

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR MİKRO ŞEBEKENİN
GELİŞMİŞ FARKLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ
KULLANILARAK MODELLENMESİ VE TEKNO-
EKONOMİK ANALİZLERİ: YILDIZ TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ ÖRNEĞİ

Faruk KÜÇÜKKARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı

Enerji Teknolojileri Programı

Danışman

Doç. Dr. Aslan İNAN

Ağustos, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ BİR MİKRO ŞEBKENİN
GELİŞMİŞ FARKLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ
KULLANILARAK MODELLENMESİ VE TEKNO-
EKONOMİK ANALİZLERİ: YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ÖRNEĞİ**

Faruk KÜÇÜKKARA tarafından hazırlanan tez çalışması 23.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı, Enerji Teknolojileri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Aslan İNAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Aslan İNAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Indrit MYDERRIZI, Üye
İstinye Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Aslan İNAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Şebekeden Bağımsız Bir Mikro Şebekenin Gelişmiş Farklı Enerji Depolama Sistemleri Kullanılarak Modellenmesi ve Tekno - Ekonomik Analizleri : Yıldız Teknik Üniversitesi Örneği” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Faruk KÜÇÜKKARA

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, desteğini ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, beni yönlendiren ve kıymetli vakitlerini ayıran değerli hocam Doç. Dr. Aslan İNAN’a teşekkürlerimi sunarım. Değerli görüşleri, tecrübeleri ve bilgi paylaşımları sayesinde çalışmalarımı daha ileriye taşımamda büyük katkı sağlayan sektör paydaşlarına da teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Ayrıca lisansüstü eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olduklarını hissettiren birbirinden değerli dostlarıma da teşekkür ediyorum.

Son olarak hayatım boyunca sevgi ve destekleriyle her zaman yanımda oldukları için kıymetli Aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Faruk KÜÇÜKKARA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması.....	2
1.2 Tezin Amacı.....	12
1.3 Tezin Katkıları	13
2 NET SIFIR, MİKRO ŞEBEKE VE BİLEŞENLERİ	14
2.1 Net Sıfır.....	14
2.2 Mikro şebeke ve Bileşenleri.....	15
2.2.1 Rüzgâr Türbinleri.....	17
2.2.2 Fotovoltaik Paneller.....	18
2.2.3 Enerji Depolama Sistemleri.....	19
3 MİKRO ŞEBEKENİN TASARIMI, GELİŞMİŞ FARKLI DEPOLAMA SİSTEMLERİNE GÖRE MODELLENMESİ VE SİSTEM GİRDİLERİ	28
3.1 Proje Konum ve Verileri	29
3.2 PV-Sol Yazılımı ile Solar Sistem Tasarımı	30
3.2.1 PV*SOL Premium Yazılımı.....	30
3.2.2 PV*SOL Premium Yazılımı ile Güneş Enerjisi Sistemi Tasarımı.....	31
3.3 Homer Pro Yazılımı ile Mikro Şebeke Tasarımı	34
3.3.1 Homer Pro Yazılımı.....	34
3.3.2 Homer Pro Yazılımı ile Mikro Şebeke Sistemi Tasarımı.....	34
4 SİMÜLASYON SONUÇLARI	54
4.1 Enerji Kaynaklarının Tekno-Ekonomik Analizleri.....	55
4.1.1 Fotovoltaik Sistemin Tekno-Ekonomik Analizleri.....	55
4.1.2 Rüzgâr Türbini Sisteminin Tekno-Ekonomik Analizleri.....	57
4.2 Tüketim Verileri.....	58

4.3	Senaryoların Gelişmiş Depolama Sistemlerine Göre Tekno-Ekonomik Analizleri.....	60
4.3.1	Senaryo 1 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları.....	60
4.3.2	Senaryo 2 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları.....	63
4.3.3	Senaryo 3 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları.....	67
4.3.4	Senaryo 4 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları.....	81
5	SONUÇ	96
	KAYNAKÇA	98
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	105



SİMGE LİSTESİ

Z_{ANEM}	Anemometre Yüksekliği [m]
V_{ANEM}	Anemometre Yüksekliğinde Rüzgâr Hızı [m/s]
$\eta_{deşarj}$	Batarya Deşarj Verimliliği [%]
B_K	Batarya Kapasitesi [kWh]
B_{max}	Batarya Maksimum Kapasitesi [%]
B_{DD}	Batarya Şarj Derinliği [%]
$\eta_{şarj}$	Batarya Şarj Verimliliği [%]
B_{VER}	Batarya Verimliliği [%]
R_{bil}	Bileşen Ömrü [yıl]
$C_{değ}$	Bileşenlerin Değişim Maliyeti
$B(t+1)$	Bir Sonraki Adımda Batarya Seviyesi [%]
f	Enflasyon Oranı
f_{PV}	Fotovoltaik Dizi Değer Kaybı Faktörü [%]
P_{PV}	Fotovoltaik Dizi Güç Çıkışı [kW]
Y_{PV}	Fotovoltaik Dizinin Standart Test Koşulları Altında Nominal Kapasitesi [kW]
P	Gerçek Hava Yoğunluğu [kg/m^3]
α_p	Gücün Sıcaklık Katsayısı [%/°C]
S	Hurda Değeri
$\dot{I}KO$	İç Karlılık Oranı
i'	İndirim Oranı
$\dot{I}_{VER}$	İnvertör Verimi [%]
R_{kal}	Kalan Bileşen Ömrü [yıl]
t_A	Otonomi (pil özerkliği) Süresi [gün]
N	Proje Ömrü [yıl]
P_{RTG}	Rüzgâr Türbini Güç Çıkışı [kW]
$P_{RTG, STP}$	Rüzgâr Türbini Standart Basınç ve Sıcaklıktaki Güç Çıkışı [kW]
Z_{HUB}	Rüzgâr Türbininin Göbek Yüksekliği [m]
V_{HUB}	Rüzgâr Türbininin Rotor Göbeği Yüksekliğindeki Rüzgâr Hızı [m/s]
Z_0	Rüzgâr Pürüzlülüğü [m]
SGF	Sermaye Geri Kazanım Faktörü

M_{ser}	Sermaye Maliyeti
P_0	Standart Basınç ve Sıcaklıktaki Hava Yoğunluğu [1.225 kg/m^3]
$T_{c,STK}$	Standart Test Koşulları Altında T Zamanında Fotovoltaik Dizi Hücre Sıcaklığı [25°C]
GT, STK	Standart Test Koşulları Altında T Zamanında Fotovoltaik Dizisine Gelen Güneş Radyasyonu [kW/m^2]
$B(t)$	t Anında Batarya Seviyesi [%]
$P_{deşarj}(t)$	t Anında Bataryadan Deşarj Edilen Güç [kW]
$P_{şarj}(t)$	t Anında Bataryaya Şarj Edilen Güç [kW]
$P_{fv}(t)$	t Anında Üretilen Fotovoltaik Panel Gücü [kW]
$P_{rüz}(t)$	t Anında Üretilen Rüzgâr Gücü [kW]
$P_{yük}(t)$	t Anında Tüketilen Gücü [kW]
$P_{aşırı}(t)$	t Anındaki Aşırı Elektrik Gücünü [kW]
$P_{unmet}(t)$	t Anındaki Karşılanamayan Yük Gücü [kW]
$P_{to,kay}(t)$	t Anındaki Toplam Kayıp Güç [kW]
G_T	T zamanında Fotovoltaik Dizisine Gelen Güneş Radyasyonu [kW/m^2]
T_c	T Zamanında, Fotovoltaik Panel Hücre Sıcaklığı [$^\circ\text{C}$]
$E_{TOP, T}$	Toplam Enerji Talebi [kWh/gün]
T_{NBM}	Toplam Net Bugünkü Maliyet
$M_{yıl,top}$	Toplam Yıllık Maliyet
$G_{yıl,net}$	Yıllık Net Gelir
i	Yıllık Reel Faiz Oranı
$E_{ürt}$	Yıllık Üretilen Enerji [kWh]

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
GES	Güneş Enerjisi Santrali
KDV	Katma Değer Vergisi
kWh	Kilovat Saat
kWp	Kilovat Pik
LCOE	Levelized Cost of Energy (Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti)
LF	Load Following (Yük Takibi)
LPSP	Loss of Power Supply Probability (Güç Kaybı Olasılığı)
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization (Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu)
MW	Megavat
MWe	Megavat Elektrik
MWh	Megavat Saat
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
PV	Photovoltaic (Fotovoltaik)
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
STP	Standart Sıcaklık ve Basınç

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Mikro şebeke konfigürasyon örneği.....	17
Şekil 2.2 a) Yatay eksenli rüzgâr türbini, b) Dikey eksenli rüzgâr türbini.....	17
Şekil 2.3 Solar hücre çalışma yapısı ve çalışma prensibi	19
Şekil 2.4 a) Çatı GES, b) Arazi GES	19
Şekil 2.5 Enerji depolama sistemleri	20
Şekil 2.6 Vanadyum redoks akış bataryası çalışma ilkesi	21
Şekil 2.7 a) Geleneksel lityum-iyon pili, (b) Deşarj sırasında katı hal bataryası ..	22
Şekil 2.8 Lityum demir fosfat batarya iç yapısı.....	23
Şekil 2.9 Lityum nikel manganez kobalt deşarj işlemi iç yapısı	24
Şekil 2.10 NaS bataryanın iç yapısı ve çalışma prensibi	25
Şekil 2.11 Süper kapasitör iç yapısı örneği	25
Şekil 2.12 Kurşun asit (jel) batarya iç yapısı örneği.....	27
Şekil 3.1 Metodun akış şeması	28
Şekil 3.2 YTÜ Davutpaşa kampüsü genel görünüm	29
Şekil 3.3 FV panel montaj sistemi.....	32
Şekil 3.4 YTÜ Elektrik-Elektronik fakültesi fotovoltaiik panel yerleşimi.....	32
Şekil 3.5 Lojman bölgesi fotovoltaiik panel yerleşimi.....	33
Şekil 3.6 Kütüphane arkası bölge fotovoltaiik panel yerleşimi	33
Şekil 3.7 Çatı fotovoltaiik panel mikro şebeke sistem girdileri.....	35
Şekil 3.8 Çatı ve arazi fotovoltaiik panel mikro şebeke sistem girdileri	36
Şekil 3.9 Rüzgâr türbini mikro şebeke sistem girdileri	38
Şekil 3.10 WES250 Model rüzgâr türbininin güç eğrisi	39
Şekil 3.11 Dönüştürücü için mikro şebeke sistem girdileri.....	40
Şekil 3.12 Vanadyum redoks batarya için mikro şebeke sistem girdileri	41
Şekil 3.13 Katı hal batarya için mikro şebeke sistem girdileri	42
Şekil 3.14 LiFePO ₄ batarya için mikro şebeke sistem girdileri	43
Şekil 3.15 Li-NCM batarya için mikro şebeke sistem girdileri.....	44
Şekil 3.16 NaS batarya için mikro şebeke sistem girdileri.....	45
Şekil 3.17 Süperkapasitör için mikro şebeke sistem girdileri	46
Şekil 3.18 Kurşun asit (jel) batarya için mikro şebeke sistem girdileri.....	47
Şekil 3.19 Yük takibi stratejisi akış şeması	50

Şekil 3.20 Yük takibi kontrol cihazı ve enerji yönetim sistemi girdileri.....	51
Şekil 4.1 Çatı fotovoltaik sistem analiz sonuçları	56
Şekil 4.2 Çatı fotovoltaik sistemin aylara göre günlük güç çıkışı profili	56
Şekil 4.3 Çatı ve arazi fotovoltaik sistem analiz sonuçları.....	57
Şekil 4.4 Çatı ve arazi fotovoltaik sistemin aylara göre günlük güç çıkışı profili	57
Şekil 4.5 Rüzgâr türbini sisteminin analiz sonuçları	58
Şekil 4.6 Rüzgâr türbini sisteminin aylara göre günlük güç çıkışı profili.....	58
Şekil 4.7 Fakültenin aylara göre tüketim bilgileri	58
Şekil 4.8 Fakültenin 2,5 aylık %15 tasarruflu aylara göre tüketim bilgileri	59
Şekil 4.9 Fakültenin 2,5 aylık %15 ve 9,5 aylık %5 tasarruflu aylara göre tüketim bilgileri.....	59
Şekil 4.10 Senaryo 1 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri.....	60
Şekil 4.11 Senaryo 1 farklı depolama sistemlerine göre teknik veriler.....	60
Şekil 4.12 Senaryo 2 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri.....	64
Şekil 4.13 Senaryo 2 farklı depolama sistemlerine göre teknik veriler.....	64
Şekil 4.14 Senaryo 3 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri.....	68
Şekil 4.15 Vanadyum redoks akış bataryası teknik sonuçları	68
Şekil 4.16 Vanadyum redoks akış bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	69
Şekil 4.17 Vanadyum akış bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	69
Şekil 4.18 Katı hal bataryası teknik sonuçları	70
Şekil 4.19 Katı hal bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	70
Şekil 4.20 Katı hal bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	71
Şekil 4.21 Lityum demir fosfat batarya teknik sonuçları	72
Şekil 4.22 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	72
Şekil 4.23 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin ekonomik sonuçları.....	73
Şekil 4.24 Lityum nikel kobalt manganez batarya teknik sonuçları.....	73
Şekil 4.25 Lityum nikel kobalt manganez bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları.....	74
Şekil 4.26 Lityum nikel kobalt manganez bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	74
Şekil 4.27 Sodyum sülfür batarya teknik sonuçları	75
Şekil 4.28 Sodyum sülfür bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları.....	75
Şekil 4.29 Sodyum sülfür bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	76

Şekil 4.30 Süper kapasitör teknik sonuçları	77
Şekil 4.31 Süper kapasitörlü sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	77
Şekil 4.32 Süper kapasitörlü sistemin ekonomik sonuçları	78
Şekil 4.33 Kurşun asit (jel) batarya teknik sonuçları.....	78
Şekil 4.34 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	79
Şekil 4.35 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	79
Şekil 4.36 Senaryo 4 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri.....	82
Şekil 4.37 Vanadyum redoks akış bataryası teknik sonuçları	82
Şekil 4.38 Vanadyum redoks akış bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	83
Şekil 4.39 Vanadyum akış bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	83
Şekil 4.40 Katı hal bataryası teknik sonuçları	84
Şekil 4.41 Katı hal bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	84
Şekil 4.42 Katı hal bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	85
Şekil 4.43 Lityum demir fosfat batarya teknik sonuçları	86
Şekil 4.44 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	86
Şekil 4.45 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin ekonomik sonuçları.....	87
Şekil 4.46 Lityum nikel kobalt manganez batarya teknik sonuçları.....	87
Şekil 4.47 Lityum nikel kobalt manganez bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları.....	88
Şekil 4.48 Lityum nikel kobalt manganez bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	88
Şekil 4.49 Sodyum sülfür batarya teknik sonuçları	89
Şekil 4.50 Sodyum sülfür bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları.....	89
Şekil 4.51 Sodyum sülfür bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	90
Şekil 4.52 Süper kapasitör teknik sonuçları	91
Şekil 4.53 Süper kapasitörlü sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	91
Şekil 4.54 Süper kapasitörlü sistemin ekonomik sonuçları	92
Şekil 4.55 Kurşun asit (jel) batarya teknik sonuçları.....	92
Şekil 4.56 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları	93
Şekil 4.57 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin ekonomik sonuçları	93

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Mikro şebeke bileşenleri	16
Tablo 2.2 Rüzgâr türbini aksamaları.....	18
Tablo 3.1 Proje karakteristikleri.....	29
Tablo 3.2 Tüketim verileri	30
Tablo 3.3 FV panel teknik özellikleri	31
Tablo 3.4 Finansal parametreler.....	34
Tablo 3.5 Rüzgâr türbini teknik özellikleri	37
Tablo 3.6 Vanadyum redoks batarya teknik özellikleri	41
Tablo 3.7 Katı hal batarya teknik özellikleri.....	42
Tablo 3.8 LiFePO ₄ batarya teknik özellikleri.....	43
Tablo 3.9 Li-NCM batarya teknik özellikleri	44
Tablo 3.10 NaS batarya teknik özellikleri.....	45
Tablo 3.11 Süperkapasitör teknik özellikleri	46
Tablo 3.12 Kurşun asit (jel) batarya teknik özellikler.....	47
Tablo 4.1 Şebeke tüketim tarife ve şebekeye satış fiyatları	55
Tablo 4.2 Senaryo 1 için farklı depolama modellerine göre ekonomik sonuçlar .	61
Tablo 4.3 Senaryo 1 için farklı depolama modellerine göre gelir ve gider durumu	62
Tablo 4.4 Senaryo 1 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı	63
Tablo 4.5 Senaryo 2 için farklı depolama modellerine göre ekonomik sonuçlar .	65
Tablo 4.6 Senaryo 2 için farklı depolama modellerine göre gelir ve gider durumu	66
Tablo 4.7 Senaryo 2 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı	67
Tablo 4.8 Senaryo 3 için farklı depolama modellerine göre gelir ve gider durumu	80
Tablo 4.9 Senaryo 3 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı	81
Tablo 4.10 Senaryo 4 için farklı depolama modellerine göre gelir ve gider durumu	94
Tablo 4.11 Senaryo 4 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı	95

Şebekeden Bağımsız Bir Mikro Şebekenin Gelişmiş Farklı Enerji Depolama Sistemleri Kullanılarak Modellenmesi ve Tekno-Ekonomik Analizleri: Yıldız Teknik Üniversitesi Örneği

Faruk KÜÇÜKKARA

Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı

Enerji Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Aslan İNAN

Günümüzde, artan nüfus, kentleşme, sanayileşmenin büyümesi, teknolojinin gelişimi ve iklimsel değişiklikler enerjiye olan talebi artırmaktadır. Enerji talebinin artışıyla enerji üretiminde önemli paya sahip fosil yakıt tüketimi de artmakta ve doğaya daha fazla sera gazları salınmaktadır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı teşvik edilerek yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler oluşturulmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımıyla şebekeden bağımsız güç sistemleri kurulumu artmakta ve Net Sıfır hedefi doğrultusunda önemli adımlar atılmaktadır. Bu tezde, Net Sıfır kampüs olma kapsamında enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliğine katkı amaçlanmaktadır. Çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, Elektrik-Elektronik Fakültesine ait gerçek bir yıllık enerji tüketim verileri, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve gelişmiş farklı enerji depolama

sistemleri entegrasyonlarıyla farklı senaryolarda oluşturulan şebekeden bağımsız güç sistemlerinin kurulumu ve işletilmesi üzerine bir araştırma sunulmuştur. Çalışmada, sisteme gelişmiş farklı enerji depolama sistemleri de dahil edilerek teknik ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımda yöntem olarak öncelikle saha incelemeleri yapılarak sistemin en etkin kaynağı olan güneş enerjisi sisteminin PV-SOL premium yazılımı ile optimum kurulu güç ve üretim hedefiyle tasarımı yapılmıştır. Daha sonra elde edilen veriler Homer Pro mikro şebeke yazılımına aktarılarak güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve depolama sistemlerinden oluşan şebekeden bağımsız güç sisteminin tasarımı yapılmış teknik ve ekonomik analizleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sistemlerin sermaye maliyeti, net bugünkü maliyeti, birim enerji kapasite maliyeti, seviyelendirilmiş enerji maliyeti, basit geri ödeme süresi ve iç karlılık oranları açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca sistemlerin daha ekonomik olabilmesi için önerilerde bulunularak enerji depolama sistemlerinin önemine değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Net Sıfır, Mikro şebeke, Güneş Enerjisi, Rüzgâr Enerjisi, Gelişmiş Enerji Depolama Sistemleri.

Modeling and Techno-Economic Analysis of Micro-Grid Grid-Independent Using Different Advanced Energy Storage Systems: Yıldız Technical University Case

Faruk KÜÇÜKKARA

Department of Energy Technologies

Master of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aslan İNAN

Today, increasing population, urbanization, growth of industrialization, development of technology and climatic changes increase the demand for energy. With the increase in energy demand, fossil fuel consumption, which has a significant share in energy production, also increases and more greenhouse gases are released into nature. Therefore, the use of renewable energy sources should be encouraged and innovative and sustainable solutions should be created. With the use of renewable energy sources, the installation of off-grid power systems is increasing and important steps are being taken towards the Net Zero target. In this thesis, it is aimed to contribute to environmental sustainability and energy efficiency by using renewable energy sources in energy production within the scope of becoming a Net Zero campus. In the study, a research is presented on the installation and operation of grid-independent power systems created in different scenarios with the integration of wind energy, solar energy and advanced different energy storage systems, real annual energy consumption data of Yıldız Technical University, Davutpaşa Campus, Faculty of Electrical and Electronics. In the study, technical and economic analyzes were carried out by including advanced different

energy storage systems in the system. As a method in design, firstly field studies were conducted and the design of the solar energy system, which is the most effective source of the system, was made with the PV-SOL premium software with the target of optimum installed power and production. Then, the obtained data was transferred to the Homer Pro microgrid software and the design of the grid-independent power system consisting of solar panels, wind turbines and storage systems was made and technical and economic analyses were examined. According to the results obtained, the capital cost, net present cost, unit energy capacity cost, levelized energy cost, simple payback period and internal profitability rates of the systems were compared. In addition, suggestions were made for the systems to be more economical and the importance of energy storage systems was mentioned.

Keywords: Net Zero, Microgrid, Solar Energy, Wind Energy, Advanced Energy Storage Systems.

Günümüz dünyasında, artan nüfus, gelişen teknoloji, kentleşme, iklim değişiklikleri gibi birçok etkenle enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Enerji talebindeki artışla enerji üretimde ciddi paya sahip fosil yakıtlara daha da bağımlı hale gelmekteyiz. Bunun sonucu doğamıza daha çok CO₂, SO₂ ve NO_x gibi fosil yakıt emisyonları salındığından sağlığımız ve doğamız büyük bir tehlikeyle karşı karşıya kalmaktadır [1]. Enerji Bakanlığının 2023 yılı verilerine göre Türkiye'nin elektrik üretiminde, en büyük payı kömür (%36,3) alırken, onu doğalgaz (%21,4), hidrolik (%19,6), rüzgâr (%10,4), güneş (%5,7), jeotermal (%3,4) ve diğer kaynaklar (%3,2) takip etmektedir. [2]. Bakanlık verilerine göre ülkemizde hala önemli oranda fosil yakıtlardan enerji üretimi sağlanmakta sağlığımız ve doğamız için büyük tehdit oluşturmaktadır. Bu durumda “Net sıfır” olma yolunda sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından önemli adımlar atılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımların artırılması, enerji verimliliğini artırmak için mevcut altyapının iyileştirilmesi, enerji tüketimindeki israfların önlenmesi ve fosil yakıtların kullanımının azaltılmasıyla çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir enerji sektörü oluşturulması hedeflenmelidir. Bu çabalar hem çevresel kaygıları azaltacak hem de enerji güvenliği ve ekonomik kalkınma açısından önemli faydalar sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında, “Net Sıfır” kampüs olma hedefi doğrultusunda şebekeden bağımsız güneş ve rüzgâr enerji kaynaklı hibrit güç sisteminde gelişmiş farklı depolama sistemleri de kullanılarak tekno-ekonomik analizleri yapılmıştır.

Tezin bölümleri ilgili bilgiler aşağıdaki gibidir.

Tezin 1. bölümünde özellikle şebekeden bağımsız mikro şebekeler hakkında literatür taraması yapılmış çalışmaların genel kapsamlarına değinilmiştir. Ayrıca tezin amacı ve katkısı hakkında da bilgi verilmiştir.

Tezin 2. bölümünde çalışmanın hedef doğrultusu olan net sıfır ve mikro şebeke bileşenleri ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve tasarımda kullanılan gelişmiş farklı depolama sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin 3. bölümünde izlenen yöntem açıklanarak mikro şebekenin tasarımı, gelişmiş farklı depolama sistemlerine göre modellenmesi, sistem girdileri ve açıklamaları yapılmıştır.

Tezin 4. bölümünde simülasyon sonuçları detaylı olarak verilerek sistemde teknik ve ekonomik analizleri sunulmuştur.

Tezin 5. bölümde ise genel olarak sistem için uygun olan sonuçlara değinilerek durumun daha iyi sonuçlar verebilmesi adına öneriler bulunulmuştur.

1.1 Literatür Taraması

Mikro şebekeler şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Buradaki temel amaç, yenilebilir enerji kaynaklarının da katkısıyla birlikte yerel enerji üretimini teşvik etmek, enerji verimliliğini artırmak, elektrik kesintilerini azaltmak, şebeke güvenliğini sağlamak ve karbon emisyonlarını azaltmaktır. Böylece genel anlamda hem ekonomik hem de çevresel katkılar sunabilecektir. Bu bağlamda yapılan uygulamalı ve akademik çalışmalar aşağıdaki özetlenmektedir. Boğaziçi Üniversitesi Kilyos Sarı tepe Kampüsü'nde BÜRES projesi kapsamında 1 MW'lık bir rüzgâr türbininin kurulduğu görülmektedir. Bu proje ile kampüsün yıllık enerji tüketiminin %40 fazlası üretilmekte, ayrıca yılda 900-ton karbon emisyonu azaltılması ve 1 milyon kWh enerji üretimi sağlanmaktadır. Böylece Sarı tepe kampüsü Yeşil Kampüs olma yolunda örnek teşkil edecek bir aşamayı tamamlamış ve karbon salınımı en aza indirerek, süreç içerisinde “Net Sıfır” bir kampüs haline gelme yolunda önemli adımlar atılmıştır [3].

Karabük Üniversitesinde de binaların çatı ve yan yüzeylerine monte edildiği 4 bin adet fotovoltaik güneş panelleri ile 1 MWe kurulu güçte kendi elektriğini üreterek hem ekonomik hem de çevresel açısından katkı sağlanmıştır. Üniversite bu projeyle “Yeşil kampüs” alanında sayılı üniversiteler arasında yer almıştır [4].

Uygulamalı çalışmaların yanı sıra akademik olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Susan Pierce vd. UCD Belfield kampüsü için yaptıkları çalışmalarında, kampüs üzerinde 3 MW'lık güneş fotovoltaik potansiyelini belirlemişler ve karbon emisyonlarında neredeyse %10'luk ek bir azalma sağladığını tespit etmişler. Böylece karbonsuzlaşma adına önemli bir adım atmışlardır [5].

Iqra Panhwar vd. Pakistan'da Mehram Üniveristesi Mehran Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi verilerini kullanarak Enerji talebini hesaplamak, sistem optimizasyonunu yapmak ve ekonomik uygunluğu değerlendirmek amaçlarıyla şebekeden bağımsız hem de şebekeye bağlı güç sistemleri tasarımları yapmışlar. Sonuçlar incelendiğinde PV, dönüştürücülü ve yedekleme sistemli şebekeden bağımsız sistemin, Pv ve dönüştürücülü şebeke bağlı sistemden daha maliyetli olduğu ama %100 yenilenebilir olduğundan daha çevresel olduğu sonucuna varmışlardır [6].

Timothy Araoye vd. Nijerya'nın Abuja Üniversitesi'nde güneş, rüzgâr, dizel ve pil (lityum iyon) yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik üretimi için Homer yazılımı ile hibrit mikro şebeke enerji sistemini modelleyerek optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yıllık ortalama 2355 kWh/gün güç tüketimi ve optimal yük talebi ise 313.40 kWp olan sistemin optimizasyon sonuçlarına göre; en düşük enerji maliyetli sistem olan PV/rüzgâr/dizel/dönüştürücü/pil hibrit sisteminin enerji maliyetini 0.1616 \$/kWh, işletme maliyetini 50592\$ ve net bugünkü maliyetini 1795026 \$ olarak bulmuşlardır. En yüksek enerji maliyetli sistem olan Dizel/rüzgâr/dönüştürücü/pil hibrit sistemin ise enerji maliyetini 0.4242 \$/kWh ve net bugünkü maliyetini 4710983 \$ olarak bulmuşlardır. Sistemde toplam üretilen elektrik enerjisi 1272778 kWh/yıl, PV tarafından üretilen elektrik enerjisi 1030485 kWh/yıl (%81), dizel jeneratör 93927 kWh/yıl (%7.38) ve rüzgâr enerjisi ise 148366 kWh/yıl (%11,7) olarak elde edilmiştir. Rüzgâr/dizel/dönüştürücü/pil hibrit sistemde yılda 557749 kg CO₂ üretildiği tespit edilmiş olup en çevreci sistem olan rüzgâr/PV/pil ve PV/pil hibrit sistemleri olduğu ancak dizel/rüzgâr/pil hibrit sisteminin yüksek emisyon oranına sahip olduğu görmüşlerdir. Ayrıca fotovoltaiik panellerden üretilen elektrik enerjisinin en fazla şubat ve haziran ayları arası olduğu tespit etmişlerdir. [7].

Zafer Öztürk vd. çalışmalarında, Gemlik ilçesinde yer alan günlük ortalama yük değeri 24037 kWh, yük eğrisinde maksimum yük tüketimi 2105.5 kW ve yük profil faktörü %48 olarak belirledikleri sanayi bölgesinin elektrik tüketiminin karşılanması için hibrit sisteminin modellenmesi gerçekleştirmişlerdir. Model de 50 m yüksekliğinde 660 kW'lık rüzgâr türbini, 500 kW'lık flat tipi PV paneli, 700 kW'lık konvertör, 2400 kW'lık dizel jeneratör ve 100kWh'lık lityum iyon batarya tercih etmişlerdir. Homer yazılımı kullanılarak modellenen hibrit sistem, şebeke

bağlantısının varlığı veya yokluğu durumlarına göre teknik ve ekonomik açılarından analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre; enerji maliyetini, şebekesiz sistemde 3.07\$, şebekeli sistemde 0.119\$ olarak bulmuşlardır. Bu sonuçlara göre sistemler arasında 25,9 kat oranında bir fark olduğu tespit etmişlerdir. Ayrıca 25 yıl sonundaki net bugünkü maliyet değeri; şebekesiz sistemde \$3.48B iken şebekeli sistemde \$135M olarak bulmuşlardır. Bu çalışmanın sonucunda, ekonomik açısından şebekeli sistemlerin şebekesiz sistemlere göre daha avantajlı olduğunu görmüşlerdir [8].

Michail Katsivelakis vd. şebeke genişletmenin zor olduğu adalar ve topluluklar gibi uzak bölgelerde elektrik tedariki için Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri tasarlamışlardır. Bu çalışmayı farklı senaryolarda Donoussa adasında bir hibrit sistemin teknik-ekonomik uygunluğunu ve gerçekleştirilebilirliğini incelemek amacıyla yapmışlardır. Çalışmada HOMER Pro yazılımı kullanılarak, farklı oranlara sahip üç senaryo (senaryo 1; Rüzgâr türbinleri, PV güneş panelleri ve beş dizel jeneratör ünitesi, senaryo 2; üç dizel ünite, rüzgâr türbinleri, PV güneş panelleri ve batarya, senaryo 3; Rüzgâr türbinleri, PV güneş panelleri ve batarya (2 farklı otonomi süresine göre)) için teknik-ekonomik bir analiz yapılmış ve farklı sistem konfigürasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Her senaryonun uygun konfigürasyonları arasından en düşük net bugünkü maliyet, minimum aşırı elektrik yüzdesi ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti baz alınarak yapılmış olup sonuçlara göre aşırı elektriği olmayan, net bugünkü maliyeti 4031102.03€ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0.2401€ olan Senaryo 2 önerilen hibrit sistem sistemi seçmişlerdir [9].

Abdullahi Abubakar Mas'ud vd. fosil yakıtlara çok bağımlı olan Suudi Arabistan'ın Al-Jouf bölgesinde uzak bir konum için Homer yazılımında PV/rüzgâr/dizel/batarya sistemi tasarlamışlardır. Çalışmada yakıt fiyatındaki artış, PV bozulması, tüketici yükündeki artış ve batarya bozulması gibi çok yıllık ve gelişmiş batarya depolama parametrelerinin etkisi dikkate alınmışlardır. Ayrıca, Al-Jouf'ta yaz mevsiminde yaşanan yüksek sıcaklıklar nedeniyle, çalışmada da ambiyans sıcaklığının sistemin performansı üzerindeki duyarlılığı araştırılmış sonuçlara göre çok yıllık giriş ve batarya bozulma parametrelerinin projenin 25 yıllık ömrü boyunca sistem çıkışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görmüşlerdir. Teknik sonuçlarda ise PV üretimi %11,3 azalmış, dizel üretimi ise %38 artarak yakıt tüketimini ve CO₂

emisysonunu artırmıştır. Sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyeti ve net bugünkü maliyeti değerleri sırasıyla 0.204\$ ve 206919\$ olarak bulmuşlardır. Duyarlılık analizine göre, ambiyans sıcaklığının batarya performansı ve PV güç üretimi üzerinde önemli bir etkisi bulunduğu tespit etmişlerdir. [10].

Wesly Jean vd. HOMER aracılığıyla Haiti'deki uzak bir toplulukta güneş ve rüzgâr kaynaklarından faydalanarak bir hibrit enerji sisteminin teknik ve ekonomik uygunluğunu değerlendirmeyi önermiştir. Birçok konfigürasyon analiz edilmiş ve en uygun olan sistemin net bugünkü maliyeti 389647\$ enerji maliyeti 0,497\$/kWh olduğunu görmüşlerdir. Konfigürasyonda yılda 82124 kWh enerji üretimi olduğu, karşılanamayan yükün olmadığı, %9,6 fazla elektriğe sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca gelecekteki yük artışı için sistemin performansı ve teknik uygunluğunu gösteren bir duyarlılık analizi yapmışlardır [11].

Makbul A.M. Ramli vd. Suudi Arabistan'ın batı sahil bölgesindeki yapmış oldukları çalışmada hibrit rüzgâr/güneş enerjisi sisteminin potansiyelinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada hem rüzgâr türbini hem de fotovoltaik panel tarafından üretilen enerji ve enerji maliyetine vurgu yapılmış olup karşılanmayan elektrik yükü ve fazla elektrik dikkate alınmıştır. Çalışmada teknik ve ekonomik analizleri gerçekleştirmek için Matlab ve Homer yazılımları kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, rüzgâr türbini ve PV dizisi aynı boyutta kullanıldığında, PV dizisinin daha fazla elektrik ürettiğini tespit etmişlerdir. Mali açıdan; rüzgâr enerjisinin kWh başına maliyeti \$0.149 olup güneş enerjisinin kWh başına maliyeti \$0.0637 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu rüzgâr/güneş hibrit sistem konfigürasyonunda, 4560 kWh nominal kapasiteye sahip bir batarya kullanmışlardır. Farklı batarya boyutları açısından da değerlendirildiğinde fazla elektriğin, karşılanamayan elektrik yükün az çok az oranda düştüğü fakat daha yüksek net bugünkü maliyete ve enerji maliyetine neden olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Papia Ray vd. Homer Pro yazılımı ile 5 senaryolu (senaryo 1 güneş enerjisi (2 farklı kapasiteli) ile batarya (kurşun-asit) enerji depolama, senaryo 2 güneş enerjisi ile pompalı hidro enerji depolama, senaryo 3 güneş enerjisi ile hidrojen güç sistemi, senaryo 4 hibrit güneş enerjisi ve rüzgâr türbini ile batarya (kurşun-asit) enerji depolama ve senaryo 5 hibrit güneş enerjisi ve rüzgâr türbini ile pompalı hidro enerji depolama) tamamen yenilenebilir enerji tarafından desteklenen bağımsız

mikro şebeke sistemleri için teknik ve ekonomik analiz yapmışlardır. Her senaryo, konfigürasyonuna göre 1 kW nominal kapasiteli güneş PV ve 1,5 kW nominal kapasiteli rüzgâr türbinine sahip olup depolama için; 1 kWh kurşun asitli piller, 245 kWh pompalı hidro enerji depolama ve hidrojen enerjisi kullanmışlardır. Yıllık zirve yükü 88.22 kW ve günlük ortalama talep 800 kWh olan bir yük profiline sahip olan mikro şebeke de yakıt fiyatı ve kubbe yüksekliği gibi belirsizliklere karşı tasarımın direncini belirlemek için bir hassasiyet analizi yapmışlardır. Sistemin çalıştırılmasının ardında simülasyon sonuçları göre, senaryo 5 olan Pompalı Hidro Enerji Depolama tabanlı bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin en düşük net bugünkü maliyeti 272422.25\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti de 0.065\$ olduğu görmüşlerdir. Ayrıca karbon emisyonları açısından değerlendirildiğinde en çevre dostu tasarım senaryo 3 olan güneş enerjisi ile hidrojen güç sistemli tasarım olduğu sonucuna varmışlardır [13].

Rifki Arif vd. Endonezya'nın 3 farklı şehrinde Homer yazılımı ile Hidro enerji, güneş enerjisi, biyogaz enerjisi, rüzgâr enerjisi, batarya ve konverter kullanarak 8 farklı kombinasyonda mikro şebeke vaka çalışması tasarlamışlardır. Tasarımda kullanılan yük verisi günlük 10.50 kWh veya yılda 3,832.50 kWh ev yükü olduğunu varsayarak yapılmış olup kontrolör olarak Homer yazılımının yük takibi stratejisi kullanarak analizler yapılmıştır. Alembang, Pagar Alam ve Lubuk Linggau şehirleri için yapılan Analiz sonuçlarına göre; etkili ve verimli bir enerji üretim sisteminin kombinasyonunun Pagar Alam Şehri'nde Hidro/Güneş/Pil/Dönüştürücü olduğu ve yıllık 48809 kWh enerji üretimi sağlandığı sonucuna varmışlardır. Sonuçlara göre güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji üretimine sahip olan Hidro/Pil/Dönüştürücü sistemini elde etmişlerdir. Net Bugünkü Maliyet ve en yüksek karbon emisyonları, diğer yenilenebilir enerji santralleriyle karşılaştırıldığında, dizel enerji santrallerinde bulunduğunu tespit etmişlerdir [14].

Hazim moria çalışmasında, Suudi Arabistan'da şehir merkezinden uzaktaki otoyol mescitlerinde güneş ve rüzgâr hibrit sisteminin benimseyen mikro şebeke tasarlamıştır. Ortalama enerji tüketiminin 33,27 kWh/gün ve pik yükün 5,3 kW olduğu tasarımda, mescit için en ekonomik ve çevresel açıdan en uygun güç kaynağının 10 kW fotovoltaiik panel, 6 kW MPPT, 5.1 kW'lık rüzgâr türbini, sekiz pil ünitesi ve 5.44 kW dönüştürücülerin bir hibritinin kurulmasıyla elde edilebileceği sonucuna varmıştır. Optimum yapılandırmada net bugünkü maliyeti

35449.35\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyetini ise 0.226\$ olarak bulmuştur. Sistemin başlangıç sermayesi olan 28932 \$ olması %100 yenilenebilir bir sistem olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir. İlave olarak tasarımının, her uzak mescit konfigürasyonundaki tüm yenilenebilir kaynakların enerji verimliliğini teşvik ettiğini ve fosil yakıtlara alternatifler sunarak sera gazı emisyonlarını ortadan kaldırdığını göstermiştir [15].

Belboul Zakaria vd. çalışmalarında, Cezayir'in Djelfa şehrindeki on beş konut birimine enerji talebini karşılamak üzere fotovoltaiik paneller, rüzgâr türbinleri, batarya, dizel jeneratörler ve inverterlerden oluşan bir şebekeden bağımsız mikro şebekenin optimizasyonuna odaklanmışlardır. Çalışmada Hibrit mikroşebeke sistemleri optimizasyonu için meta-sezgisel algoritmalarından biri olan çok amaçlı salp sürü algoritması önerilmiş olup önerilen çok amaçlı optimizasyon problemi, enerji maliyetini ve güç kaybı olasılığın amaç fonksiyonları olarak dikkate almışlardır. Tasarımda dikkate alınan noktalar olan fotovoltaiiklerin nominal gücünü, rüzgâr türbinlerinin sayısını ve pil otonomi günlerinin sayısı olmak üzere üç tasarım değişkenini belirlemek için uygulamışlardır. Ayrıca Matlab yazılımında yapılan bu optimizasyonlar ile Çok amaçlı salp sürü algoritması algoritmasının etkinliği göstermek amacıyla çok amaçlı yusuçuk algoritması, çok amaçlı çekirge optimizasyon algoritması ve çok amaçlı karınca aslanı optimizeri ile karşılaştırmışlardır. Simülasyon sonuçları, çok amaçlı salp sürü algoritmasının enerji maliyeti için 0.255 USD/kWh ve güç kaybı olasılığı için %27,079 katkı sağladığını doğrulamışlardır. Ayrıca, önerilen yöntem kullanılarak elde edilen optimizasyon sonuçlarının, hibrit mikro şebeke için bir dizi tasarım çözümü sağladığını görmüşlerdir [16].

Rawit Khamharnphol vd. çalışmalarında Tayland'da Koh Samui adasında bir dağıtım sistemi besleyicisi için 10 MW'lık güneş/rüzgâr/dizel enerji üretimli ve batarya enerji depolama sistemli optimizasyonu sunmuşlardır. Tasarım pv paneller, rüzgâr türbini, dizel jeneratör, iki yönlü şebeke bağlı şarj inverteri ve bataryalı enerji depolama sisteminden oluşup yenilenebilir enerji tabanlı enerji üretiminin maksimize edilmesi ve seviyelendirilmiş enerji maliyetinin minimize edilmesi amacıyla Homer Pro kullanılarak 3 senaryo olarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre en uygun senaryo olan güneş/rüzgâr/dizel/batarya/dönüştürücülü sistemde net bugünkü maliyeti 438M\$, seviyelendirilmiş enerji maliyetini

0.20\$/kWh ve yenilenebilir oranı %89,4 olarak bulmuşlardır. Ayrıca, hassasiyet analizinde Senaryo 3'ün en yüksek yıllık enerji üretimi olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmanın genel olarak Koh Samui adasının Yeşil Ada konseptinin geliştirilmesi için bölgesel enerji uygulayıcılarına ve politika yapıcılara mikro şebeke dayalı sistemlerin en uygun konfigürasyonları konusunda yardımcı olacağını düşünmüşlerdir [17].

Subhash Yadav vd. çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizliklerinden dolayı enerji depolama sistemleri kullanımına dikkat çekerek enerji depolama sistemlerinin enerji yönetimi tekniklerindeki eksiklikler, fazla enerji ya da güvenilirlik sorunları nedenlerden dolayı birden fazla depolama sistemi içeren hibrit yenilenebilir enerji sistemi önermişlerdir. Tasarımda fotovoltaiik panel, rüzgâr türbini, yakıt hücresi, elektrolizör, hidrojen depolama sistemi ve batarya enerji depolama sistemi içeren mikro şebekeleri Homer Pro yazılımını kullanarak üç farklı senaryoda tekno-ekonomik analizlerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre fotovoltaiik panel, rüzgâr türbini, yakıt hücresi, elektrolizör, hidrojen depolama, batarya enerji depolama ve dönüştürücü içeren sistemin %0 ve %1 kapasite eksikliğine göre net bugünkü maliyetlerini 838832\$ ve 679605\$, seviyelendirilmiş enerji maliyetlerini ise 0.232 \$/kWh ve 0.189 \$/kWh olarak bulmuşlardır. Ayrıca, aynı kapasite eksikliğinde fazla enerji ve karşılanmamış yükler de en düşük seviyede olduğu sonucuna varmışlardır [18].

Narges Ghorbani vd. çalışmada, İran'ın Tahran şehrindeki bir off-grid ev için fazladan üretilen elektriği depolamak için bir batarya depolaması ile birlikte hibrit bir PV-Rüzgâr Türbini üretim ünitesi tasarlamışlardır. Tasarımda yük profili, güneş ışınlamı ve rüzgâr hızı verilerinin Homer tarafından bir yıl boyunca 8760 saatlik bir simülasyonla modellenmesiyle gerçekleştirilmiş olup GA-PSO ve MOPSO yöntemlerini, sistem boyutlandırmasını sistem güvenilirliğini maksimize etmek ve toplam mevcut maliyeti minimize etmek için kullanmışlardır. Simülasyon üç farklı senaryoda uygulanarak (PV paneli ve batarya sistemi, rüzgâr türbini ve batarya sistemi ve PV paneli-rüzgâr türbini ile batarya sistemi) GA-PSO optimizasyonunda, güvenilirlik faktörü olarak LPSP düşünülüp ve kapasite eksikliği için 5.6 \$/kWh ceza faktörü belirlemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, maksimum LPSP'nin %2 olduğu durumda PV paneli, batarya sistemi, rüzgâr türbini içeren sisteminin net bugünkü maliyetini 787193\$ olarak bulmuşlardır. Ayrıca MOPSO ile, maliyet ve

güvenilirlik aynı anda optimize edilmiş ve üç sistem için üç Pareto önü elde etmişlerdir. Ve bu karşılaştırma sonuçlarına göre, önerilen yaklaşımın 0.508\$ seviyelendirilmiş enerji maliyetli olduğunu, %7 ile %10 arasında bir sapma gösterdiğini ortaya koymuşlardır [19].

Adiza Azahra vd. çalışmalarında Endonezyada sadece dizel jeneratörlerle enerji sağlanan adalar bölgesinde yer alan konum için dizel/pv/batarya kombinasyonu önermişlerdir. Ayrıca bu sistem için hem yük takibi hem de şarj döngüsü stratejisini uygulayarak karşılaştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre 14572 kW PV, 14562 kW dizel, 7964 kW pil ve 7282 kW dönüştürücüden oluşan ve CC stratejisi ile en uygun çözüm olduğunu sistemin net bugünkü maliyetini 126349125.32\$ ve enerji maliyetini 0.135\$ olarak bulmuşlardır. LF'nin maliyetinin daha fazla olmasının sebebi daha yüksek RES penetrasyonunda kaynaklı olduğu tespitini yapmışlardır. Ayrıca duyarlılık analizi de yaparak, sistem performansı üzerinde batarya şarj durumu ve dizel yakıt fiyatı gibi bazı parametrelerin önemini göstermişlerdir [20].

Shezan Arefin vd. çalışmada Bangladeş'in Dhaka ve Khulna bölgelerindeki iki konum için rüzgâr türbinleri, depolama sistemi, güneş panelleri ve dizel jeneratörleri içeren hibrid off-grid yenilenebilir enerji sistemleri tasarlamış olup tasarımda beş sevk stratejisini (yük takibi, döngü şarjı, kombine dağıtım, Homer tahmini dağıtım ve jeneratör sırası) dikkate alan iki off-grid hibrit yenilenebilir enerji sistemini optimize ederek değerlendirmişlerdir. Simülasyondaki amaçlarının tasarlanmış hibrit yenilenebilir enerji sistemi için en iyi gönderim tekniğinin, seviyelendirilmiş enerji maliyetini, CO₂ deşarjını, net bugünkü maliyetini ve hibrit yenilenebilir enerji sistemi frekansını ve gerilim istikrarını en aza indirmek olduğunu göstermişlerdir. Simulasyon sonuçlarında en iyi stratejinin yük takip stratejisi olduğu tespit edilerek net bugünkü maliyeti 156181\$, seviyelendirilmiş enerji maliyetini 0,213 \$/kWh ve CO₂ deşarjı 4,863 kg/yıl olarak bulmuşlardır. Önerilen hibrit yenilenebilir enerji sisteminde, teknik-ekonomik geçerlilik (optimal boyutlandırma ve maliyetlendirme) ve sistem istikrarını (frekans ve gerilim istikrarı) sağlayarak Dhaka ve Khulna'nın istenilen konumları için kesintisiz elektrik tedarikini sağlamış olduğu izole ve off-grid konumlar için uygun olacağı sonucuna varmışlardır [21].

Fakher Oueslat yirmi farklı Fransız şehrinde kurulan hidrojen dolum istasyonlarında geleneksel enerji üretim yöntemleri yerine yenilenebilir enerjinin kullanımını teşvik etmek amacıyla gerçekleştirdiği Hidrojen Yakıt İstasyonları tasarımını önermiştir. Çalışmada, hidrojen yakıt ikmal istasyonları modelinin, günlük olarak yeşil hidrojenle beslenen 25 aracın hidrojen yakıtını sağlamasını beklemiştir. Bu amaçla, 60 kombinasyona yol açan üç senaryo (senaryo 1 PV-Rüzgâr-Batarya, senaryo 2 Rüzgâr-Batarya, senaryo 3 PV-Batarya) incelenmiştir. Simülasyonlar Homer yazılımında gerçekleştirilerek 20 şehir için ortalama net bugünkü maliyeti 1038117\$, seviyelendirilmiş enerji maliyetini 0,41665/kWh ve hidrojen birim maliyeti 15,835\$/kg bularak senaryo 3' ün (PV-Batarya) en uygun senaryo olduğu sonucuna varmıştır. Çevresel katkılar açısından, önerilen Hidrojen Yakıt İstasyonları modeli yılda yaklaşık olarak 83 ton CO₂ azaltımı sağlamakta ve yirmi şehir yıllık 259 ton benzinin yerine geçebilecek toplam miktar fayda sağlayacağı sonucuna varmışlardır [22].

Md. Fatin Ishraque vd. çalışmalarında Mymensingh, Rangpur, Rajshahi ve Sylhet gibi Kuzey Bangladeş'in dört bölgesi için fotovoltaik panel, rüzgâr türbini, batarya depolama, dizel jeneratör ve 27.31 kW yükü içeren mikro şebeke tasarımının yanı sıra beş farklı dağıtım stratejisini (Yük Takibi, Döngü Şarjı, Jeneratör Sırası, Kombine Dağıtım ve HOMER tahmin edici dağıtım stratejisi) Homer yazılımında uygulayarak optimizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Önerilen mikro şebekelerde, Net Bugünkü Maliyetini, CO₂ emisyonunu ve seviyelendirilmiş enerji maliyetini azaltmak için gerçekleştirilen optimizasyonda Homer Pro yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerle elde edilen stratejiler ardından mikro şebekelerin güç sistemine verdiği yanıtları ve uygunluk analizini MATLAB Simulink'te gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, Yük takibinin 149794\$ ile en düşük net bugünkü maliyetine, 0,204 USD/kWh seviyelendirilmiş enerji maliyetine, 3698\$ işletme maliyeti ve yıllık 3298 kg CO₂ emisyonu ile en iyi dağıtım stratejisi olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışmanın mobil kule işletimi, sulama, off-grid alanlarda bulunan hastane/okullar gibi herhangi bir merkezi olmayan uygulama için de geçerli olabileceğini belirtmişlerdir [23].

MD Nurunnabi vd. çalışmada, Bangladeş'in Kuakata, Sitakunda, Magnama, Dinajpur ve Rangpur gibi farklı bölgelerinde rüzgâr ve güneş enerjisinin potansiyelini araştırarak yenilenebilir enerji tabanlı off-grid ve grid-bağımlı

mikro şebekelerin olası olduğunu gösteren bir fizibilite ve duyarlılık analizi sunmuşlardır. Rüzgâr hızı ve güneş ışınımını izlemek için yapay sinir ağı algoritması kullanarak verilerin tahminlerinin güvenilir olup olmadığına karar vermek amacıyla yapılan analizlerde tahminleri güvenilir olduğu sonucuna varmışlardır. Elde edilen verilere ve konumlara göre 4 farklı model senaryosu (Fotovoltaik-Şebeke, Rüzgâr-Şebeke, Rüzgâr-Fotovoltaik-Şebeke ve şebekeden bağımsız hibrit) HOMER Pro yazılımı kullanarak tasarlamışlardır. Elde edilen sonuçlarda özellikle net bugünkü maliyetini, enerji maliyetini, yenilenebilir enerji fraksiyonunu, yerel yük talebini, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliğini, sistem ekonomisini ve sera gazı emisyonlarını dikkate almışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, Fotovoltaik-Şebeke ve Rüzgâr-Şebeke senaryolarının maliyet açısından en uygulanabilir senaryolar olduğu, çevresel açıdan da şebekeden bağımsız sistemin en kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışma ile Bangladeş'in kırsal bölgelerinde yaşayan insanlara düşük maliyetli elektrik sağlamaya katkı ile birlikte çevresel ve sosyal faydalar getireceğini görmüşlerdir [24].

Bahtiyar Dursun vd. çalışmalarında Kırklareli Üniversitesi Merkez Kütüphanesi'nin elektrik yükü gereksinimlerini karşılamak için hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin teknik-ekonomik analizini sunmuşlardır. HOMER yazılımında yapılan analizde şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı hibrit yenilenebilir enerji sistemini (Şebeke/fotovoltaik/batarya, rüzgâr/batarya ve fotovoltaik/rüzgâr/batarya vb.) farklı kombinasyonlarında analizler yaparak özellikle toplam net bugünkü maliyetini ve enerji maliyetini göz önünde bulundurmuşlardır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre en düşük toplam net bugünkü maliyete sahip bağımsız hibrit sistemlerin en uygun sistem konfigürasyonunun 40 kW fotovoltaik dizi, 10 kW Rüzgâr türbini, 20 kW güç dönüştürücü ve 72 bataryadan oluştuğunu belirleyerek toplam net bugünkü maliyetini ve enerji maliyetini sırasıyla 228330 \$ ve 0.334 \$/kWh olduğu sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde, en düşük toplam net bugünkü maliyete sahip şebeke bağlantılı hibrit sistemlerde en uygun sistem konfigürasyonunun 30 kW Rüzgâr türbini, 100 kW şebeke olduğu belirlenmiş ve toplam net bugünkü maliyetini 137979\$ ve enerji maliyetini 0.185 \$/kWh olduğu sonucuna varmışlardır. Bu konfigürasyonlar enerji maliyeti ve toplam net bugünkü maliyet açısından karşılaştırıldığında, şebeke bağlantılı hibrit sistemlerin bağımsız

hibrit sistemlerden daha ekonomik olarak görülmekte olup çevresel etkiler (CO_2 , CO NO_x ve karbon vergisi vb.) açısında bağımsız hibrit sistemin daha uygun olduğunu görmüşlerdir [25].

Riad Chedid vd. çalışmalarında şebeke kesintileri sık yaşayan ve dizel jeneratörlere bağımlılık gösteren bir üniversite kampüsü mikro şebekesinin güç tedarik sisteminin yeniden tasarımını açıklamışlardır. Önerilen optimizasyon tekniği, güneş panelleri ve pil depolama sistemi kapasitelerinin en ideal boyutlarını belirlemek ve fotovoltaiik/batarya enerji depolama/dizel jeneratör/şebeke sistemi içinde enerji akışını en iyi şekilde yönetmek için genetik algoritma ve dinamik programlama yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Belirli koşullara bağılı olarak optimal güç akışı analizi çalıştırıldığında, eklenen optimal fotovoltaiik ve batarya enerji depolama kapasitelerinin, dizel jeneratörleri neredeyse tamamen ortadan kaldırdığını ve orijinal sistemde beklenenin sadece %3,5' ini 10 yıllık bir dönem boyunca kullandığını tespit etmişlerdir. Önerilen fotovoltaiik ve batarya enerji depolama sisteminin, ortalama yıllık 1.336 m \$ tasarruf sağladığı, birinci yılda sistemin genel enerji maliyetini 0.137\$/kWh' den 0.088 \$/kWh' e ve onuncu yılda 0.144 \$/kWh 'den 0.10 \$/kWh' e düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Ayrıca fotovoltaiik ve batarya enerji depolama sisteminin tümü, 10 yıl boyunca banka kredisinden finanse edilmiş olmasına rağmen, geri ödeme süresinin 6 yıl olduğunu bulmuşlar ve hibrit fotovoltaiik ve batarya enerji depolama sisteminin güvenilirmez şebekelerde işletilen dizel jeneratörlere göre ekonomik olarak uygun olduğunu doğrulamışlardır [26].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, Elektrik-Elektronik Fakültesine ait gerçek bir yıllık enerji tüketim verileriyle desteklenen bir araştırmayı ele alır. Amacı, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda kampüsü "Net Sıfır" hedefine taşımak için rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve gelişmiş farklı enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunu içeren şebekeden bağımsız mikro şebeke sisteminin kurulumu ve işletilmesini incelemektir. Bu bağlamda mikro şebeke tasarımı, gerçek tüketim verileri, bileşen özellikleri ve maliyet analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve uygulanabilir bir sistem olarak hayata geçirilmiştir. Ayrıca, gelişmiş batarya sistemlerinin teknik ve

ekonomik analizleri yapılarak günümüz koşullarında en uygun batarya sisteminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Tezin Katkıları

Bu çalışma, günlük MWh tüketimi seviyesinde olan fakülte binasında rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve gelişmiş depolama sistemlerinin entegrasyonunu içeren şebekeden bağımsız mikro şebeke tasarımı yapılarak aynı şekilde MWh seviyesinde depolama birimi kurulmasının uygulanabilirliği yönünde önemli adımlar için öncülük etmiştir. Ayrıca ülkemizde kullanılmayan, dünyada örnekleri olan gelişmiş farklı depolama sistemlerinin de uygulanabilirlik açısından değerlendirilmesi yönünde tekno-ekonomik yaklaşımlar sunmaktadır. Burada kullanılan teknik ve mali veriler piyasa paydaşlarıyla yapılan ikili görüşmelerle alınmış olup çalışmanın gerçekliğini ortaya koymuştur.

2

NET SIFIR, MİKRO ŞEBEKE VE BİLEŞENLERİ

2.1 Net Sıfır

Net sıfır emisyon, en kötü iklim etkilerini önlemek amacıyla doğmuş olup atmosferdeki karbon dioksit (CO₂), metan ve diğer sera gazları azaltma ve bitirme amacını ifade eder [27]. Emisyonlarla ilgili dünyada ilk yapılan protokol ve sözleşmeleri incelediğimizde olayın başlangıcı ozon tabakasının incelten maddelerin azaltılması yönünde görüşlerle başlamıştır. Bu kapsamda 1985 yılında yapılan Viyana Sözleşmesi ozon tabakasını koruma üzerine ve 1987 yılında kabul edilen Montreal Protokolü ozon tabakasını incelten maddelere yönelik ilk somut adımlar olarak gösterilebilir [28]. Bu süreç 1994 de yapılan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde belirtilen sera gazı emisyonlarının azaltılması, araştırma ve teknoloji konularında iş birliği yapılması ve sera gazı yutaklarını korumaya teşvik etmeyle devam etmektedir. Ülkemizde bu sözleşmeye 2004 yılında katılmıştır [29]. Ardından 1997 de imzalanıp 2005 de yürürlüğe giren Kyoto Protokolü, sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan bir uluslararası anlaşmadır. Türkiye 2009 yılında protokole taraf olmuştur ancak sayısallaştırılmış emisyon azaltım garantisi bulunmamaktadır. Protokolün iki taahhüt dönemi vardır ve 2020' den sonra Paris Anlaşması ile iklim rejimini düzenleme görevini devretmiştir. [30]. Son olarak bu konularda yapılan ve geçerliliğini koruyan 2016 yılında kabul edilen Paris Anlaşması'dır. Paris anlaşması özellikle 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturmakla birlikte küresel ölçekte bütün ülkeler sera gazı emisyon azaltımı garantisini vermişlerdir. Anlaşmaya göre; insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının yol açtığı küresel ısınmayı uzun vadede sanayi devrimi öncesi seviyelere kıyasla 2 °C derecenin altında tutmayı amaçlamakta ve bu hedefe ulaşırken 1,5 °C derecelik bir artışı yakalamanın önemine vurgu yapmaktadır. Ülkemizde 22 Nisan 2016 tarihinde yapılan anlaşmayı imzalamıştır. Bu kapsamda ülkemizde de Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2030 yılına kadar emisyon azaltım oranının %41 olarak hedeflendiği ve 2030 yılı için yaklaşık 500 milyon ton emisyon azaltımı yapacağımızı açıklamıştır.

Ayrıca Cumhurbaşkanımız 2053 yılına net sıfır emisyon hedefini deklare etmiştir.[31]. Net sıfır emisyon uygulamalarına baktığımızda, Yenilenebilir enerji kaynaklarını teşvik etmek, enerji verimliliğini artırmak, sıfır emisyonlu taşıma sistemlerine geçiş sağlamak, karbon yakalama ve depolama teknolojilerini geliştirmek, ormanların korunması ve ağaçlandırma ve sera gazı emisyonlarını azaltan politikaları benimsemek, karbon dengeleme projelerine yatırım yapmak gibi birçok uygulama örnek olarak gösterilebilir [32].

2.2 Mikro şebeke ve Bileşenleri

Mikro şebeke, elektrik enerjisinin üretildiği, dağıtıldığı ve tüketildiği lokal bir elektrik şebekesidir. Yapısal olarak elektrik şebekesinden bağımsız olarak çalışabilir veya ana şebekeye bağlı olarak yedek güç sağlayabilir. Mikro şebekeler akım türüne alternatif, doğru ve hibrit olmak üzere üç ana gruba ayrılır [33]. Buradaki akım, kaynakların ürettiği akım türüne göre oluşan bara türüdür.

Mikro şebekelerin avantajları;

- Yerel ve yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı,
- Enerji yönetim sistemleri ve teknolojileri kullanabilme,
- Hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız çalışabilme,
- Karbon emisyonlarını azaltma,
- Depolama sistemlerinin kullanımı ve entegrasyonu,
- Enerji güvenliği ve esnekliği artırma,
- Elektrik kesintilerine karşı koruma sağlama,

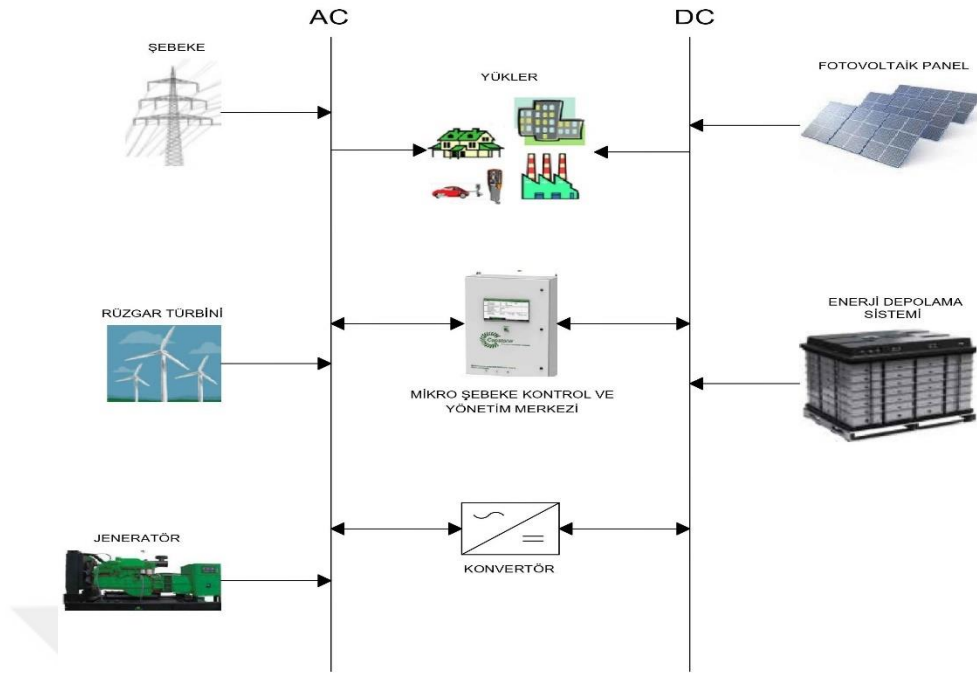
Mikro şebekelerin dezavantajları ve zorlukları ise;

- Hükümet politikaları, yönetmelik ve prosedürler,
- Hizmet ücretlendirme planları ve anlaşmaları,
- Finansman ve maliyetlerin yüksek olması,
- Enerji talebindeki dengesizliklerden etkilenme [34].

Mikro şebeke bileşenleri Tablo 2.1’ de, mikro şebeke konfigürasyon örneği ise Şekil 2.1’ de verilmiştir.

Tablo 2.1 Mikro şebeke bileşenleri [35]

Mikro şebeke bileşenleri	İçerikleri
Yükler	Farklı faktörlere göre yükler: Güç: AC ve DC yükleri. Doğrusallık: Doğrusal ve doğrusal olmayan yükler. Konum: Yerel ve ortak yükler. İşletme koşulları ve yük yönetim planları: Kritik, kritik olmayan.
Dağıtık enerji kaynakları	Rüzgâr türbinleri, FV paneller, mikro hidroelektrik santralleri, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, yakıt hücreleri, jeneratörler vb. kaynaklar ile enerji üretimi sağlanmaktadır.
Enerji depolama sistemleri	Elektrokimyasal (lityum iyon, kurşun-asit, NaS, Vanadyum redoks vb.), kimyasal (hidrojen), elektriksel (süperkapasitörler) vb. Fazlada üretimi depolayarak güç kaynağını yedekleme, yük dalgalanmalarını engelleme, mikro şebeke kararlılığını ve performansını artırmak için kullanılır.
Dönüştürücüler	AC/DC ve DC/AC dönüştürücüler yardımıyla akım türü, voltajı ve frekansı ayarlanabilir.
Kontrol sistemleri	Enerji yönetimi ve optimizasyonu, güç dengesi ve frekans kontrolü, uzaktan izleme ve acil durum yönetimi gibi otomasyon sistemleridir.



Şekil 2.1 Mikro şebeke konfigürasyon örneği

2.2.1 Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr enerjisi, doğada güneşin havayı ısıtması, ısınan havanın yükselmesine neden olur. Yükselen hava soğuyarak yoğunlaşır ve aşağı iner ve yüksek basınç bölgesi oluşturur. Oluşan basınç farkı ile hava yüksek basınçlı bölgelerden alçak basınçlı bölgelere doğru hareket ederek rüzgârı oluşturur.

Rüzgâr sahip olduğu kinetik enerji ile rüzgâr türbinlerinde yer alan mekanik bileşenlerde mekanik enerji oluşturur. Sağlanan mekanik enerjiye jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Herhangi bir sera gazı veya emisyonun olmadığı bu sistem temiz ve sürdürülebilir enerji açısından önemli bir kaynaktır. Rüzgâr türbinleri genel olarak dönme eksenlerine Şekil 2.2' a ve b de gösterildiği gibi yatay ve dikey olmak üzere iki çeşittir.



(a)



(b)

Şekil 2.2 a) Yatay eksenli rüzgâr türbini, **b)** Dikey eksenli rüzgâr türbini [36]

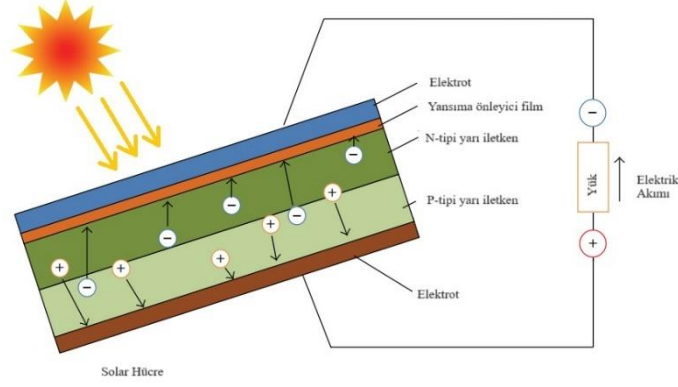
Ayrıca hem karada hem de denizde rüzgâr santralleri kurulabilir. Rüzgâr türbinlerinde yer alan ana aksam ve işlevleri Tablo 2.2’ de detaylandırılmıştır.

Tablo 2.2 Rüzgâr türbini aksamaları [37]

Aksam	İşlevi
Anemometre	Rüzgâr hızı ölçümü ve veri iletimi sağlar.
Kule	Türbini taşıyan bölüm.
Kanat	Rüzgârın esmesiyle rotorun dönüşünü sağlar.
Rotor	Rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bölüm.
Jeneratör	Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.
Kontrol ünitesi	Türbinlerin işleyişlerini yöneterek optimum şekilde çalışmasını sağlayan birimdir.

2.2.2 Fotovoltaik Paneller

Güneş, ısı ve ışık kaynağı olan bir yıldız olup bu özelliği ile dünyamız için vazgeçilmez enerji ve yaşam kaynağıdır. Solar hücreler ise güneşin sahip olduğu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmemizi sağlayan cihazlardır. Solar hücreler, çoğunlukla yarı iletkenlerden yapılmış olup, güneş enerjisini emer ve doğrudan elektrik akımına dönüştürür. Yarı iletken malzeme, güneşten yayılan fotonları yakalar ve emilen fotonlar bir elektron boşluk çifti oluştururlar. Bu milyarlarca elektron, pozitif yükler (p-tipi) ve negatif yüklerin (n-tipi) birleşimiyle oluşan elektriksel alan altında aynı yönde hareketi ile bir akım oluşturur. Bir dizi solar hücre bir fotovoltaik paneli oluşturur ve elektrik üretici olarak kullanılabilir. Şekil 2.3’ te solar hücrenin çalışma prensibi gösterilmiştir. Genel olarak kullanılan fotovoltaik malzemeler arasında monokristalin, polikristalin ve amorf silikon, kadmiyum tellür ve bakır indiyum/galyum selenid/sülfid bulunmaktadır. [38].



Şekil 2.3 Solar hücre çalışma yapısı ve çalışma prensibi

Solar hücreler ve fotovoltaik diziler her geçen gün daha da gelişmekte verimlerinin artırılması sağlanmaktadır. Panellerden enerji üretimi genellikle Şekil 2.4’ te de görüldüğü gibi yapılara (çatısına veya duvarlarına) veya zemine yerleştirilerek sağlanır. Bunun yanı sıra son zamanlarda yüzer güneş enerji santralleri de yaygınlaşmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.4 a) Çatı GES, b) Arazi GES [39]

2.2.3 Enerji Depolama Sistemleri

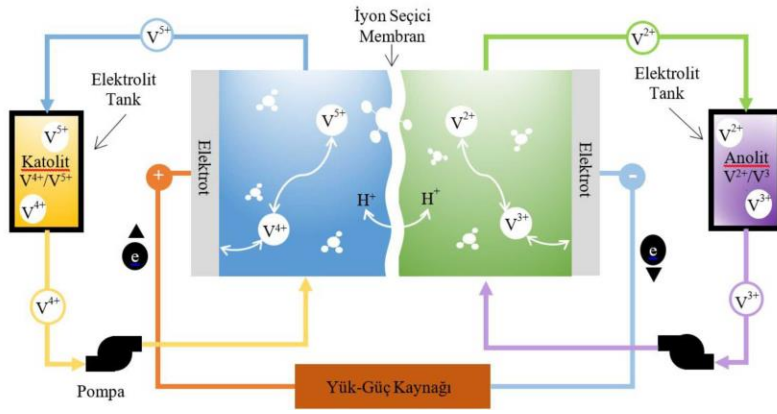
Enerji depolama sistemleri, farklı enerji türlerini belirli bir zaman diliminde depolayarak ihtiyaç halinde hâlinde kullanılmasını sağlayan sistemlerdir. Enerji depolama sistemleri hayatımızın her alanında kullandığımız elektrik enerjisi için oldukça önemli rol oynamaktadır. Elektrik herhangi bir ölçekte fiziki anlamda depolanamasa da depolanabilen diğer enerji türlerine ve talep üzerine yeniden elektriğe dönüştürülebilir [40]. Enerji depolama sistemleri Şekil 2.5’ te görüldüğü gibi termal, mekanik, elektrokimyasal, elektriksel ve kimyasal alanlarda sınıflandırılmaktadır [41]. Alt bölümlerde çalışmamızda kullanılan depolama sistemleri ile genel bilgiler verilmiştir.



Şekil 2.5 Enerji depolama sistemleri

2.2.3.1 Vanadyum Redoks Akış Bataryası

Vanadyum elementi temelli enerji depolama için kullanılan bir tür akış bataryasıdır. Bu batarya, enerjiyi kimyasal olarak depolamak ve sonra geri çekmek için vanadyumun farklı oksidasyon durumlarını kullanarak şarj ve deşarj işlemini gerçekleştirir. Genel olarak rüzgâr ve güneş gibi değişken enerji kaynaklarından gelen enerjiyi depolayarak dalgalanmalarını dengelemek ve sürekli enerji sağlamak için kullanılabilir. Vanadyum redoks akış bataryasının çalışma prensibi ile ilgili görsel Şekil 2.6’ da verilmiştir [42].

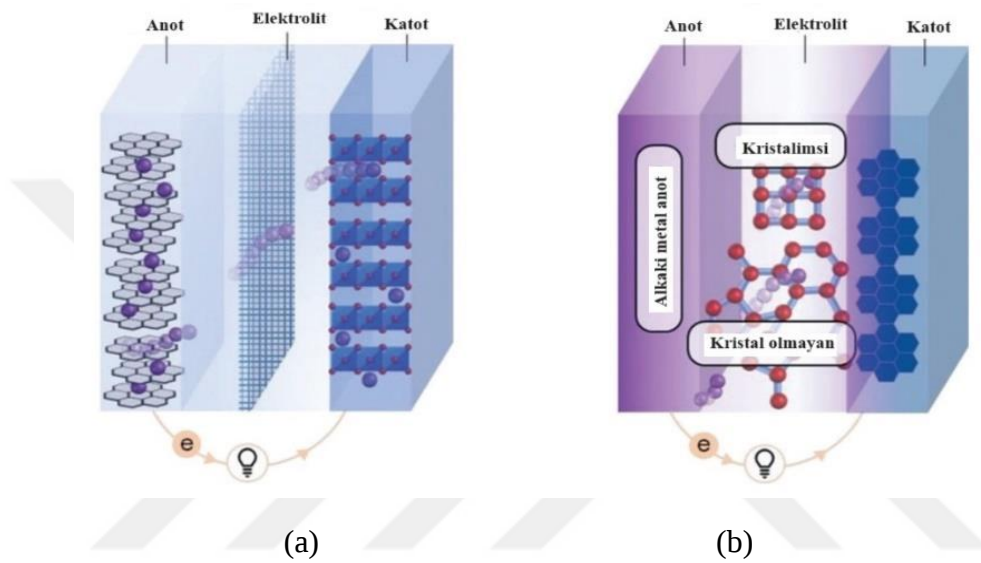


Şekil 2.6 Vanadyum redoks akış bataryası çalışma ilkesi

Genel çalışma prensibi; Bir proton değişim membranı, iki elektroliti ayırır. Belirli iyonların geçişini kontrol etmek ve elektrotlar arasında istenmeyen iyon etkileşimlerini önlemek için kullanılır. Şarj döngüsü sırasında, dış bir kaynaktan gelen elektrik enerjisi kullanılarak elektrolitlerin oksidasyon durumu değiştirilir. Negatif elektrot ve elektrolitindeki V^{3+} iyonları V^{2+} 'ye indirgenirken, pozitif elektrot ve elektrolitindeki V^{5+} iyonları V^{4+} iyonlarına oksitlenir. Böylece şarj sırasında kimyasal enerji depolanmış olur. Deşarj döngüsü sırasında ise, Elektronların hareketi, negatif elektrotta V^{2+} iyonlarının V^{3+} iyonlarına oksitlenir. Pozitif elektrotta ise V^{5+} iyonları V^{4+} iyonlarına indirgenir. Bu kimyasal reaksiyonlar sonucunda, bataryadaki kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu elektrik enerjisinin yüke verilmesi sağlanır [43]. Vanadyum redoks akış bataryalarının genel olarak avantajları; Büyük enerji depolama imkânı, uzun ömürlü olması (20 yıl üzeri), sistemin devreden çıkarılması ile vanadyumun tekrar kullanılabilmesi, lityum iyon pillere göre daha düşük karbon ayak izi, %100 deşarj derinliği (lityum ve sodyum bataryalara göre daha fazla deşarj derinliğine sahip olması), termal akış olmaması ile yangın riski bulunmaması, tepkime sürelerinin kısa olması (70 ms' den az), az bakım gerektirmeleridir. Dezavantajları ise düşük enerji yoğunluğu (gerekten enerjiyi depolamak için büyük elektrolit tanklarına ihtiyaç duyulması) ve elektrolit çözeltisinin depolanmasının bataryayı hantal hale getirmesi nedeniyle, bu bataryalar yalnızca sabit uygulamalarda kullanıma uygun olması ve kWh başına fiyatın diğer bataryalara göre biraz yüksek olması olarak gösterilebilir [44].

2.2.3.2 Katı Hal Bataryaları

Geleneksel lityum iyon bataryalarına göre farklı olarak kullanılan elektrolit malzemesidir. Örneğin, grafen, seramik oksit, polimerler gibi katı elektrolitler kullanılır. Şekil 2.7' de gösterildiği gibi, geleneksel bir lityum iyon bataryanın çalışma prensibiyle aynıdır. Deşarj sırasında, katot indirgenir ve anot oksitlenir, bununla birlikte lityum iyonlarının anottan katoda katı elektrolit aracılığıyla hareketi gerçekleşir ve şarj sırasında ters işlem gerçekleşir [45].

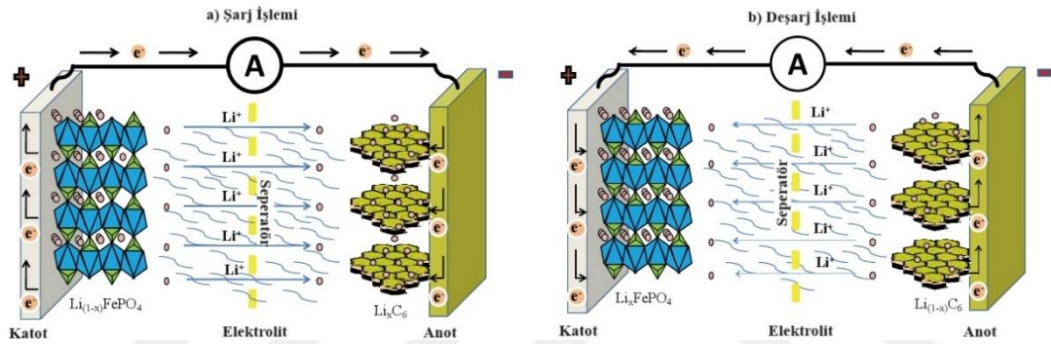


Şekil 2.7 a) Geleneksel lityum-iyon pili, **(b)** Deşarj sırasında katı hal bataryası

Katı hal bataryalarının uygulama alanlarına; Taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması için örnekler verilebilir. Avantaj ve dezavantajları incelendiğinde; Katı elektrolitler kullanıldığı için yüksek güvenli, yoğun enerji depolama kapasitesine sahip, ömürleri uzun ömür gibi avantajları bulunmaktadır [46]. Dezavantajları ise, üretiminin ve işlenmesinin genellikle daha maliyetli olması, teknolojik olgunluk olarak hala istenilen seviyede değil olamaması gelişme aşamasında ve ticari olarak yaygın değildir.

2.2.3.3 Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄) Batarya

LiFePO₄ formülü ile gösterilen lityum demir fosfat bataryalar lityum-iyon pil teknolojisinin gelişmiş türüdür. LiFePO₄ güvenli, aşırı şarja karşı hassas, çevre dostu, düşük deşarj hız gibi birçok avantaja sahiptir. Uygulama alanlarına genel olarak elektrikli araçlar, güneş enerjisi depolama sistemleri ve yedek güç kaynakları gibi örnekler verilebilir. Bu bataryanın iç yapısında bulunan katot lityum demir fosfat (LiFePO₄), anot lityum karbonat (LiC₆) ve lityum demir fosfat karbonat (Li₂FePO₄C₆) gibi bileşiklerin reaksiyonları sırasında lityum iyonları katot ve anot arasında hareket eder. Bu reaksiyonlar sonucu elektrik akımı üretilir veya depolanır. Şekil 2.8’ de lityum demir fosfat bataryanın iç yapısı örneği gösterilmiştir [47].

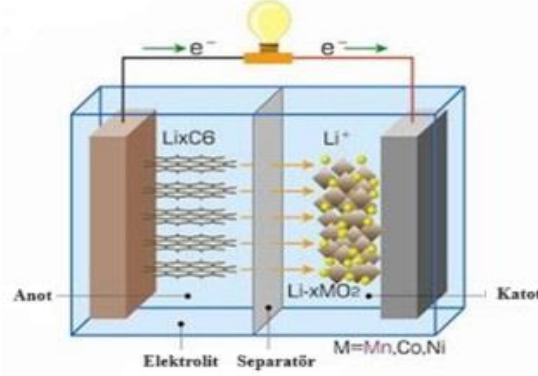


Şekil 2.8 Lityum demir fosfat batarya iç yapısı

2.2.3.4 Lityum Nikel Manganer Kobalt (Li-NCM) Batarya

LiNiMnCoO₂ formülü ile gösterilen lityum nikel manganer kobalt oksitler lityum-iyon pil teknolojisinin gelişmiş türüdür. Li-NCM bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür, hızlı şarj edilebilme yeteneği ve düşük kendiliğinden deşarj gibi avantajlara sahiptir. LiFePO₄ bataryalar ile döngü ömürleri benzerdir. Fakat maliyetleri LiFePO₄ bataryalara göre fazladır. Uygulama alanlarına genel olarak LiFePO₄ bataryalar gibi elektrikli araçlar, güneş enerjisi depolama sistemleri ve yedek güç kaynakları gibi örnekler verilebilir. Çalışma prensibi LiFePO₄ bataryalara benzerdir. Bataryanın iç yapısında bulunan katot lityum nikel manganer kobalt oksitler (LiNiMnCoO₂), anot lityum karbonat (LiC₆) ve lityum nikel manganer kobalt oksitler (Li₂FePO₄C₆) gibi bileşiklerin reaksiyonları sırasında lityum iyonları katot ve anot arasında hareket eder.

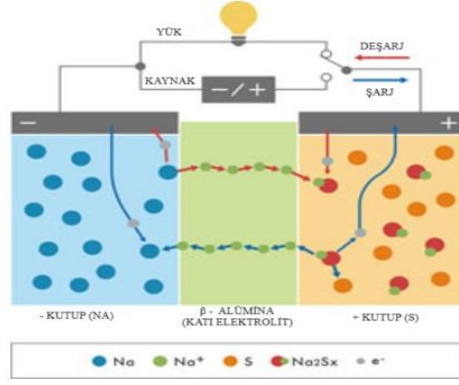
Bu reaksiyonlar sonucu elektrik akımı üretilir veya depolanır. Şekil 2.9’ da bataryanın deşarj işlemi ve iç yapısı örneği verilmiştir. Şarj işlemi ise deşarj işleminin tersi olarak gerçekleşmektedir [48].



Şekil 2.9 Lityum nikel manganez kobalt deşarj işlemi iç yapısı

2.2.3.5 Sodyum Sülfür (NaS) Batarya

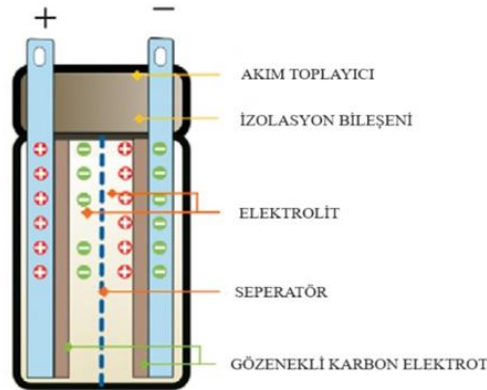
Sodyum-iyon pilleri, dünya kabuğundaki yüksek sodyum bolluğu ve düşük maliyetli vaat edici özellikleri ile enerji depolama sistemlerindeki son trendlerden biridir [49]. Sodyum sülfür (NaS) pilleri genellikle katı beta alümina elektroliti ile ayrılmış, pozitif elektrotta erimiş sülfür ve negatif elektrotta erimiş sodyum içeren silindirik elektrokimyasal hücrelerdir. NaS pillerinde, çekirdekteki erimiş sodyum dış devreye elektron sağlar, bu da sodyum iyonlarının elektrolitten pozitif elektrot bölmesine doğru göç etmesine neden olur. Serbest elektronlar erimiş sülfür tarafından yakalanır ve polisülfüre dönüştürülür. Bu süreç, şarj döngüsü sırasında tersine döner, burada sodyum polisülfürleri elektrolitin aracılığıyla pozitif sodyum iyonlarını serbest bırakmak için ayrıştırılır ve elementel sodyum olarak yeniden birleşir. Sodyum ve sülfürü erimiş halde tutmak ve elektrolitte yeterli iletkenliği sağlamak için, tüm bileşenler 270 °C'nin üzerinde bir sıcaklıkta tutulan termal olarak yalıtılmış bir kapsül içinde bulunur [50,51]. Genel olarak avantajları; Yüksek güç ve enerji yoğunluğu, ortam koşullarına duyarsızlık, yüksek çevrim ömrü, yüksek verim ve düşük maliyet olarak değerlendirilebilir. Ayrıca güvenlik sorunları, sıkı işletme ve bakım maliyetleri gibi dezavantajları da bulunmaktadır [52]. Şekil 2.10’ da NaS bataryanın iç yapısı ve çalışma prensibi gösterilmiştir [53].



Şekil 2.10 NaS bataryanın iç yapısı ve çalışma prensibi

2.2.3.6 Süperkapasitörler

Süperkapasitörler, ultra kapasitörler olarak da bilinirler ve akı toplayıcı, izolasyon bileşeni, gözenekli iki karbon elektrot, elektrolit ve bir ayraçtan oluşurlar. Süperkapasitör modülünün iç yapısı örneği Şekil 2.11’ de gösterildiği gibidir [54].



Şekil 2.11 Süperkapasitör iç yapısı örneği

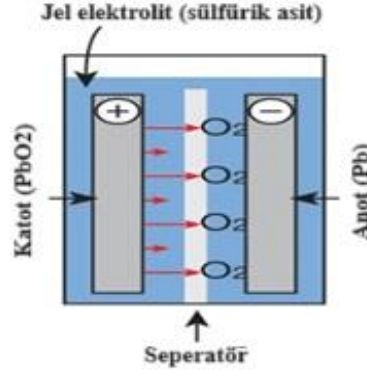
Çalışma prensibi; Aktif karbon yapıları iki elektrot, daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayan daha geniş bir yüzey alanı sağlar. Gözenekli membran ile yüklü iyonların serbestçe hareket etmesine izin verir, aralarında elektronik temasın oluşmasını engeller. Elektrotlar, uygulanan bir doğru akım voltajı ile yüklendiğinde, elektrolit içindeki iyonlar ters yüklü elektrotun gözeneklerine doğru difüze olur. Bu iyonlar, elektrotlar ve elektrolit arasındaki arayüzde birikerek, elektrotun yüzeyinde yük dağılımları sağlanarak katmanlar oluşturur. Örneğin, pozitif yüklü bir elektrotun etrafında iki adet yüklü katman oluşur. İlk katman, negatif iyonlardan meydana gelen ve yüzeye yakın bulunan bir tabakadır. İkinci katman ise, bu negatif iyon tabakasına bağlı ve dengeleyici işlevi gören pozitif iyonlardan oluşur. Aynı durum

negatif yüklü elektrot için de geçerlidir. Elektrolit, iyonları bir elektrottan diğerine iletir. Yapısal olarak, bir süperkapasitör piller ve kapasitörler arasında bir yerde bulunur. Süperkapasitörler, piller gibi gözenekli bir ortamla ayrılmış iki elektrottan oluşur ve tıpkı tipik bir kapasitör gibi elektrostatik alan şeklinde enerji depolar [55,56]. Süper kapasitörlerin avantajları; özgül güç yoğunluğu yüksek olması, sağlamlık, güvenilirlik, çeşitli ortamlara (sıcak, soğuk ve nemli) uyum sağlayabilme, bakım gerektirmeme ve çok uzun kullanım ömrü ve yüksek bir kendiliğinden deşarj hızına sahiptir [57]. Dezavantajları ise; enerji yoğunluğu diğer depolama birimlerine göre düşük olması ve maliyetlerinin yüksek olması olarak gösterilebilir. Genel uygulama alanları ise endüstriyel ekipmanlar, taşıma araçları ve güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinde üretilen enerjiyi düzenlemek ve depolamak için kullanılabilir.

2.2.3.7 Kurşun Asit (Jel) Batarya

Kurşun asit batarya, en eski ve en yaygın batarya türlerinden biridir. Genel olarak Sulu kurşun asit batarya ve Valf Ayarlı Kurşun Asit batarya olmak üzere ikiye ayrılır. Valf Ayarlı Kurşun Asit bataryalar, genellikle bakımsız kurşun-asit aküler olarak bilinir ve özel bir tasarıma sahiptirler. Bu bataryalar, elektrolit sıvısının (genellikle sülfürik asit ve su çözeltisi) bir jel veya emici cam elyaf mat içine hapsedtiği "kapalı" bir sistemde çalışır. Kurşun asit bataryanın temel prensibi, içindeki elektrolit olarak bulunan sülfürik asidin (H_2SO_4) kullanılmasıdır. Bu bataryanın iç yapısında bulunan katot kurşun dioksit (PbO_2) ve anot kurşun (Pb) elektrotların şarj ve deşarj işlemleri arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla birlikte elektrik enerjisinin depolanması ve serbest bırakılmasını sağlar [58]. Uygulama olarak acil durum aydınlatmaları, telekomünikasyon sistemleri, güneş enerjisi depolama sistemleri ve kesintisiz güç kaynağı gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilir. Genel olarak avantajları; Fazla akım gerektirmez, jel kıvamından dolayı dökülmez ve sızdırmaz, düzenli sulama gerektirmez, montaj kolaylığı vardır, aşırı sıcaklıklara karşı daha fazla direnç sunar, şok ve titreşime dayanıklıdır, gaz çıkışı olmaması, havalandırmanın sınırlı olduğu yerlere kurulumunu güvenli hale getirir, korozyon yaşamazlar, klasik sulu asitlere göre şarj döngü performansı daha iyidir, hassas elektronik ekipmanların yakınına kurulabilir veya kullanılabilir, maliyet olarak diğer gelişmiş depolama sistemlerine göre daha ucuzdur. Dezavantajları ise sulu kurşun asitten daha pahalı, aşırı şarja karşı hassastırlar.

Ayrıca diğ er gelişmiş batarya türlerine göre (LiFePO_4 , katı hal, vanadyum redoks vb.) göre şarj döngüleri düşük olup ömürleri kısadır. şekil 2.12’de kurşun asit jel batarya iç yapısı  rneđi gösterilmiştir [59].

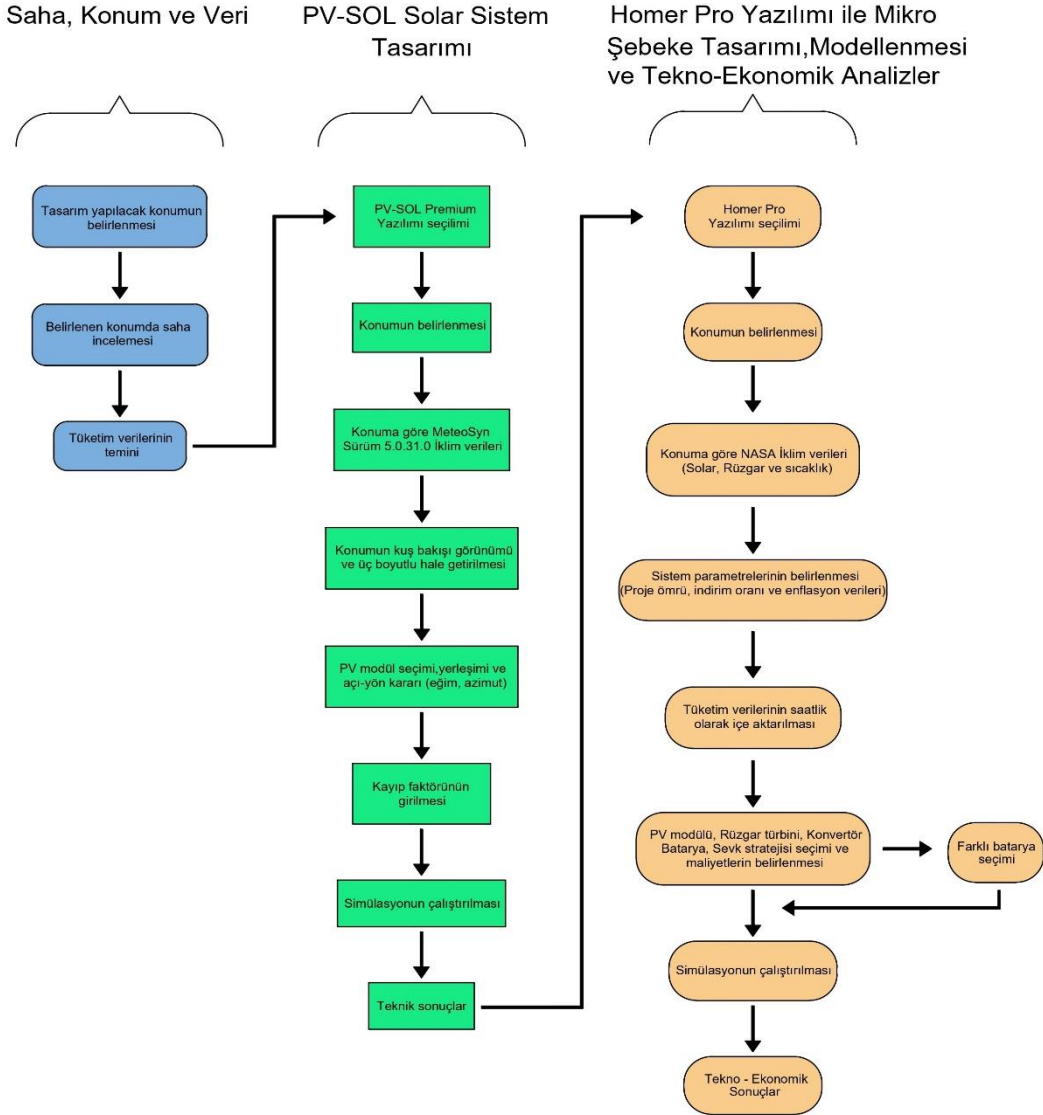


şekil 2.12 Kurşun asit (jel) batarya iç yapısı  rneđi

3

MİKRO ŞEBEKENİN TASARIMI, GELİŞMİŞ FARKLI DEPOLAMA SİSTEMLERİNE GÖRE MODELLENMESİ VE SİSTEM GİRDİLERİ

Çalışmada metod, saha-konum ve veri, PV-Sol yazılımı ile solar sistem tasarımı, Homer Pro yazılımı ile mikro şebeke tasarımı, modellenmesi ve tekno-ekonomik analizleri olmak üzere üç bölümden oluşmuştur. Metod ile ilgili akış şeması Şekil 3.1’ deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Metodun akış şeması

3.1 Proje Konum ve Verileri

Çalışma, 41° 01'42.98" kuzey enlemi, 28° 53'25.78" doğu boylamında yer alan Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi olarak belirlenmiş olup konum ile ilgili görsel Şekil 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3.2 YTÜ Davutpaşa kampüsü genel görünüm [60]

Ayrıca konum ile ilgili proje lokasyonu, coğrafi koordinatlar ve meteorolojik veriler Tablo 3.1' de detaylandırılmıştır. Meteorolojik veriler, mikro şebeke tasarımının yapıldığı Homer Pro yazılımından alınan veriler olup konuma göre düzenlenerek Tablo 3.1' e aktarılmıştır.

Tablo 3.1 Proje karakteristikleri

Proje Lokasyonu	
İl	İstanbul
İlçe	Esenler
Adres	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi
Coğrafi Koordinatlar	

Tablo 3.1 Proje karakteristikleri (devamı)

Enlem	41° 01' 42.98" K
Boylam	28° 53' 25.78" D
Meteorolojik Veriler	
Ortalama Yıllık Güneş Radyasyonu	3.94 kWh/m²/gün
Ortalama Yıllık Sıcaklık	14.46 C°
Ortalama Yıllık Rüzgâr Hızı (H: 10 m, H: 50 m)	2,71 m/s, 6,99 m/s

Proje’ de kullanılan tüketim verileri ise Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığından alınmış olup Elektrik-Elektronik Fakültesine ait gerçek yıllık enerji tüketim verileridir. Saatlik olarak alınan veriler, Yıllık tüketim, Günlük ortalama tüketim ve Saatlik pik tüketim olarak düzenlenmiş halde Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.2 Tüketim verileri

Yıllık Toplam Tüketim	1283133 kWh
Günlük Ortalama Tüketim	3516.38 kWh
Saatlik Pik Tüketim	485.33 kWh

3.2 PV-Sol Yazılımı ile Solar Sistem Tasarımı

3.2.1 PV*SOL Premium Yazılımı

Valentin Software şirketine ait fotovoltaik tasarım programı ile her türlü küçük, orta, ticari çatı sistemlerine büyük enerji parklarına kadar tasarım ve simülasyon yapmak mümkündür. 3D görselleştirme özelliği ve çevrimiçi veri tabanı ile zengin modül desteğine sahiptir. 3D özelliğinin avantajlarından biri olan nesnelere dayalı gölgelendirme ile en yüksek tahminli veriler sunarak doğru veriler ve gelir hesaplamalarına olanak tanır. Ayrıca öz tüketimin hesaplanması, akü depolama tasarımı veya elektrikli araçların entegrasyonu özellikleri ile PV*SOL ile tüm

müşteri isteklerini çok kısa sürede hayata geçirebilir ve sunabilir. Ve bununla ilgili rapor ve sunumlarda gerçekleştirilebilir [61].

3.2.2 PV*SOL Premium Yazılımı ile Güneş Enerjisi Sistemi Tasarımı

Yazılımda öncelikle tasarım lokasyonu tanımlanıp lokasyonlara ait MeteoSyn Sürüm 5.0.31.0 ile iklim verileri indirilmiştir. Daha sonra Google Earth uydu görüntüsü yazılıma aktarılıp sahadan yapılan incelemelerde alınan bilgiler ışığında tasarımlar üç boyutlu hale getirilerek panel yerleşimleri yapılmıştır.

3.2.2.1 Panel Seçimi

Panel seçimi, piyasada kullanılan CW Enerji panel firmasına ait CWT550-108PM12 550 Wp kodlu panel kullanılmıştır. Panel ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.3' te verilmiştir [62].

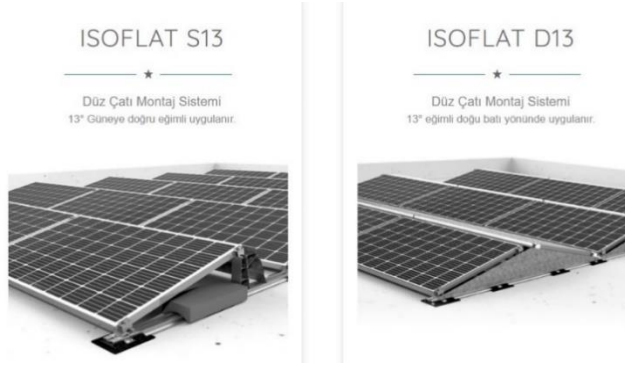
Tablo 3.3 FV panel teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Maksimum Güç	550 Wp
Modül Verimliliği (%)	21.48
Maksimum Güç Gerilimi (V_{mp})	31.5 V
Maksimum Güç Akımı (I_{mp})	17.46 A
Panel Ömrü	25 yıl
Panel Boyutu(mm)	1965 x 1303 x 35

3.2.2.2 Panel Yerleşimi

Fakülte çatısına yerleşim; Kontrol Otomasyon Mühendisliği bölümü, Elektronik-Haberleşme Mühendisliği bölümü, Elektrik Mühendisliği bölümü, Bilgisayar Mühendisliği bölümü, İdari Kısım ve Konferans Salonu binaların üzerine yapılmıştır. Çatılar genel olarak düz çatı sistemine sahip olup sadece konferans salonu eğimli çatıya sahiptir. Bu yüzden düz çatı sistemlerinde Şekil 3.3' te gösterilen FV panel montaj sistemi kullanılarak tasarımları yapılmıştır. Tasarımda

optimum kurulu güç ve üretim doğrultusunda en uygun montaj sisteminin 13° eğimli doğu-batı yönlü montaj sistemi olduğu yapılan analizlerle belirlenmiştir.



Şekil 3.3 FV panel montaj sistemi [63]

Tasarlanan panel yerleşim sonuçlarına göre;

- Konferans Salonu için eğim çatıya 0°, yerleşim güneybatı 225°,
- Bilgisayar Mühendisliği bölümü için, eğim çatıya 13°, yerleşim güneybatı 234° ve kuzeydoğu 54°,
- Elektrik Mühendisliği bölümü için, eğim çatıya 13°, yerleşim güneybatı 223° ve kuzeydoğu 43°,
- Elektronik-Haberleşme Mühendisliği bölümü için, eğim çatıya 13°, yerleşim güneybatı 211° ve kuzeydoğu 31°,
- Kontrol Otomasyon Mühendisliği bölümü için, eğim çatıya 13°, yerleşim güney 200° ve kuzey 20°,
- İdari Kısım için, eğim çatıya 13°, yerleşim güneybatı 218° ve kuzeydoğu 38°,

Olarak belirlenmiş olup Şekil 3.4’ te yerleşim ile ilgili görsel verilmiştir.



Şekil 3.4 YTÜ Elektrik-Elektronik fakültesi fotovoltaiik panel yerleşimi

3.2.2.3 Tasarımın Simülasyon Sonuçları

Tasarımda, simülasyon çalıştırılmadan önce toplam iletim kaybı %2 olarak alınmıştır [64]. Simülasyonun çalıştırılmasıyla yerleşim sonucunda, 3 farklı alan için kurulu güçler sırasıyla fakülte çatı GES 1285.9 kWp, lojman bölgesi arazi GES 1309 kWp ve kütüphane arkası arazi GES 3550.8 kWp olarak bulunmuştur.

3.3 Homer Pro Yazılımı ile Mikro Şebeke Tasarımı

3.3.1 Homer Pro Yazılımı

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nda orijinal olarak geliştirilen ve UL Solutions tarafından geliştirilen ve hizmete sunulan HOMER Pro mikro şebeke yazılımı, küçük yerleşim yerleri, kampüsler ve askeri üslere kadar her türlü yerleşim yerinde adalı modda ve şebekeye bağlı modda mikro şebeke tasarımı optimize etmek kullanılan yazılımdır. Ayrıca HOMER (Çoklu Enerji Kaynakları için Hibrit Optimizasyon Modeli) üç güçlü aracı (Simülasyon, Optimizasyon ve Duyarlılık Analizi) bir yazılım ürünüde bir araya getirerek mühendislik ve ekonomi alanlarının birlikte çalışmasına olanak tanır [65].

3.3.2 Homer Pro Yazılımı ile Mikro Şebeke Sistemi Tasarımı

Yazılımda öncelikle proje konumu tanımlanarak, konuma göre güneş ve rüzgâr sistemleri için gerekli iklim verileri (solar radyasyon, rüzgâr hızı ve sıcaklık) yazılımındaki mevcut çevrimiçi NASA verileri indirilmiştir. Sistem tasarımında kullanılan bileşenlerin maliyetlendirilmesi Amerikan doları ile yapıldığından, nominal indirim oranı ABD'nin 10 yıllık tahvil oranı [66] ve Türkiye'nin kredi risk birimi [67] toplamı olarak alınmıştır. Ayrıca enflasyon oranı ise ABD'nin enflasyon oranı [68] alınmıştır. Detaylar Tablo 3.4' te tasarımda kullanılan finansal parametre verileri olarak verilmiş olup yazılıma girilmiştir.

Tablo 3.4 Finansal parametreler

Finansal Parametreler	
Sistem Ömrü	25 yıl

Tablo 3.4 Finansal parametreler (devamı)

İndirim Oranı	%4,459 + %3,5105 = %7,9695 ≈ %7,97
Enflasyon oranı	%3,3

Son olarak, sistem bileşen verilerinden önce Tablo 3.2’ de yer alan tüketim verileri sisteme dahil edilerek bileşenler bölümüne geçilmiştir.

3.3.2.1 Panel Seçimi ve Formülasyon

Panel seçimi, PV-SOL yazılımında olduğu gibi teknik özellikleri Tablo 3.3’ te belirtilen CW Enerji panel firmasına ait CWT550-108PM12 550 Wp kodlu panel Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Solar sistemin kurulu gücü PV-SOL yazılımında hesaplanan çatı bölümü 1285.9 kWp ve arazi bölümü 4859.8 kWp olarak boyutlandırılması yapılmıştır. Maliyet verilerine göre solar sistemin 1 kW maliyeti (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil) 400\$, yıllık bakım ve işletme giderleri 5\$ olarak sisteme girilmiştir. Ayrıca yazılımlarda kullanım amacına göre mevcut özellikleri nedeniyle simülasyon sonuçları farklı olmasından dolayı fotovoltaik elektrik üretimi aynı olması için indirgeme faktörü (panellerin yaşlanması, sıcaklık, toz, kir, bulut örtüsü ve güneş ışığı açısından gelen değişimler gibi çeşitli dış etkenler katsayısı) %72,48 olarak hesaplanarak sisteme girilmiştir. Fotovoltaik panel mikro şebeke sistem girdileri ise Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.

The screenshot displays the configuration window for a PV panel in Homer Pro. The panel is identified as CWT550-108PM12 550 Wp. The interface is divided into several sections:

- Properties:** Name: CWT550-108PM12 550 Wp, Abbreviation: CWT550, Panel Type: Flat plate, Rated Capacity (kW): 1285.9, Manufacturer: CW Enerji, www.homerenergy.com.
- Cost:** Capacity (kW): 1, Capital (\$): 400.00, Replacement (\$): 0.00, O&M (\$/year): 5.00, Lifetime (years): 25.00.
- Sizing:** HOMER Optimizer™, Search Space, kW: 0 to 1285.9.
- Site Specific Input:** Derating Factor (%): 72.48.
- Electrical Bus:** AC (selected), DC.

Şekil 3.7 Çatı fotovoltaik panel mikro şebeke sistem girdileri

Properties

Name: CWT550-108PM12 550 Wp
Abbreviation: CWT550
Panel Type: Flat plate
Rated Capacity (kW): 6145.7
Manufacturer: CW Enerji
www.homerenergy.com

Cost

	Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	400.00	0.00	5.00	

Lifetime: 25.00 time (years)

Site Specific Input

Derating Factor (%): 72.48

Electrical Bus: AC

Sizing

HOMER Optimizer™
Search Space

kW

0
6145.7

Şekil 3.8 Çatı ve arazi fotovoltaik panel mikro şebeke sistem girdileri

Fotovoltaik panellerle ilgili matematiksel formülasyon denklem 3.1' de verilerek girdi detayları açıklanmıştır [69].

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STK}} \right) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STK})] \quad (3.1)$$

P_{PV} = Fotovoltaik dizi güç çıkışı (kW)

Y_{PV} = Fotovoltaik dizinin standart test koşulları altında nominal kapasitesi (kW)

f_{PV} = Fotovoltaik dizi değer kaybı faktörü (%)

G_T = T zamanında fotovoltaik dizisine gelen güneş radyasyonu (kW/m²)

$G_{T, STK}$ = Standart test koşulları altında T zamanında fotovoltaik dizisine gelen güneş radyasyonu (kW/m²)

α_P = Gücün sıcaklık katsayısı (%/°C)

T_c = T zamanında fotovoltaik panel hücre sıcaklığı (°C)

$T_{c,STK}$ = Standart test koşulları altında T zamanında fotovoltaik dizi hücre sıcaklığı (25°C)

3.3.2.2 Rüzgâr Türbini Seçimi ve Formülasyon

Rüzgâr türbini seçimi ise, hem Homer Pro kütüphanesinde yer alan hem de piyasa koşullarında kullanılan Wind Energy Solutions firmasına ait WES250 kodlu rüzgâr türbini kullanılmıştır. 250 kW'lık türbin seçimi saha koşulları ve türbinin süpürme alanı dikkate alınarak yapılmıştır. Maliyet açısından; üretici firmadan alınan maliyet verilerine göre 1 adet maliyeti 1020549\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil) ve yıllık bakım ve işletme giderleri 10000\$ olarak sisteme girilmiştir. Kurulu gücü ve kule yüksekliği (30 m, 39 m, 48 m seçenekleri mevcut)

seçimi ise tasarımda tekno-ekonomik değerlendirmeler sonucu belirlenerek 1 adet 250 kW ve 48 mt yüksekliğinde olan rüzgâr türbini seçilerek sistemin boyutlandırılması yapılmıştır. Kullanılan rüzgâr türbinin teknik özellikleri ise Tablo 3.5’ te verilmiştir.

Tablo 3.5 Rüzgâr türbini teknik özellikleri [70]

Anma Gücü	250 kW
Özgül Güç	354 W/m²
Şebeke Gerilimi	400V ±%10
Şebeke Frekansı	50/60Hz ±3Hz
Rotor Çapı	30 mt
Bıçak Sayısı	2
Rüzgâr Hızında Kesinti	<3 m/sn. (6,7 mil/saat)
Rüzgâr Kesme Hızı	25 m/sn. (56 mil/saat)
Nominal Rüzgâr Hızı	13 m/sn. (29 mil/saat)
Süpürme Alanı	707 m²
Kule Yüksekliği	48 mt

Ayrıca rüzgâr enerji sistemlerinde teknik sonuçlar için kullanılan pürüzlülük katsayısı $Z_0=3$ mt (yazılımda şehir içi ve uzun bina bölgeleri için) olarak rüzgâr kaynağı verilerinde kullanılmıştır. Rüzgâr türbini ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.

WIND TURBINE

Name: WES 30 [250kW] Abbreviation: WES25X Remove
Copy To Library

Properties

Name: WES 30 [250kW]
Abbreviation: WES250
Rated Capacity (kW): 250
Manufacturer: Wind Energy Solutions
Specifications for WES 30

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$1,020,549.00	\$1,020,549.00	\$10,000.00

Click here to add new item

Multiplier:

Site Specific Input

Lifetime (years): 20.00 Hub Height (m): 48.00 ☒ Consider ambient temperature effects?

Quantity Optimization

☐ HOMER Optimizer™ ☒ Search Space

Quantity
0
1

Electrical Bus: ☒ AC ☐ DC

Şekil 3.9 Rüzgâr türbini mikro şebeke sistem girdileri

Rüzgâr türbinlerinde tasarım ve üretim için ilgili hesaplamalar sırasıyla denklem 3.2 ve denklem 3.3’ teki matematiksel ifadelerle formüle edilmiştir. Göbek yüksekliğinde rüzgâr hızı denklem 3.2’ deki gibi hesaplanmaktadır [71].

$$V_{HUB} = V_{ANEM} \left(\frac{\ln\left(\frac{Z_{HUB}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ANEM}}{Z_0}\right)} \right) \quad (3.2)$$

V_{HUB} = Rüzgâr türbininin rotor göbeği yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/s)

V_{ANEM} = Anemometre yüksekliğinde rüzgâr hızı (m/s)

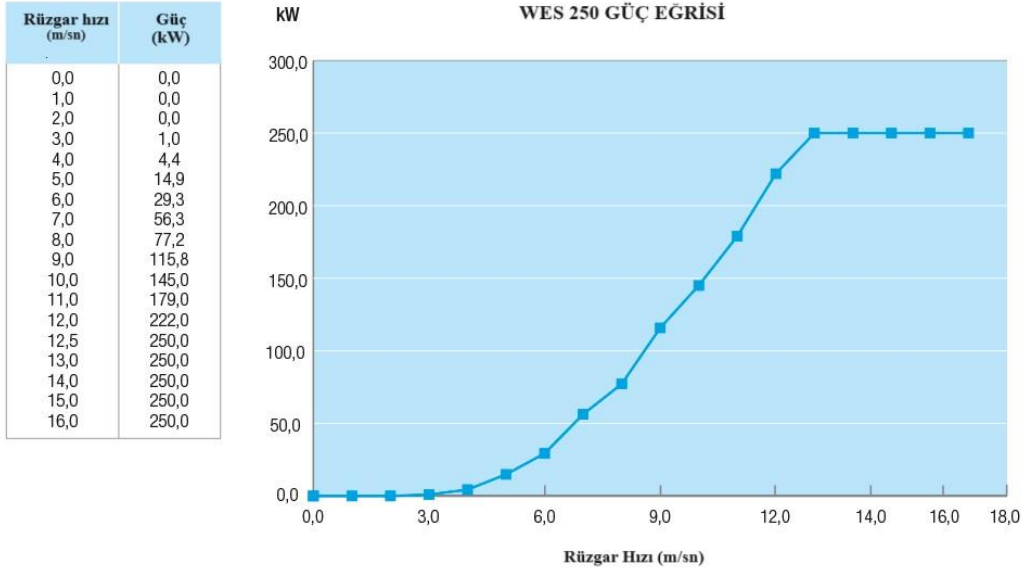
Z_{HUB} = Rüzgâr türbininin göbek yüksekliği (m)

Z_{ANEM} = Anemometre yüksekliği (m)

Z_0 = Rüzgâr pürüzlülüğü (m)

Türbinlerde güç çıkışı hesabı ise;

Standart sıcaklık ve basınç (STP) koşulları altında Şekil 3.10’ da ki örnekte olduğu gibi güç eğrisi grafikleri referans alınarak hesaplanıp gerçek koşullara uyum sağlamak için, denklem 3.3’ te olduğu gibi güç eğrisi tarafından tahmin edilen güç değerini hava yoğunluğu oranıyla çarpılarak bulunur [72].



Şekil 3.10 WES250 Model rüzgâr türbininin güç eğrisi

$$P_{RTG} = P_{RTG,STP} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.3)$$

P_{RTG} = Rüzgâr türbini güç çıkışı (kW)

$P_{RTG,STP}$ = Rüzgâr türbini standart basınç ve sıcaklıktaki güç çıkışı (kW)

P = Gerçek hava yoğunluğu (kg/m^3)

P_0 = Standart basınç ve sıcaklıktaki hava yoğunluğu (1.225 kg/m^3)

3.3.2.3 Dönüştürücü (Konvertör) Seçimi

Dönüştürücüler, DC' yi AC' ye dönüştüren bir inverter olarak ve AC' yi DC' ye dönüştüren bir doğrultucu olarak çalışabilir. Tasarlanan sistemde PV/Rüzgâr/Batarya grubu içeren bir güç sistemi olduğu için DC ve AC bileşenleri arasındaki güç akışı, güç dönüştürücüsü kullanılarak sürdürülmüştür. Tasarımda farklı batarya türleri olacağından genel kullanım amaçlı Homer Pro kütüphanesinde yer alan sistem konvertörü kullanılmıştır. Konvertörün boyutlandırılması yazılımın optimizasyonu ile sağlanarak maliyetleri sisteme girilmiştir. Dönüştürücü ile ilgili bilgiler Şekil 3.11' de detaylı olarak gösterilerek sisteme dahil edilmiştir.

CONVERTER **System Converter** Name: Abbreviation:

Properties
 Name: **System Converter**
 Abbreviation: **Converter**
www.homerenergy.com
 Notes:
 This is a generic system converter.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$350.00	\$350.00	\$5.00

Click here to add new item

Multiplier:

Capacity Optimization
☒ HOMER Optimizer™
☐ Search Space
☐ Advanced

Generic
[homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Inverter Input
 Lifetime (years):
 Efficiency (%):
☒ Parallel with AC Generator?

Rectifier Input
 Relative Capacity (%):
 Efficiency (%):

Şekil 3.11 Dönüştürücü için mikro şebeke sistem girdileri

3.3.2.4 Batarya Seçimi ve Formülasyon

Çalışmada, genel olarak günümüz koşullarında kullanılan farklı ve gelişmiş depolama sistemleri tasarımıdaki saha koşulları da dikkate alınarak tercih edilmiştir. Yapılan araştırma ve piyasa incelemelerine göre Vanadyum redoks akış batarya, Katı hal batarya, Lityum demir fosfat batarya, Lityum nikel kobalt mangan batarya, Sodyum sülfür batarya, Süperkapasitör ve kurşun asit (jel) batarya olmak üzere yedi farklı enerji depolama sistemi tercih edilerek mevcut tasarımında tekno-ekonomik analizleri yapılmıştır. Tüm bataryalarda başlangıç doluluk oranı %100 olarak kabul edilmiş olup minimum şarj durumu %20' a kadar kullanılmasına müsaade edilerek sisteme dahil edilmiştir. Bataryaların teknik özellikleri farklı olacağından dolayı boyutlandırmaları yazılımın optimizasyon özelliğinden yararlanılmış olup genel olarak batarya boyutlandırılması denklem 3.4' te gösterildiği gibidir [73].

$$B_K = \left(\frac{E_{TOP,T} \cdot t_A}{\dot{I}_{VER} \cdot B_{VER} \cdot B_{DD}} \right) \quad (3.4)$$

B_K = Batarya kapasitesi (kWh)

$E_{TOP,T}$ = Toplam Enerji Talebi (kWh/gün)

t_A = Otonomi (pil özerkliği) süresi (gün)

$\dot{I}_{VER}$ = İnvertör Verimi (%)

B_{VER} = Batarya verimliliği (%)

B_{DD} = Batarya şarj derinliği (%)

- Vanadyum Redoks Akış Batarya

Vanadyum redoks akış bataryası için VCEC Energy firmasına ait 50KW250KWH Containerized VRFB kodlu batarya Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.6’ da verilmiştir.

Tablo 3.6 Vanadyum redoks batarya teknik özellikleri [74]

Nominal Gerilim	289 V
Nominal Kapasite	865 Ah
Nominal Enerji Kapasitesi	250 kWh
Maks. Sürekli Şarj/Deşarj Akımı	173 A / 173 A
Şarj-deşarj verimliliği	%73
Tasarım Ömrü	25 yıl

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet batarya maliyeti 316388\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 1000\$ olarak üretici firmadan alınan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.12’ de gösterilmiştir.

STORAGE  Name: 50KW250KWH Containeriz Abbreviation: 50KW2! Remove Copy to Library ?

Properties
Idealized Battery Model
 Nominal Voltage (V): 289
 Nominal Capacity (kWh): 250
 Nominal Capacity (Ah): 865
 Roundtrip efficiency (%): 73
 Maximum Charge Current (A): 173
 Maximum Discharge Current (A): 173

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	316,388.00	316,388.00	1,000.00

Lifetime time (years): 25.00 More...

Sizing
☒ HOMER Optimizer™
☐ Search Space
☐ Advanced

Site Specific Input
 String Size: 1 Voltage: 289 V
 Initial State of Charge (%): 100.00 ⬅
 Minimum State of Charge (%): 20.00 ⬅

Şekil 3.12 Vanadyum redoks batarya için mikro şebeke sistem girdileri

- Katı Hal (Solid State) Batarya

Katı hal bataryası için Enerbond firmasına ait GTEM-700V264KW-R kodlu batarya Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.7’ de verilmiştir.

Tablo 3.7 Katı hal batarya teknik özellikleri [75]

Nominal Gerilim	699.3 V
Nominal Kapasite	378 Ah
Nominal Enerji Kapasitesi	264.54 kWh
Maks. Sürekli Şarj/Deşarj Akımı	360 A / 360 A
Şarj-deşarj verimliliği	%96.8
Tasarım Ömrü	25 yıl

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet batarya maliyeti 243279\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 500\$ olarak üretici firmadan alınan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.13’ de gösterilmiştir.

The screenshot shows the HOMER Pro software interface for configuring a battery. The 'STORAGE' tab is active, displaying the 'Idealized Battery Model' with the following properties:

- Nominal Voltage (V): 699
- Nominal Capacity (kWh): 264
- Nominal Capacity (Ah): 378
- Roundtrip efficiency (%): 96.8
- Maximum Charge Current (A): 360
- Maximum Discharge Current (A): 360

The 'Cost' section includes a table with the following data:

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	243,279.00	243,279.00	500.00

The 'Lifetime' section shows a value of 25.00 years. The 'Site Specific Input' section includes fields for String Size (1), Voltage (699.3 V), Initial State of Charge (%), and Minimum State of Charge (%).

Şekil 3.13 Katı hal batarya için mikro şebeke sistem girdileri

- Lityum Demir Fosfat (LiFePO4) Batarya

Lityum demir fosfat batarya için Pomega firmasına ait PBH-768200 kodlu batarya Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.8’ de verilmiştir.

Tablo 3.8 LiFePO4 batarya teknik özellikleri [76]

Nominal Gerilim	768 V
Nominal Kapasite	200 Ah
Nominal Enerji Kapasitesi	153.6 kWh
Maks. Sürekli Şarj/Deşarj Akımı	200 A / 200 A
Şarj-deşarj verimliliği	%92
Döngü Ömrü	>4000
Tasarım Ömrü	15 yıl

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet batarya maliyeti 47610\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 250\$ olarak üretici firmadan alınan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.14’ te gösterilmiştir.

The screenshot shows the HOMER Pro software interface for configuring a battery. The 'STORAGE' tab is selected, and the battery model 'PBH-768200' is chosen. The battery icon is displayed. The 'Properties' section lists the following specifications:

- Idealized Battery Model**
- Nominal Voltage (V): 768
- Nominal Capacity (kWh): 154
- Nominal Capacity (Ah): 200
- Roundtrip efficiency (%): 92
- Maximum Charge Current (A): 200
- Maximum Discharge Current (A): 200

The 'Cost' section includes the following input fields:

- Quantity: 1
- Capital (\$): 47,610.00
- Replacement (\$): 47,610.00
- O&M (\$/year): 250.00
- Lifetime: 15.00 years

The 'Site Specific Input' section includes the following input fields:

- String Size: 2
- Voltage: 1536 V
- Initial State of Charge (%): 100.00
- Minimum State of Charge (%): 20.00

Şekil 3.14 LiFePO4 batarya için mikro şebeke sistem girdileri

- Lityum Nikel Kobalt Manganez (Li-NCM) Batarya

Lityum nikel kobalt manganez batarya için SMA firmasına ait Commercial Storage 50-20 kodlu batarya Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.9’ de verilmiştir.

Tablo 3.9 Li-NCM batarya teknik özellikleri [77]

Nominal Gerilim	567 V
Nominal Kapasite	100Ah
Nominal Enerji Kapasitesi	56.7kWh
Maks. Sürekli Şarj/Deşarj Akımı	100A / 100A
Şarj-deşarj verimliliği	%98
Tasarım Ömrü	15 yıl

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet batarya maliyeti 68875\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 300\$ olarak üretici firmadan alınan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.15’ de gösterilmiştir.

STORAGE Add/Remove SMA Commercial Storage 50

Name: SMA Commercial Storage Abbreviation: SMA St

Properties
Idealized Battery Model
 Nominal Voltage (V): 567
 Nominal Capacity (kWh): 56.7
 Nominal Capacity (Ah): 100
 Roundtrip efficiency (%): 98
 Maximum Charge Current (A): 100
 Maximum Discharge Current (A): 100

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	68,875.00	68,875.00	300.00

Lifetime time (years): 15.00

Sizing
☒ HOMER Optimizer™
☐ Search Space
☐ Advanced

Site Specific Input
 String Size: 2 Voltage: 1134 V
 Initial State of Charge (%): 100.00
 Minimum State of Charge (%): 20.00

Şekil 3.15 Li-NCM batarya için mikro şebeke sistem girdileri

- Sodyum Sülfür (NaS) Batarya

Sodyum sülfür batarya için NGK-BASF firmalarına ait NAS batarya hem Homer Pro kütüphanesinde yer alan hem de piyasada mevcut olan bataryadır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.10’ da verilmiştir.

Tablo 3.10. NaS batarya teknik özellikleri

Nominal Gerilim	192 V
Nominal Kapasite	7551Ah
Nominal Enerji Kapasitesi	1450kWh
Maks. Sürekli Şarj/Deşarj Akımı	1200A / 1410A
Şarj-deşarj verimliliği	%85
Tasarım Ömrü	20 yıl

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet batarya maliyeti 632776\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 5000\$ olarak yazılımda yer alan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.16’ da gösterilmiştir.

The screenshot shows the HOMER Pro software interface for configuring a NaS battery. The 'STORAGE' tab is selected, and the 'Idealized Battery Model' is configured. The 'Cost' section includes a table with columns for Quantity, Capital (\$), Replacement (\$), and O&M (\$/year). The 'Lifetime' section includes fields for time (years) and throughput (kWh). The 'Sizing' section includes a dropdown for the optimizer (HOMER Optimizer is selected) and checkboxes for Search Space and Advanced. The 'Site Specific Input' section includes fields for String Size, Initial State of Charge (%), and Minimum State of Charge (%).

Şekil 3.16 NaS batarya için mikro şebeke sistem girdileri

- Süperkapasitör

Süperkapasitör SUPRO ENERGY firmasına ait SY1126V169KWh31R kodlu batarya Homer Pro Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.11’ de verilmiştir.

Tablo 3.11 Süperkapasitör teknik özellikleri [78]

Nominal Gerilim	1126 V
Nominal Kapasite	210Ah
Nominal Enerji Kapasitesi	169kWh
Maks. Sürekli Şarj/Deşarj Akımı	100A / 200A
Şarj-deşarj verimliliği	%96
Tasarım Ömrü	25 yıl
Döngü Ömrü	20000

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet süperkapasitör maliyeti 126880\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo, vergiler vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 500\$ olarak üretici firmadan alınan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.17’ te gösterilmiştir.

Şekil 3.17 Süper kapasitör için mikro şebeke sistem girdileri

- Kurşun Asit (Jel) Batarya

Kurşun asit (jel) batarya için OUTDO firmasına ait OT200-12(GEL)/CL kodlu batarya Homer Pro Homer Pro kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır. Batarya ile ilgili teknik özellikler Tablo 3.12’ de verilmiştir.

Tablo 3.12 Kurşun asit (jel) batarya teknik özellikleri [79]

Kapasite	200Ah
Nominal Voltaj	12V
Deşarj Derinliği (25°C)	%30 2000, %50 1200, %80 600, %100 400
Batarya Ömrü	8 yıl
Maksimum Deşarj Akımı	299.5A

Maliyet açısından yapılan değerlendirmelerde ise 1 adet batarya maliyeti 535\$ (kurulum, taşıma, işçilik, kablo vb. dahil), yıllık bakım ve işletme giderleri 3\$ olarak piyasa paydaşlarından alınan bilgilere göre sisteme girilmiştir. Batarya ile ilgili sistem girdileri Şekil 3.18’ de gösterilmiştir.

The screenshot shows the HOMER Pro software interface for configuring a storage system. The 'STORAGE' section is active, showing a battery icon and the name 'OT200-12(GEL)/CN (GEL)'. The 'Properties' panel on the left lists various technical specifications for the battery. The 'Cost' table shows the capital cost, replacement cost, and O&M cost. The 'Site Specific Input' section allows for setting the initial state of charge, minimum state of charge, replacement degradation limit, and string size.

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	535.00	535.00	3.00

Site Specific Input:

- Initial State of Charge (%): 100.00
- Minimum State of Charge (%): 20.00
- Replacement degradation limit (%): 10.00
- String Size: 108
- Voltage: 1296 V
- ☒ Consider temperature effects?

Şekil 3.18 Kurşun asit (jel) batarya için mikro şebeke sistem girdileri

3.3.2.5 Sevk Stratejisi Seçimi ve Formülasyon

Mikro şebeke sistemlerinde, güç kaynaklarının verimli kullanımı ve uygun dağıtımın sağlanması için üretim ve tüketimin optimize edilmesine yönelik çeşitli

yönetim stratejileri uygulanmaktadır. Yazılımda bu stratejiler kontrol cihazı ve enerji yönetim sistemi birimleri kullanılarak sistemin enerji yönetimini gerçekleştirmektedir. Homer Pro yazılımında bu optimizasyon süreci yük takibi, döngü şarjı, jeneratör sırası, Pro Matlab link, birleşik dağıtım, öngörülen tahmin ve zaman adımı içi dağıtım olmak üzere yedi farklı dağıtım stratejisi kullanılarak yapılabilmektedir. Dağıtım sistemleri karşılaştırıldığında literatürde yer alan araştırmalara göre yenilenebilir kaynaklar üzerinde en iyi etkiye sahip olan yük takibi stratejisinin uygun olduğu bulunmuştur [80].

Yük takibi stratejisinde en önemli öncelik yükün karşılanmasıdır. Böylece üretim kaynakları öncelikle yüke hizmet edecektir. Strateji aşırı elektriği ve karşılanamayan yükü minimize edecek ve sistemi mümkün olduğunca en optimum şekilde maliyetlendirmeye olanak sağlayacaktır. Stratejinin özelliğine göre değişken durumlar ve kısıtlamalar aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

1. Durum;

$$P_{fv}(t) + P_{rüz}(t) \geq P_{yük}(t) \quad (3.6)$$

$$P_{deşarj}(t) = 0 \quad (3.7)$$

Denklem 3.6' da da belirtildiği üzere fotovoltaik panellerden ve rüzgâr türbinlerinden üretilen enerji şebeke yükünü karşılıyorsa, denklem 3.7' de gösterilen batarya kullanım durumu sıfıra eşit olur. Burada $P_{yük}(t)$ t anında tüketilen gücünü, $P_{fv}(t)$ t anında üretilen fotovoltaik panel gücünü, $P_{rüz}(t)$ t anında üretilen rüzgâr türbini gücünü, $P_{deşarj}(t)$ ise t anında bataryadandeşarj edilen gücü göstermektedir.

2. Durum;

$$P_{fv}(t) + P_{rüz}(t) > P_{yük}(t) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8' de gösterildiği gibi fotovoltaik panellerden ve rüzgâr türbinlerinden üretilen enerji şebeke yükünden büyükse 2 farklı koşul oluşarak sistemin devamlılığı sağlanır.

Koşul 1:

$$P_{şarj}(t) = \min (B_{max} - B(t), \frac{P_{fv}(t) + P_{rüz}(t) - P_{yük}(t) - P_{to,kay}(t)}{\eta_{şarj}}) \quad (3.9)$$

Denklem 3.9' da görüldüğü üzere eğer batarya dolu değilse, fazla enerji minimum koşullarda batarya şarj edilerek bataryanın dolumu sağlanır. Burada; $P_{şarj}(t)$ t anında bataryaya şarj edilen gücü, B_{max} bataryanın maksimum kapasitesini, $B(t)$ t anındaki bataryanın şarj seviyesini, $P_{to,kay}(t)$ t anında toplam kayıp gücü göstermektedir.

Koşul 2:

$$P_{aşırı}(t) = P_{fv}(t) + P_{rüz}(t) - P_{yük}(t) - P_{şarj}(t) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10' da ki durumda ise, batarya dolu ise kullanılamayan aşırı elektrik gücünü oluşturmaktadır. Burada; $P_{aşırı}(t)$ t anındaki aşırı elektrik enerji gücünü göstermektedir.

3. Durum

$$P_{fv}(t) + P_{rüz}(t) < P_{yük}(t) \quad (3.11)$$

Denklem 11' de ki durumda ise fotovoltaik panellerden ve rüzgâr türbinlerinden üretilen enerji şebeke yükünden küçükse, 2 alt durum oluşmaktadır.

Durum 3.1:

$$P_{deşarj}(t) = \min \left(B(t), \frac{P_{yük}(t) + P_{to,kay}(t) - (P_{fv}(t) + P_{rüz}(t))}{\eta_{deşarj}} \right) \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'de, sistemin devamlılığı için batarya minimum koşulu sağlayacak şekildedeşarj edilir. Burada; $P_{deşarj}(t)$ t anında bataryadandeşarj edilen gücü, $\eta_{deşarj}$ ise batarya şarj verimliliğini göstermektedir.

Durum 3.2:

$$P_{unmet}(t) = P_{yük}(t) + P_{to,kay}(t) - (P_{fv}(t) + P_{rüz}(t) + (\eta_{deşarj} \cdot P_{deşarj}(t))) \quad (3.13)$$

Denklem 3.13' de ise, sistem kaynaklardan sağlanan güçle yükü karşılayamadığı için karşılanamayan yük gücü oluşmaktadır. Burada $P_{unmet}(t)$ t anında karşılanamayan yük gücünü göstermektedir.

Yukarıdaki durumlar gerçekleşirken batarya denklem 3.14' teki gibi sonraki adımdaki seviyesini bulabilmek için enerji dengesini sağlayamaya çalışır.

$$B(t + 1) = B(t) + \eta_{şarj} \cdot P_{şarj}(t) - \eta_{deşarj} \cdot P_{deşarj}(t) \quad (3.14)$$

Burada $B(t+1)$ bir sonraki adım için batarya seviyesini ifade eder.

Ayrıca sisteme girilen kısıtlamalarda denklem (3.15), (3.16) ve (3.17) de yer verilmiştir.

$$20\% = B_{min} \leq B(t) \leq B_{max} \quad (3.15)$$

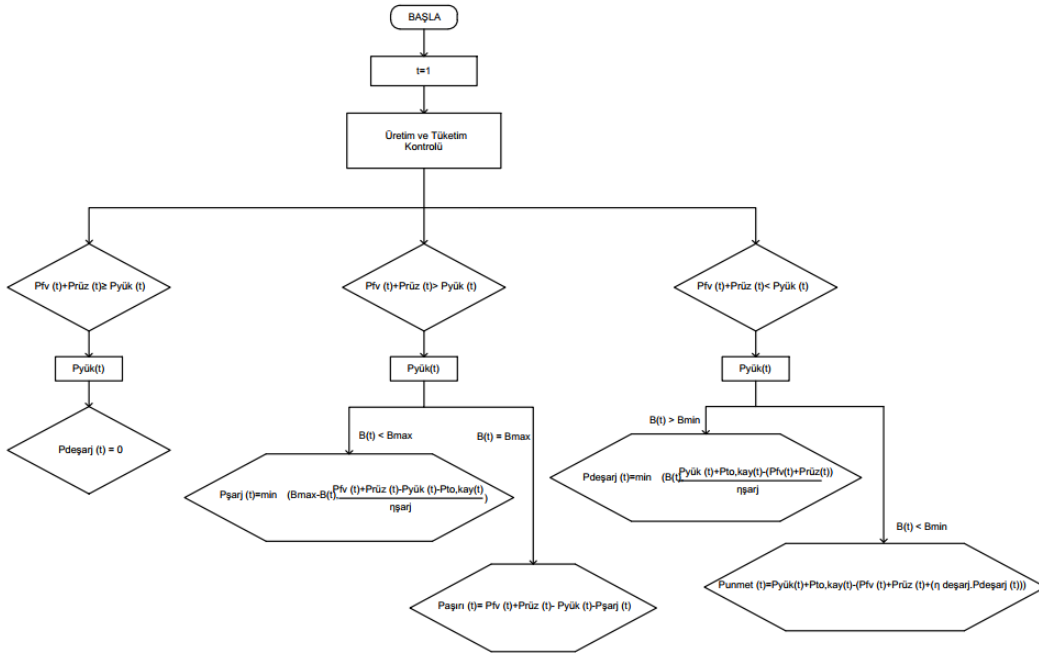
$$100\% = B(1) = B_{max} \quad (3.16)$$

Burada $B(1)$ batarya başlangıç kapasitesini ifade eder.

$$P_{unmet}(t), P_{aşırı}(t), P_{şarj}(t), P_{deşarj}(t) \geq 0 \quad (3.17)$$

Denklem 3.17 de gösterildiği gibi t anında karşılanamayan yük gücü, t anında aşırı elektrik gücü, t anında bataryaya şarj edilen güç ve t anında bataryadandeşarj edilen güç belirtildiği şekilde sınırlandırılmıştır.

Genel olarak yukarıda eşitliklerde belirtilen koşul ve durumların akış şeması Şekil 3.19' da ki gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 3.19 Yük takibi stratejisi akış şeması

Bu bağlamda çalışmada şebekeden bağımsız bir sistem olduğu için hem sistemin kesintisiz bir şekilde sürdürülmesi hedefi hem de net sıfır hedefi doğrultusunda kontrol cihazı ve enerji yönetim sistemi birimleri yük takibi stratejisi özellikli

seçilerek sisteme girilmiştir. Seçilen yük takibi kontrol cihazı ve enerji yönetim sistemi birimleri için sistem girdileri Şekil 3.20’ de ki gibi gösterilmiştir.

Component	Min Qty	Max Qty	Bus
Generator	0	20	AC or DC
Storage	0	10	DC
PV	0	10	AC or DC
WindTurbine	0	2	AC or DC
Converter	0	1	AC or DC
Boiler	0	1	Thermal
Hydroelectric	0	1	AC or DC
Hydrokinetic	0	1	AC or DC
Reformer	0	1	Hydrogen
Electrolyzer	0	1	AC or DC
HydrogenTan	0	1	Hydrogen
Grid	0	1	AC
ThermalLoadC	0	1	AC

Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
15,000.00	15,000.00	1,500.00

Lifetime time (years): 15.00

☒ Allow diesel-off Operation
☒ Allow generators to operate simultaneously
☒ Allow systems with generator capacity less than peak load

The load following strategy is a dispatch strategy whereby whenever a generator operates, it produces only enough power to meet the primary load. Lower-priority objectives such as

Şekil 3.20 Yük takibi kontrol cihazı ve enerji yönetim sistemi girdileri

3.3.2.6 Finansal Terimler

- Toplam Net Bugünkü Maliyet (T_{NBM})

Toplam net bugünkü maliyet, sistemin ilk sermaye maliyeti, bakım ve operasyon maliyeti, varsa yakıt maliyeti, sistem şebeke bağlantılı ise şebeke maliyeti vb. maliyetler bütünüdür. Hurda geliri, şebekeye elektrik satışı gibi faydalı kazançlardan çıkarılarak net maliyetin hesaplanması olarak ifade edilebilir. Toplam net bugünkü maliyet eşitlik 3.18’de, Sermaye geri kazanım faktörü eşitlik 3.19’da verilmiştir [81].

$$T_{NBM} = \frac{M_{yıl, top}}{SGF(i, N)} \quad (3.18)$$

$$SGF(i, N) = \frac{i * (1+i)^N}{[1+i]^N - 1} \quad (3.19)$$

T_{NBM} = Toplam net bugünkü maliyet

$M_{yıl, top}$ = Toplam yıllık maliyet

SGF = Sermaye geri kazanım faktörü

i = Yıllık reel faiz oranı

N= Proje ömrü (yıl)

Eşitlik 3.20' de yer alan yıllık reel faiz oranı hesabı ise eşitlik 3.21' de verilmiştir.

$$i = \frac{i' - 1}{1 + f} \quad (3.20)$$

i' = İndirim oranı

f= Enflasyon oranı

- Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE)

Seviyelendirilmiş enerji maliyeti, genel anlamda sistem tarafından üretilen faydalı elektrik enerjisinin kWh başına ortalama maliyeti olarak tanımlanır. Maliyet ve giderlerin üretilen enerjiye bölünmesi ile formüle edilir. Eşitlik 3.22' de verilmiştir [82].

$$SEM = \frac{M_{yıl,top}}{E_{ürt}} \quad (3.21)$$

M_{yıl,top} = Toplam yıllık maliyet

E_{ürt} : Yıllık üretilen enerji,

- Kurtarma (Hurda) Değeri

Kurtarma (hurda) değeri Homer Pro yazılımında “Salvage” olarak adlandırılmıştır. Bir varlığın ya da bileşenin ömrü sonunda sahip olduğu tahmini değeri ifade eder. Yani, bir ekipman, makine kullanıldıktan sonra ne kadar değere sahip olacağını gösterir. Genellikle, bir bileşenin ömrü sona erince satılabilir veya başka bir şekilde değerlendirilebilirse, bu değer hurda değeri olarak kabul edilir. Kurtarma değeri ile hesaplama eşitlik 3.22' de verilmiştir [83].

$$S = C_{değ} * \left(\frac{R_{kal}}{R_{bil}} \right) \quad (3.22)$$

S = Hurda değeri

C_{değ} = Bileşenlerin değişim maliyeti

R_{kal} = Kalan bileşen ömrü

R_{bil} = Bileşen ömrü

- Sermaye Maliyeti (Yatırımı)

Kurulan sistem başlangıç maliyeti de denilebilir. Simülasyon sonuçlarında “Capital” olarak adlandırılmıştır.

- Basit Geri Ödeme Süresi

Bir yatırımın sermaye maliyetinin, yıllık net kazanç ile ne kadar sürede yatırımın geri kazanılacağını gösteren süredir. Genel olarak hesaplaması eşitlik 3.23’ te verilmiştir [84].

$$\text{Basit Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Sermaye maliyeti}}{\text{Ortalama Yıllık Net kazanç}} \quad (3.23)$$

- İç Karlılık (Getiri) Oranı

Bir yatırım veya projenin yatırıma değer olup olmadığına karar vermek için kullanılan finansal bir ölçüttür. Genel olarak hesaplaması eşitlik 3.24’ te verilmiştir [85].

$$0 = \sum_{n=1}^N \frac{G_{yıl,net}}{(1+İKO)^n} - M_{ser} \quad (3.24)$$

$G_{yıl,net}$ = Yıllık net gelir

N = Proje ömrü (yıl)

$İKO$ = İç karlılık oranı

M_{ser} = Sermaye maliyeti

Bu bölümde, tasarımı yapılan şebekeden bağımsız FV/Rüzgâr/Batarya kaynaklı mikro şebekenin farklı senaryolarda teknik ve ekonomik sonuçları incelenmiştir. Senaryolar kendi içinde farklı depolama sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup belirtilen üretim ve tüketim koşullarında değerlendirmeleri yapılmıştır.

Senaryolar kendi içinde benzer sistem kısıtlamaları altında değerlendirildiğinden ortak olan üretim analizleri “Enerji Kaynaklarının Tekno-Ekonomik Analizleri” bölümünde verilerek detaylandırılmıştır. Ayrıca tüketim ilgili verilerde “Tüketim Verileri” bölümünde detaylandırılmıştır.

Senaryolara genel olarak bakıldığında;

Senaryo 1; Bir rüzgâr türbini, Çatı GES, depolama sistemleri ve normal tüketim değerleri ile,

Senaryo 2; Bir rüzgâr türbini, Çatı GES, depolama sistemleri ve 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 tasarruflu tüketim kısıtlamasıyla,

Senaryo 3; Çatı GES, arazi GES, depolama sistemleri ve 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 tasarruflu tüketim kısıtlamasıyla,

Senaryo 4; Çatı GES, arazi GES, depolama sistemleri ve 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 kalan 9,5 aylık kesim için %5 tasarruflu tüketim kısıtlamasıyla,

Değerlendirilmiş teknik ve ekonomik sonuçlar elde edilmiştir. Senaryo 1 hariç diğer 3 senaryoda da tüketim kısıtlamasıyla tüketimin pik yaptığı dönemlerde tasarrufa gidilerek maliyetlerin azaltılması amaçlanmıştır. Burada tasarruflar genel itibariyle;

Aydınlatma sistemlerinde verimli armatür ve az kullanılan yerlerde hareket sensörleri kullanılarak, klima ve iklimlendirme sistemlerinde kullanımın otomasyon sistemleri kontrolü ile daha verimli kullanılmasıyla, elektronik cihazlarda enerji tasarruflu modellerin kullanımı veya kullanım durumuna göre uyku moduna alınmasıyla ve genel olarak kullanıcı odaklı uyarılar yapılarak gereksiz kullanımların azaltılması gibi öneriler kapsamında ele alınmıştır.

Ayrıca sonuçlarda yer alan basit geri ödeme süresi ve iç karlılık oranı verileri de simülasyondan alınan detaylı veriler kullanılarak Microsoft Excel ortamında hesaplanarak her senaryodaki model için sonuçlara eklenmiştir. Basit geri ödeme süresi ve iç karlılık oranı için kullanılan şebeke tüketim tarife fiyatı ve şebekeye geri satış fiyatı verileri EPDK'dan alınan tek terimli “Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile diğer” tarifesini üzerinden KDV dahil olarak hesaplanmıştır. Fazla enerjinin şebekeye satışı ise yine EPDK'dan alınan tek terimli “Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile diğer” fiyatından Lisanssız Üretici-2 fiyatı çıkartılarak hesaplanmıştır [86]. Ayrıca yapılan hesaplamalar tarife fiyatına en yakın zamandaki kur fiyatı kullanılarak Amerikan dolarına çevrilmiştir [87]. Hesaplar ile ilgili detaylar Tablo 4.1’ de verilmiştir.

Tablo 4.1. Şebeke tüketim tarife ve şebekeye satış fiyatları

Şebeke Tüketim Tarife Fiyatı	351,56 krş	0,1301 \$
Şebekeye Satış Fiyatı	240,91 krş	0,081 \$

4.1 Enerji Kaynaklarının Tekno-Ekonomik Analizleri

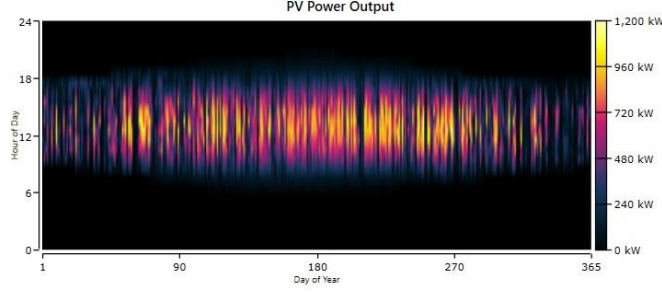
4.1.1 Fotovoltaik Sistemin Tekno-Ekonomik Analizleri

Homer Pro programında konum, iklim ve kullanılan bileşen girdilerine göre fotovoltaik sistem ile ilgili analiz sonuçları senaryolarda belirtilen durumlara (çatı ve çatı + arazi GES) göre detaylandırılmıştır.

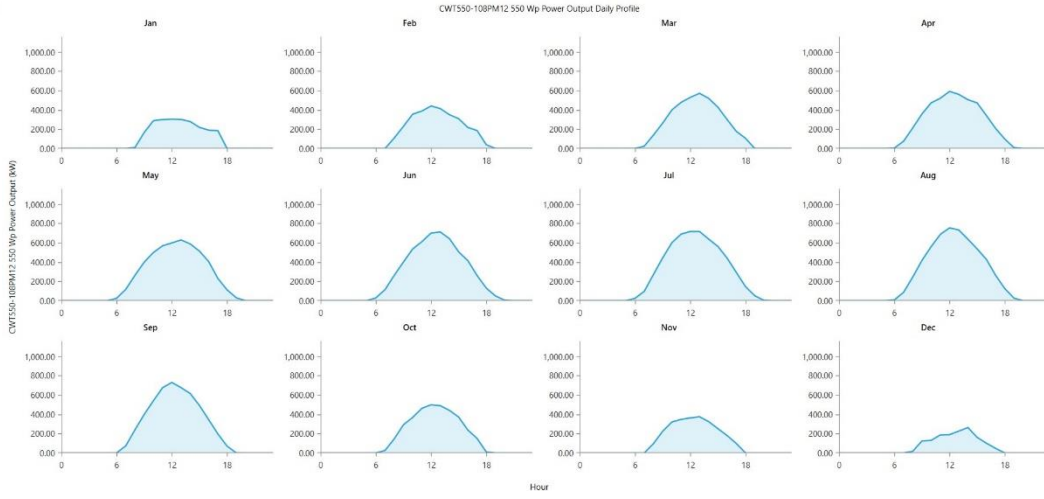
Çatı GES için Şekil 4.1 incelendiğinde 1286 kWp kurulu güçlü fotovoltaik panel sisteminin ortalama çıkış gücü 166 kW, maksimum çıkış gücü 1158 kW olup kapasite faktörü %12.9 olarak bulunmuştur. Fotovoltaik sistemin penetrasyonu %113 ve yıllık ortalama üretim 1455190 kWh’ tir. Sistemin yıllık çalışma saati 4391 saat olup yaz aylarının diğer aylara kıyasla solar radyasyonunun ve güneşli saatlerin yüksek olması sebebiyle üretimin daha fazla olduğu Şekil 4.2’ de görülmektedir. Ayrıca ekonomik açıdan güncel finansal parametrelere göre seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0.0283 \$/kWh olarak bulunmuştur.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	1,286	kW
Mean Output	166	kW
Mean Output	3,987	kWh/d
Capacity Factor	12.9	%
Total Production	1,455,190	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	1,158	kW
PV Penetration	113	%
Hours of Operation	4,391	hrs/yr
Levelized Cost	0.0283	\$/kWh
Clipped production	0	kWh



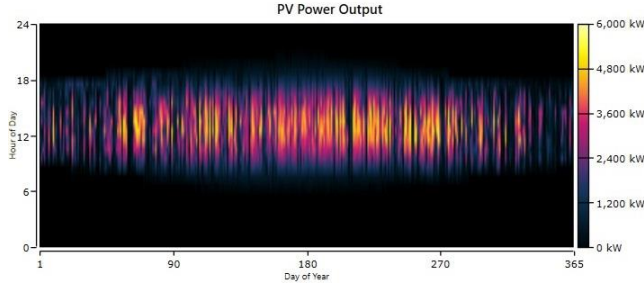
Şekil 4.1 Çatı fotovoltaik sistem analiz sonuçları



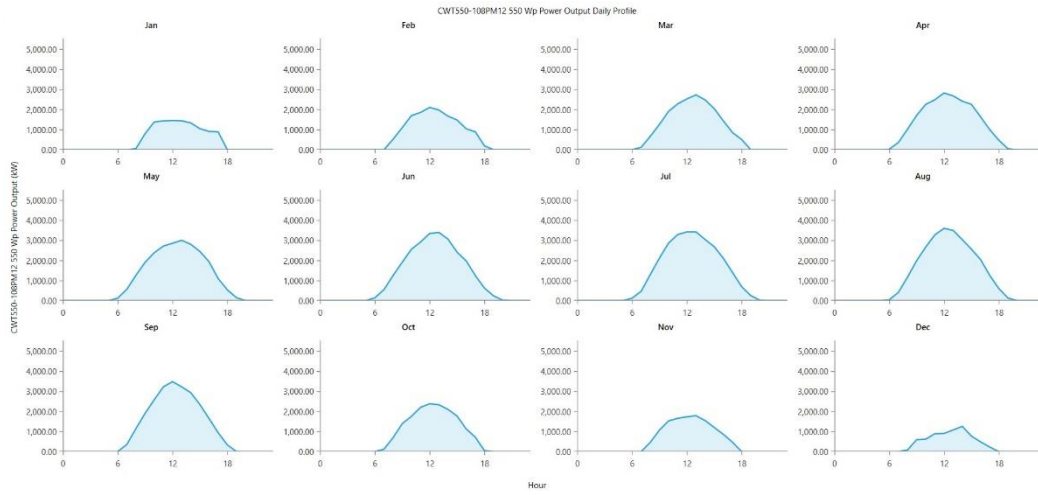
Şekil 4.2 Çatı fotovoltaik sistemin aylara göre günlük güç çıkışı profili

Çatı ve Arazi GES için veriler ise Şekil 4.3' te detaylı olarak verilmiş olup 6146 kWp kurulu güçlü fotovoltaik panel sisteminin ortalama çıkış gücü 794 kW, maksimum çıkış gücü 5534 kW olup kapasite faktörü %12.9 olarak bulunmuştur. Fotovoltaik sistemin penetrasyonu %568 ve yıllık ortalama üretim 6954788 kWh' tir. Sistemin yıllık çalışma saati 4391 saat olup yaz aylarının diğer aylara kıyasla solar radyasyonunun ve güneşli saatlerin yüksek olması sebebiyle üretimin daha fazla olduğu Şekil 4.4' de görülmektedir. Ayrıca ekonomik açıdan güncel finansal parametrelere göre seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0.0283 \$/kWh olarak bulunmuştur.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated Capacity	6,146	kW	Minimum Output	0	kW
Mean Output	794	kW	Maximum Output	5,534	kW
Mean Output	19,054	kWh/d	PV Penetration	568	%
Capacity Factor	12.9	%	Hours of Operation	4,391	hrs/yr
Total Production	6,954,788	kWh/yr	Levelized Cost	0.0283	\$/kWh
			Clipped production	0	kWh



Şekil 4.3 Çatı ve arazi fotovoltaik sistem analiz sonuçları



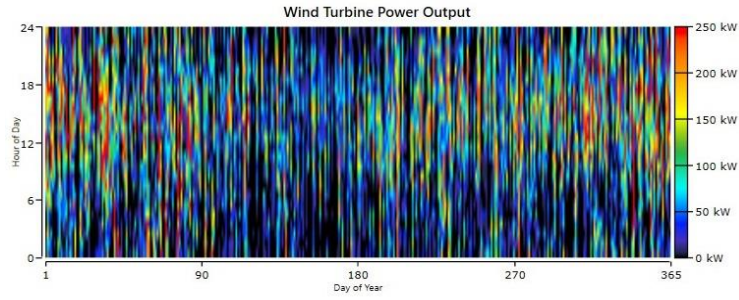
Şekil 4.4 Çatı ve arazi fotovoltaik sistemin aylara göre günlük güç çıkışı profili

4.1.2 Rüzgâr Türbini Sisteminin Tekno-Ekonomik Analizleri

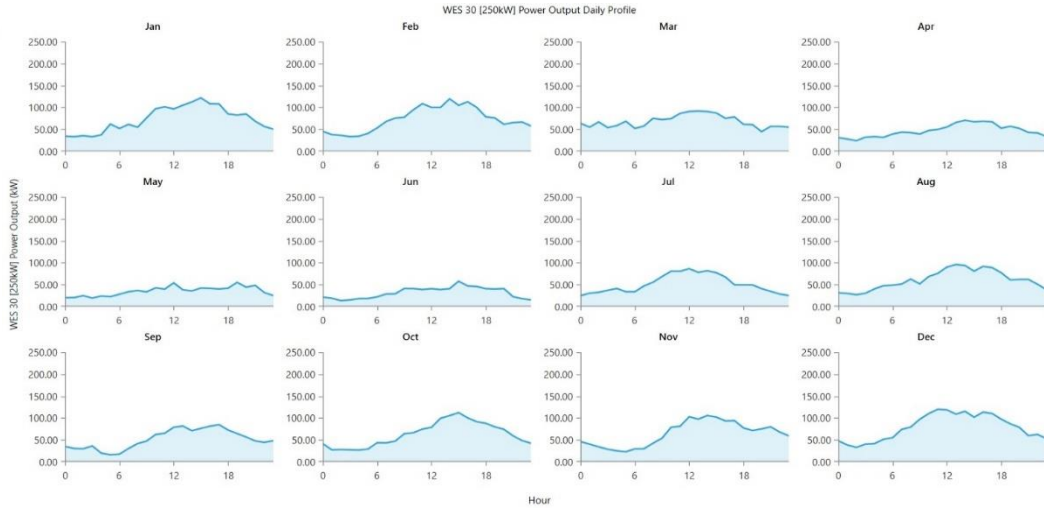
Homer Pro programında konum, iklim ve kullanılan bileşen girdilerine göre rüzgâr türbini sistemi ile ilgili analiz sonuçları Şekil 4.5’ te detaylı olarak gösterilmiştir. Sistem genel olarak incelendiğinde 250 kWp kurulu güçlü rüzgâr türbini sisteminin ortalama çıkış gücü 58.1 kW, maksimum çıkış gücü 250 kW olup kapasite faktörü %23.2 olarak bulunmuştur. Rüzgâr türbini sisteminin penetrasyonu %39.6 ve yıllık ortalama üretim 508822 kWh’ tir. Sistemin yıllık çalışma saati 7268 saat olup aylara göre günlük güç çıkışı profili Şekil 4.6’ da gösterildiği gibidir. Ayrıca ekonomik açıdan güncel finansal parametrelere göre seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0.178 \$/kWh olarak bulunmuştur.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	250	kW
Mean Output	58.1	kW
Capacity Factor	23.2	%
Total Production	508,822	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	250	kW
Wind Penetration	39.6	%
Hours of Operation	7,268	hrs/yr
Levelized Cost	0.178	\$/kWh



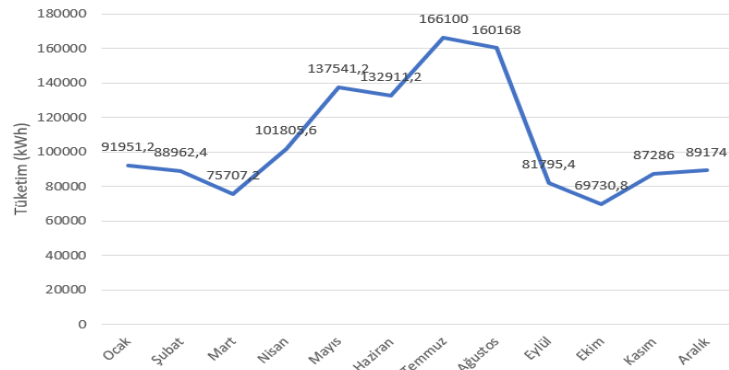
Şekil 4.5 Rüzgâr türbini sisteminin analiz sonuçları



Şekil 4.6 Rüzgâr türbini sisteminin aylara göre günlük güç çıkışı profili

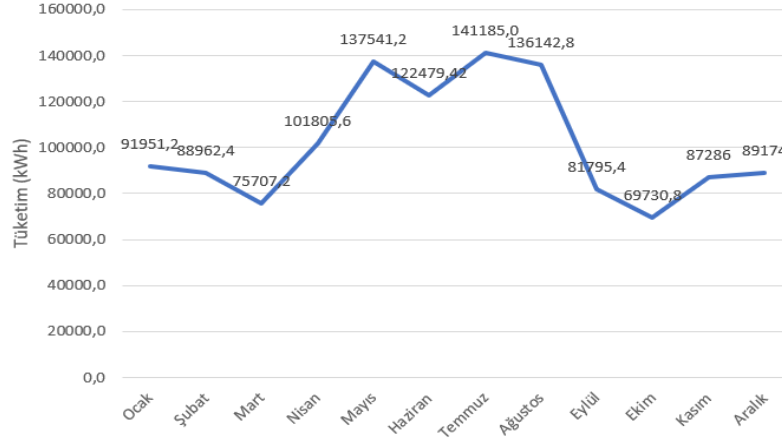
4.2 Tüketim Verileri

Fakültenin Tablo 3.2’ de de verildiği üzere yıllık tüketim değeri 1283133 kWh’ tir. Tüketimin aylara göre değeri grafiği Şekil 4.7’ de verilmiştir.



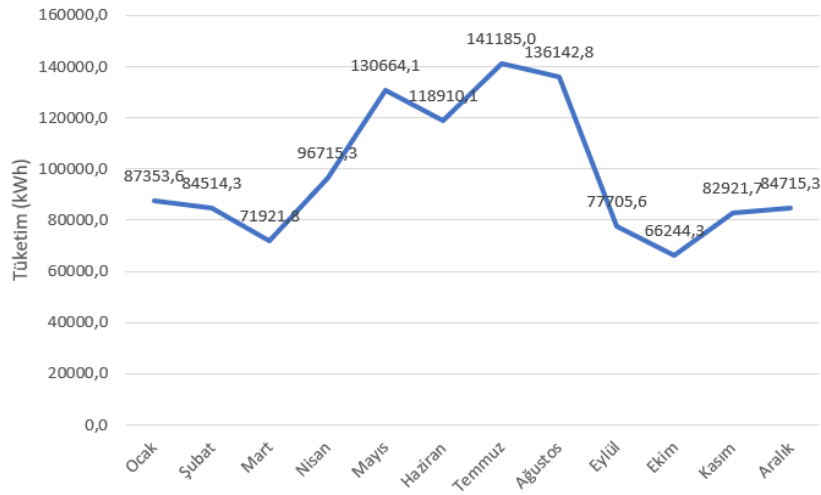
Şekil 4.7 Fakültenin aylara göre tüketim bilgileri

Sistemde maliyetleri azaltmak için Senaryo 2 ve Senaryo 3'te kullanılan 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 tasarruflu tüketimin toplam değeri ise 1223761 kWh olup aylara göre değer grafiği detaylı olarak Şekil 4.8' de verilmiştir. Ayrıca yıllık ortalama tüketim 3353,15 kWh olup, pik tüketim ise 412,42 kWh'tir.



Şekil 4.8 Fakültenin 2,5 aylık %15 tasarruflu aylara göre tüketim bilgileri

Aynı şekilde sistemde maliyetleri azaltmak için Senaryo 4' te kullanılan 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 ve kalan 9,5 aylık kesim için %5 tasarruflu tüketimin toplam değeri ise 1178994 kWh olup aylara göre değer grafiği detaylı olarak Şekil 4.9' da verilmiştir. Ayrıca yıllık ortalama tüketim 3231,47 kWh olup, pik tüketim ise 412,42 kWh'tir.



Şekil 4.9 Fakültenin 2,5 aylık %15 ve 9,5 aylık %5 tasarruflu aylara göre tüketim bilgileri

4.3 Senaryoların Gelişmiş Depolama Sistemlerine Göre Tekno-Ekonomik Analizleri

4.3.1 Senaryo 1 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları

Bir rüzgâr türbini, Çatı GES, depolama sistemleri ve normal tüketim değerlerinde oluşan Senaryo 1 için Şekil 4.10’ da üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri detaylı olarak gösterilmektedir. Burada yükün mevcut üretimden karşılandığı ve depolama sistemine ihtiyaç olmadığı durumlarda ise elektrik üretim fazlalığı oluşturmaktadır. Ve bu durum kullanılan depolama sistemlerine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 4.10 Senaryo 1 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri

Ayrıca kullanılan depolama sistemleri farklı olduğu için depolama sistemlerinin boyutlandırılmasında da farklılıklar oluşmaktadır. Depolama sistemleri ile ilgili teknik veriler Şekil 4.11’ de detaylı olarak gösterilmiştir.

50KW250KWH Containerized VFRB			GTEM-700V250KW-264KWH-R			PBH-768200			SMA Commercial Storage 50		
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Autonomy	153	hr	Autonomy	127	hr	Autonomy	133	hr	Autonomy	127	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh	Storage Wear Cost	0	\$/kWh	Storage Wear Cost	0	\$/kWh	Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	27,998	kWh	Nominal Capacity	23,262	kWh	Nominal Capacity	24,269	kWh	Nominal Capacity	23,247	kWh
Usable Nominal Capacity	22,399	kWh	Usable Nominal Capacity	18,609	kWh	Usable Nominal Capacity	19,415	kWh	Usable Nominal Capacity	18,598	kWh
Lifetime Throughput	14,907,096	kWh	Lifetime Throughput	12,937,285	kWh	Lifetime Throughput	7,965,649	kWh	Lifetime Throughput	7,716,613	kWh
Expected Life	25.0	yr	Expected Life	25.0	yr	Expected Life	15.0	yr	Expected Life	15.0	yr
NAS battery			Supercapacitor battery 5Y1126V169KWh31R			OT200-12(GEL)/CN (GEL)					
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units			
Autonomy	142	hr	Autonomy	127	hr	Autonomy	171	hr			
Storage Wear Cost	0.0648	\$/kWh	Storage Wear Cost	0	\$/kWh	Storage Wear Cost	1.37	\$/kWh			
Nominal Capacity	26,096	kWh	Nominal Capacity	23,316	kWh	Nominal Capacity	27,888	kWh			
Usable Nominal Capacity	20,877	kWh	Usable Nominal Capacity	18,653	kWh	Usable Nominal Capacity	22,310	kWh			
Lifetime Throughput	11,053,028	kWh	Lifetime Throughput	12,989,802	kWh	Lifetime Throughput	4,553,150	kWh			
Expected Life	20.0	yr	Expected Life	25.0	yr	Expected Life	8.00	yr			

Şekil 4.11 Senaryo 1 farklı depolama sistemlerine göre teknik veriler

Şekilde de görüldüğü üzere en fazla boyutlandırma şarj-deşarj verimliliğinin en az olan vanadyum akış bataryalı modelde görülmüştür. En düşük boyutlandırma ise şarj-deşarj verimliliğinin en fazla olan Lityum Nikel temelli batarya da görülmektedir.

Modellerin ekonomik sonuçları ise Tablo 4.2’ de ki gibi detaylandırılmıştır.

Tablo 4.2. Senaryo 1 için farklı depolama modellerine göre ekonomik sonuçlar

Batarya Tipi	Batarya Birim enerji kapasitesi maliyeti (\$/kWh)	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (\$/kWh)	Yatırım (Sermaye) Maliyeti (\$)	Toplam Net Bugünkü Maliyet (\$)
Vanadyum Redoks Akış	1265	2.07	37148600	39347593
Katı Hal	921	1.28	23141596	24346644
LiFePO4	310	0.7118	9303997	13517771
Li-NCM	1230	2.32	30144885	44057833
NAS	436.4	0.8866	13093820	16837427
Süperkapasitör	750.8	1.1	19226829	20792159
Kurşun asit (Jel)	222.9	0.8841	7940015	16783285

Tablo 4.2 detaylı olarak incelendiğinde seviyelendirilmiş enerji maliyeti en yüksek modelin Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu, yatırım maliyeti en yüksek model ise vanadyum akış bataryalı model olduğu görülmektedir. Toplam net bugünkü maliyette ise yine Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu

görülmüştür. Diğer taraftan yatırım maliyeti en düşük Kurşun asit batarya temelli model olduğu görülse de hem seviyelendirilmiş enerji maliyeti hem de toplam net bugünkü maliyeti açısından en düşük modelin LiFePO4 batarya temelli model olduğu görülmektedir.

Ayrıca sistemler için daha öncede belirtildiği üzere basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı hesapları da yapılmıştır. Gelir olarak tasarruf edilen tüketim maliyeti, aşırı elektrikten elde edilen kazanç ve hurda değeri gösterilmiş olup Giderlerde ise bakım, onarım, işletme ve değişim maliyetlerinin toplamı alınmıştır. Belirtilen değerler Tablo 4.3’ te detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Senaryo 1 için farklı depolama modellerine göre gelir ve gider durumu

Batarya Tipi	Tasarruf edilen toplam tüketim maliyeti (\$)	Aşırı üretimden elde edilen toplam kazanç (\$)	Hurda değeri (\$)	Toplam gider (\$)	Yıllık ortalama net gelir (\$)
Vanadyum Redoks Akış	4173801	912746,1	819822	4505330	56041,57
Katı Hal	4173801	1252412,9	826458	2832337	136813,39
LiFePO4	4173801	1196250,3	3350108	10308138	-63519,15
Li-NCM	4173801	1265201,7	10297071	33281001	-701797,1
NAS	4173801	1103867,2	9359204	15332686	-27832,55
Süperkapasitör	4173801	1243435,8	821239	3436104	112094,87
Kurşun asit (Jel)	4173801	1033300,7	6262827	21240731	-390832,1

Basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı sonuçları ise Tablo 4.4’ te detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Senaryo 1 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı

Batarya Tipi	Basit geri ödeme süresi (Yıl)	İç karlılık oranı (%)
Vanadyum Redoks Akış	>25	-14,24
Katı Hal	>25	-10,24
LiFePO4	>25	-8,3
Li-NCM	>25	-11,15
NAS	>25	-7,31
Süperkapasitör	>25	-10,13
Kurşun asit (Jel)	>25	-16,74

Tablo 4.4’ te ki sonuçlara göre basit geri ödeme süreleri tasarlanan sistem ömründen çok yüksek olduğu için >25 olarak yazılmıştır. Zaten iç karlılık oranı değerlerinden de anlaşılacağı üzere Senaryo 1 için kullanılan tasarımın yatırım olarak uygun olmadığı tespit edilmiştir.

4.3.2 Senaryo 2 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları

Bir rüzgâr türbini, Çatı GES, depolama sistemleri ve 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 tasarruflu tüketim kısıtlamasında oluşan Senaryo 2 için Şekil 4.12’ de üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri detaylı olarak gösterilmektedir. Burada yükün mevcut üretimden karşılandığı ve depolama sistemine ihtiyaç olmadığı durumlarda ise elektrik üretim

fazlalığı oluşturmaktadır. Ve bu durum kullanılan depolama sistemlerine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 4.12 Senaryo 2 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri

Ayrıca kullanılan depolama sistemleri farklı olduğu için depolama sistemlerinin boyutlandırılmasında da farklılıklar oluşmaktadır. Depolama sistemleri ile ilgili teknik veriler Şekil 4.13’ de detaylı olarak gösterilmiştir.

Quantity	Value	Units
Autonomy	116	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	20,249	kWh
Usable Nominal Capacity	16,199	kWh
Lifetime Throughput	13,931,105	kWh
Expected Life	25.0	yr

Quantity	Value	Units
Autonomy	98.4	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	17,182	kWh
Usable Nominal Capacity	13,745	kWh
Lifetime Throughput	12,099,381	kWh
Expected Life	25.0	yr

Quantity	Value	Units
Autonomy	102	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	17,818	kWh
Usable Nominal Capacity	14,254	kWh
Lifetime Throughput	7,447,897	kWh
Expected Life	15.0	yr

Quantity	Value	Units
Autonomy	97.4	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	17,010	kWh
Usable Nominal Capacity	13,608	kWh
Lifetime Throughput	7,214,462	kWh
Expected Life	15.0	yr

Quantity	Value	Units
Autonomy	108	hr
Storage Wear Cost	0.0648	\$/kWh
Nominal Capacity	18,847	kWh
Usable Nominal Capacity	15,078	kWh
Lifetime Throughput	10,333,829	kWh
Expected Life	20.0	yr

Quantity	Value	Units
Autonomy	98.7	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	17,234	kWh
Usable Nominal Capacity	13,787	kWh
Lifetime Throughput	12,148,707	kWh
Expected Life	25.0	yr

Quantity	Value	Units
Autonomy	132	hr
Storage Wear Cost	1.07	\$/kWh
Nominal Capacity	20,477	kWh
Usable Nominal Capacity	16,381	kWh
Lifetime Throughput	4,258,945	kWh
Expected Life	8.00	yr

Şekil 4.13 Senaryo 2 farklı depolama sistemlerine göre teknik veriler

Şekilde de görüldüğü üzere en fazla boyutlandırma Senaryo 1’den farklı olarak kurşun asit (jel) bataryalı modelde görülmüştür. En düşük boyutlandırma ise Senaryo 1’de olduğu gibi şarj-deşarj verimliliği en fazla olan Lityum Nikel temelli batarya da görülmektedir.

Modellerin ekonomik sonuçları ise Tablo 4.5’ de ki gibi detaylandırılmıştır.

Tablo 4.5. Senaryo 2 için farklı depolama modellerine göre ekonomik sonuçlar

Batarya Tipi	Batarya Birim enerji kapasitesi maliyeti (\$/kWh)	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (\$/kWh)	Yatırım (Sermaye) Maliyeti (\$)	Toplam Net Bugünkü Maliyet (\$)
Vanadyum Redoks Akış	1265	1.61	27339015	29078336
Katı Hal	921	1.02	17509456	18521703
LiFePO4	310	0.5745	7212222	10404303
Li-NCM	1230	1.8	22361467	32591251
NAS	436.4	0.7041	9910745	12751515
Süperkapasitör	750.8	0.8788	14630460	15911761
Kurşun asit (Jel)	222.9	0.716	6311345	12964899

Tablo 4.5 detaylı olarak incelendiğinde seviyelendirilmiş enerji maliyeti en yüksek modelin Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu, yatırım maliyeti en yüksek model ise vanadyum akış bataryalı model olduğu görülmektedir. Toplam net bugünkü maliyette ise yine Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu görülmüştür. Diğer taraftan yatırım maliyeti en düşük Kurşun asit batarya temelli model olduğu görülse de hem seviyelendirilmiş enerji maliyeti hem de toplam net bugünkü maliyeti açısından en düşük modelin LiFePO4 batarya temelli model olduğu görülmektedir.

Ayrıca sistemler için daha öncede belirtildiği üzere basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı hesapları da yapılmıştır. Gelir olarak tasarruf edilen tüketim maliyeti, aşırı elektrikten elde edilen kazanç ve hurda değeri gösterilmiş olup Giderlerde ise bakım, onarım, işletme ve değişim maliyetlerinin toplamı alınmıştır. Belirtilen değerler Tablo 4.6’ da detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Senaryo 2 için farklı depolama modellerine göre gelir ve gider durumu

Batarya Tipi	Tasarruf edilen toplam tüketim maliyeti (\$)	Aşırı üretimden elde edilen toplam kazanç (\$)	Hurda değeri (\$)	Toplam gider (\$)	Yıllık ortalama net gelir (\$)
Vanadyum Redoks Akış	3980675	1064907,0	819304	372226	85466,38
Katı Hal	3980675	1381127,9	814215	2495007	147240,42
LiFePO4	3980675	1328833,7	2652850	7920962	1655,85
Li-NCM	3980675	1393416,1	7702598	24598582	-460875,7
NAS	3980675	1242467,1	6979894	11517760	27411,03
Süperkapasitör	3980675	1372697,9	811676	2947165	128715,34
Kurşun asit (Jel)	3980675	1173653,5	4825127	16084950	-244219,8

Basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı sonuçları ise Tablo 4.7’ de detaylı olarak gösterilmiştir.

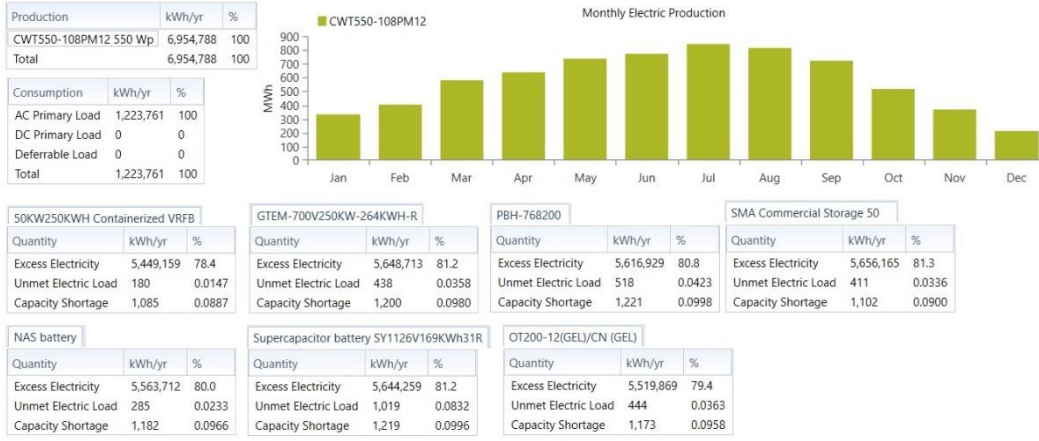
Tablo 4.7. Senaryo 2 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı

Batarya Tipi	Basit geri ödeme süresi (Yıl)	İç karlılık oranı (%)
Vanadyum Redoks Akış	>25	-12,29
Katı Hal	>25	-8,77
LiFePO4	>25	-7,05
Li-NCM	>25	-10,69
NAS	>25	-6,50
Süperkapasitör	>25	-8,48
Kurşun asit (Jel)	>25	-15,12

Tablo 4.7’ de ki sonuçlara göre basit geri ödeme süreleri tasarlanan sistem ömründen çok yüksek olduğu için >25 olarak yazılmıştır. Zaten iç karlılık oranı değerlerinden de anlaşılacağı üzere Senaryo 2 için kullanılan tasarımın yatırım olarak uygun olmadığı tespit edilmiştir.

4.3.3 Senaryo 3 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları

Çatı GES, arazi GES, depolama sistemleri ve 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 tasarruflu tüketim kısıtlamasında oluşan Senaryo 3 için Şekil 4.14’ te üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri detaylı olarak gösterilmektedir. Burada yükün genel olarak mevcut üretimden karşılandığı ve depolama sistemine ihtiyaç olmadığı durumlarda ise elektrik üretim fazlalığı oluşturmaktadır. Ve bu durum kullanılan depolama sistemlerine göre farklılık göstermektedir.

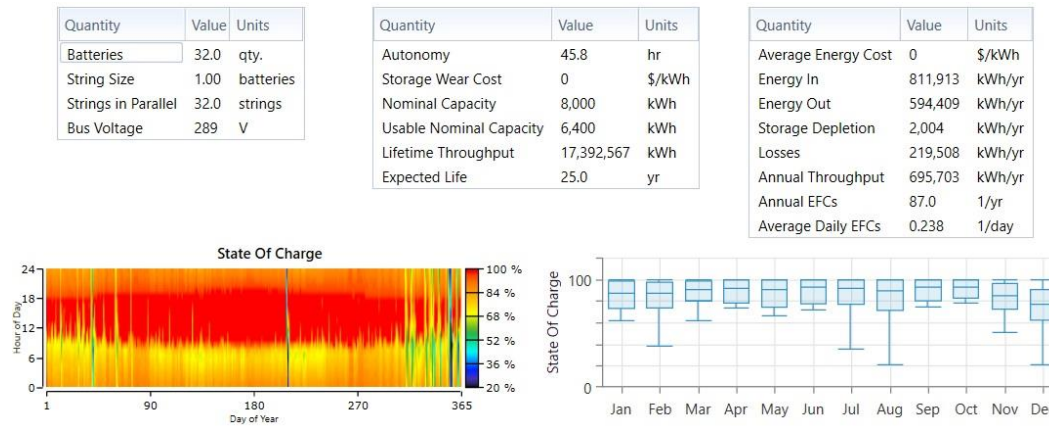


Şekil 4.14 Senaryo 3 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri

4.3.3.1 Vanadyum Redoks Akış Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

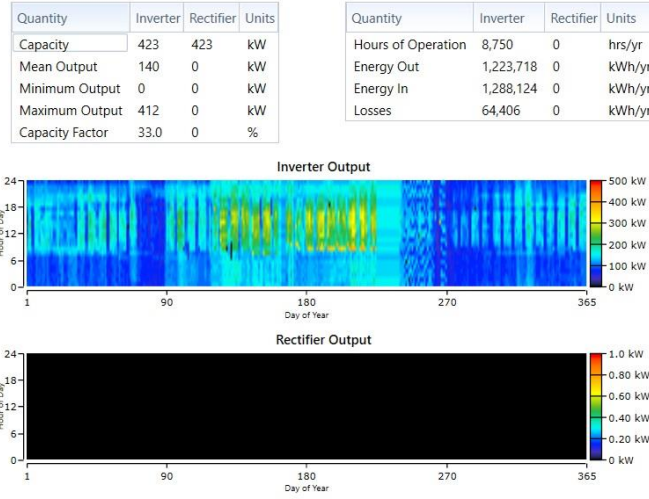
32 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 8000 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 819913 kWh enerji girişi ve 594409 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 45.8 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.15’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Vanadyum redoks akış bataryası teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

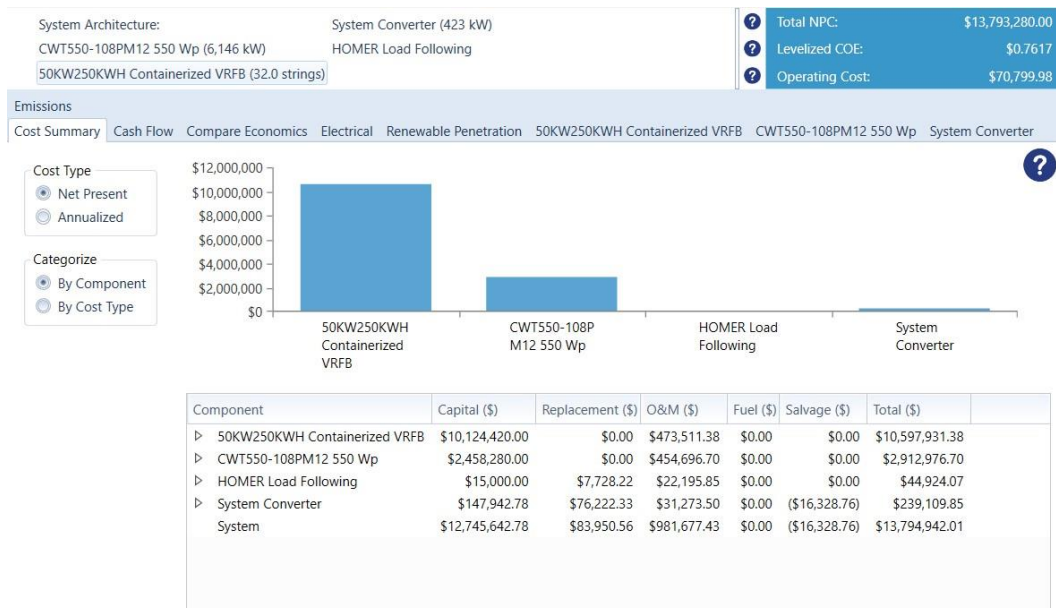
Dönüştürücünün kapasitesi 423 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.16’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Vanadyum redoks akış bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 12745642\$, toplam net bugünkü maliyeti 13794942\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.7617 \$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.17’ deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %79.4’ lük bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

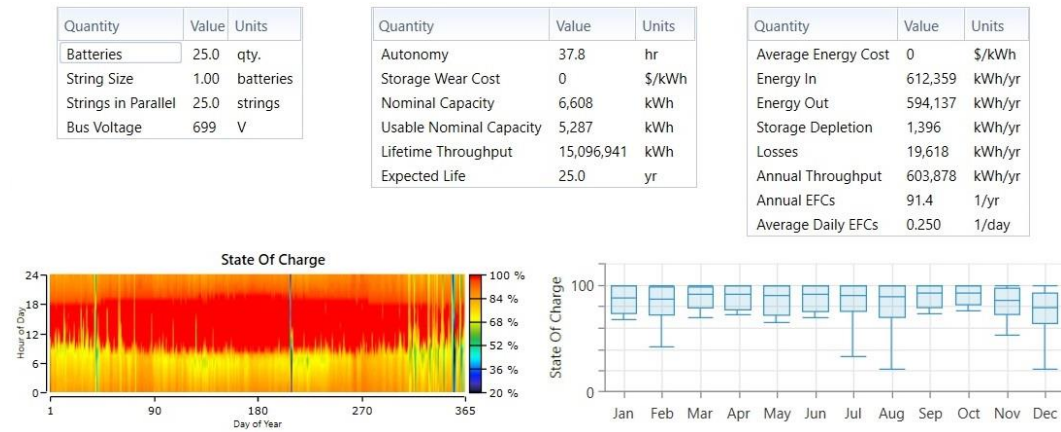


Şekil 4.17 Vanadyum akış bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.3.2 Katı Hal Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

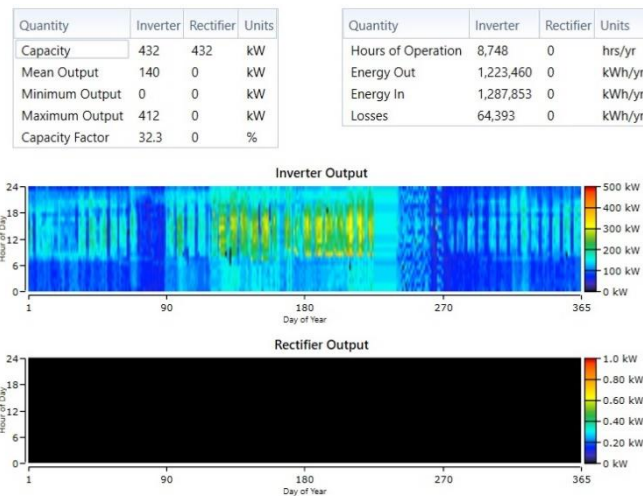
25 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 6608 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 612359 kWh enerji girişi ve 594137 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 37.8 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Katı hal bataryası teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

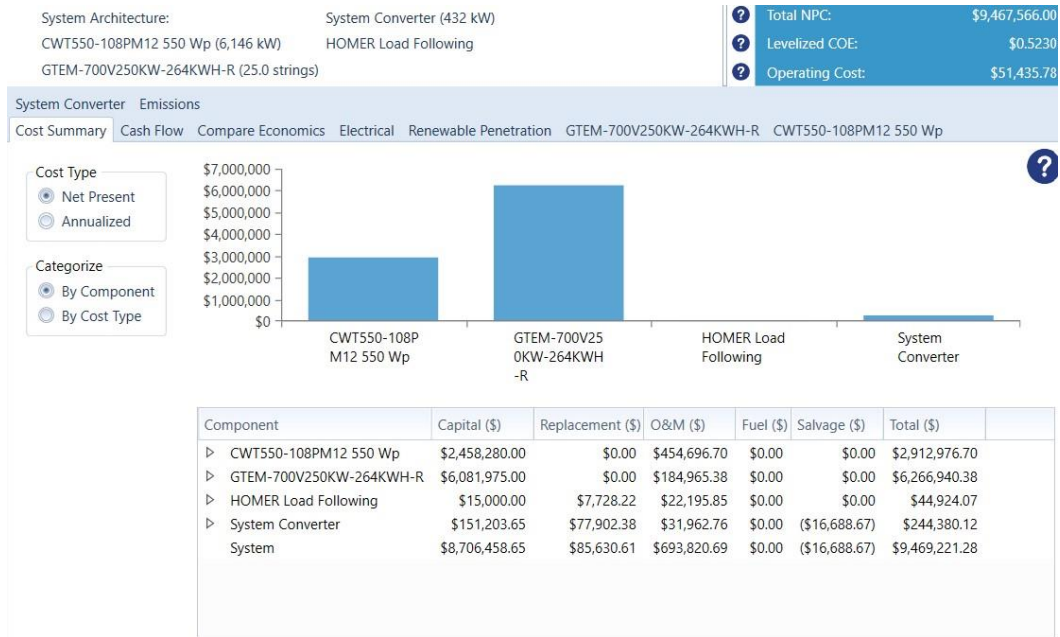
Dönüştürücünün kapasitesi 432 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.19’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Katı hal bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 8706458\$, toplam net bugünkü maliyeti 9469221\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.523 \$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.20’deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %69.8’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.20 Katı hal bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.3.3 Lityum Demir Fosfat (LiFePo4) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

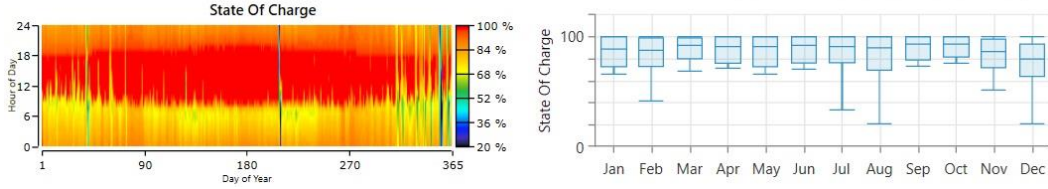
Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

2’li seri 22 adet paralel dizi halinde 44 adet batarya kullanılmış olup 6758 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 644143 kWh enerji girişi ve 594053 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 38.7 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

Quantity	Value	Units
Batteries	44.0	qty.
String Size	2.00	batteries
Strings in Parallel	22.0	strings
Bus Voltage	1,536	V

Quantity	Value	Units
Autonomy	38.7	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	6,758	kWh
Usable Nominal Capacity	5,407	kWh
Lifetime Throughput	9,290,152	kWh
Expected Life	15.0	yr

Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	0	\$/kWh
Energy In	644,143	kWh/yr
Energy Out	594,053	kWh/yr
Storage Depletion	1,503	kWh/yr
Losses	51,593	kWh/yr
Annual Throughput	619,343	kWh/yr
Annual EFCs	91.6	1/yr
Average Daily EFCs	0.251	1/day



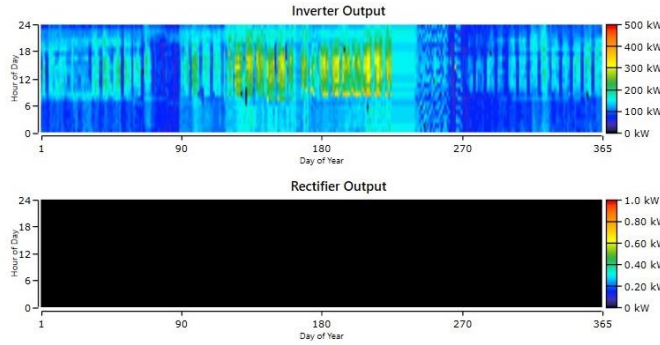
Şekil 4.21 Lityum demir fosfat batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

Dönüştürücünün kapasitesi 445 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.22’ de gösterilmiştir.

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	445	445	kW
Mean Output	140	0	kW
Minimum Output	0	0	kW
Maximum Output	412	0	kW
Capacity Factor	31.4	0	%

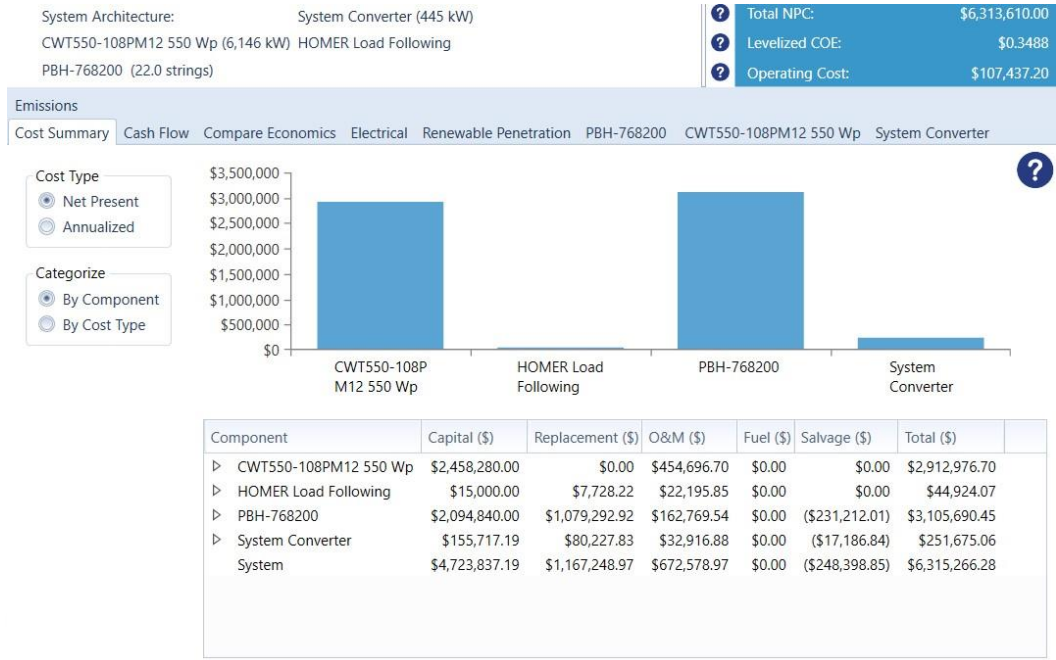
Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of Operation	8,748	0	hrs/yr
Energy Out	1,223,381	0	kWh/yr
Energy In	1,287,769	0	kWh/yr
Losses	64,388	0	kWh/yr



Şekil 4.22 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 4723837\$, toplam net bugünkü maliyeti 6315266\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.3488 \$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.23’ deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %44.3’lük bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

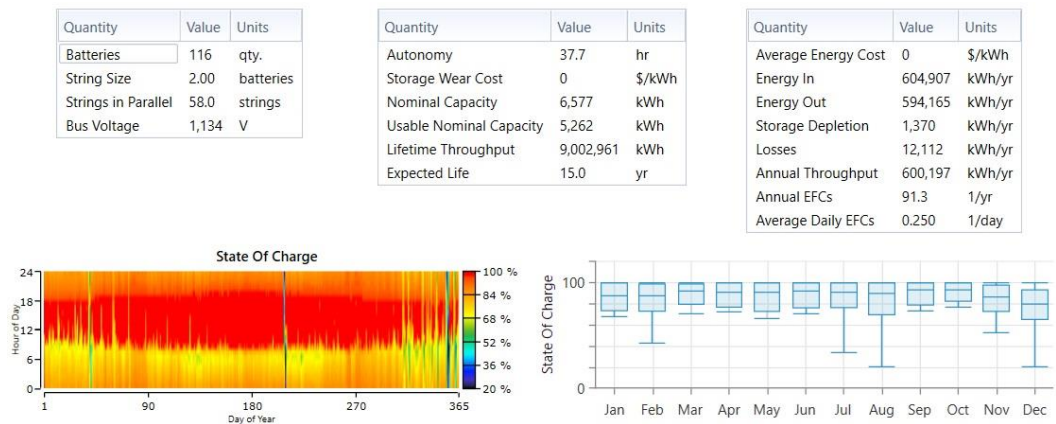


Şekil 4.23 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.3.4 Lityum Nikel Kobalt Manganez (Li-NCM) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

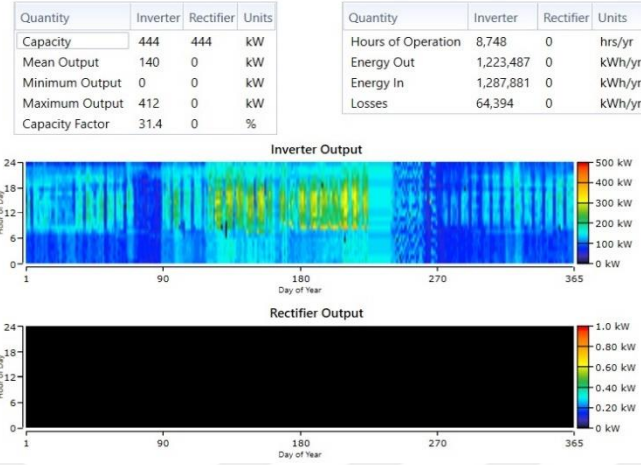
2'li seri 58 adet paralel dizi halinde 116 adet batarya kullanılmış olup 6577 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 604907 kWh enerji girişi ve 594165 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 37.7 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.24' de gösterilmiştir.



Şekil 4.24 Lityum nikel kobalt manganez batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

Dönüştürücünün kapasitesi 444 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.25’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.25 Lityum nikel kobalt manganez bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 10618327\$, toplam net bugünkü maliyeti 14948237\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.8256\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.26’ da ki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %75.2’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

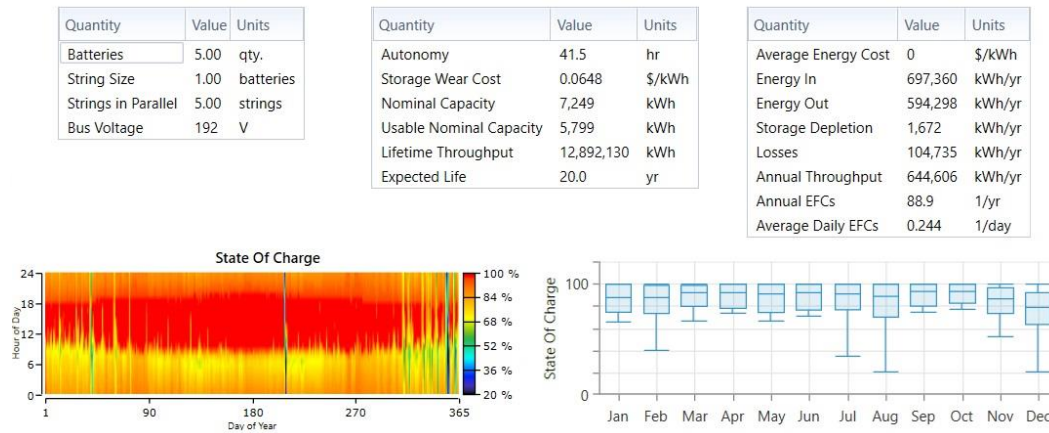


Şekil 4.26 Lityum nikel kobalt manganez bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.3.5 Sodyum Sülfür (NAS) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

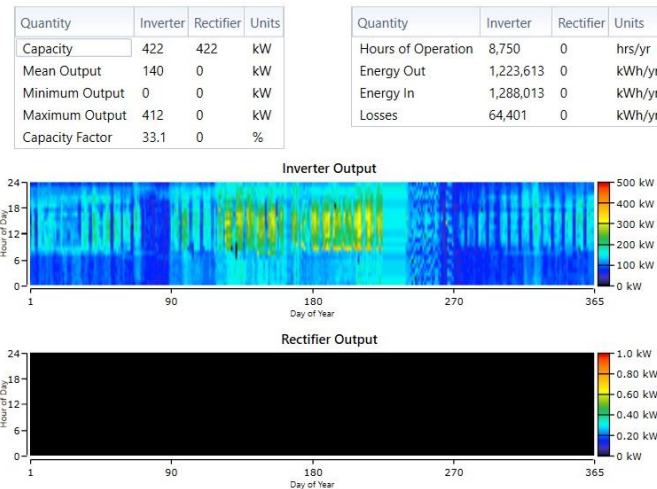
5 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 7249 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 697360 kWh enerji girişi ve 594298 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 41.5 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.27’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Sodyum sülfür batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

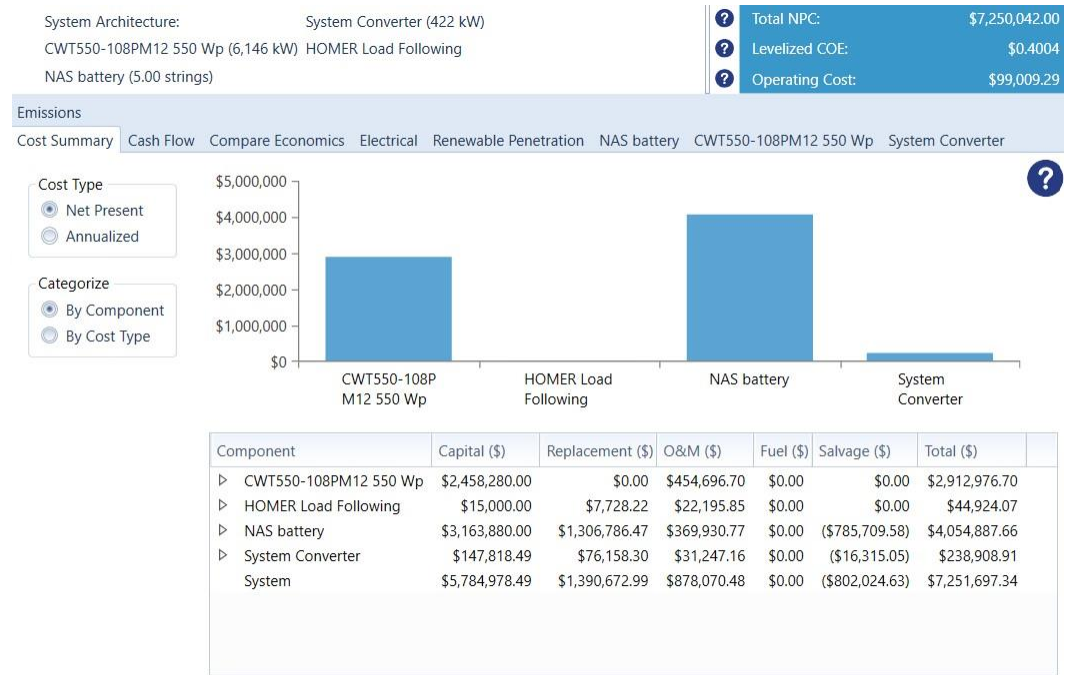
Dönüştürücünün kapasitesi 422 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.28’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 Sodyum sülfür bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 5784978\$, toplam net bugünkü maliyeti 7251697\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.4004\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.29’ da ki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %54.7’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

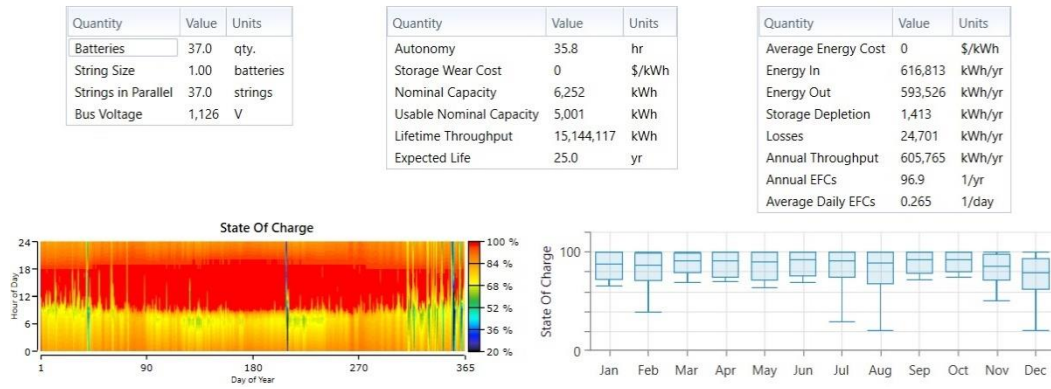


Şekil 4.29 Sodyum sülfür bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.3.6 Süper kapasitörlü Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

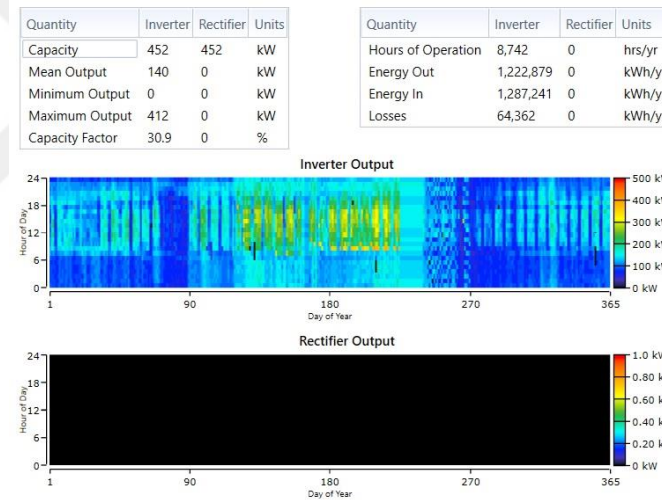
37 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 6252 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 616813 kWh enerji girişi ve 593526 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 35.8 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.30’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.30 Süper kapasitör teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

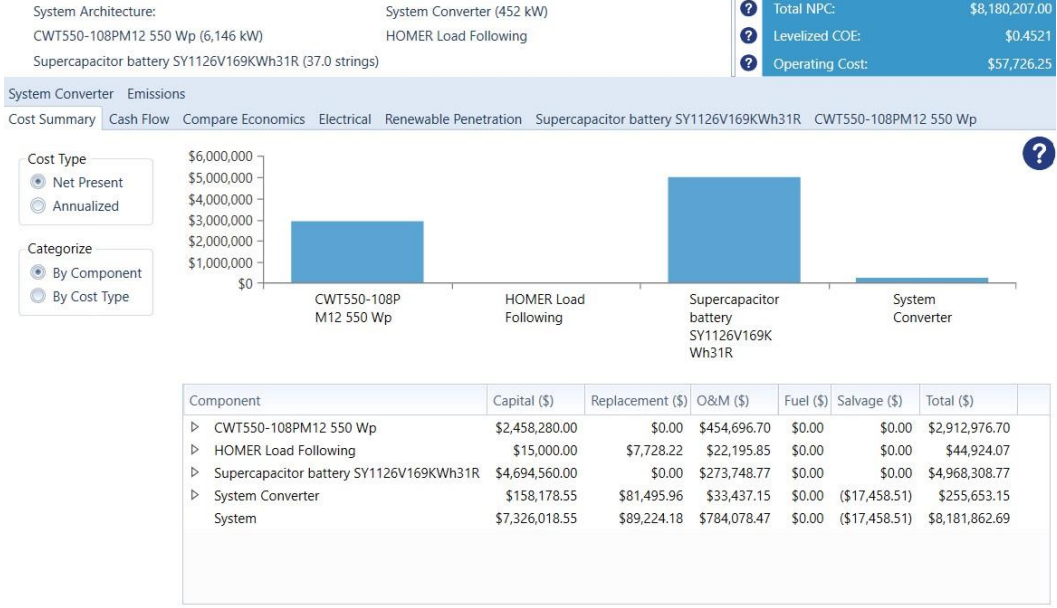
Dönüştürücünün kapasitesi 452 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.31’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.31 Süper kapasitörlü sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 7326018\$, toplam net bugünkü maliyeti 8181862\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.4521\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.32’ deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %64.1’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

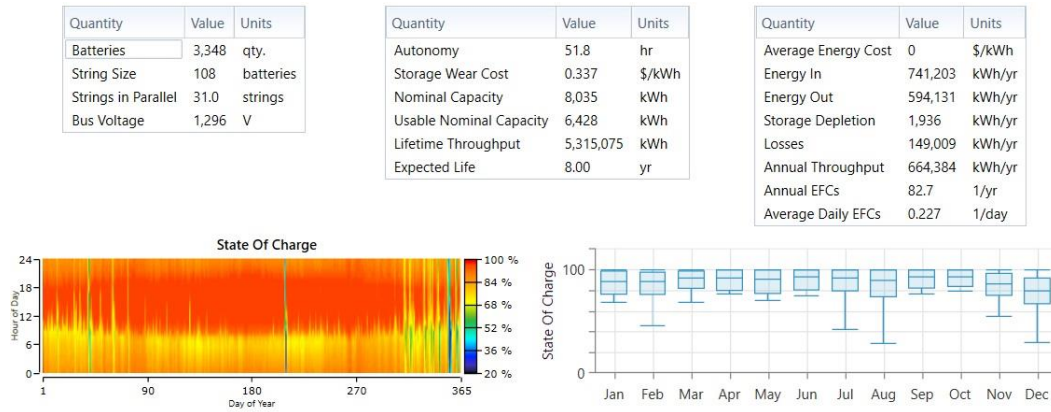


Şekil 4.32 Süper kapasitörlü sistemin ekonomik sonuçları

4.3.3.7 Kurşun Asit (Jel) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

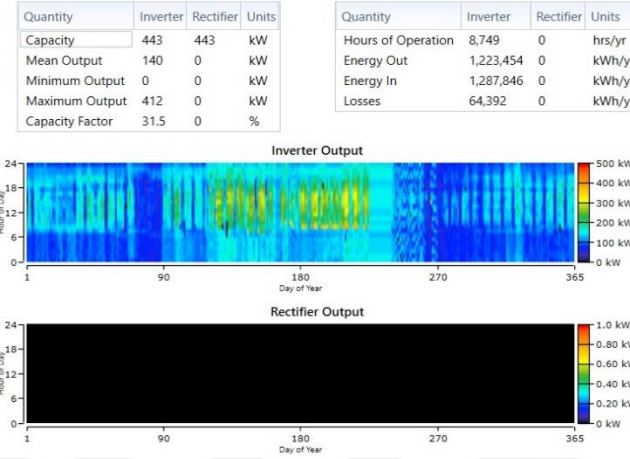
108'li seri 31 paralel dizi halinde 3348 adet batarya kullanılmış olup 8035 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 741203 kWh enerji girişi ve 594131 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 51.8 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.33' te gösterilmiştir.



Şekil 4.33 Kurşun asit (jel) batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

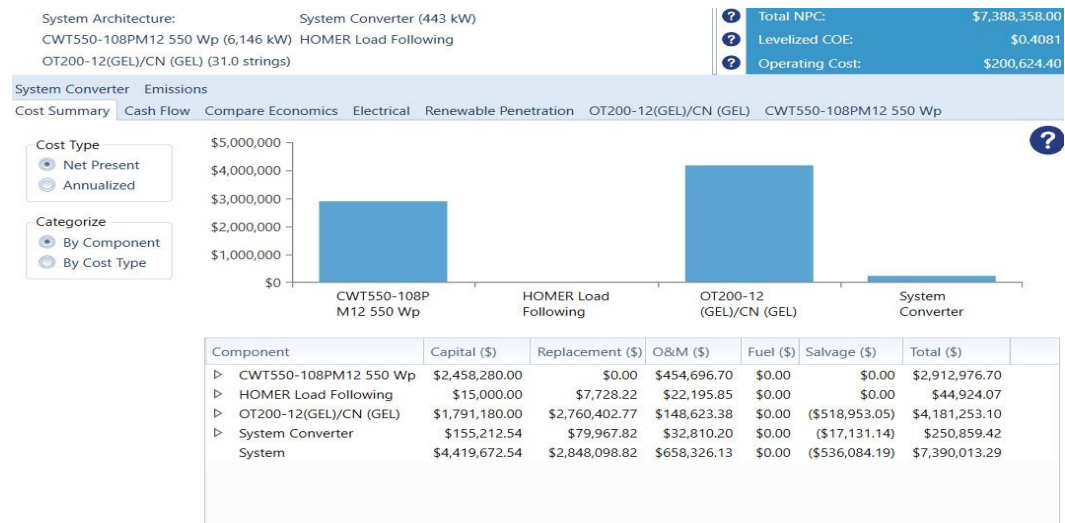
Dönüştürücünün kapasitesi 443 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 140 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.34’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.34 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 4419672\$, toplam net bugünkü maliyeti 7390013\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.4081\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.35’ teki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %40.5’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.35 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

Yukarıda detaylı olarak verilen sonuçlar incelendiğinde seviyelendirilmiş enerji maliyeti en yüksek modelin Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu, yatırım maliyeti en yüksek model ise vanadyum akış bataryalı model olduğu görülmektedir. Toplam net bugünkü maliyette ise yine Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu görülmüştür. Diğer taraftan yatırım maliyeti en düşük Kurşun asit batarya temelli model olduğu görülse de hem seviyelendirilmiş enerji maliyeti hem de toplam net bugünkü maliyeti açısından en düşük modelin LiFePO4 batarya temelli model olduğu görülmektedir.

Ayrıca sistemler için daha öncede belirtildiği üzere basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı hesapları da yapılmıştır. Gelir olarak tasarruf edilen tüketim maliyeti, aşırı elektrikten elde edilen kazanç ve hurda değeri gösterilmiş olup Giderlerde ise bakım, onarım, işletme ve değişim maliyetlerinin toplamı alınmıştır. Belirtilen değerler Tablo 4.8’ da detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.8 Senaryo 3 için farklı depolama modellerine göre gelir- gider durumu

Batarya Tipi	Tasarruf edilen toplam tüketim maliyeti (\$)	Aşırı üretimden elde edilen toplam kazanç (\$)	Hurda değeri (\$)	Toplam gider (\$)	Yıllık ortalama net gelir (\$)
Vanadyum Redoks Akış	3980675	11042357,9	49314	1821493	530034,14
Katı Hal	3980675	11446740,8	50401	1338429	565575,49
LiFePO4	3980675	11382332,6	750186	3401907	508451,45
Li-NCM	3980675	11461841,8	2715016	9891323	330648,37
NAS	3980675	11274491,9	2422183	4810223	514685,06

Tablo 4.8 Senaryo 3 için farklı depolama modellerine göre gelir- gider durumu
(devamı)

Süperkapasitör	3980675	11437715,1	52726	1497904	558928,46
Kurşun asit (Jel)	3980675	11185647	1619021	6656003	405173,58

Basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı sonuçları ise Tablo 4.9’ da detaylı olarak gösterilmiştir.

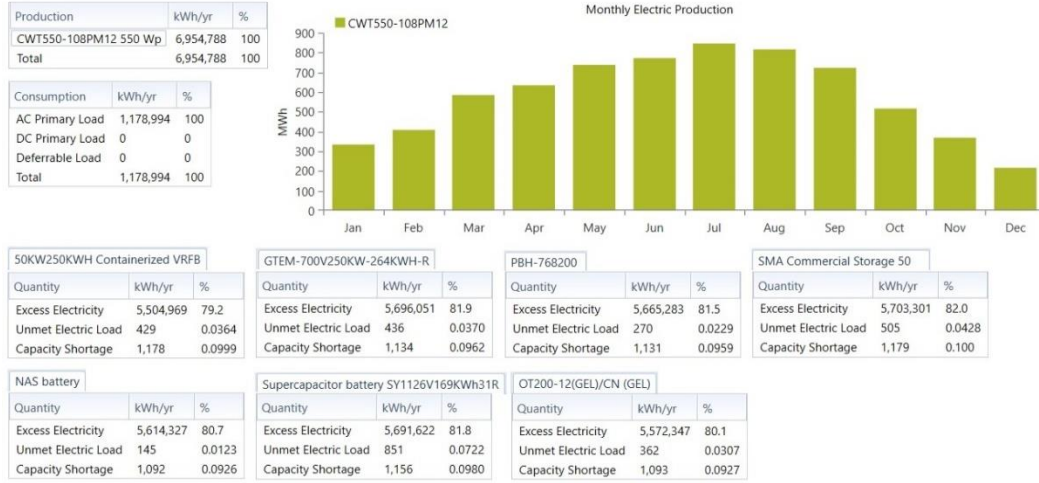
Tablo 4.9 Senaryo 3 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı

Batarya Tipi	Basit geri ödeme süresi (Yıl)	İç karlılık oranı (%)
Vanadyum Redoks Akış	24,05	0,3
Katı Hal	15,39	4,14
LiFePO4	9,29	9,91
Li-NCM	32,11	-1,56
NAS	11,24	7,4
Süperkapasitör	13,11	5,74
Kurşun asit (Jel)	10,91	7,97

4.3.4 Senaryo 4 için Tekno-Ekonomik Analiz Sonuçları

Çatı GES, arazi GES, depolama sistemleri, 2,5 aylık yaz dönemi (16 Haziran-31 Ağustos) %15 tasarruflu ve kalan 9,5 ay için %5 tasarruflu tüketim kısıtlamasından oluşan Senaryo 4 için Şekil 4.36’ da üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine

göre aşırı elektrik verileri detaylı olarak gösterilmektedir. Burada yükün genel olarak mevcut üretimden karşılandığı ve depolama sistemine ihtiyaç olmadığı durumlarda ise elektrik üretim fazlalığı oluşturmaktadır. Ve bu durum kullanılan depolama sistemlerine göre farklılık göstermektedir.

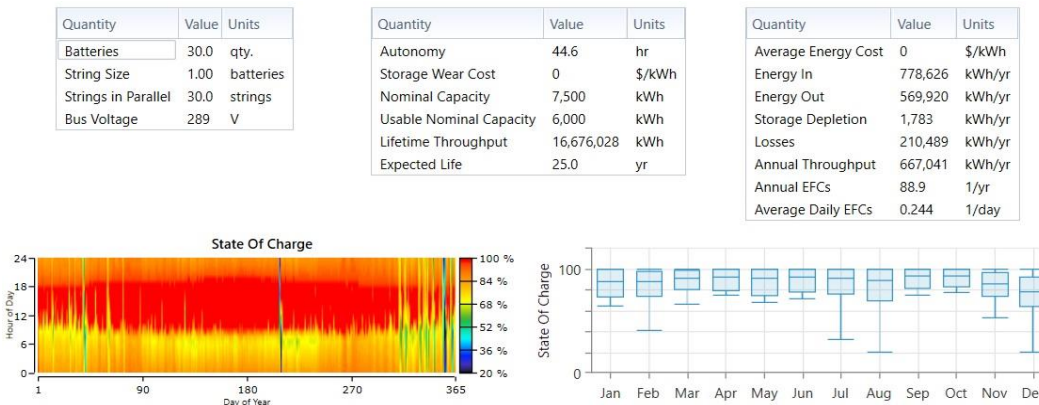


Şekil 4.36 Senaryo 4 üretim, tüketim ve farklı depolama sistemlerine göre aşırı elektrik verileri

4.3.4.1 Vanadyum Redoks Akış Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

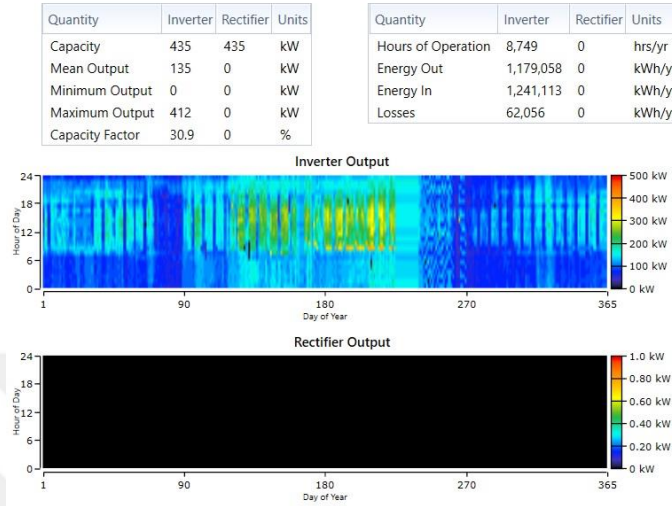
30 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 7500 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 778626 kWh enerji girişi ve 569920 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 44.6 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



Şekil 4.37 Vanadyum redoks akış bataryası teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

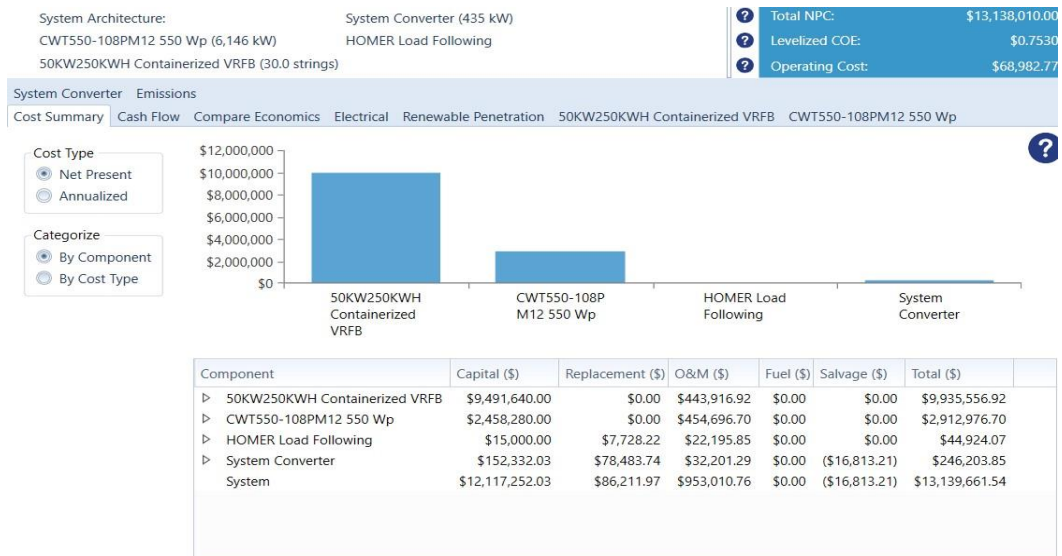
Dönüştürücünün kapasitesi 435 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.38’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.38 Vanadyum redoks akış bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 12117252\$, toplam net bugünkü maliyeti 13139661\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.753 \$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.39’ da ki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %78.3’lük bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.39 Vanadyum akış bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.4.2 Katı Hal Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

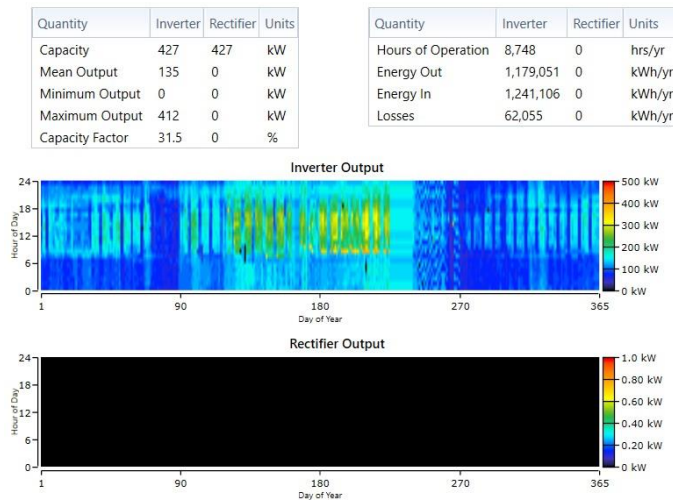
24 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 6344 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 587544 kWh enerji girişi ve 569913 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 37.7 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.40’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.40 Katı hal bataryası teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

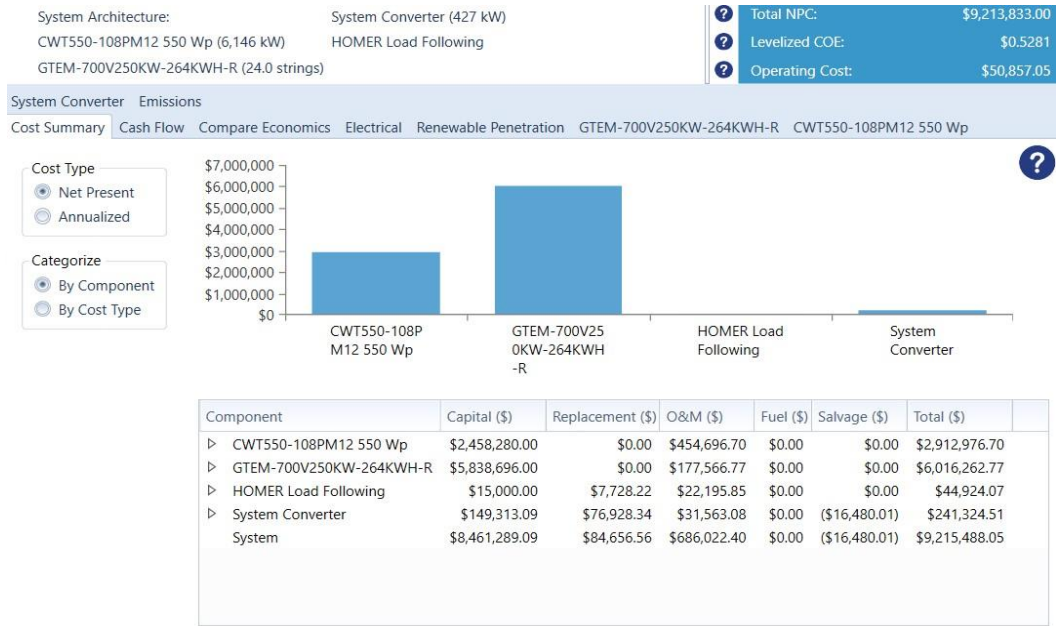
Dönüştürücünün kapasitesi 427 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.41’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.41 Katı hal bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 8461289\$, toplam net bugünkü maliyeti 9215488\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.5281 \$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.42’deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %69’ luk bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

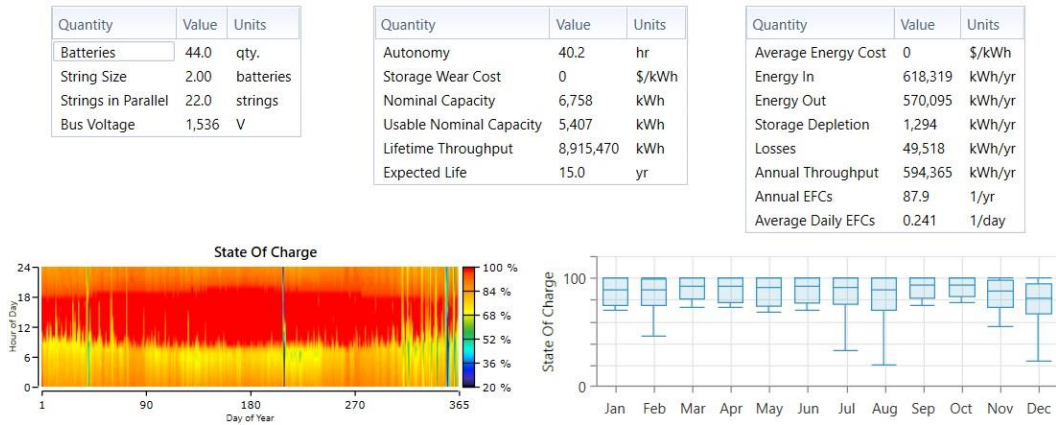


Şekil 4.42 Katı hal bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.4.3 Lityum Demir Fosfat (LiFePo4) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

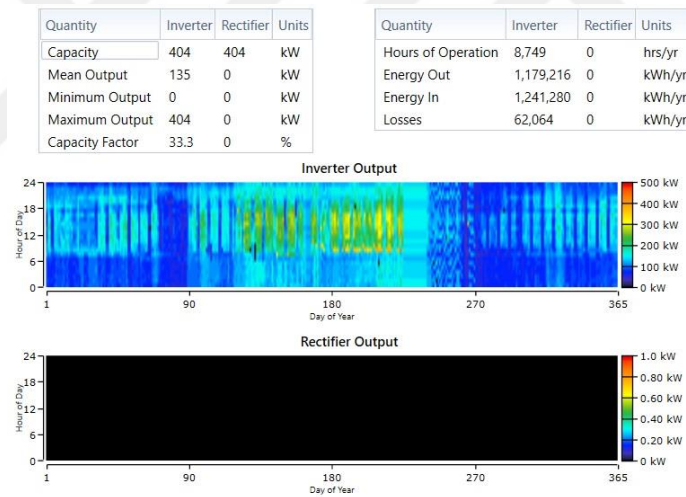
2’li seri 22 adet paralel dizi halinde 44 adet batarya kullanılmış olup 6758 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 618319 kWh enerji girişi ve 570095 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 40.2 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.43’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.43 Lityum demir fosfat batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

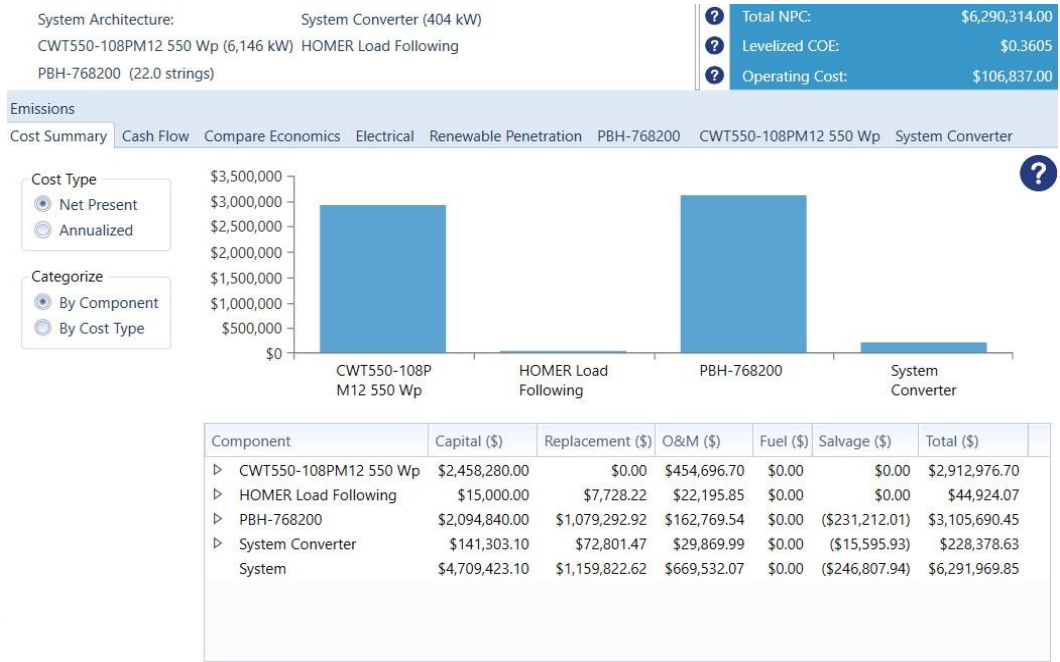
Dönüştürücünün kapasitesi 404 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.44' de gösterilmiştir.



Şekil 4.44 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 4709423\$, toplam net bugünkü maliyeti 6291969\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.3605\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.45' deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %44.4'lük bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.45 Lityum demir fosfat bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.4.4 Lityum Nikel Kobalt Manganer (Li-NCM) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

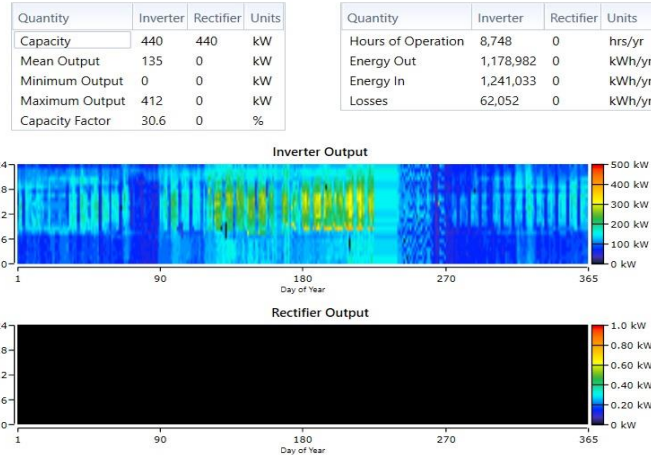
2'li seri 55 adet paralel dizi halinde 110 adet batarya kullanılmış olup 6237 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 580294 kWh enerji girişi ve 569840 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 37.1 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.46' da gösterilmiştir.



Şekil 4.46 Lityum nikel kobalt manganer batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

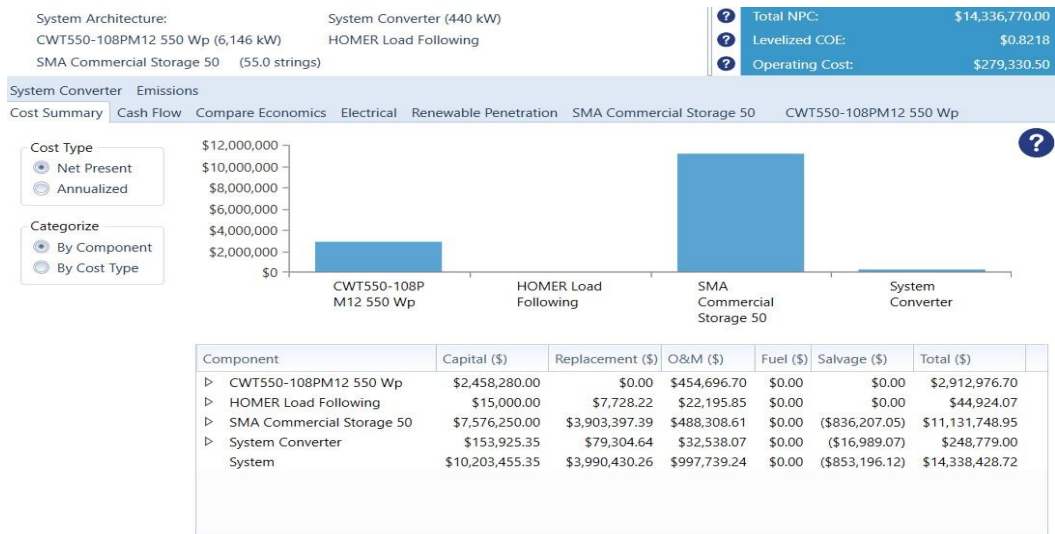
Dönüştürücünün kapasitesi 440 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.47’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.47 Lityum nikel kobalt mangan bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 10203455\$, toplam net bugünkü maliyeti 14338428\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.8218\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 48’ deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %74.2’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

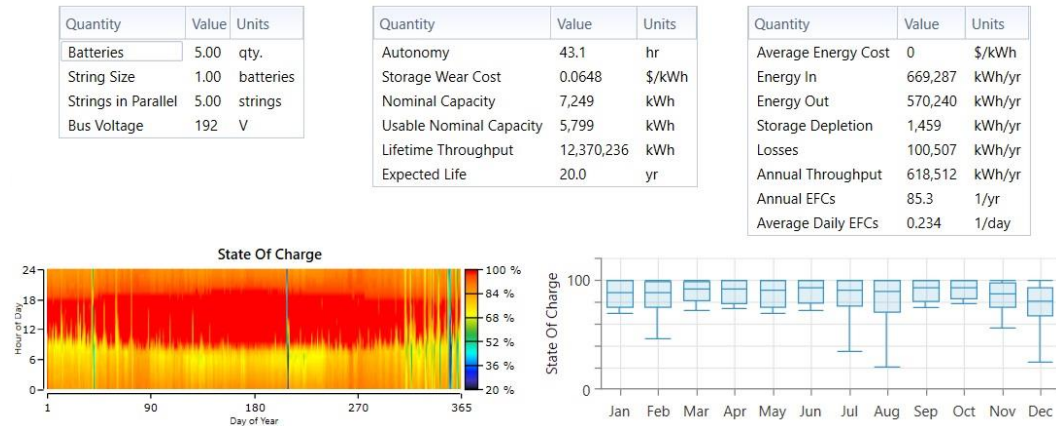


Şekil 4.48 Lityum nikel kobalt mangan bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.4.5 Sodyum Sülfür (NAS) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

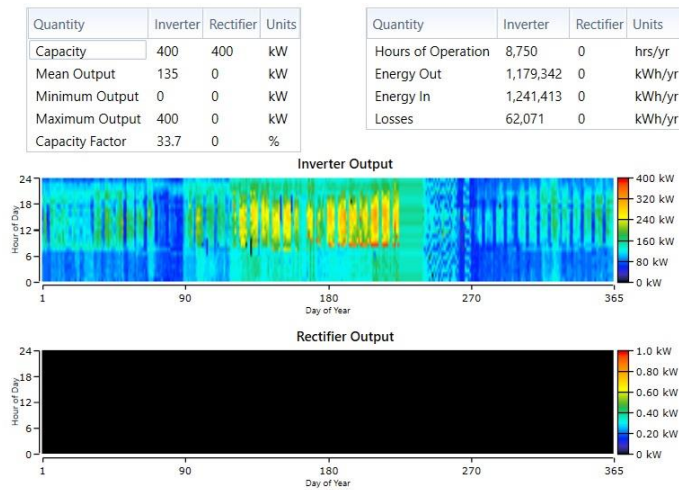
5 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 7249 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 669287 kWh enerji girişi ve 570240 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 43.1 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.49’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.49 Sodyum sülfür batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

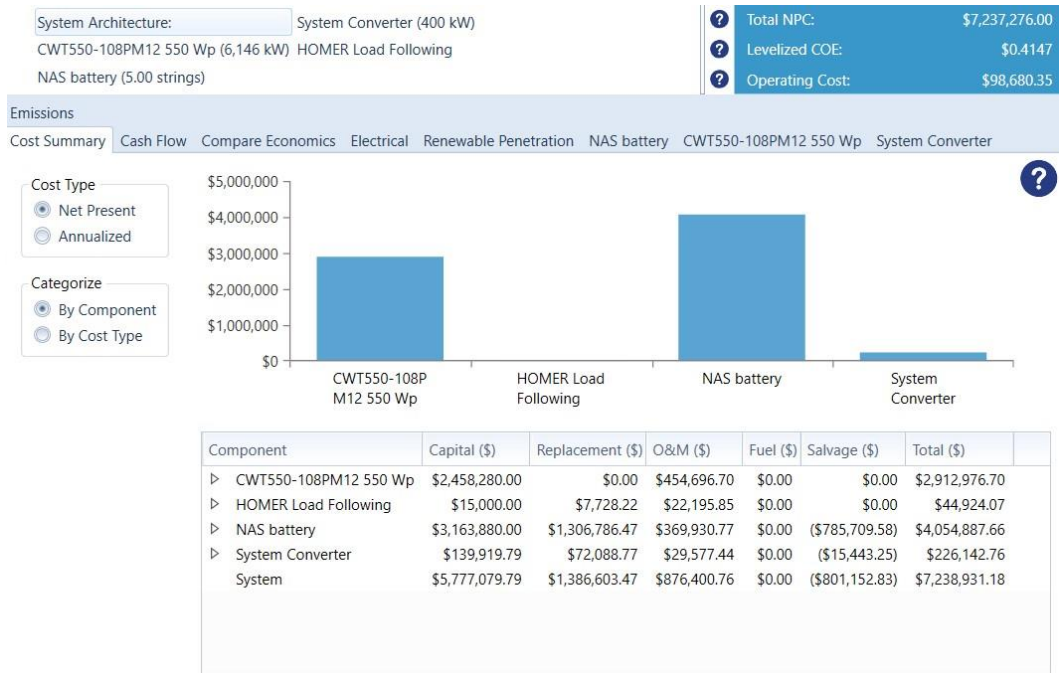
Dönüştürücünün kapasitesi 400 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.50’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.50 Sodyum sülfür bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 5777079\$, toplam net bugünkü maliyeti 7238931\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.4147 \$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.51’deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %54.7’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.51 Sodyum sülfür bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

4.3.4.6 Süper kapasitörlü Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

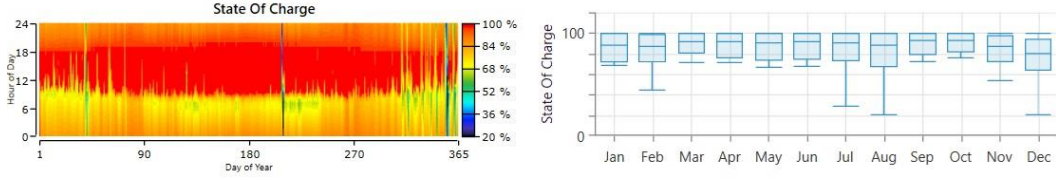
Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

36 adet paralel dizi halinde batarya kullanılmış olup 6083 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 591972 kWh enerji girişi ve 569476 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 36.1 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.52’de gösterilmiştir.

Quantity	Value	Units
Batteries	36.0	qty.
String Size	1.00	batteries
Strings in Parallel	36.0	strings
Bus Voltage	1,126	V

Quantity	Value	Units
Autonomy	36.1	hr
Storage Wear Cost	0	\$/kWh
Nominal Capacity	6,083	kWh
Usable Nominal Capacity	4,866	kWh
Lifetime Throughput	14,530,464	kWh
Expected Life	25.0	yr

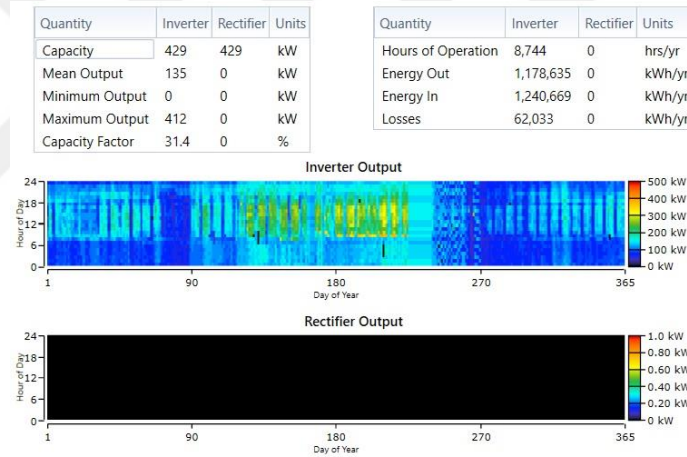
Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	0	\$/kWh
Energy In	591,972	kWh/yr
Energy Out	569,476	kWh/yr
Storage Depletion	1,206	kWh/yr
Losses	23,703	kWh/yr
Annual Throughput	581,219	kWh/yr
Annual EFCs	95.6	1/yr
Average Daily EFCs	0.262	1/day



Şekil 4.52 Süper kapasitör teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

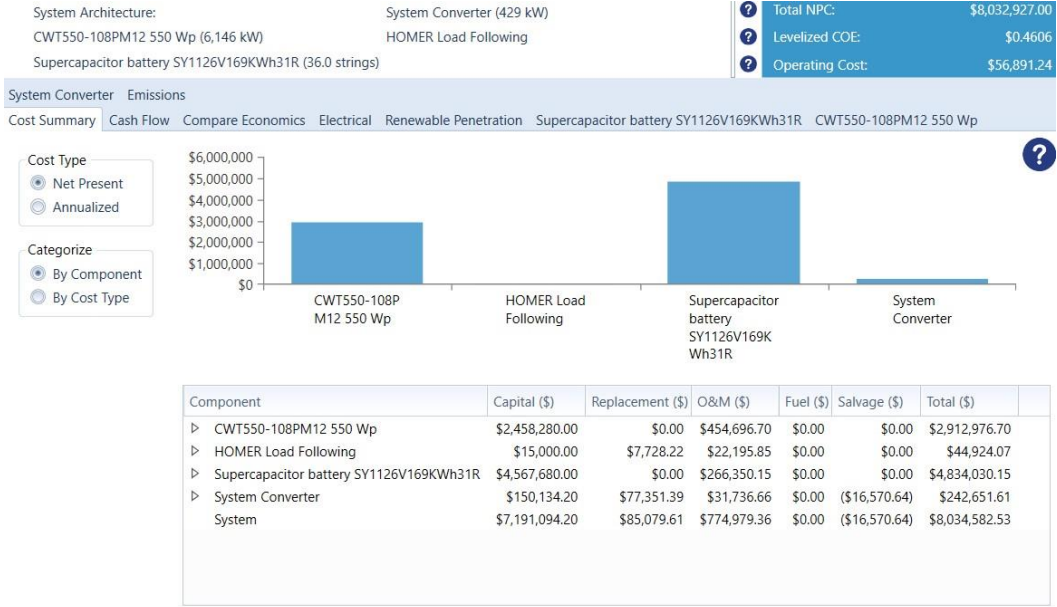
Dönüştürücünün kapasitesi 429 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.53’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.53 Süper kapasitörlü sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 7191094\$, toplam net bugünkü maliyeti 8034582\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.4606\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.54’ deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %63.5’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.

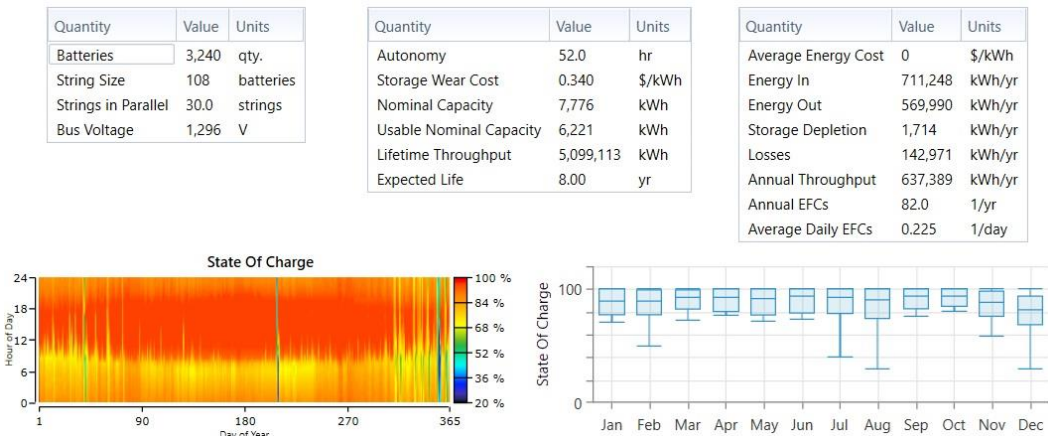


Şekil 4.54 Süper kapasitörlü sistemin ekonomik sonuçları

4.3.4.7 Kurşun Asit (Jel) Bataryalı Modelin Tekno-Ekonomik Analizleri

Sistemde kullanılan bataryanın teknik sonuçları incelendiğinde;

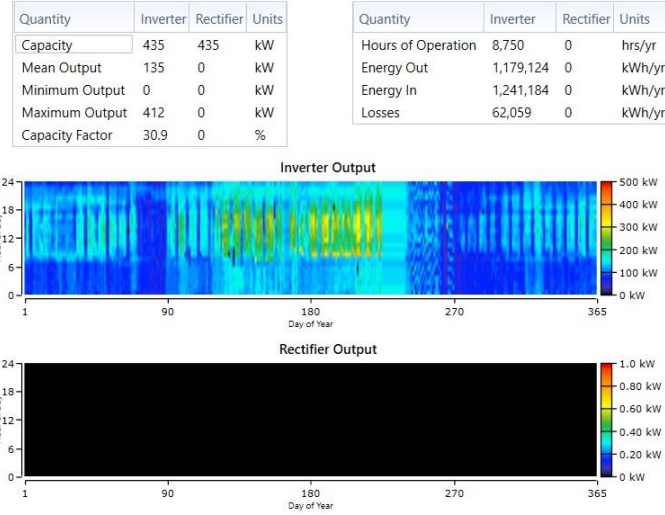
108’li seri 30 paralel dizi halinde 3240 adet batarya kullanılmış olup 7776 kWh nominal kapasiteli olarak boyutlandırılmıştır. Ayrıca bataryada yıllık 711248 kWh enerji girişi ve 569990 kWh enerji çıkışı sağlanmıştır. Bataryanın otonomi süresi ise 52 saat olarak hesaplanmıştır. Batarya şarj durum grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.55’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.55 Kurşun asit (jel) batarya teknik sonuçları

Sistemde kullanılan dönüştürücünün teknik sonuçları incelendiğinde;

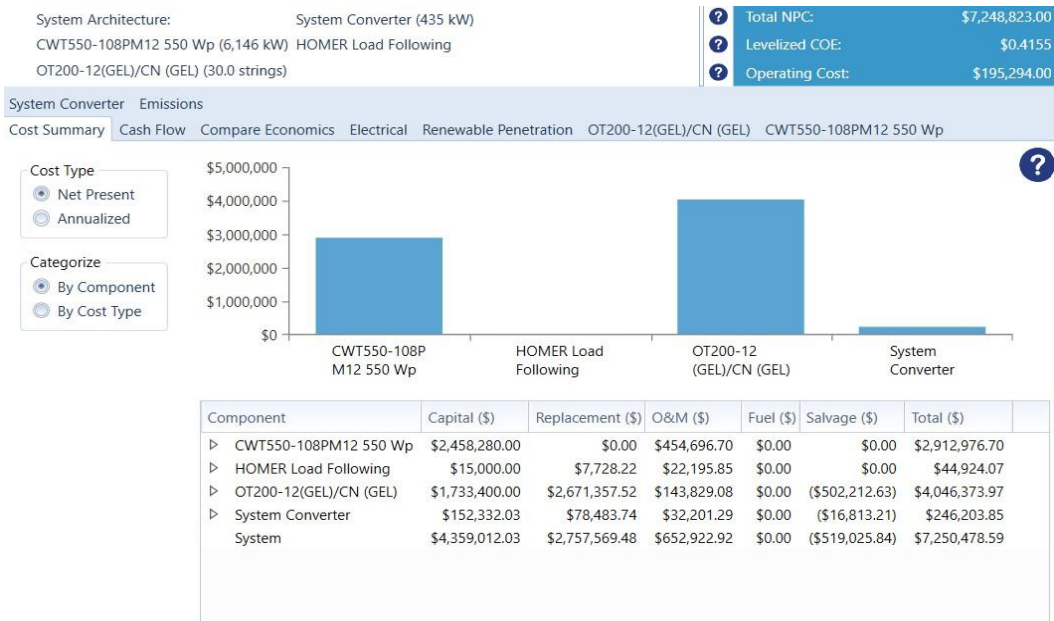
Dönüştürücünün kapasitesi 435 kW olarak boyutlandırılmıştır. Sistemdeki eviricinin ortalama çıkış gücü 135 kW olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücü kullanım grafiği ve teknik detaylar Şekil 4.56’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.56 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin dönüştürücü teknik sonuçları

Sistem ekonomik olarak incelendiğinde;

Sistemin sermaye maliyeti 4359012\$, toplam net bugünkü maliyeti 7250478\$ ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti ise 0.4155\$/kWh olarak bulunmuştur. Şekil 4.57’ deki görselde sistemin ekonomik sonuçları detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselde de görüldüğü üzere sistemin toplam maliyetinin yaklaşık %39.7’lik bölümü batarya maliyetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.57 Kurşun asit (jel) bataryalı sistemin ekonomik sonuçları

Yukarıda detaylı olarak verilen sonuçlar incelendiğinde seviyelendirilmiş enerji maliyeti en yüksek modelin Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu, yatırım maliyeti en yüksek model ise vanadyum akış bataryalı model olduğu görülmektedir. Toplam net bugünkü maliyette ise yine Lityum nikel temelli bataryalı model olduğu görülmüştür. Diğer taraftan yatırım maliyeti en düşük Kurşun asit batarya temelli model olduğu görülse de hem seviyelendirilmiş enerji maliyeti hem de toplam net bugünkü maliyeti açısından en düşük modelin LiFePO4 batarya temelli model olduğu görülmektedir.

Ayrıca sistemler için daha öncede belirtildiği üzere basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı hesapları da yapılmıştır. Gelir olarak tasarruf edilen tüketim maliyeti, aşırı elektrikten elde edilen kazanç ve hurda değeri gösterilmiş olup Giderlerde ise bakım, onarım, işletme ve değişim maliyetlerinin toplamı alınmıştır. Belirtilen değerler Tablo 4.10’ da detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.10 Senaryo 4 için farklı depolama modellerine göre gelir- gider durumu

Batarya Tipi	Tasarruf edilen toplam tüketim maliyeti (\$)	Aşırı üretimden elde edilen toplam kazanç (\$)	Hurda değeri (\$)	Toplam gider (\$)	Yıllık ortalama net gelir (\$)
Vanadyum Redoks Akış	3835036	11155453,2	50777	1777457	530553,15
Katı Hal	3835036	11542668,1	49771	1323363	564165,27
LiFePO4	3835036	11480318,8	745381	3382343	507136,49
Li-NCM	3835036	11557359,7	2576725	9430875	341530,61
NAS	3835036	11377059,9	2419550	4799500	513286,62
Süperkapasitör	3835036	11533693,0	50045	1474484	557772,38

Tablo 4.10 Senaryo 4 için farklı depolama modellerine göre gelir- gider durumu
(devamı)

Kurşun asit (Jel)	3835036	11291990,2	1567502	6470657	408955,63
------------------------------	----------------	-------------------	----------------	----------------	------------------

Basit geri ödeme süresi ve İç karlılık (Getiri) oranı sonuçları ise Tablo 4.11’ de detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.11 Senaryo 4 için basit geri ödeme süresi ve iç karlılık (Getiri) oranı

Batarya Tipi	Basit geri ödeme süresi (Yıl)	İç karlılık oranı (%)
Vanadyum Redoks Akış	22,84	0,71
Katı Hal	15	4,39
LiFePO4	9,29	9,91
Li-NCM	29,88	-1,14
NAS	11,26	7,39
Süperkapasitör	12,89	5,91
Kurşun asit (Jel)	10,66	8,26

Bu tez çalışması, amacında da belirtildiği gibi çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda kampüsü "Net Sıfır" hedefine taşımak için rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve gelişmiş farklı enerji depolama sistemlerinin entegrasyonunu içeren şebekeden bağımsız mikro şebeke sisteminin kurulumu ve işletilmesini incelemektedir. Bu bağlamda mikro şebeke tasarımı, gerçek tüketim verileri, bileşen özellikleri ve maliyet analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve uygulanabilir bir sistem olarak hayata geçirilmiştir. Tasarımda günümüz koşullarında var olan gelişmiş batarya sistemleri de kullanılarak teknik ve ekonomik analizleri yapılmış mali olarak en uygun batarya sistemi belirlenmiştir.

Tasarım simülasyon sonuçları bölümünde de detaylandırıldığı üzere 4 farklı senaryoda değerlendirilip teknik ve ekonomik analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Senaryo 1 ve Senaryo 2 ekonomik olarak yatırımın uygun olmadığı görülmüştür. Bu yüzden ilave üretim kaynağı olarak arazi GES ilave edilmiştir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin gerek maliyeti gerekse uygulanması açısından problemler yaşanabileceği için sadece arazi GES'e yönelim gerçekleşmiştir. Böylece Senaryo 3 ve Senaryo 4' te fotovoltaik sistem kurulu gücü 1285.9 kWp ten 6145.7 kWp ye çıkartılarak üretim kapasitesi artırılmış bataryaya olan ihtiyaçta minimize edilmiştir. Ayrıca sistem ürettiğini kullanıp fazlasını depolama ve satma yoluna giderek şebekeden elektrik satın almadan kendi kendine yetebilmiştir. Sistem tüketim maliyetinden sağlanan tasarruf ve satmış olduğu elektrik ile sermaye maliyetini lityum nikel temelli bataryalı modeller hariç amorti etmeyi başarmıştır. Senaryo 3 ve Senaryo 4'ün sonuçlarına bakıldığında bu sistem için en uygun bataryanın basit geri ödeme süresi ve İç karlılık oranı ile LiFePO4 bataryalı modelin olduğunu görmekteyiz. Ayrıca altı modelin iç karlılık oranının pozitif olduğu ve kendini amorti ettiği, Lityum nikel temelli modelin proje ömründen yüksek geri dönüş süresi ve negatif iç karlılık oranı olduğundan yatırım için uygun olmadığı görülmektedir. Genel olarak maliyetlerin bu kadar fazla olması batarya sistemlerinin birim enerji kapasitesi maliyetlerinin yüksek olmasından

kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre modellerdeki yatırım maliyetlerindeki en büyük payın bataryalar olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak mevcut durumlar incelendiğinde maliyetlerin azaltılabilmesi için; verimliliği artıracak teknolojiler kullanılabilir, daha sıkı tasarruflar yapılarak tüketim azaltılabilir ya da mümkünse GES yatırımları artırılması gibi birçok durum gerçekleştirilebilir. Bunun yanı sıra sistemde dönüştürücünün etkin kullanımı modeller için önemlidir. Örneğin tasarımda kullanılan %95 verimli dönüştürücü yerine daha iyi bir dönüştürücü kullanımı maliyetlere olumlu katkı yapabilir. Genel olarak modellerde günümüz şartlarında şebekeye bağlı sistemlere göre ekonomik açıdan uygun olmasa da çevresel açısından %100 yenilenebilir kaynaklara sahip olduğundan “Net Sıfır” kampüs olma yolunda önemli bir adım olduğu görülmektedir. Sonuç olarak günümüzde enerjiye olan bağımlılığın artması yenilenebilir enerji kaynakları kurulumunu da artırmaktadır. Bu yüzden yüklerin enerji ihtiyacının kesintisiz bir şekilde karşılanabilmesi için enerji depolama sistemlerine olan ihtiyaç her geçen gün daha da artmaktadır.

-
- [1] E. Barrett, B. Thayer, K. Studarus, and S. Pal, "The varied impacts of energy storage and photovoltaics on fossil fuel emissions," in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, USA, 2017, pp. 1-1, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274550
- [2] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Elektrik," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>. Erişim tarihi: 25 Mart 2024.
- [3] Boğaziçi Üniversitesi Yeşil Kampüs, "Kilyos Kampüsü Rüzgâr Enerji Santrali (BÜRES)," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://yesilkampus.bogazici.edu.tr/tr/content/kilyos-kampusu-ruzgar-enerji-santrali-bures>. Erişim tarihi: 24 Şubat 2024.
- [4] Külliye Karabük, "KBÜ kendi elektriğini güneş panelleri ile üretiyor," Karabük Üniversitesi, 03 Şubat 2019. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://kulliye.karabuk.edu.tr/kbu-kendi-elektrigini-gunes-panelleri-ile-uretiyor/>. Erişim tarihi: 24 Şubat 2024.
- [5] S. Pierce, F. Pallonetto, L. De Donatis, ve M. De Rosa, "District energy modelling for decarbonisation strategies development - The case of a University campus," *Energy Reports*, cilt. 11, ss. 1256-1267, 2024. doi: 10.1016/j.egy.2023.12.048
- [6] İ. Panhwar, A. R. Sahito, and S. Dursun, "Designing Off-Grid and On-Grid Renewable Energy Systems Using HOMER Pro Software", *J. Int. Environmental Application & Science*, vol. 12, no. 4, pp. 270–276, 2017.
- [7] T. O. Araoye, E. C. Ashigwuike, S. A. Umar, T. F. Adebayo, S. V. Egoigwe, M. C. Odo, ve O. W. Akachukwu, "Modeling and optimization of hybrid microgrid energy system: a case study of University of Abuja, Nigeria," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, cilt. 14, no. 2, ss. 1201-1209, 2023. doi: 10.11591/ijpeds.v14.i2.pp1201-1209.
- [8] Z. Öztürk, S. Tosun ve A. Öztürk, "Örnek Bir Hibrit Yenilebilir Enerji Sisteminin HOMER ile Modellenmesi, Ekonomik ve Teknik Yönden Analizleri", *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 2, sy. 2, ss. 286–299, 2019.
- [9] M. Katsivelakis, D. Bargiotas, A. Daskalopulu, I. P. Panapakidis, ve L. Tsoukalas, "Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid system: Application in Donoussa Island, Greece," *Energies*, cilt. 14, no. 7, ss. 1868, 2021. doi: 10.3390/en14071868.
- [10] A. A. Mas' ud ve H. Z. Al-Garni, "Optimum configuration of a renewable energy system using multi-year parameters and advanced battery storage modules: A case study in Northern Saudi Arabia," *Sustainability*, cilt. 13, no. 9, ss. 5123, 2021. doi: 10.3390/su13095123.
- [11] J. Wesly, A. C. Brasil Jr, C. A. Frate, ve R. K. Badibanga, "Techno-economic analysis of a PV-wind-battery for a remote community in Haiti," *Case Studies*

- in *Chemical and Environmental Engineering*, cilt. 2, 100044, 2020. doi: 10.1016/j.cscee.2020.100044.
- [12] M. A. Ramli, A. Hiendro, ve Y. A. Al-Turki, "Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia," *Renewable Energy*, cilt. 91, ss. 374-385, 2016. doi: 10.1016/j.renene.2016.01.071.
- [13] P. Ray ve A. A. K. Majhi, "Techno-Economic Analysis on Solar and Wind Assisted Standalone Microgrid," in *2022 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)*, 2022, pp. 525-530. IEEE. doi: 10.1109/OCIT56763.2022.00103.
- [14] R. Arif, Y. Z. Arief, S. Wilyanti, A. Pangestu, ve R. R. Al-Hâkim, "Using HOMER Simulation Method for Renewable Energy Power Generation Design in South Sumatra, Indonesia," *International Journal of Scientific Research*, vol. 1, no. 2, 2023. doi: 10.59890/ijsr.v1i2.155.
- [15] H. Moria, "Techno-economic optimization of solar/wind turbine system for remote mosque in Saudi Arabia highway: Case study," *International Journal of Engineering Research & Technology*, cilt. 8, no. 09, ss. 78-84, 2019. doi: 10.17577/IJERTV8IS090037.
- [16] Z. Belboul, B. Toual, A. Kouzou, L. Mokrani, A. Bensalem, R. Kennel, ve M. Abdelrahem, "Multiobjective optimization of a hybrid PV/Wind/Battery/Diesel generator system integrated in microgrid: A case study in Djelfa, Algeria," *Energies*, cilt. 15, no. 10, ss. 3579, 2022. doi: 10.3390/en15103579.
- [17] R. Khamharnphol, I. Kamdar, J. Waewsak, W. Chaichan, S. Khunpetch, S. Chiwamongkhonkarn, ... ve Y. Gagnon, "Microgrid Hybrid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Storage Power Generation System: Application to Koh Samui, Southern Thailand," *International Journal of Renewable Energy Development*, cilt. 12, no. 2, ss. 216, 2023. doi: 10.14710/ijred.2023.47761.
- [18] S. Yadav, P. Kumar ve A. Kumar, "Techno-economic Assessment of Hybrid Renewable Energy System with Multi Energy Storage System Using HOMER," *Energy*, vol. 131231, 2024. doi: 10.1016/j.energy.2024.131231.
- [19] N. Ghorbani, A. Kasaeian, A. Toopshekan, L. Bahrami, ve A. Maghami, "Optimizing a hybrid wind-PV-battery system using GA-PSO and MOPSO for reducing cost and increasing reliability," *Energy*, cilt. 154, ss. 581-591, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.057.
- [20] A. Azahra, K. D. Syahindra, D. R. Aryani, F. H. Jufri, ve I. M. Ardita, "Optimized configuration of photovoltaic and battery energy storage system (BESS) in an isolated grid: a case study of Eastern Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 599, no. 1, p. 012017, Nov. 2020. IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/599/1/012017.
- [21] S. A. Shezan, M. F. Ishraque, S. M. Mueen, A. Abu-Siada, R. Saidur, M. M. Ali, ve M. M. Rashid, "Selection of the best dispatch strategy considering techno-economic and system stability analysis with optimal sizing," *Energy Strategy Reviews*, cilt. 43, 100923, 2022. doi: 10.1016/j.esr.2022.100923.

- [22] F. Oueslati, "HOMER optimization of standalone PV/Wind/Battery powered hydrogen refueling stations located at twenty selected French cities," *International Journal of Renewable Energy Development*, cilt. 12, no. 6, ss. 1070-1090, 2023. doi: 10.14710/ijred.2023.58218.
- [23] M. F. Ishraque, S. A. Shezan, M. M. Ali, ve M. M. Rashid, "Optimization of load dispatch strategies for an islanded microgrid connected with renewable energy sources," *Applied Energy*, cilt. 292, 116879, 2021. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116879.
- [24] M. Nurunnabi, N. K. Roy, E. Hossain, ve H. R. Pota, "Size optimization and sensitivity analysis of hybrid wind/PV micro-grids—a case study for Bangladesh," *IEEE Access*, vol. 7, ss. 150120-150140, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2945937.
- [25] B. Dursun ve A. Altay, "A green university library based on hybrid PV/wind/battery system," (2018.).
- [26] R. Chedid, A. Sawwas, ve D. Fares, "Optimal design of a university campus micro-grid operating under unreliable grid considering PV and battery storage," *Energy*, cilt. 200, 117510, 2020. doi: 10.1016/j.energy.2020.117510.
- [27] S. Matemilola ve H. A. Salami, "Net Zero Emission," *Encyclopedia of Sustainable Management*, ss. 1–6, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-02006-4_512-1.
- [28] Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/viyana-sozlesmesi-ve-montreal-protokolu.tr.mfa>. Erişim tarihi: 28 Nisan 2024.
- [29] Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi.tr.mfa>. Erişim tarihi: 28 Nisan 2024.
- [30] Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa>. Erişim tarihi: 28 Nisan 2024.
- [31] Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>. Erişim tarihi: 28 Nisan 2024.
- [32] F. Küçükpara, & A. İnan, "Şebekeden Bağımsız Mikro Şebekede Farklı Batarya Teknolojilerinin Tekno-Ekonomik İncelemesi: Yıldız Teknik Üniversitesi Örneği", Ases VIII. International Health, Engineering And Sciences Conference, İzmir, 2024, 13-31.
- [33] Y. Yoldaş, A. Önen, S. M. Muyeen, A. V. Vasilakos, ve I. Alan, "Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt. 72, ss. 205-214, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.064.
- [34] Ş. Ulutürk, "Karabük Üniversitesi Mikroşebekesinin Tasarımı ve Modellenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, 2020.
- [35] M. Abbasi, E. Abbasi, L. Li, R. P. Aguilera, D. Lu, ve F. Wang, "Review on the microgrid concept, structures, components, communication systems, and control methods," *Energies*, cilt. 16, no. 1, ss. 484, 2023. doi: 10.3390/en16010484.

- [36] Rüzgâr türbin geleceği, makine öğrenimiyle değişebilir!
<https://futureflow.life/makine-ogrenim-destekli-dikey-eksenli-ruzgar-turbinleri-vawt/>, 01.05.2024.
- [37] G. Yıldız, "Site Tarzı Binalarda Küçük Güçlü Rüzgâr Türbini Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2019.
- [38] H. L. Zhang, T. Van Gerven, J. Baeyens, ve J. Degreëve, "Photovoltaics: reviewing the European feed-in-tariffs and changing PV efficiencies and costs," *Scientific World Journal*, vol. 2014, 404913, 2014. doi: 10.1155/2014/404913.
- [39] CW Enerji, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cw-enerji.com/tr/ges-projelerimiz>. Erişim tarihi: 2 Mayıs 2024.
- [40] M. Krichen, Y. Basheer, S. M. Qaisar, ve A. Waqar, "A Survey on energy storage: Techniques and challenges," *Energies*, cilt. 16, no. 5, ss. 2271, 2023. doi: 10.3390/en16052271.
- [41] J. Mitali, S. Dhinakaran, ve A. A. Mohamad, "Energy storage systems: A review," *Energy Storage and Saving*, cilt. 1, no. 3, ss. 166-216, 2022. doi: 10.1016/j.enss.2022.07.002.
- [42] R. Z. Coşkun ve F. Fatih, "Enerji depolamada yeni gelişme: vanadyum bataryaları," *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, cilt. 34, ss. 27-31, 2022.
- [43] K. Lourenssen, J. Williams, F. Ahmadpour, R. Clemmer, ve S. Tasnim, "Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, cilt. 25, 100844, 2019. doi: 10.1016/j.est.2019.100844.
- [44] R. Ragsdale, "Vanadium fuels growing demand for VRFB," *Metal Tech News*, 20 Mayıs 2020.
- [45] Y. Huang, B. Shao, ve F. Han, "Solid-state batteries: an introduction," in *Solid State Batteries Volume 1: Emerging Materials and Applications*, pp. 1-20, American Chemical Society, 2022. doi: 10.1021/bk-2022-1413.ch001.
- [46] T. Inoue ve K. Mukai, "Are all-solid-state lithium-ion batteries really safe? – verification by differential scanning calorimetry with an all-inclusive microcell," *ACS Applied Materials & Interfaces*, cilt. 9, no. 2, ss. 1507-1515, 2017. doi: 10.1021/acsami.6b13224.
- [47] Toprakci, H. A. K. Toprakci, L. Ji, ve X. Zhang, "Fabrication and electrochemical characteristics of LiFePO₄ powders for lithium-ion batteries," *KONA Powder and Particle Journal*, cilt. 28, ss. 50–73, 2010. doi: 10.1002/chin.201143199.
- [48] Lithium-Ion Batteries, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.pluginindia.com/lithiumion.html>. Erişim tarihi: 17 Nisan 2024.
- [49] H. A. Karahan Toprakci ve O. Toprakci, "Recent Advances in New-Generation Electrolytes for Sodium-Ion Batteries," *Energies*, cilt. 16, no. 7, ss. 3169, 2023. doi: 10.3390/en16073169.
- [50] B. Dunn, H. Kamath, ve J. Tarascon, "Electrical energy storage for the grid: a battery of choices," *Science*, cilt. 334, ss. 928–935, 2011. doi: 10.1126/science.1212741.

- [51] P. Moseley ve D. Rand, "High-temperature sodium batteries for energy storage," in *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, 2015, pp. 253–268.
- [52] *Handbook on Battery Energy Storage System*, Asian Development Bank, 2018.
- [53] About NAS Batteries, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas-about.html>. Erişim tarihi: 18 Nisan 2024.
- [54] J. Mitali, S. Dhinakaran, ve A. A. Mohamad, "Energy storage systems: A review," *Energy Storage and Saving*, cilt. 1, no. 3, ss. 166–216, 2022. doi: 10.1016/j.enss.2022.07.002.
- [55] O. Krishan ve S. Suhag, "An updated review of energy storage systems: classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources," *International Journal of Energy Research*, cilt. 43, ss. 6171–6210, 2018. doi: 10.1002/er.4285.
- [56] Boicea, "Energy storage technologies: the past and the present," *Proceedings of the IEEE*, cilt. 102, ss. 1777–1794, 2014. doi: 10.1109/JPROC.2014.2359545.
- [57] B. Bendjedja, F. Bouchafaa, N. Rizoug, ve M. Boukhniher, "Comparative study between battery and supercapacitor hybridization with fuel cells for automotive applications," *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, cilt. 2017–Janua, ss. 833–838, 2017. doi: 10.1109/CoDIT.2017.8102698.
- [58] Working Principle of Lead Acid Battery, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.bravabatteries.com/lead-acid-battery-working-principle/>. Erişim tarihi: 23 Haziran 2024.
- [59] Brava battery, "Flooded, Gel, AGM Lead Acid Batteries: Which is best?," *BRAVA*, 31 Mayıs 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.bravabatteries.com/flooded-gel-agm-lead-acid-batteries/>. Erişim tarihi: 29 Aralık 2023.
- [60] Google Earth, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://earth.google.com/web/@41.02424894,28.89137068,71.69940954a,66.8.92058296d,84.01712721y,70.05527193h,0t,0r/data=OgMKATA>. Erişim tarihi: 25 Mart 2024.
- [61] Valentin Software, "The design and simulation software for photovoltaic systems," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>. Erişim tarihi: 18 Mart 2024.
- [62] CW Enerji, "CW Enerji 550Wp 108PMFB M12 Black Series Güneş Paneli," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://cw-enerji.com/tr/urun/cw-enerji-550wp-108pmfb-m12-black-series-gunes-paneli-1034.html>. Erişim tarihi: 28 Şubat 2024.
- [63] İzotec, "Düz Çatı Sistemleri," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://isotec.com.tr/gunes-paneli-montaj-sistemleri/duz-cati-sistemleri/>. Erişim tarihi: 7 Mart 2024.
- [64] R. Sharma ve L. Gidwani, "Grid connected solar PV system design and calculation by using PV*SOL premium simulation tool for campus hostels of

- RTU Kota," *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, ss. 1-5, 2017. doi: 10.1109/ICCPCT.2017.8074315.
- [65] Homer Software, "Homer Pro," UL Solutions, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://homerenergy.com/products/pro/index.html>. Erişim tarihi: 12 Eylül 2023.
- [66] Investing.com, "U.S. 10-Year Bond Yield," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tr.investing.com/rates-bonds/u.s.-10-year-bond-yield>. Erişim tarihi: 27 Mayıs 2024.
- [67] Investing.com, "Turkey CDS 10 Years (USD) Streaming Chart," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tr.investing.com/rates-bonds/turkey-cds-10-years-usd-streaming-chart>. Erişim tarihi: 27 Mayıs 2024.
- [68] Trading Economics, "United States Inflation CPI," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tradingeconomics.com/united-states/inflation-cpi>. Erişim tarihi: 27 Haziran 2024.
- [69] H. K. Adan, "Technical and economic evaluation of a standalone and grid connected hybrid renewable energy system: Case study at Eskişehir Technical University," Master's Thesis, Anadolu University, 2020.
- [70] Wind Energy Solutions, "WES250," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://windenergysolutions.nl/wes/windturbine-wes-250/#toggle-id-2>. Erişim tarihi: 1 Mart 2024.
- [71] Homer Energy, "How HOMER Calculates Wind Turbine Power Output," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/how_homer_calculates_wind_turbine_power_output.html. Erişim tarihi: 14 Mart 2024.
- [72] M. A. Ramli, A. Hiendro, and Y. A. Al-Turki, "Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia," *Renewable Energy*, vol. 91, pp. 374-385, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.071.
- [73] M. Bagheri, S. H. Delbari, M. Pakzadmanesh, and C. A. Kennedy, "City-integrated renewable energy design for low-carbon and climate-resilient communities," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1212-1225, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.031.
- [74] VCEC Energy, "50KW250KWH Containerized Vanadium Redox Flow Battery," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.vcecenergy.com/50KW250KWH-Containerized-Vanadium-Redox-Flow-Battery-Energy-Storage-System-VRFB-With-BMS-EMS-PCS-pd545705798.html>. Erişim tarihi: 13 Mart 2024.
- [75] Enerbond, "CAPRACK/GTEM-700V250KW-264KWH-R," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://enerbond.com/product/gtem-700v250kw-264kwh-r/>. Erişim tarihi: 13 Mart 2024.
- [76] Pomega, "Yüksek Gerilim 19'' Batarya Grupları," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tr.pomega.com/wp-content/uploads/2022/06/Pomega-BataryaGruplari.pdf>. Erişim tarihi: 11 Aralık 2023.

- [77] SMA, "SMA Commercial Storage Solution," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sma.de/en/products/system-solutions-packages/sma-commercial-storage-solution>. Erişim tarihi: 5 Mart 2024.
- [78] Suproenergy, "Graphene battery," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://suproenergy.com/product/sy1126v169kwh31r/>. Erişim tarihi: 28 Şubat 2024.
- [79] Zhangzhou OUTDO Power Technology Co., Ltd., "Energy Storage Battery," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.huawei-battery.com/dydc_xq/1.html. Erişim tarihi: 28 Şubat 2024.
- [80] M. F. Ishraque, S. A. Shezan, M. M. Ali, and M. M. Rashid, "Optimization of load dispatch strategies for an islanded microgrid connected with renewable energy sources," *Applied Energy*, vol. 292, p. 116879, 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116879>.
- [81] Y. Kirim, H. Sadikoglu, and M. Melikoglu, "Technical and economic analysis of biogas and solar photovoltaic (PV) hybrid renewable energy system for dairy cattle barns," *Renewable Energy*, vol. 188, pp. 873-889, 2022. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.082>.
- [82] R. Sinaga, "Modeling and Analysis of the Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity (LCoE) - Case Study in Kupang," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1364, p. 012066, 2019. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1364/1/012066>.
- [83] Homer Energy, "Salvage Value," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/salvage_value.html. Erişim tarihi: 2 Nisan 2024.
- [84] E. Perdahlıyan, "Endüstriyel bir tesis çatısına fotovoltaik sistem kurulumu için tasarım ve hesaplamaları; Edirne örneği," Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, 2021.
- [85] Internal Rate of Return, Tipalti, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tipalti.com/en-eu/financial-operations-hub/internal-rate-of-return/>. Erişim tarihi: 28 Haziran 2024.
- [86] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), "Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>. Erişim tarihi: 2 Haziran 2024.
- [87] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/202401/02012024.xml>. Erişim tarihi: 16 Haziran 2024.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. Küçükkara, & A. İnan, “Şebekeden Bağımsız Mikro Şebekede Farklı Batarya Teknolojilerinin Tekno-Ekonomik İncelemesi: Yıldız Teknik Üniversitesi Örneği”, Ases VIII. International Health, Engineering And Sciences Conference, İzmir, 2024,13-31.

