T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN BULUNDUĞU BİR MİKROŞEBEKEDE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN MALİYET OPTİMİZASYONU

Recep KAŞ

YÜKSEK LİSANS

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Recep Kaş tarafından hazırlanan “Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Bulunduğu Bir Mikroşebekede Enerji Depolama Sistemlerinin Maliyet Optimizasyonu” adlı tez çalışması 01/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇEVİK	……..
Danışman Doc.Dr. Bahadır AKBAL	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Halil ÇİMEN	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Recep KAŞ

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİNİN BULUNDUĞU BİR MİKROŞEBEKEDE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN MALİYET OPTİMİZASYONU

Recep KAŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bahadır AKBAL

2022, 95 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇEVİK
Dr. Öğr. Üyesi Halil ÇİMEN
Doç. Dr. Bahadır AKBAL

Günümüzde elektrik enerjisi büyük çoğunlukla tükenmekte olan kaynaklardan elde edilmektedir. Ancak tükenmekte olan kaynakların sürdürülebilir olmadığı açıktır ve bu yüzden yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe görevi devralmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve uygulanması belirli problemleri beraberinde getirmiştir. Bunlardan başlıca olanı yenilenebilir enerji kaynaklarının stabil olmamasıdır. Tez kapsamında, öncelikle yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji depolama sistemlerinin tanıtımı yapılmış ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının en optimum dalgalanma değerleri ile şebeke veya bir tesise entegrasyonu üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önündeki en büyük engellerden birisi kararsız çalışmasıdır. Bu tez ile yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen enerjinin minimum dalgalanma ile şebekeye entegrasyonu ve enerji depolama sistemleri ile kararsız çalışmasının önüne geçilebilecek sistemler geliştirilecek ve öneriler sunulacaktır. Yenilenebilir enerjinin en büyük dezavantajı olarak tanımlayabileceğimiz kararsızlık probleminin aşılması ile kullanımının daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Mevcut elektrik üretim kaynakların ömrü kısıtlı olduğu için gelecekteki enerji ihtiyaçlarımızı karşılayabilmemiz için bunu yapmak zorundayız. Bu tez kapsamında ETAP programı ile 10 MW gücünde yükü besleyen 6 MW gücünde rüzgar ve 6 MW gücünde güneş santrali içeren bir hibrid şebeke kurulmuş, kurulan şebekeye eklenecek olan enerji depolama sistemlerinin boyutunun belirlenmesinde farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Dolayısıyla, gerekli olan en uygun ve en az maliyetli sistem 4 MWh olarak belirlenemiştir.

Anahtar Kelimeler: Bataryalar, Enerji Depolama Sistemi, Enerji Depolama Sistemleri, Güneş Enerjisi, Hibrit, Rüzgâr Enerjisi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ABSTRACT

MS THESIS

COST OPTIMIZATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN A MIKROSEBDE WITH RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Recep KAŞ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bahadır AKBAL
2022, 96 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÇEVİK
Assoc. Prof. Dr. Halil ÇİMEN
Advisor Assoc. Prof. Dr. Bahadır AKBAL

Novadays, electrical energy is largely derived from sources that are running out. However, it is clear that the resources that are being exhausted are not sustainable, and therefore renewable energy sources are taking over the task day by day. The use and implementation of renewable energy sources has led to certain problems. The main thing is that renewable energy sources are unstable. The thesis primarily introduced renewable energy sources and energy storage systems, and has been studied using optimization methods to integrate renewable energy resources into the grid or a facility with the optimum fluctuations. One of the biggest obstacles to renewable energy sources is its unstable functioning. This thesis will develop and provide recommendations for the minimum fluctuation of energy generated in renewable energy sources, integration of energy into the grid, and the ability to prevent energy storage systems and instability. It is thought that the use of renewable energy will become even more common with the exceeding of the instability problem that we can define as the biggest disadvantage. Because the life of existing electricity production resources is limited, we have to do this so that we can meet our future energy needs. In this thesis, optimization methods were used to determine the size of energy storage systems that were installed and added to the gird that was installed with a hybrid grid. Therefore, the most appropriate and least cost-effective system required will be determined. Within this thesis, a hybrid grid with 6 MW wind power and 6 MW solar power power plant was established with the Etap program, which supplies a load of 10 MW. Three different optimization methods have been used to determine the size of energy storage systems that will be added to the installed grid. Therefore, the most appropriate and least cost-effective system required was not identified as 4 MWh.

Keywords: Batteries, Energy Storage System, Energy Storage Systems, Solar Energy, Hybrid, Wind Energy, Renewable Energy sources

ÖNSÖZ

Öncelikle tez konusu seçerken isteklerimi göz önünde bulunduran, her aşamasında bilgisini, deneyimlerini ve desteğiyle bana her şekilde yol gösteren, değerli danışmanım Bahadır AKBAL' a bu çalışılmanın gerçekleştirilmesindeki destek ve katkılarından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında olduğu gibi, şefkati ve merhametiyle her zaman desteğini yanımda hissettiğim, aileme ve tez çalışmamı hazırlarken her çalışmada bana yardımcı olan kardeşim Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şen'e sonsuz teşekkür ederim

Recep KAŞ
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET **1**

ABSTRACT **2**

ÖNSÖZ **3**

İÇİNDEKİLER **4**

İMGELER VE KISALTMALAR **6**

1. GİRİŞ **7**

1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları 8
1.1.1. Güneş Enerjisi 11
1.1.2. Rüzgâr Enerjisi 12
1.1.3. Jeotermal Enerji 13
1.1.4. Hidroelektrik 14
1.1.5. Biyoenerji 15
1.1.6. Okyanus Enerjisi 16
1.2. Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri 17
1.2.1. Mekanik Enerji Depolama Sistemleri 19
1.2.1.1. Volan Enerji Depolama Sistemi 19
1.2.1.2. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemi 20
1.2.1.3. Pompalanan Hidroenerji Depolama Sistemi 21
1.2.2. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri 24
1.2.2.1. Nikel Kadmiyumun (NiCd) Bataryalar 24
1.2.2.2. Nikel-Hidrojen Bataryalar 25
1.2.2.3. Nikel-Metal Hidrit Bataryalar 25
1.2.2.4. Nikel- Çinko Bataryalar 25
1.2.2.5. Kurşun Asit Bataryalar 26
1.2.2.6. Sodyum-sülfür Bataryalar 26
1.2.2.7. Sodyum Nikel Klorür Bataryalar 27
1.2.2.8. Lityum iyon Bataryalar 28
1.2.3. Akış Bataryaları 28
1.2.4. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri 29
1.2.4.1. Hidrojen Enerji Depolama 29
1.2.5. Termal Enerji Depolama 31
1.2.6. Elektriksel Enerji Depolama 34
1.2.6.1. Kapasitor ve Süperkapasitör Enerji Depolama 34
1.2.6.2. Süper İletkenlik Manyetik Enerji Depolama (SMED) 36

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **38**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **45**

3.1. Optimizasyon 45
3.1.1. Genetik Algoritma 46
3.1.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) 47

3.1.3. Ateşböceği Algoritması (FA)..... 49
3.2. Batarya Enerji Depolama Sistemine Bakış..... 52
3.3. Sistem Maliyet Analizi..... 53
3.4. Güç kaynağı kaybı olasılığı (GKKO)..... 54
3.5. GKKO hesaplama prosedürü..... 54
3.6. Optimizasyon Kısıtlamaları..... 55
3.7. Optimizasyon Metodolojisi..... 56
3.8. Simülasyon İçin Örnek Şebekenin Oluşturulması..... 59
3.8.1. Simülasyon İçin Yük Verileri..... 62
3.8.2. Simülasyon İçin Güneş Enerjisi Verileri..... 62
3.8.3. Simülasyon İçin Rüzgâr Enerjisi Verileri..... 65
3.8.4. Simülasyon İçin Dizel Jeneratör Verileri..... 71
3.8. Pil Spesifikasyon Verileri Simülasyon için Veri Yükle..... 72
3.9. Simülasyon Çalışmaları..... 74

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... 75

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 88

5.1. Sonuçlar..... 88
5.2. Öneriler..... 89

KAYNAKLAR..... 90

EKLER.....Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

İMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

EDS : Enerji Depolama Sistemleri
PV : Fotovoltaik
BEDS : Batarya Enerji Depolama Sistemi
TEDS : Termal Enerji Depolama Sistemleri
UK : Ultra Kapasitörler
YEK : Yenilenebilir Enerji Kaynakları
DÜ : Potansiyel Dağıtık Üretim
VEDS : Volan Enerji Depolama Sistemi
CAES : Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemi
PVPHS : Pompa Hidroelektrik Enerji Depolama Sistemi
Li-ion : Lityum-iyon
NaS : Sodyum-sülfür
Ni-Cd : Nikel-kadmiyum
Ni-Zn : Nikel-çinko
ZnBr : Çinko-brom
FLA : Daldırılmış Kurşun Asit Akü
VRLA : Valf Ayarlı Kurşun Asit Akü
ZEBRA : Sıfır Emisyonlu Akü Araştırma Etkinliği
VRB : Vanadyum Redoks Akışlı Batarya
HED : Hidrojen Enerji Depolama
PCMS : Tipik Faz Değiştirme Malzemeleri
PCM : Faz Değişikliği Materyali
TED : Termal Enerji Depolama
ATED : Akifer Termal Enerji Depolama
SMED : Süper İletkenlik Manyetik Enerji Depolama
HMOPSO : Karma çok hedefli parçacık sürü optimizasyonu
MOPSO : Parçacık sürü optimizasyonu
ARMA : Otomatik gerileme hareketi ortalaması
NSGA-II : Algoritmasını elitist doz dışı sıralama genetik algoritması
5PEM :Beş noktalı tahmin yöntemi

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi bugün hayatımızın birçok alanında kullanılmaktadır ve tartışılmaz bir öneme sahiptir. Günümüzde elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır ve artmaya devam edecektir. Bütün dünyada devletler bu talebi karşılamak zorunda ve yıllık üretimlerini artırmak zorundadırlar. Günümüzde elektrik enerjisinin üretiminin büyük bir kısmı yenilenemez fosil kaynaklarından elde edilmektedir. Yıllardır fosil yakıtların tükeneceği konusunun gündemde olmasına rağmen gerekli önlemler tam olarak alınmamıştır. Ayrıca, ülkeler arasındaki çekişme ve savaşlar fosil yakıtların fiyatlarında yükselmelere neden olmuştur. Özellikle ülkemiz gibi fosil yakıtları başka ülkeden ithal eden ülkeler için kriz daha da büyüktür. Örneğin, fosil yakıtların ithal edildiği ülkelerin yaşadığı sorunlarından dolayı, ülkemizde zorunlu elektrik kesintileri olmuştur. Sanayilerimizde yapılan elektrik kesintilerinin ülkemize milyonlarca dolar zararı göz önüne alındığında, bu durumların önüne geçilmesi gerekmektedir. Bunun için enerjide dışa bağımlılığımızı azaltarak, kendi elektrik enerjimizi üretmemiz gerekmektedir. Yenilebilir enerji kaynakları ülkemizin uygun coğrafi konumu itibariyle en uygun çözümlerden biri olacağı aşikardır. Gelişen teknoloji ile yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim maliyeti azalmakta, verimi ve kullanım ömrü artmaktadır. Yenilebilir enerji kaynaklarının faydaları tartışılmaz derecede fazladır ancak bazı dezavantajları da vardır. En büyük dezavantajlarından birisi aralıklı üretimidir. Örneğin güneş enerjisi sadece gündüz saatlerinde üretim yapar. Hava kapalı olduğunda ve geceleri üretim yapmayacaktır. Özelikle elektriğin akşam daha fazla kullanıldığı göz önüne alındığında bu çözülmesi gereken bir sorundur. Aralıklı üretim aynı zamanda gerilim dengesizliklerini beraberinde getirecektir. Bu problemlerin çözümü ve yenilebilir enerji kaynaklarını daha kullanılabilir hale getirebilmek için enerji depolama sistemleri kullanımını önerilir. Enerji depolama sistemlerinin yüksek maliyeti tercih edilmesini zorlaştırmıştır. Tez kapsamında, optimizasyon yöntemleri ile en uygun çözümleri aranmıştır. Çeşitli optimizasyon yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılarak en uygun çözümler sunulmuştur.

1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Sürekli artan dünya nüfusunun ve gelişen sanayinin enerji gereksinimi fosil kaynaklardan artık karşılanamamakta, üretilen enerji ile tüketilen enerji arasındaki fark giderek artmaktadır. Dünyada enerji arzı, 2035 yılına gelindiğinde 1998 yılının iki katına, 2055 yılında ise üç katı olacağı tahmin edilmektedir. (*Url-1*)

Yenilenemeyen, kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji gibi enerji kaynakları doğaya ve insan sağlığına her geçen gün daha fazla zarar vermektedir. Fosil yakıtlar başta ulaştırma olmak üzere, konut, sanayi sektöründe ve hayatımızın birçok alanında kullanımı sorunu daha karmaşık hale getirmiştir. Dolayısıyla elektrik enerji üretiminde de yenilebilir enerjinin kullanımı daha da önem kazanmaktadır. (*Url-1*)

Ayrıca, fosil yakıtların kullanımı karbondioksit miktarını artırmakta, ormanların azalması ile de atmosferdeki diğer gazlar güneş ışınlarının yansımasını engellemektedir. Sera etkisi olarak bilinen bu durum dünyayı olduğundan daha sıcak ve yaşanılmaz hale getirmektedir. Bundan 20 yıl sonra küresel ısınmanın bu denli devam etmesi durumunda, deniz seviyesinin bir metreye kadar yükseleceği, bu durumda dünyanın en büyük şehirlerinden bazıları sular altında kalacağı ileri sürülmektedir. (*Url-1*)

Diğer yandan, fosil yakıtlar yakıldığında karbon monoksit (CO) vücuttaki oksijen oranını azaltarak ölümlere yol açarken, kükürt dioksit de (SO_2) kansere sebep olan gazlar ortaya çıkarmaktadır. Doğalgazın yanmasıyla ortaya çıkan kokusuz ve gözle görülemeyen azot oksit (NO) ise atmosferde diğer gazlarla etkileşime girerek vücudun bağışıklık sistemini çökertmektedir. (*Url-1*)

Giderek artan hava kirliliğinin önlenmesi için tedbirler, 1970 yılında birçok gelişmiş ülkede alınmaya başlanmıştır. Ancak, kirletilen havanın yalnızca bulunduğu ülke değil çevresindeki ülkelerde de zararlı etkilerinin ortaya çıkması engellenememiştir. Hava yoluyla taşınan kirleticiler, insan sağlığını olumsuz etkilemiş, toprakta ve su kaynaklarında asit oranın artmasına neden olarak birçok canlı türünün yok olmasına sebep olmuştur. Ayrıca, tesislerin ve binaların yüzeylerine de zarar vermiştir. (*Url-1*)

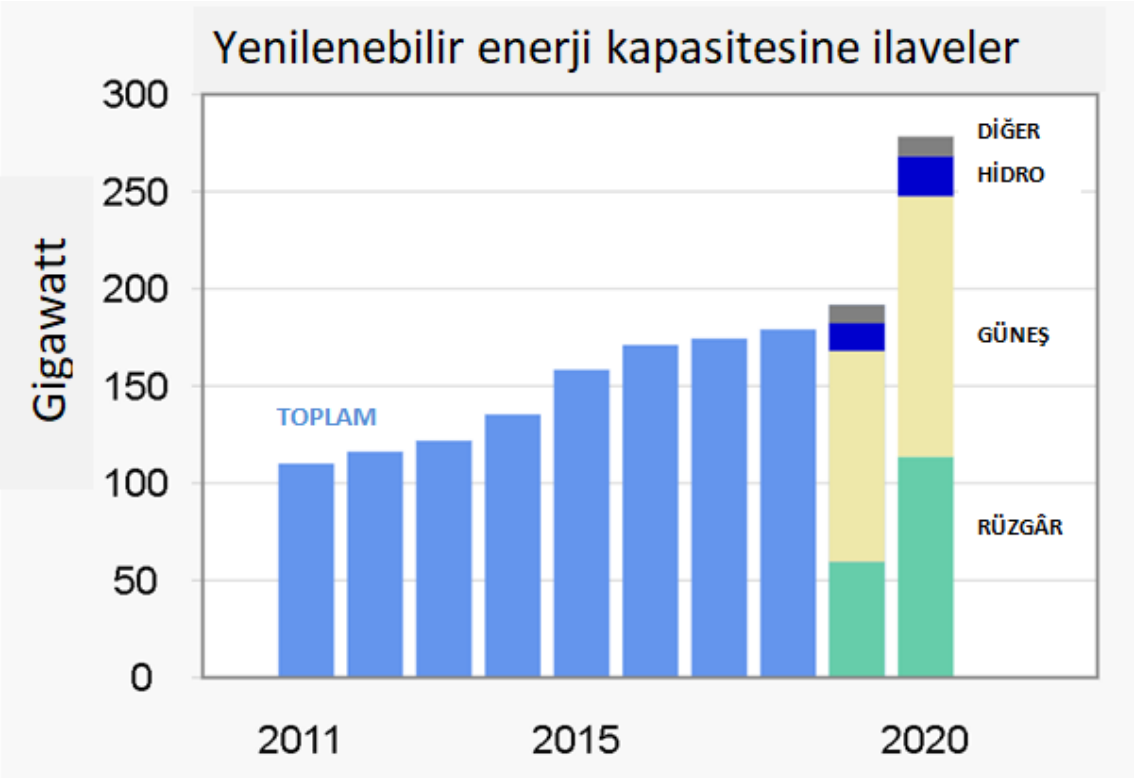
Nükleer Enerji dünya üzerinde enerji üretimi için kurtarıcı çözüm olarak görülmüş ve birçok ülke tarafından yoğun bir şekilde de kullanılmaktadır. Ancak bilindiği üzere nükleer enerji santrallerinin radyoaktif madde barındırması, çevreye olan zararlı etkisi ve daha önceki "Çernobil Nükleer Kazası" gibi tecrübelerden dolayı endişelere sebep olmaktadır. Günümüzde enerji, askeri, ticari ve araştırma amaçlı birçok

nükleer tesis bulunmakta, ancak yeni tesisler kurulması ciddi derece tartışmalara neden olmaktadır.

Diğer tarafından tüm bu gelişmelere ek olarak petrolün bize elli yıl eşlik edeceği göz önüne alındığında, insanoğlu yeni enerji kaynakları arayışına yönelmiştir. Bu kapsamda doğa ile dost, temiz ve nispeten ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Yenilenebilir enerjinin "sürdürülebilir" olması, insanlık var olduğu sürece var olacağı düşünülen doğal kaynaklardan elde edilen bu enerji insanlığın umudu olmuştur.

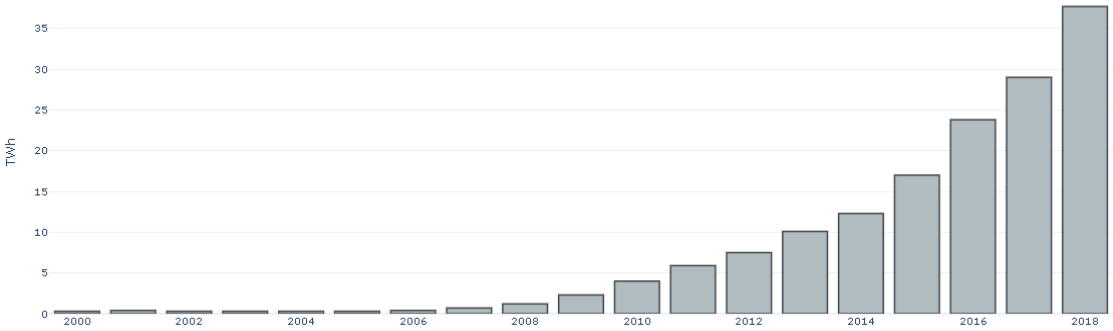
Yenilenebilir enerji, rüzgâr, güneş, gelgitler, dalgalar ve jeotermal güneş ışığı, rüzgâr, yağmur, gelgitler, dalgalar ve jeotermal ısı gibi karbon nötr doğal kaynaklardan elde edilir. Bu kaynaklar rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerjisi, biokütle enerjisi olarak sıralanabilir. Yenilenebilir enerji, yenilenmekten çok daha hızlı tüketilen fosil yakıtların aksine yaşam olduğu sürece var olacağı kabul ediliyor (Ellabban vd., 2014).

Yenilenebilir enerji genellikle elektrik üretimi, ortam ve su ısıtma, hava ve su soğutma ve kırsal (şebekeden bağımsız) bölgelere elektrik sağlama olmak üzere dört önemli alanda enerji sağlar .(Ahmed vd., 2010) İnsanların küresel enerji tüketiminin yaklaşık %20'si, elektriğin yaklaşık %30'u da dahil olmak üzere yenilenebilir kaynaklardır (Shuai vd., 2021).Son yıllarda dünya üzerindeki kurulu yenilenebilir enerji kaynaklarındaki güç artışı Şekil 1.1' de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. 2020 yılında yenilenebilir enerji kapasitesinde artışlar, 2019'den itibaren %90 daha fazla yeni rüzgâr gücü (yeşil) ve yeni güneş fotovoltaik kurulumların %23'i (sarı) dahil olmak üzere %45'den fazla genişlemiştir.

Dünya üzerinde birçok yenilebilir enerji üzerinde çalışan firma vardır. Yenilenebilir enerji sanayisinde güneş enerjisiyle çalışan fotovoltaikler en büyük paya sahiptir. Yenilenebilir enerji konusunda olan bu gelişmeler yenilenebilir enerji sistemlerinin hızla daha verimli ve ucuz hale gelmesinde etkilidir. Dünya çapında bu gelişmeler birçok ülkede elektrik üretiminin büyük bir bölümünü yenilebilir enerji kaynakları devralıyor. Yıllara göre Türkiye'deki yenilebilir enerjinin değişim grafiği Şekil 1.2'de gösterilmektedir. (*Url-2*)



Şekil 1.2. Yıllara Göre Türkiye Yenilebilir Enerjinin Değişimi

1.1.1. Güneş Enerjisi

Elektrik üretmek için güneş enerjisi, suyu güneşle ısıtma dahil güneş termal enerjisi ve güneş enerjisi mimarisi gibi çeşitli teknolojiler kullanılarak güneşten yayılan ışık ve sıcaktan elektrik enerjisi üretmektir. (*Url-3*)

Güneş, yenilenebilir enerjinin temel kaynağıdır ve teknolojileri, güneş enerjisini nasıl yakalayıp dağıttıkları veya güneş enerjisine dönüştürdüklerine bağlı olarak pasif güneş veya aktif güneş enerjisi olarak büyük ölçüde nitelendirilir. Aktif güneş teknikleri arasında fotovoltaik sistemlerin, konsantre güneş enerjisinin ve enerjiden tasarruf etmek için güneş suyuyla ısınmanın kullanımı yer alır. Pasif güneş teknikleri arasında bir binanın güneşe yönlendirmesi, termal kütleye veya ışık dağıtımına uygun özelliklere sahip malzemeler seçilmesi ve havanın doğal bir şekilde dolaşmasını sağlayan alanlar tasarlanması yer almaktadır.

Güneş enerjisi bu denli boyutu, onu son derece çekici bir elektrik kaynağı haline getirir. Güneş enerjisi 2021 yılından beri fosil yakıtlardan daha ucuz olduğu savunulmaktadır.(Url-4)

Dünya, üst atmosferde 174 petawatt (PW) gelen güneş radyasyonu (güneş ışıması) almaktadır, yaklaşık %30'i uzaya yansıtırken, geri kalanı bulutlar, okyanuslar ve kara kütleleri tarafından emilmektedir. Dünyanın yüzeyindeki güneş ışığı spektrumu, çoğunlukla ultraviyole benzeri küçük bir parçasıyla görünür ve yakın kızılötesi aralıklarına yayılır. (*Url-5*)

Fotovoltaik (PV), fizik, fotokimya ve elektrokimya alanında incelenen bir fenomen olan fotovoltaik etkiyi sergileyen yarı iletken malzemeler kullanılarak ışığın elektriğe dönüştürülmesi işlemektedir. Fotovoltaik etki, ticari olarak elektrik üretimi ve foto sensor olarak kullanılır.

2019 yılında dünya çapında kurulu PV kapasitesi 635 gigawatt'ın (GW) üzerine çıkmıştır ve bu da küresel elektrik talebinin yaklaşık yüzde ikisini kapsar. Hidroelektrik ve rüzgar güçlerinin ardından PV, küresel kapasite açısından üçüncü yenilenebilir enerji kaynağıdır.(Fraunhofer ISE & PSE Projects GmbH, 2022)

Güneş enerjisi ülkemiz gibi çok güneş alan ülkelerde önemli bir enerji kaynağı alternatifidir. Şekil 1.3'te elektrik enerjisi üretimi için kurulu olan bir güneş santrali gösterilmektedir.

Şekil 1.3. Güneş Enerjisi Santrali

1.1.2. Rüzgâr Enerjisi

Dünyada rüzgarlar güneş radyasyonunun yer yüzeyinde sıcaklık farkı oluşturmasından dolayı oluşan rüzgârdan kaynaklanır. Rüzgâr gücü veya rüzgâr enerjisi, elektrik üretmek için çoğunlukla rüzgâr türbinleri kullanılır. Geçmişte yelken, rüzgâr gücü yelken, rüzgâr değirmeni ve rüzgâr pompalarında kullanılmıştır. Rüzgâr gücü, çevre üzerinde fosil yakıtları yakmaktan çok daha küçük bir etkiye sahip olan popüler, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr çiftlikleri, elektrik iletim hattına bağlı olan birçok ayrı rüzgâr türbininden oluşur.

Rüzgâr, 2021 yılında 1800 TWh elektrik üretimi ile dünya elektriğinin %6'sını ve dünya enerjisinin yaklaşık %2'inden fazlasını sağlıyordu. (*Url-6*) 2021 yılında, çoğunlukla Çin ve ABD'de olmak üzere, küresel kurulu rüzgâr gücü kapasitesi 800 GW'yi aştı. (*Url-7*)

Rüzgâr gücü değişken yenilenebilir enerjidir, bu nedenle güç yönetimi teknikleri kullanılır veya arz ve talebi karşılamak için farklı güç kaynakları hibrit kullanılır. Şekil 1.4'te kurulu olan bir rüzgâr enerjisi santrali gösterilmektedir.

Şekil 1.4. Rüzgâr enerjisi santrali

1.1.3. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, gezegenin oluşumundan ve şu anda belirsiz ancak muhtemelen yaklaşık olarak eşit oranlarda radyoaktif malzeme bozulmasından kaynaklanan, dünya kabuğunda bulunan termal enerjidir. (Dye, 2012) Yeryüzünün içindeki yüksek sıcaklık ve basınç, bazı kayaların erimesine ve katı mantonun plastik gibi davranmasına neden olur. Bu durum, mantonun bazı kısımlarının çevredeki kayadan daha hafif olduğu için yukarı doğru hareket etmesinden oluşur. (Lay vd., 2008)

Örneğin, sıcak oluklardan gelen suyu kullanan jeotermal ısıtma, Filolojik zamanlardan beri yıkanmak ve antik Roma zamanlarından beri alan ısıtma için kullanılmaktadır. Jeotermal enerjiden elektrik üretimi için kullanılan terim olan jeotermal enerji, daha kısa bir süre önce önem kazanmıştır. Dünyanın jeotermal kaynaklarının teorik olarak insanlığın enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli olduğundan fazla olduğu tahmin ediliyor, ancak şu anda çok küçük bir fraksiyondan, çoğunlukla tektonik plaka sınırlarının yakınındaki yararlanılıyor.

Dünyada hükümet destekli araştırma ve endüstri deneyimi sonucunda jeotermal enerji üretme maliyeti 1980'ler ve 1990'lara göre %25 oranında azaldı, yeni teknolojik

gelişmeler, maliyetleri önemli ölçüde azalttı ve böylece uygulanabilir kaynakların aralığını ve boyutunu genişletti. (Cothran, 2002)

Dünya çapında 2019 yılında 13,900 megawatt (MW) jeotermal güç kullanıldı. Ek olarak 2010 yılından beri bölgesel ısıtma, alan ısıtma, endüstriyel amaçlar, tuzdan arındırma ve tarım uygulamaları için 28 gigawatt (GW) doğrudan jeotermal ısıtma kapasitesi kurulmuştur.(*Url-8*) Şekil 1.5'de bir jeotermal enerji santrali gösterilmektedir.

Şekil 1.5. Jeotermal Enerjisi Santrali

1.1.4. Hidroelektrik

Hidroelektrik veya hidroelektrik gücü, yüksek bölgedeki suyun daha alt seviyelerdeki bölgelere dökülürken ortaya çıkan kinetik enerjiyi kullanarak hidroelektrikten üretilen elektriktir. 2020 yılında hidroelektrik dünyanın elektriğinin altıda birini oluşturmuştur, 4500 TWh kapasitesiyle, diğer tüm yenilenebilir teknolojilerin yanı sıra nükleer enerjiden de fazla elektrik enerjisi üretilmiştir. Hidroelektrik, talep olması halinde yüksek miktarda düşük karbonlu elektrik besleyebilir. Bunu birçok güvenli ve temiz elektrik şebekesinin anahtarı haline gelmiştir. (*Url-9*)

Baraj ve depo ile birlikte, istasyonun ürettiği miktar değişen enerji taleplerine uyum sağlamak için birkaç saniye veya dakika içinde değişebileceği için esnek bir elektrik kaynağıdır. Bir hidroelektrik kompleksi inşa edildikten sonra proje doğrudan atık üretmez. Hemen hemen her zaman fosil yakıtla çalışan enerji santrallerinden çok daha düşük bir sera gazı çıkış seviyesine sahiptir.(Ahmed vd., 2011)

Bir hidroelektrik kompleksinin inşası, kurulduğu bölgenin yapısına bağlı olarak özellikle ekilebilir arazi kaybı ve nüfusun yer değiştirmesine yol açabilecek önemli çevresel etkiye neden olabilir. Ayrıca, ilgili nehrin doğal ekolojisini de bozarak yaşam ve ekosistemleri etkileyebilir. Barajlar selle ilgili riskleri iyileştirebilse de yıkıcı olabilecek bir baraj arızası riski de vardır. Şekil 1.6.'da bir hidroelektrik santral gösterilmektedir.

Şekil 1.6. Hidroelektrik Santrali

1.1.5. Biyoenerji

Biokütle, ısı veya elektrik üretmek için yakıt olarak kullanılan tesis bazlı malzemedir. Örneğin ahşap ve ahşap kalıntıları, enerji mahsulleri, tarım kalıntıları ve sanayi, çiftlikler ve evlerdeki atıklar. Biokütle doğrudan yakıt olarak kullanılabildiği için (örn. Ahşap kütükleri), bazı insanlar biokütle ve biyoyakıt kullanımını dönüşümlü olarak kullanır. (*Url-10*)

Biyoenerji, yenilenebilir biyolojik kaynaklardan gelen enerjidir. Biyokütle, biyoyakıtlar ve biyoenerjinin kullanımı ve gelişimi ile ilgili ekonomik ve teknik sistemleri içerir.

Biyoenerji kullanımı iki ana kategoriye ayrılır: "Geleneksel" ve "modern". Geleneksel kullanım; ahşap, hayvan atıkları ve geleneksel kömür gibi biyolojik kütlenin yanması anlamına gelir. Modern biyoenerji teknolojileri arasında küspe ve diğer

tesislerden üretilen sıvı biyoyakıtlar, biyorafineriler, kalıntıların anaerobik sindirimi yoluyla üretilen biyogaz, ahşap tanecik ısıtma sistemleri ve diğer teknolojiler yer alır.

Dünyanın yenilenebilir enerji kullanımının yaklaşık dörtte üçü biyoenerji içerir ve bunların yarısından fazlası geleneksel biyokütle kullanımını içerir. Biyoenerji, 2015 yılında toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %10'ini ve küresel güç üretiminin %1,9'ini oluşturdu. (*Url-11*) Şekil 1.7.'de bir biyoenerji santrali gösterilmektedir.

Şekil 1.7. Biyoenerji Santrali

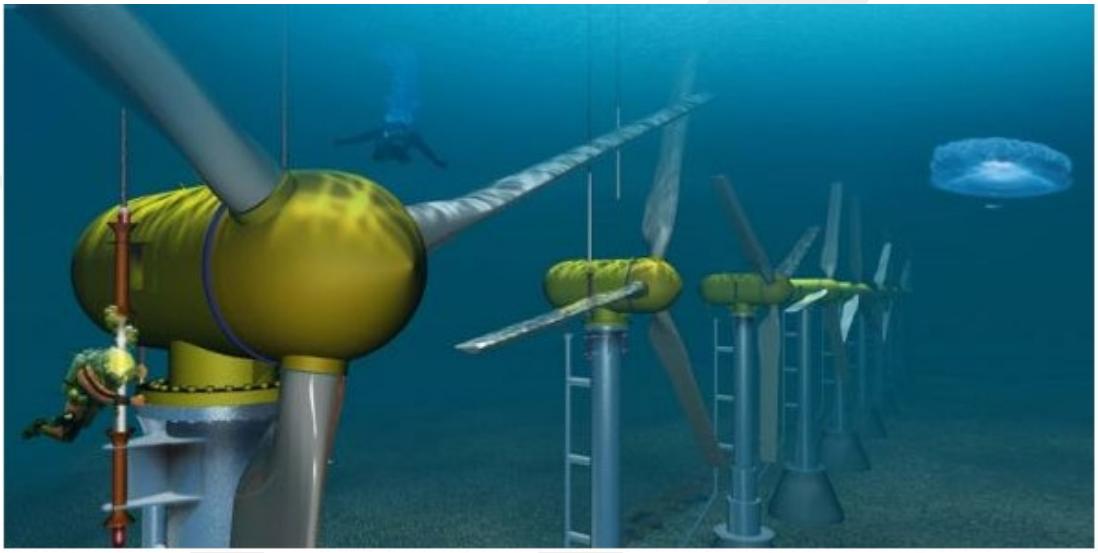
1.1.6. Okyanus Enerjisi

Okyanus enerjisi veya okyanus gücü (bazen okyanus enerjisi, okyanus gücü veya deniz ve hidrokinetik enerji olarak da bilinir) okyanus dalgaları, gelgitler, tuzluluk ve okyanus sıcaklığı farklarının taşıdığı enerjiyi ifade eder. Dünyanın okyanuslarında su hareketi, geniş bir kinetik enerji deposu veya hareket halindeki enerjiyi oluşturur. Bu enerjinin bir kısmı evlere, nakliyeye ve sektörlere elektrik üretmek için harcanabilir.

Okyanus enerjisi terimi hem dalga gücünü hem de yüzey dalgalarından gelen gücü, yani hareketli suyun büyük gövdelerinin kinetik enerjisinden elde edilen gelgit

gücünü kapsar. Rüzgâr türbinleri suyun üzerine yerleştirilmiş olsa bile rüzgâr enerjisi rüzgârdan türetildiği için açık deniz rüzgâr gücü bir tür deniz enerjisi değildir.

Okyanuslar muazzam miktarda enerjiye sahip olup, en yoğun nüfuslu bölgelere olmasa da pek çok insanın yaşadığı bölgelere yakındır. Okyanus enerjisi, dünya çapında önemli miktarda yeni yenilenebilir enerji kaynağı sağlama potansiyeline sahiptir. (Carbon Trust, 2006) Şekil 1.8.'de bir okyanus enerji santrali gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Okyanus Enerji Santrali

1.2. Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri

Uzun bir süredir var olan ve geliştirilmekte olan Enerji Depolama Sistemleri (EDS) teknolojileri, 21. yüzyılda büyük önem kazanmaktadır. Son zamanlarda, git gide elektrik üretimi kavramı, yenilenemeyen enerji kaynaklarının (kömür, petrol vb.) yerini yenilenebilir kaynaklara (güneş, rüzgâr, gelgit, jeotermal vb.) devretmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının günümüzdeki enerji sistemlerine girişiyle, enerji depolama sistemlerinin enerji sistemi yönetiminde kullanımı artmaktadır. Enerji depolama sistemleri kavramının evrimi kuşkusuz yeni fırsatlar ve sayısız avantajlar sunmasının yanı sıra bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Son yıllarda, bu enerji depolama sistemleri alanında birçok yeni gelişme kaydedilmiştir. Bu enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları tarafından sağlanan elektrik

üretiminin bazı sınırlarının üstesinden gelmeye yardımcı olmaktadır. Bu sınırlamalardan en önemlisi üretimin aralıklı olmasıdır(Cheeweewattanakoon vd., 2014).

EDS, elektriğin ihtiyaç duyulduğunda üretilmesini ve üretimin talebi aşması durumunda depolanmasını sağlar. Düşük talep, düşük üretim maliyeti veya mevcut enerji kaynakları kesintili olduğu dönemlerde depolama yararlıdır. Aynı zamanda, depolanan enerji yüksek talep, yüksek üretim maliyeti veya alternatif üretim olmadığında tüketilebilir (Medina vd., 2014) .

Dünyada gün geçtikçe enerji talebi daha da artmaktadır. Bu durum, enerji fiyatlarında artışlara yol açmıştır ve geleneksel enerji üretim yöntemleri, piyasa dengesizliğini, güç kalitesi sorunları ve karbondioksit emisyonları gibi sorunlara çözüm olmaktadır (Chen vd., 2009). Ayrıca, EDS frekans düzenleme, geçici kararlılık, voltaj desteği, kesintisiz güç kaynağı gibi birçok avantaj da sunar (Hadjipaschalis vd., 2009).

Enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisi arz ve talebini dengelemek ve elektrik sistemlerinin verimliliğini artırmak için bir araç olarak kullanılmasının yanında elektrik şebekelerinin istikrar ve kalitesini geliştirmek için de kilit bir unsurdur. Süreç, elektrik enerjisinin mevcut bir kaynaktan başka bir enerji biçimine dönüştürülmesini ve depolanmasını gerektirir; bu enerji de gerektiğinde tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Enerji depolama dönüşüm formları kimyasal, elektrokimyasal, mekanik, termal veya manyetik olabilir.

Küçük ölçekli enerji depolama cihazları, batarya enerji depolama sistemi (BEDS), termal enerji depolama sistemleri (TEDS), ultra kapasitörler (UK) ve volanları içerir (Cheeweewattanakoon vd., 2014). Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ve potansiyel dağıtık üretim (DÜ), geleneksel üretim yöntemleri için destek veya alternatif olarak kabul edilir (Hadjipaschalis vd., 2009). Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkilere bağlı olarak enerji üretiminde oluşan kesintilerden kaynaklanan enerji sürekliliği sorunu söz konusudur (Crespo Del Granado vd., 2014). YEK'in enerji ürettiği periyotta, düşük talep olabilir, ancak enerji talebinin yüksek olduğu periyotta, talep YEK enerji üretimini aşabilir(Koohi-Fayegh & Rosen, 2020). YEK enerji arzında hava koşullarına bağlı olduğundan aylık, mevsimsel ve yıllık dalgalanmalar söz konusudur. Bu nedenle, EDS, geleneksel üretim tesislerinin aşırı talebi karşılamasında ve YEK'in elektrik şebekesine entegrasyonlarında oluşan dalgalanmaları desteklemek için hayati bir gerekliliktir.(Fu vd., 2013)

1.2.1. Mekanik Enerji Depolama Sistemleri

Mekanik enerji depolama sistemleri, girilen enerjiyi depolamak için kinetik veya yerçekimi kuvvetlerinden yararlanır. Mekanik sistemlerin fizikleri genellikle oldukça basit olsa da (örn. bir volanı döndürmek veya bir tepe üzerindeki ağırlıkları kaldırmak), bu kuvvetlerin verimli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayan teknolojiler özellikle gelişmiştir. Bir kuvvet uygulandığında ortaya çıkan enerjiyi depolamanın iki farklı esas sistem vardır. Bunlardan ilki kütlenin hareketi sonucu açığa çıkan kinetik enerji, ikincisi potansiyel enerjideki değişim ile bağlantılıdır. Bu iki enerji birbirlerine dönüştürülebilirken aynı zamanda ısı enerjisine de dönüştürülebilir.(Huggins, 2015)

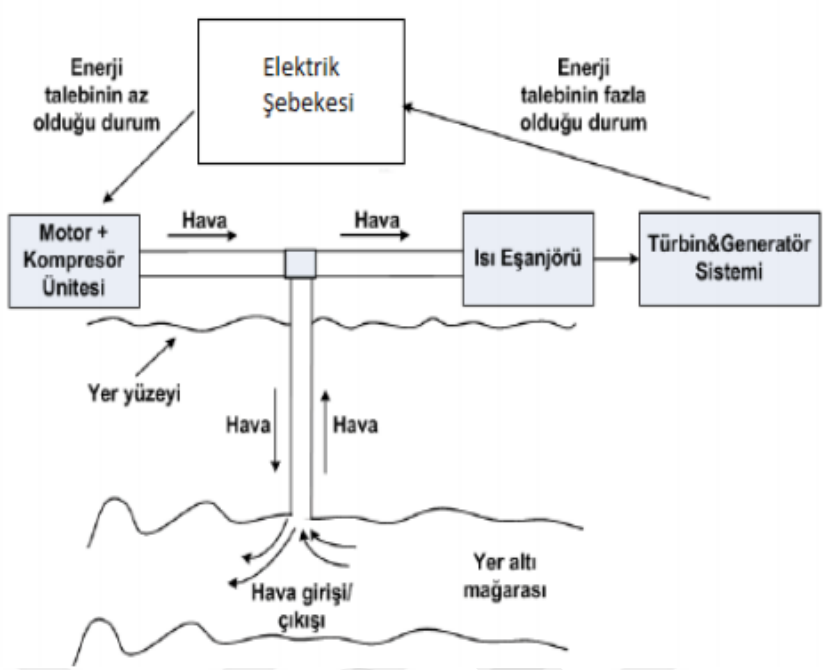
1.2.1.1. Volan Enerji Depolama Sistemi

Volan, döner bir kütle içinde kinetik enerjiyi depolayan mekanik bir cihazdır. Elektrik enerjisini yoğun olmayan dönemlerde kinetik enerji biçiminde depolayan volan için bir elektrik motoru kullanılır ve daha sonra yoğun talep dönemlerinde kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Volan Enerji Depolama Sistemi (VEDS), minimum bakım gerektirirken hızlı bir geçiş yanıtı sunar ve uzun bir kullanım ömrüne sahiptir. Bu depolama sistemi tipik olarak yüksek güçlü sistemler için uygundur, ancak yüksek enerjili sistemler için uygun değildir. VEDS sistemleri şebekeden uzak uygulamalarda frekansı düzenlemek ve güç dalgalanmalarını azaltmak için kullanılmıştır (Bhuiyan & Yazdani, 2012) Şekil 1.9.'da bir volan enerji depolama sistemi gösterilmektedir.

Şekil 1.9. Volan Enerji Depolama Sistemi

1.2.1.2. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemi

Sıkıştırılmış hava sistemleri enerjiyi sıkıştırılmış hava biçiminde yeraltı mağaralarında saklayan sistemlerdir. Bu sistemler elektrik enerjisini, havayı yüksek basınç altında kaplara ileten kompresörleri hareket ettirmek ve daha sonra bir piston veya türbin içerisinde, basınç altındaki bu havayı gerektiğinde enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Genellikle CAES sistemlerinin küçük çaplı ihtiyaçlara için işletme giderleri oldukça fazladır. Pratikte en küçük CAES enerji depolama ünitesi 10 MW güce ve 100 MW/s enerji üretimine sahiptir (H. L. Wills and S. G. Walter, 2000). Sıkıştırılmış hava enerji depolama sisteminin yapısı Şekil 1.10'de gösterilmiştir. Bulundurarak %99'dan fazla güvenilirlik ile yüksek empedans akımını algılamayı başarmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin büyük güç dağıtım şebekesinde yüksek empedans arıza akımlarının güvenilir bir şekilde tespit edilebileceğini göstermektedir.



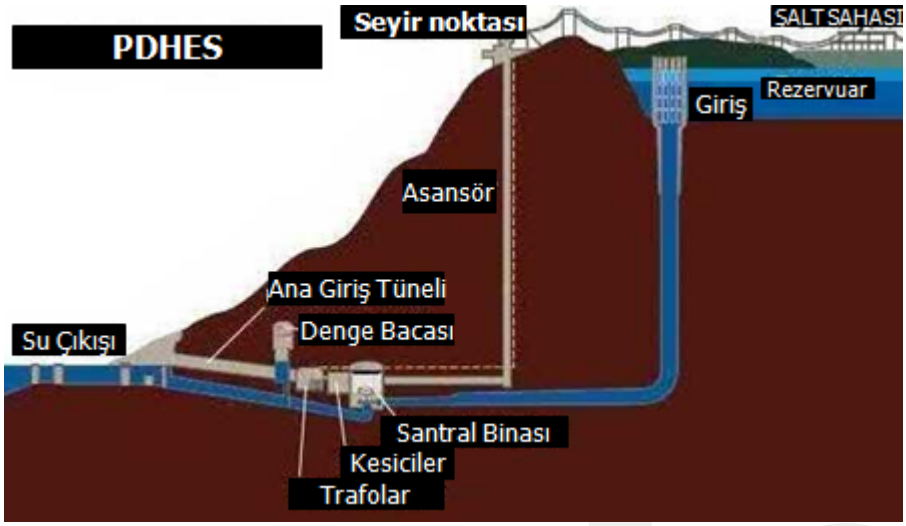
Şekil 1.10. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemi

1.2.1.3. Pompalanan Hidroenerji Depolama Sistemi

Pompalanan hidroenerji depolama (PVPHS), suyu bir boru üzerinden düşük bir irtifada bir su gövdesinden daha yüksek bir su haznesine taşımak için bir elektrikli pompa kullanarak elektrik enerjisini hidrolik potansiyel enerji biçiminde depolayan, kaynak tahrikli bir tesistir. Enerji, suyun bir hidro türbinden yüksek irtifadan daha düşük bir irtifaya geçerek boşaltılabilir. Türbin, türbinden enerji boşaldıkça elektrik üretebilen bir jeneratöre bağlıdır. Türbine giden suyun giriş akışı, değişken bir güç çıkışı sağlamak için kapılar kullanılarak kontrol edilebilir. Şarj sırasında regülasyon sağlamak için değişken hızlı sürücüler de kullanılabilir. Pompalanan hidro enerji depolama sistemleri, yükseklik ve suya erişim farkı olan yerlerin bulunabilirliği gibi özel koşullar gerektirir. Koşullar karşılandığında, şebekenin yanı sıra yenilenebilir enerji depolama için de uygun bir seçenektir. PVPHS sistemlerinin enerji verimliliği %70–80 arasında değişir ve genellikle 1000–1500 MW olarak boyutlandırılır. PVPHS sistemlerinin diğer özellikleri uzun varlık ömürleridir; örneğin, 50 - 100 yıl ve düşük işletim ve bakım maliyetleridir(Rehman vd., 2015). Pompalanan hidroelektriğin dezavantajlarından bazıları büyük birim boyutları, yüksek sermaye maliyetleri ve

topografı sınırlamalardır; örneğin, her iki depo ve çevresel olanlar arasındaki mevcut yükseklik farklarıdır. Yeraltı PVPHS sistemleri, örneğin terk edilmiş madenler gibi yeraltı rezervuarlarını kullanarak bu zorluklardan kaçınmak için teknik açıdan uygulanabilir bir seçenek olarak kabul edilir (Menéndez vd., 2019). Teknik olarak uygulanabilir ticari ve sosyal açıdan da kabul edilebilir PVPHS 'ler için uygun sahaların tanımlanması ve seçilmesine yönelik yöntemler ve araçlar hakkında araştırma yapılması gerekir. Ekonomik açıdan uygulanabilir PVPHS 'ler için kullanılabilecek kaynakların azaldığını öne sürüyorlar.

Geleneksel PVPHS 'lere göre daha fazla çalışma esnekliği ve verimlilik elde etmek için çalışma saatlerini artırmak amacıyla değişken hızlı PVPHS teknolojileri ve baypas pompası düzenlemeleri geliştirilmektedir. Değişken hızlı PVPHS teknolojileri, biraz daha yüksek sermaye maliyetleriyle geleneksel PVPHS 'lere göre daha geniş bir çalışma ve verimlilik yelpazesi sunar. Küçük kapasitelerde PVPHS sistemleri tasarım pompalama kapasitesini %60'den tam kapasiteye ve üretim kapasitesini %20'den tam kapasiteye kadar değiştirebilir (Beevers vd., 2015). Kapasite değişken iken tek makineler verimlilik açısından sınırlı olsa da çeşitli yapılandırmalarda birden fazla makine kullanma seçenekleri de incelenmiş. PVPHS 'lerinin değişken hızlı çalışması için farklı seviyelere karşılık gelen çeşitli kontrol stratejileri de geliştirilmiştir (Krishnakumar R. vd., 2019). Değişken hızlı PVPHS sistemlerinin hızlı güç tepkisi, rüzgar gücü düzenlemesi için değişken ve sabit hızlı PVPHS sistemleri arasında yapılan bir karşılaştırmada kanıtlanmıştır (W. Yang & Yang, 2019). Sonuçlar, ceza enerjisi ve güç gecikmesi olmak üzere iki durum arasındaki güç farkının ortalama ve standart sapmasına göre karşılaştırılır ve sabit hızlı duruma kıyasla değişken hızlı PVPHS durumunda tek bir büyüklük sırasına kadar iyileştirmeler gösterir. Güç dönüştürücüler, mekanik olarak kontrol edilen sabit hızlı sisteme kıyasla PVPHS sistemlerinin pompalama ve üretme modlarında hızlı yanıt (yaklaşık 2 sn içinde) sağlayarak mikro şebeke uygulamalarına olanak tanır. Uygulamada gözlemlenen çeşitli çalışma modlarında bir PVPHS sistemi ve şebeke içinde stabilize etmek için güç dönüştürücülerin ve denetleyicilerin yeteneğini incelemek üzere bir prototip oluşturma ortamı geliştirilmiştir (Mohanpurkar vd., 2018). Şekil 1.11.’de örenek bir pompalanan hidroenerji depolama sistemi şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Pompalanan Hidroenerji Depolama Sistemi

Yang ve Jackson (C. J. Yang & Jackson, 2011), PVPHS teknolojilerine yönelik yeni geliştirme faaliyetleri ve yaklaşımlar da dahil olmak üzere ABD'deki pompalanan hidroenerji depolama tesislerinin tarihsel gelişimi üzerine çalışmalar yapmışladır. PVPHS sistemlerinin çevresel sorunlarını azaltmak için geliştiriciler, PVPHS uygulamalarında atık suyun potansiyel kullanımı da dahil olmak üzere çevresel etkileri ele almanın yenilikçi yollarını önermektedir. Artan enerji depolama ihtiyacıyla bu yeni yöntemler, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının birleştirilmesiyle PVPHS 'nin daha fazla kullanımına yol açabilir. Yeni PVPHS tasarımları, geleneksel PVPHS 'lerle ilgili başlıca zorlukları ele alıyor. Vasel-be-Hagh ve d. (Vasel-Be-Hagh vd., 2013) uzun su deposu kuleleri veya uzun boru tesisatı gerektirmeyen ve elektrik fazlalığına bağlı olarak çok çeşitli kapasitelerde ölçeklenebilir çalışmaya sahip yeni bir tasarım sunuyor. Bu tasarım, sürekli basınç ve daha hızlı deşarj sağlayarak anlık talep dalgalanmalarına hızlı yanıt verir. Şekil 1.12. dünyadan pompalanan hidroenerji depolama sistemi örneği gösterilmektedir.

Şekil 1.12. Dünyada Pompalanan Hidroenerji Depolama Sistemi Örnekleri (Michigan)

1.2.2. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Elektrokimyasal enerji depolama için gereken akü, belirli bir yük için gerekli çalışma gerilimini ve kapasitesini elde etmek için uygun seri ve paralel düzende iki veya daha fazla hücre bağlandığında elde edilir. Piyasada birçok farklı pil türü vardır ve bunların çoğu ile daha fazla araştırma ve geliştirme yapılabilir. PV sistemlerinde çeşitli türlerde piller kullanılabilir: Nikel kadmiyum (NiCd), Nikel Çinko (NiZn) veya kurşun asit. Akünün yüksek şarj veya deşarj verimliliği, düşük kendi kendine boşalma ve uzun çevrim ömrü gibi bazı önemli özellikleri vardır (Divya & Østergaard, 2009).

1.2.2.1. Nikel Kadmiyumun (NiCd) Bataryalar

NiCd piller genellikle nispeten ucuz ve sağlam olarak bilinir. Pozitif nikel elektrot nikel hidroksit/nikel oksithidroksit (Ni(OH)2/NiOOH) bileşiktir; negatif kadmiyum elektrot ise metalik kadmiyum (CD) ve kadmiyum hidroksit (CD (OH) 2) içerir. Elektrolit, potasyum hidroksit (KOH) sulu çözeltisidir. Bu teknoloji ekonomik olarak fiyatlandırılmıştır ve döngü başına en düşük maliyeti sunar. NiCd pilde hafıza etkisi, Kadmiyumun çevre üzerindeki olumsuz etkisi ve yüksek başlangıç maliyeti gibi

dezavantajlar vardır. Bu nedenle, NiCd teknolojisinin yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılması tavsiye edilmez.

1.2.2.2. Nikel-Hidrojen Bataryalar

Nikel-hidrojen pil, uzun kullanım ömrü, aşırı şarj direnci gibi bazı avantajlar sunar. Uzay araçları ve iletişim uyduları gibi alan uygulamaları için genellikle uygundur. Ancak yenilenebilir enerji tesisatlarında bu tip bir akünün uygulanması, yüksek başlangıç maliyeti, yüksek hücre basıncı ve düşük volümetrik enerji yoğunluğu gibi bazı dezavantajlarla sınırlıdır.

1.2.2.3. Nikel-Metal Hidrit Bataryalar

Bu piller otomotiv, tıbbi uygulamalar ve taşınabilir cihazlar için ticari bir ürün olarak oldukça olgundur. Yenilenebilir enerji alanında kullanılmaları, yüksek kendi kendine deşarj, azaltılmış çevrim ömrü ve arızaya yol açan yüksek basınç gibi bazı dezavantajlardan dolayı tercih edilmemektedir. Ancak aslında, üreticiler rüzgâr ve güneş kaynakları tarafından üretilen gücün depolanması için büyük kapasiteli sabit piller geliştiriyorlar. NiMH çok daha az çevre açısından sorunlu olduğundan, NiCd pilleri kolayca değiştirebilirler.

1.2.2.4. Nikel- Çinko Bataryalar

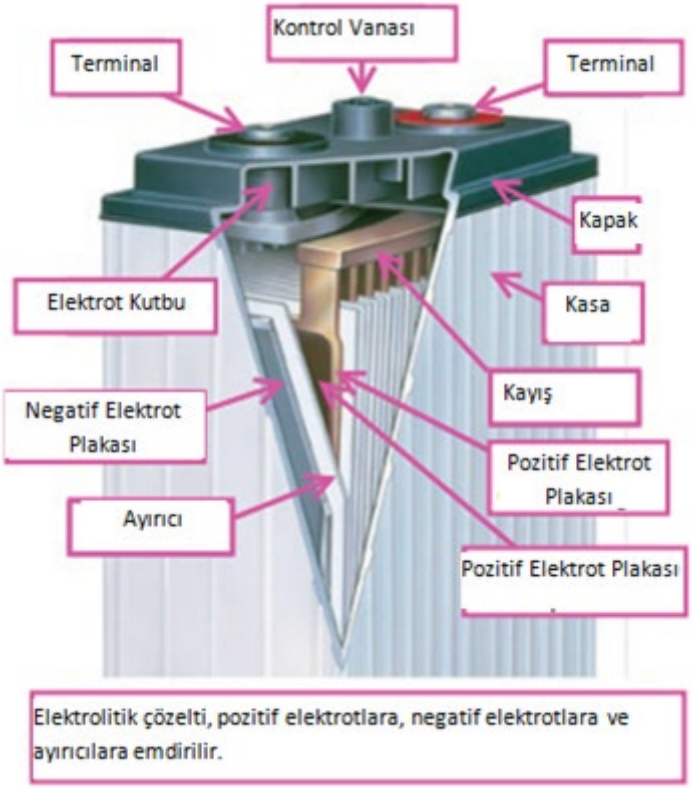
Pozitif elektrot nikel oksitten, negatif elektrot ise çinko metalden oluşur. Daha iyi çevresel etkilere ek olarak, bu tip aküler yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (nikel kadmiyumdan %25 daha yüksek). NiZn pil, NiCd pilden daha ucuzdur ve NiCd ile Kurşun Asit teknolojileri arasında fiyatlıdır. NiZn pil, kurşun aküye göre daha yüksek bir enerji/kütle oranına ve daha yüksek bir güç/kütle oranına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı NiZn teknolojisi NiCd ve kurşun piller yerine yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanım potansiyeline sahiptir.

1.2.2.5. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun-asit akü, sülfürik asit elektrolitine batırılmış iki elektrottan oluşur. Negatif, metalik sünger kurşun içeren bir ızgaraya iliştirilir ve pozitif, metalik kurşun dioksit granülleri bulunan gözenekli bir ızgaraya iliştirilir. İki tip geleneksel kurşun asit akü vardır: Daldırılmış Kurşun Asit (FLA) ve Valf ayarlı kurşun asit akü (VRLA) (Mohammedi vd., 2016). Daldırılmış akü, mühürlü VRLA aküden daha ucuzdur ancak düzenli bakım gerektirir ve yayılan gazların güvenli bir şekilde dağılmasını sağlamak için havalandırılan bir alanda tutulmalıdır. Kurşun asit aküler, özellikle akıtmaz olmaları, kolay taşınmaları ve diğer tiplere göre daha düşük maliyetleriyle bağımsız güç sistemlerinde yenilenebilir enerji dağıtımını desteklemek için en çok kullanılan modellerdir. Bununla birlikte, geleneksel kurşun asitli aküler, özellikle kısa çevrim ömrü (<500), düşük deşarj derinliği (<%20), sınırlı kullanım ömrü (3-4 yıl), yavaş şarj ve bakım gerektiren çeşitli teknik sorunlardan dolayı sıkıntı çekmektedir. Bu olumsuzlukları azaltmak için daha yeni kurşun asitli piller piyasaya sürülmüştür. Bu yeni piller, süper kapasitörlü negatif elektrot oluşturmak için negatif elektrotta karbon kullanımına dayanır. Bu tip akülerde pozitif elektrot aynı kimyasal işleme maruz kalırken negatif elektrotta kimyasal bir işlem yoktur (Mohammedi vd., 2016). Bu süreçte pozitif elektrot daha az korozyona uğradığından, geleneksel kurşun asit teknolojisine göre daha uzun kullanım ömrü ve daha iyi performans sağlar(Mohammedi vd., 2016).

1.2.2.6. Sodyum-sülfür Bataryalar

Bir sodyum-sülfürlü aküde sodyum ve sülfür sıvı biçimindedir ve elektrotlar, sodyum katot ve sülfür anot olur. Elektrolitin rolünü üstlenen alüminyum ile ayrılırlar. Bu, yalnızca pozitif sodyum iyonlarının içinden geçmesine ve sülfür ile birlikte sodyum polisülfür oluşturmasına olanak tanır. Bu tip aküler yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek şarj/deşarj verimliliğine (%89-92) ve uzun çevrim ömrüne sahiptir ve ucuz malzemelerden üretilmiştir. Sodyum-sülfür yüksek çalışma sıcaklığı (350º C) gerektirir, bu da kükürt akülerin konut uygulamaları için kullanımını zorlaştırır (Ogunniyi & Pienaar, 2017). Geniş güç seviyesinde, sodyum-sülfür lider pazar teknolojisidir ancak aslında Lityum iyon aküyle rekabet etmesi gerekir. Şekil 1.13'te bir valf ayarlı kurşun-asit pilin yapısı gösterilmektedir.



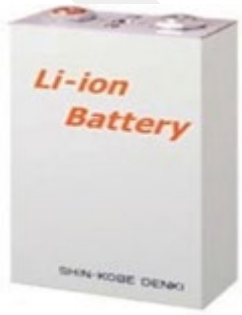
Şekil 1.13. Valf ayarlı kurşun-asit pilin yapısı

1.2.2.7. Sodyum Nikel Klorür Bataryalar

Sodyum Nikel Klorür Akü, ZEBRA (Sıfır Emisyonlu Akü Araştırma Etkinliği) olarak da bilinir Pil ve yaklaşık 270º C- 350º C arasında çalışan bir sistemdir. Aküdeki kimyasal reaksiyon, şarj aşamasında sodyum klorür, nikel ile nikel klorür ve sodyum arasında geçiş yapar. Deşarj sırasında reaksiyon tersine döner. Her hücre sağlam bir çelik muhafaza içinde bulunur. Ticari modeller, minimum 1 MW gücünde aküler öneririm. Zebra pili, %75 verimlilikle 4500 döngülük tipik uzun bir kullanım ömrüne sahiptir. Sodyum nikel piller, uzun deşarj süresi, uzun çevrim ömrü ve hızlı tepki sayesinde büyük yenilenebilir enerji santrallerinde toplu halde depolama için uygundur. Ancak, erimiş hal sıcaklığını korumak için ısı gerekmesi nedeniyle bunların kullanımı büyük ölçüde sınırlıdır. Dahası, erimiş sodyum suyla tehlikeli bir şekilde tepkimeye girer ve bildirilen olaylarda yangına neden olur (Villablanca vd., 2001).

1.2.2.8. Lityum iyon Bataryalar

Lityum iyon (Li-ion) pillerin çalışması, şarj sırasında lityum iyonlarının pozitif elektrottan negatif elektroda aktarılmasına ve deşarj sırasında da negatif elektroda aktarılmasına dayanır. Bir Li-ion bataryasının pozitif elektrotu, lityum iyonları saklayabilen bir dizi lityum metal oksidinden ve bir Li-ion bataryanın negatif elektrotundan oluşur. Elektrolit, organik karbonatlarda çözünmüş lityum tuzlardan oluşur. Lityum iyon aküler, güvenli ve verimli bir çalışma için sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyar. Lityum iyon piller, dünyanın en popüler depolama biçimidir ve 2015'de kullanılan enerji depolama sisteminin %85.6'ini temsil eder (Meng vd., 2018). Taşınabilir cihazlar, hibrit elektrikli araçlar ve elektrikli araçlar nedeniyle lityum için büyük talep, büyük ölçekli depolama sistemlerinin çok pahalı olmasına neden olabilir (Ellis & Nazar, 2012). Bu tür bir pil en yüksek fiyata sahip olsa da, en düşük döngü başına maliyeti gösterdiği için yenilenebilir enerji depolama özelliği sağlar(Mohammedi vd., 2016). Şekil 1.14'te bir lityum iyon pilin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Lityum iyon pilin yapısı

1.2.3. Akış Bataryaları

Akış bataryalar, sıvı elektrolitler içinde çözünmüş bir veya daha fazla iyon tipinde enerji depolar (Zhao vd., 2015). Akış akülerinde redoks ve hidrit aküler bulunur. Redoks akışlı bir aküde, farklı harici tanklarda iki sıvı tutulur ve akü çalıştırıldığında kuru bir elektrokimyasal yığından pompalanır. Hidrit akü durumunda, harici bir depoda

yalnızca bir çözelti depolanır, diğeri daima elektrokimyasal ünitede tutulur(Ellis & Nazar, 2012). Çinko bromun (ZneBr) akü, vanadyum akü redoks akışlı bir aküdür. Akış aküsünün gücü elektrokimyasal reaktörün boyutuna ve tasarımına bağlıdır; depolanan enerji ise daha büyük tanklar kullanılarak artırılır (Ogunniyi & Pienaar, 2017). Akış akülerinde, enerji elektrolit çözeltilerinde depolanan potansiyel bir kimyasal enerjidir. Vanadyum redoks akışlı batarya (VRB) 'nin avantajları şunlardır (Cheeweewattanakoon vd., 2014):

- Artan vanadyum iyon konsantrasyonları sayesinde enerji yoğunlukları %70'den fazla artmıştır.
- Artan akım yoğunlukları ile çalışma.
- Artırılmış çalışma sıcaklığı aralığı.
- Basit tasarımlarda megawatt/megawatt-saat güç ve enerji depolama.
- Güç ve enerji kapasitelerini ayrı ayrı tasarlama esnekliği.
- Tek seferde 12 saat kadar deşarj etme gücü.
- Gerektiğinde hızlı bir şekilde tam güce yükseldi.
- Mükemmel elektrokimyasal tersinirlik sayesinde uzun çevrim süresi (> 5000 derin çevrim).
- Yüksek enerji verimliliği Yüksek derecede reaktif veya toksik madde içermez, güvenlik ve çevre sorunlarını en aza indirir.
- Depolamayı kaybetmeden uzun süre boyunca rölantide bırakılan kapasite.
- Düşük bakım maliyeti

1.2.4. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri

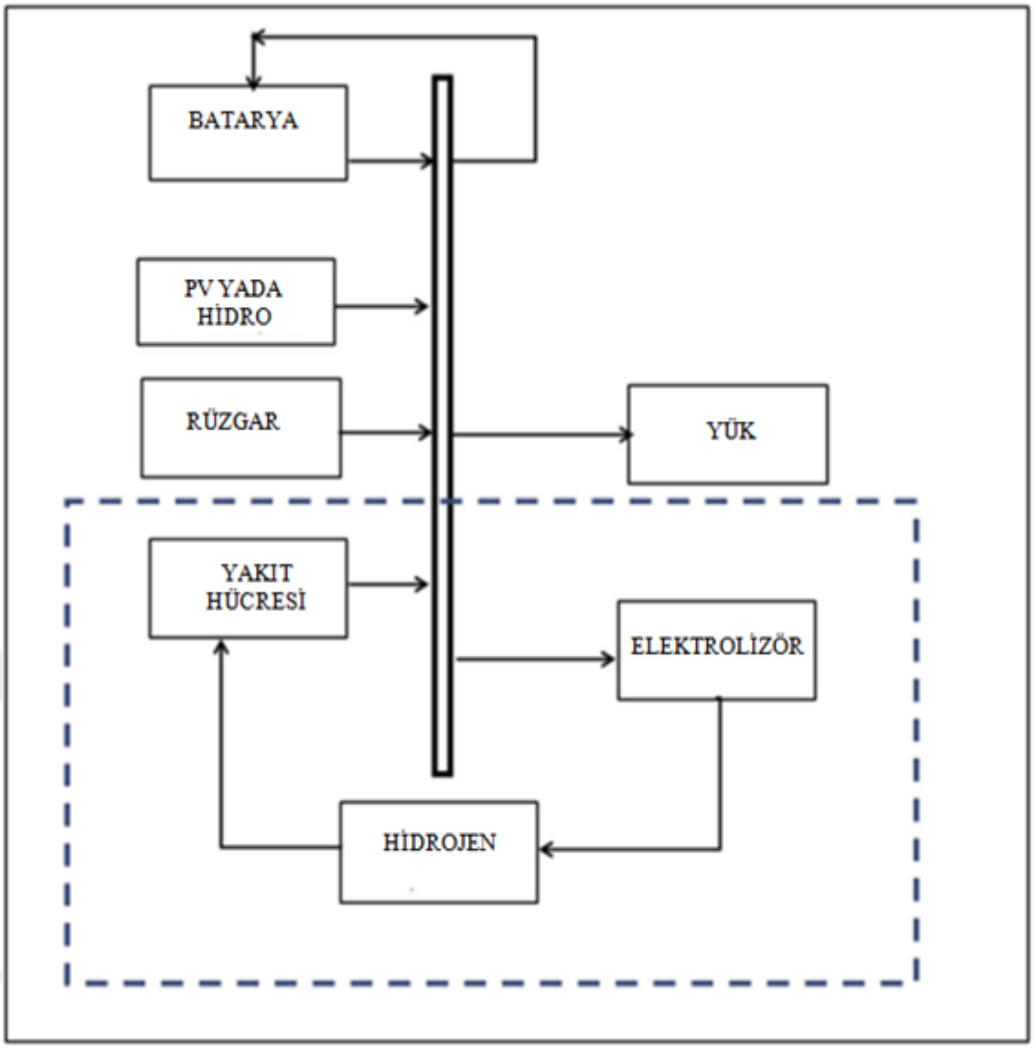
1.2.4.1. Hidrojen Enerji Depolama

Hidrojen, rüzgâr ve güneş kaynakları da dahil olmak üzere elektrik üretimi için yenilenebilir enerji uygulamalarının gelişmesine olanak sağlayan önemli bir teknolojidir. Hidrojen, kütle başına diğer yakıtlara göre en yüksek enerjiye sahip yakıttır. Ancak, ortam sıcaklığındaki düşük yoğunluğu, daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşmak için gelişmiş depolama teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirir. Farklı hidrojen depolama modları kullanılabilir:

- sıkıştırılmış,
- sıvılaştırılmış,
- metal hidrit vb.

Bir yakıt hücresinde hidrojen ve oksijen, elektrik üretmek için su oluşturmak üzere reaksiyon gösterir. Bir yakıt hücresi temel olarak elektrotlar ile ayrılan elektrotlar içerir. Elektrolit tipine bağlı olarak farklı yakıt hücreleri türleri vardır. Kayda değer çıkış gerilimleri elde etmek için, yakıt hücresi yığını elde etmek üzere birkaç yakıt hücresinin birleştirilmesi gerekir. Çoğu mobil uygulama ve özellikle otomobil, proton değişim zarı yakıt hücreleri (PEMFC) tarafından hakimdir.

Şekil 1.15'te gösterilen rüzgâr sisteminde veya yük sağlayan hibrit rüzgâr/fotovoltaik (veya hidro) sistemde kısa süreli depolama ve aynı zamanda sistemi enerji kaynaklarının dalgalanmalarına karşı dengelemek için bir akü sistemi eklenebilir, ancak uzun süreli depolama için hidrojen depolama tankına bağlı bir elektrolizör kullanılır.

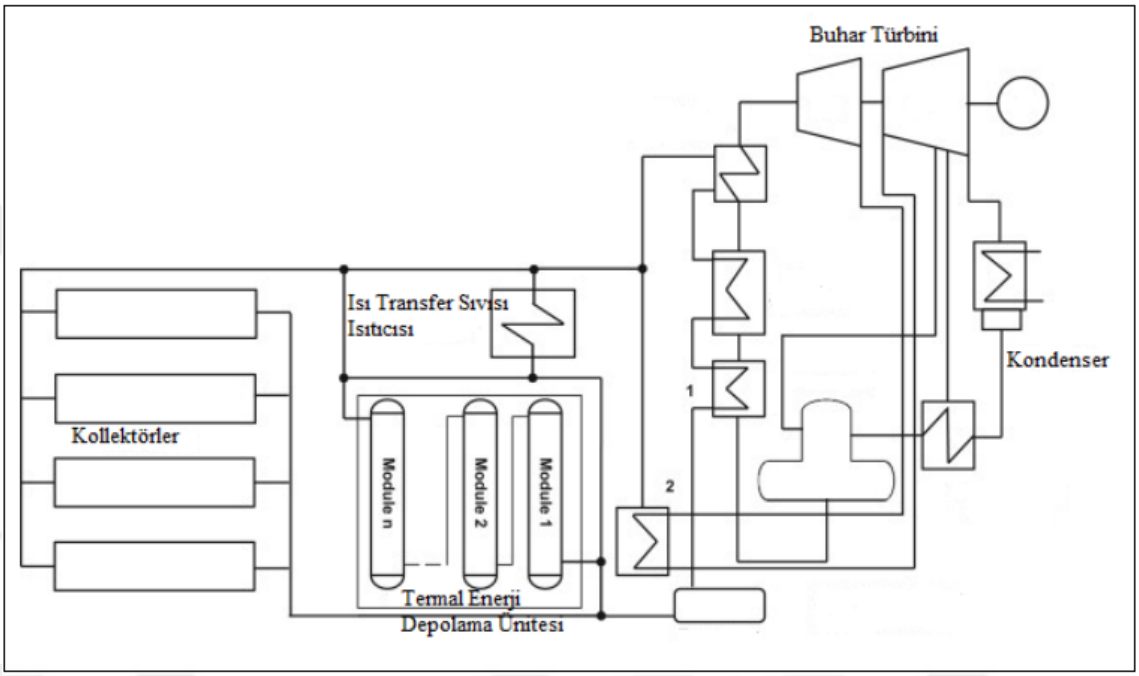


Şekil 1.15. Yük sağlayan hidrojen depolamalı hibrit rüzgar/fotovoltaik sistem

1.2.5. Termal Enerji Depolama

Termal enerji depolama, bir depolama ortamında ısı veya "soğuk" depolamayı ifade eder. Termal depolama sistemleri genellikle bir depolama ortamından ve ısı enjeksiyonu ve ortama/ortamdan tahliye ekipmanından oluşur. Depolama ortamı doğal olarak meydana gelen bir yapı, bölge olabilir veya ısı kaybını veya çevreden (su tankları) kazanımı önleyen bir kap kullanılarak yapay olarak yapılabilir. Üç ana termal enerji depolama (TES) modu vardır: Hassas, gizli ve termokimyasal. Geleneksel olarak, ısı depolama, bir ortamın sıcaklığını yükselterek hassas ısı biçimindedir. Bu tür enerji depolamasına örnek olarak sıcak su depolama (hidro birikme), yeraltı termal enerji depolama (sinek, boredelik, kavern, topraktaki kanallar, çukur) ve kaya dolu depolama (kaya, çakıl taşı, çakıl taşı) (Fleuchaus vd., 2018). Gizli ısı depolama, genellikle katı ve sıvı aşamalar arasında depolama malzemesinin fazını değiştirmeyi içeren ve sağlam gaz,

sıvı gaz ve katı faz değişiklikleri de mevcut olan gelişen bir teknolojidir. Gizli ısı depolama, özellikle faz değiştirme sürecinin izotermal yapısı ve depolama kapasitesi ve kompaktlık birimi başına düşük ağırlığı nedeniyle son zamanlarda önemli ölçüde dikkat çekti. Kararlı faz değiştirme sıcaklığı ve yüksek gizli ısı gibi mantıklı ısı depolama malzemelerine kıyasla gelişmiş termal özellikleri de ortaya çıkmasına katkıda bulunan faktörlerdir. Depolama ortamı olarak kullanılan tipik faz değiştirme malzemeleri (PCMS) parafin, esterler, yağ asitleri ve tuz hidratları, üst tetik tuzlar ve suyu içerir (Luo vd., 2015). Şekil 1.16'te bir TED Santrali Şematiği gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Faz değişim malzemeleri ile termal depolama (Cardenas, B., Leaon, N., 2013)

Diğer enerji depolama türlerine benzer şekilde, termal enerji kaynağı sürekli bir hızda ve/veya sabit bir maliyetle enerji sağlamadığında termal enerji depolanır. Termal enerji kaynağındaki dalgalanmalar mevsimsel olarak veya daha kısa süre içinde meydana gelebilir. Mevsimsel enerji depolamada, birkaç ay sonra kullanmak üzere ısıyı koruyabilecek daha büyük bir enerji depolama sistemi gereklidir. Örneğin, yazın zemindeki binadan çıkarılan ısıyı saklamak için bir binaya bağlanan ve binada ısıtma gerektiğinde soğuk mevsimlerde kullanılan bir yer ısısı depolama sistemi. Benzer bir konsept, yaz boyunca güneş enerjisinin kış aylarında kullanılmak üzere saklanmasıyla da uygulanabilir. Kısa süreli enerji depolama sistemleri genellikle daha küçük kapasitelere sahiptir ve ısıyı birkaç saat ila birkaç gün boyunca korur. Bu sistemler aynı zamanda gün içinde ısınmanın gerektiği soğuk saatlerde güneş enerjisinin saklanması için de kullanılabilir. Gün içinde elektrikli ısıtma ve/soğutma kullanılan binalarda

termal enerji depolayarak, düşük oranlı dönemlerde elektrik kullanarak üretilen ve en yoğun saatlerde kullanan termal enerji depolama sistemleri elektrik maliyetini azaltmak için kullanılabilir.

Termal enerji depolama teknolojileri üzerine yapılan araştırmalar çok geniştir ve bu teknolojilerin çeşitli yönleriyle ilgili ayrıntılı incelemeler mevcuttur (Tatsidjodoung vd., 2013). Bunlar arasında TED modları, malzeme termal özellikleri, formülasyon ve modelleme yaklaşımları, mantıklı ve gizli termal depolama sistemleri için termal geliştirme teknikleri ve ısı depolama tesislerinin tasarım yapılandırmaları yer alır (Lin vd., 2018).

Gizli ısı depolama üzerine yapılan araştırmalar çoğunlukla yeni depolama ortamının geliştirilmesine ve kullanıma sunulmasına ve mevcut depolama ortamlarının termodinamik özelliklerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Yakın zamanda incelenen PCM, bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilen yağ asitlerinden meydana gelmektedir. PCM 'lerin, zaman zaman yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte akıllı termal ızgara sistemlerine uygulanmasıyla ilgili söz verdiklerini öne sürülüyor.

Zemin termal depolama, mantıklı termal enerji depolamanın giderek yaygınlaştığı bir yöntemdir. Yaz aylarında bir binadan ısı almak ve kış kullanımı için yerde saklamak için genellikle bir dolaştırım aracı (genellikle su veya hava) kullanılır. Isı eşanjörleri, dolaşımdaki ortamı daha derin bir zemine taşır. Yer ısı eşanjörlerinin modelleri ve uygulamaları Florides ve Kalogirou tarafından incelenmiştir (Florides & Kalogirou, 2007). Hassas ısı depolama için yeraltı alanlarının kullanılma konusundaki gelişmeler arasında sinek, borek deliği, mağara, çukur ve su tankı termal enerji depolaması yer almaktadır. Suyun yüksek spesifik ısısı ve enerji şarjı ve boşalması için yüksek kapasite oranları nedeniyle su tanklarının termodinamik bakış açısından en uygun seçenek olarak önerilmektedir (Lee, 2010). Akifer termal enerji depolama (ATED) sistemleri doğal suyu, saklama ortamı olarak doygun ve geçirgenleştirilmiş bir yeraltı katmanında kullanır. Ülke bazında istatistiksel analiz, Feluchaus ve d. (Fleuchaus vd., 2018) gelişmekte olan bir pazar evresi, büyüme evresi ve olgunluk evresi perspektifinden ticarileştirme düzeyine girmek için piyasa engellerini belirlenmesi gerektiğini savunur. Yeni gelişen pazar evresinin önündeki engeller nedeniyle teknik fizibilite, farkındalık eksikliği ve teknolojide güvensizliklerin giderilmesi önerilmektedir. Teknoloji büyüme aşamasına doğru ilerledikçe, yüksek yatırım maliyetleri, politika ve mevzuat ve ulusal ve yerel danışmanlar arasında bilgi eksikliği önemli engeller haline gelir. Yerleşik enerji piyasalarında, daha küçük uygulamalarda

daha düşük finansal tasarruflar ve giderek artan sayıda uygulanan sisteme sahip yüzey altı alanı, faktörleri sınırlayabilir.

1.2.6. Elektriksel Enerji Depolama

1.2.6.1. Kapasitor ve Süperkapasitör Enerji Depolama

Kapasitörler, plakalar üzerinden gerilim diferansiyeli uygulandığında, iki plaka metal veya iletken arasında dielektrik olarak bilinen bir yalıtım malzemesiyle ayrılmış elektrik yükü olarak enerji depolar. Plakalardan biri doğrudan akım kaynağından elektrik ile şarj edildiğinde, diğer plaka karşı işarete yük getirmiş olacaktır. Kapasitansı belirleyen faktörler plakaların boyutu, plakaların ayrılması ve dielektrik için kullanılan malzeme tipidir. Kapasitörlerde depolanan enerji, kapasiteleri ve elektrokimyasal hücrenin terminalleri arasındaki gerilimin karesiyle doğru orantılıdır, kapasite ise elektrotlar arasındaki mesafeyle orantılıdır. Kapasitörler birçok genel amaçlı güç kontrolü uygulamasında zaten kullanılmaktadır. Ancak kapasitörlerin başlıca sorunu düşük enerji yoğunluklu olmasıdır. Yüksek kapasite gerekiyorsa dielektrik alanı çok büyük olmalıdır. Bu gerçek, büyük kapasitörlerin ekonomik olmayan ve genellikle hantal bir şekilde kullanılmasını nedenidir. (Chen vd., 2009)

Süper kapasitör (SC), diğer kapasitörlerden çok daha yüksek kapasitans değerine sahip, ancak düşük gerilim limitlerine sahip, elektrolitik kapasitörler ile şarj edilebilir aküler arasındaki boşluğu kapatan yüksek kapasiteli bir kapasitördür. Tipik olarak birim hacmi veya kütlesi başına elektrolitik kapasitörlere göre 10 ila 100 kat daha fazla enerji depolayabilir, bataryalardan çok daha hızlı şarj yapabilir, ve şarj edilebilir pillere göre çok daha fazla şarj ve deşarj döngüsüne izin verirler.(Häggström & Delsing, 2018)

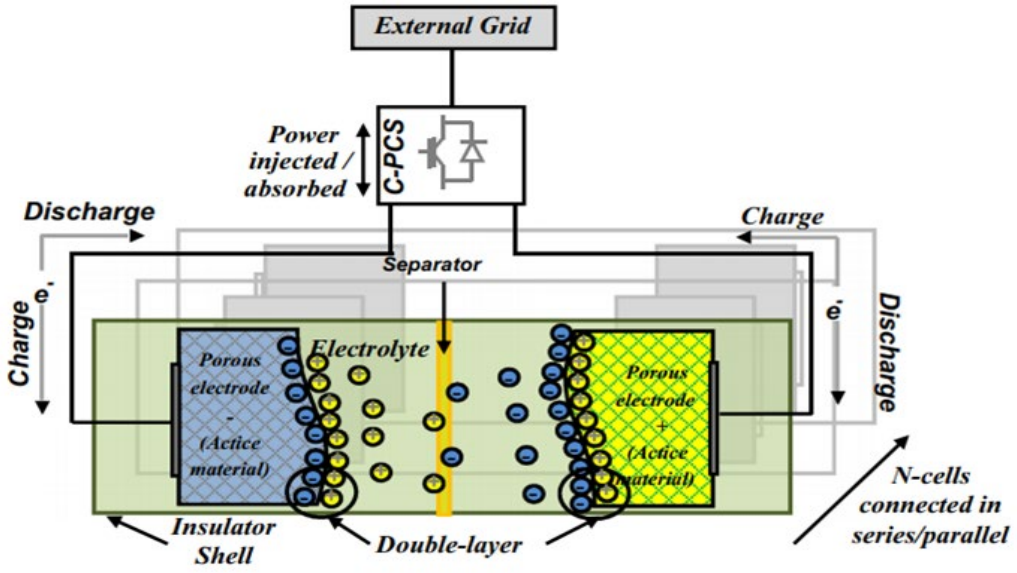
Sıradan kapasitörlerden farklı olarak süperkapasitörler geleneksel katı dielektrik kullanmaz, bunun yerine elektrostatik çift katmanlı kapasitans ve elektrokimyasal pseudokapasitans kullanır, her ikisi de kapasitörün toplam kapasitansa birkaç farkla katkıda bulunur: (Bueno, 2019)

Letrostatik çift katmanlı kapasitörler (EDLCs), elektrokimyasal pseudokapasitansa göre çok daha yüksek elektrostatik çift katmanlı kapasitanslı karbon elektrotlar veya türevler kullanır ve iletken elektrodun yüzeyi ile elektrolit arasındaki arayüzde

Helmholtz çift katmanında yükün ayrılmasını sağlar. Şarjın ayrılması, geleneksel bir kondansatöre göre çok daha küçük birkaç ångström (0.3–0.8 nm) sırasıdır.

Elektrokimyasal pseudokapasitörler, çift katmanlı kapasitansa ek olarak yüksek miktarda elektrokimyasal pseudokapasitans içeren metal oksit veya iletken polimer elektrotlar kullanır. Pseudokapasitans, redoks reaksiyonları, interkalasyon veya elektrosorpsiyon ile Faradaik elektron şarj aktarımı ile elde edilir.

Lityum iyon kapasitör gibi hibrit kapasitörler, farklı özelliklere sahip elektrotlar kullanır: Biri çoğunlukla elektrostatik kapasitans, diğeri ise çoğunlukla elektrokimyasal kapasitans gösterir. Şekil 1.17.'da bir kondansatör depolama sistemi gösterilmektedir.



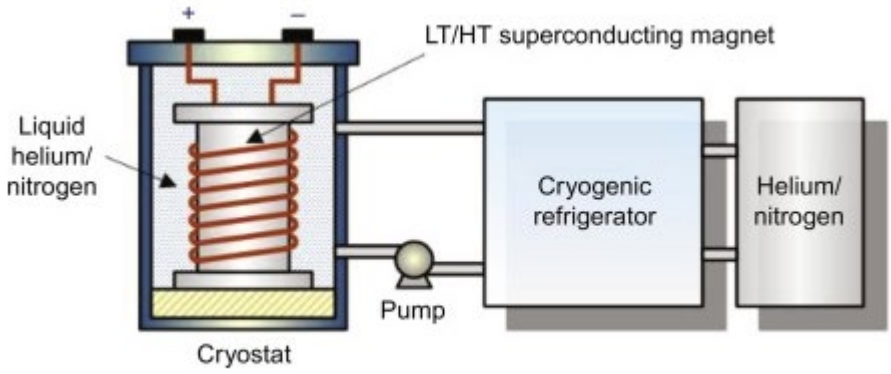
Şekil 1.17. Kondansatör Depolama Sistemi

Çoğu uygulamada depolanan enerji, yükü yalnızca birkaç saniye ila dakika boyunca sağlar. Şarj ve deşarj döngülerinin sayısı tüm pratik amaçlar için neredeyse sınırsız olup hızlı döngüsel çalışmada enerji üretimi sınırlıdır. Süperkapasitörlerin yüksek çıkış gerilimine ulaşmak amacıyla seri bağlı olması durumunda, her bir süperkapasitörün ayrı ayrı gerilimlerini dengelemek için kontrol devresi, güvenli ve güvenilir çalışma için gereklidir. Süperkapasitörlerin kullanım ömrü büyük olasılıkla büyük geleneksel kapasitörlerin aralığında olacaktır, örneğin 10 yıl kadar. Giriş-çıkış verimliliği çok yüksektir, ancak kendi kendine boşalma hızı akülere göre oldukça yüksektir. Son olarak, süperkapasitörlerin en önemli dezavantajının kurşun asitli akü maliyetinin 5 katı olarak tahmin edilen yüksek maliyeti olduğu fark edilebilir (Gualous vd., 2003)

1.2.6.2. Süper İletkenlik Manyetik Enerji Depolama (SMED)

Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi, elektrik enerjisini kimyasal veya mekanik formlara dönüştürmeden bir mıknatıs alanında depolayan sistemdir. SMED, genellikle çok düşük sıcaklıkta (-270º C) çalışan Niobium Titanate (NbTi) filamentlerden oluşan neredeyse sıfır dirençli süper iletken kablolardan yapılmış bobine DC akımı indükleyerek elde edilir. Şarj sırasında akım artar, deşarj işlemi sırasında azalır ve AC veya DC gerilim uygulaması için dönüştürülmesi gerekir. Ancak toplam sisteme bakarken, soğutma için önemli bir enerji gereksinimi olduğu açıktır. Ayrıca, akımın süper iletken olmayan bileşenler ve katı hal anahtarlarından akması gerekir; bu da dirençli kayıplara neden olur. Buna rağmen MW aralığındaki ticari uygulamalarda genel verimlilik çok yüksektir. Bir pil gibi, bir SMED sistemi de şarj veya deşarj için hızlı yanıt sağlar. Bir akünün aksine, mevcut enerji miktarı deşarj oranından bağımsızdır. Günümüzde ticari kullanımdaki SMED' in enerji kapasitesi yaklaşık 1 kWh'dir. Ancak maksimum güç çıkışı MW aralığındadır ve yalnızca güç elektroniğinin derecesiyle sınırlıdır. Soğutma sisteminin karmaşıklığı nedeniyle, düşük güç çıkışları için SMED' lerin uygun maliyetli bir şekilde üretilmez. Bir SMED' in tepki süresi, enerji serbest bırakma ihtiyacının tespit edildiği hız ve güç elektroniğinin sonraki anahtarlama işleminin hızı ile birkaç milisaniye ile sınırlıdır. Uygulamada bu birkaç milisaniye ile sınırlıdır. Uygulamada ise bu birkaç milisaniyedir.

Süper iletken sarmalın ömrü, şarj ve deşarj sayısı çok yüksektir. Ayrıca bileşenlerde malzeme yorgunluğuna yol açan mekanik gerilim olmasına rağmen muhtemelen tüm rakip teknolojileri aşar. İyi teknolojik özelliklerine rağmen, aslında bu sistem özellikle yüksek maliyetlerinden dolayı çok az sayıda kullanır (Koshizuka vd., 2003). Şekil 1.18'de bir süper iletken manyetik depolama sistemi gösterilmektedir.



Şekil 1.18. Süper iletken manyetik depolama sistemi

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

S. Koohi-Fayegh ve ark. enerji depolama türleri, sınıflandırmalar ve karşılaştırmalar dahil olmak üzere enerji depolama teknolojileri önemli ölçüde incelemişler. Elektrokimyasal ve pil enerjisi depolama, termal enerji depolama, termokimyasal enerji depolama, volan enerji depolama, basınçlı hava enerji depolama, pompalanan enerji depolama, manyetik enerji depolama, kimyasal ve hidrojen enerji depolama gibi birçok enerji depolama teknolojisi göz önünde bulundurmuşlar. Yeni enerji depolama türleri hakkında yapılan son araştırmaların yanı sıra enerji depolama alanındaki önemli gelişmeler de bu araştırmalara dahil edilmiştir. Bu teknolojiyi daha da geliştirmek için adsorpsiyonlu dengesizliklerini önlemek ve sistem optimizasyonunu amacıyla malzemeler üzerinde daha fazla araştırma yapılması gerektiği savunmuşlar. Çeşitli enerji depolama sistemi kategorileri arasında, hidrojen enerji depolama sistemleri mevcut enerji sisteminde büyük değişikliklere neden olabilecek sistemler gibi görünmektedir. Enerji depolama teknolojilerinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili sorunlarına çözüm bulmak için bir katalizör görevi görmeleri ve tam ekonomik faydalarını gerçekleştirmelerine yardımcı olması bekleniyor. Yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen elektrik üretiminde meydana gelen bu tür bir genişleme, diğer sürdürülebilir enerji sistemlerinin kullanılmasında da büyümeye yardımcı olacaktır. Enerji depolama sistemlerine daha fazla yenilenebilir enerji sistemi entegre edildiği için gelecekte enerji taşıyıcı olarak hidrojen ve elektrik kullanımının da iyileştirilmesi bekleniyor. (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020)

Sufyan ve ark. günümüz dünyasında giderek artan elektrik talebi, verimli ve güvenilir bir enerji kaynağı sistemi olduğunu ifade etmişler. Dizel jeneratörler, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi dağıtımlı enerji kaynakları, tüketicilere sürdürülebilir bir şekilde enerji sağlamak için bir mikroşebeke içinde birleştirilebileceğini savunmuşlardır. Daha güvenilir ve ekonomik enerji kaynağı sağlamak için pil depolama sistemi mikro şebekeye entegre edilmiştir. Bu makalede, optimum pil boyutu göz önünde bulundurularak ekonomik planlama sayesinde izole edilmiş mikroşebekenin işletme maliyeti azatlığı tebit edilmiştir. Ancak, derin deşarj akünün kullanım ömrünü kısaltır. Bu nedenle, her zaman aralığındaki boşalma derinliği göz önünde bulundurularak gerçek zamanlı pil çalışma maliyeti modellenir. Ayrıca, pil boyutlarıyla önerilen ekonomik planlama, ateşböceği algoritması (FA) kullanılarak optimize edilmiştir. FA'nın etkinliği, elektrik maliyeti ve güç kaynağı olasılığının kaybı olan

performans ölçümü endeksleri açısından diğer metaheuristik tekniklerle karşılaştırılmıştır. 165 kW boyutundaki bir yükün olduğu şebekede farklı batarya enerji depolama sistemleri mikro şebekeye eklenmiş ve veriler analiz edilmiştir. Bahse konulu şebekenin optimum batarya boyutu 145 kWh olarak tespit edilmiştir. (Sufyan vd., 2019)

T. M. Gür ve ark. yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye %20'den fazla dahil edildiğinde, şebekenin kılavuz sisteminin dengesini büyük ölçüde bozacağını ifade etmişler. Elbette, büyük ölçekli elektrik enerjisi depolama sistemleri, kılavuz sistemindeki doğal verimsizlikleri ve eksiklikleri ortadan kaldırmak ve şebeke güvenilirliğini artırmaya, stabil olmayan yenilenebilir kaynakların tam entegrasyonunu kolaylaştırmaya ve güç üretimini etkin bir şekilde yönetmeye yardımcı olmak için kullanılabilir. Yenilenebilir güç üretimi kaynaklarının hızlı büyümesi ve devreye alınması, büyük ölçekli, uygun maliyetli depolamaya duyulan acil ihtiyacı giderek daha da artırdığı belirlenmiş. Gelecekte hangi enerji depolama teknolojilerinin üstünlük sağlayacağını tahmin etmek zordur, ancak büyük olasılıkla bugün ve gelecekte sahip olduğumuz eşit çeşitlilikte güç üretimi teknolojilerinin özel ancak farklı gereksinimlerini karşılamak için geniş bir depolama sistemleri yelpazesi gerekir. Bu kadar zengin bir sistem özellikleri çeşitliliğinin gerekliliklerini karşılamak, kesinlikle bu makalede tartışıldığı gibi teknik zorluklar doğurur, ancak, özellikle bu teknolojilerin birbirlerinin güçlü yönlerini tamamlayan ve eksikliklerini telafi eden sinerjik kombinasyonlarda kullanılabileceği durumlarda, depolama uygulamaları için çok çeşitli seçenekler ve olasılıklar da sağlar. Ayrıca, bilimsel topluluğun önemli bir rol oynadığı depolama teknolojileri, malzemeleri ve süreçlerinde yenilik ve gelişmeler için fırsatlar sunacağı ifade edilmiştir.(Gür, 2018)

Y. Yang ve ark. hidroelektrik gücü, fotovoltaik ve rüzgâr türbinleri gibi yenilenebilir enerji, petrol tükenmesi, enerji talebinin artması ve antropojenik küresel ısınmayla ilgili sorunların ele alınması için en yaygın çözüm haline geldiği ifade edilmiştir. Güneş ve rüzgâr enerjisi, aralıklı ve değişken özelliklere sahip hava şartlarına büyük ölçüde bağlıdır. Bu yaklaşım, pil boyutu ile ilgili kritik metriklerin ve pil boyutunu belirlemek için en uygun yöntemin, yenilenebilir enerji sistemi uygulamasının türüne ve boyutuna göre belirlendiği açıkça anlaşılıyor. Optimizasyon sürecinde kullanılan çeşitli performans göstergeleri, finansal, teknik ve hibrit (hem finansal hem de teknik göstergeleri bir araya getirme) göstergelerin literatürde göz önünde bulundurulması düşünülen ana öğeler olduğu için mevcuttur. Daha büyük boyutlu

yenilenebilir sistemler için daha yaygın olan hibrit göstergelerle, finansal göstergeler daha küçük boyutlu sistemler için daha belirgin şekilde kullanılır. Optimum boyutta batarya enerji depolama sistemleri (BEDS) elde etmek için kullanılan yöntemler de incelendi ve çeşitli teknikler değerlendirildi. Tekniklerin karmaşıklığı, uygulanan yaklaşıma bağlı olarak değişir ve yöntemler olasılık, analitik veya yönlendirmeli arama tabanlı gibi kategorilere düşer. Belirli göstergeler için belirli optimizasyon yöntemlerinin tercih edilebilir olduğu, örneğin finansal göstergeleri göz önünde bulundurarak arama tabanlı yöntemlerin kullanılması olduğu unutulmuştur. Giderek artan bir eğilimin genetik algoritmalar gibi doğadan ilham alan sezgisel yöntemlerin kullanımı olduğu, bulgusal ve diğer teknikleri bir araya getiren karma optimizasyon yaklaşımlarını ayrıntılı bir şekilde anlatan literatür gövdesinin arttığı ortaya çıkmıştır. BEDS boyut optimizasyonuyla ilgili önceki yorumların aksine, bu inceleme yenilenebilir enerji depolamanın enerji uygulaması türüne göre düzenlenmiştir. Dağıtık, bağımsız, mikro şebeke ve enerji santrali sistemlerinin durumları göz önünde bulundurularak, sistem tasarımı için en kritik hangi optimizasyon kriterlerinin kanıtlandığı ve BEDS'leri boyutlandırılması için en uygun optimizasyon tekniğinin genişletilmesiyle ilgili yeni görüşler elde edilmiştir. Bu, sistem tasarımcıları için çok önemli bir rol oynayacaktır; çünkü daha fazla RES tarafından üretilen güç, tasarımcıların sistemin boyutuna ve amaçlanan uygulamaya dayalı olarak bir sistem için kritik tasarım parametrelerini belirlemesine olanak tanır. Daha yenilenebilir enerji üretimine geçiş devam ederken, daha gelişmiş optimizasyon araçları geliştirilecek. Bu incelemede de vurgulandığı gibi, çevresel hususlar ve kriterler, halihazırda dikkate alınmakta olan finansal ve teknik göstergelerin yanı sıra daha büyük önem taşımaktadır.(Y. Yang vd., 2018)

R. Li ve ark. Yaptıkları çalışmada, yüksek entegrasyonu özellikli yenilenebilir enerji kaynakları (RES) ve enerji depolama sistemleri (ESS) ile aktif dağıtım sistemi (ADS) genişletme planlaması için çok amaçlı, çok seviyeli bir model önermektedir. Bu çalışmada, ESS ve dağıtım ağlarının aynı anda planlamasını optimize etmek için hiyerarşik optimizasyonların lider takipçi stratejisine dayalı üç güçlü optimizasyon yöntemi benimsenmiştir. Bu modelde, üst düzey ve orta düzey, planlama sorunlarını çok paydaşların farklı bakış açılarından modellemeyi amaçlamaktadır; alt düzey, ESS'lerin çalışma yönünü modellemeyi amaçlamaktadır. Çok senaryolu araçlar ve K-araçları, belirsizliklerle başa çıkmak ve baskı ve yük talebinin zaman değişkenliğini yakalamak için kümeleme benimsendiği anlamına gelir. Maliyetlerin azaltılması,

güvenilirliğin geliştirilmesi ve RES entegrasyonu promosyonunun birden fazla hedefini dengelemek için önerilen optimizasyon sorununu çözmek üzere değiştirilmiş bir Pareto tabanlı parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılır. Bu makalede, çok objektif, çok seviyeli optimizasyon metodolojisine dayanan bir ADS kooperatif planlama modeli önerilmektedir. Önerilen modelin mevcudiyeti ve etkinliği, çeşitli nihai açıklamalar ve sonuçlar içeren vaka çalışmaları tarafından iyi bir şekilde gösterilmiştir. Sonuçlar, RES'lerin ve ESS'lerin optimum tahsisi ve koordine çalışmasının hem dağıtılmış üretim operatörü (DGO) hem de Dağıtım sistem operatörü (DSO) için ekonomik verimliliği artırmak, sistem güvenilirliğini artırmak ve yeşil enerji kullanımını teşvik etmek açısından yararlı olduğunu göstermektedir. DGO'nun bakış açısından, ESS'lerin entegrasyonu ve daha fazla etkisiyle, DGO'nun sonsuz ortalama net geliri 374.55 ($) ile 411.54 ($) arasında bir artış yaşamıştır. Pahalı sermaye maliyetleri ve O&M maliyetleri gelirin yavaş büyümesine katkıda bulunur, ancak ESS'lerin işletilmesi ile geçici yük değişiminin en yüksek olduğu durumda daha fazla net gelir elde edilebilir. Bu nedenle, ESS'lerin optimum entegrasyonu net gelirlerde yaklaşık %10'lik bir artış sağlar ve ESS'lerle planlama planı daha cazip bir yatırım çekimini sunar. DSO perspektifinden ESS entegrasyonuyla DSO da bazı avantajlar elde edebilir. İ Çok seviyeli optimizasyona dayanarak, önerilen planlama modeli ADS işleminin ADS planlama hesaplamalarında açıkça temsil edilmesini sağlar. Buna ek olarak, ağların planlanması ve RES'lerin ve ESS'lerin tahsisi, birden fazla paydaşın farklı bakış açıları göz önüne alındığında iş birliği içinde optimize edilmiştir. K-araçlarının kümelenmesine ve çok senaryolu araca dayanarak, yıllık zamana bağlı veriler, hesaplama yükünü hafifletirken, RES'lerle ve yük talebiyle ilgili zaman değişken doğaları ve belirsizlikleri yakalayabilen tipik günlük senaryolara etkili bir şekilde işlenmiştir(Li vd., 2017).

F. Keck ve ark. elektrik enerjisi depolama sisteminin (EES), elektrik şebekesine esneklik kazandırdığı için gelecekte temiz enerjiye geçiş sağlama potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışma, EES'nin düşük karbonlu elektrik tedariğindeki rolünün ekonomik analizini sunmaktadır. Avustralya'nın Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) destekli saatlik simülasyon çalışması, EES'nin rüzgâra ve güneş üretimine yüklü elektrik maliyeti (LCOE), kurulu kapasite, üretim karışımı ve enerji sıçraması üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada, EES dağıtımının yenilenebilir kaynakların yüksek entegrasyonu olan senaryolarda LCOE'yi azaltabileceği ortaya kondu. Avustralya'nın

örnek olay incelemesinin, 90 ile 180 GWh arasındaki EES kapasitesinin 1,000 AU$k/Wh altındaki maliyet seviyeleri için ekonomik olabileceğini ortaya konmuştur. Ayrıca, çalışma EES'nin LCOE'yi %13–22 oranında azaltabileceğini, kurulu kapasiteyi %22'e kadar azaltabileceğini ve israf edilen enerjiyi %76'e kadar azaltabileceğini ortaya koymuştur. Uygulanan EES'nin büyüklüğüyle neslin karışımını büyük ölçüde etkilediği görülmektedir. Sonuçlar Avustralya'da yapılan bir örnek olay incelemesinden elde edilmiştir ancak diğer ülkeler ve bölgeler için de geçerlidir. Üretim kapasitesi ve iletim maliyetleri döviz kurları, tedarikçi rekabeti, ağ topolojisi vb. faktörlere bağlı olarak değişse de yenilenebilir enerji ve EES ile ilgili bu çalışmanın temel ekonomisi diğer bölgelerde de geçerlidir. Bu çalışmanın sonuçları, yenilenebilir kaynaklara, dağıtılmış yük merkezlerine ve komşu pazarlarla sınırlı ara bağlantıya sahip ülkeler için en uygun sonuçları verir. Gelecekteki araştırmalarda, depolama konumunun ve EES boyutunun optimize edilmesi ve elektrikli araç penetrasyonu ve yük kaydırma gibi çeşitli ek faktörlerin dahil edilmesi önerilir. Buna ek olarak, EES'nin işletmeye yönelik çekiciliğini ortaya çıkartabilecek ağ için EES faydalarını ölçme yaklaşımları belirlenmiştir ve daha fazla araştırma yapılması önerilir(Keck vd., 2019).

P.Boonluk ve ark. bu çalışmada, güç üretimi güvenilirliği ve kalitesine yönelik RES dalgalanmalarının etkisini azaltmak için dağıtım ağı operatörlerinin (DNO) yenilenebilir enerji kaynakları bulunan bir dağıtım şebekesindeki pil enerji depolama sisteminin (BEDS) optimum şekilde içmesi ve boyutlandırılması sunulmaktadır. Dağıtım ağının performansını artırmak için dağıtım şebekesindeki gerilim sapmaları, güç kayıpları ve en yüksek taleplerden kaynaklanan maliyetleri en aza indirerek, Beslerin en iyi şekilde elde edilmesiyle ve boyutlandırılmasıyla elde edilir. BEDS kurulumunun simülasyon sonuçları IEEE 33 bara sisteminde değerlendirilmiştir. Genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO), bu optimizasyon sorununu çözmek için kullanılmış ve bu iki algoritmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dağıtım şebekesinde BEDS kurulumundan sonra, gerilim sapmaları, güç kayıpları ve pik talepleri, BEDS kurulumu olmayan durumlarla karşılaştırıldığında azaltılmıştır. Dağıtım şebekesinde, adres ile birlikte iyi BEDS'nin boyutlandırılması da sunulmuştur. En aza indirgenmesi düşünülen amaç işlevi, dağıtım şebekesinde meydana gelen gerilim sapmaları, güç kayıpları ve en yüksek taleplerden oluşan toplam maliyettir. BEDS kurulumu, hedef işlevini optimize etmek için GA ve PSO algoritmaları kullanılarak IEEE 33 sisteminde bara çalıştırıldı ve doğruluğu doğrulamak için her iki algoritmadan alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. GA ve PSO kullanılarak

RES ile IEEE 33-bus dağıtım ağında BBESS kurulumunun simülasyonundan sonra, BBESS kurulumunun optimum şekilde içilmesi hem GA hem de PSO tarafından elde edilen 6. Veri yolu oldu. BEDS'lerin büyüklüğü 1.99 MW güç ve GA tarafından sağlanan 14.23 MWh kapasite ve PSO tarafından sağlanan 1.98 MW güç ve 14.98 MWh kapasitedir. Her iki algoritmanın da benzer değerlere sahip olduğu gözlemlenebilir. Bu nedenle, dağıtım ağları IÇIN BESLERIN en iyi şekilde içlenmesi ve boyutlandırılması, PSO'nun GA'dan daha iyi bir hedef değer olarak bulabileceği minimum hedef değer göz önünde bulundurularak seçilebilir. Hem GA hem de PSO tarafından elde edilen sonuçlar, BEDS kurulumunun maliyet en aza indirgeme, gerilim sapmalarının azaltılması, güç kayıpları ve tepe talebi açısından dağıtım ağının verimliliğini artırabileceğini göstermiştir. Elektrik şebekelerinde dalgalanma olan RES bağlantısını da destekler. Ayrıca, PSO'nun bu sorun için hedef işlev optimizasyonunun GA iç kesimlerinden daha verimli olduğu tespit edilmiştir(Boonluk vd., 2020).

Jufri ve ark. Endonezya'daki çoğu yerleşmiş adalar, ekonomik veya coğrafi nedenlerden dolayı oldukça bilinen dizel jeneratörler tarafından desteklendiğini ve birincil şebekeden yalıtılmış olduğunu ifade etmişler. Bu arada dizel jeneratör, enerji maliyetini azaltmak ve yenilenebilir enerji penetrasyonunu artırmak amacıyla hibrit güç üretim sistemi oluşturmak için fotovoltaik (PV) sistem ve Akü Enerjisi Depolama (BES) sistemi ile birleştirilebilir olduğunu savunmuşlardır. Bunun için her bir güç üretimi bileşeninin doğru boyutlandırılması gerekir. Bunlardan biri uygulanan kontrol stratejisinden etkilenmiştir. Bu belge, güç üretimi bileşenlerinin boyutlarını optimize eden optimum BES gönderim (OBD) kontrol stratejisi önerilir. Bu yöntem, yük takip etme, döngü şarj etme veya kombinasyon gibi diğer popüler kontrol stratejilerinin eksikliklerini inceler. Optimizasyon hedefleri, seviyelendirilmiş enerji maliyetini (LCOE) en aza indirmek ve yenilenebilir enerji (RE) penetrasyonunu en üst düzeye çıkarmaktır. Bu, yükü diğer mevcut nesillere göre sağlamak için BES'ye öncelik vererek ve jeneratör her çalıştığında BES'i şarj ederek sağlanabilmiştir. Önerilen yöntem, farklı yük profillerine sahip iki farklı sistemde uygulanır. Sonuç olarak, önerilen kontrol stratejisi daha düşük LCOE sağlarken, her iki konumdaki diğer kontrol stratejilerinden daha yüksek yeniden penetrasyon sağlar. Pahalı dizel jeneratörler genellikle uzak ve izole alanlarda kullanılır. PV sistemi ve BES'den oluşan hibrit sistemin uygulanması, LCOE'yi azaltma ve yenilenebilir enerji penetrasyonunu artırma gibi iki kat avantaj sağlar. Yük takip etme, döngü şarj etme ve birleşik gönderim gibi en popüler nesil dağıtım kontrol stratejileri, hibrid sistemdeki enerji yönetim sistemi algoritması olarak

uygulanabilir. Ancak bu algoritmalar hala dezavantajlara sahiptir ve performansları yük profili ve yerel güneş ışımaları gibi sistem özelliklerine bağlıdır. Bu makalede, birleşik dağıtım kontrol stratejisini geliştiren optimum BES boşalma (OBD) adı verilen gelişmiş bir kontrol stratejisi algoritması sunulmuştur. OBD, daha küçük PV ve BES sistem boyutuyla bir hibrit sistemi (jeneratör-PV-BES) çalıştırmak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, LCOE bunu yaparak azaltılabilir ancak yine de yenilenebilir enerji penetrasyonu oranının daha yüksek olması gerekir. Ayrıca, hibrid sistemin ürettiği aşırı elektriği en aza indirmeyi amaçlıyordu. Sonuçlar, önerilen kontrol stratejisinin ortaya çıkan LCOE, yenilenebilir enerji penetrasyon oranı ve aşırı elektrik ile değerlendirilecek diğer kontrol stratejilerinden daha iyi çalışabileceğini göstermiştir. Bir HRES'in LCOE değeri, OBD uygulandığında %2,2–9.1 daha düşüktür. Yeniden penetrasyon oranı ikinci en düşük LCOE ile kıyaslanabilirdi, bu oran sadece %3,1 daha düşük olabilir, ancak %35.3 daha yüksek olabilmektedir. OBD uygulamasının fazla elektriği %10'in altına indirilebilirken, diğer kontrol stratejileri çoğunlukla %10'in üzerinde elektrik tüketimine sahiptir. Ayrıca, önerilen OBD kontrol stratejisi farklı yük ve güneş ışıması profillerinde de tutarlı bir şekilde başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.(Jufri vd., 2021)

F. Mohamad ve ark. geleneksel olarak, BEDS'leri güneş enerjili panellerinin bulunduğu otobüslere yerleştirilmiş, böylece fazla güneş enerjisi iletim hatlarına iletilmeden hemen depolanabilir ve olacağını bu nedenle hat kayıplarından kaçınılacağı ifade edilmiştir. Bu çalışmada, ağ topolojisi ve güç akışı kısıtlamaları göz önünde bulundurularak, BEDS'leri en iyi şekilde dağıtan ve iki parçalı bir çerçevedeki kapasitelerini belirleyen bir yöntem önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin daha fazla güneş enerjisi depolayabildikleri geleneksel dağıtım stratejisinden daha verimli olduğunu göstermektedir. Yapılan diğer analizler, tüm yerleşim stratejileri için BEDS kapasite dağılımlarının, düşük hat kapasitesi ortalama %82 olan bölgede yoğun bir şekilde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar daha sonra, BEDS'lerin kapasitesinin dağıtılan tüm BEDS'ler arasında eşit olarak dağıtıldığı senaryoyla karşılaştırmışve karşılaştırmanın sonuçları, BEDS kapasitesinin optimize edilmesinin tüm çözümlerden ortalama %27 daha düşük beklenen güneş enerjisi kısıtlaması ürettiğini göstermiştir. Makalenin sonuçları, BEDS'lerin kapasite dağıtımı ve ataması için önerilen optimizasyon çerçevemizin önemli olduğunu doğruluyor (Mohamad vd., 2021).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında öncelikle bir elektrik şebekesi tasarlanmış ve bu tasarlanan şebekenin de ETAP benzetim programında benzetimi yapılmıştır. Ebzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile optimum batarya boyut için üç ayrı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan optimizasyon yöntemleri, genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu ve ateş böceği algoritması şeklindedir.

3.1. Optimizasyon

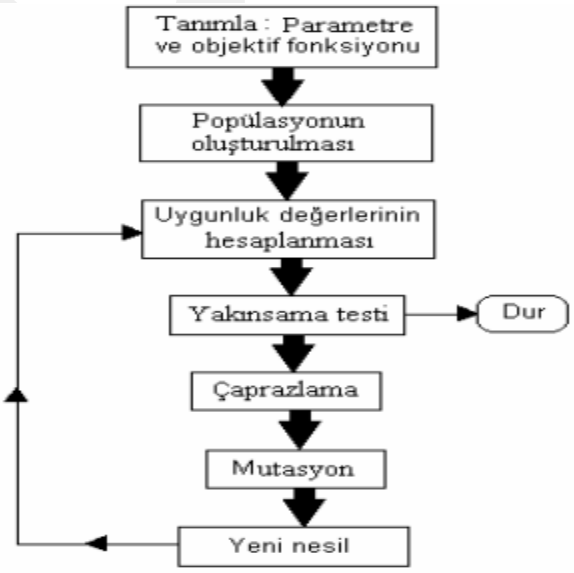
Optimizasyon, belirli kısıtlama kümesi verilen bir probleme mümkün olan en iyi çözüm anlamına gelir ve buna uygulanabilir küme de denir. Bu tür doğrusal olmayan problemlerde, optimum çözümleri bulmak için etkili optimizasyon algoritmaları gerektirir. Optimizasyon algoritmaları, deterministik ve stokastik olmak üzere iki ana sınıflandırmaya ayrılır. Deterministik algoritmalar, aynı ilk varsayımlardan ve girdilerden başlasa bile aynı çözümleri oluşturur. Bununla birlikte, stokastik algoritma aynı ilk girdileri kullanarak farklı çözümler oluşturur. Deterministik algoritmalar zorlu bir prosedürü takip ederken stokastik algoritmalar her zaman rastgele olur. Deterministik yöntemler, rüzgar üretimi özelliklerinin, güneş ışınımlarının ve yük verilerinin süre boyunca sabit kalmasını gerektirir (Lange, 2013).

Stokastik algoritmalar hem deterministik hem de rastgele parçalara sahiptir. Her iki formül de güç sisteminin planlanması için kullanılabilir. Stokastik yöntem, batarya boyutlandırma verileri için giriş olarak kullanılan gerçek veya tahmin/yapay verileri kullanabilir.

3.1.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritma, canlılarda olan genetik olaylara dayalı bir optimizasyon yöntemidir. Dünyada canlıların hayatta kalması için bazı yeteneklere sahip olması gerekmektedir. Bu yetenekler de farklı özelliklere sahip bireylerin üremesiyle çeşitlenebilir. Bu özelliklere ait bilgiler, canlıların kromozomlarında bulunmaktadır. Eşlenerek çoğalmadan sonra oluşan yavrulara ait kromozomlar her çiftten gelen bilgilerin bir birleşiminden meydana gelir. İstenilen sonuç yavrunun en iyi özellikleri içeren genleri almasıyla olacaktır.

Genetik algoritmada paremetreler, genler tarafından temsil edilir ve parametlererin tümü de kromozomu temsil etmektedir. Genetik algoritmada her bir kromozom aslında bir çözümü ifade eder. Bu çözüme aday kümeler popülasyon olarak isimlendirilir. Popülasyondaki kromozaomların uygunluk değeri optimizasyon problemine göre minimize ya da maksimize edilir. Genetik algoritma mutasyon ve çaprazlama olmak üzere iki temel genetik fonksiyona sahiptir. Çaprazlama işleminde popülasyondan iki birey seçilerek, bu bireylerde çaprazlanacak noktalar ve bu noktadan itibaren bireylerin elemanları karşılıklı olarak yer değiştirilir. Mutasyon popülasyonda çeşitliliğe neden olur ve problem sonucunun yerel çözümlere takılmasını önler (Özsağlam & Çunkaş, 2008). Şekil 3.1.'de Genetik algoritma akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Genetik algoritma akış diyagramı

Genetik Algoritmaların çalışma süreci aşağıda adım adım verilmektedir.

i. Başlangıç olarak rasgele üretilen kromozomların bulunduğu popülasyon oluşturulur. Başlangıç popülasyonu, İkili sayı sisteminde, gerçek değerli veya permitasyon gibi yöntemler kullanılarak oluşturulur.

ii. Amaç fonksiyonu kullanılarak her bir kromozomun uygunluk değeri hesaplanır. Aslında genetik algoritma ya da tüm algoritmalarda algoritmanın başarılı olması çoğu zaman amaç fonksiyonun ne kadar iyi belirlendiğine bağlıdır. Bu aşamada en iyi birey seçilir ve bu yerel olarak çözümün en iyi değeri olarak saklanır.

iii. Başlangıç popülasyonu oluşturulmuş genetik algoritma üç evrim operatörüyle çalışır. Bunlar; seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleridir.

iv. Önceden belirlenen jenerasyon sayısı veya uygunluk değeri durdurma kriteri olarak verilebilir. Her iterasyonda durdurma kriteri test edilir. Eğer bu iterasyonda kriterler sağlanıyorsa elde edilen yerel en iyi, global en iyi olur ve algoritma durdurulur. Şartlar sağlanmıyorsa bir sonraki adıma geçilerek en iyi çözümü aramaya devam edilir.

v. Popülâsyon boyutu sabit büyüklükte tutulur, uygunluk değeri esas alınarak bireyler popülâsyonda çaprazlamaya tabii tutulur ve çeşitli şeçim yöntemleri uygulanır. Seçilen bireyler çaprazlama ve mutasyon işlemlerine girerek yeni bireyler oluşturur ve ikinci işlem basamağından işleme tekrar edilir. Genetik Algoritma Parametreleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Genetik Algoritma Parametreleri

Genetik Algoritma Parametreleri	Değeri
Maksimum iterasyon Sayısı	70
Çaprazlama oran	0.80
Mutasyon oranı	0.02

3.1.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) sürü halinde hareket eden bazı hayvanların yiyecek bulmak gibi temel ihtiyaçlarını giderirken sergiledikleri hareketlerin, sürüdeki diğer bireyleri etkilediğinin ve sürünün amacına daha kolay ulaştığının

gözlemlenmesinden esinlenilerek, Dr. Eberhart ve Dr.Kennedy tarafından geliştirilmiş popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Balık veya kuş sürülerinin yiyecek ararken ki sosyal davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir (Kennedy & Eberhart, 1995).

Özetle, PSO, bireyler arasındaki sosyal bilgi paylaşımını esas alır. Çözümü bulmak adına arama yapan her bir bireye parçacık adı verilir. Parçacıklardan oluşan popülasyona da sürü denir. Her bir parçacık bir önceki tecrübesinden faydalanarak kendi pozisyonunu, sürüdeki en iyi pozisyona doğru ayarlar. PSO, temelinde sürüde bulunan bireylerin pozisyonunun, sürünün en iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır. Bu yaklaşma hızı rastgele gelişen bir durumdur ve genelde parçacıklar yeni hareketlerinde bir öncekine nazaran daha iyi bir konuma gelirler. Bu süreç hedefe ulaşana kadar devam eder. PSO, talep miktarı belirleme, çizelgeleme problemleri, güç ve voltaj kontrolü, motor parametrelerini belirleme, tedarik seçimi ve sıralama problemleri gibi bir çok optimizasyon problemlerinde başarı ile kullanılmıştır (Özsağlam & Çunkaş, 2008).

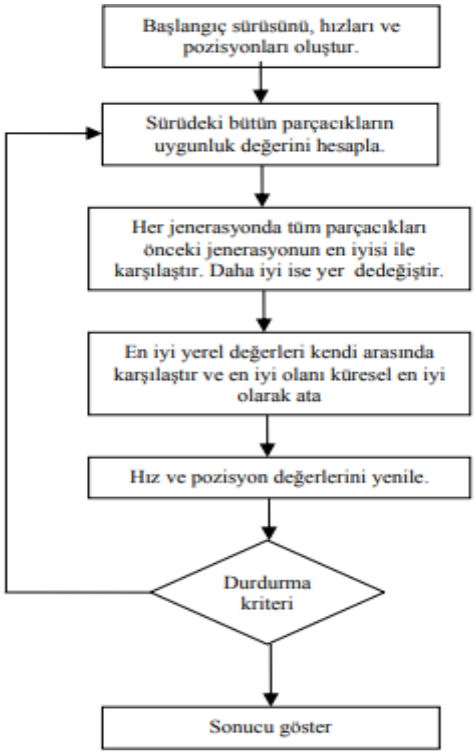
$$V_i^{k+1} = w * V_i^k + + c_1 rand_1^k \left(pbest_i^k - x_i^k\right) + c_2 rand_2^k (gbest^k - x_i^k) \quad (3.1)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.2)$$

Burada X_i^k pozisyon ve V_{id} hız değerlerini verirken, $rand_1$ ve $rand_2$ değerleri rasgele üretilmiş sayılardır. W atalet ağırlık değeri ve C_1, C_2 ölçeklendirme faktörleridir. Şekil 3.2.'de parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı gösterilmektedir. Parçacık Sürü Algoritması Parametreleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Parçacık Sürü Algoritması Parametreleri

Parçacık Sürü Algoritması Parametreleri	Değeri
Maksimum iterasyon Sayısı	70
Atalet ağırlık değeri (W)	0,99
Ölçeklendirme faktörleri (C_1 ve C_2)	2



Şekil 3.2. Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı

3.1.3. Ateşböceği Algoritması (FA)

Ateşböceği algoritması 2008 Yılında Xin-She Yang tarafından geliştirilen sürü tabanlı Sezgisel Optimizasyon Algortimasıdır. Ateş böceklerinin parlaklığa duyarlı olarak birbirlerini etkilediği sosyal davranışlarını ele alarak geliştirilmiştir. Algoritma da ateş böceklerinin cinsiyet olmadığı varsayılır ve tüm ateş böcekleri birbirlerine yönelebilirler. Uygulamada daha parlak olan ateş böcekleri daha çekicidir. Parlaklığı daha az olan ateş böcekleri, parlaklığı daha fazla çekici olan ateş böceklerine doğru yönelir. Parlaklık etkisi mesafe artıkça azalacağı için daha uzaktaki ateş böcekleri uzaktaki parlak ateş böceklerinden daha az etkilenir. Ek olarak bir ateş böceği eğer kendinden daha parlak bir ateş böceği bulamazsa rastgele hareket gerçekleştirir (X.-S. Yang & Slowik, 2020).

Ateş böceklerinin konumları rasgele belirlenir. Ve her bir ateş böcekleri parlakları hesaplanır. Rasgele oluşturulan her çözüm kümesi parametre sayısı kadar

eleman içerir. Oluşturulan bu çözüm kümelerinin uygunluk değeri bulunur. Ateş böcekleri daha parlak olan ateş böceklerine doğru hareket eder. Bütün çözüm kümelerine sırayla iyileştirme formülü uygulanır. Önceden belirlenen tekrar sayısına(maksimum iterasyon sayısı) ulaşıncaya kadar ateş böceklerinin hareketleri tekrarlanır.

Şekil 3.3.'de ateşböceği algoritmasının akış diyagramı gösterilmektedir.

Şekil 3.3. Ateşböceği algoritmasının akış diyagramı

Parametreler tanımlanmalı, başlatılmalı ve buna göre ayarlanmalıdır. Ateş böceği algoritmasında, genellikle $Beta$ (β) olarak adlandırılan çekicilik önemli bir rol oynar. Çekicilik faktörü, ilk olarak ışık yoğunluğuna göre yönetilen ve daha da ateşler arasındaki mesafe (**r**) ile sürülen iki değişken tarafından belirlenir. Çekicilik faktörü, ilk olarak ışık yoğunluğu tarafından yönetilen ve daha sonra ateşböcekleri arasındaki mesafe tarafından yönlendirilen iki değişken tarafından belirlenir. Ters kare yasasına göre, $\boldsymbol{\beta_1(r) = I_0/r^2}$, $\boldsymbol{I_0}$ ateş böceğinin başka bir ateş böceğine doğru hareketinin yoğunluğudur. Hava yoluyla absorpsiyon ters orantılı olduğundan, $\boldsymbol{\beta_2(r) = I_0 e^{-\gamma r}}$,

absorpsiyon katsayısıdır ve $\boldsymbol{\gamma}$ [$\mathbf{0}$, ∞). $\boldsymbol{\gamma}$ = $\mathbf{0}$ berrak ortamla absorpsiyon olmadığı anlamına gelirken, $\boldsymbol{\gamma} = \infty$ yoğun ortam anlamına gelir. Daha sonra, nihai maliyetler için tahmini değerleri hesaplamak için aşağıdaki denklem şu şekilde ifade edilir: $\boldsymbol{\beta(r)} = \boldsymbol{I_0 e^{-\gamma r^2}}$, elde edilir ve daha kolay hesaplamalar için $\boldsymbol{I_0/(1 + \gamma\, r^2)}$ olarak formüle edilir. Ateşböceklerinin çekiciliği, ışığın yoğunluğu ve r'nin dikkate alınmasıyla doğrudan ilişkilidir. $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ senaryosu, $\boldsymbol{\beta_0}$= $\boldsymbol{I_0}$, $\mathbf{0}$ ile $\mathbf{1}$ arasında değişir. Son olarak tüm terimleri bir araya getirerek, $\boldsymbol{\beta(r)} = \boldsymbol{\beta_0 /(1 + \gamma\, r2)}$. $\boldsymbol{\beta_0}$ ateşböceklerinin birbirlerine doğru hareket etme arzusunu belirler. Dolayısıyla artan veya azalan $\boldsymbol{\beta_0}$ faktörü ateş böceği hareketini doğrudan etkiler. Meta sezgisel algoritmalarda, bu bir stokastik algoritma olduğundan, her zaman rastgele bir bileşen gereklidir, aksi takdirde algoritma yerel optimumlarda kalır. Rastgele dağılım oluşturmanın kolay bir yolu, ateşböceği hareketini ileri ve geri yönlendirebilen [-0.5, 0.5] aralığında tek tip dağılım kullanmaktır.

Sorunun ölçeği ve karmaşıklığı bir diğer önemli kriterdir. Kesikli rasgele sayı aralığı, bireysel boyutun çeşitli rasgelelik düzeylerini oluşturduğundan, denklem (3.3)'e göre problem ölçeğinde değerler üretmek için üretilen rasgele sayı orantılı olarak çarpılmalıdır.

$$xi = xi + \frac{\boldsymbol{\beta_0}}{(1 + \gamma r i j^2)(Xi - X_J)} + \alpha\delta(R - 0.5) \tag{3.3}$$

Burada R, [0,1] arasında var olan tekdüze oluşturulmuş dağıtılmış rasgele sayılar kümesidir, α rasgeleliği düzenleyen kontrol parametresidir. Rastgelelik, α ile ölçülür, [0,1] içinde bulunur, burada 0 kesinlikle rastgelelik yok ve 1 aşırı yüksek rastgelelik anlamına gelir. Ateş Böceği Algoritması Parametreleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ateş Böceği Algoritması Parametreleri

Ateş Böceği Algoritması Parametreleri	**Değeri**
Maksimum iterasyon Sayısı	40
Popilasyon Sayısı (nPop)	5
Isık Soğurma Katsayısı(ɣ)	1
Çekim Katsayısı Temel Değeri (β_0)	2
Rasgelelik Değeri (α)	0.2
Mutasyon katsayı sönümleme oranı	0.99

3.2. Batarya Enerji Depolama Sistemine Bakış

Batarya enerji depolama sistemi geleneksel olarak aralıklı üretimin olduğu veya arıza durumlarında şebekenin stabilizesinin sağlanması ve enerjisiz kalmamasını sağlar. Yüksek çıkış verimliliğine sahip yaygın olarak kullanılan bir elektrik enerjisi depolama sistemidir. Mevcut güç sınırlı olduğunda gerekli yükü sağlayacak ve pil enerjisi minimum (deşarj derinliği) kapasitesine düşecektir. Bu, depolama sistemlerinin izole yapısını hafifleten mikro şebekelerde yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu azaltır. Enerji, kaynak mevcut olduğunda başarıyla depolanabilir ve daha sonra ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. Bu, üretim ve gerekli yük talebi arasındaki boşluğu dolduran şarj durumu tarafından yönlendirilir. Yükleme ve boşaltmanın temelleri, besleme ve yük koşulları tarafından yönlendirilir (Tan vd., 2013).

Pilin çalışmasıyla ilgili varsayım, hibrit yenilenebilir üretim birimleri yük talebini karşılamak için yeterli gücü sağlayamadığında pilden sağlanan gücün gerekli olduğudur. Pilin çalışmasıyla ilgili varsayım, hibrit yenilenebilir üretim birimleri yük talebini karşılamak için yeterli gücü sağlayamadığında, pilden sağlanan gücün gerekli olduğudur. Yenilenebilir kaynaklar gerekli yükten fazla güç ürettiğinde talep, kalan ekstra güç yedek enerji olarak depolanacaktır. Pil şarj durumu, her zaman aralığı için önceki durumunun bir faktörüdür. Pil yoluyla emilen/iletilen enerjinin üretimi aşağıdaki denklem (3.4) ve (3.5) ile açıklanmaktadır. Pil kapasitesi, %50 ile %80 arasında alınan maksimum deşarj seviyesinin (DoD) üzerindedir. Bu nedenle BEDS kısıtlamaları şu şekilde basitleştirilebilir:

Şarj sırasında:

$$Ebat(t) = Ebat\ (t-1) + Pbat(t).\Delta t.\eta c(t) \tag{3.4}$$

Deşarj sırasında:

$$Ebat\ (t) = Ebat\ (t-1) - Pbat\ (t).(\Delta t/\ \eta \mathrm{d}(t)) \tag{3.5}$$

Pbat(t) kW cinsinden t anındaki pil çıkış gücüdür, Ebat(t) o anda depolanan enerji miktarıdır t, Δt kWh cinsinden aralık süresidir (bu şebeke için 1 saat).

3.3. Sistem Maliyet Analizi

Bu tez kapsamında kıyaslama ve analiz için toplam enerjinin seviyelendirilmiş maliyeti (TSEM) kullanıldı. Bu analizin temel amacı, değişen pil boyutları için yatırım ve işletme harcamalarından oluşan maliyeti, genetik, parçacık sürü ve ateşböceği algoritmalarını kullanarak toplam maliyet amaç fonksiyonunu en aza indirmeye odaklanmaktır. Birim sistem maliyetinin hesaplanması, maliyet sistemini hesaplamak için kamu hizmet sektöründe yaygın olarak kullanılan Net Bugünkü Maliyet (NBM) yöntemi kullanılarak yapılır (Bashir & Sadeh, 2012).

Nihai maliyet fonksiyonu denklem (3.6) ile tanımlanmaktadır.

$$min\left(\frac{C_{PV} + C_{Rüz} + \sum_{t=0}^{T}(C_{d.jen} + C_{bat})}{\sum_{t=0}^{T} P_{yük}}\right) \tag{3.6}$$

Burada; t =0, 1, 2, 3, …. T bir yıl boyunca her saat verisi, C_{pv} güneş enerjisi toplam maliyeti ($), $C_{Rüz}$ rüzgar enerjisi maliyeti ($), $C_{d.jen}$ dizel jeneratör maliyeti ($), C_{bat} enerji depolama maliyeti ($), $P_{yük}$ şebeke yükü (kW)'dür.

Ekonomik fizibiliteyi değerlendirmek için tüm bileşenleri içeren çeşitli enerji maliyetlerinin analizi dikkate alınır. SEM, önemli sayıda varsayıma dayanmasına rağmen, enerji üretim maliyetini karşılaştırmak ve ölçmek için sıklıkla kullanılan bir tekniktir. SEM, daha fazla analiz için kullanılan aşağıdaki denklem (3.7) ile hesaplanır.

$$\text{TSEM} = \frac{Toplam\ yıllık\ maliyet\ (\$/Yıl)}{Yıllık\ karşılanan\ toplam\ yük(Kwh/Yıl)} \tag{3.7}$$

Projenin net bugünkü değerinin toplam değeri, nihai olarak toplam yıllık maliyeti hesaplamak için nakit akışlarında hesaplanacaktır.
Yıllıklandırılmış maliyetler denklem (3.8) ile değerlendirilir.

$$Toplam\ yıllık\ maliyet\ (\$/yıl) = Toplam\ NBM \times SGKF \tag{3.8}$$

Sermaye geri kazanım faktörü olarak adlandırılan SGKF, normalde denklem (3.9) ile ifade edilir: faiz oranını kullanan sermaye geri kazanım faktörü (Ir) ve referans alınan yıl sayısı (n) olmak üzere aşağıdaki formülde tanımlanmıştır.

$$SGKF(ir,n) = \frac{(ir*(1+ir)^{n})}{(1+ir)^{n-1}} \quad (3.9)$$

3.4. Güç kaynağı kaybı olasılığı (GKKO)

GKKO, yük talebini karşılayamayan hibrit güç üretiminden üretilen yetersiz arz olasılığı olarak belirtilmektedir. Gelecekteki yük tahmininin veya mevcut yük özelliklerinin sistem performansını ölçen istatistiksel bir araçtır. GKKO =0 talebin tamamen karşılandığını gösterirken GKKO=1 yetersiz arzın olduğunu yani yükün karşılanmadığını gösterir.

$$GKKO = \frac{\sum_{i=0}^{T} Tanımlı\ aralıklı\ üretim\ dönem\ güç\ sorunları}{T} \quad (3.10)$$

Burada T, saatlik olarak bildirilen hava durumu bilgileri kullanılarak çalışılan saatlerin sayısı. Güç kesintisi, genellikle yenilenebilir enerjiden elde edilen gücün sınırlı olduğu ve pil depolamasının tükendiği zaman olarak tanımlanır.

3.5. GKKO hesaplama prosedürü

Saatlik enerji çıkışı, rüzgâr hızı ve sahadaki güneş verileri modellenerek belirli bir yıl boyunca bireysel rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin çıkışından hesaplanır. Saatlik yük için üretimle eşleşmek üzere farklı rüzgâr jeneratörü ve PV modülü kombinasyonları kullanılır. GKKO güç kaynağı kaybı alasılığı, hesaplanan enerji kavramları, belirtilen zaman aralığı Eyük (t) için toplam talep toplamındaki eksik güç GKK (t) faktörü olarak tanımlanır.

Enerji depolama kontrol prosedürü, akü şarj etme, deşarj ve kaynak kullanımının verimliliğini etkili bir şekilde belirler. Birkaç saat boyunca enerji eksikliği ve ayrı kaynak kombinasyonları arasında fazla üretim olacaktır. Bu toplanmış enerji açığı her

zaman yeşil enerjiden sağlanamaz. Maksimum açık enerjisini en aza indirecek birleşik rüzgâr jeneratörü ve PV modülünden üretilen güç seçilir. Pil boyutu, maksimum enerji açığı miktarıyla belirlenir. GKK, aşağıdakiler kullanılarak tüm kombinasyonlar için değerlendirilir:

$$GKK = P_{yük}(t) - (P_{PV}(t) + P_{Rüz}(t) + P_{bat}(t) + P_{d,jen}(t)) \quad (3.11)$$

$$GKKO = \frac{\sum_{t=0}^{T} GKK(t)}{\sum_{t=0}^{T} Pyük(t)} \quad (3.12)$$

$$GKKO = \frac{\sum_{t=0}^{T} (P_{yük}(t) - (P_{PV}(t) + P_{Rüz}(t) + P_{bat}(t) + P_{d,jen}(t)))}{\sum_{t=0}^{T} Pyük(t)} \quad (3.12)$$

Burada; t =0, 1, 2, 3, …. T bir yıl boyunca her saat verisi, GKK(t) bir gün içinde yaşanan güç kaynağı kaybı, $P_{yük}$ şebeke yükü (kW), $P_{pv}(t)$ saatlik güneş enerjisi gücü (kW), $P_{Rüz}(t)$ saatlik rüzgar enerjisi gücü (kW), $P_{d.jen}(t)$ saatlik dizel jeneratör gücü (kW), $P_{bat}(t)$ batarya deşarj gücü (kW)'dür.

Bu analizde gerekli olan veriler bir yıllık bir süre boyunca kaydedilir; yani 8760 saat T, saat sayısıdır. Yük talebinin her zaman tatmin edici olduğu güç kesintilerinin olmadığı ideal bir elektrik güç sisteminde, GKKO = 0 değeri. Bu nedenle, GKKO> 0 olduğunda, toplam müşteri yükü her zaman hibrit yenilenebilir enerji ile sağlanamaz. Birçok servis sağlayıcı şirketi, bağımsız olarak çalışan mikro şebeke sistemleri için yaklaşık 0.0001 GKKO değerine sahiptir (Energy & Assessment, 2012).

GKKO ne kadar düşük olursa, güvenilirlik performansının da o kadar yüksek olması beklenir. Bu makalede GKKO =0.01 kullandık, tüm sistemin minimum toplam maliyetinin değerlendirilmesine dayalı olarak optimum kaynak kombinasyonu belirtilecektir.

3.6. Optimizasyon Kısıtlamaları

Mikroşebekenin enerji yönetimi işlemi, aşağıdaki kısıtlamalarla optimize edilmiştir.

(1) Pil Kısıtlamaları: Akü şarj ve deşarj enerjisi, Denklem (3.15)'de olduğu gibi ifade edilir. (Khorramdel vd., 2016)Batarya deşarj olurken P_{bat} , pozitif, batarya şarj

olurken P_{bat} ,negatif değer gösterir. İlgili sınırlandırma Denklem (3.14) akü gücünü minimum ve maksimum değeriyle sınırlıdır. Bu tezdeki maksimum ve minimum enerji depolama kapasitesi sırasıyla %90 ve %15 olarak ayarlanır. Bu tezde maksimum ve minimum enerji depolama kapasitesi sırasıyla %90 ve % 20 olarak alınmıştır.

$$E_{bat}(t+1) = \begin{cases} E_{bat}(t) - \dfrac{P_{bat,des}(t) * \Delta t}{\eta_{bat}^{des}} \ (P_{bat}(t) > 0) \\ E_{bat}(t) - P_{bat,sar} * \Delta t * \eta_{bat}^{sar} \ (P_{bat}(t) < 0) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$P_{bat,\min}(t) \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max} \quad (3.14)$$

$$E_{bat,min} \leq E_{bat}(t) \leq E_{bat,max} \quad (3.15)$$

Burada E_{bat}, enerji depolama sistemi enerjisi, $P_{bat,des}$, enerji depolama sistemi deşarj gücü, $P_{bat,sar}$, enerji depolama sistemi sarj gücü, $\eta_{bat,des}$, batarya enerji depolama sistemi deşarj verimliliği, $\eta_{bat,sarj}$, batarya enerji depolama sistemi şarj verimliliği, $P_{bat,min}$, $P_{bat,max}$ sırasıyla BEDS'nin minimum ve maksimum gücüdür. $E_{bat,min}$, $E_{bat,max}$, sırasıyla mınımum ve maksimum BEDS kapasitesidir.

(2) Dizel Jeneratör Kısıtlamaları: Dizel jeneratörlerden üretilen güç, her jeneratörün üst ve alt sınırları içinde olmalıdır. Dizel jeneratörde, Denklem (3.16) ile ifade edilen denklem sağlanmalıdır.

$$P_{d.jen,min} \leq P_{d.jen}(t) \leq P_{d.jen,max} \quad (3.16)$$

$P_{d.jen,min}$, $P_{d.jen,max}$ sırasıyla dizel jeneratörün minimum ve maksimum gücüdür.

(3) Güç Dengesi Kısıtlamaları: Mikroşebekede, Denklem (3.17) ile ifade edilen denklem her zaman güç akışını dengelemelidir.

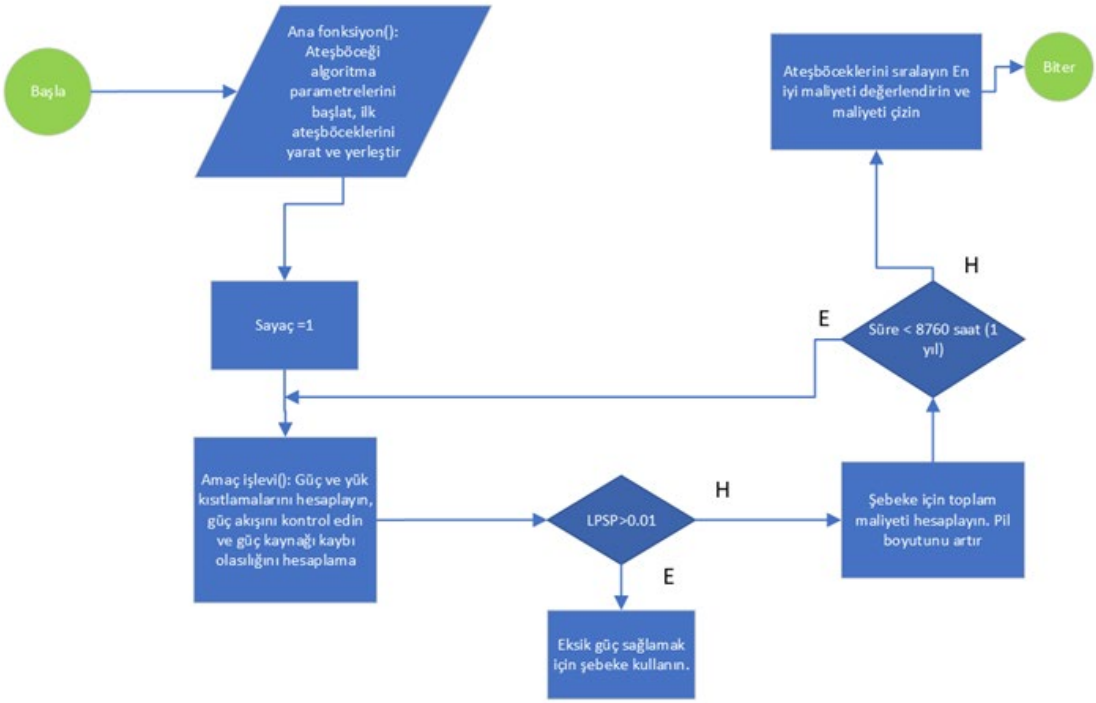
$$\left(P_{PV}(t) + P_{Rüz}(t) + P_{bat}(t) + P_{d.jen}(t)\right) - P_{yük}(t) = 0 \quad (3.17)$$

3.7. Optimizasyon Metodolojisi

Jeneratör sistemleri, herhangi bir elektrik güç sisteminde müşterilerin ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmıştır. Üreticiler, normalde teknik kurallar altında düzenlenen güvenilirlik kriterleri tarafından yönetilen yük taleplerini karşılayacak kadar güç üretmelidir. Bu çalışmada, güç kaynağı güvenilirlik endeksi olan GKKO, bir yıllık veriler için enerji kaynağı ve yük gereksinimlerindeki farkı karşılaştırmak için kriterleri belirler. Aşağıdaki operasyonel program, genel optimizasyonun temelini oluşturan arz ve talep dengesi kurallarını tanımlar:

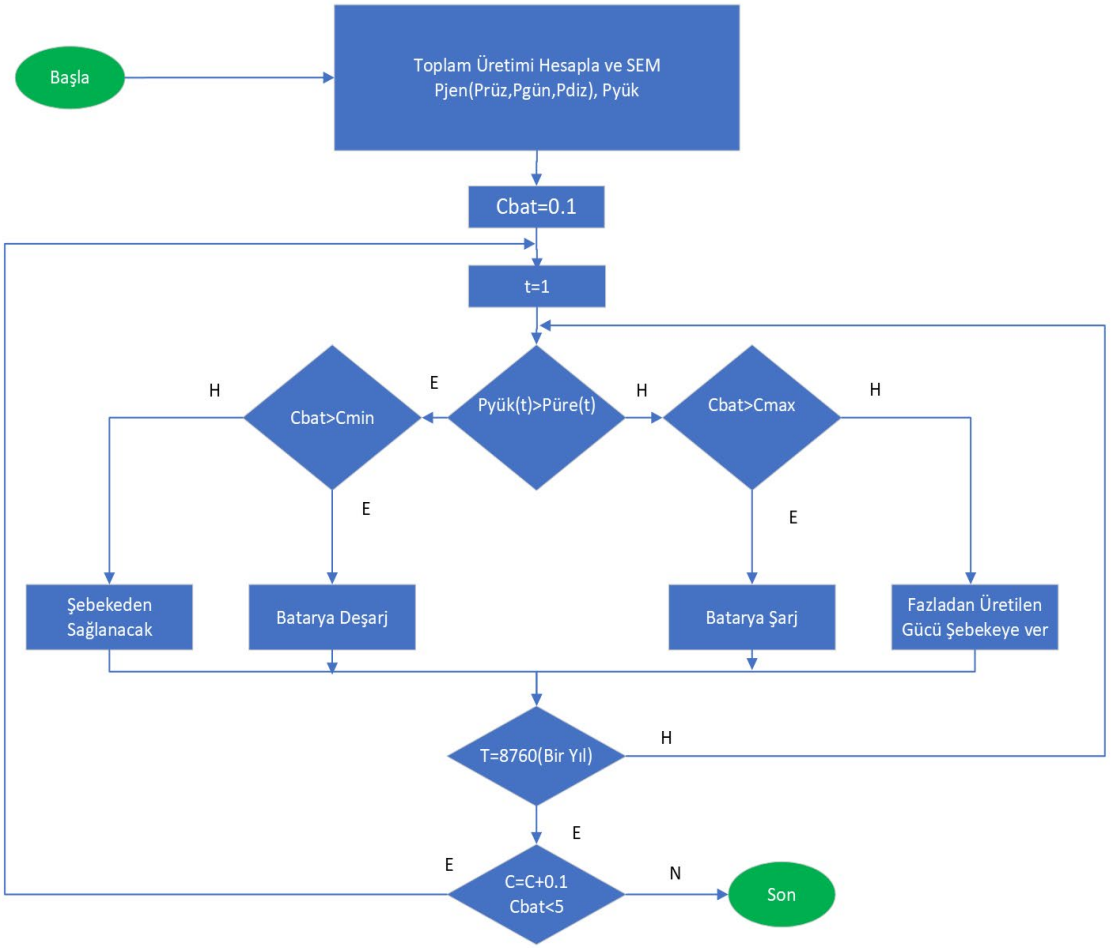
- Güneş ve rüzgâr kaynakları, normalde doğrultucu olarak adlandırılan AC/DC doğrultucu dönüştürücüler aracılığıyla doğrudan güç sağlar.
- Mikro şebeke üzerinden üretilen toplam güç yüksek olduğunda, fazla enerji bataryalarda depolanır.
- Toplam üretilen enerji talep koşullarını yerine getiremezse, yetersiz beslemeyi desteklemek için akü deşarj edilir.
- Akü tamamen boş ise yedek jeneratör çalıştırılmadığı sürece yük otomatik olarak kesilmeye başlar; bu durumda yalnızca şebekeden alınabilir.

Şekil 3.4. 'de gösterilen akış şeması, ateşböceği algoritması için ana ve amaç fonksiyonlarını başlatmak için gereken adımları açıklar. İlk adım, geçmiş verileri kullanarak yenilenebilir üretim ile saatlik üretilebilecek beklenen kapasiteyi belirlemek için yenilenebilir üretim profili oluşturmaktır. GKKO, müşteri kesintilerini en aza indirmede güvenilirlik eşiğini uygulamak için hesaplanacaktır, aksi takdirde dizel jeneratörlerden enerji gönderilir. Simülasyon, en sonunda en iyi boyutu kaydetmek için bir aralık (minimum ila maksimum pil boyutu) içinde yinelenir.



Şekil 3.4. Ateşböceği algoritması kullanılarak maliyet optimizasyonu için akış şeması

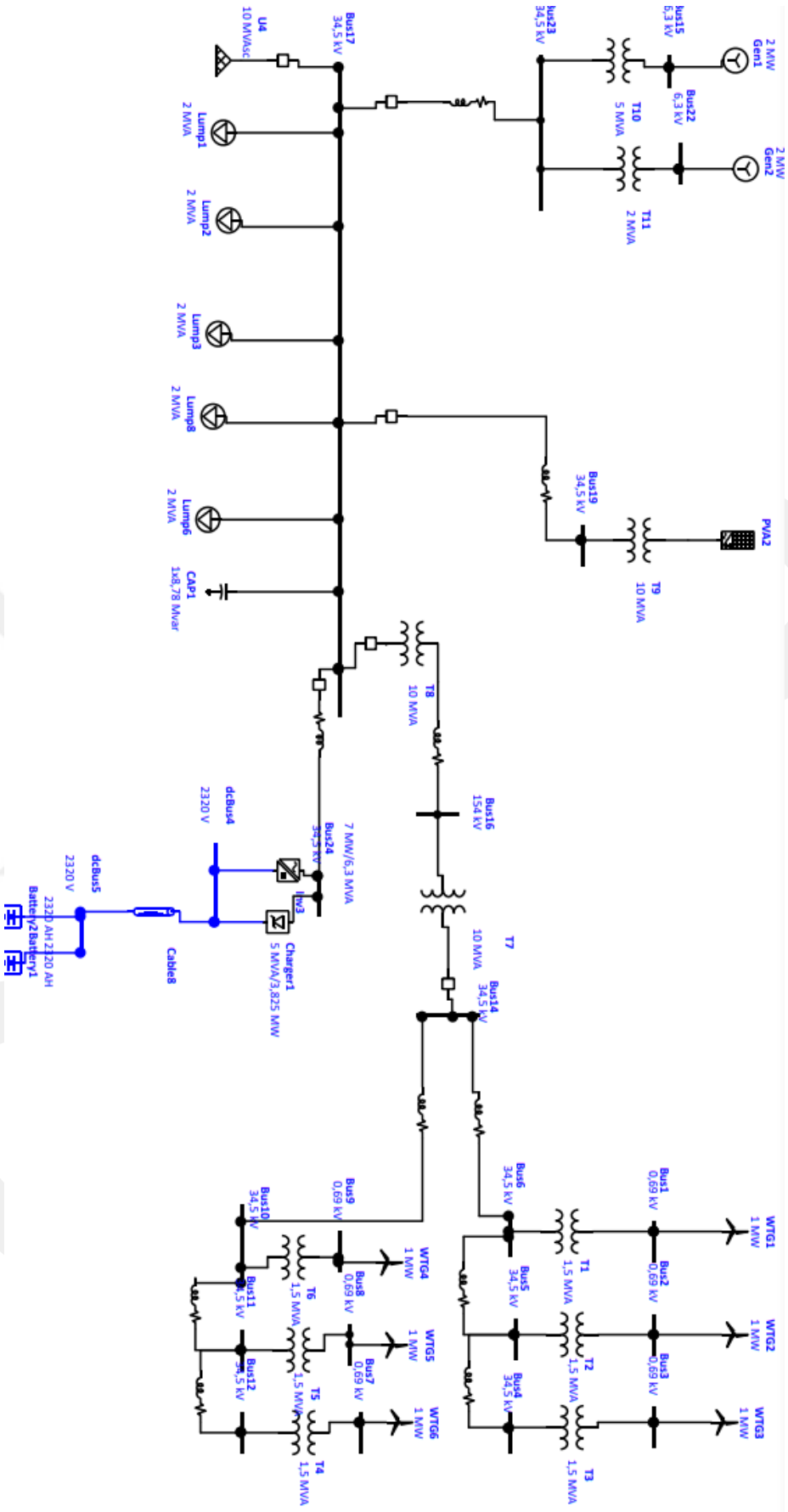
Şekil 3.5. 'de Şebeke işletimi için yük, besleme ve pil kısıtlamaları şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Şebeke işletimi için yük, besleme ve pil kısıtlamaları

3.8. Simülasyon İçin Örnek Şebekenin Oluşturulması

Bu tez kapsamında Etap yazılımı kullanılarak örnek bir mikroşebeke oluşturulmuştur. Şebeke kurulurken 10 MW gücünde bir tesis veya sanayi bölgesinin elektrik ihtiyacını kesintisiz bir şekilde sağlayacak ve sorunsuz bir şekilde yükleri besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin elektrik gücü yenilebilir enerji kaynakları tarafından sağlanmaktadır. Yenilebilir enerji kullanımı önünde en büyük sıkıntı olarak görülen aralıklı üretim sorunu bu şebeke içinde geçerli olmuştur. Rüzgâr santralleri ve güneş enerjisi panelleri birlikte hibrid olarak kullanılan bu sistemde rüzgârın üretim olmadığı vakitler de güneş enerji tesisleri sistemi besleyecek, aksi durumda rüzgar tribünleri tarafından sistem beslenecektir. Şekil 3.6. Etap yazılımında mikroşebeke kurulumu gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Mikroşebeke kurulumu

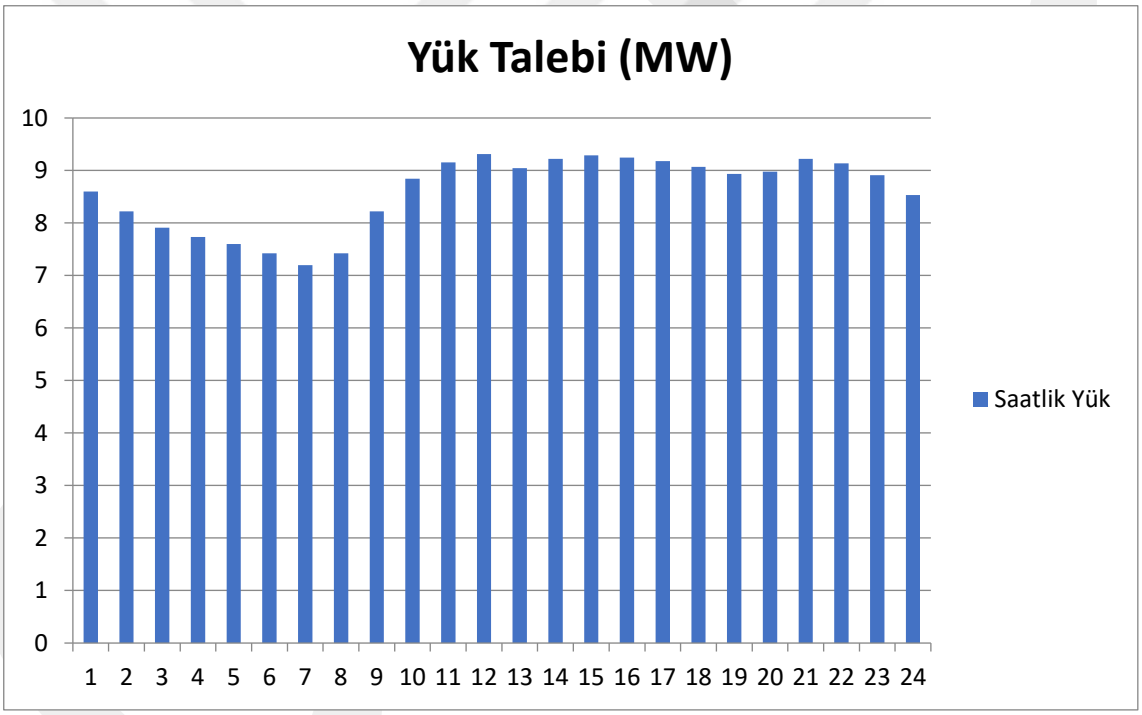
Hibrid sistemler hali hazırda birçok projede başarı ile uygulanmıştır. Ancak Etap yazılımı kullanarak yaptığımız test ve analizlerde bu sisteminde gerilim dalgalanmalarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Rüzgâr ve güneş santrallerinin doğa olaylarına bağlı olarak aynı anda üretim yapmadığı dönemlerde sistemin enerjisiz kalması düşünülemez. Sistemin gerilim stabilitesini sağlamak ve aralıklı üretim dönemlerinde sistemi sürdürülebilir kılmak için batarya enerji depolama sistemi kurulan şebekeye dahil edilmiştir. Mikroşebeke ait bileşenler ve güç değerleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Mikroşebeke ait bileşenler ve güç değerleri

Mikro Şebeke Bileşenleri	**Gücü**
Yük	10 MW
Rüzgar Tirbünü	6 MW
Güneş Santrali	6 MW
Dizel Jeneratör	4 MW
Batarya Enerji Depolama Sistemi	0-6 MW

3.8.1. Simülasyon İçin Yük Verileri

Similasyon için Şekil 3.7. da gösterildiği gibi sistemimiz yıl boyunca maksimum 10 MW güç talep edecektir. Sistem beslenmesi gereken sabit sürekli bir yük modeli benimsenmiştir. Özellikle gündüz vakitleri talebin fazla olduğu vakitlerde güneş santrali sistemin taleplerini karşılayacak, güneş olmadığı vakitlerde rüzgâr türbinleri sistemin ihtiyaçlarını karşılayacaktır. Sistem talebinin karşılanması için yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılanmadığı durumda batarya enerji depolama sistemi tarafından karşılanmaktadır. Kurulan mikroşebekenin yük talebinin 24 saat olarak verilmiştir.

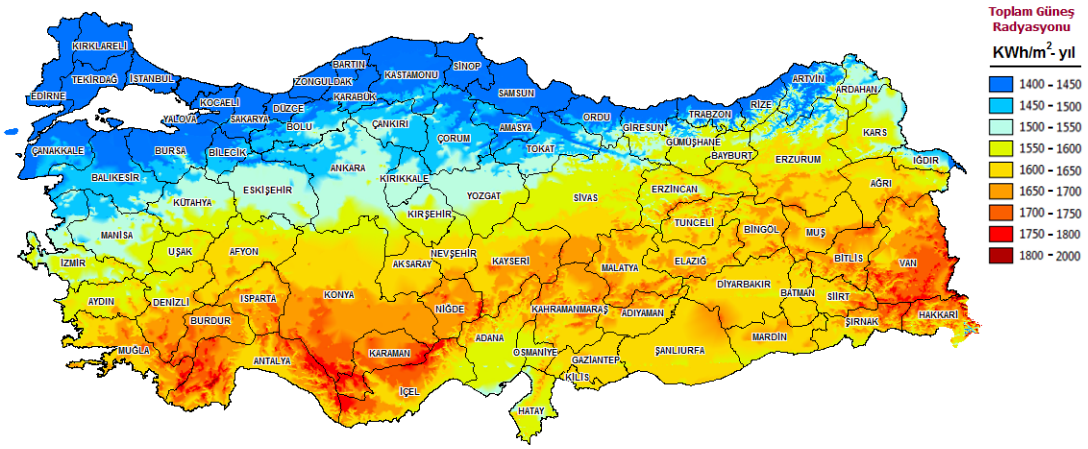


Şekil 3.7. Saatlik yük güç talebi

3.8.2. Simülasyon İçin Güneş Enerjisi Verileri

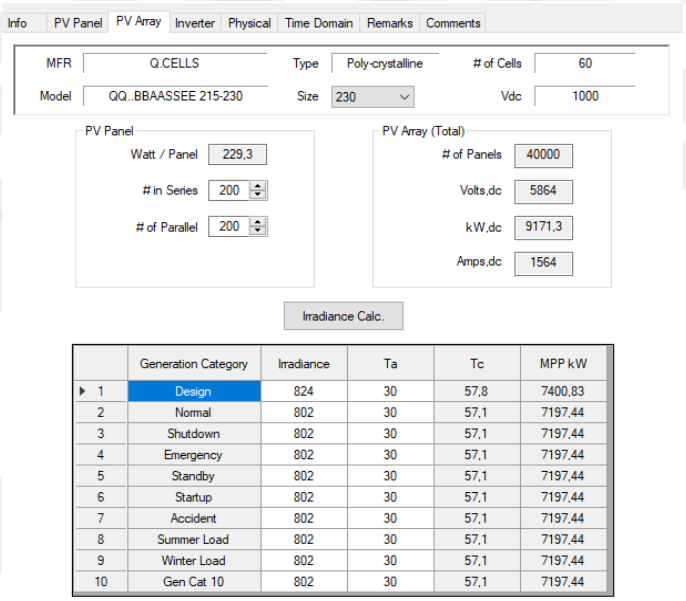
Güneş enerjisi santrali modellemek için Etap yazılı ile bir güneş santrali oluşturuldu. Etap yazılımında bize şebekeyi modelleyeceğimiz bölge seçimi imkânı sunmaktadır. Bu tez kapsamında şebekenin ülkemizin Konya bölgesinde kurulduğu var sayılmış ve veriler bu şekilde elde edilmiştir. Şekil 3.8.' de Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741,07

saat olup ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1.527,46 kWh/m2 olduğu tespit edilmiştir. (*Url-12*)



Şekil 3.8. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA)

Şekil 3.9.'da Etap yazılımın PV güneş paneli teknik verilerinin seçiminin yapıldığı ve konum bilgilerini girdiğimiz ekran gösterilmektedir.



	Generation Category	Irradiance	Ta	Tc	MPP kW
1	Design	824	30	57,8	7400,83
2	Normal	802	30	57,1	7197,44
3	Shutdown	802	30	57,1	7197,44
4	Emergency	802	30	57,1	7197,44
5	Standby	802	30	57,1	7197,44
6	Startup	802	30	57,1	7197,44
7	Accident	802	30	57,1	7197,44
8	Summer Load	802	30	57,1	7197,44
9	Winter Load	802	30	57,1	7197,44
10	Gen Cat 10	802	30	57,1	7197,44

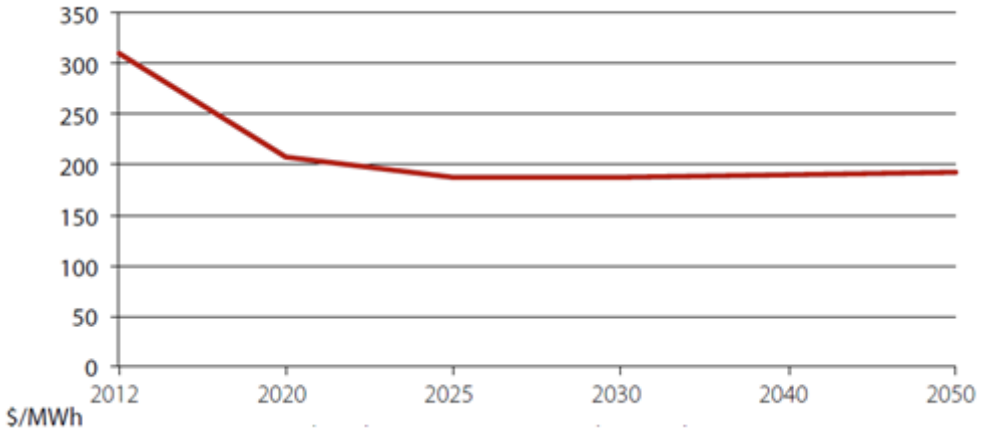
Şekil 3.9. Etap güneş enerji santrali verilerinin ayarlanması

Lokasyon olarak Konya bölgesi seçilmiş ve 6 MW gücünde Q.cells marka güneş paneli sisteme eklenmiştir. Güneş enerji santralinin Çizelge 3.5.'de performans özellikleri ve maliyet tahminleri gösterilmektedir. Güneş enerjili santraller, büyük yatırım gerektirir. Operasyonlar ve bakım tahminleri nispeten büyüktür ancak bunlar gelişmiş varlık yönetimi stratejileriyle azaltılabilir. TSEM temel olarak sermaye maliyetlerine ve yerel güneş kaynağı kullanılabilirliğine bağlıdır. Şekil 3.10'te Temel performans göstergesi ve solar termal için ilişkili maliyet tahmini gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Temel performans göstergesi ve solar termal için ilişkili maliyet tahmini

Sermaye maliyeti $/kW net	4,920
Kurulum maliyeti	25%
İşçilik maliyetleri	20%
Ortalama kapasite faktörü	22% to 24%
Ekonomik ömür (yıl)	30-40
TSEM	208 ($/MWh)

Şekil 3.10.'de güneş enerjisi santralinin maliyet tahminleri gösterilmektedir. (X. S. Yang, 2010)



Şekil 3.10 Seviyeleştirilmiş Enerji Maliyeti

Güneş fotovoltaik dizisi tarafından ölçülen güç, her saat güneş ışınımı ve ortam sıcaklığına bağlıdır. PV gücü denklem 3.18' ifade edilir. (Ju & Wang, 2016)

$$P_{PV,out} = P_{PV,rated} * \frac{I}{I_{ref}} * [1 + k_t\{\left(T_{amp} + (0.0256 * I)\right) - T_{ref}\}] \quad (3.18)$$

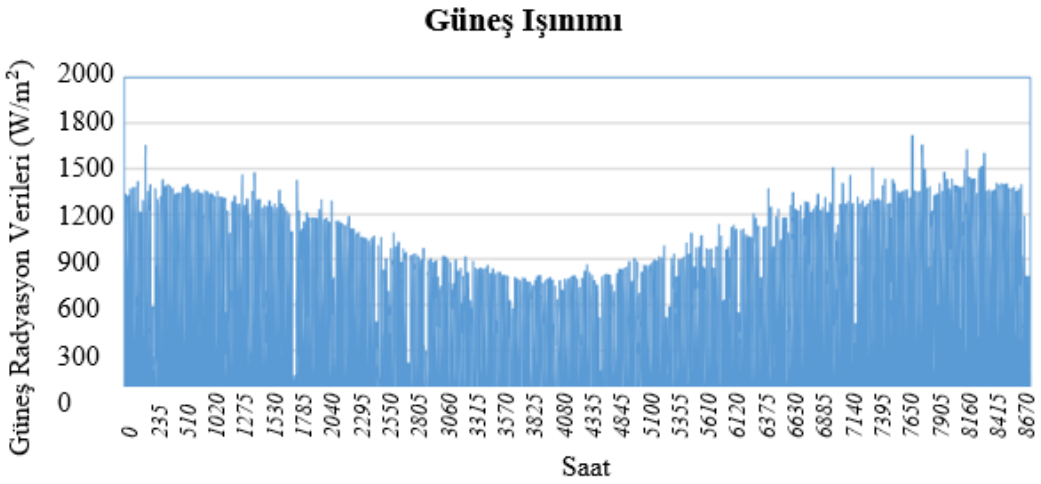
Burada $P_{pv,\ rated}$ maksimum PV gücü (kW), I belirli bir günde güneş ışıması (W/m2), k_t güneş enerjisi katsayısı, I_{ref} standart sıcaklıkta güneş ışıması, T_{amp} güneş panelinin ortam sıcaklığıdır.

Güneş fotovoltaiği tarafından gönderilen güç maliyeti, tanımlanan başlangıç maliyeti ve güç çıkışına bağlıdır. PV gücü denklem 3.19' ifade edilir. (Ju & Wang, 2016)

$$C_{PV} = (\sum_{t=1}^{T} P_{pv,out}(t)) * IC_{PV} * SGKF \tag{3.19}$$

Burada $P_{pv,out}$ PV gücü (kW), IC_{pv} ilk fotovoltaik maliyeti ($/kW), SGKF sermaye geri kazanım faktörüdür.

Şekil 3.11.'de bir yıl için güneş radyasyon verileri gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Saatlik güneş radyasyon verisi (Bir Yıl)

3.8.3. Simülasyon İçin Rüzgâr Enerjisi Verileri

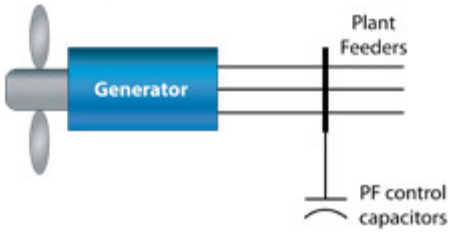
Elektrik enerjisi üretiminde rüzgâr türbinleri ancak belirli bir rüzgâr hızında başlayabilmektedir. Türkiye için düşünüldüğünde genelde yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santralı kurulabileceği kabul edilmiştir. Türkiye'nin mevcut rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak öngörülmektedir. Türkiye yüz ölçümünün

yaklaşık %1,30'una denk karşılık gelen bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30'una denk gelmektedir.

Bu tez kapsamında etap yazılımı kullanılarak rüzgâr türbini modellerken dört tip rüzgâr türbini mevcuttur. Genel olarak, günümüz pazarında en yaygın olarak satılan ve kurulan teknolojiler, tip 3 ve 4 üniteler olma eğilimindedir. Tüm büyük ekipman satıcıları bu teknolojilerden birini veya her ikisini sağlar. Bununla birlikte, dünya çapında hizmette olan çok sayıda tip 1 ve 2 ünite vardır ve bu nedenle bunların modellenmesi de önemlidir.

Tip 1

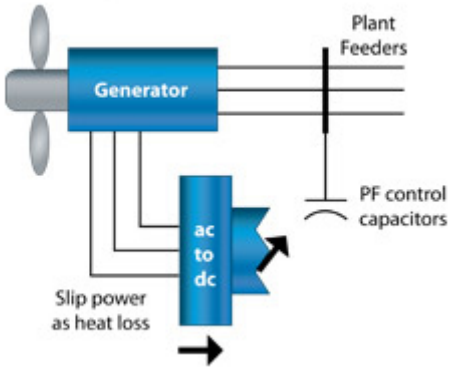
Makine, eğim düzenlenmiştir ve doğrudan şebekeye bağlı bir sincap kafesi indüksiyon jeneratörünü tahrik eder. Genel model jeneratör modeli, güç aktarma sistemi modeli ve aralık kontrol cihazından oluşur. Şekil 3.12.' de Etap tip 1 rüzgâr türbini gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Etap tip 1 rüzgâr türbini

Tip 2

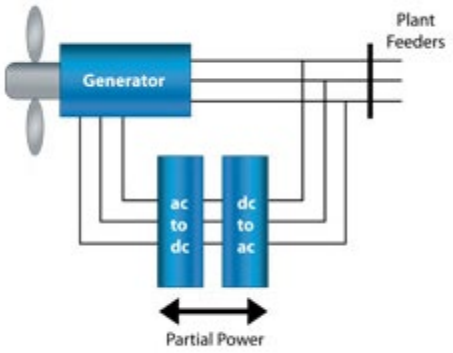
Makina değişken kayma ile çalışmaktadır. Rotor sargısı kayar halkalar ve fırçalar aracılığıyla dışarı çıkarılan bir sargılı rotor endüksiyon jeneratörü kullanır. Bir harici rotor direnci, makinenin tork-hız özelliklerindeki dinamik değişiklikleri etkilemek için elektronik olarak modüle edilir. Jenerik model, jeneratör modeli, harici direnç kontrolörü, aktarma organları modeli ve hatve kontrolörü içerir. Şekil 3.13.' de Etap tip 2rüzgâr türbini gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Etap tip 2 rüzgâr türbini

Tip 3

Makine, çift beslemeli bir endüksiyon jeneratörü (DFIG) veya kısmi dönüşümdür. Türbin eğim ayarlıdır ve rotor terminalleri ile şebeke arasına bağlanan bir AC/DC/AC güç dönüştürücülü bir sargılı rotor endüksiyon jeneratörüne sahiptir. Jeneratör stator sargısı doğrudan şebekeye bağlanmıştır. Rotor devresindeki güç dönüştürücü, geniş bir jeneratör hızı aralığında hızlı aktif ve reaktif güç kontrolü sağlayarak, jeneratör torku ve akısının bağımsız kontrolüne izin verir. Şekil 3.14.' de Etap tip 3 rüzgâr türbini gösterilmektedir.

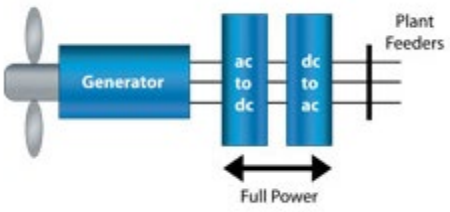


Şekil 3.14. Etap tip 3 rüzgâr türbini

Tip 4

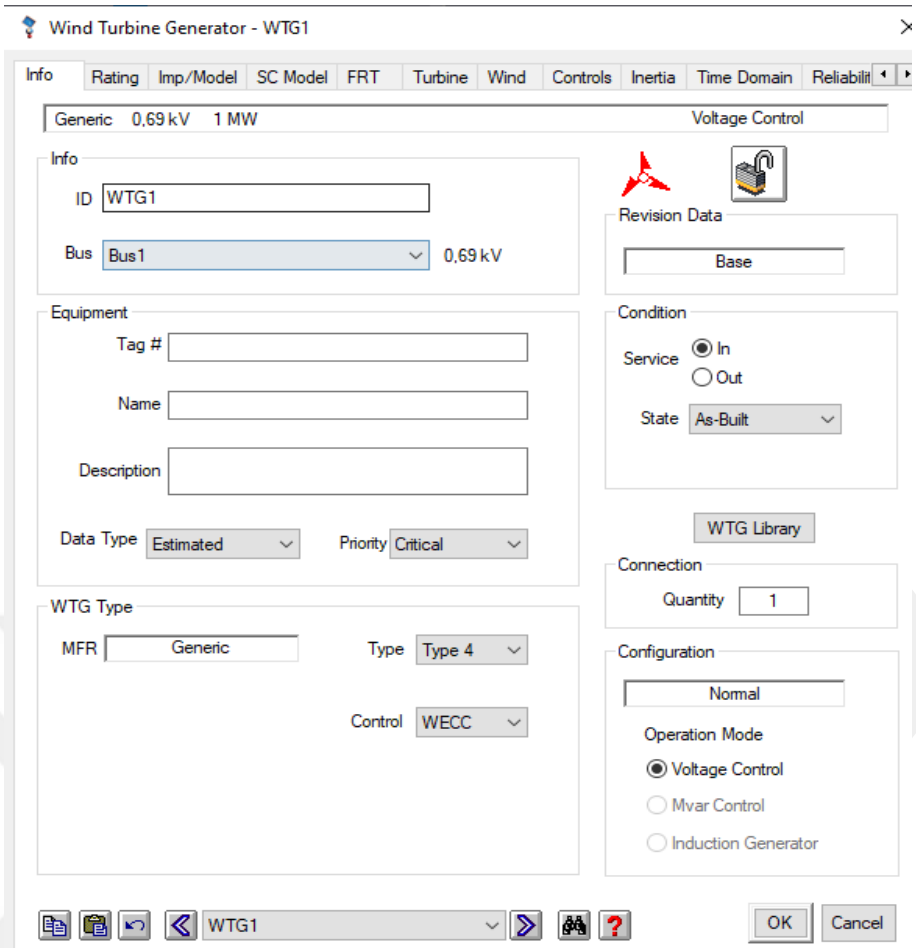
Türbin, adım ayarlıdır ve jeneratörün tüm gücünün işlendiği bir AC/DC/AC güç dönüştürücüsüne sahiptir. Jeneratör, endüksiyon veya senkron tipte olabilir. Güç

dönüştürücü, çok çeşitli jeneratör hızları üzerinde hızlı aktif ve reaktif güç kontrolü sağlayarak, şebeke ara yüzünde karesel ve doğrudan eksen çıkış akımlarının bağımsız kontrolüne izin verir. Şekil 3.15'te Etap tip 4 rüzgâr türbini gösterilmektedir.



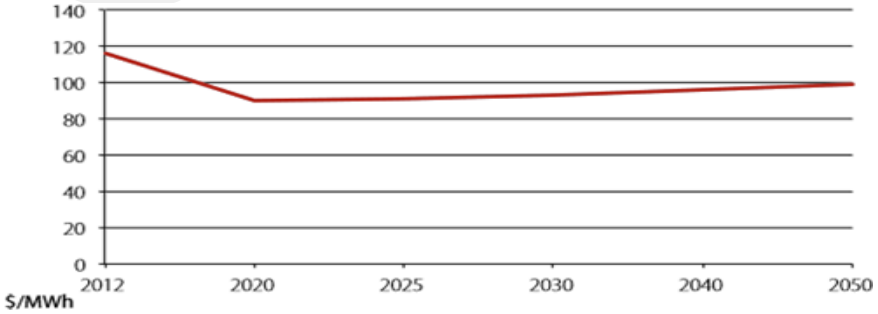
Şekil 3.15. Etap tip 4 rüzgâr türbini

Bu tez kapsamında Etap yazılımında tip 4 rüzgâr santrali şebeke ara yüzünde karesel ve doğrudan eksen çıkış akımlarının bağımsız kontrolüne izin vermesi gibi teknik özellikleri sebebiyle tercih edilmiştir. Seçilen bölgenin hava durumuna bağlı rüzgar verileri ve örnek bir rüzgar santrali tribün verileri Şekil 3.16' de gösterildiği gibi Etap yazılımına girilmiştir. Rüzgâr santrali verileri ayarlanarak mikroşebekye dahil edilmiştir. Her biri 1 MW olmak üzere altı adet tip 6 rüzgar santrali şebekeye eklenmiştir.



Şekil 3.16. Etap rüzgâr türbini verilerinin ayarlanması

Şekil 3.17, TSEM değerlerinin yıllar içinde daha da azaltılmasını göstermektedir. Çizelge 3.6 'de yaklaşık rüzgâr santrali ekonomik ölçümleri ve tipik bir rüzgâr santrali ile ilgili açıklamalar gösterilmektedir. Durum izleme kullanımının artması, komponent arıza oranlarının ve önleyici bakım fırsatlarının daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, rüzgar sahası kurulumunun gelecekteki maliyetlerini azaltmıştır (X. S. Yang, 2010).



Şekil 3.17. Seviyeleştirilmiş enerji maliyeti

Çizelge 3.6. Rüzgâr santrali için hesaplanan değerler

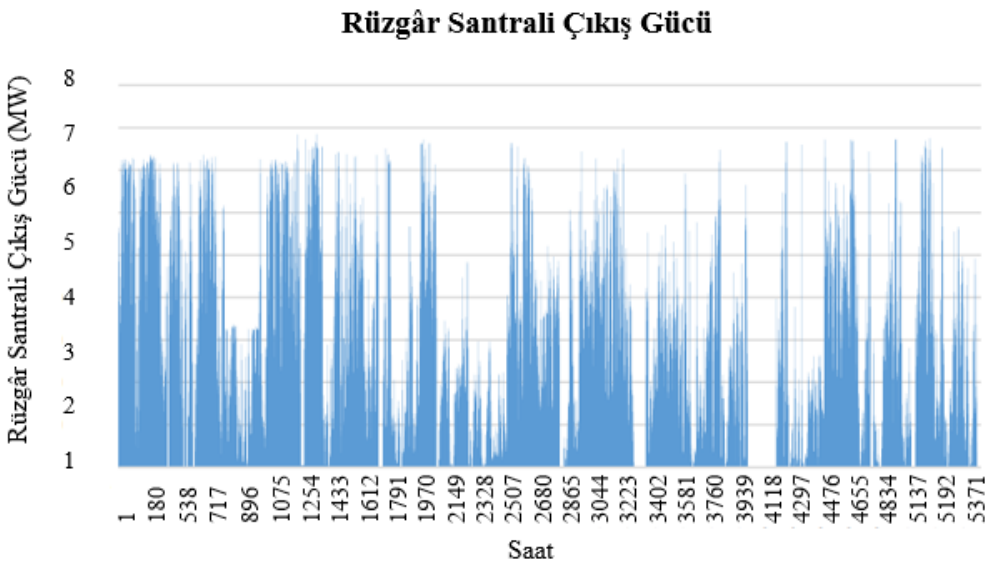
KW başına sermaye maliyetleri	$2,530
Kurulum maliyeti oranı	13%
İşçilik maliyetleri oranı	15%
Ortalama kapasite faktörü	38%
Ekonomik ömür (yıl)	20-30
TSEM	90 ($/MWh)

Rüzgar türbini tarafından belirli bir günde dağıtılan gücün maliyeti, gönderilen gücün ve rüzgar türbininin ilk maliyetinin ürünüdür. Denklem 3.20 sermaye geri kazanım faktörü, faiz oranını ve tahmini kullanım ömrünü göz önünde analizin mevcut değerini hesaplar.(Rokni vd., 2018)

$$C_{WT} = (\sum_{t=1}^{T} P_{w,h}(t)) * IC_{WT} * SGKF \tag{3.20}$$

Burada $P_{w,h}$ (kW) cinsinden rüzgar türbininin saat olarak çıkış , IC_{pv} rüzgar türbininin başlangıç maliyeti ($/kW), SGKF sermaye geri kazanım faktörüdür.

Şekil 3.18.'de bir yıl için rüzgar santrali çıkış gücü verileri gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Saatlik rüzgar enerjisi verisi (Bir Yıl)

3.8.4. Simülasyon İçin Dizel Jeneratör Verileri

Dizel jeneratör ve enerji depolama, yenilenebilir enerjinin gerekli elektrik talebini karşılayamadığı durumlarda mikro şebeke için ikincil güç üretimi kaynaklarıdır. Geleneksel jeneratör yedek enerji kaynağı olarak çalışır ve yenilenebilir enerji kaynağından güç üretimini yumuşatarak sistem güvenilirliğini artırır (Modiri-Delshad vd., 2016). Bu çalışmada göz önünde bulundurulan toplam iki jeneratör vardır. Jeneratörün güç dağıtımı açısından maliyeti Denklem 3.21'de ifade edilir

$$C_{d.gen} = F_i\left(P_{d.gen,i}(t)\right) = a_i P_{d,gen,i}^2(t) + b_i P_{d.gen,i}(t) + c_i \qquad (3.21)$$

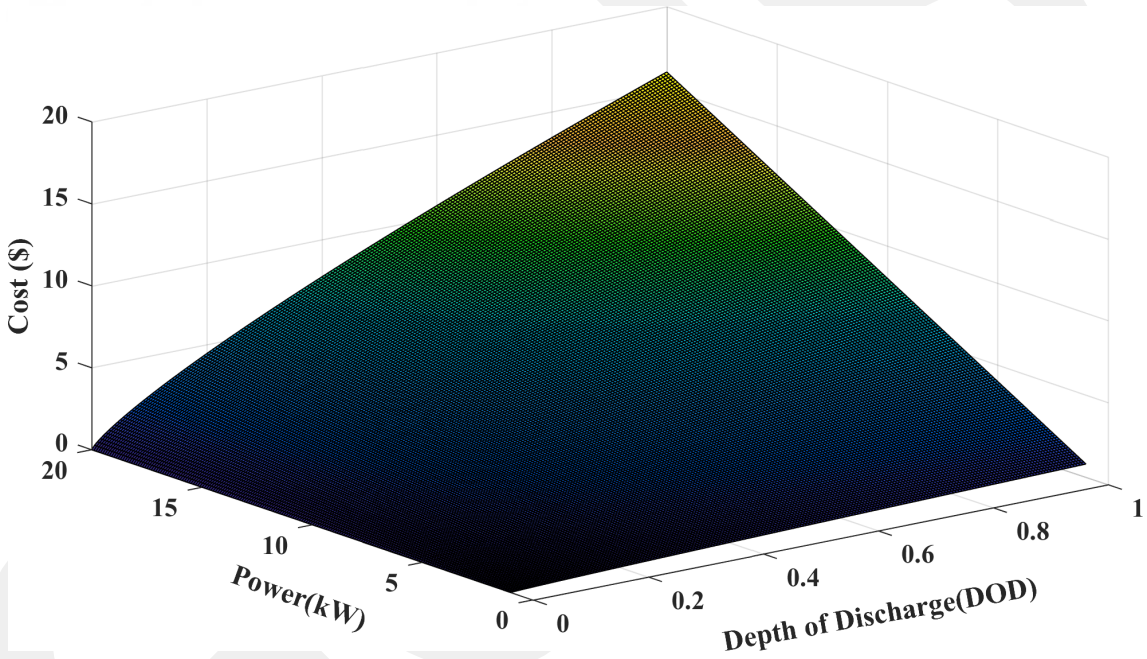
Burada Cd.gen dizel jeneratör maliyeti Pd.gen,i t zamanında i. jeneratör tarafından üretilen güç (kW), ai, bi, ci i'inci jeneratörler için maliyet katsayılarıdır. Dizel jeneratörlerin parametreleri çizelge 3.7.'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7. Dizel jeneratörlerin parametreleri(Sufyan vd., 2019)

DG	a_i ($/kW²)	b_i ($/kW)	c_i ($)	P_{min} (kW)	P_{max} (kW)
Dizel 1	0.0001	0.0438	0.3	0	2000
Dizel 2	0.0001	0.0479	0.5	0	2000

3.8. Pil Spesifikasyon Verileri Simülasyon için Veri Yükle

Batarya enerji depolama sistemleri içi ayrıntılı olarak yapılan literatür taraması ve enerji depolama sistemleri üretimi yapan şirketler incelendiğinde, sistemin maliyetinin çok yüksek olduğu, bunun da batarya enerji depolama sistemlerinin kullanımı önünde büyük engel olduğu tespit edilmiştir. Batarya sisteminin sisteme dahil edilmesi sürecinde optimizasyon yöntemleri kullanarak, sistemin ihtiyaçlarını karşılayacak optimumum batarya boyut, optimizasyon yöntemleri kullanılarak değerlenmiş ve sisteme eklenmiştir. Enerji depolama maliyeti analizi, farklı güç deşarj değerleri ve deşarj derinliği için Şekil 3.19'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Farklı DOD ve Güç Deşarjı İçin Enerji Depolama Maliyeti

Şekilde, DOD yüksek olduğunda enerji depolama maliyetinin arttığı ve benzer şekilde akü daha fazla güç tükettiğinde maliyetin arttığı görülmektedir. Deşarj gücındaki artış, enerji depolama kapasitesinin azalmasına ve DOD' nin yüksek olmasına neden olur. Ancak, maksimum DOD' de enerji depolama sisteminden sürekli yüksek güç boşalması, enerji depolama maliyetini maksimum değere çıkarır. Batarya gücünün ve DOD'nin bir fonksiyonu olarak her zaman aralığında akünün şarj edilmesi/deşarj edilmesi maliyeti, Denklem 3.22, Denklem 3.23 ve Denklem 3.24'te formüle edilmiştir (Ju & Wang, 2016).

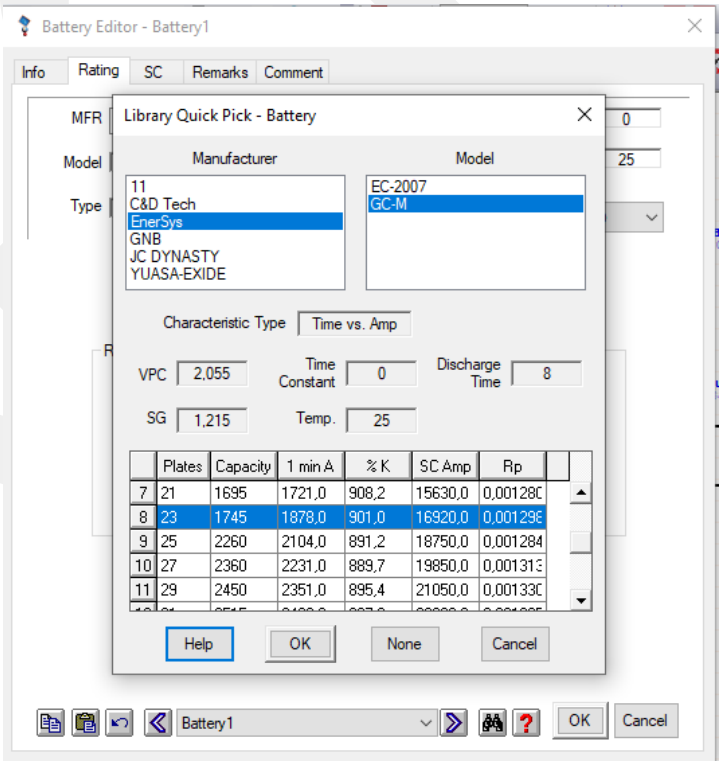
$$C_{bat}(t) = \frac{C_{bat,cap} * P_{bat} * \Delta(t)}{E_{bat,t} * I_C\left(DOD_{bat}(t)\right) * \eta_{bat}^2} \quad (3.22)$$

$$I_C\left(DOD_{bat}(t)\right) = 694 * \left(DOD_{bat}(t)\right)^{-0.795} \quad (3.23)$$

$$DOD_{bat}(t) = 1 - SOC_{bat}(t) \quad (3.24)$$

C_{bat} enerji depolama maliyeti ($), $C_{bat,cap}$ enerji depolamanın sermaye maliyeti ($), P_{bat} akü tarafından şarj edilen/deşarj edilen güç miktarı, Δ(t) bir saat olarak alınan zaman aralığı, η_{bat} enerji depolama verimliliği, $E_{bat,t}$ batarya enerji depolama sistemi toplam kapasitesi, $I_c(DOD_{bat}(t))$ belirli DOD'de enerji depolama döngülerinin sayısıdır.

Batarya sistemleri uzun bir literatür çalışması dahilinde incelendi bu sisteme en uygun batarya teknolojisinin Lityum-iyon piller olduğu tespit edildi. EnerSys firmasına ait GC-M model piller bu şebekede kullanılmak üzere simüle edilmiştir. Şekil 3.20.'da Etap yazılımında seçtiğimiz GC-M model pil ve teknik özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Etap pil verilerinin ayarlanması

Pil kapasitesi değiştikçe, farklı pil boyutları için pilin yaklaşık maliyetlerini tahmin etmek için pilin SEM'si uygulanır. Pil maliyetleri ve diğer spesifikasyon kriterleri çizelge 3.8.'de gösterilmektedir (Han vd., 2014) :

Çizelge 3.8. Batarya özellikleri

Kapasite Özellikleri	0-6 MWh
SOC_{mak} (%)	90
Başlangıç sermayesi maliyeti ($/kWh)	625
SOC_{min} (%)	20
P_{bat} (100 kWh)	25 kW
Boşalma Verimliliği (%)	90

Enerji depolama sistemi, şu anda gerilim kararlığı noktasında en üst düzeyde fayda sağlayan, yüksek sermaye gereksinimleri olan sistemlerdir.

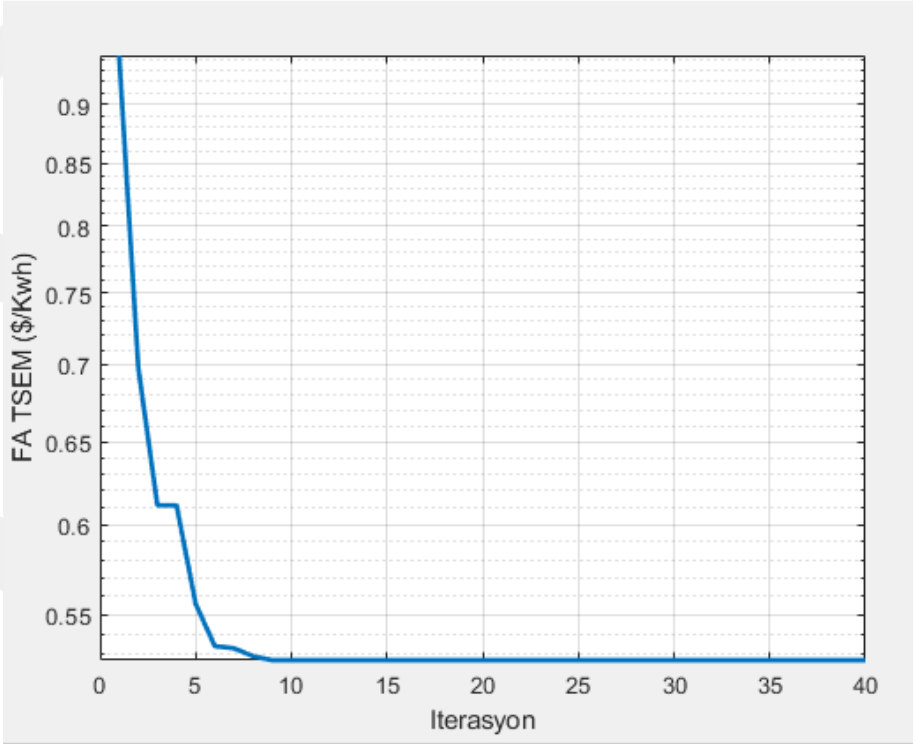
3.9. Simülasyon Çalışmaları

Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, mikro şebekeler için BESS boyutlandırması hakkında değerli bilgiler sağlar. Bu sonuçlar, nihai mikro şebeke çıktılarını ve DG konfigürasyonunu öngörmeye yardımcı olacaktır. Ateş böceği algoritması, Etap yazılımında oluşturulan mikro şebekesi için kabul edilebilir pil boyutunu hesaplamak için MATLAB ortamında oluşturulmuştur. ETAP sisteminden tüm operasyonel verileri analiz etmek için PI sunucu verilerini doğrudan Excel ile entegre eden PI veri bağlantısı üzerinden bir yıllık yük profili verileri çıkarılmıştır. Parametre ayarlarına dayalı olarak yürütülen FA simülasyon programı için önceki bölümlerde ele alınan GKKO (güvenilirlik göstergesi) ve SEM (ekonomik gösterge) hesaplamaları kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

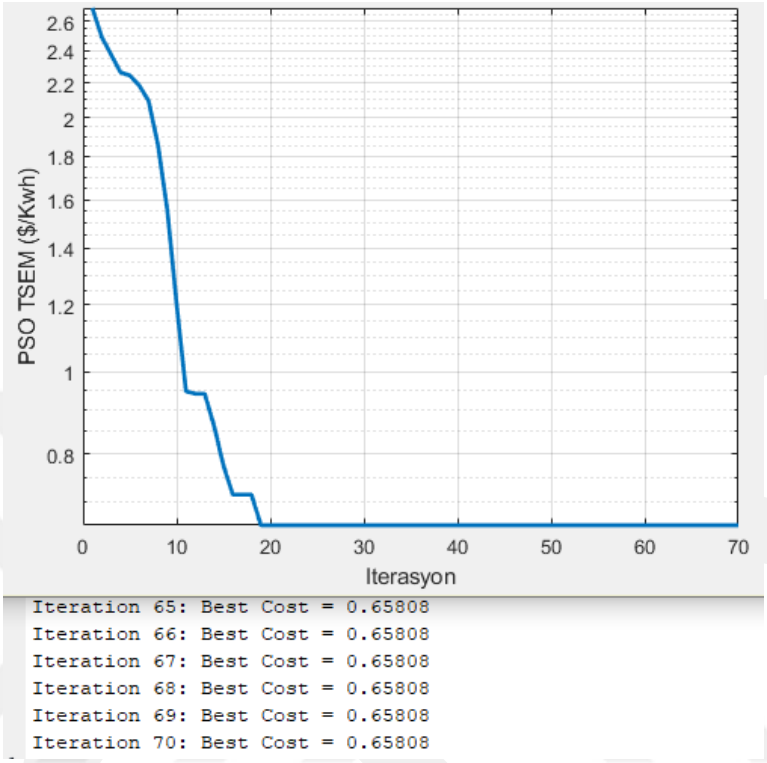
Bu çalışma iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada Etap yazılımında hibrid çalışan bir mikroşebeke kurularak elektrik üretimi analiz edilmiştir. Batarya enerji depolama sistemleri sistemimizin gerilim dalgalamasını büyük ölçüde yok ettiği görülmüştür. İkinci aşamada Matlab yazılımı kullanılarak belirli kısıtlamalar altında şebeke için en uygun batarya boyutunun belirlenmesi amacıyla analizler yapılmıştır. Analizler için seviyelendirilmiş enerji maliyeti esas alınmıştır. Batarya enerji depolama sistemleri en düşük 0.1 MWh olmak üzere 0.1 MWh, 0.5 MWh, 1 MWh, 2 MWh, 3 MWh, 4 MWh, 5 MWh, 6MWh batarya boyutları için sırayla genetik, parçacık sürü ve ateş böceği algoritmaları çalıştırılmıştır.

Şekil 4.3,4.4 ve 4.5'te batarya boyutu 0.1 MWh için optimizasyon sonuçları gösterilmektedir. 0.1 MWh batarya boyutu için ateş böceği algoritması kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) 0.5264 $/kWh olarak hesaplanmıştır.



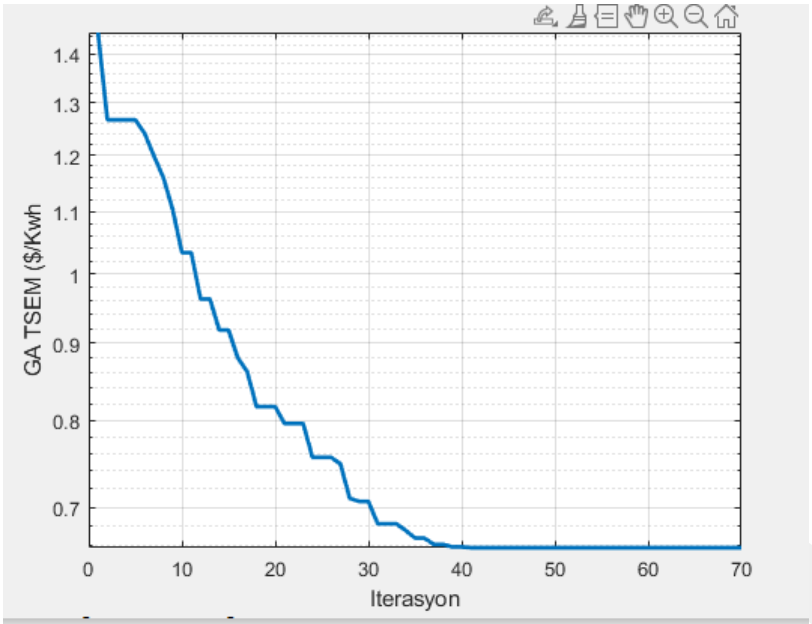
Şekil 4.1. Batarya boyutu 0.1 MWh için TESM (ateş böceği algoritması)

0.1 MWh batarya boyutu için parçacık sürü algoritması kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) 0.65 $/kWh olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Batarya boyutu 0.1 MWh için TESM (parçacık sürü algoritması)

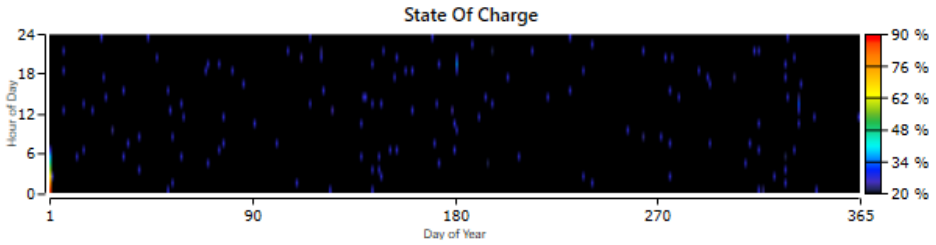
0.1 MWh batarya boyutu için genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış, ile çalıştırılmış optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) 0.6580 $/kWh olarak hesaplanmıştır.




```
Iterasyon 66: Maliyet = 0.65808
Iterasyon 67: Maliyet = 0.65808
Iterasyon 68: Maliyet = 0.65808
Iterasyon 69: Maliyet = 0.65808
Iterasyon 70: Maliyet = 0.65808
```

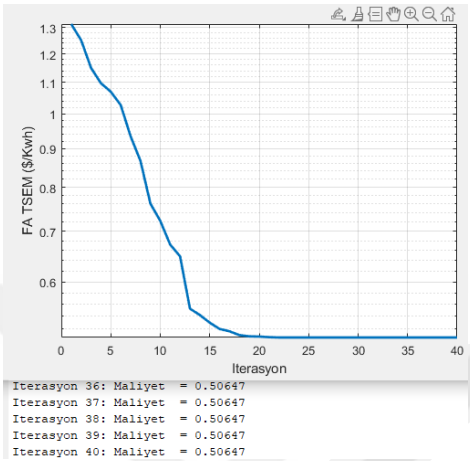
Şekil 4.3. Batarya boyutu 0.1 MWh için TESM (genetik algoritma)

Burada batarya gücü 0.1 MWh olması durumunda sistemin ihtiyacını karşılamak için akü sürekli deşarj olmuş. Çoğu durumda şarj olamadan deşarj olduğu için batarya sarj durumu(SOC) Şekil 4.4.' de verildiği gibi çoğu zaman sınır değerin altında kalmıştır.

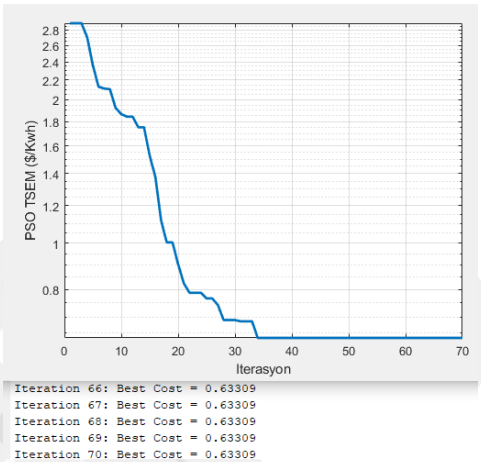


Şekil 4.4. Batarya boyutu 0.1 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

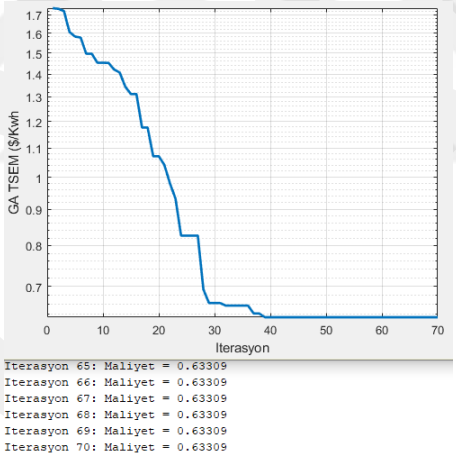
0.5 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar. Şekil 4. 6.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) maliyeti ateş böceği algoritması için 0.5064 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.6330 $/kWh, olarak hesaplanmıştır.



a) Ateş Böceği Algoritması



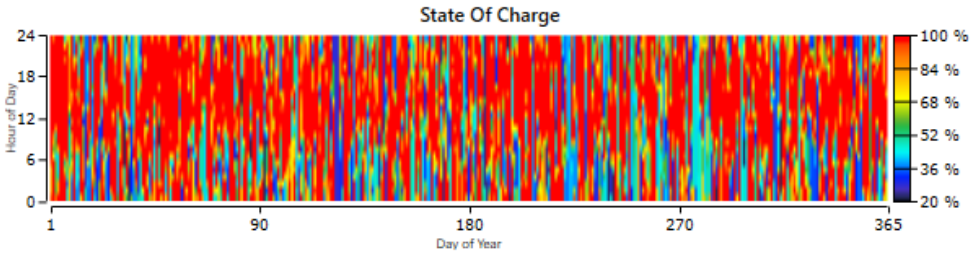
b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

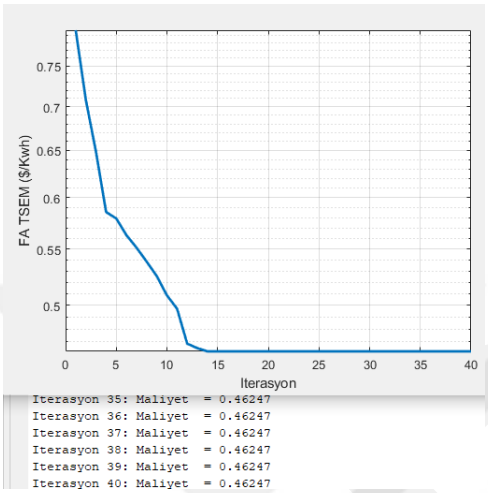
Şekil 4.5. Batarya boyutu 0. 5 MWh için TESM

Burada batarya gücü 0.5 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.6.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde otuz sınırların seyrettiği görülmektedir.

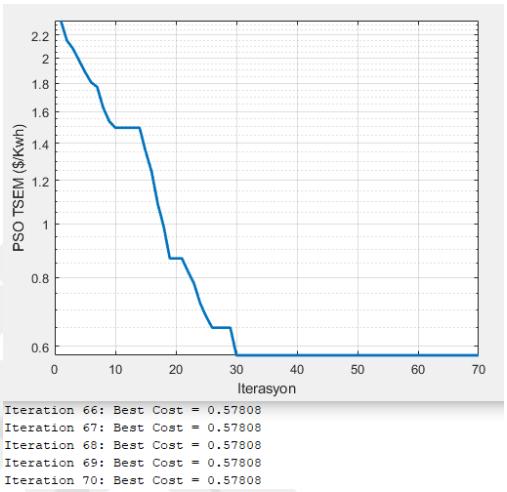


Şekil 4.6. Batarya boyutu 0.5 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

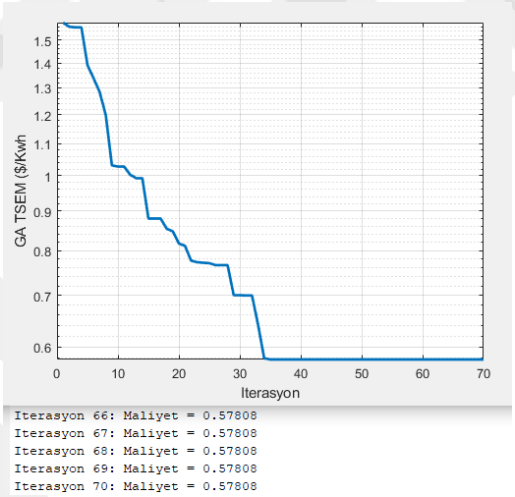
1 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4. 7.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) ateş böceği algoritması için 0.4624 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.5780 $/kWh, olarak hesaplanmıştır.



a) Ateş Böceği Algoritması



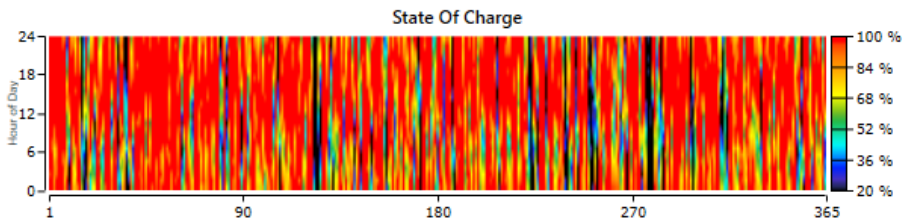
b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

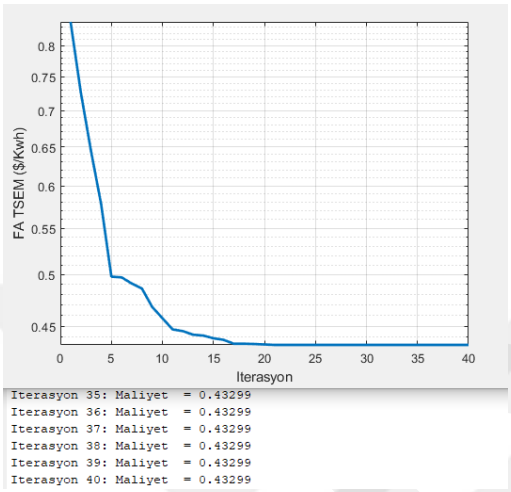
Şekil 4.7. Batarya boyutu 1 MWh için TESM

Burada batarya gücü 1 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.8.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde kırk sınırların seyrettiği görülmektedir.

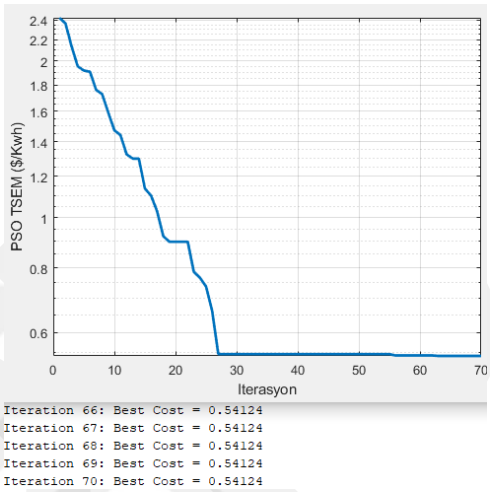


Şekil 4.8. Batarya boyutu 1 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

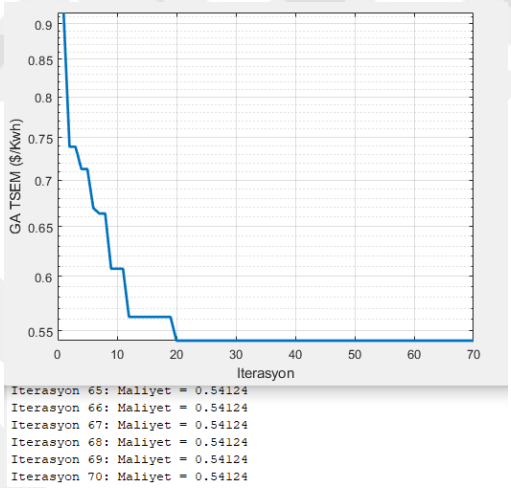
2 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4. 8.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) ateş böceği algoritması için 0.4329 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.5412 $/kWh, olarak hesaplanmıştır.



a) Ateş Böceği Algoritması



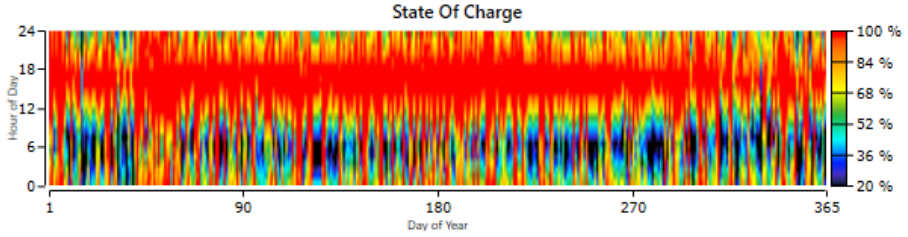
b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

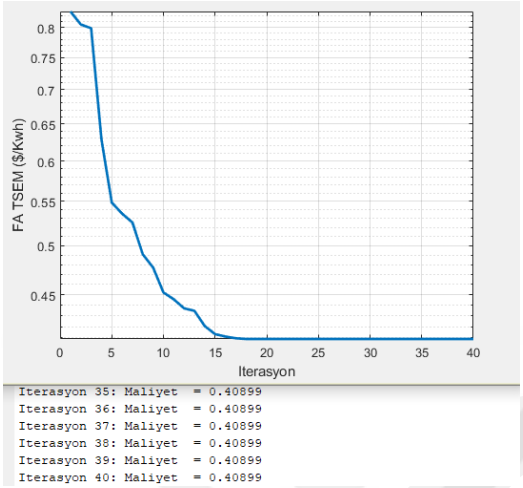
Şekil 4.9. Batarya boyutu 2 MWh için TESM

Burada batarya gücü 2 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.10.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde elli sınırların seyrettiği görülmektedir.

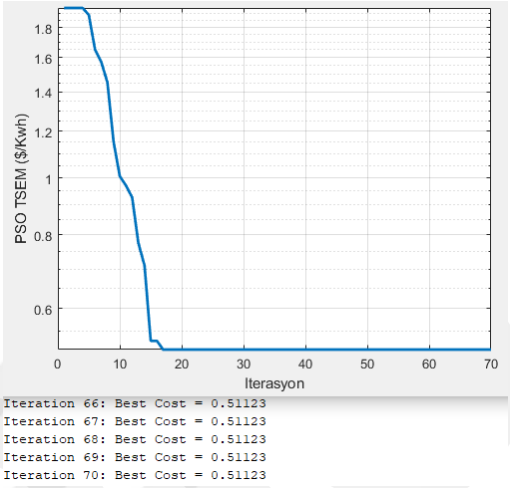


Şekil 4.10. Batarya boyutu 2 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

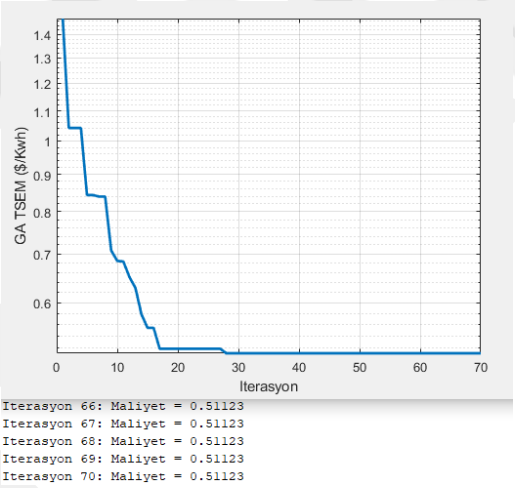
3 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4. 9.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) ateş böceği algoritması için 0.4089 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.5112 $/kWh, olarak hesaplanmıştır.



a) Ateş Böceği Algoritması



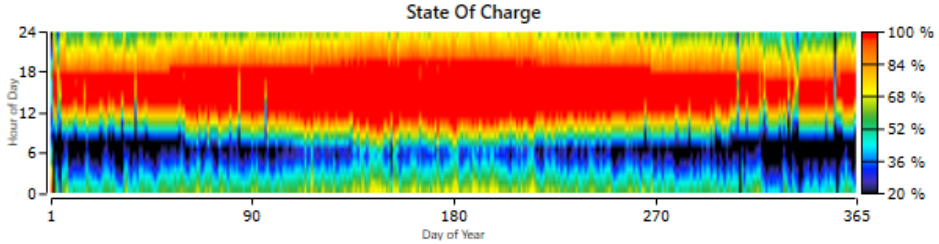
b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

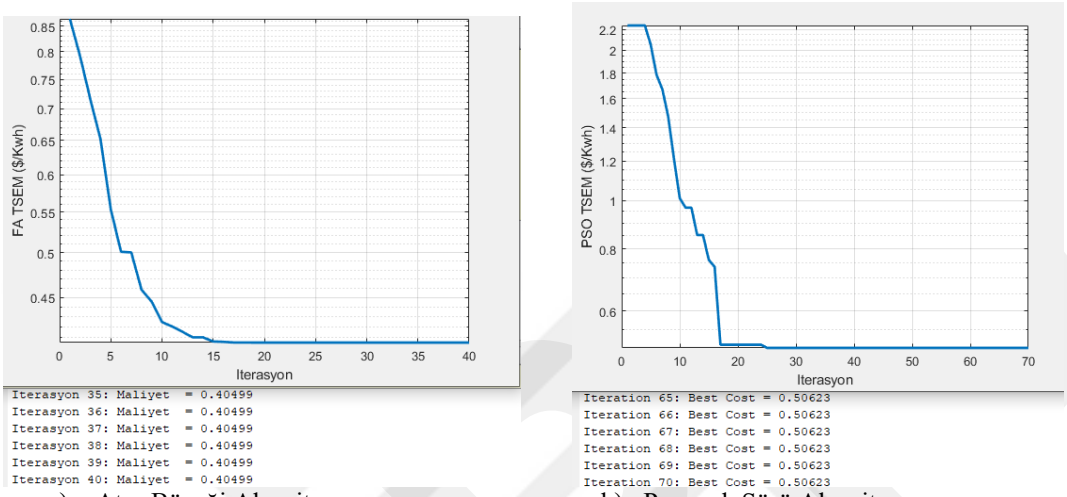
Şekil 4.11. Batarya boyutu 3 MWh için TESM

Burada batarya gücü 3 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.12.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde altmış sınırların seyrettiği görülmektedir.

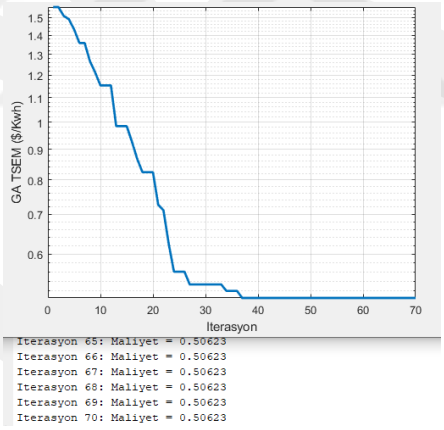


Şekil 4.12. Batarya boyutu 3 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

4 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4. 9.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) ateş böceği algoritması için 0.4049 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.5062 $/kWh olarak hesaplanmıştır.



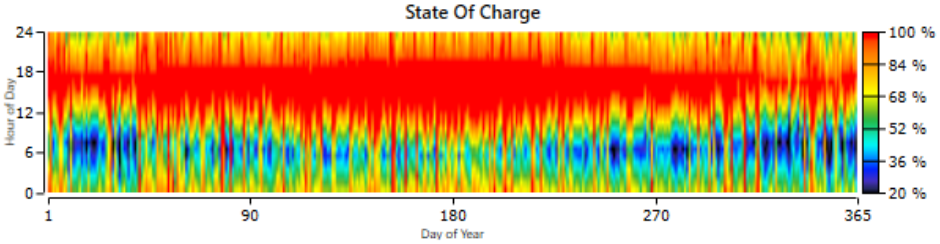
a) Ateş Böceği Algoritması b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

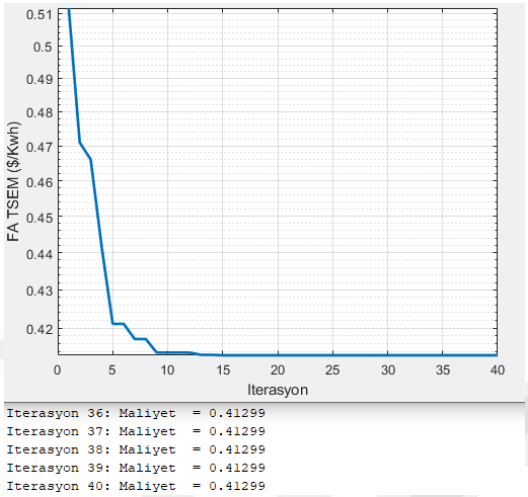
Şekil 4.13. Batarya boyutu 4 MWh için TESM

Burada batarya gücü 4 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.14.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde yetmiş sınırların seyrettiği görülmektedir.

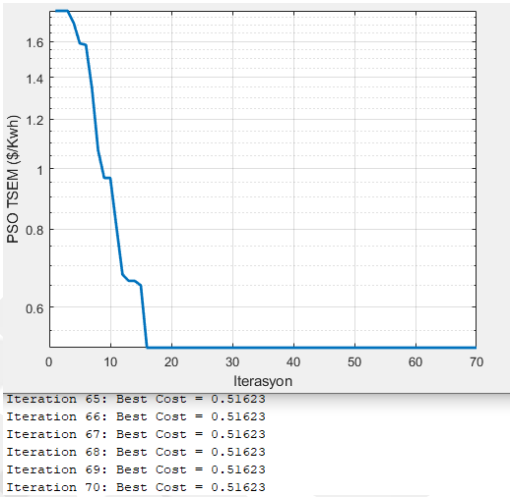


Şekil 4.14. Batarya boyutu 4 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

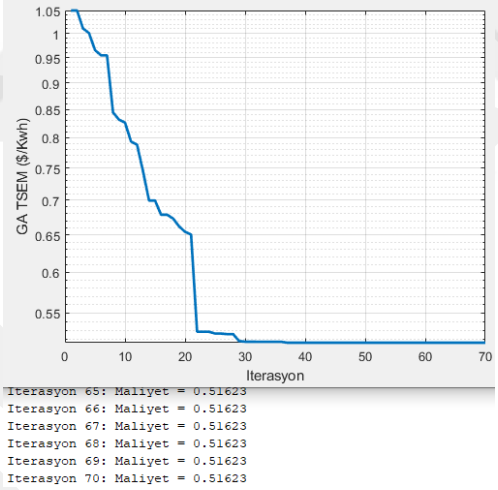
5 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.15.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) ateş böceği algoritması için 0.4129 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.5162 $/kWh olarak hesaplanmıştır.



a) Ateş Böceği Algoritması



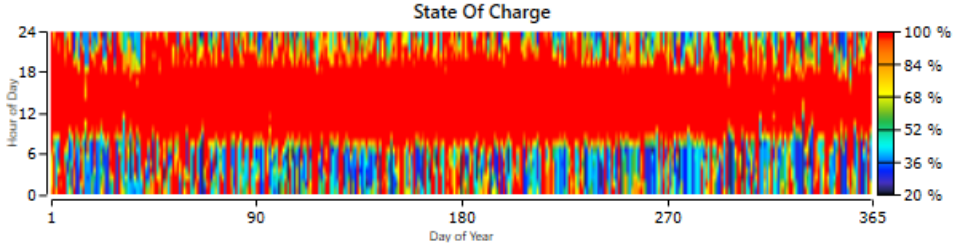
b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

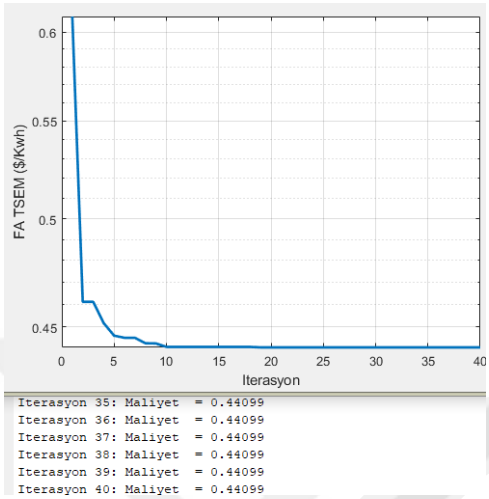
Şekil 4.15. Batarya boyutu 5 MWh için TESM

Burada batarya gücü 5 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.16.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde seksen sınırların seyrettiği görülmektedir.

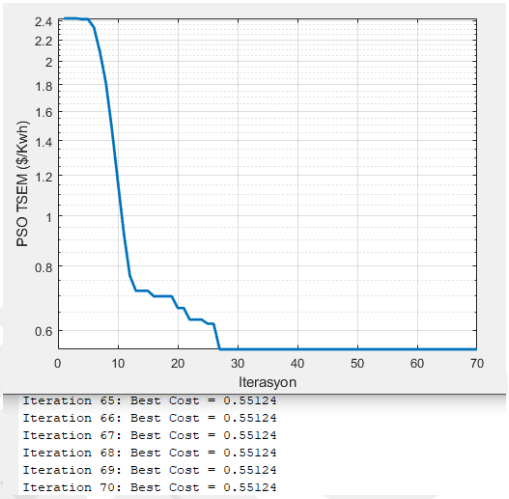


Şekil 4.16. Batarya boyutu 5 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

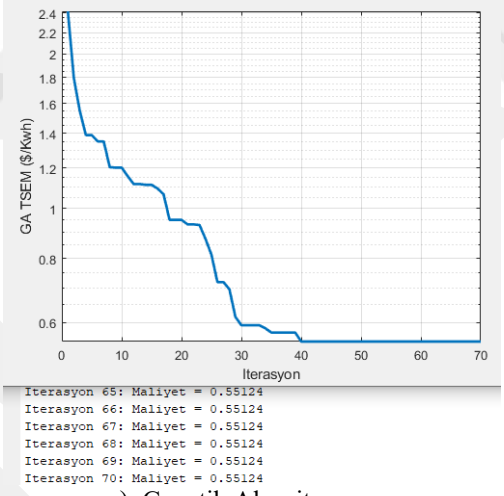
6 MWh batarya boyutu için ateşböceği algoritması, parçacık sürü ve genetik algoritma kullanılarak gerekli koşullar ve optimizasyon kısıtları ile çalıştırılmış ve sonuçlar Şekil 4. 17.'de gösterilmiştir. Optimimum toplam seviyelendirilmiş enerji maliyeti (TSEM) ateş böceği algoritması için 0.4409 $/kWh, genetik algoritma ve parçaçık sürü algoritması için 0.5512 $/kWh olarak hesaplanmıştır.



a) Ateş Böceği Algoritması



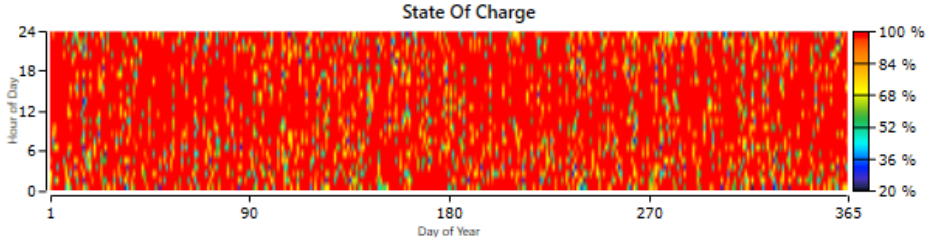
b) Parçacık Sürü Algoritması



c) Genetik Algoritma

Şekil 4.17. Batarya boyutu 6 MWh için TESM

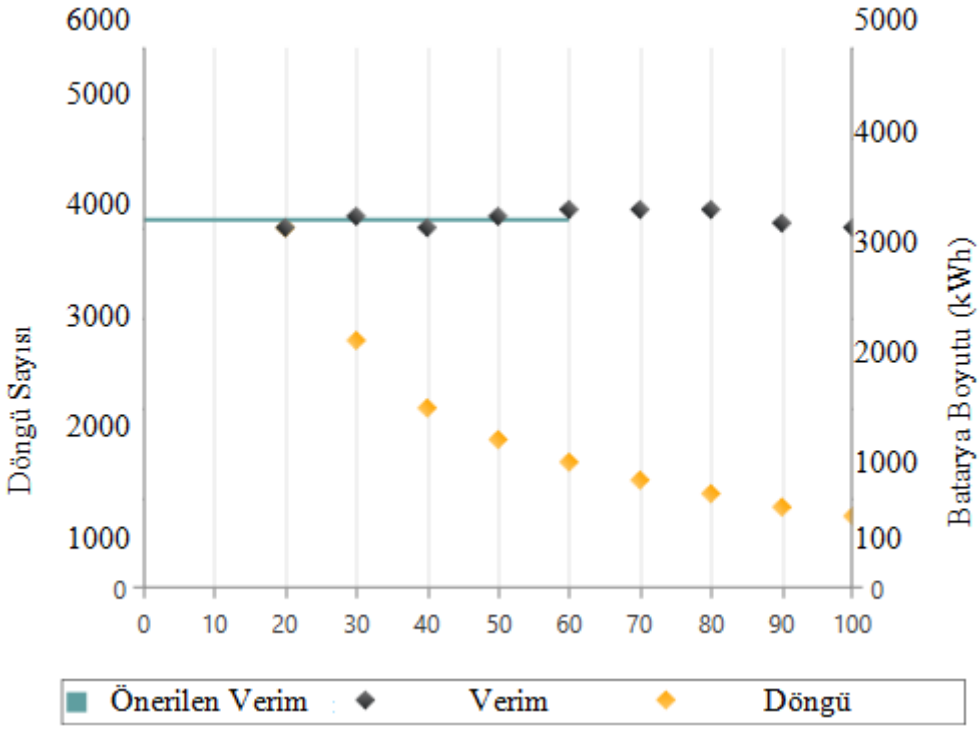
Burada batarya gücü 6 MWh olması durumunda batarya sarj durumu (SOC) Şekil 4.18.' de verildiği gibi ortalama olarak yüzde doksan sınırların seyrettiği görülmektedir.



Şekil 4.18. Batarya boyutu 6 MWh için yıllık şarj durumu (SOC)

Bu çalışmalar ve sonuçlar Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Bu çalışmada DOD yüksek olduğunda enerji depolama maliyetinin arttığı ve benzer şekilde akü daha fazla güç tükettiğinde düşük batarya boyutunda, batarya ömrünü kısaltığı için maliyetin arttığı görülmektedir. DOD' de enerji depolama sisteminden sürekli yüksek güç boşalması, enerji depolama maliyetini maksimum değere çıkarır. Sistem için en uygun batarya boyutu üç algoritma tarafından 4 MWh olarak seçilebilir. Ancak en yüksek yakınsama hızı ile ateş böceği algoritması daha fazla başarıya sahiptir. Ateş böceği algoritması bütün sonuçlarda çok daha erken ve daha az iterasyonla sonuca ulaşmıştır.

Şekil 4.19.'de farklı batarya boyutları sisteme eklendiğinde olusan deşarj derinliğine (DOD) bağlı olarak oluşan döngü sayısı grafik olarak verilmiştir. Sistemin ihtiyacı olan batarya boyutunu tespit etmek adına sarı renkle gösterilen batarya boyutları eklenerek artırılmıştır. Sistemin ihtiyacının altında batarya boyutunda batarya sistemi çok fazla aşırı boşalmaya mağruz kaldığından ömrü kısalmaktadır. Aynı şekilde sistemin ihtiyacından daha büyük batarya boyutunun maliyeti artırdığı görülmüştür. Seçilen batarya için deşarj derinliği (DOD) ve döngü sayısı ilişkisi Çizelge 4.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Döngü sayısı ve batarya boyutu arasındaki ilişki

Çizelge 4.1. Sevilendirilmiş enerji maliyeti (TSEM)

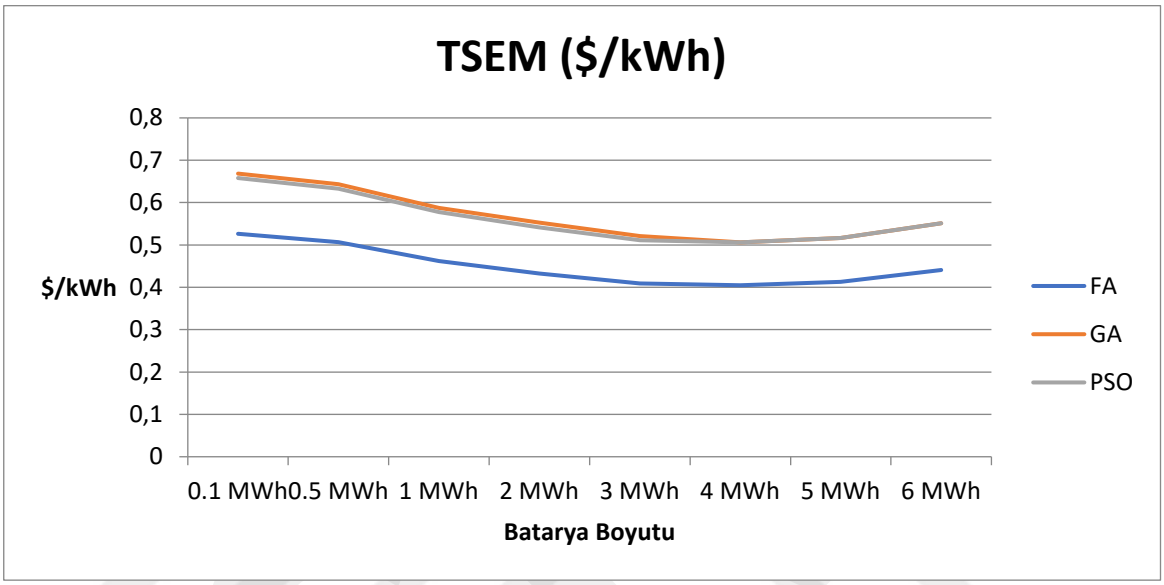
No	Batarya Boyutu (MWh)	FA TSEM ($/kWh)	GA TSEM ($/kWh)	PSO TSEM ($/kWh)
1	0.1	0,5264	0,6585	0,6580
2	0.5	0,5064	0,6335	0,6330
3	1	0,4624	0,5780	0,5780
4	2	0,4329	0,5424	0,5412
5	3	0,4089	0,5111	0,5112
6	4	0,4049	0,5062	0,5062
7	5	0,4129	0,5162	0,5162
8	6	0,4409	0,5512	0,5512

Çizelge 4.2. Sevilendirilmiş enerji maliyeti (TSEM)

Batarya Deşarj Derinliği(%)	Döngü Sayısı
20.00	4000
30.00	2750
40.00	2000
50.00	1650
60.00	1400
70.00	1200
80.00	1050
90.00	900
100.00	800

Şekil 4.19.'de artan akü boyutları için kaydedilen TSEM değerleri gösterilmektedir. Küçük akü boyutları için eğri nispeten düzdür ancak daha büyük akü boyutları yük ve besleme taleplerini fazla etkilemeden toplam sermayeyi ve işletme

maliyetini artırdığı için katlanarak artar. 3 MWh'nin üzerinde takılı olan pil boyutu için TSEM, 4 MW'a kadar artan boyutla azalmaya başlar. Pil boyutu gittikçe arttığında, sermaye maliyeti ($/MWh) büyük ölçüde artar. Bu durum, BEDS'ler tarafından üretilen aşırı enerjinin ilk yatırım tahminini geri ödemediğini göstermektedir. Simülasyon sonuçları, 3~4 MWh arası pil boyutunun tüm güç kısıtlamalarını karşılarken minimum maliyeti (LCOE: 0.40) sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.20. Döngü sayısı ve batarya boyutu arasındaki ilişki

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Günümüzde enerji talebi sürekli artmaktadır ve karşılanması hayati derecede önemlidir. Elektrik üretiminin büyük çoğunluğu hala fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil kaynaklar her geçen gün tükenmekte ve bu günlerde orta çıkan Rusya-Ukrayna savaşı ile ülkelerin enerji ulaşması zorlaşmıştır. Ülkemizde enerji üretiminin büyük bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Dolayısıyla küresel krizlerden oldukça fazla etkilenmektir. Bu sebeplerden dolayı bir organize sanayi bölgesinde de kısa süreli elektrik kesilmesine gidilmiştir. Elektrik kesintileri üretimin durmasına ve maddi kayıplara neden olmaktadır. Elektrik üretiminde olabildiğince hızlı bir şekilde yenilebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu gerekmektedir. Yenilebilir enerji kaynakları şebekeye entegrasyonunda veya direk yük üzerinde kullanılmasının önündeki en büyük engel aralıklı üretimidir. Aralıklı üretimin karşılanması amacıyla hibrit bir şebeke kurularak birbirlerinin açığını kapatması ön görülmüş. Rüzgâr ve güneş enerji santrallerinin birlikte hibrit kullanımı büyük oranda aralıklı üretimi önlediği görüldü. Ancak hala küçük miktarda aralıklı üretim olduğu ve yüksek gerilim dalgalanmalarının olduğu tespit edildi. Bunun çözümü için de batarya enerji depolama sistemleri kullanılmıştır. Batarya enerji depolama sistemleri hakkında uzun ve yoğun bir literatür taraması yapıldı. Bütün enerji depolama sistemleri tek tek irdelendi ve uygulamalar araştırıldı. Yüksek verimlilik ve en iyi deşarj derinliği ile birlikte, sistemimize en uygun batarya enerji depolama sistemi lityum iyon teknolojisi olduğu tespit edilmiştir. Etap yazılımı üzerinde yapılan analizlerde batarya enerji depolama sisteminin sistemin gerilim stabilitesini sağladığı tespit edilmiştir. Batarya enerji depola sisteminin sisteme faydası oldukça fazladır ancak maliyetleri büyük bir dejavantajdır. Bu tez kapsamında sistemimiz için en optimal batarya boyutunu tespit etmek üzerine çalışılmış ve Matlab yazılımı kullanılarak batarya boyut optimizasyon işlemi yapılmıştır. Sistem için 4 MWh batarya boyutu en uygun batarya boyutu olarak tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışma gerçek hayattaki verileri Etap yazılımı ile simüle ederek hazırlanmıştır. Etap yazılımı hayatın birçok evresinde kontrol devresi veya simülasyon için başarıyla uygulanmıştır. Gerçek hayatta verilere olabildiğince iyi analiz ederek yakınlaştırılsa da bazı farklılıklar olabileceği ve bunların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Eğer mümkünse verilerin gerçek bir mikroşebeke kurularak elde edilmesi önerilir.

Tez kapsamında optimizasyon teknikleri kullanılarak optimum batarya boyutu hesaplanmıştır. Gelecek çalışmalarda yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi teknikler kullanılarak değerler karşılaştırabilir.

Veriler ayarlanırken Türkiye coğrafi özellikleri göz önünde bulundurulmuş ancak yapılacak başka çalışmalar için şebekenin kurulacağı bölge verileri değiştirmektedir. Batarya enerji depolama sistemleri fiyatları, enerji piyasasındaki çoğu şirketten teklif alınarak incelenmiş ve uluslararası tahminler göz önünde bulundurulmuştur.

KAYNAKLAR

Ahmed, S., Jaber, A., Dixon, R., Eckhart, M., Hales, D., Radka, M., Mubiru, P., Thompson, G., Santos, C. V., & Pitka-kangas, L. (2010). RENEWABLES 2010 GLOBAL STATUS REPORT Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN21 convenes international multi-stakeholder leadership to enable a rapid global transition to renewable energy . It pro- motes appropriate policies that increase. *Nuclear Safety*, *September*, 80. http://www.ren21.net

Ahmed, S., Jaber, A., Konukiewitz, M., Dixon, R., Eckhart, M., Hales, D., & Thompson, G. (2011). Ren21 Gsr 2011. *REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, *5*(4), 116. http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf

Bashir, M., & Sadeh, J. (2012). Size optimization of new hybrid stand-alone renewable energy system considering a reliability index. *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2012 - Conference Proceedings*, 989–994. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2012.6221521

Beevers, D., Branchini, L., Orlandini, V., De Pascale, A., & Perez-Blanco, H. (2015). Pumped hydro storage plants with improved operational flexibility using constant speed Francis runners. *Applied Energy*, *137*, 629–637. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.065

Bhuiyan, F. A., & Yazdani, A. (2012). Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications. *2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2012*, 303–310. https://doi.org/10.1109/EPEC.2012.6474970

Biomass - Wikipedia. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/Biomass#cite_note-FOOTNOTEEIA2021a-1

Boonluk, P., Siritaratiwat, A., Fuangfoo, P., & Khunkitti, S. (2020). Optimal siting and sizing of battery energy storage systems for distribution network of distribution system operators. *Batteries*, *6*(4), 1–16. https://doi.org/10.3390/batteries6040056

Bueno, P. R. (2019). Nanoscale origins of super-capacitance phenomena. *Journal of Power Sources*, *414*, 420–434. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.010

Carbon Trust. (2006). Future Marine Energy. *Development*, 36. http://www.carbontrust.co.uk/Publications/pages/PublicationDetail.aspx?id=CTC601

Cheeweewattanakoon, N., Kaur, G., Chawla, N., & Bruno, O. (2014). Residential battery energy storage systems (BESS) modeling and effect on the smart grid from the classroom point of view. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*. https://doi.org/10.18260/1-2--22978

Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, *19*(3), 291–312. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014

Climate Change 2001: The Scientific Basis. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi https://web.archive.org/web/20070929100134/http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/041.htm#121

Cothran, H. (2002). *Energy alternatives : opposing viewpoints*. 220.

Crespo Del Granado, P., Wallace, S. W., & Pang, Z. (2014). The value of electricity storage in domestic homes: A smart grid perspective. *Energy Systems*, *5*(2), 211–232. https://doi.org/10.1007/s12667-013-0108-y

Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems-An overview. *Electric Power Systems Research*, *79*(4), 511–520.

https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017
Dye, S. T. (2012). Geoneutrinos and the radioactive power of the Earth. *Reviews of Geophysics*, *50*(3), RG3007. https://doi.org/10.1029/2012RG000400
Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 748–764. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.113
Ellis, B. L., & Nazar, L. F. (2012). Sodium and sodium-ion energy storage batteries. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, *16*(4), 168–177. https://doi.org/10.1016/j.cossms.2012.04.002
Energy, A., & Assessment, T. (2012). *Australian Energy Technology Assessment*.
Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., & Blum, P. (2018). Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *94*(June), 861–876. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057
Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, *32*(15), 2461–2478. https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014
Fraunhofer ISE, & PSE Projects GmbH. (2022). *Photovoltaics Report -2022- Fraunhofer ISE*. *February*, https://www.ise.fraunhofer.de/conte%0Ant/dam/ise/d. https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html%0Ahttps://www.ise.fraunhofer.de/conte%0Ant/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf%0Awww.ise.fraunhofer.de
Fu, Q., Hamidi, A., Nasiri, A., Bhavaraju, V., Krstic, S. B., & Theisen, P. (2013). The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids. *IEEE Electrification Magazine*, *1*(2), 21–29. https://doi.org/10.1109/MELE.2013.2294736
Gualous, H., Bouquain, D., Berthon, A., & Kauffmann, J. M. (2003). *Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature*. *123*, 86–93. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00527-5
Güneş - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (y.y.). Tarihinde 12 Nisan 2022, adresinden erişildi https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes
Gür, T. M. (2018). Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: Challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy and Environmental Science*, *11*(10), 2696–2767. https://doi.org/10.1039/c8ee01419a
H. L. Wills and S. G. Walter. (2000). *Distributed Generation Planning and Evaluation*. https://doi.org/10.1007/978-4-431-56042-5_36
Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(6–7), 1513–1522. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.028
Häggström, F., & Delsing, J. (2018). IoT Energy Storage - A Forecast. *Energy Harvesting and Systems*, *5*(3–4), 43–51. https://doi.org/10.1515/ehs-2018-0010
Han, S., Han, S., & Aki, H. (2014). A practical battery wear model for electric vehicle charging applications. *Applied Energy*, *113*, 1100–1108. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.062
Huggins, R. A. (2015). Energy storage: Fundamentals, materials and applications, second edition. Içinde *Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications, Second Edition*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21239-5
Hydropower Special Market Report – Analysis - IEA. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022,

adresinden erişildi https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report

Ju, C., & Wang, P. (2016). Energy management system for microgrids including batteries with degradation costs. *2016 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2016*, 7–12. https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7754011

Jufri, F. H., Aryani, D. R., Garniwa, I., & Sudiarto, B. (2021). Optimal battery energy storage dispatch strategy for small-scale isolated hybrid renewable energy system with different load profile patterns. *Energies*, *14*(11). https://doi.org/10.3390/en14113139

Keck, F., Lenzen, M., Vassallo, A., & Li, M. (2019). The impact of battery energy storage for renewable energy power grids in Australia. *Energy*, *173*, 647–657. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.053

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, *4*, 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968

Khorramdel, H., Aghaei, J., Khorramdel, B., & Siano, P. (2016). Optimal Battery Sizing in Microgrids Using Probabilistic Unit Commitment. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *12*(2), 834–843. https://doi.org/10.1109/TII.2015.2509424

Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, *27*(October 2019), 101047. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047

Koshizuka, N., Ishikawa, F., Nasu, H., Murakami, M., Matsunaga, K., Saito, S., Saito, O., Nakamura, Y., Yamamoto, H., Takahata, R., Itoh, Y., Ikezawa, H., & Tomita, M. (2003). Progress of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, *386*, 444–450. https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)02206-2

Krishnakumar R., V., Vigna, K. R., Gomathi, V., Ekanayake, J. B., & Tiong, S. K. (2019). Modelling and simulation of variable speed pico hydel energy storage system for microgrid applications. *Journal of Energy Storage*, *24*(January). https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100808

Lange, K. (2013). *Optimization - Kenneth Lange - Google Kitaplar*. https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=1U5GAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=optimization+&ots=L9IT5DJhx2&sig=qSsAVawxZPqyMN4bZKTdEr1cENc&redir_esc=y#v=onepage&q=optimization&f=false

Lay, T., Hernlund, J., & Buffett, B. A. (2008). Core–mantle boundary heat flow. *Nature Geoscience*, *1*(1), 25–32. https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.44

Lee, K. S. (2010). A review on concepts, applications, and models of aquifer thermal energy storage systems. Içinde *Energies* (C. 3, Sayı 6, ss. 1320–1334). https://doi.org/10.3390/en3061320

Levelized Cost Of Energy, Levelized Cost Of Storage, and Levelized Cost Of Hydrogen. (y.y.). *Lazard.com*. Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi http://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-levelized-cost-of-storage-and-levelized-cost-of-hydrogen/

Li, R., Wang, W., & Xia, M. (2017). Cooperative Planning of Active Distribution System with Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems. *IEEE Access*, *6*(c), 5916–5926. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2785263

Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*(May 2017), 2730–2742. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.002

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, *137*, 511–536. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081

Medina, P., Bizuayehu, A. W., Catalão, J. P. S., Rodrigues, E. M. G., & Contreras, J. (2014). Electrical energy storage systems: Technologies' state-of-the-art, techno-economic benefits and applications analysis. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2295–2304. https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.290

Menéndez, J., Ordóñez, A., Álvarez, R., & Loredo, J. (2019). Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *108*(March), 498–512. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.007

Meng, Y., Yang, Y., Chung, H., Lee, P. H., & Shao, C. (2018). Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(12), 1–28. https://doi.org/10.3390/su10124779

Modiri-Delshad, M., Aghay Kaboli, S. H., Taslimi-Renani, E., & Rahim, N. A. (2016). Backtracking search algorithm for solving economic dispatch problems with valve-point effects and multiple fuel options. *Energy*, *116*, 637–649. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.140

Mohamad, F., Teh, J., & Lai, C. M. (2021). Optimum allocation of battery energy storage systems for power grid enhanced with solar energy. *Energy*, *223*, 120105. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120105

Mohammedi, A., Rekioua, D., Rekioua, T., & Bacha, S. (2016). Valve Regulated Lead Acid battery behavior in a renewable energy system under an ideal Mediterranean climate. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(45), 20928–20938. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.087

Mohanpurkar, M., Ouroua, A., Hovsapian, R., Luo, Y., Singh, M., Muljadi, E., Gevorgian, V., & Donalek, P. (2018). Real-time co-simulation of adjustable-speed pumped storage hydro for transient stability analysis. *Electric Power Systems Research*, *154*, 276–286. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.08.010

Ogunniyi, E. O., & Pienaar, H. C. V. Z. (2017). Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications. *Proceedings of the 25th Conference on the Domestic Use of Energy, DUE 2017*, 233–239. https://doi.org/10.23919/DUE.2017.7931849

Özsağlam, Y., & Çunkaş, M. (2008). Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçaçık Sürü Optimizasyonu Algoritması. *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt*, *11*(4), 299–305.

Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 586–598. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040

Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020. (y.y.). Tarihinde 27 Mart 2022, adresinden erişildi https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020

RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi https://www.ren21.net/gsr-2020/

Rokni, S. G. M., Radmehr, M., & Zakariazadeh, A. (2018). Optimum energy resource scheduling in a microgrid using a distributed algorithm framework. *Sustainable Cities and Society*, *37*(July 2017), 222–231. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.016

Shuai, C., Deyou, Y., Weichun, G., Chuang, L., Guowei, C., & Lei, K. (2021). Global sensitivity analysis of voltage stability in the power system with correlated renewable energy. *Electric Power Systems Research*, *192*(May), 106916. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106916

Solar Energy Perspectives: Executive Summary. (2011). International Energy Agency. http://www.iea.org/Textbase/npsum/solar2011SUM.pdf

Sufyan, M., Rahim, N. A., Tan, C. K., Muhammad, M. A., & Raihan, S. R. S. (2019). Optimal sizing and energy scheduling of isolated microgrid considering the battery lifetime degradation. *PLoS ONE*, *14*(2), 1–28. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211642

Tan, X., Li, Q., & Wang, H. (2013). Advances and trends of energy storage technology in Microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *44*(1), 179–191. https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2012.07.015

Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *18*, 327–349. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025

Vasel-Be-Hagh, A., Carriveau, R., & Ting, D. S. K. (2013). Energy storage using weights hydraulically lifted above ground. *International Journal of Environmental Studies*, *70*(5), 792–799. https://doi.org/10.1080/00207233.2013.810043

Villablanca, A., Larsson, C., Höög, A., & Teh, B. T. (2001). Molecular Genetics of Familial Hyperparathyroidism. *International Journal on Disability and Human Development*, *2*(1), 3–12. https://doi.org/10.1515/IJDHD.2001.2.1.3

Wind energy generation vs. installed capacity, 2020. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi https://ourworldindata.org/grapher/wind-energy-consumption-vs-installed-wind-energy-capacity

Wind Power – Analysis - IEA. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi https://www.iea.org/reports/wind-power

Yang, C. J., & Jackson, R. B. (2011). Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 839–844. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.020

Yang, W., & Yang, J. (2019). Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment. *Applied Energy*, *237*(September 2018), 720–732. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.090

Yang, X.-S., & Slowik, A. (2020). Firefly Algorithm. *Swarm Intelligence Algorithms*, 163–174. https://doi.org/10.1201/9780429422614-13

Yang, X. S. (2010). Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, *2*(2), 78–84. https://doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124

Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C., & Kay, M. (2018). Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*(January), 109–125. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047

Yenilenebilir Enerji Kaynakları / T.C. Dışişleri Bakanlığı. (2022). https://www.mfa.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.tr.mfa

Yıllara Göre Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Üretimi | Veri Kaynağı - Veri Kaynağı. (y.y.). Tarihinde 13 Mayıs 2022, adresinden erişildi https://www.verikaynagi.com/grafik/yillara-gore-turkiyede-yenilenebilir-enerji-uretimi/

Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., & Rasmussen, C. N. (2015). Review of energy

storage system for wind power integration support. *Applied Energy*, *137*, 545–553. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103