzı ve yurt içi üretim oranları (2011-2020) [35].....	17
Şekil 1.3. Kaynak bazında Türkiye kurulu güç gelişimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı [36].....	18
Şekil 1.4. YEKDEM kapsamındaki santrallerin yıllık kurulu güçleri [37].	19
Şekil 1.5. Türkiye'nin 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı haritası [40].....	20
Şekil 1.6. İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [41].	21
Şekil 1.7. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli (GEPA).....	22
Şekil 2.1. HOMER Pro kullanıcı ara yüzü, örnek bir uygulama.	23
Şekil 2.2. HOMER Pro çalışma metodolojisi.....	25
Şekil 2.3. HOMER optimizasyon süreci akış şeması [43].	27
Şekil 2.4. HOMER rapor oluşturma sayfası [45].	36
Şekil 3.1. Mevcut kojenerasyon sistem şebeke bağlantılı sistem (a), şebeke bağımsız sistem modellemesi (b)	40
Şekil 3.2. Yakıt eğrisi sekmesi	43
Şekil 3.3. Simülasyon sonucu listelenen hibrit enerji modelleri örnek listesi.	50
Şekil 3.4. Modellenen şebeke bağlı sistem modellemesi (a), şebekeden bağımsız (b)	52
Şekil 3.5. Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemi [49,50].....	54
Şekil 3.6. PV panellerin ışınlıma bağlı akım, gerilim, güç değişim değerleri [51].	55
Şekil 3.7. HOMER PV bilgilerinin girildiği arayüz	55
Şekil 3.8. Güneş açıları [52].	56
Şekil 3.9. Hava yoğunluğunun rakıma göre değişimi	61
Şekil 3.10. Rüzgâr türbini güç grafiği	61
Şekil 3.11 Yatay eksenli rüzgâr türbini genel yapısı.....	63
Şekil 3.12. HOMER rüzgâr verilerinin girildiği arayüz	64

Şekil 3.13 Rüzgâr hızlarının tipik bir dağılımı ve en uygun Weibull dağılımı örneği.	64
Şekil 4.1. Denizli ilinin yıllık ortalama rüzgâr kaynak değerleri [60].	67
Şekil 4.2. Denizli güneş enerjisi potansiyeli atlası 2021 [65].	69
Şekil 4.3. Denizli global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün) [65].	70
Şekil 4.4. Denizli güneşlenme süreleri (Saat) [65].	70
Şekil 4.5. Denizli PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (kWh-yıl) [65].	70
Şekil 4.6. Elektrik yük profili	72
Şekil 4.7. Termal yük profili	72
Şekil 4.8. HALBES 100 kW rüzgâr türbini güç grafiği.	74
Şekil 4.9. Mevcut doğal gazlı kojenerasyon sistem; şebeke bağlantılı sistem (a), şebeke bağımsız sistem modellemesi (b).	79
Şekil 4.10. Doğal gazlı kojenerasyon santrali, güneş paneli, rüzgâr türbini, batarya ve şebeke hibrit enerji üretim sistemi.	79
Şekil 4.11. Şebekeden bağımsız doğal gazlı kojenerasyon santrali, güneş paneli, rüzgâr türbini ve batarya hibrit enerji üretim sistemi.	80
Şekil 4.12. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon aylık elektrik üretimi.	85
Şekil 4.13. Hibrit üretim sistemi 1. Simülasyon raporundaki elektrik üretimi yüzdeleri.	85
Şekil 4.14. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon aylık termal enerji üretimi	86
Şekil 4.15. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon ekonomik sonuç özet tablosu.	87
Şekil 4.16. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon nakit akışı.	88
Şekil 4.17. Simülasyon-1 için güneş radyasyonu ortalaması 7,8 kWh/m ² /gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olan simülasyonun analizine bağlı elektrik üretim kaynakları sonucu.	89
Şekil 4.18. Hibrit elektrik üretim sistemi 2. simülasyonun aylık elektrik üretimi	90
Şekil 4.19. Hibrit üretim sistemi 2. simülasyon aylık termal enerji üretimi	91
Şekil 4.20. Hibrit üretim sistemi 2. simülasyon nakit akışı.	93
Şekil 4.21. Simülasyon-2 için güneş radyasyonu ortalaması 7,8 kWh/m ² /gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olan simülasyon analizine bağlı elektrik üretim kaynakları sonucu.	93

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
$C_{y\text{llık,top}}$	Toplam yıllık maliyet
CNPC	Toplam bugünkü maliyet
CO ₂	Karbondioksit
COE	Düzeltilmiş enerji maliyeti (Cost of Energy)
CHP	Kombine ısı ve güç
C_p	Güç katsayısı
$C_{\text{değ}}$	Bileşenin yenileme, değiştirme maliyeti
CRF	Sermaye Geri Kazanım Faktörü
CuInS ₂	Bakır İndiyum 2-Selenür
DA	Doğru Akım
$E_{\text{ş,s}}$	Şebekeye enerji satış toplamı
$E_{\text{yük,AA}}$	AA Yük miktarı
$E_{\text{yük,DA}}$	DA Yük miktarı
Fl	Yakıt eğrisi eğimi
f	Yıl bazında enflasyon oranı
GEPA	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
i	Reel faiz oranı
i_0	Nominal faiz oranı
N	Yıl sayısı
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NPC	Toplam bugünkü net maliyet (Total Net Present Cost)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
Ø	Enlem açısı
PT	Türbinden elde edilen güç
P_{jen}	Jeneratör elektrik çıkışı
PV	Fotovoltaik
R	Rotor yarıçapı
$R_{\text{bileşen}}$	Komponentin ömrü
REPA	Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
R_{proj}	Proje ömrü
$R_{\text{değ}}$	Bileşen kalan ömrü
S	Hurda değeri
T	Sıcaklık
U_r	Referans yükseklikteki rüzgâr Hızı
$v(z)$	Yerden z yükseklikteki rüzgâr hızı
w	Açısal hız
ω	Saat açısı (°)
β	Eğim açısı
δ	Deklinasyon açısı
θ	Güneş geliş açısı
θ_z	Zenit açısı
ρ	Havanın yoğunluğu
k\$	Bin USD

1. GENEL BİLGİLER-TEZİN AMAÇ VE KAPSAMI

1.1. Giriş

Dünyada nüfus ve sanayideki artış enerjiye ihtiyacı da arttırmaktadır. Enerji taleplerinin karşılanması için fosil yakıtlardan yararlanılması bunun getirisi sera gazı emisyonunun artması ve iklim değişiklerinin olması, sıfır emisyonu sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmıştır. Çevresel nedenler dışında fosil yakıtlardaki fiyat artışları ve yakın zamanda tükenmek üzere olmalarından dolayı da dünya genelinde yeni enerji kaynakları araştırılmaktadır. Bu süreç içerisinde çevreye verilen zarar ve tükenme olasılıkları düşünüldüğünde herkesin ortak araştırma alanları yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, su ve rüzgâr enerjisi olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının olumsuz yanları yararlarıyla kıyaslandığında oldukça azdır ve zamanla gelişen teknolojiyle birlikte birçok olumsuzluğu ortadan kaldırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. En önemli olumsuzlukları maliyetli kurulum süreçlerine sahip istikrarsız kaynaklar olmalarıdır. Günümüzde rüzgâr ve güneş enerjisi en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Gerek kurulum maliyetlerinin yüksek olması gerekse en önemli faktör olan sürekli aynı potansiyelde enerji üretimi sağlanamaması sebebiyle, maliyet etkin biçimde kullanılamamaktadır. Araştırmalarımda güneş enerjisi için fotovoltaik sistemler kullanılarak direkt veya yoğunlaştırılmış termal sistemler kullanılarak dolaylı elektrik üretimi üzerine bilimsel ve ticari uygulamalar bulunmakta olup, rüzgâr ve güneş enerjisinin birlikte hibrit olarak kullanılmasına yönelik çalışmalara da rastlanmaktadır. Yenilenebilir enerjiler açısından oldukça zengin bir potansiyele sahip Türkiye'nin rüzgâr ve güneş enerji kaynakları için coğrafi konumunun çok uygun olması nedeniyle ülkemizde yenilenebilir enerji açısından yapılan çalışmaların çoğunun rüzgâr ve güneşle ilgili olduğu görülmektedir.

Yeni enerji kaynakları aranırken en önemli kriter hem yeterli hem de sürekliliği sağlanabilen bir kaynak olmasıdır. Bu bağlamda doğada güneş ve rüzgâr her zaman ve aynı seviyede bulunmayan yani bir gün içerisinde bile yerine ve saate göre bir istikrara sahip olmayan kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanırken sürekliliği ve istikrarı sağlamak için hibrit sistemler tasarlanmıştır. Hibrit sistemler birden fazla sistemi bir uyum içerisinde sürekli ve istikrarlı enerji sağlayacak şekilde kaynakları kullanan tasarımlara sahip sistemlerdir. En önemli önceliği sıfır karbon salımına sahip enerjinin üretilmesidir. Bu çalışmada fosil yakıt kullanılarak enerji üreten bir sistemde uygun maliyetli ve mümkün olduğunca var olan emisyon değerlerinin altında bir hibrit sistem modellendiği için sıfır

emisyon mümkün olmamıştır. Fosil yakıtların tamamen ortadan kalkmasıyla oluşturulan hibrit sistemlerde sifıra yakın hatta bazı değerlerde sıfırın elde edildiği görülmektedir. Bu çalışmada da yenilenebilir enerji kullanımı arttıkça fosil yakıt kullanımı azalmakta ve emisyon değerleri daha iyi sonuçlar vermekte olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan araştırmada yenilenebilir enerji kapsamında ikili hibrit sistemlerde şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız birçok çalışmaya rastlanmıştır. Bazı rüzgâr ve güneş hibrit sistemlere bakıldığında genellikle farklı yapılarda imal edilmiş rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri hatta hibrit sistemlerdeki dönüştürücü, şarj regülatörü, akümülatörler de sistemden elde edilebilecek maksimum ve minimum güçler için incelenerek farklı senaryolar için değerlendirildiği görülmüştür. Yapılan çalışmada bu çalışmalardan farklı olarak maliyeti ve geri dönüşümü açısından en uygun türbin ve panel seçilerek oluşturan üçlü hibrit sisteme göre bileşenleri önceden tayin ederek en verimli şekilde bölgesel olarak hangilerinin o bölgeye hangi oranda yerleştirileceği bulmaya çalışılmıştır.

Enerji üretiminde yıl boyunca ihtiyaç duyulan baz yüklerin yenilenebilir enerji kaynakları, pik yüklerin ise fosil yakıtlarla karşılanması uygun maliyet ve sürekli üretim için en elverişli uygulama olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtlardan temiz enerji kaynaklarına geçişin arttığı bu dönemde geçiş sürecinde doğal gazı sadece enerji sürekliliğini sağlamak için kullanmakla minimal düzeyde tutarak asıl yükü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayan hibrit bir sistem tasarlanmıştır

Bu çalışmada hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız bir sistemde ülkemizde oldukça az uygulaması olan fosil yakıtla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı hibrit üretim sistemlerinin, ihtiyaç duyulan baz yüklerin yenilenebilir enerji kaynaklardan, pik yüklerin ise fosil yakıtlarla karşılanmasının uygun maliyet ve sürekli üretim için en elverişli uygulamalardan biri olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır. Enerji üretimi üzerine yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde yenilenebilir enerjilerle en verimli, tasarruflu sistemler olması nedeniyle bu çalışmada kojenerasyon ve yenilenebilir enerjilerin bir arada olacağı bir sistem tasarlanmıştır. Ege bölgesinde Denizli ilinde kurulu gücü 12 MW olan bir kojenerasyon santralinden alınan verilerle birlikte, bölgedeki rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeline bağlı olarak teknoekonomik ve çevresel analizleriyle, maliyet etkin ve düşük karbon salımlı, geri ödeme süresinin minimum olduğu, sürekli enerji üretimi sağlayabilen ve bu üç enerji kaynağının optimum kullanım oranlarının elde edilebileceği en uygun sistem tasarımı bulunmuştur.

Bu modelleme için, simülasyon ve optimizasyon için HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) yazılımı kullanılarak maliyeti en uygun olan hibrit enerji

sistemi bulunmuş ve duyarlılık (hassaslık) analizleri yapılan simülasyonlarda mevcut potansiyele göre hangi enerji sisteminin daha uygun olduğu tespit edilmiştir [1].

1.2. Literatür Taraması

Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanırken sürekliliği ve istikrarı sağlamak için hibrit sistemler tasarlanmıştır. Hibrit sistemler birden fazla sistemi sürekli ve istikrarlı enerji sağlayacak kaynakları bir uyum içerisinde kullanan tasarımlardır. En önemli hedefi sıfır karbon salınımına sahip enerjinin üretilmesidir. Var olan fosil yakıtların kullanıldığı sistemlerde fosil yakıtı mümkün olduğunca azaltan sistemler amaçlanır. Bu durumda hedef olabildiğince düşük emisyonlu ve maliyetli sistemler tasarlamaktır.

Hibrit yenilenebilir enerji sistemini inceleyen önceki çalışmalarda yapılan araştırmada yenilenebilir enerji kapsamında ikili hibrit sistemlerde şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız birçok çalışma bulunmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerjilerinin birlikte kullanılmasının amaçlandığı hibrit sistemlere bakıldığında genellikle farklı yapılarda imal edilmiş rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri hatta hibrit sistemlerdeki dönüştürücü, şarj regülatörü, akümülatörler de sistemden elde edilebilecek maksimum ve minimum güçler için incelenerek farklı senaryolar için değerlendirildiği görülmüştür.

Dursun [2] tez çalışmasında, Kırklareli Üniversitesi Kayalı yerleşkesi Merkezi Derslik-2'nin elektrik enerjisi gereksinimini birden fazla yenilenebilir enerji kaynağı kullanılarak karşılanmanın mümkün olduğunu analiz etmiştir. Bu çalışmada rüzgâr, güneş ve biyokütle enerji kaynakları kullanarak oluşturulan hibrit yenilenebilir güç üretim sistemi ile yüklerin karşılanması üzerine bir çalışma yapılmıştır. Karşılaştırmalı ekonomik analizini yapabilen ve sistemlerin toplam bugünkü net maliyetlerine (Total Net Present Cost) göre sıralayabilen HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) yazılımını kullanmıştır. Dursun [2]'un vardığı sonuçlara göre bir sistemin ömür boyu maliyeti hesaplandığında yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen sistem ekonomik görülebilir. Sistem bileşenlerinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda ise hibrit yenilenebilir güç üretim sistemlerinin birbirlerine göre karşılaştırılmalı analizinden elde edilen sonuçlar irdelenmektedir.

Çalışmalarda daha çok ev derslik gibi lokal ihtiyaçlar için hibrit sistem tasarımları görülmektedir. Örneğin Karadöl 2017 yılındaki çalışmasında sadece bir evin günlük enerji ihtiyacını karşılayabileceği ve ihtiyaç fazlası enerjinin şebekeye aktarılabilmesi düşünülen Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Avşar kampüsünde, ikili hibrit sistem olan güneş

ve rüzgâr enerjili hibrit bir sistem tasarlamıştır. Çalışmada güneş panelinden ve rüzgâr türbininden elde edilen gerilim ile akım değerleri günün farklı bölümlerinde alınmış ve değerlendirmiştir [3].

Jafarzadeh [4] çalışmasında İTÜ Ayazağa kampüsünde kurulabilecek bir rüzgâr/güneş hibrit enerji santralının optimizasyonu ve yıl içinde bu santraldan elde edilebilecek elektrik enerjisinin hesabı ele alınmıştır. Lisanssız üretim sınırları içinde kalması planlanan santralin toplam kurulu gücü 900 kW ile sınırlandırılmış, İTÜ Ayazağa kampüsü için güneş enerjisinin öncelikli olduğu sonucuna varılmıştır. Kampüs binalarının çatılarına güneş panelleri kurulması fakat çatı kurulumlarında yer sorunu öne çıktığı için, en yüksek kurulu gücü sağlamak açısından verimi en yüksek olan panel tipi olan mono-kristal kullanılması önerilmiştir.

Farklı coğrafyalardaki güneş ve rüzgâr verilerinin değerlendirilmesiyle bu verilere en uygun hibrit sistemlerin tespit edilmesine yönelik çalışmalar da sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Güllökkan [5] yaptığı çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan, güneş ve rüzgâr enerjileri ile iki farklı coğrafi konumda bulunan ve farklı iklimsel özelliklere sahip bölgelerdeki müstakil konutların elektrik ihtiyacını karşılayacak fotovoltaik ve rüzgâr enerji hibrit sisteminin tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. Coğrafyalardaki iki yerleşim biriminin güneş ve rüzgâr verileri karşılaştırılarak optimum sistem konfigürasyonunu oluşturan tasarımın uygulanabilirliği üzerinden avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte değerlendirilerek yapılmıştır. Bu çalışmada da yaygın olarak kullanılan HOMER yazılımı enerji modelleme programı olarak kullanılmıştır Sistem tasarlanırken şebeke bağlantılı olmak üzere; yakıt optimizasyonu, yük ihtiyacını sıfırlayan ya da en aza indirecek şekilde ve müstakil konutun bir yıllık elektrik ihtiyacı kadar elektrik enerjisi üretebilen optimum sistemin boyutlandırılması ve optimizasyonu olmak üzere farklı senaryolar üzerinde durulmuştur

Tabak [6] çalışmasında sistemde fotovoltaik paneller, rüzgâr türbini ve biyogaz olmak üzere üç sistemden oluşan bir hibrit sistemden, çalışmanın kapsamındaki Karabük Üniversitesi Kampüsü'nde bulunan İktisadi İdari Bilimler Fakültesi'nin yük ihtiyacını fotovoltaik paneller, rüzgâr türbini ve biyogaz ile sağlarken anlık olarak tüketilemeyen enerji ise atık yük vasıtasıyla harcanan bir sistem tasarlamıştır. Bu üç kaynağın optimum boyutlandırmasından sonra enerji maliyetini de göz önünde bulundurup amaç fonksiyonu olarak toplam net bugünkü değerin denklemi seçildiği, güç kaynağı kaybı Olasılığını değerlendiği çalışma sunmuştur. Genetik Algoritma ve Isıl İşlem Algoritması ile sonuç

çıkarmış, çözümleri kendi içinde performans açısından karşılaştırmıştır. Sonuç olarak etkili bir kontrol stratejisi ile fakülte binasının elektrik enerjisi ihtiyacı hibrit sistemle karşılamıştır.

Benzer çalışmalar için farklı bölgeler ve farklı yüklerde tüketim ihtiyaçları seçilerek yapıldığı gibi yine bu çalışmalarda farklı modellemelerin de kullanıldığı görülmektedir.

Gün'ün 2019 yılında yapılan çalışmasında İstanbul ve çevresinde yapılan ölçüm verileri ile rüzgâr ve güneş analizleri yapılmıştır. Ömerli, Ormanlı, Bağırganlı, Melen Yolu ve Kıyıköy olmak üzere toplam beş bölgenin detaylı rüzgâr, güneş, hibrit üretim ve hasılat analizleri yapılmıştır. Bazı çalışmalarda uygun sistemler hedefteki enerjiye göre tespit edilirken bu çalışmada olduğu gibi bazı sistemler çalışmanın başında sabit tutularak bölgeler değiştirilmektedir. Yapılan analizde aynı marka ve model türbin, dönüştürücü ve paneller kullanılarak belirlenen bölgeler için rüzgâr ve güneş potansiyelleri incelenerek, rüzgâr-güneş hibrit sistem için kapasite faktörleri belirlenerek modellenmiştir. AWS Openwind programı ile belirlenen sahaların rüzgâr potansiyelleri hesaplanarak saatlik üretim analizleri, PVsyst programı ile de güneş analizleri yapılarak saatlik üretim sonuçları elde edilmiş ve üretimler birer yıllık saatlik veri setlerine dönüştürülerek hibrit üretim analizi değerlendirmesi yapılmıştır. ANFIS modellemesi bulunan ortalama değerler ve veri setleri arasındaki ilişkiler ile yapılmış ve bulanık mantık kullanılarak ilişkiler değerlendirilmiş ve modellenmiştir. Gerçek veri ile ANFIS'in ilişkilendirilerek hesaplayıp sonuç olarak oluşturduğu veriler arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bir sonraki ayın hibrit üretimi için ANFIS'in başarılı sonuç elde ettiği sonucuna varılmıştır [7].

Farklı bir modelleme kullanımını da Kilercioğlu'nun 2019 yılında yaptığı çalışmada görülmüştür. Bu çalışmada yenilenebilir enerjili hibrit sistemlerin önemi vurgulanarak şebekeden bağımsız bir güneş-rüzgâr hibrit sistemi MATLAB/ simulink'te modellenmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir [8].

Özsoy [9]'un yaptığı çalışmada Afyon Kocatepe Üniversitesinde bulunan Elektrik laboratuvarının genel aydınlatması için gerekli elektrik enerjisinin, hibrit rüzgâr-güneş güç üretim sistemi ile karşılanabilmesi için, Afyonkarahisar iline ait güneş ve rüzgâr verileri değerlendirilerek, en uygun sistem bileşenlerinin bulunması ve maliyetini tespit edilmesi amaçlamış. Optimizasyon işlemleri ve tüm hesaplamalar yine MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmanın sonunda elde edilen bulgular ve bunlara etki eden parametreleri vererek sonuçlar değerlendirmiş

Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan saatlik güneş ve rüzgâr verileri kullanılan güneş-rüzgâr hibrit sistem tasarımı için bir optimizasyon çalışması yapan Baran [10], yılındaki çalışmasında hibrit güneş-rüzgâr güç üretim sistemlerinin tasarımında

değişen atmosferik koşullar altında hibrit sistemde yükün güçsüz kalma olasılığı ve bu olasılığa bağlı olarak oluşan sistem maliyeti olmak üzere iki kriter belirleyerek çalışmasını sürdürmüştür. Bu çalışmada optimum sistem için her iki kriterin minimum olduğu değerleri hesaplamak amacıyla MATLAB’da bir program yazılmış karar değişkenleri güneş pili sayısı, rüzgâr türbini sayısı, batarya sayısı ve rüzgâr türbini kurulum yüksekliği alınmıştır. Çalışma sonunda tasarım sonuçları verilmiştir. Tasarlanan sistemin sonuçlarını doğrulamak için, farklı rüzgâr hızı olan Çanakkale ilinin de hibrit sistem tasarımı yapılmıştır [10].

Enerji üreten sistemlerin tasarlanmasında en önemli kriterlerin çevreye, ekonomiye yaptıkları katkıların yanında sürdürülebilir ve istikrarlı bir potansiyele sahip olmalarıdır. Sistemlerin bileşenin sayısı, gücü gibi özellikleri kapsayan teknik verilerin, başlangıç, işletme, bakım, onarım maliyetleri, kullanım ömrü gibi özellikleri kapsayan ekonomik verilerle birlikte kullanılarak yapılan ve aynı zamanda sistemin fizibilite çalışmasının temelini oluşturan analiz sistemine teknoekonomik analizi denir. Bu analizler bir yatırımcının bir tesise yatırım yapma kararı alma aşamasında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada teknoekonomik ve çevresel optimizasyon da hedeflenmiştir. Bu kapsamdaki incelemelerde çalışma konusu kapsamında benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Fakat farklı sistemler için bu analizlerin yer aldığı bazı çalışmalar bulunmuştur.

Aykut [11] tez çalışmasında enerji ihtiyacının konvansiyonel enerji kaynakları ile karşılanan Marmara Üniversitesi Göztepe Yerleşkesi için yenilenebilir enerji kaynakları temelli bir hibrit güç üretim sistemi önerilmiştir. Rüzgâr, güneş ve biokütle enerji kaynakları ile yerleşkenin enerji ihtiyacının karşılanabileceği optimum hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarının ve en uygun hibrit güç üretim konfigürasyonların belirlenmesinde yine HOMER yazılımı ile detaylı olarak analiz edilmiştir. Birim enerji maliyetini dikkate alarak en optimum güç üretim sistemi belirlenmiştir. Aynı zamanda her bir hibrit güç üretim sistemi için bugünkü toplam net maliyet, başlangıç maliyeti ve bakım onarım maliyeti gibi diğer ekonomik parametreler yanında CO, CO₂, SO₂, NH₃ gibi sera gazı emisyonlarını içeren çevresel parametreler de incelenmiştir.

Güneşle ve rüzgâr enerjinin birlikte değerlendirildiği hibrit bir sistemin incelendiği çalışmalar oldukça fazladır. 2018 yılına ait Kahraman [12] tarafından yapılan çalışmada yine Kütahya fakat daha geniş bir alan içim seçilen lokasyonda yenilenebilir enerji potansiyellerinin teknoekonomik analizi ve iki ayrı finansman senaryosu içerisinde muhtemel santral fizibiliteleri yapılmıştır. Maliyet analizleri için HOMER yazılımı kullanılmış olup iklim verileri ve üretililecek enerji miktarlarının hesaplanması

aşamasında RET Screen yazılımı kullanılmıştır. 1MW kurulu güce sahip iki ayrı enerji santrali tasarlanmış ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir [12].

Bu çalışmada güneş ve rüzgâr enerjilerinin yanında doğal gaz da kullanılarak üçlü hibrit bir sistem tasarlanmış ve seçilen bölgedeki veriler kullanarak optimum sonuçlara ulaşılmıştır. Bu zamana kadar yapılmış önceki çalışmaların incelemesinde içerisinde bu çalışmanın konusu olan doğal gaza üçlü hibrit sistemler ve içerisinde teknoekonomik, çevresel analizin değişen enerji kaynaklarıyla ve şebeke bağlantısı kriterleriyle değerlendirme yapan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Doğal gaz çalışmaları daha çok doğal gaz elektrik santrallerinin optimizasyonu üzerine olduğu görülmektedir. Yine de çalışma konusu olarak yararlanılabilecek bilgiler anlamında en yakın çalışma Subaşı [13] tarafından 2019 yılında yapılmış fakat içerik doğal gazın ve yenilenebilir enerjilerin ayrı ayrı CO₂ Emisyonları açısından karşılaştırmalı yorumu çerçevesinde kalmaktadır. Mühendisliğe dayalı bir çalışma değildir. Subaşı 1990 yılından sonra enerji-ekonomik büyüme ilişkisine CO₂ emisyonunun sonraki yıllarda spesifik değişkenlerin eklenmesiyle veri olarak kullanılıp üzerine çeşitli araştırmalar yapıldığından bahsetmektedir. CO₂ Emisyonları, Doğal gaz, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye'deki Dinamik Değişkenlerin Analizi üzerine yapılan çalışmasında 1984-2017 yıllarına ait yıllık kişi başına düşen gayri safi yurtiçi hasıla, CO₂ emisyonu, doğal gaz ve yenilenebilir enerji tüketim verileri kullanarak bu değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin varlığının tespit edilebilmesi için eş bütünleşme testi uygulamıştır. Sonuçta uzun dönem gelir esnekliğinin zaman içinde azalacağını ve ekonomik büyümenin CO₂ salınımının azaltılmasının yararlarının zaman içinde olacağını göstereceği vurgulanmıştır [13].

Ahmad vd., 2018 [14] yılında yayımlanan çalışmalarında Pakistan'ın Pencap eyaletinin Chakwal yakınlarındaki Kallar Kahar'ın yerel sakinleri için şebekeye bağlı bir hibrit mikrogrid sisteminin teknoekonomik analizine yani fizibilitesine odaklanmakta ve hibrit rüzgâr, fotovoltaik ve biyokütle sistemi yoluyla elektrik üretimi potansiyelini araştırmaktadır. Yine yaygın bir yazılım olan HOMER-Pro yazılımını tercih etmiştir Optimizasyon ve duyarlılık analizi sonuçlarını önerilen hibrit mikro-grid sistemi için maliyet analizlerinde kullanmıştır. Bu çalışmada toplam yük, rüzgâr, fotovoltaik ve biyokütle kaynakları yoluyla üretilen güç arasında en iyi şekilde paylaşılmıştır ve yükün düşük yerel talebi durumunda fazlalık güç ulusal şebekeye aktarılmaktadır. Kullanılan yazılımla duyarlılık analizinden, optimum konfigürasyonun önerilmesine kadar birçok değerlendirme yapılmıştır [14].

Yayımlanan çalışmalarda özellikle bölgesel verilerin değerlendirilerek bazı yazılım programları aracılığıyla yapılan üçlü hibrit sistemlerin teknoekonomik analizlerine rastlamak mümkündür. Bunların çoğunda hidrojen üretimi üzerinden değerlendirilme yapılmıştır. Bunlardan biri de Samy vd. [15], 2020 yılında yapılan çalışmadır. Samy vd. bu çalışmasında PV / rüzgâr / FC (yakıt hücresi) bazlı çok kaynaklı yenilenebilir enerji kullanılarak Mısır'da rustik elektrifikasyon için teknolojik ekonomik analizini yapmıştır. Matematiksel modelleme, simülasyon ve optimizasyon yaklaşımlarına dayanan teknoekonomik bir araştırma kullanılmaktadır. Simülasyon sonuçları, hidrojen üretimi için bir elektrolizör içeren güneş PV / Rüzgâr / Yakıt Hücresi kombinasyonunun mükemmel performans verdiğini göstermiştir [15].

Farklı bir örnek olarak Krishan vd. [16], çalışması söylenebilir. Enerji açısından fakir bir kırsal topluluk için PV, rüzgâr ve akü içerecek hibrit yenilenebilir enerji sisteminin üç farklı optimal yapılandırmasıyla teknoekonomik analizini yapmıştır. Hindistan'ın Haryana Eyaleti'ndeki Yamunanagar bölgesi seçtiği bu çalışmasında ekonomik analiz ve optimum boyutlandırma için, gerekli tüm modelleme ve simülasyon HOMER yazılımı, teknik analiz için, optimize edilmiş sistemin MATLAB kullanarak simülasyon modeli oluşturulmuştur. Diğer çalışmalardan bu çalışmayı ayıran hem HOMER hem de MATLAB simülasyon araçlarını sırayla kullanması olmuştur [16].

Suudi Arabistan'ın doğu kıyı kenti Jubail sanayi kenti örnek olay incelemesiyle Baseer vd. [17], üç konut bileşiği için pil depolama ile PV / Rüzgâr / Dizel ve PV / Rüzgâr hibrit enerji sistemlerinin teknoekonomik tasarımı ve değerlendirilmesini içeren bir çalışma yapmıştır. HOMER yazılımı kullanılarak optimum bir sistem belirlemiş ve bu sistem için değerlendirmeler yaparak her yıl 2800 ton karbondioksit emisyonu tasarrufu sağlayacağı sonucuna varmıştır.

Rüzgâr-güneş-yakıt hücresi sistemlerinden oluşan üçlü hibrit sistem incelemesi Haddad vd. [18], tarafından 2020 yılında yapılmıştır. Önerilen sistemin avantajını sunmak için Lübnan'daki Dahr Al-Baidar bölgesi ile ilgili bir vaka çalışması yürütülmüştür. Sonuçlar rüzgâr enerjisi sisteminin termal güneş sistemi ile birleştirilmesinin, özellikle kışın güneş termal sistemlerinin ürettiği düşük gücün üstesinden gelmeye izin verdiğini gözler önüne sermiştir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında hibrit sistemlerin yanında sadece bir yenilenebilir enerji kaynağı optimum enerji verimi için bu kaynağın boyutlandırması ve kaynak değerlendirmesiyle ekonomik uygulanabilirliği araştırmaları da yapılmıştır. Ramadan vd., 2017 Mısır'ın Sina Yarımadası için böyle bir çalışma gerçekleştirmiştir. WAsP ve WindPRO

yazılımını kullanarak, rüzgâr çiftliği net yıllık enerji üretimi beklenen 840.62 GWh olarak hesaplanmış Ulusal Elektrik Tarifesi ile ekonomik olarak uygulanabilir olarak görmüştür. Yaptığı incelemeyle önerilen rüzgâr çiftliğinin fizibilitesi ekonomik olarak doğrulanmıştır [19].

Mezzai vd. [20], 2014 yılındaki çalışmasının konusu dönüştürücü yoluyla yük sağlayan bir akü deposunun da dahil olduğu hibrit fotovoltaik / rüzgâr / yakıt hücresi güç sisteminin modellenmesidir. Her bir alt sistemin tanımlaması yapılmış ve önerilen sistem Matlab / simulink paketi altında modellenmiş ve simüle edilmiştir. Hibrit sistemin güç kontrolü LabVIEW Yazılımı kullanılarak tanıtılır. Çalışmanın sonunda hibrit sistemin etkinliği gösterilmektedir.

Şebekeye bağlanmayan fotovoltaik-rüzgâr hibrit sisteminin boyutlandırılması ve teknoekonomik analiz ve optimizasyonu Belmili vb. [21], tarafından değerlendirilen bir çalışmada yapılmıştır nesneye yönelik programlamaya dayalı esnek yazılımlardan tasarımın geliştirilmesinde yararlanılmıştır. PV – Windsystems programı, fotovoltaik ve rüzgâr jeneratörü modelleri, depolama kapasitesi modelleri, Güç Kaynağı Olasılık Kaybı (LPSP) algoritması ve en düşük yatırımla güvenilir bir enerji tedarikini garanti edecek sistemi belirlemek için önerilen bir teknoekonomik algoritma temelleri üzerine inşa edilmiştir.

Şebekeden bağımsız başka bir örnek çalışmayı da Guangqian vd., 2018 yılında hazırlamıştır. Şebekeden bağımsız biyodizel tabanlı hibrit güneş / rüzgâr sistemlerinin modellenmesinde hibrit algoritma tabanlı optimizasyonunda hibrit rüzgâr / fotovoltaik / biyodizel / pil sistemlerinin boyut optimizasyonunu formüle etmek ve bu optimizasyon problemi üzerine hibrit bir algoritma önermektir. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen hibrit uyum arama simülasyonlu hibrit fotovoltaik / biyodizel / pil sistemi elektrik yükü tedarik etmek için en iyisi olduğunu göstermiştir [22].

Liu vd. [23], 2019 yılında yaptığı çalışmaya göre hem hidrojen hem de metan, bütünleşmiş enerji sistemlerinin doğasında bulunan esnekliğin kilidini açma konusunda önemli potansiyele sahip mevcut doğal gaz sistemine enjekte edilebilir. Operasyonel maliyeti en aza indirmeyi amaçlayan güçlü hidrojen ve güçlü metan dikkate alan hibrit güç-doğal gaz enerji sistemlerinin koordineli çalışma stratejisi önerilmektedir.

Tahani vd. [24], yaptığı çalışmada en yaygın yenilebilir enerji kaynaklarından PV (Fotovoltaik) ve rüzgâra batarya (akü) da eklemiş ve sisteminin optimizasyonu, hibrit FPA / SA algoritması ve CFD simülasyonu kullanılarak Tahran örnekleminde analizler yapmıştır. Çalışmana tamamlandığında PV paneller için eğim açısının 30'a eşit olarak ayarlanması ve PV panel sayısının 11'e eşit olarak seçilmesi durumunda, 12 yıl ve iki ay olan en hızlı geri

ödeme süresinin ve LPSP ile% 3,28'e kadar maksimum kümülatif tasarrufun meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Diab vd. [25], 2016 yılında Mısır bölgesi için hibrit bir sistem üzerine çalışmıştır. Mısır'da temiz enerji kaynakları olarak çok miktarda enerji sağlayacağı düşünülen güneş enerjisi ve rüzgâr olması göz önüne alındığında bu çalışma Mısır ve Yeni Borg El Arab şehrinde çevre dostu bir fabrikanın elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak için hibrit fotovoltaik / rüzgâr / dizel / akü sistemi kullanmanın detaylı fizibilite ve teknoekonomik değerlendirmesi yapılmıştır.

Singh vd. [26], kırsal bir alanda tercih edilen bu çalışmasında sisteme pil de eklenerek PV, rüzgâr, biyokütle ve pil enerjisi depolama sisteminden oluşan bir mikro şebekenin fizibilite çalışması yapılmıştır. Bu makale, küçük bir alanın elektrik yükü ihtiyacını karşılamak için biyokütle ve depolama ile hibrit bir PV-rüzgâr üretim sistemi değerlendirilmektedir. Bileşenlerin optimum boyutlandırılması için, yakın zamanda tanıtılan sürü bazlı bir yapay arı kolonisi (ABC) algoritması uygulanıp, (HOMER) ve partikül sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılır. Çıkan sonuç önerilen şemanın aynı optimal konfigürasyonla düzgün bir güç akışını yönetebildiğidir [26].

Rüzgâr ve güneş enerjisine dayanan hibrit yenilenebilir sistem, elektrik depolama ile birleştirilerek dinamik simülasyon ve ekonomik değerlendirme süreciyle ilgili farklı bir çalışmayı da Buonomano vd. [27], 2018 yılında gerçekleştirmiş depolama sistemi olan veya olmayan ve farklı kullanıcılar için farklı sistem düzenleri çalışarak çoğu çalışmaya göre biraz farklılık yaratmıştır. Her çalışmada tasarlanan sistem başarılı sonuçlar vermemiştir. Modellenen sistemin dinamikleri ekonomik analizlerin olumlu sonuçlanmasını zorlaştırmıştır. Bu çalışmada da maliyet analizi beklenen iyi sonuçları verememiştir. Bir enerji depolama sistemine bağlanmış rüzgâr türbini ve fotovoltaik teknolojilere dayanan hibrit yenilenebilir bir elektrik santralinin simülasyon modelini sunuyor. Toplam tesis kapasitesi 200 kW (sırasıyla fotovoltaik ve rüzgâr türbini için 190 kW ve 10 kW), enerji depolama kapasitesi 400 kWh'dır. Bu çalışmanın amacı, elektrik öz tüketimini en üst düzeye çıkararak şebekeye satın alınan veya satılan marjinal miktarlarda elektrikle sınırlı dalgalanmalar gösteren yenilenebilir bir elektrik santrali tasarlamaktır. Geliştirilen termo-ekonomik model, şebeke ile değiştirilen elektriğe uygulanan zamana bağlı tarifeleri ve elektrik depolama olasılığını göz önünde bulundurarak en iyi sistem konfigürasyonunu belirlemeye ve ekonomik karlılığı en üst düzeye çıkarmaya izin verir. Sonuçlar, işletme maliyetlerinde dikkate değer bir azalma olmasına rağmen, düşük verimlilik ve yüksek

sermaye maliyeti nedeniyle, depolama sistemi dahil olsa bile negatif kâr endekslerini (en kötü durumda 0,27 ve en iyi durumda depolama olmadan 0,61) göstermektedir [27].

Ferrari vd. [28], yine 2018 yılında uzaktan şebeke dışı uygulama için bir fotovoltaik-rüzgâr-dizel hibrit sisteminin optimum enerji karışımına etkisini incelemiş, hibrit bir PV-rüzgâr-dizel bağımsız sisteminin optimum konfigürasyonunu tahmin edebilen uzun vadeli bir enerji üretim maliyeti analizine dayalı bir boyutlandırma stratejisi geliştirmek için İtalyan Alper'indeki izole bir dağ evinin enerji ihtiyacını karşılamak için çalışmasını yapmıştır. Hibrit sistem, geleneksel dizel motor konfigürasyonuna göre maksimum uzun süreli tasarruf temel alınarak optimize edildi. Bu vaka çalışması için sonuçlar, en uygun çözümün, yenilenebilir kaynaklardan izin verilen maksimum katkıyı içeren ve üç kaynak arasında optimize edilmiş bir enerji karışımının varlığını vurgulayan bir çözüm olmadığını göstermiştir. Biriken aküler aynı zamanda hem yakıt tüketiminde hem de motorda geçici kullanımda bir düşüşe neden olabilir. Mevcut sonuçlara göre, uygun büyüklükte bir hibrit sistem, uzak bir tüketiciye sadece dizel konfigürasyonuna göre kayda değer para ve kirlilik tasarrufu sağlayabilir. Literatürde halihazırda mevcut olan konvansiyonel pratik tasarım yaklaşımları ile ilgili olarak, mevcut analiz gerçek makine verilerinin, gerçekçi sistem kısıtlamalarının ve maliyet fonksiyonlarının kullanımına dayandığından, sorunun daha gerçekçi bir açıklaması burada sağlanmıştır [28].

Karbon emisyonları için de yapılan bazı farklı çalışmalardan bahsetmek gerekirse Li vd. [29], 2019 yılında yaptığı Çin'de konsantre bir güneş enerjisi santralının CO₂ emisyonu ve enerji tüketimi için bütünleşmiş hibrit yaşam döngüsü değerlendirmesi ve katkı analizi iyi bir örnek olabilir. Güneş enerjisini tek bir odak noktasına yoğunlaştırarak elektrik sağlayan bir teknoloji olan konsantre güneş enerjisi (CSP), büyük ölçekli kullanım için büyük bir potansiyel göstermektedir. Bu çalışmada, Çin'de bulunan 10 MW'lık bir güç kulesi CSP tesisinin yaşam döngüsü CO₂ emisyonunu, enerji tüketimini ve enerji geri ödeme süresini değerlendirmek için Çin'in birçok bölgesi için bütünleşmiş bir hibrit yaşam döngüsü değerlendirme modeli sunulmuştur. CSP tesisinin 25 yıllık yaşam döngüsü boyunca 35 g / kWh CO₂ emisyonuna sahip olduğu, 514 kJ / kWh enerji tükettiği ve dört yıla yakın bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğu tahmin edilmektedir. Önerilen hibrit modelini kullanarak, önemli bir avantaj, girdi-çıktı ekonomik arka planında her sektörden kaynaklanan yaşam döngüsü etkisini karşılaştırma yeteneğidir. İl düzeyinde ekonomik geçmişin bölgeselleşmesine bağlı olarak, en dikkat çekici etki Hubei eyaletinde görülmüş ayrıca her ilde elektrik sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonu için en büyük katkıyı sağlamıştır. CSP tesisinin yaşam döngüsü CO₂ emisyonunun çoğunluğuna (% 54), bu

bölgenin ekonomisinde enerji tüketiminde çoğunlukla kömürün kullanıldığı Çin'in kuzey bölgesi katkıda bulunmuştur [29].

Çok az yapılan doğal gaz çalışmalarından biri de Rashid vd. [30], 2019 yılında yayımlamıştır. Sinerjik bir güneş ve doğal gaz hibrit santralinin dinamik simülasyonu, kontrolü ve performans değerlendirmesinin yapıldığı simülasyon tabanlı çalışmada, güneş enerjisini toplamak için parabolik bir oluklu güneş yoğunlaştırıcı kullanılır. Güneş alanından toplanan ısı, Rankine döngüsünde buhar üretmek için kullanılır. Sistem aynı zamanda, bulut örtüsü veya gece nedeniyle güneş yoğunluğu azaldığında, buhar jeneratörünün doğal gaz yanmasını kullanır. Doğal gaz, sistemin daha yüksek sıcaklıklar üretmesine ve artan termodinamik döngü verimliliği elde etmesine izin veren buharın aşırı ısıtılması için de kullanılır. Bu esnek tasarım nominal koşullarda 100 MW üretirken, yeterli güneş enerjisi mevcut olduğunda maksimum 140 MW üretebilir. Bu çalışmanın yeni katkıları, hibrit bir güneş santralinin eksiksiz, sistem düzeyinde, dinamik bir modelini içeriyor. Model, sistemi gece doğal gaz modundan gün boyunca güneş hibrit moduna sorunsuz bir şekilde geçiren bir kontrol sistemi ile tamamlandı. Esnek yakıt çalışması, verimliliği artırmak için buhar kızdırması ve güneş veya atık ısı ile ön ısıtma gibi yenilikçi tasarım özellikleri değerlendirilmiş güzel bir çalışmadır. Ayrıca, bu çalışma, bir güneş sisteminin dağıtılabilir bir enerji kaynağı ile melezleştirilmesiyle, güneş enerjisi üretiminin güvenilirliğinin ve verimliliğinin arttığını göstermektedir. Yıllık güneş-elektrik verimliliği hibrit bir sistem oluşturulmasıyla % 15.2'den % 26.13'e yükselir, bu da güneş enerjisi kullanımının etkili bir şekilde arttığını gösterir [30].

Üçlü hibrit sistemlerin hepsini sadece yenilenebilir enerji kaynaklarından seçen, güç dengesi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanan çalışmaları, son yıllarda yaygın olarak görmek mümkündür. Farklı bir örneği de Reikard vd. 2015 yılında dalga enerjisini rüzgâr ve güneş ile birleştirerek kısa vadeli tahmin içeren bir çalışmada görmekteyiz. Çalışmasında rüzgâr ve güneş ile dalga enerjisinin şebekeye entegre edilmesini analiz etmiştir. Yük 24 saat ve yedi gün döngüleri, mevsimsellik ve uzun vadeli eğilim gösterir. Güneş enerjisine günlük döngü ve mevsimsellik hakimdir, aynı zamanda bulut örtüsü, atmosferik bulanıklık ve yağış nedeniyle doğrusal olmayan değişkenlik gösterir. Rüzgâr gücü, yüksek ve düşük güç durumları arasında düzensiz geçişler olan büyük rampa olayları tarafından yönetilmektedir. Dalga enerjisi mevsimsel döngüler sergiler ve genellikle daha yumuşaktır, ancak özellikle kış aylarında hala bazı büyük geçişler vardır. Tahmin deneyleri, yük ve her üç yenilenebilir enerji türü için 1-4 saatlik süreçler üzerinde gerçekleştirilir. Dalgaların rüzgâr ve güneşten daha öngörülebilir olduğunun bulunduğu çalışmada simüle edilmiş dalga çiftlikleri için

bir saatlik tahmin hatası yüzde 5-7 aralığındayken, güneş ve rüzgâr tahmin hataları yüzde 17 ve 22'dir. Coğrafi dağılım tahmin doğruluğunu artırır. 1 saatlik süreçte, büyük ölçekli dalga çiftlikleri için tahmin hatası, bireysel şamandıralara göre yüzde 39-49 daha düşük tespit edilmiştir. Şebeke entegrasyon maliyetleri dengeleme rezervleri hesaplanarak belirlenen çalışmada dalgaların en düşük rezerv maliyetinin, yarı rüzgâr ve güneşten daha az olduğu tespit edilmiştir [31].

Talaat vd. [32], 2019 yılındaki çalışmasında dalga, güneş ve rüzgâr enerjilerini entegre etme yeteneğini araştıran deneysel ve simülasyon çalışma yapmıştır. Çalışmasında PV / Rüzgâr / Dalga enerjisi hibrit sisteminin dinamik modellenmesi ve kontrolü sunulmuştur. Deneysel test alanı, bu üç farklı yenilenebilir enerji türü için bunları nasıl bütünleştireceklerini ve enerji üretimlerini nasıl birleştireceklerini incelemiştir. Bu enerjinin elektrik enerjisine nasıl aktarılacağı konusunda zorluk Rüzgâr ve güneş enerjisi de güneş ışınlamındaki değişiklikler ve rüzgâr hızı gibi farklı çevresel koşullar dikkate alınarak incelenmektedir. Bu nedenle, rüzgâr ve güneş enerjisinin dalga enerjisi ile entegrasyonu büyük bir zorluktur. Hibrit enerji sisteminin analiz ve simülasyon modellemesi MATLAB / simulink ortamı kullanılarak gerçekleştirmiş, Buck-boost devresi kavramı, bütünleşmiş devrenin tasarımında sunulmuş ve araştırılmıştır. Simüle edilen modelin etkinliğinin pratik olduğu ve modelin önerilen üç enerjinin entegrasyonunda kullanıldığı kanıtlanmıştır.

Çalışmalar incelendiğinde Matlab / Simulink, AWS Openwind programı, PVsyst programı PV – Windsystems programı, HOMER yazılımı, WAsP ve WindPRO yazılımları, partikül sürü optimizasyonu (PSO), CFD simülasyonu, FPA / SA algoritması ve sürü bazlı bir yapay arı kolonisi (ABC) algoritması gibi birçok yazılım, simülasyon ve optimizasyon uygulamaları, farklı algoritmalar kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada hibrit sistemler için giderek yaygın kullanılan ve birçok çalışmada farklı programlarla da kıyaslandığında doğru sonuçlar veren HOME pro yazılımı kullanılmıştır.

Yapılan tüm çalışmalardan çıkan en önemli sonuç aslında yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlandığı hibrit sistemlerin uygun yazılım programlarıyla modellenmesi ve kurulum maliyetlerinin düşmesini sağlayacak teknolojilerin gelişmesiyle daha uygun maliyetlerle oluşturulan hibrit yenilenebilir sistemlerin gelecekte fosil yakıtların kullanıldığı enerji sistemlerinin yerini almasının mümkün olduğudur.

Bu çalışmaya en yakın görülen Özkoca [33]'nın çalışmasında doğal gazla çalışan kojenerasyon santraline sadece fotovoltaiik modül eşlik ederken, Tekbir sistem üzerinden hassaslık analizleri değişkenleri şebeke elektrik fiyatı ve elektrik üretimi için kullanılmakta

olan doğal gaz fiyatı kullanılmış ve maliyet üzerinden etkileri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ise modellenen sisteme rüzgâr türbinleri ve bataryalar da dahil edilmiş, karşılaştırılan simülasyonlarda değişen rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu üzerinden yenilenebilir enerji değişimlerinin sisteme yansımaları, kabul edilen doğal gaz ve elektrik fiyatlarının tüm uygulamaya etkileri de değerlendirilmiştir. Diğer benzer çalışmalarda ekonomik verilerde sistemler sabit tutularak maliyet üzerinden yorumlar yapılmış ya da sisteme eklenen ya da çıkarılan kaynaklar üzerinden sadece verim analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada geçen modellemenin aynısına rastlanmamış benzerlerinde ise hem teknoekonomik değerlendirme hem de emisyon değer karşılaştırmaları üzerinden bir çıkarım yapan çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada diğer çalışmalara göre en önemli fark var olan bir tesisin zararlı emisyon değerlerini düşürmesi açısından teknoekonomik olarak en iyi optimizasyonu bularak, bulunan bu modellemenin var olan önceki sisteme katkılarının incelenmesidir. İstenen sonuçlar elde edilmediğinde yine bunların nedenleri açıklanmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Fosil yakıtlardan temiz enerji kaynaklarına geçişin arttığı bu dönemde geçiş sürecinde doğal gazı sadece enerji sürekliliğini sağlayan pik yükler için minimal düzeyde kullanarak asıl yükün yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığı hibrit bir sistemin oluşturulması amaçlanmıştır. Yapılan literatür taramasında görüldüğü üzere çalışmalarda genellikle bir tesis ya da yerleşim yeri için ya yenilenebilir enerjileri kullanarak termal ve elektrik yükler karşılanmaya çalışılmış ya da yine pik yükler fosil yakıtlardan sağlanması koşuluyla yenilenebilir enerji kullanan sistemler modellenmiştir. Bu çalışmadaki en önemli fark var olan ve fosil yakıt kullanan bir tesise bölgeye uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı, sadece pik yüklerin fosil yakıttan sağlanması koşuluna uygun bir sistem modellemeyi amaçlamasıdır. Yenilenebilir enerjilerin fosil yakıt kullanan tesislere entegre edilmesiyle, hem yakıt kullanımındaki dışa bağımlılığı azaltarak ekonomik anlamda katkı sağlamak hem de zararlı emisyonları azaltarak çevreye duyarlı bir sistem modellemek amaçlanmıştır.

Modellenen sistemde, fosil yakıt olan doğal gazın kullanıldığı kojenerasyon santrale, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneşin seçilerek eklenmesiyle doğal gazda dışa bağımlılığı azaltarak, hem net şimdiki maliyeti hem de geri ödemesi açısından en uygun türbin ve güneş paneli (PV) seçilerek oluşturulan hibrit sisteme göre değerlendirmeler

yapılmıştır. Bileşenleri önceden tayin ederek en verimli şekilde bölgesel olarak hangi tasarımın uygulanabileceği kararına varılmıştır. Bu karar verilirken aynı zamanda emisyon değerleri de göz önüne alınmıştır. Bu sistemin tasarlanmasında, modellenmesinde, simülasyonu ve optimizasyonunda HOMER pro yazılımı kullanılmıştır.

Ham maddesi doğada bulunan saf madenler veya doğanın sahip olduğu güç olan enerji kaynakları ihtiyaç ve kullanım potansiyeline göre tüketilebilir enerji kaynaklarına dönüştürülmektedir. Yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarına sahip ülkemizde enerji elde etmek için bu kaynakların kullanımında farklı konum ve stratejileri olan coğrafi bölgeler bulunmaktadır. Elde edilecek enerji için bir strateji geliştirilirken bu kaynakların doğru kullanılabilmesi için hem yapılan yatırımların kazanımlara dönüştürülmesi hem de çevreye duyarlı sonuçlara ulaşması hedeflenmelidir.

Önceleri var olan enerji kaynaklarının direk ihtiyaca yönelik çözümlerde kullanılması ön plandayken artan çevre kirliliği ve ihtiyaçla birlikte artık dünyada olduğu gibi Türkiye’de de enerji yatırım hedeflerinin geri ödemesi daha kısa sürede olabilecek verimli yatırımların olmasının yanında düşük seviyelere çekilebilen fosil yakıt kaynak kullanımı ve çevreye duyarlı sistemler geliştirilmektedir. Bu sistemleri oluştururken kullanılacak yenilenebilir enerji kaynaklarının hangilerinin, ne ölçüde olabileceği seçilen bölgenin konumuyla doğrudan ilgili olmaktadır. Hibrit sistemler için kurulacak yerin ilgili kurumlardan izinleri, kurulum maliyeti, tüketim bölgesine olan konumundan şebekeye bağlanacaksa tüm alt yapıların sağlanma koşulları, sürekliliği sağlamak için nasıl bir sistemle ya da enerji kaynağıyla desteklenmesi gerektiği gibi birçok konunun ayrıntılarıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu süreçleri en doğru şekilde yönetebilmek için enerji kaynaklarına, kurulu güç değerlerine hakim olmak önem taşımaktadır. Modellenecek sistemi simüle edebilecek ve analizlerin yapılabileceği uygun bir yazılım programı seçilmelidir.

Sanayi tesislerinin çalışması, aydınlatılma, ısınması ve ulaşımın sağlanması büyük ölçüde enerjiye dayanmaktadır. Ülkelerin kalkınmasında önemli bir unsur olarak kabul edilen enerjinin üretilen ve tüketilen miktarları gelişmişlik düzeyleri belirtilirken önemli bir kriterdir.

Yenilenemeyen ve yenilenebilen kaynaklar olarak iki grupta toplanan enerji kaynaklarından yenilenemeyen enerji kaynakları kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan oluşup, tükendiğinde kimyasal değişime uğradıkları için yenilenememektedir. Zenginleştirilmiş uranyum kullanılarak elde edilen nükleer enerji, günümüzün ve geleceğin en önemli enerji kaynaklarından biri olarak kabul görmektedir. Petrol ve doğal gazın bazı ülkelerde geniş rezervler halinde bulunmaması ve bu kaynakların yenilenemez oluşu birçok

ülkeyi nükleer araştırmalara ve nükleer enerjiden faydalanmaya yönlendirmişse de nükleer santrallerin tükenmiş yakıt sorununun giderilmesi, santral güvenliği ve kaza riski gibi sorunları barındırmaktadır. Çernobil faciasında olduğu gibi doğaya ve insanlara çok feci zararlar verdiği bilinmektedir. Güneş, rüzgâr, su ve jeotermal enerjiden oluşan ve kendi kendilerini yenileyebilen kaynaklar ise yenilenebilen enerji kaynakları [34].

Bu çalışmada coğrafi bölge olarak rüzgâr ve güneş potansiyeli açısından ve Ege Bölgesi'nde benzerlik gösteren başka iller için de uygulanabilir verilere sahip olması nedeniyle Denizli ili örnek uygulama için seçilmiştir.

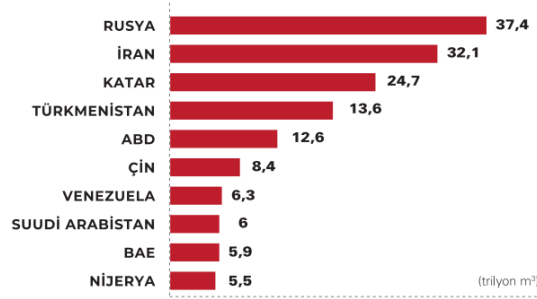
Çalışmada hem şebekeden bağımsız hem de şebeke bağlantılı sistem tasarımları yapılmıştır. Fosil yakıt kullanılmasını azaltmaya yönelik var olan kurulu güce sahip kojenerasyon doğal gaz santralinin sağladığı elektrik ve termal güçleri yenilenebilir enerji kaynakları olan güneşi ve rüzgârı kullanarak modellenen bir hibrit sistemle sağlanması planlanmıştır. Çalışmada teknoekonomik ve emisyon açısından en iyi sonuçlara ulaşabilen sonuçlar arasından sağlanan koşullara en uygun olanı önerilmiştir. Bu değerlendirmeler yapılırken HOMER yazılımı kullanılmıştır. Doğal gazla çalışan kojenerasyon santraline uyumlandırılan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı enerji sistemlerinin hibrit tasarımlarında farklı kombinasyonlar oluşturulabilir. Başka çalışmalarda da kullanılabilen veriler içeren bu çalışmada alınan iki temel unsur, yenilenebilir enerji sistemlerinin uyumlandırıldığı kurulu güce sahip santralin ve dahil edilecek şebeke elektriğinin bütünleştirilebilmesi için altyapının olduğu ve var olan bir arazide modelleme yapılması nedeniyle arazi ve ona bağlı maliyetin olmadığı kabul edilmesidir. Var olan bir sisteme entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının kazanımının değerlendirildiği bu çalışmada zaten kıyaslama sırasında bu maliyetler aynı tutulacağı için genel sürece bir etkisi olmayacaktır.

Hibrit enerji sisteminde yenilenebilir enerji kullanım oranı üzerinden; geri ödeme süresi, zararlı gazlar için emisyon miktarı gibi unsurlar, teknoekonomik ve çevresel parametreler açısından karşılaştırılmaktadır. Fosil yakıt kullanan kurulu güce sahip bir kojenerasyon santralinin yenilenebilir enerji sistemleriyle bütünleştirilmesiyle elde edilebilecek kazanımlar için örnek bir çalışma oluşturmaktadır.

1.4. Enerji kaynaklarının seçilmesi

Çalışmada sisteme dahil edilen fosil yakıt olan doğal gaz kaynaklarında Türkiye şanslı ülkeler içerisinde değildir (Şekil 1.1.). 2020 yılı Türkiye doğal gaz ithalatının ülkelere göre

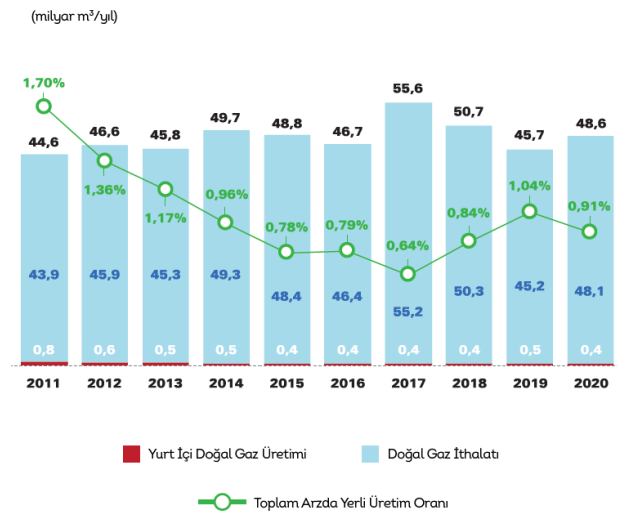
dağılımında, % 33,6 ile Rusya'nın payı en büyüktür. Azerbaycan % 24 ile hemen arkasında yer alırken, sırasıyla Cezayir, İran, ABD, Katar, Nijerya gibi ülkeler gelmektedir [35].



Şekil 1.1. En fazla doğal gaz rezervine sahip ilk 10 ülke (2020) [35].

Dünya geneline bakıldığında da mevcut doğal gaz kaynakları azalmaktadır. Ülkemizde doğal gazın özellikle en çok elektrik üretimi için de kullanılması nedeniyle en kısa sürede yeni ve çevreye daha duyarlı kaynaklara geçiş kaçınılmazdır [35].

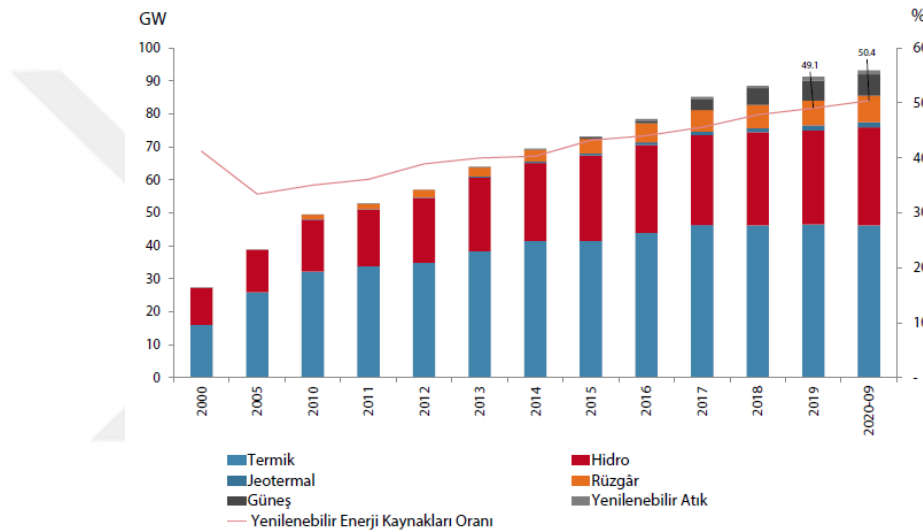
Türkiye'nin yıllık arzın çok altında olan yerel doğal gaz üretimi nedeniyle doğal gaz ithal oranı oldukça yüksektir. 2011 yılıyla 2020 yılları arasında yurt içi doğal gaz üretiminin toplam arzda yerli üretime oranına göre ve yurt içi doğal gaz üretiminin aynı oranda giderek artması nedeniyle % 1,70'lerde olan oranın 2020'de % 0,91 seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir. 441 milyon m³ olarak gerçekleşen 2020 doğal gaz üretiminin tüketimi ise toplam 48,6 milyar m³ olmuştur. Arada oluşan fark ise yaklaşık 48,1 milyar m³ seviyesinde gerçekleşmiştir. Türkiye doğal gaz tüketiminin yaklaşık % 99,1'ini ithalatla % 0,91'ini ise (441,00 Mm³) ülkenin kaynaklarıyla karşılamıştır (Şekil 1.2) [35].



Şekil 1.2. Türkiye'nin doğal gaz arzı ve yurt içi üretim oranları (2011-2020) [35].

Türkiye yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş açısından şanslı bir ülkedir. Bölgeler arasında verim açısından değişkenlik göstermesi nedeniyle farklı enerji kaynaklarına yönelim olabilmektedir. 2010 yılından sonra rüzgâr, 2015 yılından sonra güneş enerji kaynaklarının kullanımına yönelik enerji elde etme yatırımlarında yükselme trendi yakalayıp günümüzde giderek artan kurulu güç kapasitesine kavuşmuştur (Şekil 1.3).

Türkiye toplam kurulu gücüne bakıldığında 2015 yılı öncesinde içinde yenilenebilir enerjiyle üretilen enerji kapsamındaki toplam kurulu güç oranı % 3 altında bir seviyede iken, oran hızla artarak 2020 yılı başlarında % 23 seviyesine kadar yükselmiştir.



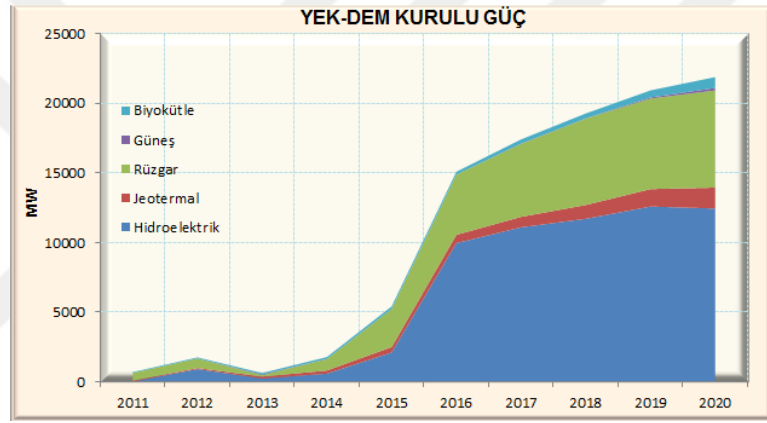
Şekil 1.3. Kaynak bazında Türkiye kurulu güç gelişimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı [36].

5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun’la, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi yapan tesislere ilişkin üretim lisansı sahibi tüzel kişiler ile lisanssız elektrik üretimi yapan elektrik üretim tesislerinin desteklenmesi kararı alınarak, faydalanabilecek üretim tesisleri, bu kanun kapsamında rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle ve elde edilen gaz (çöp gazı dâhil), dalga, akıntı enerjisi ve gel-git ile kanal veya nehir tipi veya rezervuar alanı on beş kilometrekarenin altında olan hidroelektrik kaynakları tesisin kurulması için uygun olması durumunda elektrik enerjisi üretimi yapabilmektedir [37]. Enerjiyle ilgili kanunlar sürekli yenilenmekte ve bu süreçlerin çok sık takip edilmesi gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji için yapılan yatırım bazında bakıldığında ise YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması) kapsamındaki santrallerin yıllık

kurulu güç kayıtlarına 2011-2020 yılları arasına bakıldığında yenilenebilir enerji için yapılan yatırım daha net görülmektedir (Şekil 1.4).

Coğrafi bölgelere göre yenilenebilir enerji kaynakları değişiklik göstermektedir. Yeryüzünün ısınması homojen olmadığı için zamana ve bölgeye göre değişiklik gösteren kaynaklar baz alınarak tasarlanan ya da modellenen bir hibrit sistem kurulan bölgeye göre mevcut kaynakların verimli kullanılması amacıyla tasarlandığı için farklı bölgelerde farklı sonuçlar vermektedir. Bu sürece son tüketime ulaşana kadar gereken teknolojiyi de eklersek maliyet ve geri ödemeler değişir. Tesisin kurulacağı yerin maliyetinden şebeke bağlantısı için alt yapıya kadar birçok kalem kurulum maliyetine eklenmektedir. Bu gibi nedenler yüzünden aynı teknolojiyi kullanmak aynı sonuçları vermeyecektir. Verilerin son on yıllık periyoduna bakıldığında da aylık veriler önceki yıllarla da tam olarak örtüşmez.



Şekil 1.4. YEKDEM kapsamındaki santrallerin yıllık kurulu güçleri [37].

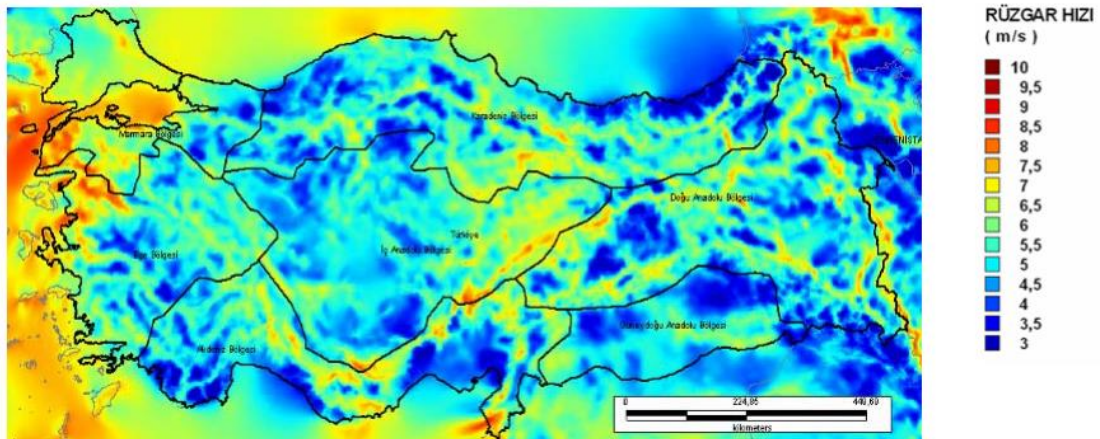
Çalışmada tasarlanan hibrit sistemde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisini oluşturan kaynak güneş enerjisidir. Rüzgâr enerji potansiyeli tüm dünya yüzeyindeki güneşten gelen radyasyon enerjisine bağlıdır. Basınç ve sıcaklık farkına sahip hava kütlelerinin hareketiyle oluşan rüzgâr enerjisi, kinetik enerjinin önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüşmesiyle elektrik üretiminde kullanılır.

Ülkemizde yer seviyesinden 50 metre yükseklikte, 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilerek orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli (Tablo 1.1.) 48.000 MW olarak belirlenmiştir.

Tablo 1.1. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli [38], [39].

Rüzgar Sınıfı	Yıllık Güç Yoğunluğu (W/m ²)	Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Kapasite (MW)
4	400 – 500	7,0 – 7,5	29 259,36
5	500 – 600	7,5 – 8,0	12 994,32
6	600 – 800	8,0 – 9,0	5 399,92
7	> 800	> 9,0	195,84
TOPLAM KAPASİTE			47 849,44 Karasal: 37 836 Deniz Üstü: 10 013

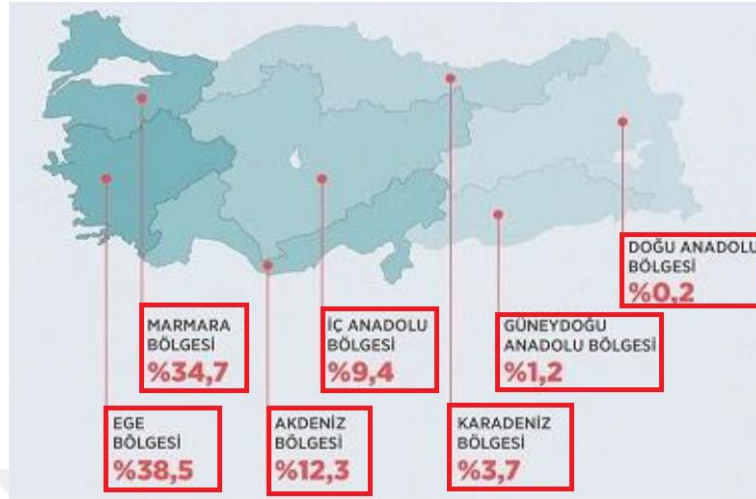
Türkiye Rüzgâr enerjisi potansiyel atlası REPA verilerine göre 50 m ve 30 m yükseklikteki ölçüm değerleri incelendiğinde Türkiye geneli açısından Ege ve Marmara bölgeleri iyi konumdadır (Şekil 1.5.). Ekonomik RES yatırımı için 7 m/s veya üzerinde rüzgâr hızı gerekmektedir. Bu nedenle daha düşük rüzgâr seviyelerindeki yerler için hibrit bir sistemde değerlendirilen rüzgâr enerjisinin tekno-ekonomik olarak daha verimli olduğu yapılan çalışmalarda gözlemlenmektedir.



Şekil 1.5. Türkiye'nin 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı haritası [40].

Ekonomik RES yatırımı için 7 m/s veya üzerinde rüzgâr hızı gerekmektedir. Ekonomik RES yatırımı için % 35 veya üzerinde kapasite faktörü gerekmektedir. Bunlarla beraber birçok kriter değerlendirilmektedir. Rüzgâr atlasıyla beraber saatlik rüzgâr verisi, bölge pürüzlülük bilgileri, yakın çevre engel bilgileri, bölgenin topoğrafyası değerlendirilmektedir. 2019 verilerine baktığımızda Türkiye genelinde işletmedeki

RES'lerin bölgelere göre dağılımında (Şekil 1.6.) Ege bölgesinin ilk sırada olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle uygulamada Ege Bölgesinden bir şehir seçilmiştir.



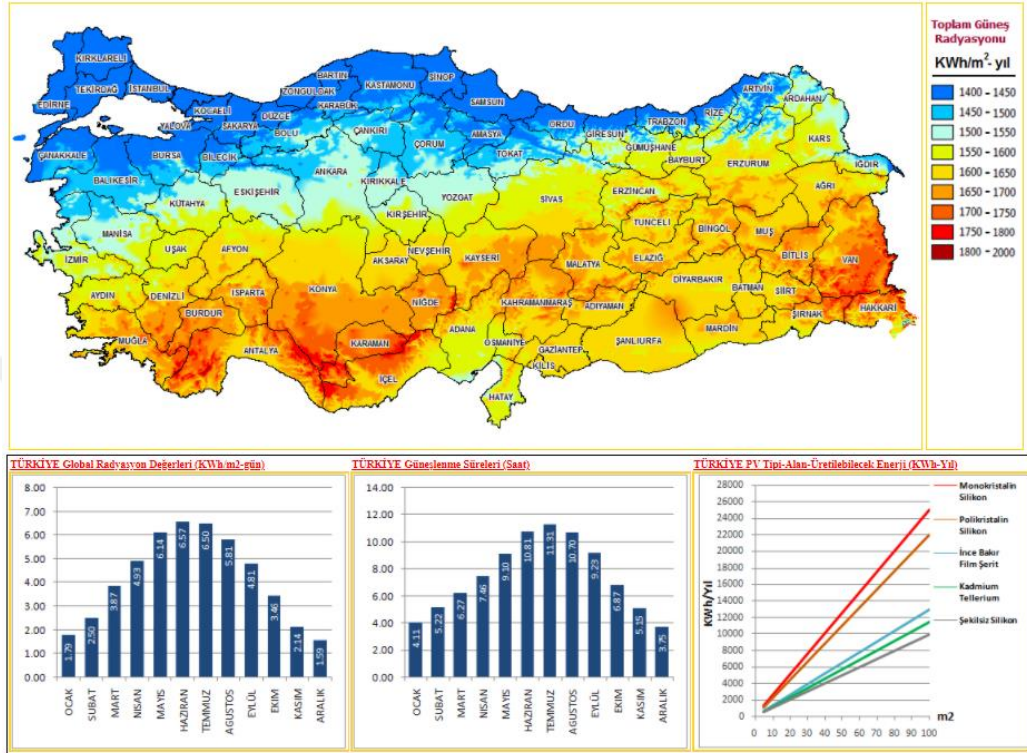
Şekil 1.6. İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [41].

Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m^2 değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında değişim gösteren bu küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden oldukça fazladır. 1970'lerden sonra güneş enerjisi konusundaki çalışmalar özellikle hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleyerek maliyetinin giderek düştüğü, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirdiği görülmüştür. Kurulumdan sonra düşük maliyetle çalışması temiz bir enerji kaynağı güneş enerjisinin önemini arttırmaktadır [42].

Güneş enerjisi sanayide, konutlarda ve bireysel amaçlı kullanımlarda, gerek duyulan enerji ihtiyacı için doğrudan güneşten sağlanamaması nedeniyle geliştirilen teknolojilerle dönüştürülerek kullanılabilen enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte bir kısmı güneş enerjisini ışık ya da ısı enerjisi şeklinde kullanırken, diğer teknolojiler güneş enerjisinden elektrik elde etmek şeklinde kullanım sağlamaktadır. Güneş enerjisi doğrudan veya dolaylı elektrik üretimi, sıcak su elde edilmesi, alan ısıtma ve soğutma, sanayi kuruluşları için proses ısı enerjisi ve sera ısıtması gibi birçok alanda kullanılabilir.

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre (gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/), ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741,07 saat olup ortalama yıllık toplam ışıınım değeri $1527,46 \text{ kWh/m}^2$

olarak hesaplanmıştır. Ortalama olarak günlük toplam güneşlenme süresi 7,50 saat/gün ve günlük toplam ışıınım şiddeti 4,18 kwh/m²-gün olarak hesaplanmıştır (Şekil 1.7.) [42]. Çalışmadaki hibrit sistem tasarımıda seçilen diğer yenilenebilir enerji kaynağı güneş enerjisidir.

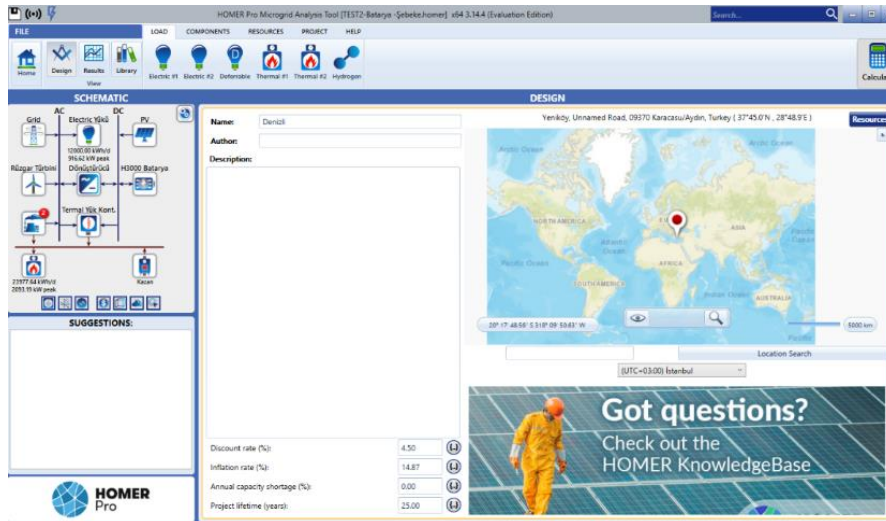


Şekil 1.7. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli (GEPA)

Veriler değerlendirildiğinde yine Ege bölgesinin güneş enerjisi açısından oldukça elverişli olduğu görülmektedir.

2. HOMER PROGRAMI

HOMER yazılımı aslında bir bilgisayar modeli olan, Birleşik Devletler Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilmiş bir mikro güç optimizasyon modeli olarak hibrit sistemlerin tasarlanmasında uygunluk analizlerinin yapılmasında kullanılır. Bir ay dene süresinden sonra ücretle alınan bir program bu çalışma için satın alınmıştır. HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) tekno-ekonomik analiz yaparak bileşenlerinin optimal boyutunu belirleyen çıktılar elde etmek için şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olarak Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri tasarlanması ve planlanması için güçlü bir araçtır. Rüzgâr türbinleri, güneş panel dizisi, yakıt hücreleri, küçük hidroelektrik, biyokütle, dönüştürücü, piller ve konvansiyonel jeneratörler gibi birçok kaynak HOMER'de modellenmiştir. HOMER ile Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri oluştururken simülasyon için gerekli giriş verileri, sistem materyallerinin optimal boyutları HOMER tarafından belirlenebilmektedir [43]. Tasarımda değerlendirilmeye alınması istenilen bütün kaynak verileriyle sistemlerin bütün mümkün oluşumlarını simüle edip en iyi değere ulaşmayı amaçlar. HOMER yüzlerce olasılığı simüle edebilir ve bu süreçte kullanıcının veri girmesine izin verdiği gibi Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nden (NASA) internet ağı üzerinden meteorolojik verilerin otomatik olarak da alınmasına imkan sağlamaktadır. Girdi verilerini tanımlayıp bir sitem oluşturmak için araçların bulunduğu ara yüzde (Şekil 2.1.) sistem tasarımını yaparak ilgili verileri girmek için her aracın ilgili ara yüzünü açarak gerekli bilgiler girilip sistem tanımı yapılır.



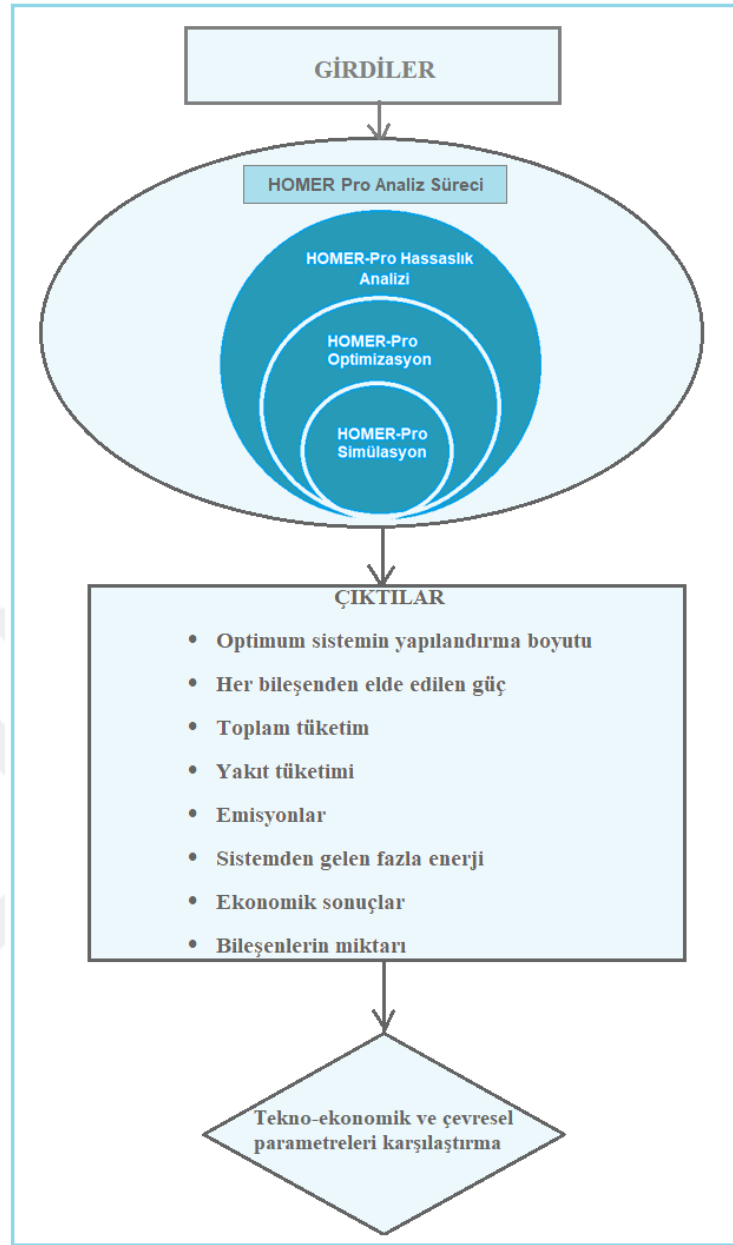
Şekil 2.1. HOMER Pro kullanıcı ara yüzü, örnek bir uygulama.

Yakındaki elektrik ve/veya ısı yüklerini karşılayan bir sisteme mikrogüç sistemi denir. Çeşitli teknolojilerde elektrik üretimi ve depolama bileşenleri kullanılabilen, şebekeye bağlantılı veya şebekeden ayrı sistemler olabilir. Bir güç sistemi tasarlarırken, sistemin yapılandırması sırasında, sistem için en iyi bileşenlerden kaç tane ve hangi boyutta olması durumunda sistem en verimli hale geleceği kararı verilmesi gerekir. Enerji kaynaklarının seçilen bölgedeki durumu, maliyetlerdeki çeşitlilik ve çok sayıda teknoloji seçeneği kararları zorlaştırmaktadır. HOMER'in optimizasyon ve hassasiyet analizi algoritmaları, olası birçok sistem yapılandırmasının değerlendirilmesini kolaylaştırır. HOMER, mühendislikle beraber ekonomik analizlerin birlikte çalışması için simülasyon, optimizasyon ve hassaslık analizinden oluşan üç güçlü aracı tek bir yazılım ürününde bir araya getirir.

Birçok simülasyon değerlendirilerek optimizasyon tamamlanacağı için doğru sonuca ulaşana kadar yüzlerce simülasyon var olan verilen üzerinden değerlendirilir. HOMER Pro analiz sürecinde görüleceği gibi optimizasyon bütün simülasyon olasılıklarını kapsamaktadır. Birçok optimizasyondan oluşan duyarlılık (hassaslık) analizi hepsini kapsamaktadır (Şekil 2.2.'de). HOMER'in duyarlılık analizi olarak adlandırdığı değişken seçimleri bu çalışmada farklı simülasyonlar olarak adlandırılmaktadır.

Sürekli değişen yenilenebilir enerji kaynaklarının, ana parametrelerdeki belirsizliklerin içerisinde doğru optimizasyona ulaşırken, teknik açıdan olabilirliğini ve ömür boyu maliyetini tespit etmek için sistemi oluşturan parçaların bileşenlerinin performansının yılın her saati için değerlerine bakar. HOMER optimizasyon boyunca çok farklı sistem yapılandırmalarının en düşük ömür boyu maliyetli teknik sınırları karşılayacak şekilde simülasyonunu yapar.

HOMER yazılımının bir parçası olan HOMER Pro yazılımı, köy ve ada gibi kırsallardan, şebekeye bağlı kampüslere ve askeri üslere kadar tüm sektörlerde mikro şebeke tasarımını optimize etmek için küresel standartlarda tasarımlar oluşturup analizlerinin yapılmasına olanak sağlar. HOMER analiz süreci, simülasyon, optimizasyon ve hassaslık analizlerini içerir. HOMER yazılım sisteminde ihtiyaçlar doğrultusunda modellenecek sisteme göre HOMER Pro gibi başka alt yazılımlar da bulunmaktadır.



Şekil 2.2. HOMER Pro çalışma metodolojisi.

2.1 Simülasyon Süreci

HOMER aslında bir simülasyon modelidir. HOMER çok çeşitli mikro güç sistemi yapılandırmalarının, düşünmek istediğimiz mümkün olan tüm olasılıklar için uygun bir sistemi simüle etmeye çalışır. HOMER kurulu sistemin içeriğine göre yüzlerce hatta binlerce sistemi bir dakikadan bir saate kadar zaman adımlarında, bir yıllık bir süre için simüle edebilir.

Simülasyon sürecinde sistem girdileri üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. HOMER, kullanıcının tanımladığı sınırlar içerisinde ilk olarak, sistemin uygunluğunu,

uygulanabilirliğini ve olabilirliğini belirler. Elektriksel ve ısı yükleri nasıl besleyebileceğini belirler. İkincisi, sistemin ömür boyu maliyetini yani sistemin kurulum ve kullanım ömrü süresinde çalışma maliyetlerinin toplamını belirler. Ömür boyu maliyet sistemlerin karşılaştırmalarında ekonomik bakımdan kıyaslanabilmesi için uygun bir ölçüttür.

2.2 Optimizasyon Süreci

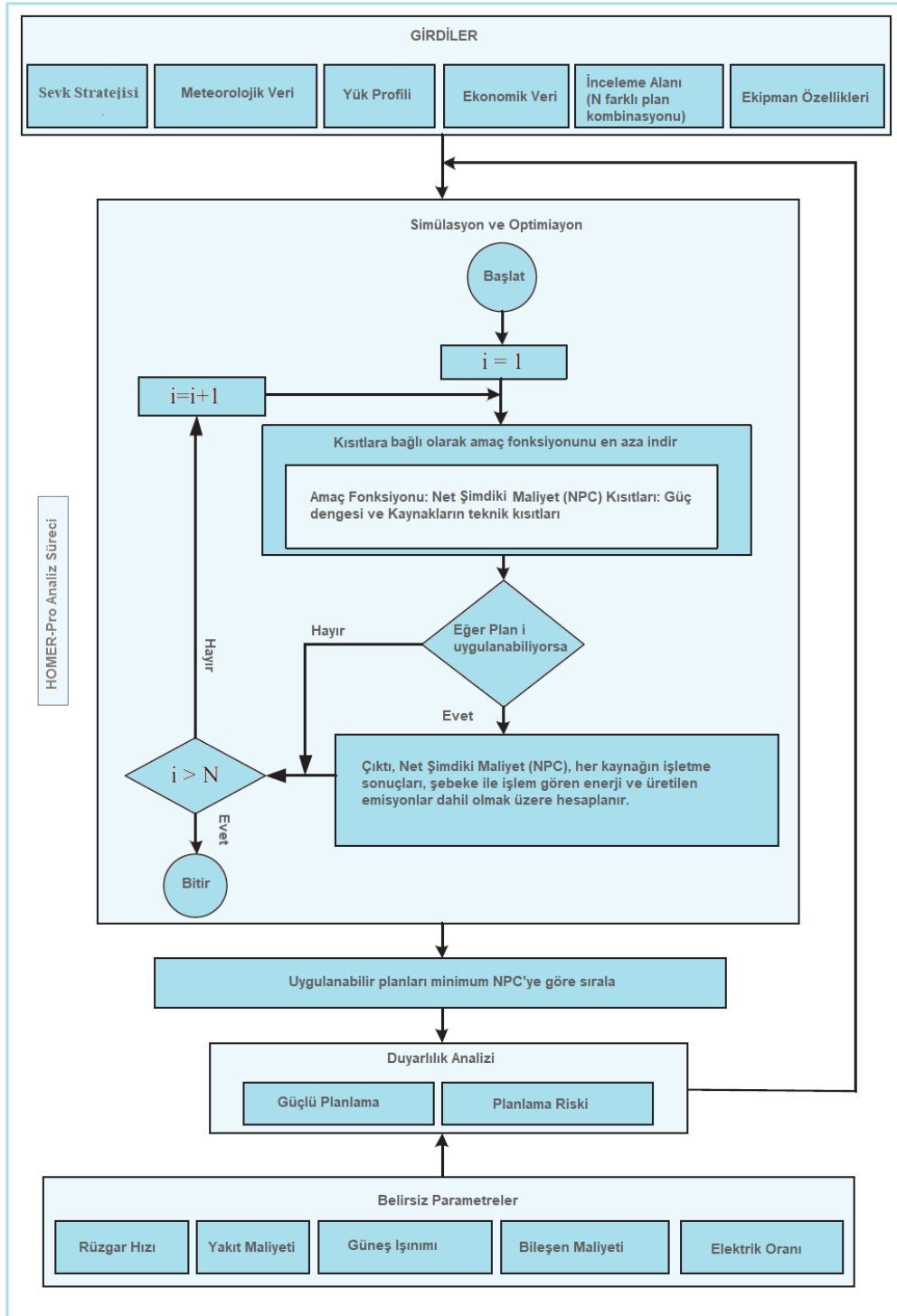
HOMER Pro'nun iki optimizasyon algoritması vardır. Arama alanı tarafından tanımlanan tüm uygulanabilir sistem yapılandırmalarını simüle eder. HOMER optimizer, en düşük maliyetli sistemi aramak için tescilli bir algoritma kullanır. HOMER daha sonra, sistem tasarım seçeneklerini karşılaştırmak için kullanabileceğimiz net şimdiki maliyete (bazen yaşam döngüsü maliyeti olarak adlandırılır) göre sıralanmış bir konfigürasyon listesi görüntüler.

Simülasyon ve optimizasyon aşamaları aynı anda yapılır. Her planın amaç fonksiyonu, toplam net şimdiki maliyettir (NPC) ve bulmak için maliyetlerin toplamından, gelirlerin toplamının çıkarılmasıyla elde edilen bugünkü değeridir.

Sistemde maliyetler, şebekeden satın alınan enerjinin maliyeti, başlangıç maliyeti, değiştirme maliyeti, işletme ve bakım maliyeti ile yakıt maliyetidir. Gelirler, şebekeye satılan enerjiden elde edilen gelir ve kurtarma değeridir. Sistem kısıtları, güç dengesi kısıtları, pilin şarj ve deşarj kısıtları, şebeke ile işlem enerjisi kısıtları ve jeneratörlerin teknik kısıtları vb.dir.

Uygulanabilir planlar için NPC, jeneratör, akü, dönüştürücü gibi kaynakların her bir zaman adımında çalışma sonuçları, şebeke ile işlenen enerji ve oluşan emisyonlar dahil olmak üzere gerekli çıktı sistem tarafından hesaplanır. Oluşturulan sonuçlar güç dengesinin her zaman adımında karşılandığı anlamına gelir. Sonunda, uygulanabilir planlar minimum net şimdiki maliyete göre sıralanır, minimum net şimdiki maliyet en iyi plan olarak kabul edilir. Sistemin bu hesaplamaları yaparken takip ettiği akış şeması Şekil 2.3'te verilmektedir.

HOMER, modelcinin yani tasarımı yapan kişinin birçok farklı tasarım seçeneğini teknik ve ekonomik değerlerine göre karşılaştırmasını sağlar. Ayrıca, girdilerdeki belirsizliğin veya değişikliklerin etkilerinin anlaşılmasına ve ölçülmesine yardımcı olur. Seçilen yerler için şebekeye bağlı PV/rüzgâr güç sistemlerinin fizibilite, teknoekonomik, optimizasyon ve hassasiyet analizleri, iklim, yük, şebeke verileri ve ekonomik veriler gibi HOMER Pro'da girdi olarak kullanılır. Tüm girdiler HOMER analiz sürecinden sonra değerlendirilebilen çıktıların yer aldığı bir raporlamaya dönüştürülebilmektedir.



Şekil 2.3. HOMER optimizasyon süreci akış şeması [43].

Şekil 2.3.'te i sayma sayısı ve N farklı plan kombinasyonunun sayısıdır. Burada amaç bütün kombinasyonlar için girdi değerlerini sistemde yerine koyarak optimizasyon yapmaktır. Sisteme giren i sayısı bileşenlerin inceleme (arama) alanı kapsamında

değerlendirildiğinde, kısıtlar göz önüne alınarak net şimdiki maliyet açısından sistem kurulabiliyorsa “Evet” sonucu alınır ve çıktı elde edilebilir. Arama alanı dışında kalan her i sayısı için sistemin algoritması çalışmayı durdurur (Bitti) ve bir azaltılarak yeniden çalıştırılıp değerlendirilir. Bu bütün kombinasyonlar bitene kadar devam eder. Belirsiz parametreler de aslında birer girdidir, fakat hassaslık analizinde bu değerler değiştirilerek sisteme yeni girdi olarak dahil edilebilmektedir. Bu nedenle belirsiz parametreler olarak adlandırılır. Eğer bu parametrelerde bir değişiklik yapılmadan sistem ilk çalıştırıldığında alınan değerlere bırakılırsa hassaslık (duyarlılık) analizi yapılmadığı için bu parametreleri sistem algoritması diğer girdilerden farklı algılamayacaktır. Şekil 2.3.’te gösterilen algoritma mümkün olan bütün sistem kombinasyonları için sonuçlar üretir. Değerlendirme kriteri olarak sonuçları çıktı olarak vermektedir. Sistemin yazılım kısmındaki mantığı özetlemektedir ve yazılım akış şemasıdır. Şekil 2.2.’de sistem çalışma prensibi daha basit olarak gösterilmiştir.

Genel olarak dört grupta değerlendirilen girdi verilerinin her bir bileşeni ve kullanılan yakıt için ayrıca teknik ve maliyet verileri de eklenmektedir. Her tasarımın bileşenleri farklı boyutlara sahip olduğundan simülasyon ve optimizasyonda göz önünde bulundurulacak bir arama uzayı bulunmaktadır. Bu arama alanı girilen verilerle sınırlandırılmaktadır. Daha ayrıntılı fizibilite yapılabilen alanlar için coğrafi koşulların yanında alanın eğimi, konumu gibi örneğin şebeke eklenecekse şebeke alt yapısı için gerekli maliyetler, arazi fiyatı da eklenebilse de bu çalışmada genel bir hesaplama tercih edilmiştir. Uygulama alanı için ise zaten var olan bir santralin alanı kullanıldığı ve ayrıntılı bir fizibilite yapılamadığı için bu gibi hassas ölçümler göz ardı edilmiştir. Yük profili, depolama, seçilen alan için meteorolojik veriler ve tasarlanan sistem için kullanılan enerji kaynakları gibi veriler bu çalışmada simülasyon girdileri olarak modellenmektedir.

2.2.1 Sevk stratejisi

HOMER, her bir bileşenin davranışını modellemeye ek olarak, bu bileşenlerin bir sistem olarak birlikte nasıl çalıştığını simüle etmektedir. Bu, hangi jeneratörlerin hangi güç seviyesinde çalışacağı, akülerin şarj edilip edilmeyeceği ve şebekeden satın alınıp alınmayacağı veya şebekeye satılıp satılmayacağı konusunda saat başı kararlar alınmasını gerektirir.

İşletme rezervi, elektrik yükündeki ve yenilenebilir güç kaynağındaki değişkenliğe rağmen güvenilir elektrik tedariki sağlamaya yardımcı olan bir güvenlik marjı sağlar.

Elektrik yükü bazen sistemin çalışma kapasitesinin üzerinde dalgalanır ve bir kesinti meydana gelir. Bu sürekliliği bozar. Herhangi bir anda, bir güç sisteminin sağladığı işletme rezervi miktarı, işletme kapasitesi için eksi elektrik yüküne eşittir [45].

HOMER'de, modelleyici gerekli işletim rezervi miktarını belirtir ve HOMER, sistemi en azından bu kadar işletim rezervi sağlayacak şekilde simüle eder. Bunu yaparken her saat için, HOMER, o saatteki birincil yükün bir kısmı artı yıllık tepe birincil yükün bir kısmı, artı o saatteki PV güç çıkışının bir kısmı ve artı rüzgâr gücü çıktısının bir kısmı olarak gerekli işletme rezerv miktarını hesaplar. HOMER, farklı güvenilirlik seviyelerine ulaşmak için gereken işletme rezervi miktarını belirlemeye çalışmaz; sistemin her saat sağlamak zorunda olduğu işletim rezervi miktarını hesaplamak için modelleyicinin özelliklerini kullanır.

Yük ve yenilenebilir güç çıkışı ne kadar değişkense ve sistem ne kadar kısıtlı bir şekilde çalışması gerekiyorsa, modelleyicinin belirtmesi gereken değer o kadar yüksek olur.

Sevk stratejisi uygulaması var olan kaynakların önceliğini belirlemek ve depolama için kullanılacak girdinin nasıl besleneceğine karar vermek için yapılan bir uygulamadır. Girdi olarak bu strateji seçilebilir ya da optimizasyonda en uygun olanı değerlendirip önerilebilir. HOMER, iki farklı sevk stratejisini modelleyebilir: yük takibi (load following) ve çevrim şarjı (cycle charging). Yük takibi stratejisi kapsamında, yenilenebilir güç kaynakları pili şarj eder, ancak jeneratörler şarj etmez. Çevrim şarjı stratejisinde ise jeneratörler her çalıştığında, pil bankasını şarj eden fazla elektrikle yüke hizmet etmek için gerekenden daha fazla güç üretirler. Bu çalışmada her ikisi içinde yapılan analizlerin optimizasyona katılması tercih edilmiştir.

2.2.2 Meteorolojik veriler

Meteorolojik veriler, yazılıma aylık ortalamalar veya zaman serisi verileri şeklinde beslenen rüzgâr hızı, güneş radyasyonu ve sıcaklık akışıdır. HOMER, rüzgâr türbini, fotovoltaik panel çıkış gücünü hesaplamak için bu giriş verilerini kullanır.

2.2.3 Yük profilleri

Tasarlanan hibrit sistem her zaman adımında yük gereksinimlerini karşılamalıdır. Elektriksel, termal ve hidrojen gibi tasarlanan sistemlere göre değişen yükler HOMER'de modellenmiştir. Elektriksel yükler birincil ve ertelenebilir yüklerdir. Birincil yükler, belirli bir süre içinde karşılanması gereken elektrik yüküdür, ertelenebilir yük ise belirli bir süre içinde karşılanması gereken elektrik yüküdür, ancak kesin zaman önemli değildir.

Üniversiteler, hastaneler, oteller ve sanayi bölgeleri gibi bazı lokasyonlar simülasyona uygun gerçek yük tüketim verilerine sahiptir. Bu gerçek veriler HOMER'de zaman serisi verileri olarak beslenir. Ancak bazı bölgelerde, özellikle gerçek yük tüketim verilerinin bulunmadığı uzak ve kırsal alanlarda, o bölgenin özelliklerine göre yük profili tahmin edilir. Bu veriler günlük profil olarak oluşturulur ve HOMER bunları güç dengesi kısıtlamasında kullanır.

HOMER'da elektrik veya termal enerji talebini yük olarak tanımlar. Bir mikrogüç sisteminin modellenmesi, sistemin hizmet etmesi gereken yükün veya yüklerin modellenmesiyle başlar. HOMER, üç tür yük modeli oluşturur. İlki birincil yük, güç sisteminin belirli bir zamanda karşılaması gereken elektrik talebidir. Makinelerin örneğin fabrikaysa oradaki makineler, endüstriyel süreçlerle ilgili elektrik talebi, yerleşim yeriye ışıklar, radyo, TV, ev aletleri, bilgisayarlar vb. genellikle birincil yük olarak modellenir. Bir tüketici bir ışığı yaktığında, ya da bir çalışan üretim için bir makineyi çalıştırdığında güç sistemi o ışığa ya da makineye derhal elektrik sağlamalıdır ve bu yük daha sonraya ertelenemez bir yüküdür. Elektrik talebi arzı aşarsa, HOMER'ın karşılanmayan yük olarak kaydettiği bir eksiklik vardır. Bu durumda sistemsel bir sorun var demektir.

İkincisi ertelenebilir yüküdür ve belirli bir zaman aralığında herhangi bir zamanda karşılanabilen elektrik talebidir. Su pompaları, buz yapıcılar ve batarya, akü şarj istasyonları ertelenebilir yüklere örnektir, çünkü bu yüklerin her birine özgü depolama süreçleri için sistemde esneklik bulunmaktadır. Bir yüke hizmet vermeyi erteleme, hassas bir kontrol gerektiren enerji üretiminin zamanlamasının kötü etkilenmesine neden olabilese de, süreklilik sağlayamayan yenilenebilir güç kaynakları içeren sistemler için genellikle avantajlıdır. Yenilenebilir güç kaynağı birincil yükü aşarsa, fazlalık boşa gitmek yerine ertelenebilir yüke hizmet edebilir.

HOMER, termal yük olan üçüncü yük profilini, çalışma rezervi kavramının termal yük için geçerli olmaması dışında, birincil elektrik yükünü modellediği şekilde modeller. Kullanıcı, saatlik verileri içeren bir dosyayı içe aktararak veya HOMER'ın 24 saatlik yük profillerinden saatlik verileri sentezlemesine izin vererek yılın her saati için termal yük miktarını belirler. Bu çalışmada HOMER kütüphanesinden çalışma koşulları seçilerek verilerin HOMER tarafından seçilmesi tercih edilmiştir. Sistem, termal yükü ya kazan, bir jeneratörden geri kazanılan atık ısı ya da fazla elektrik kullanarak dirençli ısıtma ile besler. Mevcut sistem olarak tanımlanan kojenerasyon santralinde termal yükün kazan tarafından sağlandığı bir sistem modellenmiştir. Çalışmada uygulama bölümünde diğer tüm optimizasyon süreçlerinde olduğu gibi yük profil çıktıları da verilmiş ve değerlendirilmiştir.

2.2.4 Ekonomik veri

Simülasyon süreci iki amaca hizmet eder. İlk olarak, sistemin uygulanabilir olup olmadığını belirler. HOMER, sistemin elektrik ve termal yüklere yeterince hizmet edebildiği ve kullanıcı tarafından dayatılan diğer kısıtlamaları karşılayabildiği takdirde uygulanabilir olduğunu düşünmektedir. İkinci olarak, sistemin kullanım ömrü boyunca kurulması ve işletilmesinin toplam maliyeti olan sistemin yaşam döngüsü maliyetini tahmin eder. Yaşam döngüsü maliyeti, çeşitli sistem konfigürasyonlarının ekonomisini karşılaştırmak için uygun bir ölçüdür. Bu tür karşılaştırmalar, optimizasyon sürecinin temelidir.

Yenilenebilir kaynaklar, yüksek başlangıç sermaye maliyetlerine ve düşük işletme maliyetlerine sahip olma eğilimindeyken, geleneksel yenilenemeyen kaynaklar düşük sermaye ve yüksek işletme maliyetlerine sahip olma eğilimindedir. Optimizasyon sürecinde, HOMER, değişen miktarlarda yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarından oluşan çok çeşitli sistem konfigürasyonlarının ekonomisini sıklıkla karşılaştırmak zorundadır. Adil olmak için, bu tür karşılaştırmalar hem sermaye hem de işletme maliyetlerini hesaba katmalıdır. Yaşam döngüsü maliyet analizi, sistemin yaşam süresi içinde meydana gelen tüm maliyetleri dahil ederek bunu yapar.

HOMER, tüm fiyatların proje ömrü boyunca aynı oranda arttığını varsayar. Bu varsayımla, gelecekteki nakit akışlarını bugüne indirirken, nominal faiz oranı yerine enflasyona göre ayarlanmış reel faiz oranı kullanılarak enflasyon analizden çıkarılabilir. Bu nedenle HOMER kullanıcısı, nominal faiz oranından enflasyon oranının çıkarılmasıyla elde edilen değere kabaca eşit olan reel faiz oranını girer. HOMER'deki tüm maliyetler sabit dolar cinsinden tanımlandığı için gerçek maliyetlerdir.

Bir sistemin yaşam döngüsü maliyetini HOMER, toplam net şimdiki maliyeti (NPC) kullanarak hesaplar. Toplam NPC, proje ömrü boyunca ortaya çıkan tüm maliyetleri ve gelirleri, bugünün dolar cinsinden tek bir toplu tutarda toplar ve gelecekteki nakit akışları, iskonto oranı kullanılarak yeniden iskonto edilir. İskonto oranını ve proje ömrünü sistemi tasarlarken modelleyici yani kullanıcı sisteme girdiğinde NPC, ilk yapım, bileşen değiştirme, bakım, yakıt maliyetlerine ek olarak şebekeden güç satın alma maliyetini ve zararlı emisyonlardan kaynaklanan cezalar gibi çeşitli maliyetleri içerir. Gelirler, şebekeye elektrik satışından elde edilen geliri ve proje ömrünün sonunda meydana gelen herhangi bir kurtarma değerini içerir. NPC ile maliyetler pozitif ve gelirler negatiftir. Bu net bugünkü değerin tersidir. Sonuç olarak, net bugünkü maliyet, yalnızca işaretle net bugünkü değerden farklıdır.

2.2.5 Arama alanı

HOMER'in optimizasyon işlemi sırasında en iyiyi aradığı tüm sistem konfigürasyonları seti arama alanı ya da arama uzayı olarak adlandırılır. Bileşene ait bilgide adet ya da miktarın sıfır alınması sisteme dahil edilmediği anlamına gelir. Rüzgâr türbini, PV dizisi, jeneratör, pil ve dönüştürücü gibi bileşenler farklı boyutlara sahip olduğundan simülasyon ve optimizasyonda göz önünde bulundurulacak bir arama uzayı bulunmaktadır. Arama uzayı, simülasyon ve optimizasyon aşamalarının yapılacağı her değişken kaynak için değişim sayılarının çarpımıyla farklı donanımların kombinasyonu içeren bir planla tüm olasılıkları raporlar.

2.2.6 Ekipman özellikleri

Bileşenleri oluşturan ve sağlayan bir mikro güç sisteminin herhangi bir parçası ekipmanları oluşturur. Yenilenebilir kaynaklardan bu çalışmada elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik paneller ve rüzgâr türbinleri sürekli olmadığı için kesintili olarak düşünebileceğimiz enerji kaynaklarını oluşturmaktadır. PV modülleri güneş radyasyonunu DA elektriğe dönüştürürken rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisini AA veya DA elektriğe dönüştürür. Diğer ekipmanlar, jeneratörler, şebeke ve kazanlar, sevk edilebilir enerji kaynaklarıdır, yani sistem bunları gerektiği gibi kontrol edebilir. Jeneratörler, AA veya DA elektrik üretmek için yakıt tüketir. Bir jeneratör ayrıca atık ısı geri kazanımı yoluyla termal güç üretebilir. Şebekeye bağlı bir sisteme şebeke AA elektriği iletir ve ayrıca sistemden fazla elektriği kabul edebilir. Kazanlar, ısı güç üretmek için yakıt tüketir. Yine bu çalışmada kullanılan dönüştürücüler elektrik enerjisini AA'dan DA'ya veya DA'dan AA'ya dönüştürür. Bu çalışmada enerji depolamak için kullanılan ekipman bataryadır. DA elektriği depolar.

Bu çalışmada doğal gazlı kojenerasyon santral, güneş panelleri (PV dizisi) ve rüzgâr türbini enerji kaynağı olarak şebeke, batarya ve kazan sistem içerisinde diğer ekipmanlar olarak seçilmiştir. Her ekipman için ayrılan HOMER arayüzlerine ekipman özellikleri tanımlanır. Bu tanımlama HOMER kütüphanesinden de seçilebilir, yoksa eklenerek kütüphanede oluşturulabilir.

Yakıt olarak sistemde kullanılmak istenen, doğal gaz seçildiği gibi sisteme girilir. HOMER, önceden tanımlanmış birkaç yakıttan oluşan bir liste sağlar ve kullanıcılar gerekirse yakıtın fiziksel özellikleri, yoğunluğunu, düşük ısıtma değerini, karbon içeriğini ve kükürt içeriğini içeren bilgilerden oluşan yeni bir kaynağı bu listeye ekleyebilir. Ayrıca

L, m³ veya kg olarak en uygun ölçü birimini, fiyat ve varsa yıllık tüketim limitini de eklemek mümkün olmaktadır.

Güneş Kaynağı fotovoltaik (PV) dizisi içeren bir sistemi modellemek için, HOMER kullanıcısı ilgilenilen konum için güneş kaynağı verilerini sağlamalıdır. Güneş kaynağı verileri, tipik bir yılda Dünya'nın yüzeyine çarpan doğrudan güneşten gelen küresel güneş radyasyonu ışıını radyasyonunun miktarını ve ayrıca gökyüzünün tüm bölümlerinden gelen dağınık radyasyonu gösterir.

Veriler üç biçimden birinde olabilir: yatay yüzeyde saatlik ortalama küresel güneş radyasyonu (kW/m²), yatay yüzeyde aylık ortalama küresel güneş radyasyonu (kWh/m²gün) veya aylık ortalama açıklık indeksi. Berraklık indeksi, Dünya yüzeyine çarpan güneş radyasyonunun atmosferin tepesine çarpan güneş radyasyonuna oranıdır.

Sıfır ile 1 arasında bir sayı olan açıklık indeksi, atmosferin açıklığının bir ölçüsüdür. Kullanıcı aylık güneş kaynağı verilerini sağlamayı seçerse, HOMER, Graham ve Hollands tarafından geliştirilen bir algoritma kullanarak yapay saatlik küresel güneş radyasyonu verilerini üretir [44, 46]. Bu algoritmanın girdileri, aylık ortalama güneş radyasyonu değerleri ve enlemdir. Çıktı, gerçek ölçülen veri kümelerine benzer istatistiksel özelliklere sahip 8760 saatlik bir veri kümesidir. Bu istatistiksel özelliklerden biri, bir günün önceki güne ve bir saatin bir önceki saate benzer olma eğilimi olan otokorelasyondur [45].

Modellenen bir sistem bir veya daha fazla rüzgâr türbini içerdiğinde, HOMER'e türbinlerin bir yılda karşılaşacağı rüzgâr hızlarını gösteren rüzgâr kaynağı verileri sağlanır. Varsa, ölçülen saatlik rüzgâr hızı verilerini sağlayabiliriz. Aksi takdirde, HOMER, 12 aylık ortalama rüzgâr hızından ve dört ek istatistiksel parametreden yapay saatlik veriler üretebilir: Weibull şekil faktörü, rüzgâr hızlarının yıl içindeki dağılımının bir ölçüsüdür. Otokorelasyon faktörü, bir saat içindeki rüzgâr hızının, önceki saatteki rüzgâr hızına ne kadar güçlü bir şekilde bağlı olduğunun bir ölçüsüdür. Günlük model gücü ve pik rüzgâr hızı saati, rüzgâr hızındaki ortalama günlük modelin sırasıyla büyüklüğünü ve fazını gösterir. HOMER, bu parametrelerin her biri için varsayılan değerler sağlar.

Anemometre yüksekliğini yani rüzgâr hızı verilerinin ölçüldüğü veya tahmin edildiği yerden yüksekliği sisteme girilir. Rüzgâr türbini göbeği yüksekliği anemometre yüksekliğinden farklıysa, HOMER türbin göbeği yüksekliğindeki rüzgâr hızını ya rüzgâr hızının yerden yüksekliğin logaritması ile orantılı olduğunu varsayan logaritmik yasayla ya da rüzgâr hızının yükseklikle katlanarak değiştiğini varsayan güç yasasıyla hesaplar. Logaritmik yasayı kullanmak için modellemenin yapıldığı arazinin pürüzlülüğünü karakterize eden bir parametre olan yüzey pürüzlülük uzunluğunun girilmesi gerekir. Kuvvet

yasasını kullanmak için bölgenin topoğrafyasına bağlı bir katsayı olan kuvvet yasası üssü girilmelidir. Rüzgâr türbininin çıkışını hesaplarken hava yoğunluğunun kullanılması sebebiyle HOMER'in hava yoğunluğunu hesaplaması için deniz seviyesinden yüksekliğin de belirlenmesi gerekir [45].

HOMER'de şebeke için bu çalışmaya uygun şebeke bağlantılı, şebekeden bağımsız olmak üzere 2 çeşit modellenmiş hibrit sistemin analizleri yapılmıştır. Şebekeye bağlı olan, elektriğin alış ve satış fiyatı gerçek zamanlı fiyatlar ve planlı oranlarda sisteme girilir. HOMER, şebekenin sabit ve düşük enerji maliyetini hesaplar. Sabit maliyet sıfırdır ve düşük maliyet, mevcut şebeke gücü fiyatına ve emisyon cezalarından kaynaklanan herhangi bir maliyete eşittir. Geçerli oran değiştikçe şebeke gücü fiyatı saatten saate değişebileceğinden, şebekenin düşük enerji maliyeti de saatten saate değişebilir. Bunun, HOMER'in sistem davranışı simülasyonu üzerinde önemli etkileri olabilir. Öyle ki HOMER bir jeneratörü yalnızca şebeke gücünün maliyetinin jeneratör gücünün maliyetini aştığı yüksek şebeke gücü fiyatı zamanlarında çalıştırmayı seçebildiği gibi bu çalışmada uygulamada görülen örnekteki gibi doğal gaz fiyatların şebeke elektrik fiyatını aşması nedeniyle elektriği sadece şebekeden almayı bile tercih edebilir. Böyle durumlar için modelleyici tercihlerine göre düzenleme yapılabilir.

Bir jeneratör, elektrik üretmek için yakıt tüketir ve muhtemelen bir yan ürün olarak ısıtır. HOMER'ın jeneratör modülü, çok çeşitli jeneratörleri modellemek için yeterince esnek. HOMER, her biri AA veya DA olabilen ve her biri farklı bir yakıt tüketebilen üç adede kadar jeneratörden oluşan bir güç sistemini modelleyebilir. Jeneratörün temel fiziksel özellikleri, maksimum ve minimum elektrik gücü çıkışı, çalışma saatlerinde beklenen ömrü, tükettiği yakıt türü ve tüketilen yakıt miktarını üretilen elektrik gücüyle ilişkilendiren yakıt eğrisidir. HOMER'de bir jeneratör, kullanıcıların kendi yakıtlarını ekleyebilecekleri yakıt kitaplığında listelenen yakıtlardan herhangi birini veya bunlardan herhangi birini tüketebilir.

HOMER, kazanı, talep üzerine sınırsız miktarda termal enerji sağlayabilen ideal bir bileşen olarak modeller. HOMER, jeneratörleri elektrik yüküne hizmet etmesi için gönderirken, termal yüke hizmet etmek için bir jeneratörden geri kazanılabilen herhangi bir atık ısıнын değerini dikkate alır, ancak bir jeneratörü yalnızca termal yüke hizmet etmek için göndermez. Sistemin, jeneratörlerin sağlayamadığı herhangi bir termal yüke hizmet etmesi için her zaman kazana güvenebileceğini varsayar. Bu varsayımı ihlal eden durumlardan kaçınmak için HOMER, termal yüke hizmet eden herhangi bir sistemde bir kazanın bulunmasını sağlar, kazan yakıtında herhangi bir tüketim sınırına izin vermez ve kazanın biyokütle veya depolanmış hidrojen tüketmesine izin vermez (çünkü bu yakıtlardan herhangi

biri bazen mevcut olmayabilir). HOMER'ın kazan modelinin idealize edilmiş doğası, kullanıcının kazanın yalnızca birkaç fiziksel özelliğini belirtmesi gerektiği anlamına gelir. Kullanıcı, kazanın tükettiği yakıt türünü seçer ve bu yakıtı ısıya dönüştürdüğü verimliliği girer. Kazanın diğer tek özelliği, tüketilen yakıt miktarı başına yayılan kirleticinin gram birimi cinsinden olan emisyon katsayılarıdır [45].

Batarya grubu, bir veya daha fazla ayrı bataryanın bir araya gelmesinden oluşur. HOMER, tek bir bataryayı, belirli bir miktarda doğru akım (DA) elektriği sabit bir gidiş-dönüş enerji verimliliğinde depolayabilen bir cihaz olarak, ne kadar hızlı şarj veya deşarj edilebileceği, hasara neden olmadan ne kadar derin deşarj edilebileceği ve değiştirilmesi gerekmeden önce içinden ne kadar enerji geçebilir modellemesini yapabilir. HOMER, bataryaların özelliklerinin kullanım ömrü boyunca sabit kaldığını ve sıcaklık gibi dış etkenlerden etkilenmediğini varsayar [45].

Dönüştürücü, elektrik gücünü doğru akımdan (DA) alternatif akıma (AA) ve/veya doğrultucu ile alternatif akımdan (AA) doğru akıma (DA) dönüştüren bir cihazdır. HOMER'de bir karar değişkeni olan dönüştürücü boyutu, cihazın doğru akım gücünü ters çevirerek üretebileceği maksimum alternatif akım gücü anlamına gelen dönüştürücü kapasitesini ifade eder. Modellemede AA gücünü doğrultarak cihazın üretebileceği maksimum DA güç miktarı olan doğrultucu kapasitesini dönüştürücü kapasitesinin yüzdesi olarak belirtir. Doğrultucu kapasitesi bu nedenle ayrı bir karar değişkeni değildir.

HOMER, dönüştürücü ve doğrultucu kapasitelerinin, cihazın yalnızca kısa süreler için dayanabileceği artan kapasiteler olmadığını, bunun yerine, cihazın gerektiği kadar dayanabileceği sürekli kapasiteler olduğunu varsayar. HOMER kullanırken, dönüştürücü jeneratör veya şebeke gibi başka bir AA güç kaynağı ile paralel çalışıp çalışamayacağını belirtir. Bunu yapmak, dönüştürücü AA frekansına senkronize olmasını gerektirir; bu, bazı dönüştürücülerin sahip olmadığı bir yetenektir. Dönüştürücülerin ekonomik özellikleri, dolar cinsinden sermaye ve yenileme maliyeti, yıllık işletme ve bakım maliyeti ve yıl cinsinden beklenen kullanım ömrüdür.

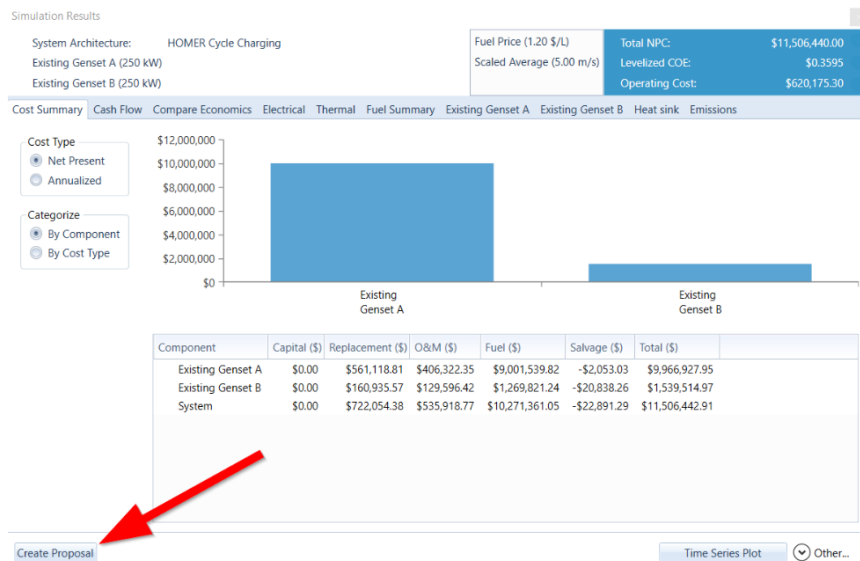
2.3. Duyarlılık Değişkeni ve Analiz Süreci

Simülasyon ve optimizasyon aşamaları yapıldığında ve fizibilite planları minimum net şimdiki maliyete (NPC) göre sıralandığında, duyarlılık analizi yapılır. Duyarlılık değişkenlerini girdi olarak tanımladığında, HOMER belirtilen her bir duyarlılık değişkeni için optimizasyon işlemini tekrarlar. Değişen her koşulda tüm olasılıkları yeniden

değerlendirdiği için tüm süreç akışı yeniden başlar ve bütün olasılıklar bitene kadar tekrarlanır. Tüm değişkenler için değer aralığı ayrı ayrı tanımlanabildiği gibi sadece bir ya da 2 belirsizlik değişkeni için duyarlılık (hassaslık) analizleri yapılabilir. HOMER, en iyi plan çıktılarının belirsiz parametrelerle nasıl değiştirileceğini göstermek için uygun rakamlar da üretir [43]. Örneğin, rüzgâr hızını bir duyarlılık değişkeni olarak tanımladığımızda, HOMER, belirtilen rüzgâr hızı aralığı için sistem konfigürasyonlarını simüle eder. Bu çalışmanın uygulama kısmında güneş radyasyon değerleri ve rüzgâr hızları değiştirilerek duyarlılık (hassaslık) analizi yapılmıştır. Çalışmada hassaslık analizleri değiştiğinde her biri için farklı simülasyonlar yapılması nedeniyle hassaslık analizi simülasyon olarak adlandırılmıştır.

2.4. Çıktılar ve HOMER Raporlama

HOMER, simülasyon sonuçları penceresinin çeşitli sekmelerinde gösterilen tüm bilgileri içeren daha özelleştirilmiş bir rapor alabilmeye izin verir. Şekil 2.4'te görülebileceği gibi ihtiyaçlara en uygun raporu seçmeye izin verdiği bir pencere açılır. Rapora eklemek istediğimiz bölümleri hatta basılacak kağıt bilgisine kadar eklenebilir. İki raporu da almamıza izin vermektedir. Bunlar Müşteri Teklifi (Client Proposal) olan ekonomik analizleri içeren yatırım yapacakların takip edeceği rapor ve Mühendis Detayı (Engineer Detail) olan teknik bilgileri içeren tasarımın teknik detaylarıyla ilgili diğer rapordur [44].



Şekil 2.4. HOMER rapor oluşturma sayfası [45].

HOMER, bir sistemin yaşam döngüsü maliyetini temsil etmek için toplam net mevcut maliyeti (NPC) kullanır. Toplam NPC, proje ömrü boyunca ortaya çıkan tüm maliyetleri ve gelirleri, bugünün dolar cinsinden tek bir toplu tutarda toplar ve gelecekteki nakit akışları, iskonto oranı kullanılarak bugüne indirgenir. Modelleyici, iskonto oranını ve proje ömrünü belirtir. NPC, ilk yapım aşamasında gerekli herşey, bileşen değiştirme, bakım, yakıt maliyetlerine ek olarak şebekeden güç satın alma maliyetini ve kirlетici emisyonlardan kaynaklanan cezalar gibi çeşitli maliyetleri içerir.

Gelirler, şebekeye elektrik satışından elde edilen geliri ve proje ömrünün sonunda meydana gelen herhangi bir kurtarma değerini içerir. NPC ile maliyetler pozitif ve gelirler negatiftir. Bu net bugünkü değerin tersidir. Sonuç olarak, net bugünkü maliyet, yalnızca işaretle net bugünkü değerden farklıdır.

HOMER, her bir bileşen için, bileşenin yıllık maliyetini bulmak için sermaye, değiştirme, bakım ve yakıt maliyetleri ile kurtarma değeri ve diğer tüm maliyetler veya gelirleri birleştirir. Bu, proje ömrünün her yılında gerçekleşmesi durumunda, proje ömrü boyunca bu bileşenle ilişkili tüm bireysel maliyetler ve gelirlerin net bugünkü maliyetine eşdeğer bir net mevcut maliyet sağlayacak varsayımsal yıllık maliyettir.

Gerekli tüm veriler HOMER'e girildikten sonra analiz sürecinde simülasyon ve optimizasyon aşamaları tamamlanıp, NPC (\$), başlangıç sermaye maliyeti (\$), işletme maliyeti (\$/yıl) gibi birçok kriterin dahil olduğu her bir planın sonuçları, sistemde CoE (\$/kWh) ile gösterilen enerji maliyeti, üretilen emisyonlar (kg/yıl) hesaplanır. HOMER tarafından minimum NPC'ye göre en iyi plan belirlense de yatırımcıların bakış açısı da dikkate alınarak diğer kriterlere dikkat edilerek en iyi plan seçilebilir. HOMER'de şebeke mesafesi, sermaye, işletme, bakım maliyeti ve şebeke güç fiyatı dahil olmak üzere üç girdi kullanılarak hesaplama yapılır. Tüm dağıtılabılır enerji kaynaklarında olduğu gibi HOMER, kazandan gelen sabit ve düşük enerji maliyetini hesaplar. Sabit maliyet sıfırdır. HOMER, denklemi kullanarak düşük maliyeti hesaplar. Bütün analiz süreci tamamlandığında seçili kombinasyona ait sonuçları rapor olarak çıkartır.

3. MATEMATİKSEL MODELLEME

HOMER yazılımında çıktıları elde etmek için girdileri kullanarak hesaplamalar yapılmaktadır. Bu bölümde mevcut sistem ve tasarlanan sistemler için kullanılan teknik ve ekonomik açıdan matematiksel hesaplamalarında kullanılan eşitliklerle ilgili bilgi verilmektedir.

Optimizasyondan önce sistem tasarlanırken aşağıdaki bilgilerin girilmiş olması gerekmektedir.

- PV dizisinin boyutu
- Rüzgâr türbini sayısı
- Her jeneratörün boyutu
- Pil (batarya) sayısı
- AA-DA dönüştürücünün boyutu
- Şebeke bilgileri
- Sevk stratejisi (sistemin nasıl çalıştığını yöneten kurallar dizisi)

Sistem modellenmesinde yukarıda geçen girdilere ek olarak her bileşene ait teknik ve mali girdilerinde sisteme eklenmesi sonrasında sistemlerin karşılaştırılması için baz alınan değerler ve amaçlanan sonuçlar Tablo 3.1.'de yer almaktadır. Her bileşenin mali analizi için aşağıdaki bilgilerin de sisteme girilmesi gerekmektedir. Bu girdiler sistem tasarımında kullanılan bileşenlere göre sisteme tanımlanması gereken girdilerdir ve mali gelir gider tanımlamasından farklıdır.

- Kapasite (saat başına harcadığı güç) (kWh)
- Ana Para (\$)
- Yenileme (bileşeni yeniden almak için gerekli tutar) (\$)
- İşletime ve bakım(O&M) (\$/yıl)
- Arama Alanı (bileşene göre farklı birimde) (kW, adet, vb.)
- Sistem Ömrü (yıl)

Tablo 3.1. Optimizasyondan sonra seçilen sistemlerin mevcut sistemle karşılaştırılmasında amaçlanan sonuçlar.

Mevcut Sistemle Tasarlanan Sistemler Karşılaştırılırken Kullanılan Teknik Çıktılar	Sembol	Amaçlanan Sonuç
Toplam elektrik üretimi, güç sistemi tarafından bir yılda üretilen toplam elektrik enerjisi miktarıdır. Sistemin tüm bileşenleri tarafından üretilen elektrik enerjisinin toplamıdır (kWh/yr).	E_p	Tasarlanan Sis $\geq$ Mevcut Sis
Sistemin tüm bileşenleri tarafından üretilen termal enerji (yıllık toplam) (kWh/yr)	H_p	Tasarlanan Sis =Mevcut Sis
Tesiste hizmet verilen, servis edilen toplam elektrik yükü, yıl boyunca birincil ve ertelenebilir yüklere hizmet etmeye giden toplam enerji miktarı ile şebekeye satılan enerji miktarıdır (kWh/yr). (=E _{serv,primAA} (Servis edilen AA birincil yük, kWh/yr)+ E _{serv,primDA} (Servis edilen DA birincil yük, kWh/yr) + E _{serv,ert} (hizmet edilen ertelenebilir yük, kWh/yr) + E _{ş,s} (şebekeye satılan enerji, kWh/yr))	E_{serv}	Tasarlanan Sis $\geq$ Mevcut Sis
Tesiste yıl boyunca termal yüke hizmet eden, servis edilen toplam termal enerji miktarıdır (kWh/yr).	H_{serv}	Tasarlanan Sis =Mevcut Sis
Emisyon Çıktıları	Sembol	Amaçlanan Sonuç
Sistemde emisyonu neden olan bileşenlerin toplam emisyon değeri	EM	Tasarlanan Sis $\leq$ Mevcut Sis
Toplam Yıllık Fosil Yakıt Tüketimi (kWh)	F_t	En aza indirilen sistemi bulmak
Ekonomik Çıktılar	Sembol	Amaçlanan Sonuç
İşletme maliyetini (\$/yr)	$C_{işletme}$	Tasarlanan Sis $\leq$ Mevcut Sis
Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (\$/kWh)	COE	Tasarlanan Sis $\leq$ Mevcut Sis
Yıllık yakıt maliyetleri	$C_{T yakıt}$	Tasarlanan Sis $\leq$ Mevcut Sis
Toplam bugünkü maliyetini (\$),	C_{NPC}	Tasarlanan Sis $\leq$ Mevcut Sis
Basit geri ödeme süresi (yıl)	SPB	Modellenen sistemlerde en kısa olanı

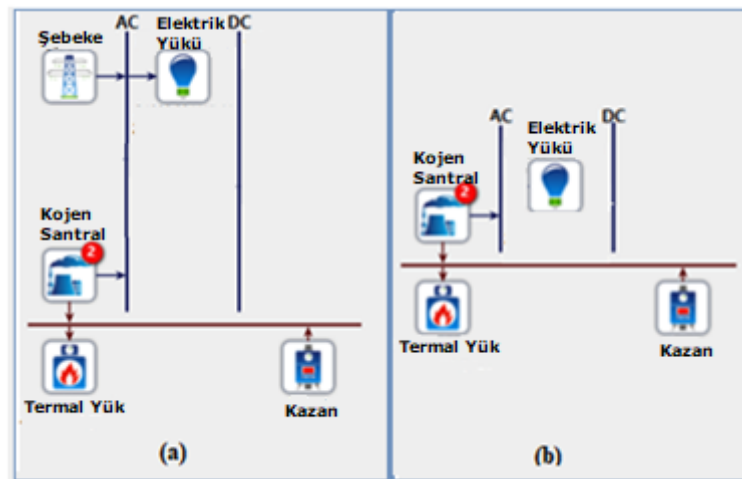
Her sistem ve bileşenlerine ait girdi ve çıktı bilgileri anlatılmaktadır (Bkz. 3.1).

3.1. Mevcut Sistemin Matematiksel Modellemesi

Birleşik ısı güç sistemlerine kojenerasyon (CHP- Combined Heat and Power Systems) denir. Biokütle, biogaz ve doğal gaz, gibi bir yakıt kaynağından, hem elektrik hem de ısı enerjisinin yüksek verimli olarak üretilmesidir. Kojenerasyon sistemleri, yakıtı, elektrik ve ısıya dönüştürmenin en verimli yoludur. Enerji üretim maliyetlerinin düşürülmesinin amaçlandığı bu sistemler maliyeti % 40 oranında düşürerek, tasarruf sağlanmasını amaçlamaktadır. Maksimum kapasitesi 50 kW'ın altında olanlar mikro kojenerasyon, 50 kW den büyük ve 1 MW'ın altında olanlar ise küçük ölçekli kojenerasyon tesisleri olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca toplam verimlilik değeri (ısı verimle elektriksel veriminin toplamı) % 70 ve üzerinde olanlar, yüksek verimli sistemler olarak tanımlanmıştır.

1 m³ doğal gazın içerisindeki 10,64 kWh enerji değeri yaklaşık 10kW elektrik enerjisine karşılık gelmektedir. Kojenerasyon santrali toplam çevrim veriminin teorik olarak % 90 olduğu düşünülerek, 1m³ doğal gazdan 9kW elektrik enerjisine karşılık gelen elektrik ve ısı enerjileri birlikte elde edilmektedir [54].

Mevcut yani kojenerasyon sistem doğal gaz santrali, kazanın olduğu kurulu bir güce sahip tesisi tanımlamaktadır (Şekil 3.1.). Kojenerasyon sistemin termal yükü kazan tarafından, elektrik yükü ise santral ve gerekirse şebeke tarafından sağlanmaktadır. İkinci simülasyon için kullanılan mevcut sistem modellemesinde şebeke dahil edilmemektedir. Gaz makine ve gaz türbinleri için verim değerleri makine üreticileri tarafından verilmektedir.



Şekil 3.1. Mevcut kojenerasyon sistem şebeke bağlantılı sistem (a), şebeke bağımsız sistem modellemesi (b)

Kojenerasyon doğal gaz santralinin (kazanla birlikte) tesisin elektrik ve termal yüklerini karşıladığı kabul edilir. Sistem girdisi olarak termal verim η_{th} ve elektrik verimi

η_e , kojenin termal ve elektrik güçleri sisteme girdi olarak alınır. Kurulu güce sahip bir tesis değerlendirilmeye alınacağı için tesiste kurulu olan kojenerasyon doğal gaz santrali verileri kullanılmıştır.

Her iki mevcut sistemde tesise ait elektrik ve termal yüklerin ve modellenen sistemde de kullanılacak olan verim, emisyon gibi hesaplamalar için bazı değerler girilmiştir. Bu değerler üzerinden yapılan hesaplamalarda amaç fonksiyonlarından biri olan net şimdiki maliyet gibi bazı çıktılar elde edilerek sonuçlara varılmıştır. Tablo 3.2. ve 3.3. sırasıyla mevcut sistem matematiksel modellemesindeki girdileri ve çıktıları göstermektedir.

Tablo 3.2. Jeneratör, kazan ve ikinci simülasyon için şebekenin dahil olduğu mevcut olarak tanımlanan sistemin girdileri.

Teknik Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Jeneratörün termal verimi (yıllık toplam)	η_{Tt}	Termal yük
Jeneratörün Elektrik verim (yıllık toplam)	η_{Te}	Elektrik yük
Kazan verimi	η_k	Termal yük
Jeneratörün toplam yıllık yakıt tüketimi (kg/yıl)	m	Toplam verim
Kullanılan yakıtın yoğunluğu (kg/m ³)	$\rho_{yakıt}$	jeneratörün yakıt tüketimi
Yakıtın alt ısı değeri (MJ/kg)	$LHV_{yakıt}$	Toplam yıllık elektrik ve termal üretim
Jeneratörün kapasitesi (kW)	Y_{jen}	Jeneratörün sabit enerji maliyeti, jeneratörün yakıt tüketimi
Jeneratörün elektrik çıkışı (kW)	P_{je}	jeneratörün elektrik verimi, yakıt tüketimi
Emisyon Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Jeneratör, kazan ve dönüştürücüde toplam yıllık yakıt tüketimi (kWh)	F_{toplam}	Emisyon hesaplanması
Sera gazları için emisyon faktörü	$f_{jen}, f_{kazan}, f_{sebeke}$	Emisyon hesaplanması
Ekonomik Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Jeneratörün ve kazanın yakıt bilgisine göre yakıt birimi ve fiyatı (\$/L)	$c_{yakıt}$	Jeneratörün sabit enerji maliyeti
Sistem sabit İşletme ve Bakım maliyeti (O&M) (\$/yıl)	$C_{ib,sabit}$	Sistem maliyet hesapları
Sistemin modellenmesinden bağımsız oluşan sabit sermaye maliyeti (\$)	$C_{ser,sabit}$	Sistem maliyet hesapları
Borç alabileceğiniz oran, (Nominal iskonto oranı) (%)	i	Değiştirme maliyeti
Proje ömrü boyunca beklenen enflasyon oranı, (%)	f	Nominal iskonto
Proje ömrü (yıl) (Projenin net bugünkü maliyetinin hesaplanması gereken yıl sayısı)	R_{proj}	Toplam net şimdiki maliyet
Kazandan gelen termal enerjinin marjinal maliyeti (\$/kWh)	c_{kazan}	seviyelendirilmiş (düzeltilmiş) enerji maliyetidir (\$/kWh)
Şebeke alım, satım fiyatı (\$/kWh)	c_j	Şebeke maliyeti
Değiştirme maliyeti (\$)	$C_{değ}$	Hurda değeri
Bileşenin ömrü (yıl)	$R_{bileşen}$	Hurda değeri

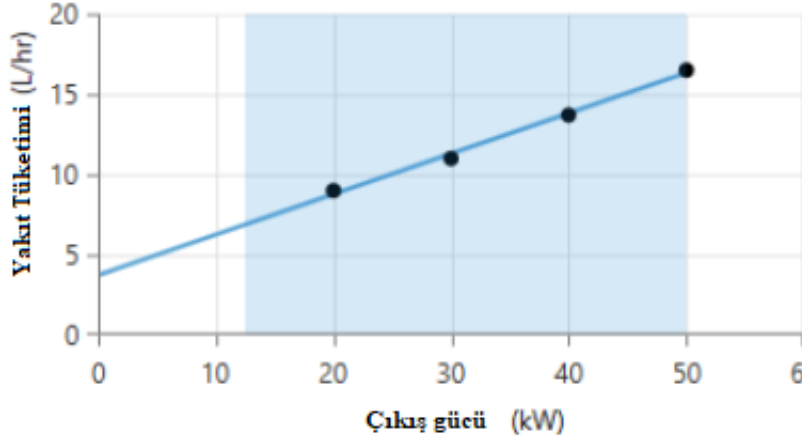
Emisyon değerleri için fosil yakıt kullanımı ve sistemde bu yakıtı kullanan bileşenler önem kazanmaktadır. Mevcut sistemde jeneratör kazan ve varsa şebeke zararlı sera gazı kaynaklarıdır. Modelleyici, tüketilen yakıt miktarı başına yayılan kirletici yani zararlı gazların gram cinsinden jeneratör emisyon katsayılarını belirler. Elektriğin yanı sıra ısı da sağlayan bir jeneratör için ayrıca ısı geri kazanım oranını da belirlemek gerekir. Bu sistemde jeneratörün tüm yakıt enerjisini elektriğe veya atık ısıya dönüştürüldüğü varsayılmaktadır. Isı geri kazanım oranı, termal yüke hizmet etmek için tutulabilecek atık ısının oranıdır. Isı geri kazanım oranı, termal yüke hizmet etmek için geri kazanılabilen ısının yüzdesidir (CHP Geri Kazanım Yüzdesi). Baca gazlarıyla sistemden ayrılan, üretilen enerjinin neredeyse %16–20 kadardır. Isı geri kazanım oranının bazı çalışmalarda % 1,3 civarında olduğu görülmüştür.

Tablo 3.3. Jeneratör, kazan ve ikinci simülasyon için şebekenin dahil olduğu mevcut olarak tanımlanan sistemin çıktıları.

Teknik Çıktılar	Sembol
Jeneratörün yıllık toplam elektrik üretimi (kWh/yıl)	E_{jen}
Jeneratörün (bu sistem için kazan) toplam yıllık termal üretimi	H_{jen}
Anlık yakıt tüketimi oranı (L ya da m^3/hr)	F
Emisyon Çıktıları	Sembol
Jeneratör/Kazan tarafından açığa çıkan zararlı maddenin emisyonu (g)	$EM_{jen,kaza}$
Şebeke tarafından açığa çıkan zararlı maddenin emisyonu (g)	$EM_{\text{ş}}$
Ekonomik Çıktılar	Sembol
Jeneratörün sabit enerji maliyeti	$C_{jen,sabit}$
seviyelendirilmiş (düzeltilmiş) enerji maliyetidir (\$/kWh)	COE
Toplam bugünkü maliyetini (\$),	C_{NPC}
Hurda değerini (\$)	S
Yıllık gelir – gider akışının bugünkü değeri	CRF
Kazandan gelen termal enerjinin marjinal maliyeti (\$/kWh)	C_{kazan}

Jeneratörün başlangıç sermaye maliyetini, yenileme maliyetini ve yıllık O&M maliyetini çalışma saati başına dolar olarak belirlenmiştir. Jeneratör İşletme ve Bakım maliyeti, yağ değişimlerini ve diğer bakım maliyetlerini hesaba katmak için ilgili hesaplamalar için bu bilgilerin girilmesi gerekmektedir.

Jeneratörün temel fiziksel özellikleri, maksimum ve minimum elektrik gücü çıkışı, çalışma saatlerinde beklenen ömrü, tükettiği yakıt türü ve tüketilen yakıt miktarını üretilen elektrik gücüyle ilişkilendiren yakıt eğrisidir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Yakıt eğrisi sekmesi

HOMER, yakıt eğrisinin y-kesişimli düz bir çizgi olduğunu varsayar ve jeneratörün yakıt tüketimi yani yakıtın kütle akış hızını bulmak için aşağıdaki eşitliği kullanır:

$$F = F_0 Y_{jen} + F_1 P_{jen} \quad (3.1)$$

Burada F_0 yakıt eğrisi kesişim katsayısıdır, F_1 ((L/hr) /kW) yakıt eğrisi eğimidir, Y_{jen} jeneratörün nominal kapasitesidir (kW) ve P_{jen} jeneratörün elektrik çıkışıdır (kW). F anlık yakıt tüketimi oranı birimleri, yakıtın ölçüm birimlerine bağlıdır. Yakıt litre cinsinden belirtilirse, F birimi L/hr, yakıt m^3 veya kg cinsinden ifade ediliyorsa, F birimleri sırasıyla saatte kaç metre küp olduğu şeklinde veya kg/h'dir. F_0 ve F_1 birimleri de aynı şekilde yakıtın ölçü birimlerine bağlıdır. Litre cinsinden ifade edilen yakıtlar F_1 (L/hr/kW) ve F_0 (L/hr) olarak alınır. Yakıt birimleri kg ise yakıtın kütle akış hızı $\dot{m}_{yakıt}$ (kg/hr) jeneratörün yakıt tüketimine birim/saat olarak verir (F). Yakıt birimleri m^3 ise Eşitlik 3.2'deki gibi kabul edilerek jeneratörün toplam verimi ($\eta_{jen,top}$) ve jeneratör elektrik verimi hesaplanabilir.

$$\dot{m}_{yakıt} = \rho_{yakıt} F \quad (3.2)$$

$\rho_{yakıt}$: yakıt yoğunluğu (kg/m³)

1m³: 1000L

Jeneratörün toplam yıllık elektrik üretimi (E_{jen} (kWh/yıl)), toplam yıllık termal üretimi (H_{jen} (kWh/yıl)) ile toplam verimin ($\eta_{jen,top} = \eta_t + \eta_e$) termal ve elektrik üretimleri arasındaki bağıntı Eşitlik (3.3)' de verilmektedir.

$$(\eta_t + \eta_e) = \eta_{jen,top} = \frac{3.6 \cdot (E_{jen} + H_{jen})}{\dot{m}_{yakıt} LHV_{yakıt}} \quad (3.3)$$

η_t	: Termal verim (yıllık toplam)
η_e	: Elektrik verim (yıllık toplam)
E_{jen}	: Jeneratörün yıllık toplam elektrik üretimi (kWh/yıl)
H_{jen}	: Jeneratörün toplam yıllık termal üretimi (kWh/yıl)
$m_{yakıt}$	: Jeneratörün toplam yıllık yakıt tüketimi (kg/yıl)
$LHV_{yakıt}$	: yakıtın alt ısı değeri (MJ/kg)
1 kWh	: 3,6 MJ

Jeneratörün elektrik verimini, çıkan elektrik enerjisinin giren yakıtın kimyasal enerjisine bölümü olarak tanımlandığında ve jeneratörün elektrik çıkışı, P_{jen} (kW) bilindiğinde jeneratörün elektrik verimini bulmak mümkün olmaktadır (Eşitlik 3.4).

$$\eta_{jen} = \frac{3.6 \cdot P_{jen}}{\dot{m}_{yakıt} LHV_{yakıt}} \quad (3.4)$$

Jeneratör işletme ve bakım maliyeti, yağ değişimlerini ve diğer bakım maliyetlerini hesaba katmak için ilgili arayüzde bu bilgilerin girilmesi gerekmektedir. HOMER yakıt maliyetini ayrı olarak hesapladığı için bu değer hariç tutularak değerler giriliyor. Modellemede ön görülen kaynaklar arasından sisteme uygun olarak devrede olan tüm güç kaynaklarında olduğu gibi HOMER, jeneratörün enerji maliyetini hesaplar ve sistemin çalışmasını simüle ederken bu bilgiyi kullanır. Enerji maliyetini önce herhangi bir elektrik üretmeden sadece jeneratörü çalıştırmanın saat başına maliyeti üzerinden hesaplar, daha sonra da o jeneratörden elektrik üretmenin kilovatsaat başına ek maliyetini bulur. Jeneratörün sabit enerji maliyetini ($C_{jen,sabit}$) hesaplamak için aşağıdaki denklem (Eşitlik 3.5) kullanılır.

$$c_{jen,sabit} = c_{ib,jen} + \frac{C_{değ,jen}}{R_{jen}} + F_0 Y_{jen} c_{yakıt,ef} \quad (3.5)$$

$c_{ib,jen}$: İşletme ve Bakım maliyeti (O&M maliyeti) (\$/h),

$C_{değ,jen}$: Değiştirme maliyeti (\$),

R_{jen} : Jeneratör ömrü (hr),

F_0 : Yakıt miktarındaki yakıt eğrisi kesişim katsayısı (kW/h),

Y_{jen} : Jeneratörün kapasitesi (kW)

$C_{yakıt,ef}$:Yakıt miktarı başına dolar cinsinden yakıtın efektif fiyatı yani, jeneratörden kaynaklanan kirletici emisyonlarıyla ilişkili maliyet cezalarını içerir.

Jeneratörden elektrik üretmenin kilovatsaat başına ek maliyetini, $C_{jen,ma}$ (\$/h) kilovatsaat başına saatte yakıt miktarındaki yakıt eğrisi eğimi F_1 ve emisyonlara ilişkin cezaların maliyeti dahil olduğu yakıt miktarı başına dolar olarak yakıtın etkin fiyatını gösteren $c_{yakıt,ef}$ çarpılarak bulunur (Eşitlik 3.6).

$$C_{jen,ma} = F_1 c_{yakıt,ef} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'da geçen ceza miktarları belirtilmediği için bu hesaplama yapılmamıştır. Maliyet bilgileri, yakıt, iskonto, enflasyon gibi bilgiler girildikten sonra yukarıdaki süreçte göre HOMER jeneratör bilgilerini hesaplayarak rapora yansıtmaktadır.

Amaç fonksiyonlarından birini net şimdiki maliyeti aldığımızda ekonomik açıdan değerlendirme sürecinde bazı sonuçları bir araya getirmek gerekmektedir. Bileşenlerin net şimdiki maliyeti (veya yaşam döngüsü maliyeti, NPC), bileşenin proje ömrü boyunca kurulması ve işletilmesine ilişkin tüm maliyetlerin mevcut değerinden, proje ömrü boyunca elde ettiği tüm gelirlerin bugünkü değerinden çıkarılmasıyla elde edilen değerdir. Sistemdeki her bir bileşenin ve bir bütün olarak sistemin net bugünkü maliyetini hesaplamak aşağıdaki bilgilerin girdi olarak alınması gerekir;

- Jeneratörün başlangıç sermaye maliyeti (\$),
- Değiştirme maliyeti (\$)
- Kullanım ömrü (yıl)
- İşletme ve bakım (O&M) maliyeti (\$/yıl),
- Yakıt maliyeti ise (\$/yıl)
- Yıllık reel iskonto oranı (faiz ve enflasyon üzerinden hesaplanır)

Değerlendirme aralıkları belirlenirken sıfır sayısı sistemde olmadığı ya da kullanılmadığı durumu ifade etmektedir. Sistemde para birimi dolar (USD \$) seçildiği için kur değerleri alınmamıştır.

Ekonomik değerleri dikkate alırken simülasyonda toplam bugünkü net maliyeti minimize edecek şekilde, optimizasyonda ise, en düşük toplam bugünkü net maliyete sahip sistem tasarımını en uygun olanını üste gelecek şekilde sıralar. Bunu yaparken yenilenebilir ve konvansiyonel enerji kaynaklarının farklı birçok tasarımlarının ekonomik boyutlarını hem sermaye hem de işletme maliyetini hesaba katarak karşılaştırır. Yıllık reel faiz oranı ve proje ömrü sistem optimizasyonunda kullanılan değerlerdir. Reel faiz oranını hesaplamak için, Eş. 3.7'de kullanılmıştır. Bu denklemde, yıllık enflasyon oranı (f) % 14.87 ve faiz oranı

(i_0) ise yaklaşık % 20 olarak belirlenmiştir [55]. Bu değerler kullanılarak reel faiz oranı 0.045 olarak bulunmuştur.

$$i = \frac{i_0 - f}{1 + f} \quad (3.7)$$

i reel faiz oranını, i_0 nominal faiz oranı (bir kredi alındığındaki oran) ve f yıllık enflasyon oranını ifade etmektedir.

Sistemin ömrü süresince meydana gelen tüm maliyetlerini yaşam döngüsü maliyet analizinde (Life Cycle Cost Analysis) hesaplarken HOMER toplam bugünkü net maliyet değerini kullanır. Iskonto oranıyla bugüne iskonto edilmiş gelecekteki nakit akışlarıyla birlikte, proje yaşam süresi içerisinde meydana gelen tüm maliyetleri ve gelirleri bugünün dolar karşılığı toplu ödenen para miktarı olarak özetleyen parametre net şimdiki maliyet olan NPC'dir. Projenin ömrünü ve iskonto oranı tasarımcı tarafından belirlenebilmektedir. Toplam bugünkü net maliyet, ilk yatırım maliyetini, yenileme, bakım, yakıt ve şebekeden alınan elektriğin maliyetini içerir. Gelirler ise, şebekeye satılan elektriği ve yaşam süresi sonucunda meydana gelen hurda maliyetini içerir. Maliyetler pozitif, gelirler de negatif olarak değerlendirilir. Yaşam süresi sonunda sistemi oluşturan her parçanın hurda maliyetini hesaplarken HOMER yazılımı eşitlik (3.8)'deki denklemi kullanır [45]. Hurda değeri, proje ömrü sonunda güç sisteminin bir bileşeninde kalan değerdir. Bileşenlerin doğrusal olarak değer kaybettiği varsayılır; bu, bir bileşenin hurda değerinin, kalan ömrüyle doğru orantılı olduğu anlamına gelir ve ilk sermaye maliyetinden ziyade yenileme maliyetine bağlı olduğu ve projenin sonuna kadar orantılı bakım maliyetlerini içerdiği varsayımı üzerine hesaplamalar yapılır.

$$S = C_{\text{değ}} \frac{R_{\text{kalan}}}{R_{\text{bileşen}}} \quad (3.8)$$

Yapılan değerlendirmede her sistem parçaları için, S hurda değerini (\$), $C_{\text{değ}}$ değiştirme, yenileme maliyetini (\$), R_{kalan} bileşenin kalan ömrünü (yıl), $R_{\text{bileşen}}$ bileşenin ömrünü (yıl) ifade eder [2]. Örneğin proje süresiyle bileşenin ömrü aynıysa, proje tamamlandığında hurda değeri yoktur.

Anapara (sermaye) geri kazanım faktörü için yıllık gelir – gider akışının bugünkü değeri Eş. (3,9)'de kullanılarak hesaplanmaktadır [56]

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3.9)$$

i reel faiz oranını (%) (Eşitlik 3.7) ve N yıl sayısını ifade etmektedir. Reel faiz oranı, tek seferlik maliyetler ile yıllık maliyetler arasında dönüşüm yapmak için kullanılan iskonto oranıdır.

HOMER seçilen tasarımın simülasyonu için çalıştırıldığında sonuçları net şimdiki maliyete (NPC) göre sıralar. HOMER, toplam net şimdiki maliyeti hesaplamak için Eşitlik (3.10.)'u kullanır [56].

$$C_{NPC} = \frac{C_{y\tilde{u}ll\tilde{u}k,top}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (3.10)$$

C_{NPC} toplam bugünkü maliyetini (\$), $C_{y\tilde{u}ll\tilde{u}k,top}$ toplam yıllık maliyeti (\$/yıl), CRF Ana para geri kazanım faktörünü (Bkz. Eş. 3.9), i reel faiz oranını (%) ve R_{proj} proje ömrünü (yıl) ifade etmektedir. Sistemin toplam net bugünkü maliyeti (NPC), sistemin ömrü boyunca katlandığı tüm maliyetlerin ve kazandığı tüm gelirin bugünkü değerinden çıkarılmasıdır.

Modellenen sistem için gelirler, hurda (kurtarma) değeri ve şebeke satış gelirini içerirken, işletim süresince katlanılan, sistem için mecburi, maliyet listesini aşağıdaki listedeki gibi sıralayabiliriz.

- Sermaye maliyetleri,
- Değiştirme maliyetleri,
- İşletme ve Bakım maliyetleri,
- Yakıt maliyetleri,
- Emisyon cezaları,
- Şebekeden güç satın alma maliyetleri.
- Projenin toplam yıllık net mevcut maliyetin yıllık değeri Eşitlik 3.11'de verilmiştir.

$$C_{y\tilde{u}ll\tilde{u}k,top} = CRF(i, R_{proj}) \cdot C_{NPC,top} \quad (3.11)$$

$C_{NPC,top}$: toplam net şimdiki (mevcut) maliyet (\$)

i : yıllık reel iskonto oranı (%)

R_{proj} :proje ömrü (yıl)

CRF : Sermaye geri kazanım faktörü, bir yıllık bugünkü değerini hesaplamak için kullanılan bir orandır. (Bkz. Eşitlik 3.9)

Toplam yıllık maliyet yoluyla işletme maliyetini (\$/yr) yani ilk sermaye maliyetleri dışındaki tüm maliyetlerin ve gelirlerin yıllıklandırılmış değerini bulmak mümkün olmaktadır (Eşitlik 3.12).

$$C_{işletme} = C_{yıllık,top} - C_{yıllık,ser} \quad (3.12)$$

$C_{yıllık, top}$:toplam yıllık maliyet (\$/yıl), (Eşitlik 3.11)

$C_{yıllık, ser}$: toplam yıllık sermaye maliyeti (\$/yıl),

İşletme maliyeti değerlendirme kriteri olabilir fakat optimizasyondan sonra elde edilen modellerin karşılaştırmasında kullanıcıya net bir bilgi vermeyebilir. Hesaplamalarda geri ödeme süreleri de değerlendirilmektedir. İndirgenmiş (iskontolu) geri ödeme, indirgenmiş nakit akışı farkı çizgisinin sıfırı geçtiği yerdir. İskonto edilmiş geri ödeme süresi proje nakit akışlarının ağırlıklı sermaye oranı ile iskonto edilerek, yatırımın ne kadar sürede geri döndüğünü göstermektedir. Yüksek enflasyonlarda tercih edilebilir. Çalışmada para birimi ADB Dolar'ı seçilmesi nedeniyle karşılaştırmada bu değer kullanılmamıştır. Basit geri ödeme süresi, mevcut sistem ile temel durum sistemi arasındaki farkın kümülatif nakit akışının negatiften pozitif geçtiği yıl sayısıdır. Geri ödeme süresi, projenin başlangıçtaki yatırımlarını kapatmak için yeterli gelir elde ettiği süre yani bir yatırımın yarattığı nakit gelirlerin orijinal yatırıma eşit olması için gereken süredir. Zaman değerini göz önüne almadan, sistemin yatırım maliyetleri, harcamalar ve masrafların karşılandığı süreyi gösterir. Daha kolay bulunur ve uygulamadaki karşılaştırmada seçim yapmak için yeterlidir. Risk değerlemesi yapmaya gerek olmadan bulunabilir. Bu çalışmada basit geri ödeme süreleri (Simple payback) karşılaştırılan sistemler için ikinci kriter olmuştur. Modellenen sistem ile mevcut sistem arasındaki farkın kümülatif nakit akışının negatiften pozitif geçtiği yıl sayısıdır. Geri ödeme, modellenen ile mevcut sistem arasındaki yatırım maliyetlerindeki farkı geri kazanmanın ne kadar süreceğinin bir göstergesidir.

Kazandan (boiler) gelen termal enerjinin marjinal maliyeti (\$/kWh) Eşitlik 3.13'te verilmektedir. Seviyelendirilmiş enerji maliyetini hesaplarken bu değeri kullanılır.

$$C_{kazan} = \frac{3.6 \cdot (C_{yakıt} + C_{kazan,emis})}{\eta_{kazan} \cdot LHV_{yakıt}} \quad (3.13)$$

$C_{yakıt}$: yakıt maliyeti (\$/kg yakıt)

$C_{kazan,emis}$: kazandan kaynaklanan emisyonlarla ilişkili ceza tutarı (\$/kg yakıt)

η_{kazan} : kazan verimliliği (birimsiz)

$LHV_{yakıt}$: kazan yakıtının alt ısı değeri [MJ/kg]

1 kWh = 3.6 MJ.

Denklemdaki yakıt maliyeti, L veya m³ başına değil, kg başındadır. Hacimsel birimlerle ifade edilen yakıtlar için HOMER, yakıt yoğunluğunu kullanarak kg başına maliyeti hesaplar.

Sistem tarafından üretilen faydalı elektrik enerjisi kWh başına ortalama maliyeti olarak tanımlanan seviyelendirilmiş (düzeltilmiş) enerji maliyetidir (COE-\$/kWh) ve Eşitlik 3.14'te verilmektedir.

$$LCOE = \frac{C_{y\text{ıllık,top}} - C_{kazan} E_{\text{termal}}}{E_{y\text{ük,AA}} + E_{y\text{ük,DA}} + E_{\text{ert}} + E_{\text{ş,s}}} \quad (3.14)$$

HOMER seviyelendirilmiş enerji maliyetini (COE), toplam yıllık maliyetten termal yük hizmeti maliyeti çıkarıp, üretilen elektriğin yıllık maliyetini bulur ve yıllık toplam faydalı elektrik enerji üretimine bölerek hesaplar. Rüzgâr veya PV gibi bir termal yüke hizmet etmeyen sistemlerde ($H_{\text{termal}}=0$), bu terim sıfırdır. Düzeltilmiş enerji maliyeti ifadesi Eşitlik 3.14'te görülmektedir. Toplam yıllık maliyet $C_{y\text{ıllık,top}}$ (\$/yıl), AA yük miktarı $E_{y\text{ük,AA}}$ (kWh/yıl), DA yük miktarı $E_{y\text{ük,DA}}$ (kWh/yıl), ertelenebilir yük yani yıl boyunca ertelenebilir yüke hizmet eden toplam enerji miktarı E_{ert} ve $E_{\text{ş,s}}$ şebekeye toplam enerji satışı (kWh/yıl) (şebeke durumuna göre) olarak ifade edilmektedir[56].

NPC ve COE HOMER yazılımında bugünkü net maliyeti denklemini Eş. (3.10)'da ve Eş. (3.14)'te verildiği gibi hesaplamaktadır. HOMER, sistemin toplam yıllık maliyetini bulmak için kirlетici (zararlı) emisyon cezaları gibi çeşitli maliyetlerle birlikte her bileşenin yıllık maliyetlerini toplar [2,45]. Tüm bu hesaplamalar yapıldıktan sonra bir arayüzde sonuçlar paylaşılmaktadır İstenirse rapor olarak da sonuçlar alınabilmektedir (Şekil 3.3.).

Sensitivity Cases														
Hassaslık Analizi sonuçları														
Cost					System					Compare Economic				
NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Fuel cost (\$/yr)	OBM (\$/yr)	Ren Frac (%)	Total Fuel (m ³ /yr)	CO ₂ (kg/yr)	Present Worth (\$)	Annual Worth (\$/yr)				
\$46.2M	-\$0.0170	\$306,761	\$13.4M	\$691,407	\$426,016	22.3	2,304,691	9,226,531	\$41.8M	\$380,790				
\$43.8M	-\$0.0179	\$269,069	\$15.1M	\$691,407	\$388,324	25.3	2,304,691	8,821,942	\$44.1M	\$412,770				
\$32.4M	-\$0.0230	\$177,192	\$13.5M	\$691,407	\$295,934	27.7	2,304,691	8,812,105	\$55.5M	\$519,490				
\$30.3M	-\$0.0232	\$141,799	\$15.1M	\$691,407	\$260,541	30.4	2,304,691	8,480,163	\$57.6M	\$539,163				

Şekil 3.3. Simülasyon sonucu listelenen hibrit enerji modelleri örnek listesi.

Sistemdeki sera gazı emisyonları için sistemde kullanılan fosil yakıt ve bu yakıtı kullanan bileşenler ve sisteme bağlandığında şebeke değerlendirmeye alınmaktadır.

Güç sistemini simüle etmeden önce, HOMER her kirleticisi için emisyon faktörünü (tüketilen yakıt birimi başına yayılan kirleticisi kg) belirler. Simülasyondan sonra, emisyon faktörünü toplam yıllık yakıt tüketimi ile çarparak o kirleticinin yıllık emisyonlarını aşağıdaki altı zararlı madde emisyonları için hesaplar.

1. Karbon Dioksit (CO₂): Toksik olmayan sera gazı olan
2. Karbon Monoksit (CO): Yakıtlardaki karbonun eksik yanması sonucu oluşan zehirli gaz. Vücudun organlarına ve dokularına oksijen verilmesini önler, baş ağrısına, baş dönmesine ve görsel algı, el becerisi ve öğrenme yeteneğinin bozulmasına neden olur.
3. Yanmamış Hidrokarbonlar (UHC): Formaldehit ve alkenler dahil hidrokarbon yakıtın eksik yanması ürünleri. Fotokimyasal dumana neden olan atmosferik reaksiyonlara yol açarlar.
4. Partikül Madde (PM): Solunum sorunlarına neden olabilen ve atmosferik pus oluşturabilen duman, kurum ve sıvı damlacıkların karışımı.
5. Sülfür Dioksit (SO₂): Kükürt içeren yakıtların (kömür, petrol ve dizel yakıt gibi) yanması sonucu açığa çıkan aşındırıcı bir gaz. Solunum problemlerine, asit yağmuruna ve atmosferik pusluluğa neden olur.
6. Nitrojen Oksitler (NO_x): Herhangi bir yakıt yüksek sıcaklıkta yakıldığında azot dioksit (NO₂) ve nitrik oksit (NO) gibi çeşitli azot bileşikler oluşur. Bu bileşikler solunum problemlerine, dumana ve asit yağmuruna yol açar.

Karbon monoksit, yanmamış hidrokarbonlar, partikül madde ve nitrojen oksitler. HOMER, bu değerleri ve yakıtın karbon ve kükürt içeriğini kullanarak, kalan iki kirleticisi

için emisyon faktörlerini bulmak için bazı hesaplamalar yapar. Bunu yaparken, HOMER üç temel varsayım kullanır:

1. Yakıttaki karbon monoksit veya yanmamış hidrokarbonlar olarak salınmayan herhangi bir karbon, karbondioksit olarak salınır.
2. Yanmamış hidrokarbon emisyonlarının karbon oranı, yakıtinkile aynıdır.
3. Yakılan yakıtta partikül madde olarak yayılmayan herhangi bir kükürt, kükürt dioksit olarak yayılır.

Kirliliğe neden olan maddelerin emisyonu çoğunlukla geleneksel termik jeneratörden elektrik enerjisinin üretilmesinden, kazandan termik enerjinin üretilmesinden ve şebeke elektriğinin tüketiminden kaynaklanmaktadır. Jeneratör, kazan ve elektrik şebekesinden genellikle yayılan zararlı maddeler yukarıda da belirtilen karbondioksit, karbon monoksit, partikül madde, kükürt dioksit ve nitrojen oksitlerdir.

Simülasyonda jeneratör ve kazandan çıkan emisyon aynı şekilde belirlenirken şebekeden gelen emisyon farklı şekilde hesaplanır. Jeneratör veya kazandan kaynaklanan yıllık emisyon Eşitlik 3.15'teki gibi tahmin edilmektedir:

$$EM_{jen/boiler} = f_{jen/boiler,emis} \times F_t \quad (3.15)$$

$EM_{jen/boiler}$: Jeneratör/Kazan tarafından açığa çıkan zararlı maddenin emisyonu (g)

$f_{jen/boiler,emis}$: Emisyon Faktörü (g / kWh)

F_t : Toplam Yıllık Yakıt Tüketimi (yakıt eğrisinde karşılık gelen kWh)

Yakıt eğrisi parametresinin birimleri, jeneratör tarafından kullanılan yakıtın birimlerine karşılık gelir (Şekil 3.2.). Örneğin, yakıt gram olarak ölçülürse, yakıt eğrisi eğimi ve kesişme katsayısı g/kWh, litre olarak ölçülürse L/kWh olarak düşünülebilir. Bu eşitlikte g/kWh alınmıştır.

Sisteme şebeke eklendiğinde enerji satın alma ve satma mümkün olduğundan, yıllık şebeke emisyonu Eşitlik 3.16'teki gibi olur [57].

Şebekeye bağlı bir sistemi simüle ederken, HOMER toplam şebeke alımlarından toplam şebeke satışlarının çıkarılmasıyla elde edilen net şebeke alımlarını hesaplar. Bu net şebeke alımlarıyla ilişkili her bir emisyonla neden olan maddenin emisyonlarını hesaplamak için net şebeke alımlarını (kWh olarak) her kirlenici madde için emisyon faktörü (g/kWh olarak) ile çarpar. Sistem, şebekeye yıl boyunca şebekeden satın aldığından daha fazla güç satıyorsa, net şebeke alımları negatif çıkar. Yapılan bu çalışmada hiçbir tasarımda negatif değere maalesef ulaşılamamıştır [44].

$$EM_{\text{ş}} = f_{\text{ş,emis}} \times (E_{\text{tşA}} - E_{\text{tşS}}) \quad (3.16)$$

$EM_{\text{ş}}$: Şebeke tarafından açığa çıkan zararlı maddenin emisyonu (g)

$f_{\text{ş,emis}}$: Emisyon Faktörü (g / kWh)

$E_{\text{tşA}}$: Toplam şebekeden alınan enerji(kWh)

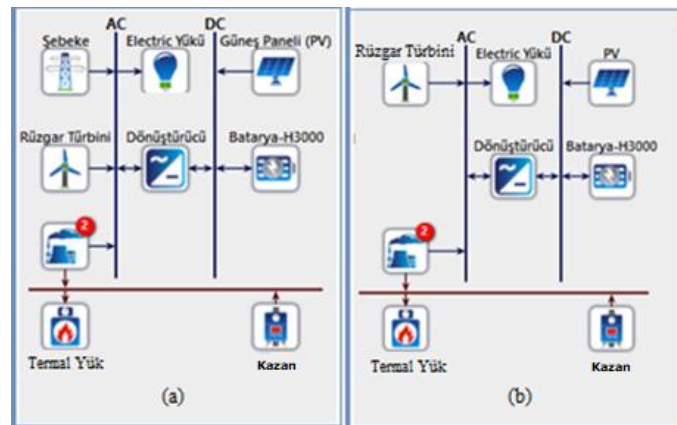
$E_{\text{tşS}}$: Toplam şebekeye satılan enerji (kWh)

Sistem, şebekeye yıl boyunca şebekeden satın aldığından daha fazla güç satıyorsa, net şebeke alımları negatiftir.

Eşitlik 3.16 ve 3.17’ de geçen emisyon faktörü, tüketilen yakıt birimi başına yayılan kirletici madde, zararlı emisyon gazlarıdır. Her iki eşitlik içinde tasarlanan sistemin yıllık emisyon miktarı proje ömrü ile çarpılarak proje ömrü boyunca toplam emisyonu hesaplamak mümkündür.

3.2. Yenilenebilir Enerji Bileşenlerinin Matematiksel Modellemesi

Simülasyonu yapılan iki sistem tasarlanmıştır. Mevcut şebekeye bağlı sisteme ve mevcut şebekeden bağımsız sisteme güneş paneli, rüzgâr türbini entegre edilerek pik yüklerin fosil yakıttan diğer yüklerin yenilenebilir enerjiyle sağlamayı amaçlayan ve net bugünkü maliyeti en düşük tasarımların içerisinde geri ödemesi en kısa ve karbon emisyonu açısından daha düşük sonuçlar verebilen optimizasyon yapılmıştır.



Şekil 3.4. Modellenen şebeke bağlı sistem modellemesi (a), şebekeden bağımsız (b)

Tüm bileşen girdileri tamamlandıktan sonra sistemin tamamı için elde edilen ekonomik çıktılar mevcut sistemle karşılaştırılmıştır. Tasarlanan sistem bileşenleri güneş paneli, rüzgâr türbini, doğrultucu ve dönüştürücü, batarya (pil) ve şebekedir. Her bir bileşenin ayrı ayrı oluşturulması sırasında sistem girdileri aşağıda ayrı ayrı anlatılmıştır.

3.2.1 Güneş paneli modellemesi

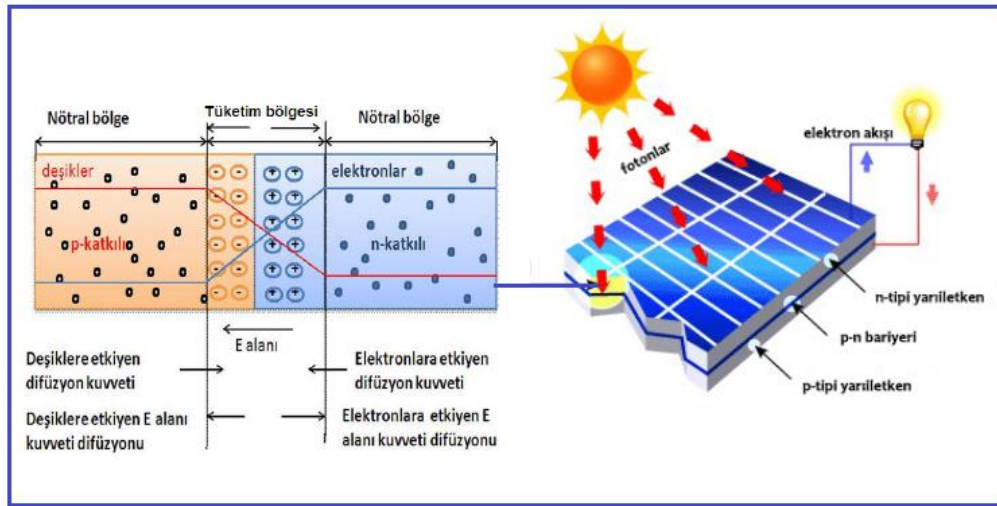
Güneş enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan yöntemlerden günümüzde en yaygın olanı yarı iletken malzemelerden yapılan güneş hücreleri (fotovoltaik (PV)) olup, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. Diğer yöntem olan ısı güneş teknolojileri ve odaklanmış güneş enerjisi (CSP) teknolojilerinde ısı doğrudan kullanılabileceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir [47]. Düzlemsel güneş kolektörleri, vakumlu güneş kolektörleri, güneş havuzları, güneş bacaları, su arıtma sistemleri, güneş mimarisi, ürün kurutma sistemleri ve seralar, güneş ocakları gibi birçok kullanım alanı olan düşük sıcaklık sistemleri bir diğer sınıfı oluştururken, yoğunlaştırıcı sistemler üçüncü ve son sınıfını oluşturur [47].

Bu sistemde uygun bir güneş paneli doğru sayıda ve konumda kullanarak sistemde en verimli şekilde kullanılması için PV sistemine ait bilgiler aşağıdaki gibidir.

Güneş kaynaklı fotonların enerjileri, güneş hücreleriyle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Güneş hücresinin çalışmasını sıcaklık, yüzey ve açı etkileri olmak üzere üç unsur etkiler. Güneş hücreleri (panelleri) 25 °C sıcaklık ideal sıcaklıkları, 1.000 W/m² Güneş radyasyonu ve 1.5 AM (Hava ağırlığı, atmosferin güneş ışınlarını geçirgenliği katsayısı) değerleri olmaktadır. Havanın ağırlığı (AM) için panelin yerleştirilmesi önem kazanmaktadır. Gelen güneş ışınının düşey açısının (zenit açısı) $1/\cos \theta$ değeri AM değerini verir. Güneş tam tepede olduğunda Hava Kütlesi 1 değerini alır. Yüzey konusunda panelin büyüklüğü, alanı ve çeşidi önemlidir. Hücrelerden oluşan panellerin yüzeylerine yansıtıcı katman konularak güneş ışınlarından daha fazla yararlanıla bilinmesi için farklı yüzey şekillerinden oluşturulabilirler. Hücrenin verimini etkileyen panellerin hareketi 0° -180° arasında değişen açılarla güneş ışınlarını en fazla en verimli şekilde alacağı pozisyonu belirler. PV sistemlerin verimi, panelin ürettiği elektrik miktarının o alana gelen global güneş ışınımının oranı şeklinde hesaplanabilir.

Güneş hücresi (fotovoltaik) terimi, ışıktan gerilim üretilmesi anlamına gelir, genellikle "PV" ile gösterilir ve yarıiletken malzemelerden oluşmuş hücrelerle güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine (DA) dönüştürebilen bir teknolojidir. PV hücrelerin yüzeyine güneş ışığı düştüğünde bu elektrik alanı momentum (kuvvet) sağlar ve ışıkla uyarılmış n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde elektronlar oluşur. Sistemde oluşturulan eksik kalan elektron yerlerine de boşluk (hole) adı verilmektedir. Bu şekilde, p-tipi bir yarı iletken malzeme elde edilmiş olur. Elde edilen bu n-tipi ve p-tipi plakalar bir araya getirilmek suretiyle fotovoltaik hücreler elde edilir. Bu n-tipi plakanın üzerine düşen güneş ışığı, plakada fazladan bulunan 1 elektrona gereken enerjiyi verdiğinde elektron p-tipi plakaya geçer. Bunu yaparken de devrede doğru akım (DA) meydana gelir. Yarıiletken

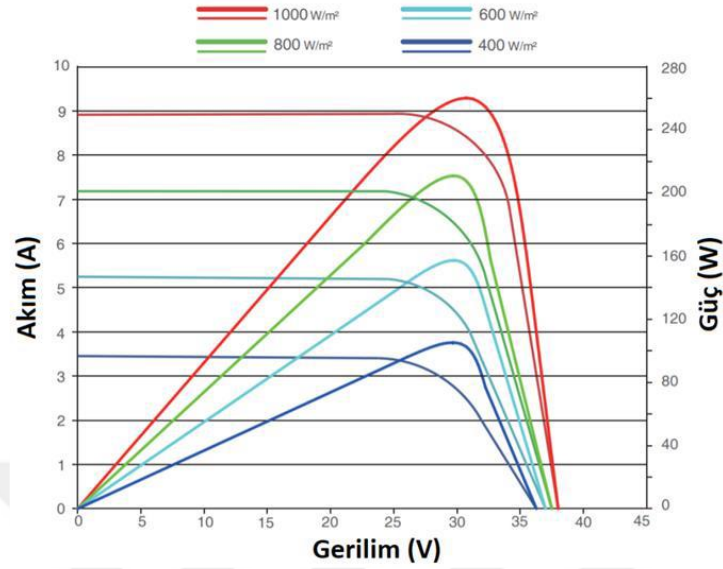
malzemenin PV hücre olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaiik olayın iki aşamada olması sağlanır. İlk olarak eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hole (bir tarafta fazla elektron olan n-tipi plaka bir tarafta elektron boşluğu olan p-tipi plaka) çiftleri oluşturulur. İkinci olarak ise; elektron-hole çiftleri bölgedeki elektrik alan yardımı ile birbirlerinden ayrılır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hole çiftleri, PV hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar (Şekil 3.6). Hücreler ışınlam aldığı sürece bu elektrik üretme döngüsü devam eder [48]. Hücre bir devreye bağlandığında elektrik akımı meydana gelir. Hücrelerin gücü devreden geçen akımla orantılı olup, akımı arttırabilmek fotovoltaiik sistemin yüzey alanını genişletmek, elektron ve boşluk sayılarını arttırmakla mümkündür. Fotovoltaiik hücreler birbirlerine bağlanarak modülleri, modüller birbirlerine bağlanarak panelleri, paneller birbirlerine bağlanarak fotovoltaiik diziler elde edilir (Şekil 3.5.). Güç talebine bağlı olarak, modüller seri ya da paralel bağlanarak; birkaç Watt' tan MW' lara ulaşabilen sistemler oluşturulabilir.



Şekil 3.5. Fotovoltaiik enerji dönüşüm sistemi [49,50]

Fotovoltaiik sistem tasarımlarında en önemli konulardan biri güneşten alabildiği ışınlamdır. Şekil 3.6.'de görülebileceği gibi PV panellerin performansına ışınlamın etkisi görülebilmektedir. PV dizisinin güç çıkışı, genel olarak yatay olmayan PV dizisinin yüzeyine çarpan radyasyon miktarına bağlıdır. Bu nedenle, her zaman diliminde, PV dizisinin yüzeyindeki küresel güneş radyasyonu olayını hesaplanmaktadır. GHI, dünya üzerindeki yatay yüzeye çarpan toplam güneş radyasyonu miktarıdır yani GHI, ışınlam radyasyonu (doğrudan normal ışınlam veya DNI olarak da adlandırılır), dağınık ışınlam ve yerden yansıyan radyasyonun toplamıdır. Düz panel PV dizisi çıkışını hesaplamak için

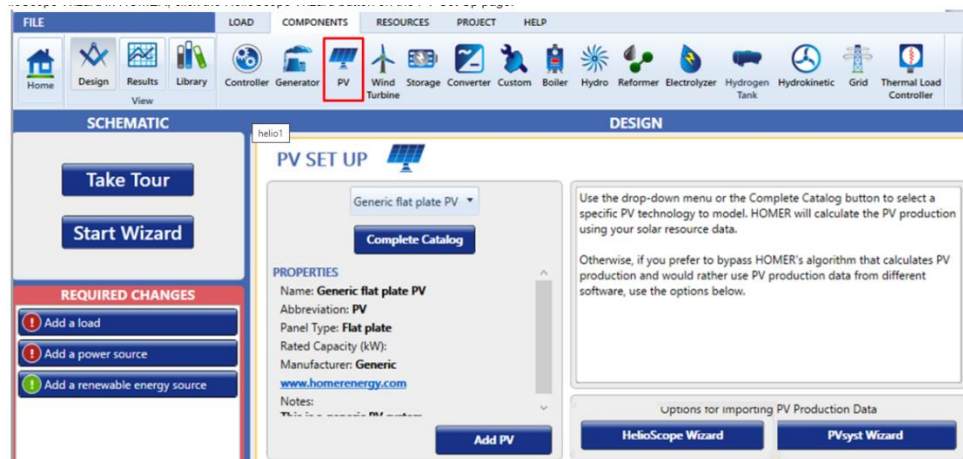
Global Yatay Işıma (GHI) Kaynağı kullanılacağı için bu tür sistemlerin tasarımları için GHI değerleri kullanılmıştır.



Şekil 3.6. PV panellerin ışıma bağlı akım, gerilim, güç değişim değerleri [51].

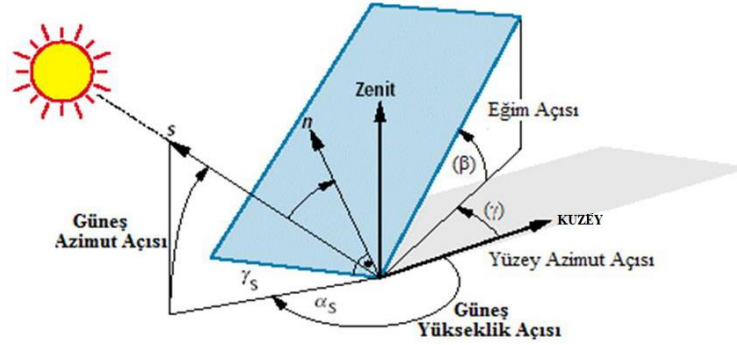
Ana sayfada haritada bir konum seçildiğinde enlem ve boylam burada görünür. Bu çalışmada ile ait enlem ve boylam manuel girilmiştir. Açılır menüden saat dilimi seçilir. HOMER, PV güç hesaplamasının çeşitli yönleri için konumu belirtmek önemlidir.

PV sistemlerin güneş ışınlarını en fazla en verimli şekilde alacağı pozisyonu belirlerken bazı açılar kullanılmaktadır. HOMER sisteminde sistemle ilgili açılar ve diğer tüm bilgilerin girilmesi için bir arayüz kullanılmaktadır. Şekil 3.7.'de PV için kullanılan arayüz örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.7. HOMER PV bilgilerinin girildiği arayüz

Panellerin yerleşim yeri ve yerleşim şekli de verimi büyük ölçüde etkilemektedir. PV sistemler modellenirken panellerin yerleşim açıları sisteme girilerek bir düzenleme yapılmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Güneş açıları [52].

PV dizisinin yönü iki parametre kullanarak tanımlanabilir. Biri eğim ve diğeri azimut açılarıdır. Eğim, panelin yüzeyi ile yatay arasında oluşan açıdır, dolayısıyla sıfır eğimi yatay yönelimi, 90°'lik eğim ise dikey yönelimi gösterir. Mevsimlere göre ayarlanması pratikte mümkün olmadığı için genellikle yıllık elektrik üretimi, seçilen bölgenin enlemi dikkate alınarak sabit bir eğim açısı belirlenir [53]. Azimut, yüzeyin baktığı yönde denebilir, güneş panellerinin ekvator çizgisine olan uzaklığını gösterir. HOMER, sıfır azimutun tam güneye karşılık geldiği ve pozitif değerlerin batıya bakan yönler karşılık geldiği kuralı kullanır. Bölge Türkiye gibi kuzey yarım kürede ise güneş azimut açısı, güney yönünde azimut açısı 0° ve batı yönünde azimut açısı 90°'dir. Yani -45 °'lik bir azimut güneydoğuya bakan bir yönelime karşılık gelir ve 90 °'lik bir azimut batıya bakan bir yönelime karşılık gelir.

PV modüllerinin güç çıkışını PV üreticileri, 1 kW/m² radyasyon, 25 °C hücre sıcaklığı ve rüzgâr olmayan standart test koşullarında (STC) değerlendirir. Güneş paneli sıcaklıkları 25°C'den çok daha yüksek olma eğiliminde olduğundan, standart test koşulları tipik çalışma koşullarını yansıtmaz. Bu koşullarda değerlendirme yapılan sistemin yanılma payı olabileceği göz önüne alınmalıdır.

PV dizisinin güneş ışığını maksimum güç noktasında elektriğe dönüştürdüğü PV modülleri için standart test koşulları altındaki verimliliğin ($\eta_{mp,STC}$ (%)) hesaplanmasında Eşitlik 3.17'i kullanır.

$$\eta_{mp,STC} = \frac{Y_{PV}}{A_{PV} G_{T,STC}} \quad (3.17)$$

Eşitlikte Y_{PV} kW olarak standart test koşulları altında PV modülünün nominal güç çıkışı, A_{PV} ise PV modülünün yüzey alanının m^2 cinsinden karşılığı ve $G_{T,STC}$ standart test koşullarında radyasyon ($1 \text{ kW}/m^2$) değerini vermektedir. $\eta_{mp,STC}$ HOMER kütüphanesinden ya da seçili panel için manuel girilen bilgilerden standart koşullarda bulunduktan sonra PV dizisinin standart test koşulları altındaki güç çıkışı (Y_{PV} (kW)) Eşitlik 3.5’de yerine koyularak bulunabilir.

Fotovoltaik (PV) güç sıcaklık katsayısı, PV dizisi güç çıkışının hücre sıcaklığına, yani PV dizisinin yüzey sıcaklığına ne kadar güçlü bağlı olduğunu gösterir. Negatif bir sayıdır çünkü güç çıkışı artan hücre sıcaklığı ile azalır. PV modül üreticileri genellikle bu katsayıyı ürün broşürlerinde sağlarlar ve genellikle ya gücün sıcaklık katsayısı, güç sıcaklığı katsayısı ya da maksimum güç sıcaklık katsayısı olarak broşürlerde yer alabilir (α_P). PV dizisinin her zaman maksimum güç noktasında çalıştığını varsaydığımızda hücre verimliliğinin (η_c) her zaman maksimum güç noktası verimliliğine eşit olduğunu varsaydığı anlamına gelir ($\eta_c = \eta_{mp}$). Gücün sıcaklık katsayısı normalde negatiftir, yani artan hücre sıcaklığı ile PV dizisinin verimliliği azalır. HOMER, verimlilik denklemini ve hücre sıcaklığı denklemlerini kullanarak hücre sıcaklığını Kelvin cinsinden her zaman adımında hesaplar (T_c) (Eşitlik 3.18.) daha sonra sistemin güç çıktısını (P_{PV}) hesaplamak için $^{\circ}\text{C}$ ’ a çevrilir.

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,STC} \left[1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC}) \right] \quad (3.18)$$

$\eta_{mp,STC}$: standart test koşulları altında maksimum güç noktası verimliliği (%)

α_P : gücün sıcaklık katsayısı ($\%/^{\circ}\text{C}$)

$T_{c,STC}$: standart test koşulları altında hücre sıcaklığı (25°C)

Eşitlikteki değerler sisteme girdi olarak alınmakta ve Eşitlik 3.16’dan T_c elde edildikten sonra her zaman adımında hücre sıcaklığını hesaplamak için kullanılır. Bu değer PV güç çıkışı için hesaplanması gereken bir girdidir.

Deretasyon faktörü (f_{PV}) dizinin, derecelendirildiği çalışma koşullarına kıyasla gerçek dünya çalışma koşullarındaki azaltılmış çıktıyı hesaba katmak için PV dizisi güç çıkışına uygulanan bir ölçeklendirme faktörüdür. Örneğin % 80’lik bir değer kaybı faktörü (deretasyon faktörü (f_{PV})), panelin nominal spesifikasyondan % 20 daha az güç ürettiği anlamına gelir.

HOMER belirli zaman aralıkları için PV dizisindeki küresel radyasyon olayını ($\bar{G}_T$ (kW/m^2)) sisteme girilen bazı bilgilerle HDKR modeli acılığıyla hesaplar [44]. PV dizisinin eğik yüzeyine çarpan küresel radyasyonu hesaplamak için, dağınık güneş radyasyonunun üç

bileşeni olduğunu varsayan HDKR modeli gökyüzünün tüm bölümlerinden eşit olarak gelen izotropik olan, güneş çevresinde olan ve güneş yönünden kaynaklanan ve ufuktan yayılan bileşenlerden oluşmaktadır.

Bu hesaplamada kullanılan sisteme girilen 1'den 365'e kadar yılın her günü için hesaplama yapılması gerektiği için, sisteme girilen enlem ve boylam bilgileriyle yıl içerisinde değişen güneşin yerine göre güneş sapması olarak bilinen deklinasyon açısını (δ) HOMER hesaplar.

Sistemin geometrisiyle ilgili diğer faktörler enlem, yılın zamanı ve günün saatidir. Güneşin gökyüzündeki konumunu etkileyen günün saati, bir saat açısıyla tanımlanmaktadır. Güneşin gökyüzündeki en yüksek noktasında olduğu günün saati yani öğle vaktindedir. HOMER, saat açısının hesaplanmasında güneş öğleden önce negatif ve güneş öğleden sonra pozitif olduğu kuralını kullanır ve ekliptik düzlemine göre dünyanın dönme ekseninin eğimini kullanarak zaman denklemine uyarlayıp, PV panellerin yerleştirilmesinde yüzey eğimi (θ), gelme açısı (β) gibi ayrıntılı tanımların yapılabildiği paneller için HOMER uyguladığı HDKR modeli aracılığıyla $\bar{G}_T$ 'yi (kW/m^2) hesaplar.

Fotovoltaik sistemin güç çıktısını HOMER Eşitlik 3.19'dekine göre hesaplamaktadır.

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})] \quad (3.19)$$

Standart test koşulları: rüzgârın olmadığı ortamda, radyasyon değeri 1 kW/m^2 , hücre sıcaklığı 25°C olarak kabul edilir.

Y_{PV} : standart test koşullarında (STC) fotovoltaik nominal güç (kW)

f_{PV} : Akım taşıma indirgeme faktörü (Deretasyon faktörü) (%)

$\bar{G}_T$: Fotovoltaik yüzeydeki anlık ışıma (kW/m^2)

$\bar{G}_{T,STC}$: Standart test koşullarında anlık ışıma (1 kW/m^2)

α_P : Gücün sıcaklık katsayısı ($\%/^\circ\text{C}$)

T_c : Geçerli zamandaki fotovoltaik hücre sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)

$T_{c,STC}$: Standart test koşullarında fotovoltaik hücre sıcaklığı (25°C)

Sermaye maliyeti, ilk satın alma fiyatıdır, yenileme maliyeti, kullanım ömrü sonunda PV sisteminin değiştirilmesinin maliyetidir ve işletme ve bakım maliyeti, PV sisteminin

yıllık işletim ve bakımının maliyetidir. Bu kapsamda sermaye ve yenileme maliyetlerini belirlerken, PV paneller, montaj donanımı, takip sistemi, kablolama, kurulum gibi PV sistemiyle ilişkili tüm maliyetleri hesaba katmak gerekir. Bu verileri girebilmek için kurulum için seçilen yerin gerçek verilerinin olduğu fizibilite çalışmasının ardından uygun fiyatların mevcut piyasa koşullarında alınması önemlidir.

Panellerin kirlenmesi, kablolama kayıpları, gölgeleme, kar örtüsü, yaşlanma vb. gibi faktörleri hesaba katmak için değer kaybı faktörünü kullanılmaktadır (f_{pv}). Yukarıda anlatılanlar Tablo 3.4. özetlemektedir.

Tablo 3.4. PV sistem modellemesinde sistem girdileri ve çıktıları

Teknik Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Global Yatay Işıma (GHI) Kaynak bilgisi	GHI	PV dizisi çıkışı hesaplamaları
PV dizisinin güç çıkışı	AA veya DA	Fotovoltaik sistemin güç çıkışı, P_{pv}
PV panel ömrü	R	
İndirgeme faktörü (Deretasyon faktörü) (%)	f_{pv}	
Standart test koşullarında fotovoltaik nominal güç (kW)	Y_{pv}	
Mevcut zaman adımıdaki PV hücre sıcaklığı ($^{\circ}C$)	T_c	
Mevcut zaman adımıdaki PV dizisindeki güneş radyasyonu olayı (kW/m ²)	$\bar{G}_T$	
Standart test koşulları altında PV modülünün verimliliği [%]	$\eta_{mp,STC}$	PV dizisinin maksimum güç noktasındaki verimliliği (%), η_{mp}
PV modülünün yüzey alanı (m ²)	A_{pv}	
PV gücün sıcaklık katsayısı (%/ $^{\circ}C$)	α_p	
Enlem Açısı	ϕ	Mevcut zaman adımıda PV dizisindeki güneş radyasyonu olayı (kW/m ²)
Eğim açısı değeri	ω	
Bölgeye ait saat dilimi	/	
PV panellerin baktığı yön, azimut açısı ($^{\circ}$)	γ	
Ekonomik Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Sistem sabit İşletme ve Bakım maliyeti (O&M) (\$/yıl)	$C_{im,sabit}$	Sistem maliyet hesapları
Sistemin modellemesinden bağımsız oluşan sabit sermaye maliyeti (\$)	$C_{ser,sabit}$	Sistem maliyet hesapları
Arama alanı (kaç panel kullanıldı)	adet	Karşılanan elektrik yükü
Fotovoltaik panel net bugünkü maliyetinin hesaplanması gereken yıl sayısı, ömrü	R_{pv}	Toplam net şimdiki maliyet
Değiştirme maliyeti (\$)	$C_{değ}$	Hurda değeri
Bileşenin ömrü (yıl)	$R_{bileşen}$	Hurda değeri
PV panel verimi	η_p	Sistemdeki panel maliyeti

3.2.2 Rüzgâr türbini modellemesi

Güneşin yer yüzeyini farklı ısıtması, sıcaklığın, nemin ve basıncın farklı olmasına neden olur. Oluşan basınç farklılıkları havanın hareketine neden olur. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin %2'si kadarı rüzgâr enerjisine dönüşmektedir. Dünyadaki bütün rüzgâr kaynağı kullanılabilirse 4.0×10^{22} J kadar enerji üretilebilir. Teorik olarak $4,0 \times 10^{22}$ J enerji dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacının (2.0×10^{20} J) 200 katıdır. Buradan da anlaşılacağı gibi rüzgâr oldukça yüksek potansiyele sahip bir enerji kaynağıdır.

Havanın kinetik enerjisini mekanik bir enerjiye ve sonra elektrik enerjisine dönüştüren makinelere rüzgâr türbini denir. Rüzgâr türbinleri, lokal rüzgârları kullanarak mevcut rüzgâr potansiyeli üzerinden kendi verimleri doğrultusunda enerji üretebilirler. Rüzgâr hız ve yön olmak üzere iki parametre ile ifade edilir. Rüzgâr hızı yükseklikle artar ve teorik gücü de hızının küpü ile orantılı olarak değişir.

HOMER, üç aşamalı bir süreç kullanarak her zaman dilimi için rüzgâr türbininin güç çıkışını hesaplar. Önce HOMER, rüzgâr türbininin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını hesaplar. Ardından, standart hava yoğunluğunda bu rüzgâr hızında rüzgâr türbininin ne kadar güç ürettiğini hesaplar. Son olarak, HOMER, gerçek hava yoğunluğu için bu güç çıkış değerini hesaplar.

Güç yasasını uygulamasıyla HOMER, Eşitlik 3.20'i kullanarak göbek yüksekliği rüzgâr hızını hesaplar:

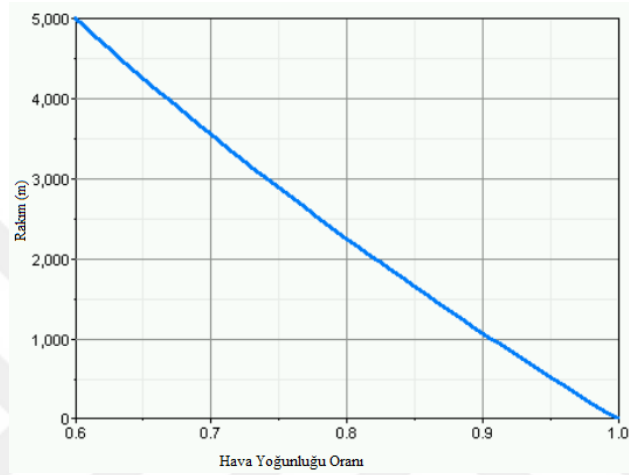
$$U_{hub} = U_{anem} \left(\frac{z_{hub}}{z_{anem}} \right)^{\alpha} \quad (3.20)$$

Meteoroloji istasyonlarında anemometreyle genellikle yerden 10 m yükseklik için hesaplanan rüzgâr hızını hub yüksekliği için hesaplarken kullanılan Eşitlik (3.1)'de U_{hub} (m/s) rüzgâr türbininin göbek (hub) yüksekliğindeki rüzgâr hızı, U_{anem} (m/s) anemometre yüksekliğindeki rüzgâr hızı, z_{hub} (m) rüzgâr türbininin göbek (hub) yüksekliği, z_{anem} anemometre yüksekliği (m), kuvvet yasası üssü olan α bölgenin topoğrafyasına bağlı olan bir katsayıdır ve genellikle 1/7 olarak kabul edilir.

Rüzgâr hızı havanın yoğunluğuyla da doğru orantılıdır. Rakım, ortalama deniz seviyesinden yüksekliğidir. Rakım hava yoğunluğunu etkiler ve bu da rüzgâr türbini çıkışını etkiler (Şekil 3.9.). Bu nedenle HOMER, rüzgâr türbininin çıkışını hesaplarken rakımı dikkate alır. Hesaplamalarda hava yoğunluğu oranı için Eşitlik 3.21'yi kullanır.

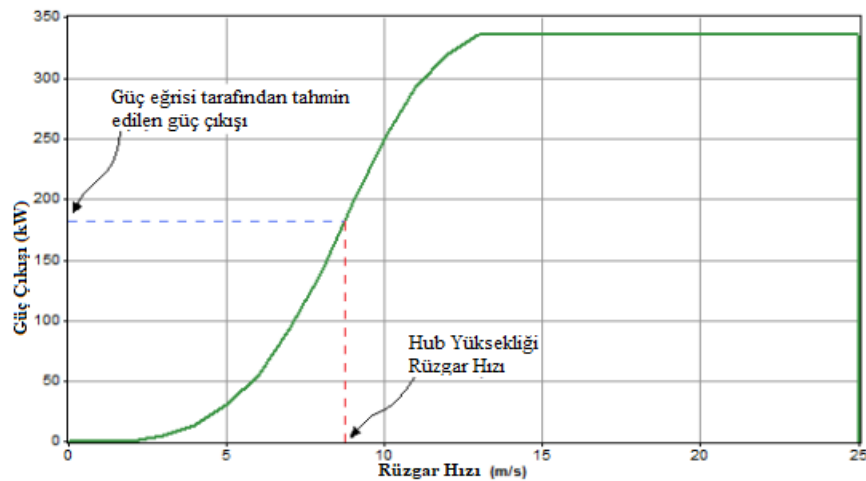
$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{Bz}{T_0} \right)^{\frac{g}{R}} \left(\frac{T_0}{T_0 - Bz} \right) \quad (3.21)$$

Eşitliğin sağ tarafında, yalnızca z , yani yükseklik sabit değildir. HOMER 'de kullanılan varsayımlarla, hava yoğunluğu oranı yalnızca yüksekliğin bir fonksiyonudur. Burada ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), ρ_0 standart koşullar hava yoğunluğu (kg/m^3) (deniz seviyesi, 15°C), T_0 standart koşullar sıcaklık (288.16 K), B Rakımın yükselmesiyle atmosfer sıcaklığının azalma miktarı ($0,00650\text{ K/m}$), z Rakım (m), R gaz sabiti (287 J/kgK), g ($9,81\text{ m/s}^2$) yerçekimi ivmesidir [44].



Şekil 3.9. Hava yoğunluğunun rakıma göre değişimi

Standart hava yoğunluğunda türbin güç çıkışının hesaplarken HOMER, göbek (hub) yüksekliği rüzgâr hızını kaynak girdilerinden belirledikten sonra, standart sıcaklık ve basınç koşulları altında bu rüzgâr hızında rüzgâr türbininden beklenen güç çıkışını hesaplamak için rüzgâr türbininin güç eğrisinden yararlanır. (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Rüzgâr türbini güç grafiği

Kırmızı noktalı çizgi göbek yüksekliği rüzgâr hızını gösterir ve mavi noktalı çizgi, güç eğrisinin o rüzgâr hızı için öngördüğü rüzgâr türbini güç çıkışını gösterir. Türbin göbeği yüksekliğindeki rüzgâr hızı, güç eğrisinde tanımlanan aralık içinde değilse, minimum kesme rüzgâr hızının altında veya maksimum kesme rüzgâr hızının üzerindeki değerlerde türbin güç üretmez.

Güç eğrileri tipik olarak standart sıcaklık ve basınç (STP) koşulları altında rüzgâr türbini performansını belirtir. Gerçek koşullara uyum sağlamak ve P_{WTG} rüzgâr türbini güç çıkışını (kW) hesaplamak için HOMER, rüzgâr türbini güç eğrisinden elde edilen güç değerini (Eşitlik 3.22) hava yoğunluğu oranıyla çarpar:

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot P_{WTG,STP} \quad (3.22)$$

Burada $P_{WTG,STP}$ standart sıcaklık ve basınçta rüzgâr türbini güç çıkışı (kW), ρ gerçek hava yoğunluğu (kg/m^3), ρ_0 ise standart sıcaklık ve basınçta hava yoğunluğu (1.225 kg/m^3) olarak geçer. Rüzgâr türbin(ler)inin ortalama güç çıkışının toplam rüzgâr türbini kapasitesine bölümü, % olarak C_p ile ifade edilen kapasite faktörünü verir. Bu değer türbinin ne kadar verimli kullanıldığını gösterir.

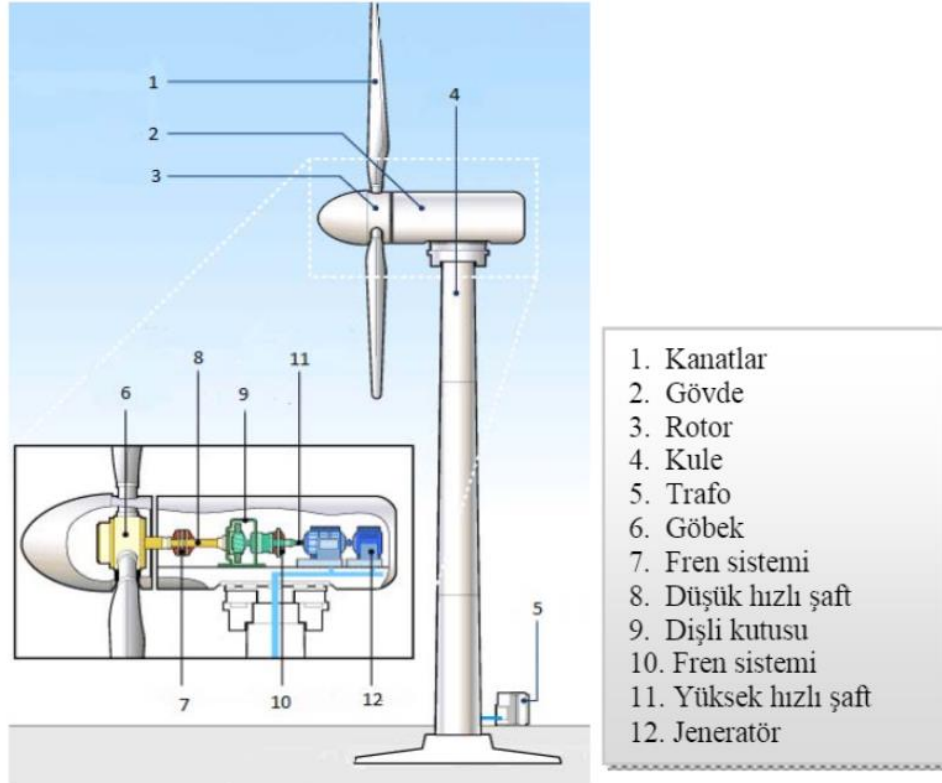
Rüzgâr türbinleri ilk yatırım maliyeti yüksek fakat kapasite faktörü düşük, değişken üretimi olan rüzgâr enerjisinin; yenilenebilir, çevre dostu, tükenmeyen, fiyat değişikliği olmayan bir kaynak olmasıyla, düşük bakım ücretleri ve işletme maliyetleri gibi birçok olumlu özelliğiyle giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Dönme eksenlerine göre adlandırılan rüzgâr türbinlerinde, yatay eksenli olarak adlandırılan ve bu çalışmada tercih edilen rüzgâr türbininin bileşenleri kule, jeneratör, dişli kutusu, göbek, elektrik-elektronik elemanlar ve kanattır ve Şekil 3.11.'de ana hatları gösterilmektedir.

Rüzgâr türbinleri belirli bir rüzgâr hızında çalışabilirler. Bir rüzgâr türbini devreye alma hızı 2-4 m/s, devreden çıkarma 25-35 m/s rüzgâr hızları arasında enerji üretimini gerçekleştirir. Teknolojiyle doğru orantılı bu değerler daha iyiye gitmektedir. Sistemin hasar görmemesi için belirli bir rüzgâr hızından sonra rüzgâr türbinlerinin durma konumuna geçmesi otomatik olarak sağlanır.

Kurulum yapılmasına karar verilen bölgedeki rüzgâr verilerine göre rüzgâr enerji santrali türbin sistemi kullanılacak bazı programlar ile verilere ve maliyete uygun türbin ya da türbinler seçilir. Türbin çeşitleri ve adetine karar verirken bu seçimlerde yardımcı olan

yazılım programlarından faydalanılmaktadır. Bu çalışmada rüzgâr hızı dikkate alınarak HOMER Pro yazılımı ile hibrit sistem için uygun türbin adedine karar verilmiştir.

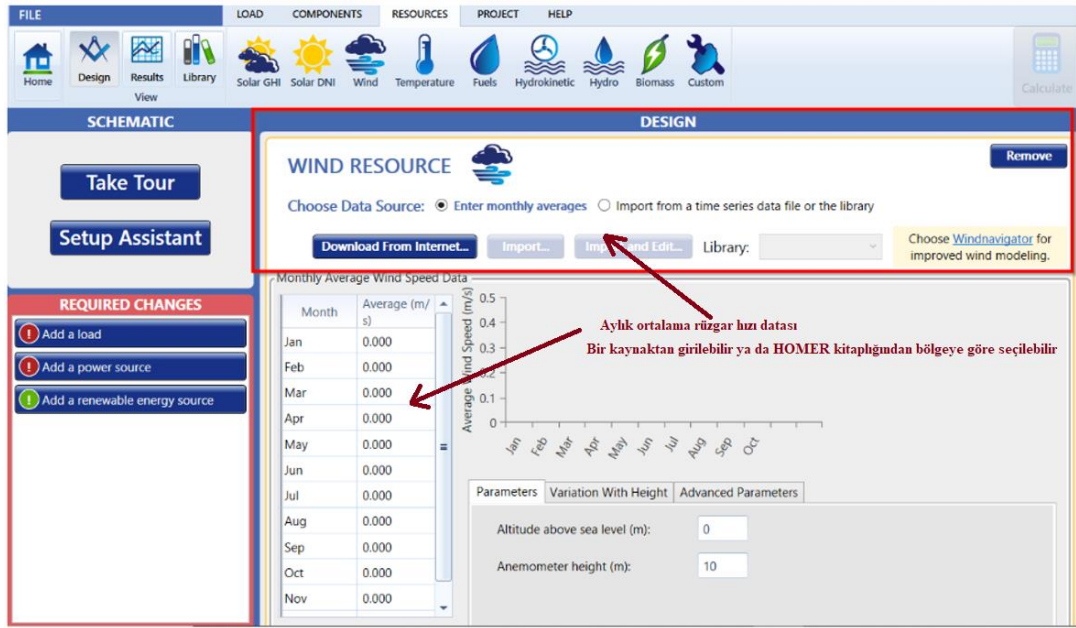


Şekil 3.11 Yatay eksenli rüzgâr türbini genel yapısı

Rüzgâr türbini kullanarak rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çevirdiğimizde çalışma prensibi gereği rüzgârdaki enerji, kanatların bağlı olduğu rotoru döndürür ve havadaki kinetik enerji mekanik enerjiye çevrilir. Jeneratöre aktarılan mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilir. Elde edilen enerjide rüzgârın ve türbinin en önemli etken olduğu simülasyonda türbinlerin yerleşiminde bu değerler üzerinden genel bir hesaplama yapılmaktadır. Yerleşim alanı ve türbinlerin yerleşiminde birbirlerine olan etkileri, kurulum yerinin topoğrafik koşulları, hatta havanın yoğunluğu, arazinin bitki örtüsü gibi daha birçok faktörün değerlendirilmesi daha net sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada uygulama alanına ait fizibilite çalışması yapılamadığı için genel bir değerlendirme yapılmaktadır.

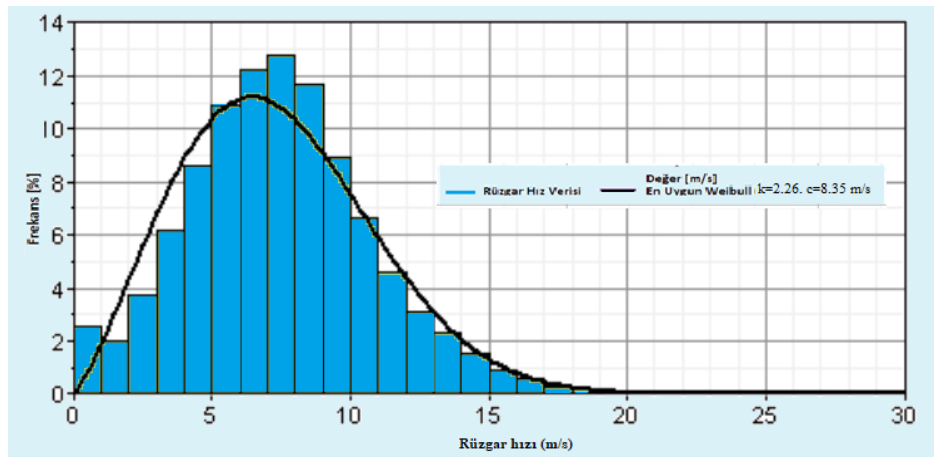
HOMER kaynak veri tabanı, her bir konum için belirli değerleri içeren bazı bölgelere ilişkin verilere sahiptir. Bu girdiler için değerler içeren bir kaynak indirilmeyecekse kaynak değerleri otomatik olarak kendi veri tabanından doldurulur. Saatlik rüzgâr ölçümleri HOMER url bağlantısıyla NASA verilerinden alınabildiği gibi dosya olarak da eklenebilir.

Veri bulunmadığı zaman, saatlik veriler aylık ortalamalardan oluşturulabilir. Şekil 3.12.'te bilgilerin girildiği HOMER arayüzü görülmektedir.



Şekil 3.12. HOMER rüzgâr verilerinin girildiği arayüz

Rüzgâr kaynağı değerlerini HOMER varsayılanlarla değiştirmezse, her bir parametre için belirli bir konumdaki rüzgâr verileri hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmadan bu parametrelerin her birinin değerini tahmin edebilmemizi sağlar. HOMER’de ölçülen rüzgâr verileriyle iyi bir uyum sağlayan Weibull dağılımı, rüzgâr rejimlerini karakterize etmek için en çok kullanılan fonksiyon olması nedeniyle tercih etmiştir. HOMER rüzgâr hızı verileriyle bu dağılımın biçimini belirleyen k değeriyle seçili bölgenin rüzgâr hızı karakteristiğini ve eğilimini oluşturarak bölgeye uygun Weibull dağılımını oluşturur (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13 Rüzgâr hızlarının tipik bir dağılımı ve en uygun Weibull dağılımı örneği.

Ortalama bir rüzgâr hızı ve bir Weibull k değeri kullanılarak bir Weibull dağılımı tanımlanabilir. Bu çalışmada bölgeye ait rüzgâr verileri olduğu için Weibull dağılımı kullanılan yol tercih edilmemiştir [46].

Bu çalışmada bölgeye ait rüzgâr verileriyle ve hup yüksekliği hava yoğunluğu gibi bilgilerle HOMER Eşitlik 3.3'te tanımlanan P_{WTG} rüzgâr türbini güç çıkışını hesaplar. Modellenen sistemde HOMER sistemdeki enerji kaynaklarının bu güç çıkışlarını sistemin yükleri için gerekli modellemeyi yaparken kullanır. Rüzgâr türbini için sisteme girilen bilgiler özet olarak Tablo 3.5 de yer almaktadır.

Tablo 3.5. Rüzgâr Türbini modellemesinde sistem girdileri ve çıktıları.

Teknik Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Bölgeye ait rüzgar hızı kaynak bilgisi	U_{anem}	Rüzgar hız hesaplamaları
Türbin güç çıkışı	AA veya DA	Rüzgar türbin güç çıktısını, P_{WTG}
Türbin ömrü	R	
Standart sıcaklık ve basınçta rüzgar türbini güç çıkışı (kW)	$P_{WTG,STP}$	
Gerçek hava yoğunluğu (kg/m ³)	ρ	
Standart koşullarda hava yoğunluğu (kg/m ³)	ρ_0	
Rakım	B	
Standart koşullar sıcaklık (288.16 K)	T_0	
Kapasite faktörü	C_p	Türbin verimi hesaplamalarında
Enlem boylam bilgisi	Enlem&Boylam	Rüzgar verileri; maksimum , minimum , yıllık ortalama rüzgar hızları
Aylık rüzgar hızları	/	
Türbin güç grafiği	/	
Türbin kapasitesi	C	
Ekonomik Girdiler	Sembol	Elde Edilen Çıktı
Sistem sabit İşletme ve Bakım maliyeti (O&M) (\$/yıl)	$C_{im,sabit}$	Sistem maliyet hesapları
Sistemin modellemesinden bağımsız oluşan sabit sermaye maliyeti (\$)	$C_{ser,sabit}$	Sistem maliyet hesapları
Arama alanı (kaç türbinkullanıldı)	adet	Karşılana elektrik yükü
Fotovoltaik panel net bugünkü maliyetinin hesaplanması gereken yıl sayısı, ömrü	R_{rt}	Toplam net şimdiki maliyet
Değiştirme maliyeti (\$)	C_{deg}	Hurda değeri
Bileşenin ömrü (yıl)	$R_{bileşen}$	Hurda değeri/Mali hesaplar

4. UYGULAMA

Modellenen sistem Ege Bölgesi'nde bir ildeki veriler üzerinden uygulama yapılarak değerlendirilmiştir.

4.1. Sistem Girdileri

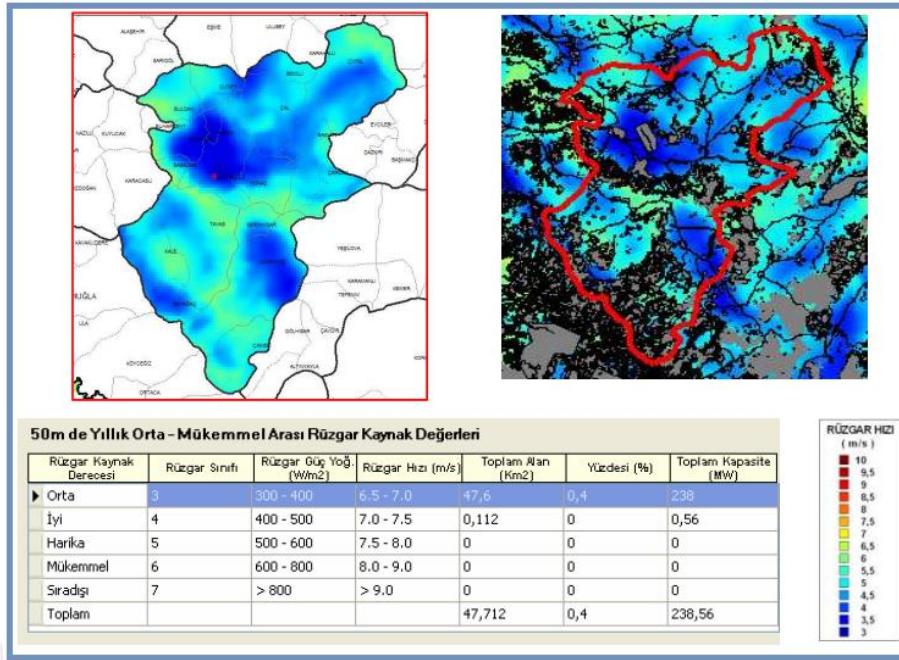
Çalışma kapsamında modellemede kullanılacak kurulu güce sahip doğal gaz kojenerasyon santrali olan bir tesis yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerjileriyle desteklenmesi için türbin ve fotovoltaik panellerle desteklenmesi için simüle edilmiştir. Hem şebekeden bağımsız hem şebekeye bağlı hibrit güç üretim sistemi için her bir bileşen ayrı ayrı modellenerek parametreleri belirlenmiş ve parametreler HOMER yazılımına girilmiştir.

4.1.1 Sistemin uygulama yeri ve meteorolojik verileri

Türkiye'nin Ege Bölgesinde Denizli ilinde (Enlem:37.75 ve boylam: 28.75) kurulu bir tesis seçilmiş ve 12MW kurulu gücü olan kojenerasyon tesisi için araştırmalar yapılmıştır [58]. 200 bin m²'lik bir alanda kurulan ve 70 bin m²'lik kapalı alanı olan 24 saat vardiyalı olarak çalışılan endüstriyel tesistir. Bu tesisin enerji verileri ile güneş panelleri ve seçilmiş rüzgâr türbininin verileri birleştirilerek HOMER programında simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçların uygulanabilirliği bölgesel fizibilite çalışmaları ve kurulumla ilgili ölçümler sonucu netlik kazanmakla birlikte bu çalışmada bu detaylar göz ardı edilerek elektrik ve termal yük dağılımları üzerinden genel bir hesaplama yapılmaktadır

Rüzgâr hızı anlamında değerlendirildiğinde orta seviyede rüzgâra sahip Denizli ilinde kurulu güç giderek artmaktadır. Özellikle hibrit sistemlerde rüzgâr enerjisi kullanılabilir durumdadır (Tablo 4.1). İlde rüzgâr hız dağılımı 3 m/s ile 6,5 m/s aralığında değiştiği görülmektedir. Hesaplamalarda ilin geneli dikkate alınmıştır (Şekil 4.1.).

Denizli ilinin deniz seviyesinden yükseklik (rakım) 354m anemometre yüksekliği 30 m alınmıştır. HOMER yazılımı internet üzerinden rüzgâr, güneş, sıcaklık, nem vb. bilgileri çevrimiçi önerdiği kaynaktan indirmeye izin verdiği gibi dışarıdan da giriş yapılabilir. Denizli ilinin genel rüzgâr ortalaması farklı kaynaklardan alınmış, HOMER çalışırken çevrimiçi aldığı NASA bilgileriyle benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Aralık'tan Temmuz ortalarına kadar güçlü rüzgârlar, Ağustos'tan Ekim'e kadar ise sakin rüzgârlar oluşmaktadır [59].

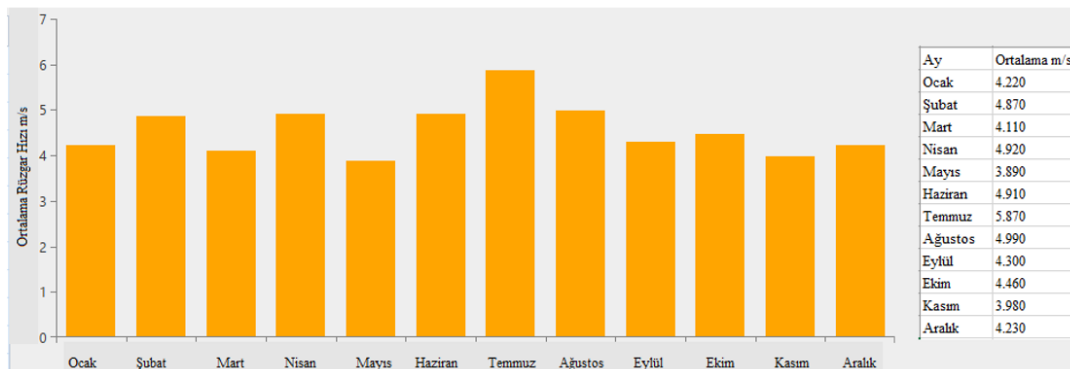


Şekil 4.1. Denizli ilinin yıllık ortalama rüzgâr kaynak değerleri [60].

HOMER’de değerlendirilen rüzgâr hızlarına ait grafik ve değerler Tablo 4.1.’de bulunmaktadır. Bölgenin rüzgâr hızı profilini diğer tüm kaynaklarda olduğu gibi NASA veri tabanından alabilmektedir fakat seçilen alan belirli bir metrekare üzerinden değerlendirmeye alınmakta ve bazen bu alan Denizli ilinin dışına denk gelebilmektedir. Yatırım maliyetleri çok yüksek olan rüzgâr türbinlerinin kurulacak bölgenin rüzgâr hız profili değerlendirilen hibrit sistemde oldukça etkileyici olması ve karar değişkenlerinden biri rüzgâr hızı seçilmesi nedeniyle Burada kullanılan değerler alınan kaynaktan girilmiştir [61].

Denizli iline ait değerlendirilmede kullanılan veriler Tablo 4.1.’de yer almaktadır HOMER. 30 m yükseklikte ölçülen rüzgâr verileri kullanılarak Weibull dağılımı elde edilmiştir. Ortalama rüzgâr hızı 4,56 m/s, ortalama güç yoğunluğu 141 W/m², Weibull ölçek parametresi (c) 5,1 m/s, şekil parametresi (k) ise 1,63 olarak elde edilmiştir [61].

Tablo 4.1. HOMER aylık rüzgâr hızları



Denizli’de bulunan rüzgâr santrali potansiyelini bir önceki yıla göre arttırmış ve ortalama 131.132.927 kWh elektrik üretimine ulaşmıştır. Yıllık elektrik üretiminde santral tam kapasite çalışmadığı halde Türkiye tüketimine oranında artış gözlemlenmesiyle mevcut rüzgâr potansiyelini ortaya koymaktadır (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. Denizli RES yıllık elektrik üretimi [62].

Denizli RES Yıllık Elektrik Üretimi			
Yıl	Üretim (kWh)	Denizli Tüketimine Oranı	TR Tüketimine Oranı
2019	43.196.560	%0,95	%0,014
2020	165.729.620	%3,6	%0,05

Sahip olduğu rüzgâr potansiyelinin altında bir üretim yapılan Denizli ilinde uygun potansiyele sahip bölgeler için yeni santraller kurulabilir. Sahip olduğu güç kapasitesi Tablo 4.3.’de verilmiştir.

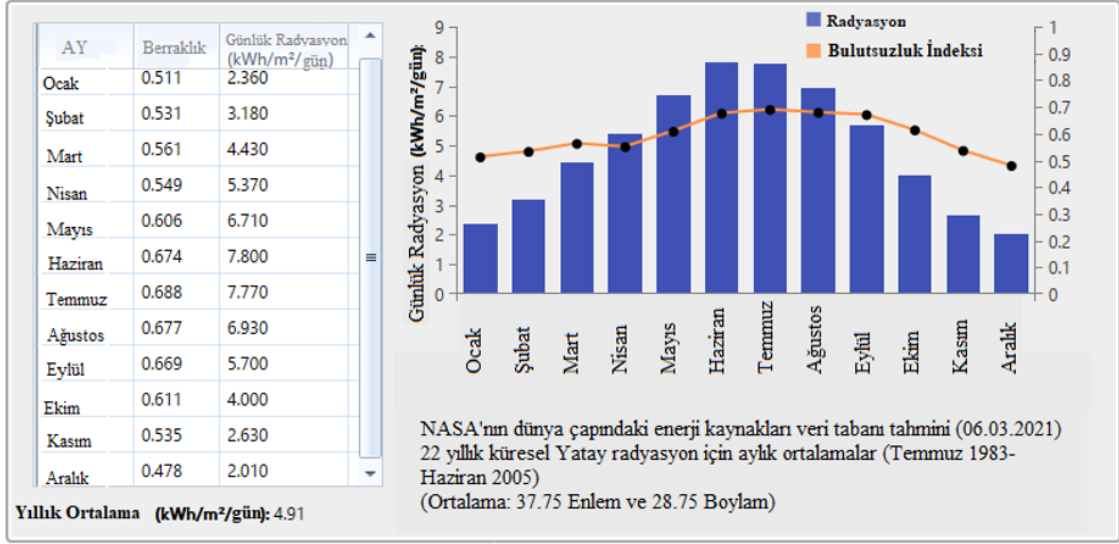
Tablo 4.3. Denizli iline kurulabilecek rüzgâr enerjisi santrali güç kapasitesi [63].

50 m’de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m’de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300 – 400	6.8 – 7.5	47,60	238,00
400 – 500	7.5 – 8.1	0,11	0,56
500 – 600	8.1 – 8.6	0,00	0,00
600 – 800	8.6 - 9.5	0,00	0,00
> 800	> 9.5	0,00	0,00
		47,71	238,56

Denizli ili güneş potansiyeli bakımından da elverişli bölgeler sahiptir. Denizli iline ait güneş enerji potansiyeli Şekil 4.2.’de verilmektedir. İç Anadolu ve Akdeniz Bölgeleri arasında yer alan Denizli, Türkiye’nin güneybatısında yer almaktadır. Konumunun getirdiği coğrafi özellikleri yılda 2934 saat güneşlenme süresine ve 1595 kWh/m²-gün global radyasyon değerine sahip olmasına olanak sağlaması güneş enerjisi yatırımı yapılabilecek bölgeler arasında yer almasına neden olmaktadır [64].

HOMER programında kullanılan Denizli ili global radyasyon değerleri Tablo 4.4.’te ve Denizli ili güneşlenme süreleri değerleri Şekil 4.4.’te verilmiştir. Her iki kaynağında, NASA ve GEPA verilerinin, paralel olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. HOMER-Denizli ili global radyasyon değerleri ve bulutsuzluk indeksi ($\text{kWh/m}^2\text{-gün}$) (NASA'nın dünya çapındaki enerji kaynakları veri tabanı tahmini 06.03.2021)



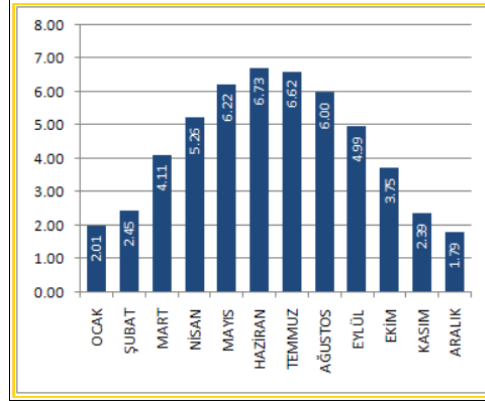
Yıllık ortalama sıcaklık $13,94\text{ }^{\circ}\text{C}$ bulunmuştur. Güneş enerjisi santrallerinin kurulumu yapılmadan önce lokasyonuna göre elde edilen değerler baz alınarak fizibilite çalışmaları yapılmaktadır. Net lokasyon için yerinde inceleme ve değerlendirilme yapılamadığı için bu çalışmada il geneline ait verilerin ortalamaları alınarak inceleme yapılmıştır.



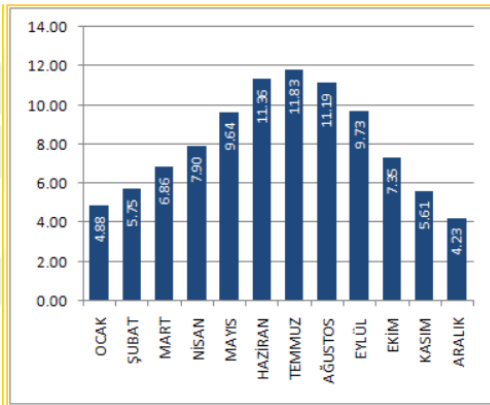
Şekil 4.2. Denizli güneş enerjisi potansiyeli atlası 2021 [65].

HOMER yazılımında güneş enerjisi hesaplamalarında farklı radyasyon değerleri kullanılmaktadır. Gelen güneş radyasyonunun dağınık veya yansıyan bileşenlerini değil, yalnızca doğrudan ışın radyasyonunu yakalayacak şekilde yoğunlaştırmak için optik kullanan PV çıktısını hesaplamak için Solar Doğrudan Normal Işıma (DNI) kaynağı

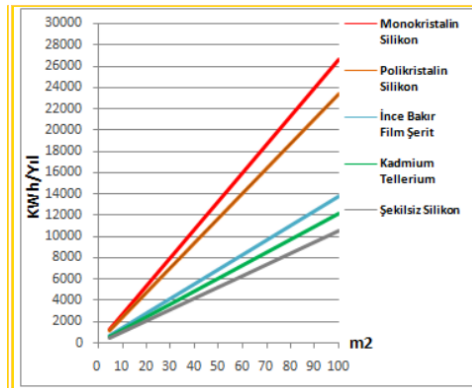
kullanılır. GHI radyasyonu; doğrudan normal ışınım (DNI), dağınık ışınım ve yerden yansıyan radyasyonun toplamıdır [44].



Şekil 4.3. Denizli global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) [65].



Şekil 4.4. Denizli güneşlenme süreleri (Saat) [65].



Şekil 4.5. Denizli PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (kWh-yıl) [65].

Düz panel PV dizisi çıkışı hesaplamak için Global Yatay Işıma (GHI) Kaynağı kullanılır. Bu nedenle GHI değerleri kullanılmıştır. Atmosferin açıklığının bir ölçüsü olan, 0-1 arasında değişkenlik gösteren ve açık havalarda yüksek, kapalı (bulutlu) havalarda ise düşük değerler alan Bulutsuzluk indeksi (clearness index) Denizli ili için 0,591 olarak

hesaplanmıştır. Yılın her saatine karşılık güneş radyasyon verilerinin değerlendirildiği HOMER gerçekçi saatlik veriler üretmek için Graham algoritmasını kullanır. Güneş radyasyonu değeri 4,91kWh/m²/gün olarak hesaplanmıştır [2].

4.1.2. Sistemin yük profilleri

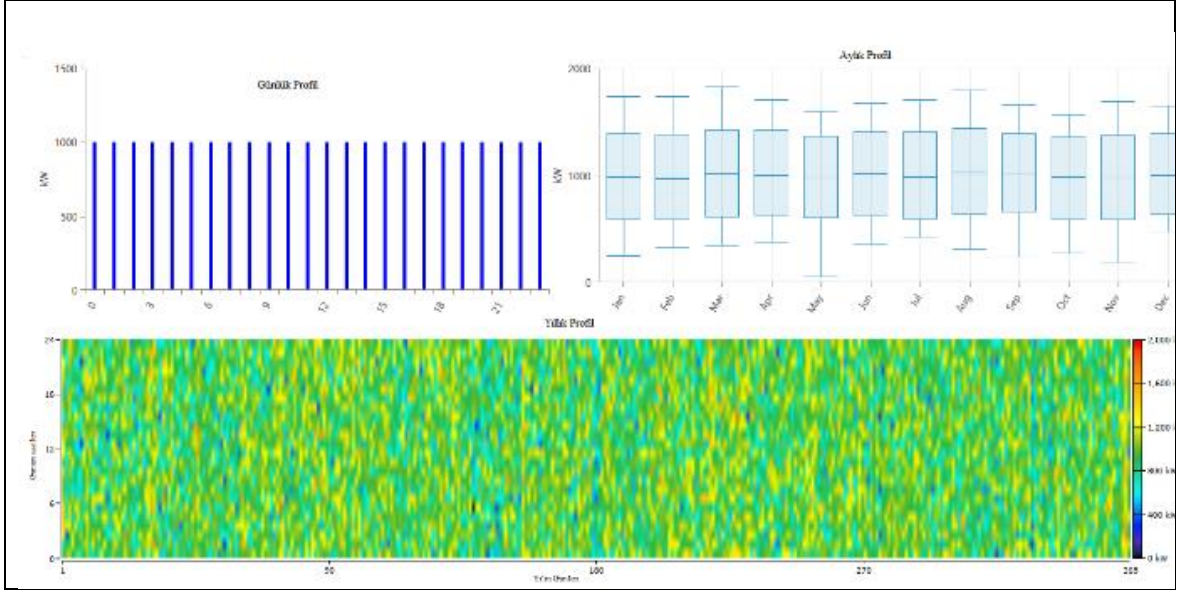
Vardiyalı olarak yıl boyu aynı performansla çalışılan bu tesiste elektrik yük ihtiyacı 34MWh/d (Günde 34.000 kWh), termal yük ihtiyacı 53 MWh/d (Günde 53.000 kWh) alınmıştır (42).

Oluşturulan simülasyonda karşılanması amaçlanan minimum yükler Tablo 4.5'te verilen yükler kabul edilir. Analiz sürecinde bu yükler karşılanmaya çalışılırken batarya ve şebeke dahil edilen sistemlerde elektrik yükün üzerine çıkan sistemler değerlendirilmiştir. Yük dağılımlarını rastgele seçerek analiz ederken HOMER kullanıcı tarafından seçilen iki değişken üzerinden değerlendirme yapar.

Tablo 4.5. Tesise ait elektrik ve termal yük ihtiyaçları mevcut sistem baz alınarak hesaplanmıştır.

Elektrik yük ihtiyacı	34 MWh/d
Termal yük ihtiyacı	53 MWh/d

Endüstriyel ve vardiyalı bir tesiste genele bakıldığında ortalama sabit bir yük profili görülebilir. Ancak gerçekçi olarak, yük profilinin boyutu ve şekli günden güne değişir. Değişkenlik eklemek, yük verilerini daha gerçekçi hale getirebilir. HOMER her günün yük profilini rastgele bir miktarda değiştirir, böylece yük her gün için aynı şekli korur, ancak yukarı veya aşağı ölçeklenir. Günden güne (day-to-day) ve adım adım zaman (time-step-to-time-step) değerlemelerde elektrik için % 20, termal yük için % 15 alınmıştır [44]. Değerlendirilen simülasyon için kullanılan elektrik üretim santralinin elektrik ve ısı ihtiyacını gösteren yük profilleri Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de verilmiştir. Şekil 4.7.'de örnek olarak raporun ayrıntılı hali gösterilmektedir. Elektrik yük profili arayüzü de benzer şekilde çıkmaktadır.



Şekil 4.6. Elektrik yük profili



Şekil 4.7. Termal yük profili

4.1.3. Seçilen güneş paneli özellikleri

Güneş paneli sisteminde panel çıkışı DA (Tablo 4.6.) olan fotovoltaik (PV) dizi tek kristalli silisyum hücreden oluşmaktadır. Dönüştürücü (DA/AA) (Converter) kullanılarak yükü beslemesi sağlanmıştır. Yüksek maliyetten kaçınılması için panelin yatay düzleme göre açısı yani eğim açısı değeri 0° yatay konumu, 90° olarak güneş takip sistemleri iki yönlü olarak belirtilmiştir ve panel maliyetine eklenmiştir. Deretasyon faktörü % 80, dış etkilerin neden olabileceği kayıplara karşılık gelen değer olan azalma faktörü, % 90 olarak

kullanılmıştır. Azimut değeri yani panelin yönü, panel sabit olarak tasarlandığı için, kuzey yarım kürede olan Türkiye için 0° kabul edilmiştir. Yüzey yansıtma değeri % 20 olarak belirlenmiştir. İşletme sıcaklığı -40°C ile 85°C arasında olan ve sistemde kullanılan tek kristalli silisyum yapıdaki fotovoltaik panel için 47°C ve verimi ise % 14 alınmıştır [45].

Fotovoltaik sistem için (PV) ilk yatırım ve yenileme maliyeti 1 kW için 1.000 \$ ayrıca yıllık bakım değeri 10 \$ olarak kabul edilmiştir [68]. Fotovoltaik sistemin ömrü 25 yıldır. Sistemin optimizasyonunda kurulu gücü, 0 ile 4000 kW arasında olacak şekilde aşamalı şekilde tanımlanmıştır [45].

Tablo 4.6. Tek kristalli silisyum yapıdaki fotovoltaik panel için sisteme girilen değerler

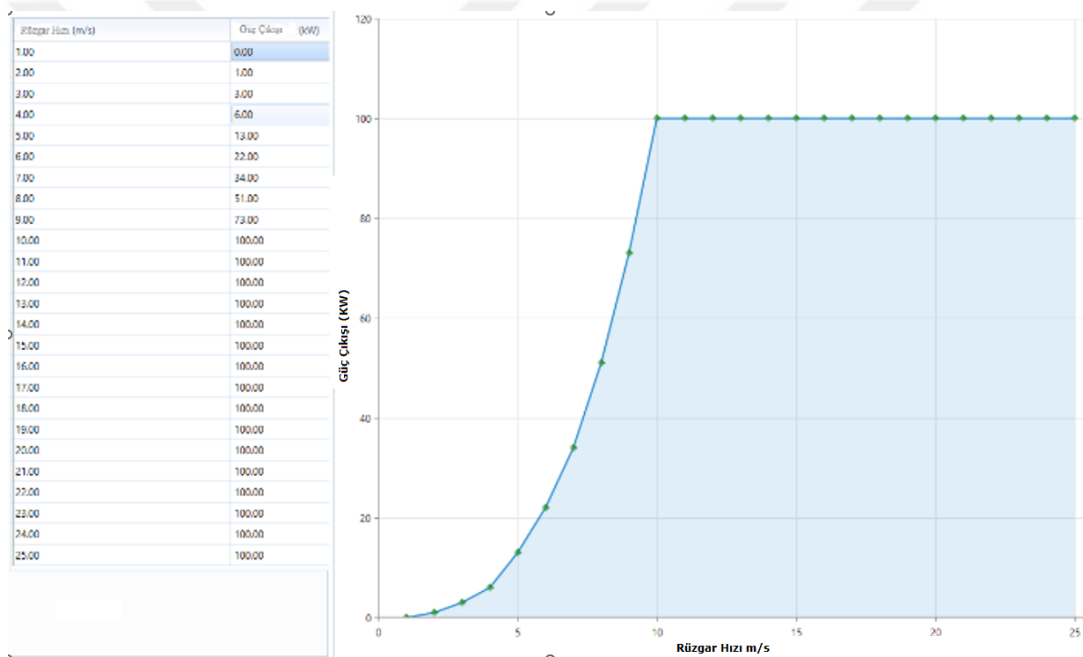
PV modellemesi	Sistem Bilgileri
PV panel dizisi	Düz panel PV dizisi
Global Yatay Işıma (GHI) Kaynak bilgisi	HOMER Kütüphanesi (girilen enlem ve boylama göre)
Uygulama alanı enlem boylam	Türkiye'nin Ege Bölgesinde Denizli ilinde (Enlem: 37.75° ve boylam: 28.75°)
Bölgeye ait saat dilimi	HOMER Kütüphanesi
Azimut açısı	Sabit- 0°
Deretasyon faktörü (f_{pv})	% 80
Standart koşullarda'de Ortalama Verimlilik Değeri ($\eta_{mp,STC}$)	Tek kristalli silisyum yapıdaki fotovoltaik panel için % 14
Enlem Açısı θ	0° - 90° arasında alınır (Türkiye için Enlem kuzey yarım kürede artı değerli)
Eğim açısı değeri (β) (Türkiye'de optimum eğim açısı $32,4^\circ$ - $37,8^\circ$ arasındadır.)	Sabit eğimli sistem kabul edildiği için enleme eşit bir eğim (37.75°) alınmıştır, tipik olarak yıllık PV enerji üretimini maksimize edeceği öngörülmektedir.
Azalma faktörü	% 90
Yüzey yansıtma değeri	% 20 olarak belirlenmiştir
HOMER-İşletme sıcaklığı	47°C
Sıcaklık güç katsayısı (α_p ($\%/^\circ\text{C}$))	Tek kristal silikon PV paneller için Raporlama Modülleri 4 ve α_p 'nin Ortalama Değeri-0.46 ($\%/^\circ\text{C}$)
Mevcut zaman adımıdaki PV hücre sıcaklığı (T_c)	HOMER tarafından hesaplanıyor ($^\circ\text{C}$).
Panel çıkış gerilimi	DA
Fotovoltaik sistemin güç çıktısını (P_{PV})	HOMER tarafından hesaplanıyor.

Tablo 4.7. Sisteme girilen güneş paneli (PV) mali bilgileri.

Kapasite (kW)	Ana Para (\$)	Yenileme (\$)	İşletme&bakım (O&M) (\$/yıl)	Arama Alanı (PV) (kW)	Sistem Ömrü (yıl)
1	1.000	1.000	10	0-4.000	25

4.1.4. Seçilen rüzgâr türbini özellikleri

Sistemde 100 kW gücünde, çıkış gerilimi AA (AA), Hub yüksekliği 32 m olan Halbes 100 kW rüzgâr türbini kullanılmıştır. Türbinin rotor çapı 20.7 m'dir [66]. Bu türbinin seçilme nedeni düşük rüzgârlara da duyarlı olmasıdır. Başlama rüzgâr hızı 2 m/s'dir (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. HALBES 100 kW rüzgâr türbini güç grafiği.

Kullanılan rüzgâr türbinin ilk yatırım ve yenileme maliyeti 100 kW için 240.000 \$ (240 k\$), bakım onarım masrafı ana paranın % 2'si olarak hesaplanmış ve 4.800 \$, alınmıştır. Türbininin ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Sistemde kullanılan rüzgâr türbini sayısı 0-7 arasında alınarak optimizasyon yapılmıştır [67, 68].

Bölge olarak rüzgâr açısından çok elverişli olmasa da genel olarak ortalama bir rüzgâr kaynağına sahip bölgede düşük rüzgâr hızına duyarlı bir rüzgâr türbini (RT) tercih edilmiştir. Türbin maliyetlerinin yüksek olması olumsuz bir etki yaratmaktadır. Daha verimli rüzgârların bulunduğu bölgeler için bölgeye uygun farklı bir türbin tercih edilmelidir.

Sadece rüzgâr kaynaklı enerji üretmek için kurulması düşünülen santrallerde, bölgeler için yapılan fizibilite sonuçlarında 4m/s altı hızlar için verimli bir bölge olmadığı düşünülse de hibrit sistemlerde destekleyici kaynak olarak kabul edilen rüzgâr enerjisi için düşük hızların kullanıldığı türbinler tercih edilebilir. Fakat her türbin için maliyete bir yük bineceği göz önüne alınmalı ve modellemede bu kriter değerlendirilmelidir. Bu çalışmada daha büyük türbin kullanılabilseydi verim ve maliyet daha farklı olacaktı. Fakat genel ortalamada düşük rüzgâr hızlarının değerlendirilmesi için bu türbin tercih edilmiştir.

Tablo 4.8 Sisteme girilen rüzgâr türbin teknik bilgileri.

Rüzgâr türbin Modellemesi	Sisteme bilgileri
Rüzgâr Türbini	Düşük rüzgâra duyarlı
Rüzgâr Hızı bilgileri	Kaynaklardan manuel aktarıldı (girilen enlem ve boylama göre)
Uygulama alanı enlem boylam	Türkiye'nin Ege Bölgesinde Denizli ilinde (Enlem:37.75 ° ve boylam: 28.75 °)
Hub yüksekliği	32 m
Rüzgâr türbini kapasitesi	100 kW
Türbinin rotor çapı	20.7 m
Başlama rüzgâr hızı	2 m/s
Aylık rüzgâr verileri	Kaynaktan sisteme girildi
Yıllık min. Ve max. Ortalama rüzgâr hızları	Girilen veriler HOMER tarafından hesaplanıyor.
Türbin çıkış gerilimi	AA
Rüzgâr türbin güç çıktısını (P_{WTG})	HOMER tarafından hesaplanıyor.

Tablo 4.9 Sisteme girilen rüzgâr türbin mali bilgileri.

Kapasite (kW)	Ana Para (k\$)	Yenileme (k\$)	İşletme&bakım (O&M) (\$/yıl)	Arama Alanı (RT) (adet)	Sistem Ömrü (yıl)
100	240	240	4.800	0-7	20

4.1.5. Kojenerasyon santrali

Denizli ilinde bulunan bir kojenerasyon tesisi seçilmiştir. Tesis toplam kurulu gücü 2 adet 6.000 kW (12 MW) kapasiteli, ömrü 26.500 saat olarak kabul edilen Wartsila 18V34SG gaz motorlarıyla elektrik enerjisi üretimi, atık ısısından da buhar ile sıcak su üretimi yapabilen doğal gazlı kojenerasyon santraline sahiptir [58]. HOMER, jeneratörün yakıtın tüm enerjisini elektrik ve ısıya dönüştürdüğünü varsayar. Jeneratörün yakıt eğrisi, belirli bir

yakıt girişi için ne kadar elektrik ürettiğini belirtir. HOMER, kalan yakıt enerjisinin ısıya dönüştürüldüğünü varsayar. Isı geri kazanım oranı, termal yüke hizmet etmek için geri kazanılabilen ısıнын yüzdesidir (CHP Geri Kazanım Yüzdesi). Üretilen enerjinin yaklaşık % 16–20 kadarı baca gazlarıyla sistemden ayrılır. Bazı çalışmalarda ısı geri kazanım oranının % 1,3’ü yakalayabildiği görülmüştür. Jeneratör ısı geri kazanım oranı girişi HOMER yazılımında yalnızca birleşik ısı ve güç sistemleri veya CHP sistemleri olarak da adlandırılan kojenerasyon sistemleri için geçerlidir. Bu sistemler, termal yükün bir kısmını veya tamamını karşılayan jeneratörden geri kazanılan atık ısı ile hem elektrik hem de termal yüklere hizmet eder. Uygulamada % 0.58 olarak daha makul bir değer alınmıştır.

Tasarlanan hibrit sistemde yenilenebilir enerji olarak rüzgâr ve güneş kaynakları değerlendirilmiştir. İşletilecek olan santrallerin konumlandırıldığı yere göre ölçümler yapılmakta ve fizibilite çalışmaları kurulum sürecinden önce değerlendirilmektedir.

Doğal gaz fiyat değişimlerinin simülasyon sonuçlarına etkisi değerlendirilmediği için 2020-2021 artış süreci göz önüne alınarak doğal gaz fiyatı ortalama bir değer olan 0,3 \$/m³ (300 \$/L), gaz motoru yatırım maliyeti için 700 \$/kW kabul edilmiştir [58].

Tablo 4.10 Sistemde 12 MW kurulu gücü olan doğal gaz kojenerasyon santrali mali bilgileri.

Kapasite (kW)	Ana Para (\$/kW)	Yenileme (\$)	Arama Alanı (Kojen. Sant.) (kW)	Sistem Ömrü (saat)
6.000	700	700	0-12000	26.500

4.1.6. Batarya

Hibrit güç üretim sistemlerinin modellenmesinde kullanılan bataryalar, yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen enerjinin, sistemin yük ihtiyacı karşılandıktan sonra geri kalan enerjinin depolandığı ve üretilen enerji yeterli olmadığı zamanlarda da depolanan enerjiyi sisteme aktaran elemanlardır [2].

Tablo 4.11 Sistemde tanımlı bataryanın mali bilgileri.

Kapasite (kWh)	Ana Para (\$)	Yenileme (\$)	İşletme&bakım (O&M) (\$/yıl)	Arama Alanı (Batarya)(adet)
6	150	150	2	0-2500

Sistemde havalandırılmalı boru şeklinde plakaları olan kurşun asit batarya türü Hoppecke 24OPzS 3000 modeli kullanılmıştır. Nominal kapasitesi 6 kWh’tir. Nominal gerilimi 2 V olup minimum şarj durumu % 30’dur. Ömrü 20 yıl alınmıştır. İlk yatırım ve

yenileme maliyeti 150 \$, işletme ve bakım maliyeti 2 \$/yıl olarak kabul edilmiştir. Optimizasyon sırasında 0-2500 adet arası değerlendirme yapılmıştır [69].

4.1.7. Doğrultucu ve dönüştürücü

HOMER’de doğrultucunun kapasitesinin, dönüştürücünün kapasitesinin % 100’ü olduğu kabul edilip, dönüştürücü ömrü 15 yıl ve verimlilik ise % 95 olarak belirlenmiş olup, hem doğru akımı (DA) alternatif akıma (AA) dönüştüren dönüştürücü, hem de alternatif akımı doğru akıma dönüştüren doğrultucu gibi çalışır. 1 kW büyüklüğündeki dönüştürücünün yatırım maliyeti 300 \$, yenileme maliyeti 300 \$ ve işletme ve bakım maliyetinin olmadığı kabul edilerek işlem yapılmıştır. Dönüştürücü sayısı 0-4000 kW arasında değerlendirilmiştir [68].

Tablo 4.12 Sistemde tanımlı doğrultucu ve dönüştürücü mali bilgileri.

Kapasite (kW)	Ana Para (\$)	Yenileme (\$)	İşletme&bakım (O&M) (\$/yıl)	Arama Alanı (kW)	Sistem Ömrü (yıl)
1	300	300	0	0-4000	15

4.1.8. Kazan

HOMER verimi % 85 olarak girilmiş kazan (boiler) sistemini termal yükün ihtiyacını karşılamak için kullanır ve enerji kaynağı olarak doğal gaz yakıt tüketimi seçilmiştir.

4.1.9. Şebeke

HOMER’de ihtiyaç sırasında elektrik satın alınabilecek ve uygun durumlarda da elektrik satılabilecek şebeke modellenirken, \$/kWh cinsinden değerler kullanılır.

Basit şebeke modu seçilmiş, sabit bir güç fiyatı, geri satış fiyatı ve satış kapasitesi belirlemeye olanak tanıyan şebekenin eklendiği modelde alış fiyatı olarak 0.07 \$/kWh, üretilen fazla enerjinin satışı için 0.05 \$/kWh değerleri sabit olarak kullanılmıştır.

4.2. Modelleme

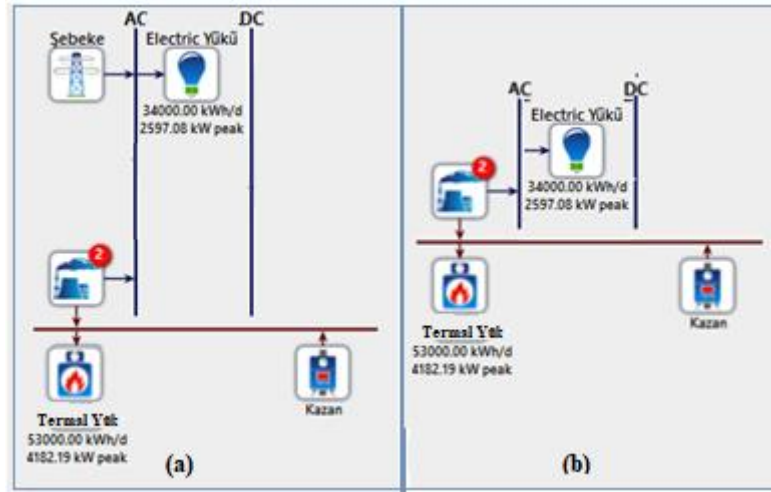
Çalışmada kojenerasyon ve yenilenebilir enerjilerin bir arada olacağı bir sistem tasarlanmıştır. Ege bölgesinde Denizli ilinde 12 MW kurulu güce sahip olan bir kojenerasyon santralinden alınan verilerle birlikte, bölgedeki rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeline bağlı olarak tekoekonomik ve çevresel analizleriyle, maliyet etkin ve düşük karbon salımlı, geri ödeme süresinin minimum olduğu, sürekli enerji üretimi sağlayabilen

ve bu üç enerji kaynağının optimum kullanım oranlarının elde edilebileceği en uygun sistem tasarımı bulunmuştur.

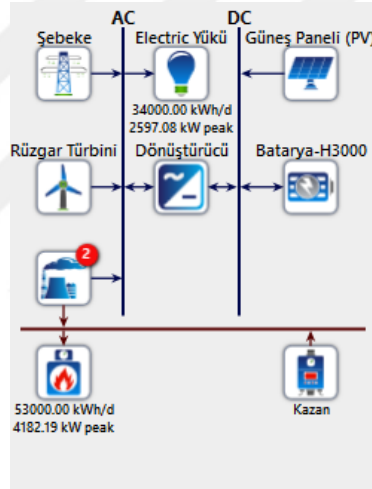
Bu sistemdeki hesaplamalar, simülasyon ve optimizasyon için HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) yazılımı kullanılarak en uygun maliyetli hibrit enerji sistemi bulunmuş ve farklı optimizasyonlar ve HOMER’de hassaslık analizleri olarak adlandırılan yeni değerlerin atandığı simülasyonlar sayesinde mevcut potansiyele göre hangi enerji sisteminin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır [68].

4.3. Simülasyonu Yapılan Hibrit Sistem Modelleri

HOMER yazılımı kullanılarak yapılan bu çalışmada iki tasarıma ait simülasyon yapılmış ve teknoekonomik olarak en karlı ve karbon emisyonu en düşük hibrit sistemin tespit edilmesine çalışılmıştır. İlk tasarımın simülasyonunda şebekeye bağlı, doğal gazlı kojenerasyon santrali, güneş paneli (PV), rüzgâr türbini ve batarya kullanılarak hibrit enerji üretim sistemi tasarlanmış, veriler doğrultusunda simüle edilerek değerlendirilmiştir. Daha sonra aynı tasarımdan şebeke çıkarılarak her iki tasarımda da güneş radyasyon değerleri ve rüzgâr hızları değiştirilerek simülasyonlar analizleri yapılmıştır. Bu analizle ekonomik anlamda en uygundan aşağıya doğru sıralamaya sahip bir liste HOMER tarafından oluşturulmuştur. Mevcut sistem olarak kabul edilen modelleme Şekil 4.9’da verilmektedir. Uygulanan değişikliklerle aynı verileri kullanarak simüle edilen tasarımın hibrit sistem modelleri sırasıyla Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.’da verilmiştir. Şebekeye bağlı mevcut sistem (Şekil 4.9. (a)) yine şebekeye bağlı hibrit sistemle (Şekil 4.10.) karşılaştırılmaktadır. Diğer karşılaştırma şebeke bağlantısı olmayan mevcut sistemle (Şekil 4.9. (b)), şebeke bağlantısı olmayan hibrit sistem (Şekil 4.11.) arasında yapılmaktadır. HOMER değerlendirilecek sistem tasarımından sonra hesaplama işlemine geçer ve sonuçları otomatik olarak tablo modunda görüntüler.

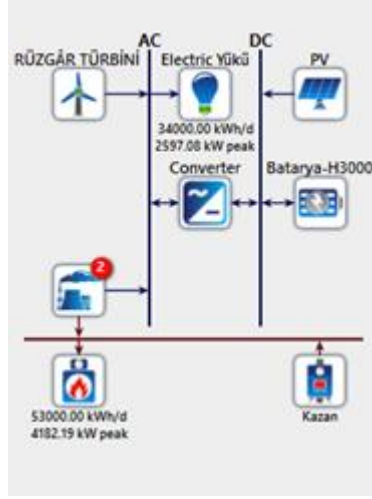


Şekil 4.9. Mevcut doğal gazlı kojenerasyon sistem; şebeke bağlantılı sistem (a), şebeke bağımsız sistem modellemesi (b)



Şekil 4.10. Doğal gazlı kojenerasyon santrali, güneş paneli, rüzgâr türbini, batarya ve şebeke hibrit enerji üretim sistemi

Önceki bölümler de gösterilen arayüzlerde belirtildiği gibi Şekil 4.10. ve 11.'deki hibrit sistemlerin oluşturulması HOMER arayüzlerine girilen verilerle mümkün olmaktadır. Tasarlanan sistemde doğrultusunda analiz yapılmıştır. Girilen bazı kabul edilen verilerle bir sonuca varan HOMER simüle ettiği sistemin optimizasyonunu da bu kriterler üzerinden oluşturur. Bu nedenle doğal gaz fiyatlarında ya da şebeke elektrik alış fiyatlarında vb. girilen verilerdeki değişiklikler tüm sonuçları etkiler.



Şekil 4.11. Şebekeden bağımsız doğal gazlı kojenerasyon santrali, güneş paneli, rüzgâr türbini ve batarya hibrit enerji üretim sistemi

Örneğin, Türkiye’de şu anda var olan elektrik ve doğal gaz piyasası dinamikleriyle doğal gaz santralleri üretim yapmak yerine şebekeden elektrik almayı tercih edecek konuma gelebilmektedir. Doğal gazın kWh (“h” saat) fiyatı ise ülkemizde sürekli artış eğilimindedir. Bir metreküp doğal gaz tüketiminden elde edilen enerji miktarı 10.64 kWh (EPDK’nın (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) tebliğine göre) standart değer olarak kabul edilmektedir.

1 m³ doğal gazın üst ısı değeri 9,155 kcal/h etmektedir. 1kW, 860 kcal/h olarak kabul edildiğinde standart değer (9,155 kcal/h/860 kcal/h) ile hesaplanarak 10.645 m³ bulunur. Satış fiyatı (\$/kWh) ve standart değer çarpılarak \$/m³ biriminden 1 m³ doğal gaz fiyatı bulunabilir. Örneğin satış fiyatı yaklaşık 0,028 (\$/kWh) alındığında doğal gaz fiyatı yaklaşık 0,3 \$/m³ olur. [70].

HOMER uygulamasında endüstriyel bir tesis için yükler tanımlanmıştır. Değerlendirme aralıkları belirlenirken sıfır sayısı sistemde olmadığı ya da kullanılmadığı durumu ifade etmektedir (Tablo 4.13.). Sistemde para birimi dolar seçildiği için kur değerleri alınmamıştır. İsteğe bağlı olarak belirsiz her parametre için simülasyon ve optimizasyon aşamaları tekrarlanır ve yeni uygulanabilir en iyi planlar elde edilebilir. Belirsiz parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmekteyse de süreç planlama ve risk planlamasını içeren kriterler araştırmacılar tarafından bazı geliştirilen metodolojilere göre hesaplanabilmekte fakat HOMER yazılımı bunları hesaplayamamaktadır [71,72].

Tablo 4.13. Ekonomik analizde sistem girdi değerleri bütünü.

Kojen-Santrali	Fotovoltaik sistem	Rüzgar türbini	Batarya	Şebeke
Doğal gaz fiyatı için 2020-2021 ortalama bir değer olan $0,3\$/m^3$ ($300\$/L$), gaz motoru yatırım maliyeti için 700 $\$/kW$ kabul edilmiştir	İlk yatırım ve yenileme maliyeti $1kW$ için 1.000 $\$$, yıllık bakım değeri 10 $\$$, ömrü 25 yıldır. Kurulu gücü 0 ile 4000 kW arasında değerlendirilmiştir.	İlk yatırım ve yenileme maliyeti 100 kW için 240.000 $\$$ bakım onarım masrafı ana paranın %2 si 4.800 $\$$, ömrü 20 yıl kabul edilmiştir. Türbin sayısı 0-7 arasında alınarak optimizasyon yapılmıştır.	İlk yatırım ve yenileme maliyeti 150 $\$$, işletme ve bakım maliyeti 2 $\$/yıl$ kabul edilmiş, optimizasyon için 0-2500 adet arası değerlendirme yapılmıştır.	Elektrik alış fiyatı olarak 0.07 $\$/kWh$, üretilen fazla enerjinin satışı için 0.05 $\$/kWh$ değerleri sabit olarak kullanılmıştır.

HOMER, hassasiyet durumları tablosundaki bir değişkenle yeni bir simülasyon yaparak, bu duruma uygun optimizasyon sonuçları tablosu görüntülemektedir. Seçilen hassasiyet durumu yani her simülasyon değişkeni için mümkün olmayanlar hariç tüm uygulanabilir simülasyonlar listelenir.

Net şimdiki maliyete göre en üst sıradaki sistem konfigürasyonlarını gösterir. Sağda, ilk sermaye maliyeti, işletme maliyeti ve toplam net şimdiki maliyet gibi en düşük maliyetli sistemin simülasyon sonuçlarından alınan birkaç özet değeri gösteren sütunlar vardır [44].

Sistemde mevcut sistem bileşenler aynen kullanılmış ve ek olarak yenilenebilir enerji sistemleri, batarya vb. tanımlanmıştır Tablo 4.14'te tanımlanan tasarımda kullanılan bileşenler yer almaktadır. Jeneratörler, şebeke ve kazan mevcut sistemde olduğu kabul edilerek karşılaştırma yapılmıştır.

Simüle edilen hibrit sistemlerin teknoekonomik ve çevre açısından değerlendirilmeleri yapıldığı için elde edilen sonuçların en uygunları arasında emisyon değerlerine göre incelemeleri yapılmıştır.

Mevcut kurulu güce sahip bir tesis üzerinden değerlendirme yapıldığı için, yenilenebilir enerji desteği sağlamak ve fosil yakıt kullanımını azaltmak anlamında yapılan yatırımın önceki sistemle arasındaki fark değerlendirilmiştir.

Hesaplamalar bittikten sonra elde edilen ekonomik metrikler tablosu, iki sistem arasındaki farkın değerini temsil eden ekonomik ölçüleri gösterir. Bu tablodaki veriler değerlendirilirken Aşağıdaki ekonomi kriterleri üzerinden değerlendirilen ve seçilen en uygun tasarımların yıllık yakıt tüketimi (m^3), şebekeden satın alınan enerji ($kWh/yıl$) ve emisyon değerleri de karşılaştırılmıştır.

Basit geri ödeme (Simple payback), mevcut sistem ile temel durum sistemi arasındaki farkın kümülatif nakit akışının negatiften pozitifte geçtiği yıl sayısıdır. Geri ödeme, mevcut sistem ile temel durum sistemi arasındaki yatırım maliyetlerindeki farkı geri kazanmanın ne kadar süreceğinin bir göstergesidir.

Bir bileşenin net şimdiki maliyeti (NPC-life-cycle cost) listedeki en düşük olan değere sahip tasarım seçilmiştir. HOMER, sistemdeki her bir bileşenin ve bir bütün olarak sistemin net bugünkü maliyetini hesaplar. Sistemde basit geri ödeme süresi (Simple payback) NPC sıralamasından sonra ikinci kriter olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.14. Karşılaştırma yapılan sistem bileşenleri.

Mevcut sistem	Simülasyon 1	Simülasyon 2
2 adet 6 MW toplamda 12 MW kurulu güce sahip doğal gazla çalışan motorlar, şebeke desteği ve termal yük için de kazan kullanılmaktadır. İkinci simülasyon için mevcut sistem şebekeden bağımsız kabul edilmiştir.	Şebekeye Bağlı Doğal gazlı Kojenerasyon Santrali, Güneş Paneli, Rüzgâr Türbini, Batarya Hibrit Enerji Üretim Sistemi.	Şebekeden Bağımsız Doğal gazlı Kojenerasyon Santrali, Güneş Paneli, Rüzgâr Türbini ve Batarya Hibrit Enerji Üretim Sistemi.

Karşılaştırmalarda baz alınan yani mevcut sisteme elektrik ve termal yüklerin karşılanması için 2 adet 6 MW toplamda 12 MW kurulu güce sahip doğal gazla çalışan motorlar, şebeke desteği ve termal yük için de kazan (boiler) kullanılmaktadır. Yenilenebilir kaynakların ve bataryanın sisteme etkilerini görebilmek için kojenerasyon santralin değerleri aynı alınmıştır.

4.4. Doğrulama

HOMER yazılımıyla simülasyonu yapılan çalışmalardan birinci simülasyona ait sonuçlar, MS Excel programı kullanılarak bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada HOMER optimizasyonu düşük maliyetli sistemi aramak amacıyla tescilli bir algoritma kullandığı için optimizasyonunda seçilen en uygun simülasyon değerlendirilmiştir.

Tablo 4.15'te sistem toplam NPC satırında bulunan değerler alt satırda HOMER tablosundaki değerlerle örtüşmektedir. PV satırı için bulunan değerler için yapılan hesaplamada önce (i_0) nominal faiz oranı 0,2 ve (f) yıllık enflasyon oranı 0,1487 Eşitlik (3.7)'ye yerleştirildiğinde i reel faiz oranı 0,0447 yani yaklaşık 0,045 olarak bulunur.

Anapara (sermaye) geri kazanım faktörü (Capital Recovery Factor-CRF (i,N)) yıllık gelir – gider akışının bugünkü değeri için Eş. (3.9) kullanılarak hesaplanmıştır. Proje ömrü olan N değeri 25 alındı ve CRF değeri 0,067 olarak bulundu.

Toplam yıllık sermaye (yatırım) maliyeti, sermaye geri kazanım faktörü ile çarpılan toplam başlangıç sermaye maliyetine eşittir. Örneğin güneş panelinin 1. Simülasyondaki işletme maliyetini bulmak için önce PV toplam yıllık sermaye (yatırım) maliyeti bulmak için 4M \$ yatırım maliyeti ve 0,067 CRF değeri alındığında sonuç 268.000,000 \$ çıkar. İşletme maliyeti 4,27 M\$ bulunur. Güneş paneli için NPC değeri ise yatırım maliyetiyle birlikte toplan 8.27 M\$ bulunur. HOMER değeriyle aynıdır. Eşitlik 3.8’den yararlanarak hurda maliyetleri hesaplanır. Örnek olarak Wartsila 18V34SG kojenerasyon doğal gaz santralinin yine simülasyon-1 için hurda değerine bakılırsa elektrik yüklerinin dağılımında kojenerasyon santralinin kullanılmadığı görülmektedir. Bu doğrultuda hurda değeri için her biri 6.000 kW kapasiteli iki kojenerasyon santrali için 700 \$/kW değeri üzerinden toplamda 4.200.000 \$ yatırım maliyeti oluşmaktadır. Eşitlik 3.8’den her biri hurda değeri için 1. Simülasyonda kullanılmadığı için değiştirme değeri üzerinden 10,381 ile çarpılarak toplam hurda değeri her biri için -43.600.000,000 \$ bulunur. MS Excel ile yapılan hesaplamalarda net şimdiki maliyet için tüm hesaplamalar yapıldığında 46.213.000,000 \$ bulunmuştur.

Tablo 4.15 MS Excel ve HOMER sonuçlarının karşılaştırılması

Birinci simülasyon bileşenleri	Yatırım maliyeti (\$)	İşletme maliyeti (\$)	Değiştirme maliyeti (\$)	Hurda değeri (\$)	Var olan kaynak (\$)	Toplam (\$)
Kazan	0,000	0,000	0,000	0,000	73.900.000,000	73.900.000,000
PV	4.000.000,000	4.268.000,000	0,000	0,000	0,000	8.270.000,000
Şebeke	0,000	41.300.000,000	0,000	0,000	0,000	41.300.000,000
Doğrultucu ve dönüştürücü	975.000,000	0,000	4.030.000,000	-3.460.000,000	0,000	1.540.000,000
Wartsila 18V34SG (1)	4.200.000,000	0,000	0,000	-43.600.000,000	0,000	-39.400.000,000
Wartsila 18V34SG (2)	4.200.000,000	0,000	0,000	-43.600.000,000	0,000	-39.400.000,000
MS Excel NPC sonuçları (MS)	13,38	45,57	4,03	-90,66	73,90	46,21
HOMER NPC sonuçları (MS)	13,40	45,50	4,03	-90,70	73,90	46,20

Eşitlik 3.14’’teki LCOE değerini bulmak için $C_{y\text{llık top}}$ 431.914 \$/yr alınarak, kazan yakıt tüketimi 2.304.691 kWh/yr bulunduğu için m^3 başına yakıt fiyatı 0,3 \$ alınarak kazan termal enerji maliyeti hesaplanarak, servis edilen toplam elektrik yükü 15.219.942 kWh/yr alınarak MS Excel’de -0,0170 \$ hesaplanmış ve bu değer HOMER sonucuyla aynı olduğu görülmüştür.

Simülasyon-1 için basit geri ödeme süresi Eşitlik 4.1. kullanılarak MS Excel’le 13,5 yıl olarak hesaplanmasına karşın HOMER’de elde edilen basit geri ödeme süresi 11,2 yıl olarak bulunmuştur.

HOMER de daha hassas bir hesaplama yapılmasının ve hesaplamada tescilli bir algoritmayla yaptığı optimizasyon sonuçlarındaki basit geri ödeme sürelerini hesaplamak için başka bir sistemle (örn. mevcut sistem) karşılaştırma ile hesaplama yapabilmesi gibi nedenlerden dolayı bu farkın oluşturduğu düşünülmektedir.

$$SPB \text{ (Basit geri ödeme)} = \frac{\text{Sistem bileşenlerinin kurulum maliyetleri toplamı}}{\text{Sistemin kurulduğu ilk yıldaki gelir}} \quad (4.1)$$

Sistem bileşenlerinin kurulum maliyetleri toplamı Tablo 4.15’ten alınmıştır. Sistemin kurulduğu ilk yıldaki gelir için Eşitlik 4.2 kullanılarak bulunmuştur.

$$\text{Sistemin kurulduğu ilk yıldaki gelir} = (ESY \times E_{\text{satış}}) + S_{\text{Bil. Top}} \quad (4.2)$$

ESY (kWh/y): Yıllık satılan elektrik

$E_{\text{satış}}$ (\$/kWh): Elektrik satış fiyatı

$S_{\text{Bil. Top.}}$ (\$/y) : Bileşenlerin toplam hurda maliyeti

4.5. Bulgular

İlk simülasyonda mevcut sistemin bileşenleri 2 adet 6MW gaz motoru, kazan ve şebekedir (on-grid). İkinci simülasyon ise şebeke dışarda bırakılarak (off-grid) yine 2 adet 6MW gaz motoru, kazandan oluşturulmuştur.

4.5.1. Şebekeye Bağlı Hibrit Enerji Üretim Sistemi

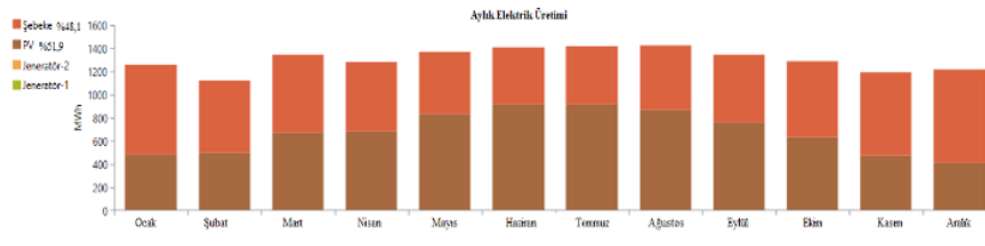
Mevcut doğal gazlı kojenerasyon santrali ve şebekeden oluşan sisteme , güneş paneli, rüzgâr türbini, batarya ve dönüştürücü eklenerek oluşturulan hibrit enerji üretim sisteminin simülasyon sonuçları alınarak mevcut doğal gazlı kojenerasyon santrali ve şebekeden oluşan sistemle karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır.

İlk simülasyonda güneş radyasyonu ortalaması 4,91 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 3,00 m/s alındığında, hibrit elektrik üretim sisteminde en düşük net şimdiki maliyet değeri 46,2 milyon dolar ile sadece güneş enerjisi, şebeke ve kazan ile çalışan sistem

olduğu görülmüştür (Tablo 4.16.). Mevcut sistemin net şimdiki maliyeti 87,9 milyon dolar olduğu görülmektedir Sistemin içerisine kojenerasyon santralleri de dahil olmasına rağmen Buradan elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanmamıştır. Sistemin elektrik üretimi Şekil 4.12.'de verilmektedir. Bu enerjinin % 51,9'u güneş panelinden % 48,1'i şebekeden sağlanmıştır. Sonunda çıkarılan raporun ilgili bölümünde bu sonuçlar görülebilir (Şekil 4.13.). Termal enerjinin ise % 100'ü kazandan (boiler) sağlanmıştır (Şekil 4.14.). Mevcut sistemde ise termal enerji için bir değişiklik olmazken elektrik enerjisinin tamamı şebekeden sağlanmaktadır. Bu durumda sisteme sadece güneş paneli ekleyerek bile bir optimizasyon yani eniyileme sağlanmıştır.

Tablo 4.16. Simülasyonda en küçük net şimdiki maliyete göre hibrit enerji modelinin bileşenleri

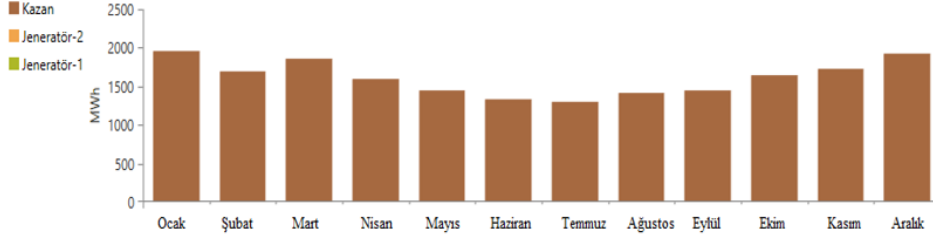
Sistem Bileşenleri	ADI	Ölçüsü	Birimi
Jeneratör #1	Wartsila 18V34SG (2)	6.000	kW
Jeneratör #2	Wartsila 18V34SG (1)	6.000	kW
Güneş Paneli	Generic flat plate PV	4.000	kW
Dönüştürücü	System Converter	3.250	kW
Kazan (Boiler)	Generic Boiler	1.00	-
Şebeke	Grid	999.999	kW



Şekil 4.12. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon aylık elektrik üretimi

Production Summary		
Component (Bileşenler)	Production (kWh/vr) (Üretim)	Percent(Yüzde)
Generic flat plate PV (Güneş Paneli)	8,120,489	51,9
Wartsila 18V34SG (2) (Jeneratör doğal gaz)	0	0
Wartsila 18V34SG (1) (Jeneratör doğal gaz)	0	0
Grid Purchases (Şebeke alımları)	7,521,619	48,1
Total (Toplam)	15,642,108	100

Şekil 4.13. Hibrit üretim sistemi 1. Simülasyon raporundaki elektrik üretimi yüzdeleri



Şekil 4.14. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon aylık termal enerji üretimi

Bu modellemeyi net şimdiki maliyeti 46,5 milyon dolar ile bir rüzgâr türbini dahil edilen sistem takip etmektedir. Elektriğin % 51,8'i güneş panelinden % 47,8'i şebekeden ve % 0,379'u rüzgâr türbininden sağlanmıştır. Termal enerjinin ise yine % 100'ü kazandan (boiler) sağlanmıştır.

Güneş radyasyonu ortalaması 4,91 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 3,00 m/s alındığında teknoekonomik ve emisyon değerlerindeki değişikliklere baktığımızda basit geri ödeme süresinin (Simple payback) 11,2 yıl olduğu görülmektedir. Bu kısa bir süre değildir. Yine de bu değişikliklerle kurulu güç anlamında kara geçmiş görünmektedir. Her iki durumda da yıllık yakıt tüketimi 2.304.691 L/yıl olarak kalmıştır. Şebekeden satın alınan enerjiye gelince 12.410.000 kWh/yıl mevcut sistemde alınmasına karşın tasarlanan sitemde 7.521.619 kWh/yıl enerji alınmış ve 2.809.942 kWh/yıl şebekeye satılmıştır (Tablo 4.17.) Ekonomik anlamda yeterli olmasa da karbon salımı açısından fark yaratmıştır. Değerlendirme sonuçlarından yılda 3.089.459 kg'dan daha az CO₂ salımı olduğu görülmüştür (Tablo 4.16.). Her iki sistemde de karbon monoksit, yanmamış hidrokarbonlar ve partikül madde sıfır kg olduğu için tabloya yansıtılmamıştır. Mevcut sistemde fazla enerji elde edilmediği için şebekeye satılan enerji, daha önceden var olan bir sistem kabul edilmesinden dolayı da iskonto oranı ve geri ödeme süresi hesaplanamadığı için sıfır alınmıştır.

Tablo 4.17. Simülasyonun ekonomik sonuçlarının ve emisyon sonuçlarının karşılaştırılması

Güneş radyasyonu ortalaması 4,91kWh/m ² /gün ve rüzgar hızı ortalaması 3,00 m/s		
Sonuçlar	1. Simülasyon-Önerilen Sistem	MEVCUT (Temel) SİSTEM
Net Şimdiki Maliyet (NPC) (\$)	46,2M	87,9M
Basit Geri Ödeme Süresi (Simple payback) (yıl)	11,2	0
İskontolu Geri Dönüş Süresi (yıl)	7,39	0
Yıllık Yakıt Tüketimi (L/yıl)	2.304.691	2.304.691
Şebekeden Satın Alınan Enerji (kWh/yıl)	7.521.619	12.410.000
Şebekeye Satılan Enerji (kWh/yıl)	2.809.942	0
Güneş Paneli PV (kWh/yıl)	8.120.489	0
CO ₂ (kg/yıl)	9.226.531	12.315.990
SO ₂ (kg/yıl)	20.690	34.003
Nitrojen Oksit (kg/yıl)	10.079	16.629

Tablo 4.17.'de bir araya getirilen sonuçlar için HOMER analizinden sonra örnek olarak, bu optimizasyon sonucu için Şekil 4.15.'de görülen simülasyon raporunun oluşturulabileceği arayüz gelmektedir. Bu arayüzde çalışmada mevcut sistem olarak kabul edilen sistemle (Base system) ilgili kriterlere uygun optimize edilen ve önerilen sisteme (Proposed system) ait sonuçlar kıyaslanmaktadır.

Architecture										C1	
	PV (kW)	HALBES TÜRBİNİ	Jeneratör-2 (kW)	Jeneratör-1 (kW)	Batarya	Şebeke (kW)	Converter (kW)	NPC (\$)	Initial capital (\$)		
Base system			6.000	6.000		999.999		\$87.9M	\$8.40M		
Proposed system	4.000		6.000	6.000		999.999	3.250	\$46.2M	\$13.4M		

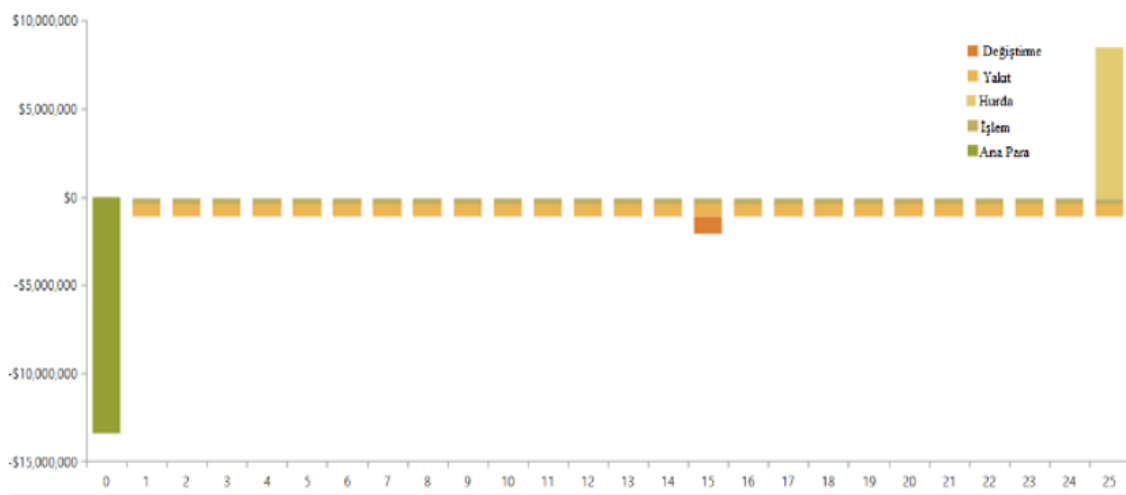
Metric	Value
Present worth (\$)	\$41.764.480
Annual worth (\$/yr)	\$390.798
Return on investment (%)	4,4
Internal rate of return (%)	6,7
Simple payback (yr)	11,24
Discounted payback (yr)	7,39

Şekil 4.15. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon ekonomik sonuç özet tablosu

İşletme maliyeti (Operating Cost), ilk sermaye maliyetleri dışındaki tüm maliyet ve gelirlerin yıllara göre dağılmış değeridir. Mevcut sistemde bu değer 744.112 \$/yıl iken seçilen sistemde 306.761 \$/yıl bulunmuştur. İlk yatırım maliyetini karşılayacak nakit akışının sağlanması açısından, bu simülasyon analizinde hibrit tasarımın kojenerasyon sisteme göre şebekeden alınan enerjide düşüş sağlansa da sistem girdilerinin maliyet değerlerinin yalnız kojenerasyon olan bir sistemin verimsiz olduğu sonucuna varmak yanlış olmayacaktır (Şekil 4.16.). Simülasyon sonucuna göre, var olan piyasa koşullarında üretim

sisteminde gaz motorları çalıştırılmamış, hibrit sistemde yenilenebilir kaynak dışındaki miktar yine şebekeden sağlanırken 12 MW kurulu gücü olan kojenerasyon sistemde de miktarın tamamı şebekeden karşılanarak simülasyonda tesis atıl durumda bırakılmıştır. Her iki durumda da elektrik üretiminde gaz motorlarının sistemin dışında bırakılması şebekeden elektrik satın alınması sisteme girdi olarak alınan şebeke satış fiyatlarının doğal gaz fiyatına göre elektrik üretim maliyetini karşılama açısından daha uygun olduğu anlamına gelmiştir.

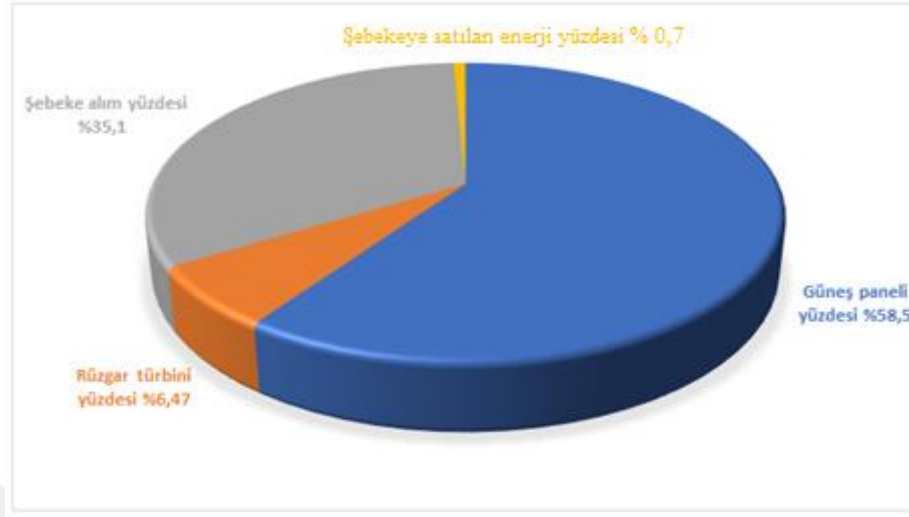
Yine basit geri ödeme süresi (Simple payback) dikkate alınarak bir sıralama yapılamamıştır. Elde edilen en az yıl 1,75 olmasına rağmen tasarlanan sisteme uygun olmayıp HOMER tarafından mevcut gaz motorlarından birinin dışarıda bırakıldığı bir sistem tasarımı önerilmektedir. Ayrıca net şimdiki maliyet (NPC) 85,6 milyon dolar ile mevcut sisteminkine çok yakındır. Mevcut zararlı gaz emisyonları üzerinden bir karar verilmesi gerekirse sadece bu sebepten dolayı tercih edilebilir.



Şekil 4.16. Hibrit üretim sistemi 1. simülasyon nakit akışı

Güneş radyasyonu ve rüzgâr hızına bağlı olarak yenilenebilir enerjinin kullanımının artmasıyla meydana gelen değişime bağlı olarak sonuçların karşılaştırmaları Tablo 4.18.'de verilmiştir. Güneş radyasyonu ortalaması 7,80 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olarak alındığında % 58,5'u güneş panelinden, % 6,47'ü rüzgâr türbininden, %35,1'si şebekeden sağlanmıştır. Güneş radyasyonu ortalaması 4,91 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s alındığında % 50,2'u güneş panelinden, % 7,23'ü rüzgâr türbininden, % 42,6'sı şebekeden sağlanmıştır. Güneş ve rüzgâr kaynaklarındaki değişim sisteme yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik ve azalan karbon salımı olarak yansımaktadır (Tablo

4.18.) Güneş radyasyonu ortalaması 7,8 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olan simülasyonun analizine bakıldığında elektrik üretim kaynakları Şekil 4.17.'de verilmektedir.



Şekil 4.17. Simülasyon-1 için güneş radyasyonu ortalaması 7,8 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olan simülasyonun analizine bağlı elektrik üretim kaynakları sonucu.

Tablo 4.18. Simülasyonun ekonomik sonuçlarının ve emisyon sonuçlarının karşılaştırılması

Sonuçlar	Güneş radyasyonu ortalaması 7,80kWh/m ² /gün ve rüzgar hızı ortalaması 4,56 m/s	Güneş radyasyonu ortalaması 4,91kWh/m ² /gün ve rüzgar hızı ortalaması 4,56 m/s	Güneş radyasyonu ortalaması 4,91kWh/m ² /gün ve rüzgar hızı ortalaması 3,00 m/s
Net Şimdiki Maliyet (NPC) (\$)	30.3M	43,8M	46.2M
Basit Geri Ödeme Süresi (Simple payback) (yıl)	11,1	13,85	11,2
İskontolu Geri Dönüş Süresi (yıl)	7,33	8,56	7,39
Yıllık Yakıt Tüketimi (L/yıl)	2.304.691	2.304.691	2.304.691
Şebekeden Satın Alınan Enerji (kWh/yıl)	6.340.658	6.881.446	7.521.619
Şebekeye Satılan Enerji (kWh/yıl)	5.138.100	3.339.542	2.809.942
Elektrik Üretim Kaynakları (%)	%58,5'u güneş panelinden, %6,47'ü rüzgar türbininden, %35,1'si şebekeden sağlanmıştır.	%50,2'u güneş panelinden, %7,23'ü rüzgar türbininden, %42,6'sı şebekeden sağlanmıştır.	%51,9'u güneş panelinden %48,1'i şebekeden sağlanmıştır.
CO ₂ (kg/yıl)	8.480.163	8.821.942	9.226.531
SO ₂ (kg/yıl)	17.373	18.855	20.690
Nitrojen Oksit (kg/yıl)	8.496	9.221	10.079

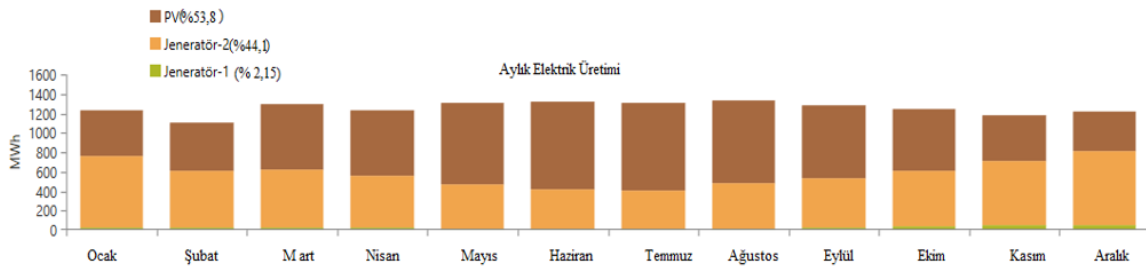
Yapılan analizlerde bataryanın mevcut değerlendirilmede sisteme etkilerine bakıldığında Tablo 4.18.'de karşılaştırma değerlerinin dışında sonuç raporlarından güneş radyasyonu ortalaması 7,80 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olarak alınan değerlendirmede kurulum ücretine 60.000 \$ ek maliyet getirmesiyle birlikte net şimdiki maliyeti (NPC (\$)) arttırarak 30,3 milyon dolardan 30,7 milyon dolara çıkartmış, basit geri

ödeme süresinde ise sisteme katkısı olmamış her iki sistemde 11 olarak kalmıştır. Bataryanın arttırılmasının sisteme etkisi bu şekilde görülmüştür.

4.5.2 Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Üretim Sistemi

Mevcut şebekeden bağımsız doğal gazlı kojenerasyon santralinden oluşan sisteme, güneş paneli, rüzgâr türbini, batarya ve dönüştürücü eklenerek oluşturulan hibrit enerji üretim sisteminin simülasyon sonuçları alınarak mevcut şebekeden bağımsız doğal gazlı kojenerasyon santralinden oluşan sistemle karşılaştırmalı değerlendirilmesi yapılmıştır.

İkinci simülasyonda güneş radyasyonu ortalaması 4,91 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 3,00 m/s alındığında, hibrit elektrik üretim sisteminde en düşük net şimdiki maliyet değeri 135 milyon dolar ile enerji kaynağı olarak yine sadece güneş enerjisi eklenmiş batarya ve kazan ile çalışan sistem olduğu görülmüştür (Tablo 4.19.). Şebekeden bağımsız mevcut sistemde bu değer 200 milyon dolardır. Sistemin elektrik ve termal yüklerin karşılanması için enerji kaynağının verimine göre kullanıldığı görülmektedir. Enerjinin % 53,8'i güneş panelinden % 44,1'i 2. Jeneratörden ve % 2,15'i 1. Jeneratörden sağlanmıştır (Şekil 4.18). Her iki jeneratör de aynı kapasitede olduğu için sıralamanın bir önemi yoktur.



Şekil 4.18. Hibrit elektrik üretim sistemi 2. simülasyonun aylık elektrik üretimi

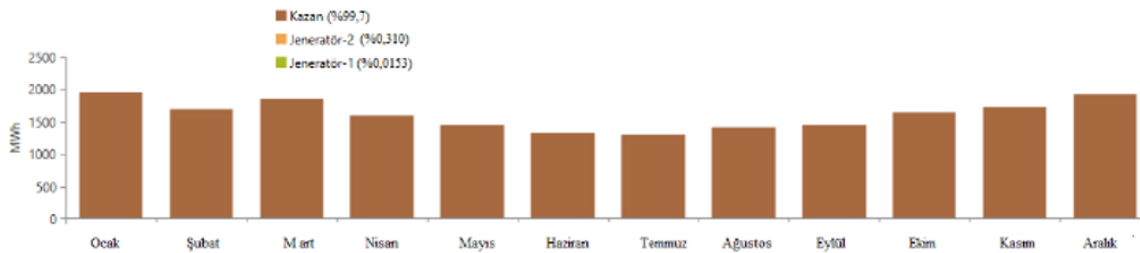
Bataryanın enerji girişi 4.199.800 kWh/yıl, çıkışı 3.620.422 kWh/yıl olarak bu sistemde çalışan tanımlı bataryanın değerlendirilmesi için maksimum 2.500 adet kullanılma sınırı yeterli gelmediği için fazla elektrik oluşmakta bu da enerji kaybına neden olmaktadır. Sistemde oluşan fazla elektrik (Excess Electricity) 1.597.051 kWh/yıl'dır. Fazla elektrik, fazla güç üretimi ya yenilenebilir bir kaynak tarafından ya da minimum çıkış yükü aştığında jeneratör tarafından ya da piller hepsini soğuramadığında oluşur. Şebekeden bağımsız mevcut sistemde jeneratörün birinin üretimi azaltılarak bunun önüne geçilmiştir. Aslında bu sisteme dahil edilebilecek şebeke ile fazla enerji satılarak tesisin kara geçebileceği yıl daha öne çekilebilir. Tabi bu bağlantıda tesisin yeri de ekonomik analizlerde önemli ölçüde etkili olabilir.

Tablo 4.19. Simülasyonun en küçük net şimdiki maliyete göre hibrit enerji modelinin bileşenleri.

Sistem Bileşenleri	ADI	Ölçüsü	Birimi
Jeneratör #1	Wartsila 18V34SG (2)	2.000	kW
Jeneratör #2	Wartsila 18V34SG (1)	6.000	kW
Güneş Paneli	Generic flat plate PV	3.995	kW
Batarya	Hoppecke 24 OPzS 3000	2.500	adet
Dönüştürücü	System Converter	2.833	kW
Kazan (Boiler)	Generic Boiler	1,00	-

Termal enerjinin ise % 99,7'si kazandan (boiler) % 0,310'i ve % 0,0153'ü jeneratörlerden sağlanmıştır (Şekil 4.19.). Şebekeden bağımsız mevcut sistemde ise termal enerji % 99,4'si kazandan (boiler) % 0,6'si ve % 0,005'si jeneratörlerden sağlanmıştır. Değerler arasında önemli bir fark görülmemiştir.

Sisteme sadece güneş paneli ekleyerek net şimdiki maliyet değeri açısından bir eniyileme sağlanmıştır. Fazla enerji üretilmesi sistem tasarımında özellikle batarya desteği gerektiğini buna bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle bu simülasyon değerlerinde güneş panel sayılarının da arttırılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.19. Hibrit üretim sistemi 2. simülasyon aylık termal enerji üretimi

Güneş radyasyonu ortalaması 4,91 kW/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 3,00 m/s alındığında teknoekonomik ve emisyon değerlerindeki değişikliklere baktığımızda basit geri ödeme süresinin (Simple payback) 5,6 yıl olduğu görülmektedir. Şebekeden bağımsız mevcut sistemde bu değerlerin sıfır olduğu düşünüldüğünde iyi olarak değerlendirilebilir. Bu sistem tasarımının en iyisi olduğu sonucunu vermese de değerlendirmede önemli bir kriterdir.

Şebekeden bağımsız mevcut sistemde yakıt tüketimi 5.659.660 L/yıl olmasına karşın sadece güneş paneli faktörüyle bu 4,102,352 L/yıl değerine inmiştir. Daha ayrıntılı karşılaştırma analizlerine Tablo 4.20.'de yer verilmiştir. Emisyon değerleri de karşılaştırılmıştır. Ekonomik anlamda yeterli olmasa da karbon salımı açısından fark yaratmıştır. Değerlendirme sonuçlarından görülmüştür ki yılda 2.986.269 kg daha az CO₂ ve 21.214 kg daha az CO salımı olduğu görülmüştür (Tablo 4.20.).

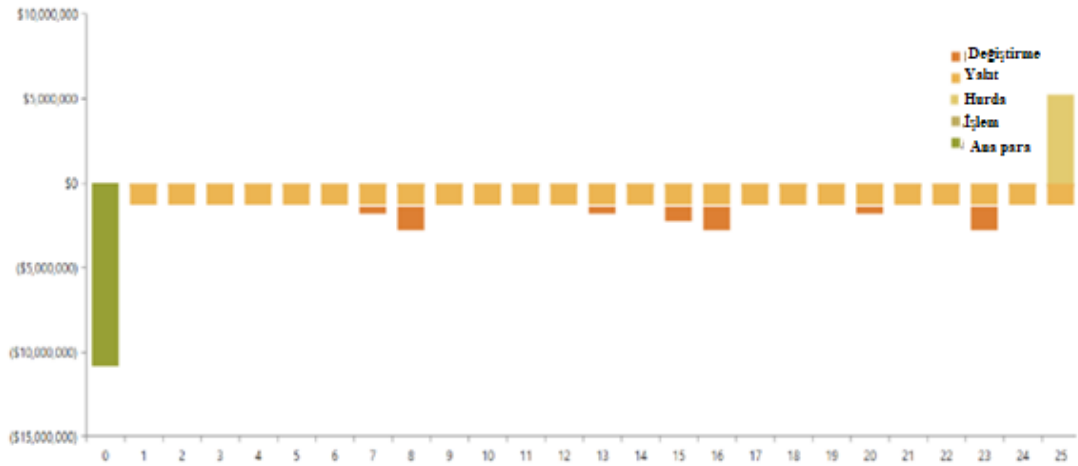
Tablo 4.20. Simülasyonun ekonomik ve emisyon sonuçlarının karşılaştırılması

Güneş radyasyonu ortalaması 4,91kWh/m ² /gün ve rüzgar hızı ortalaması 3,00 m/s		
Sonuçlar	2. Simülasyon-Önerilen Sistem	MEVCUT (Temel) SİSTEM
Net Şimdiki Maliyet (NPC) (\$)	135M	200M
Basit Geri Ödeme Süresi (Simple payback) (yıl)	5,6	0
İskontolu Geri Dönüş Süresi (yıl)	3,9	0
Yıllık Yakıt Tüketimi (L/yıl)	4.102.352	5.659.660
Fazla Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	1.597.051	0
CO ₂ Salınımı (kg/yıl)	7.920.032	10.906.301
Karbon Monoksit (kg/yıl)	24.489	45.703
Yanmamış Hidrokarbonlar (kg/yıl)	1.300	2.426
Partikül Madde (kg/yıl)	209	391
Sülfür Dioksit (kg/yıl)	0	0
Nitrojen Oksit (kg/yıl)	4.693	8.759

Bu tasarımın eniyileme listesinde hemen arkasında yer alan net şimdiki maliyeti yine 135 milyon dolar ile bir rüzgâr türbini dahil edilen sistem takip etmektedir. Elektriğin % 53,7'i güneş panelinden % 43,8 ve % 2,8'i gaz motorlarından (jeneratör) ve % 0,393'ü rüzgâr türbininden sağlanmıştır. Yine sistemin olumsuz yanı olarak 1.624.712 kWh/yıl fazla enerji bulunmaktadır.

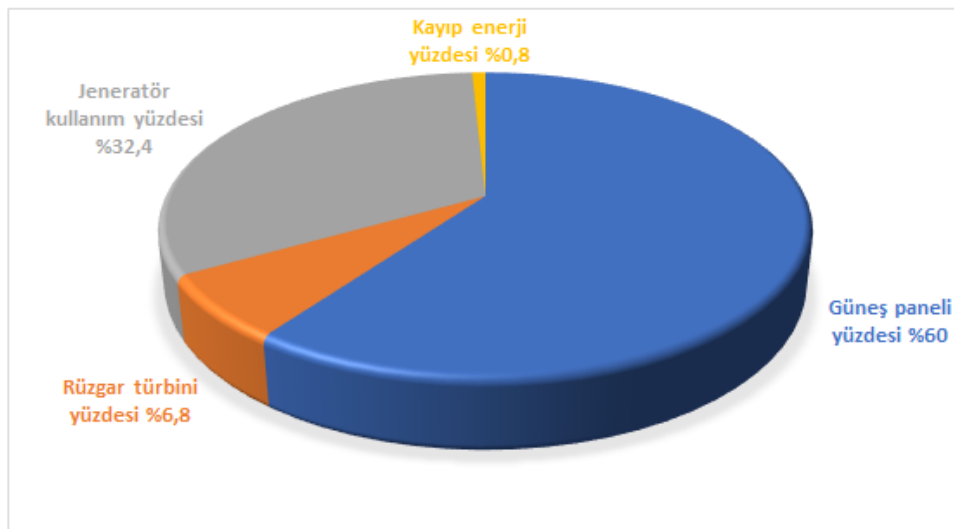
Şebekeden bağımsız mevcut sistemde İşletme maliyeti (Operating Cost), 1,81 milyon \$/yıl iken seçilen sistemde 1,16 milyon \$/yıl bulunmuştur. Nakit akışı sağlaması açısından, seçilen simülasyon analizinde hibrit tasarımın şebekeden bağımsız mevcut sisteme göre daha iyi olsa da (Şekil 4.20.) ilk yatırım maliyeti 4,34 milyon dolar daha fazladır.

Simülasyon sonucuna göre, mevcut piyasa koşullarında enerji üretimi için sistemindeki gaz motorları tam kapasiteyle çalıştırılmamış, hibrit sistem içerisinde yenilenebilir kaynakların sisteme eklenmesiyle baz yükler bu kaynaklardan sağlanmış, pik yüklerin jeneratörden alınmış olduğu görülmüştür. Elektrik enerjisinin düşük olmasında etkili neden termal yükün kazandan sağlanmasıdır.



Şekil 4.20. Hibrit üretim sistemi 2. simülasyon nakit akışı

Güneş radyasyonu ortalaması 7,80 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olarak alındığında % 58,5'u güneş panelinden, % 6,47'ü rüzgâr türbininden, %35,1'si şebekeden sağlanmıştır. Güneş radyasyonu ortalaması 4,91 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s alındığında % 50,2'u güneş panelinden, % 7,23'ü rüzgâr türbininden, % 42,6'sı şebekeden sağlanmıştır. Güneş ve rüzgâr kaynaklarındaki değişim sisteme yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik ve azalan karbon salımı olarak yansımaktadır (Tablo 4.21.). Güneş radyasyonu ortalaması 7,8 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olan değişkenlerin geçerli olduğu simülasyon analizine bakıldığında elektrik üretim kaynakları Şekil 4.21.'de verilmektedir.



Şekil 4.21. Simülasyon-2 için güneş radyasyonu ortalaması 7,8 kWh/m²/gün ve rüzgâr hızı ortalaması 4,56 m/s olan simülasyon analizine bağlı elektrik üretim kaynakları sonucu

Tablo 4.21.'de farklı güneş radyasyonu ve rüzgar hızına bağlı 2.simülasyonun sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.21. Güneş radyasyonu ve rüzgar hızına bağlı simülasyon-2 sonuçları

2. Simülasyon-Önerilen Sistem-Farklı duyarlılık analizine bağlı sonuçlar			
Sonuçlar	Güneş radyasyonu ortalaması 7,80kWh/m²/gün ve rüzgar hızı ortalaması 4,56 m/s	Güneş radyasyonu ortalaması 4,91kWh/m²/gün ve rüzgar hızı ortalaması 4,56 m/s	Güneş radyasyonu ortalaması 4,91kWh/m²/gün ve rüzgar hızı ortalaması 3,00 m/s
Net Şimdiki Maliyet (NPC) (\$)	117M	130M	135M
Basit Geri Ödeme Süresi (Simple payback) (yıl)	8,13	10,19	5,6
İskontolu Geri Dönüş Süresi (yıl)	6,67	7,14	3,9
Yıllık Yakıt Tüketimi (L/yıl)	3.748.140	3.979.078	4.102.352
Fazla Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	3.404.014	1.908.968	1.597.051
Elektrik Üretim Kaynakları (%)	%60'ı güneş panelinden, %6,80'i rüzgar türbininden, %32,4'i jeneratör (2)'den sağlanmıştır.	%51,5'i güneş panelinden, %7,42'si rüzgar türbininden, %41,1'i jeneratör (2)'den sağlanmıştır.	%53,'i güneş panelinden %44,1'i 2.Jeneratörden ve %2,15'i 1.Jeneratörden sağlanmıştır.
CO2 Salınımı (kg/yıl)	7.240.802	7.683.643	7.920.032
Karbon Monoksit (kg/yıl)	19.664	22.810	24.489
Yanmamış Hidrokarbonlar (kg/yıl)	1.044	1.211	1.300
Partikül Madde (kg/yıl)	168	195	209
Sülfür Dioksit (kg/yıl)	0	0	0
Nitrojen Oksit (kg/yıl)	3.769	4.372	4.693

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 25 yıl kullanım ömrü olan sistemde artış ve azalışları doğru tespit etmek için batarya, şebeke kapasiteleri, yenilenebilir enerji potansiyeli ve bileşenlerin sayıları, boyutları sınırlı tutulmuştur. İlk değerlendirme kriteri net şimdiki maliyet alınmıştır. Tasarlanan her iki sistemde de kazan termal yükü üstlendiği için ayrıca diğer enerji kaynaklarından termal yükü karşılamak için elektrik kullanımına gerek kalmamıştır.

Şebeke bağlantılı ve bağımsız olarak 2 şekilde tanımlanan mevcut sistem olarak doğal gazla çalışan kojenerasyon santrali için önce kabuller çerçevesinde HOMER yazılımı kullanılarak simülasyon yapıp değerler alınmış ve daha sonra yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı simülasyonlarla değerler karşılaştırılmıştır. Her modelleme kendi içinde optimizasyon sürecine alınıp önce kendi içerisindeki en uygun kombinasyona karar verilmiş daha sonra mevcut sistemle maliyet ve emisyon değerleri bakımından kıyaslanmıştır. Yapılan teknoekonomik analizlerin kıyaslamaları tablolarla verilmiştir.

Birinci simülasyonda değişen rüzgâr hızı ve güneş radyasyon değerlerinde şebekeye bağlı hibrit sistemde en iyi geri ödeme süresi 11,2 yıl ve en iyi net şimdiki maliyet 30,3 milyon dolar, güneş radyasyonunun 7,8 kWh/m², rüzgâr hızı 4,56 m/s olduğunda elde edilmiştir. Uygulanan bu simülasyon değerlerinde en az emisyon elde edilmiştir. CO₂ değeri daha düşük simülasyon değerlerinde daha yüksekken bu değerler için yapılan analizlerde en düşük değeri 8.480.163 kg/yıl olmuştur.

Şebekeden bağımsız olarak tasarlanan 2. simülasyonda da en iyi değerler yine güneş radyasyonunun 7,8 kWh/m², rüzgâr hızı 4,56 m/s olduğunda gerçekleşmiştir. Net şimdiki maliyet 117 milyon dolarken geri ödeme süresi 8,13 yıl bulunmuştur. Geri ödeme süresi 5,6 yıl bulunan diğer simülasyon analizinde net şimdiki maliyet artarak 135 milyon dolara çıkmıştır. Bu simülasyonda CO₂ emisyonunun en düşük değeri 7.240.802 kg/yıl olmuştur. Yeterli depolama ve şebeke bağlantısı olmaması fazla enerji üretimine neden olmuştur. En iyi değerlerin elde edildiği simülasyon analizinde en yüksek enerji değeri olan 3.404.014 kWh/yıl bulunmuştur. Zararlı gazların emisyon hesaplanmasında karbon ayak izini azaltmaya yönelik uygulanan cezalar sisteme dahil edilmemiştir. Dahil edilmesi durumunda hem maliyete hem de modellenen sisteme etkisi olacaktır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin kurulum aşamasından, kullanım sırasında oluşabilecek karbon ayak izi değerlendirilmemiştir. Zararlı emisyonların azaltılmasında bu gibi faktörlerin de değerlendirildiği daha hassas analizler daha doğru emisyon değerlendirmesi sağlayacaktır.

Doğal gaz kullanan kojenerasyon sisteminde hibrit bir tasarım yapıldığında elektrik yükünün şebekeden sağlanması ekonomik olarak daha uygun bulunmuştur. Gaz motorlarında kullanılan doğal gaz fiyatından daha düşük fiyatla alınabilen şebeke elektriği kojenerasyon santrallerin atıl kalmasına neden olabilmektedir. Bu uygulamaya göre şebekenin olmadığı durumda ancak kojenerasyon tesisinin tercih edilmesi önerilebilir. Aynı zamanda yüksek güç elde etmek için gereken büyük rüzgâr türbinlerinin maliyetlerinin yüksek olması, düşük kapasiteli türbinlerinin, güneş panellerinin sayısının artması maliyet açısından olumsuz etki yaratmaktadır. Bataryayı arttırmanın da maliyeti önemli ölçüde olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyellerinin artması ve teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak bu kaynakları enerjiye dönüştüren bileşenlerin maliyetlerinin düşmesi hem fosil yakıtların kullanılmasını hem şebekeden alınan elektrik enerjisinin azalmasını sağladığı hem de şebekeye satılan enerjiyi arttırarak kâr edilebildiği görülmüştür. Buna bağlı olarak da emisyon değerleri azalma eğilimi göstermektedir.

Şebeke mesafesi fiyatlandırması bu çalışmada fiyatlandırılmamıştır fakat bu veri girişi de yapılabilmektedir. Ana şebekeye uzaklığı yüksek olan uzak ve kırsal alanlarda ana şebekenin kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı hibrit sistemlerin elektrik üretilmesinde kullanılmasına kıyasla daha düşük NPC elde edilebilmesine rağmen, güç kayıpları, düşük güç kalitesi ve yüksek işletme ve bakım maliyetleri gibi çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bazı durumlarda bölgenin topografyasına dikkat edilerek şebeke erişimi mümkün olmamaktadır. Öte yandan, kentsel alanlarda, en iyi planlar için enerji maliyeti (COE), şebeke elektrik fiyatlarından daha yüksektir. Sistemdeki kaynakları enerjiye dönüştüren bileşenlerin maliyetlerinin düşmesi hem fosil yakıtların kullanılmasını hem şebekeden alınan elektrik enerjisinin azalmasını sağladığı hem de şebekeye satılan enerjiyi arttırarak kâr edilebildiği görülmüştür. Buna bağlı olarak da emisyon değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Bu çalışmada yenilenebilir enerjiyle desteklenen hibrit sistemlerin teknoekonomik ve çevre anlamında tercih edilmesinin olumlu, olumsuz etkileri ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada modellenen sistemin uygulama yeri olarak farklı bir bölge olan örneğin Türkiye'nin İç Anadolu bölgesi gibi Ege Bölgesi'ne göre daha düşük rüzgar hızı ve güneş radyasyonu olan bir yer seçilirse farklı yenilenebilir kaynaklarla modellemenin yeniden yapılması gerekecektir. Tercih edilen yenilenebilir enerji kaynakları coğrafyaya göre seçilmesi gerektiğinden yeterli güneş ve rüzgar kaynağı olmaması durumunda farklı kaynaklara yönelmek gerekebilir. Yine rüzgar ve güneş için daha elverişli bir bölge seçilmesi

durumunda ise daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması bu çalışmadaki gibi, fosil yakıt kullanan bir sisteme entegre edilmesi durumunda karbon ayak izini azaltacak ve zararlı emisyonları düşürecektir. Ekonomik anlamda da geri ödeme sürelerinin daha az olduğu sistemler oluşturulabilecektir. Bu çalışmada da rüzgar ve güneş kaynaklarının veriminin artmasıyla daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

HOMER yazılımı modellenen hibrit sistemler için hem simülasyon hem optimizasyon açısından kolaylık sağlamaktadır. Farklı yazılımlar kullanılarak yapılan çalışmalarda HOMER'in sonuçlarına yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Bu çalışmanın şebekeye bağlı hibrit sistem için HOMER sonuçlarıyla MS Excel yapılan hesaplamaların karşılaştırmasında NPC değeri HOMER'de 46,200 M\$, MS Excel'de yapılan hesaplamada 46,213 M\$ olarak yakın bir değer bulursa da basit geri ödeme yılı ise MS Excel'le yapılan hesaplamalarda yaklaşık 2 yıl fazla bulunmuştur.

HOMER kullanımında özellikle geri ödeme süresi hesaplamalarında iki sistem arasında bir kıyaslama yaparak sonuca ulaşmak, kısıtlayıcı bir özellik olduğu için farklı bir programla ya da bu çalışmada olduğu gibi MS Excel yazılımıyla hesaplama yapılarak bir değerlendirme yapılması daha uygun olabilir.

Oluşturulan tasarım incelemesi kullanılan kaynaklara göre daha net bilgiler verebilen yazılımlarla desteklenerek bu metodolojilere göre daha da geliştirilebilir. Net ölçümleri yapılan arazi koşullarının değerlendirmeye alındığı daha ayrıntılı bileşen bilgilerinin kullanıldığı hibrit bir sistem tasarımı yapılabilir.

HOMER desteklemese de farklı yazılımlar da kullanılarak süreç planlama ve risk planlamasını içeren kriterler bazı geliştirilen metodolojilerle hesaplanabilir. Bu analizlerin de yapılarak sisteme dahil edilmesi karar verme süreçlerini daha net sonuçlara götürecektir. HOMER Pro MATLAB bağlantısı kullanarak HOMER Pro için kullanıcının kendi algoritmasını yazmaya olanak tanımaktadır. Bu çalışma için daha net sonuçlara ulaşmak amacıyla MATLAB kullanılarak sistem geliştirilip bir sonraki aşamaya taşınabilir. Yapılan çalışma bu gibi eklentilerle daha da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] K. Anoune, M. Bouya, A. Astito, Abdellah, Sizing Methodologies and Optimization Techniques for PV-Wind Based Hybrid Renewable Energy System: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 93(May), 652-673
- [2] S. Dursun, “Biyokütle-rüzgâr-güneş hibrit güç üretim sistemi kullanılarak Kırklareli Üniversitesi Kayalı yerleşkesinin tekno-ekonomik açıdan değerlendirilmesi”. Yüksek Lisans, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, 2016
- [3] İ. Karadöl, “Kahramanmaraş bölgesi için güneş ve rüzgâr enerjisi hibrit sisteminin incelenmesi”. Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2017
- [4] N. Jafarzadeh, “İTÜ Ayazağa Yerleşkesi için rüzgâr/güneş hibrit güç santralı analizi”. Yüksek Lisans, Enerji Sistemleri Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2017
- [5] O. Gülkökan, “Farklı coğrafyalarda bulunan aynı büyüklükteki müstakil konutların elektrik enerjisi ihtiyacının fotovoltaik-rüzgâr hibrit enerji sistemlerinden karşılanması için yapılan tasarım ve optimizasyon çalışması”. Yüksek Lisans, Enerji, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, 2017
- [6] A. Tabak, “Karabük şartlarında fotovoltaik güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve biyogaz hibrit enerji üretim sisteminin potansiyel araştırması ve sistemin optimizasyonu”. Doktora, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2018
- [7] E. Gün, “İstanbul ve çevresinde rüzgâr-güneş hibrit sisteminin karşılama oranlarının belirlenerek ANFIS tabanlı modellenmesi”. Yüksek Lisans, Meteoroloji Mühendisli, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2019
- [8] F. R. Külekçioğlu, “Şebekeden bağımsız bir güneş-rüzgâr hibrit sistemin modellenmesi”. Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2019

- [9] M. F. Özsoy, “Hibrit rüzgâr-güneş enerji üretim sistemi ile bir elektrik laboratuvarının genel aydınlatma tasarımı”. Yüksek Lisans, Elektrik Eğitimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 2011
- [10] B. Baran, “Güneş- rüzgâr hibrit sistemlerin maliyet optimizasyonu”. Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2012
- [11] E. Aykut, “Marmara üniversitesi Göztepe kampüsü için hibrit enerji sistemlerinin tekno-ekonomik ve çevresel açıdan incelenmesi”. Doktora, Elektrik Eğitimi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2019
- [12] M.Ü. Kahraman, “Kütahya Bölgesi Güneş ve Rüzgâr Enerji Potansiyellerinin Tekno-Ekonomik Analizi”. Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2018
- [13] S. Subaşı, “CO2 emisyonları, doğal gaz, yenilenebilir enerji kaynakları ve ekonomik büyüme ilişkisi: Türkiye'deki dinamik değişkenlerin analizi”. Yüksek Lisans, İktisat, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, 2019
- [14] S. Salisu, M. W. Mustafa, L. Olatomiwa, O. O. Mohammed, “Assessment of technical and economic feasibility for a hybrid PV-wind-diesel-battery energy system in a remote community of north central Nigeria ,” Alexandria Engineering Journal, vol. 58, pp. 1103–1118, 2019
- [15] M. M. Samy, S. Barakat, H. S. Ramadan, “Techno-economic analysis for rustic electrification in Egypt using multi-source renewable energy based on PV/ wind/ FC,” International journal of hydrogen energy, vol. 45, pp.11471-11483, 2020
- [16] O. Krishan, S. Suhag, “Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community,” Journal of Energy Storage, vol. 23, pp.305-319, 2019
- [17] M. A. Baseer, A. Alqahtani, S. Rehman, “Techno-economic design and evaluation of hybrid energy systems for residential communities: Case study of Jubail industrial city,” Journal of Cleaner Production, vol. 237, pp.117806, 2019

- [18] A. Haddad, M. Ramadan, M. Khaled, H. S. Ramadan, Mohamed Becherif, "Triple hybrid system coupling fuel cell with wind turbine and thermal solar system," *International journal of hydrogen energy*, vol. 45 , pp.11484-11491, 2020
- [19] H.S. Ramadan, "Wind energy farm sizing and resource assessment for optimal energy yield in Sinai Peninsula, Egypt," *Journal of Cleaner Production*, vol. 161, pp.1283-1293, 2017
- [20] N. Mezzai, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Mohammedi, K. Idjdarane, S. Bacha, "Modeling of hybrid photovoltaic/wind/fuel cells power system," *International journal of hydrogen energy*, vol. 39, pp.15158-15168, 2014
- [21] H. Belmili, M. Haddadi, S. Bacha, M. F. Almi, B. Bendib, "Sizing stand-alone photovoltaic–wind hybrid system: Techno-economic analysis and optimization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp.821-832, 2014
- [22] D. Guangqian, K. Bekhrad, P. Azarikhah, A. Maleki, "A hybrid algorithm-based optimization on modeling of grid independent biodiesel-based hybrid solar/wind systems," *Renewable Energy*, vol. 122, pp.551-560, 2018
- [23] J. Liu, W. Sun, G. P. Harrison, "The economic and environmental impact of power to hydrogen/power to methane facilities on hybrid power-natural gas energy systems," *International journal of hydrogen energy*, xxx (x x x x) xxx Accepted 23 November 2019 Available online at .sciencedirect.com
- [24] M. Tahani, N. Babayan, A. Pouyaei, "Optimization of PV/Wind/Battery stand-alone system, using hybrid FPA/SA algorithm and CFD simulation, case study: Tehran," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp.644-659, 2015
- [25] F. Diab, H. Lan, L. Zhang, S. Ali, "An environmentally friendly factory in Egypt based on hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp.3884-3894, 2016
- [26] S. Singh, M. Singh, S. C. Kaushik, "Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp.178-190, 2016

- [27] A. Buonomano, F. Calise, M. D. d'Accadia, M. Vicidomini, "A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic," *Energy*, vol. 155, pp.174-189, 2018
- [28] L. Ferrari, A. Bianchini, G. Galli, G.Ferrara, E. A. Carnevale, "Influence of actual component characteristics on the optimal energy mix of a photovoltaic-wind-diesel hybrid system for a remote off-grid application," *Journal of Cleaner Production*, vol. 178, pp.206-219, 2018
- [29] R. Li, H. Zhang, H. Wang, Q. Tu, X. Wang, "Integrated hybrid life cycle assessment and contribution analysis for CO2 emission and energy consumption of a concentrated solar power plant in China," *Energy*, vol. 174, pp.310-322, 2019
- [30] K. Rashid, S. M. Safdarnejad, K. M. Powell, "Dynamic simulation, control, and performance evaluation of a synergistic solar and natural gas hybrid power plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 179, pp.270-285, 2019
- [31] G. Reikard, B. Robertson, J.R. Bidlot, "Combining wave energy with wind and solar: Short-term forecasting," *Renewable Energy*, vol. 81, pp.442-456, 2015
- [32] M. Talaat, M.A. Farahat, M.H. Elkholy, "Renewable power integration: Experimental and simulation study to investigate the ability of integrating wave, solar and wind energies," *Energy*, vol. 170, pp.668-682, 2019
- [33] M. İ. Özkoca, 2019, Kojenerasyon Ve Güneş Enerjisinin Bütünleştirildiği Hibrit Sistemin Ekonomik Ve Emisyon Analizi, Yük.Lisans, Tez, İTÜ, İst., Türkiye
- [34] İ. İnan, İ. Akbulut, E. Aslan, "Enerji Sorununun Çözümünde Yenilenemez Ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yeri Ve Önemi," *Türk Dünyası Araştırmaları Vakfı (TDA) Kasım - Aralık 2018 Cilt: 120 Sayı: 237 Sayfa: 11-40*. Erişim: 21/06/2021(Çevrimiçi).Mevcut:s:dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1471292
- [35] Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, "Küresel Doğal Gaz Sektörü, Küresel Doğal Gaz Rezervleri" 2020 Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu. Erişim: 18/04/2021 (Çevrimiçi). Mevcut:.tpao.gov.tr/file/2109/2020-sektor-raporu-55961407ccace9f5.pdf

- [36] Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş., “. Elektrik Sektörü Görünümü,” 2020 Enerji Görünümü. 20 Aralık 2020 (Çevrimiçi). Mevcut: tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji- sektor-gorunumu-2020.pdf
- [37] Y. Bayrak "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimini Destekleme Mekanizması," 2020 Türkiye'nin Enerji Görünümü Sayfa 347-364. 14 Haziran 2020 (Çevrimiçi).Mevcut: mmo.org.tr/sites/default/files/TEG-2020-14_Yekdem2020_Yusuf%20Bayrak.pdf
- [38] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı – Yenilenebilir Enerji, Kaynaklar, Rüzgâr, Erişim:14 Haziran 2020 (Çevrimiçi). Mevcut: enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar
- [39] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli–Erişim: 8 Ekim 2021 (Çevrimiçi). Mevcut: repa.enerji.gov.tr/REPA/ bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf
- [40] Kemal Delikmen-Anadolu Ajansı–Erişim:12/05/2021 (Çevrimiçi).Mevcut: repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf
- [41] K. Delikmen - Anadolu Ajansı (AA). Türkiye'nin rüzgâr enerjisinde kurulu gücü 8 bin megavatı aştı. Basım 26.03.2020. (Çevrimiçi). Mevcut: aa.com.tr/tr/info/infografik/17903
- [42] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı – Bilgi Merkezi, Güneş, Erişim: 18 Kasım,2020 (Çevrimiçi). Mevcut: enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes
- [43] S. Bahramara, M. Parsa Moghaddam n, M.R. Haghifam, “Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews. Eng., Volume 62, September 2016, Pages 609-620, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.039
- [44] HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) software. (2021). Erişim: 21 Haziran 2021 (Çevrimiçi). Mevcut: [.homerenergy.com/products/pro/docs/3.14/index.html](http://homerenergy.com/products/pro/docs/3.14/index.html)

- [45] T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal “Micropower system modeling with homer. Integration of alternative sources of energy,” John Wiley & Sons, Inc.; 2006. p.379–418.)
- [46] A. Graham and K. G. T. Hollands, A method to generate synthetic hourly solar radiation globally, Solar Energy, Vol. 44, No. 6, pp. 333–341, 1990.)
- [47] O. H. Boz “Günümüzün Alternatif Enerji Kaynağı: Fotovoltaik Güneş Pilleri” Yüksek Lisans Tezi Balıkesir Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Şubat 2011
- [48] Prof. Dr. Süleyman Özçelik, “Fotovoltaik (PV) Teknolojileri,” Slayt 1 (Çevrimiçi). Erişim: 30 Eylül 2021 Mevcut: solar-academy.com/menus/Fotovoltaik-PV-Teknolojileri.012332.pdf
- [49] Teknoraysolar-Fotovoltaik modüller. teknoraysolar.com.tr/fotovoltaik-moduller/ (Erişim: 13 Aralık 2021)
- [50] GO Enerji'-Güneş Enerjisi Teknolojisi. Erişim: 15 Aralık 2021 (Çevrimiçi). Mevcut: [.goenerji.com.tr/Gunes-Enerjisi-Hakkinda.html](http://goenerji.com.tr/Gunes-Enerjisi-Hakkinda.html)
- [51] C. Can Tutaşı, “Güneş Enerjisinden Isi Ve Elektrik Eldesinin Tekno-Ekonomik Simülasyonu: Örnek Bir Uygulama,” Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [52] S. Yilmaz, A. Karatutlu, C. Kecec., “PLC tabanlı Gerçek Zaman Saati ile Güneş Takip Sistemi Tasarımı,” International Journal of Scientific and Technological Research, Vol 1, No.5, 2015,24-31
- [53] Bitirgen, K. 2018. Solar radiation estimation for modeling of PV arrays and calculationof solar energy potential based on ArcGIS. Master Thesis, Anadolu University, Graduate School of Sciences Electrical and Electronics Engineering Program, Eskişehir.
- [54] S. Pravadalioglu, “Kojenerasyon Sistemleri İle Yerde Enerji Üretimi” TTMD, Isıtma,Soğutma, Havalandırma, Klima, Yangın ve S. tesisat Dergisi, Sayı - Number :

77 Ocak - Şubat / January - February 2012 Bilimsel Sektör Dergisi 2 ayda bir yayımlanır.

- [55] Enflasyon Raporu 2021-1/28 Ocak 2021- Erişim 18 Nisan 2021(Çevrimiçi). Mevcut: [.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/yayinlar/raporlar/enflasyon+raporu/2021/enflasyon+raporu+2021+-+i](http://tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/yayinlar/raporlar/enflasyon+raporu/2021/enflasyon+raporu+2021+-+i)
- [56] A. Demiroren, U. Yilmaz, (2010). Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in Gökçeada, Turkey: An island example. Renewable and Sustainable Energy Reviewsdoi.org/10.1016/j.rser.2009.06.030
- [57] A. Hossam Gabbar, R. Muhammad Abdussami, and Md. Ibrahim Adham, “Techno-Economic Evaluation of Interconnected Nuclear-Renewable Micro Hybrid Energy Systems with Combined Heat and Power” Energies, Energies 2020, 13, 1642; doi:10.3390/en13071642.
- [58] Enerji Atlası- Doğal gaz santralleri. (2021). Erişim: 18 Ağustos 2021. (Çevrimiçi). Mevcut: enerjiatlası.com/dogalgaz/
- [59] DOİM, 2021, Türkiye’de Yüksek Koruma Değerine Sahip Akdeniz Ormanları Entegre Yön. Projesi,Denizli Orman İşletme Müdürlüğü Yangın Yönetim Planı (2019-2021)
- [60] EİE-Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Ege Bölgesi Rüzgâr Potansiyeli, (2020): solar-academy.com/menus/Izmir-Bolgesi-Ruzgar-Potansiyeli.011849.pdf
- [61] Talayoğlu S.,2010, Denizli İlinin Tavas İlçesine Ait Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanması ve Ekonomik Analizi, Yük.Lisans Tezi, İTÜ,İst., Türkiye
- [62] Enerji Atlası- Rüzgâr Enerji Santralleri. (2021). Erişim: 18 Ağustos 2021. (Çevrimiçi). Mevcut: .enerjiatlası.com/ruzgar/
- [63] Denizli-İli-Ruzgar-Kaynak-Bilgileri, Erişim: 9 Aralık 2020, (Çevrimiçi). Mevcut: solar-bazaar.com/newsis/Denizli-İli-Ruzgar-Kaynak-Bilgileri-REPA.pdf
- [64] M. Bayhan, Ay M. Duran T. Z. 2016, Akademik Sosyal Araştırmalar Dergis, 2016, Yıl 4, Sayı: 25, Mart S. 151-165, Yenilenebilir Enerji Kaynağı Olarak Güneş Enerjisi: Denizli İli Uygulanabilirlik Araştırması

- [65] Güneş enerjisi potansiyeli atlası, Erişim: 18 Eylül 2020, (Çevrimiçi). Mevcut: gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/20.aspx
- [66] HALBES rüzgâr Türbini, Erişim: 13 Eylül 2021, (Çevrimiçi). Mevcut: halb.es.com.tr/100kw-r%C3%BCzgar-t%C3%BCrbini-2021
- [67] M. S. Thakur, B. Gupta, V. Kumar, M. Pandey, (2012) Renewable Hybrid Energy System for Sustainable and Economical Power Supply- A Review. International Journal of Engineering Research, Technology, 1(6), 1-9.
- [68] S. Türkdoğan, M. T. Mercan, T. Çatal, (2020). Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Sistemleri Kullanılarak 40 Hanelik Bir Topluluğun Elektrik ve Termal Yük İhtiyacının Karşıllanması: Teknik ve Ekonomik Analizleri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 476-85.
- [69] Hoppecke., Hoppecke 24OPzS 3000 battery specifications. Erişim: 21 Haziran 2021 (Çevrimiçi). Mevcut: hppecke.com
- [70] N. Üstüntaş, 2019, Diyarbakir Kadın Doğum Ve Çocuk Hastalıkları Hastanesinin Bileşik Isi Güç Sistemi Seçimi Ve Sistem Kurulum Analizi, Yük. Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakir, Türkiye.
- [71] CJ. Andrews Evaluating risk management strategies in resource planning. IEEE Trans Power Syst 1995; 10:420–6.
- [72] YY.Haimes Risk modeling, assessment, and management. John Wiley&Sons; 2005.IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications)