

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMA
SİSTEMLERİ**

**EMİN DEMİRBAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2023**

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMA
SİSTEMLERİ

EMİN DEMİRBAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ TUBA GÖZEL

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**ENERGY STORAGE SYSTEMS IN
DISTRIBUTION SYSTEMs**

EMİN DEMİRBAŞ

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. TUBA GÖZEL**

**GEBZE
2023**



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/02/2023 tarih ve 2023/11 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/03/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emin Demirbş'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr.Üyesi Tuba GÖZEL

ÜYE :Prof. Dr. Mehmet Hakan Hoccoğlu

ÜYE :Prof. Dr. Bdukkadir Balıkçı

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Günümüzde ekonomi, nüfus ve şehirleşmenin sürekli artış gösteriyor olmasına bağlı olarak enerji ihtiyacının sürekli yükselmesi ve yükselen elektrik enerjisi talebinin karşılanmasında kullanılan geleneksel enerji üretiminin büyük çoğunluğunun fosil yakıt esaslı kaynaklardan üretim yapıyor olmasına bağlı olarak neden oldukları sera gazı salınımlarının çevre kirliliği gibi olumsuzlukları gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ile temiz enerji üretimi kavramı önem kazanmıştır. Bu doğrultuda sürdürülebilir enerji sistemleri gelişmesi için ekonomik ve politik olarak küresel hedefler oluşturulmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu hem çevresel hem de şebeke işletmesi için birçok fayda sağlıyor olsa da beraberinde birtakım sorunları da beraberinde getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) kaynaklanan sorunların ana sebebi YEK'lerin meteorolojik olaylara bağlı üretim yapmasından dolayı sahip oldukları kesintili güç çıkışlarıdır.

Bu tez çalışmasında dağıtım şebekelerinin daha ekonomik ve daha güvenilir şekilde işletilebilmesi için yenilenebilir temelli dağıtım şebekelerinde teknik sorunlar açısından enerji depolama sistemlerinin (EDS) ve talep tarafı yönetimi stratejilerinin kullanılması gerekliliği, EDS'ler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının optimum kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş panellerinin Türkiye için değerlendirilmesi ve güneş santrali ve EDS türlerinden olan batarya depolama sisteminin dağıtım şebekelerine optimal yerleşimi ve optimal boyutu, optimal planlanması yapılan sistemin işletim modeli oluşturularak, şarj-deşarj zamanları belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Dağıtım şebekelerinde gerilim sapsması ve güç kayıplarını en aza indirecek şekilde EDS'lerin en uygun konumlandırılması ve boyutlandırılması üzerine 33 baralı test dağıtım sisteminde General Algebraic Modeling System (GAMS) programı ile çalışılmıştır. Çalışma da EDS'lerin en uygun yerleşimi ile güç kayıplarının ve gerilim sapsmalarını azalabileceği ve sistemin daha verimli ve güvenilir şekilde işletilebileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dağıtım Şebekesi, Yenilenebilir Enerji Barındırma Kapasitesi, Enerji Depolama Sistemleri, Talep Tarafı Yönetimi, Optimizasyon.

SUMMARY

Currently, due to the continuous increase in the need for energy due to the continuous increase in the economy, population and urbanization, and the negative effects such as greenhouse gas emissions and environmental pollution caused by the fact that the majority of traditional energy sources produce from fossil fuel-based sources, and the disproportionate distribution of these fossil fuel reserves over the world. As a result of being limited, the concept of clean energy with renewable energy sources has gained importance. In this direction, economic and political global targets have been established for the development of sustainable energy systems.

In this thesis, the necessity of using ESSs(Energy Storage System) and demand-side management strategies in terms of technical problems in renewable-based distribution networks in order to operate the system more economically and more reliably, For this purpose, studies have been carried out to determine the charge-discharge times of a distribution network that includes a solar panel and battery storage system, which is one of the ESS types. The most appropriate positioning and sizing of ESSs in the distribution networks in a way that minimizes voltage deviation and power losses has been studied with the General Algebraic Modeling System (GAMS) program in the 33 bus test distribution system. In the study, it has been revealed that with the most appropriate placement of ESSs, power losses and voltage deviations can be reduced and the system can be operated more efficiently and reliably.

Keywords: Distribution Network, Renewable Energy Capacity, Energy Storage Systems, Demand Side Management, Optimization.

TEŞEKKÜR

BaŐta, y¼ksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluŐmasının yolunu açan danıŐmanım Dr. Tuba G¼zel'e,

Tez çalıŐmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecr¼belerini benimle paylaŐan değerli Ar. G¼r. S¼leyman Tuncel'e,

ve g¼stermiŐ olduğu desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teŐekk¼rlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Sınırları	1
1.2. Tezin İçeriği	9
2. LİTERATÜR ÖZETİ	10
2.1. Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama Sistemleri	
2.1.1 EDS'lerin Dağıtım Şebekelerindeki Yeri ve Önemi	14
2.2.1 Talep Tarafı Yönetimi ve Enerji Depolama Sistemleri	16
2.2. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ	19
2.2.1 Mekanik Enerji Depolama Sistemleri	20
2.2.1.1. Pompalanmış Su ile Enerji Depolama (PHS)	20
2.2.1.2. Basınçlı Hava ile Enerji Depolama (CAES)	21
2.2.1.3. Valonlar (FES)	22
2.2.2. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri	22
2.2.2.1. Lityum-iyon (Li-on) Bataryalar	22
2.2.2.2. Kurşun Asit Bataryalar	23
2.2.2.3. Sodyum-Sülfür (NaS) Bataryalar	23
2.2.2.4. Akış Pilleri	24
2.2.3. Elektriksel Enerji Depolama Sistemleri	24
2.2.3.1. Ultra kapasitörler/Süperkapasitörler	24

2.2.3.2. Süper İletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)	24
2.2.4. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri	24
2.3.4.1. Hidrojen Enerji Depolama	25
2.3. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Tekno Ekonomik Analizi	28
3. GELİŞTİRİLEN METODOLOJİ	38
3.1. Matematiksel Modeller	38
3.1.1. Sistem Kısıtları	39
3.1.2. Güç Akış Denklemleri	40
3.2. PV-Batarya Sisteminin Optimum Kapasitesinin ve Konumunun Belirlenmesi	40
3.3. Akış Şeması	45
4. GELİŞTİRİLEN METODOLOJİNİN UYGULANMASI	46
4.1. Sistem Tanıtımı	46
4.2. Temel Durum Analizleri	48
4.3. Batarya Sistemlerinin Büyüklüğünün ve Konumunun Belirlenmesi	49
4.3.1. Batarya Büyüklüğünün Belirlenmesi	
4.3.2. Aktif Güç Kaybı İçin En Uygun PV-Batarya Sisteminin Konum Analizleri	51
4.3.3. Reaktif Güç Kaybı İçin En Uygun PV-Batarya Sisteminin Konum Analizleri	53
4.3.4. Ortalama Gerilim Sapması için En Uygun PV-Batarya Sisteminin Konum Analizleri	54
4.3.5. Çok Amaçlı Amaç Fonksiyonu İçin En Uygun PV-Batarya Sisteminin Konum Analizleri	55
4.4. Şebeke İşletim Modelinin Oluşturulması	56
5. ANALİZ SONUÇLARI	59
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	63
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	72
EKLER	73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Acıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
i	: Bara Numarası
j	: Bara Numarası
V_i	: i . Baranın Gerilim Değeri
δ	: Baranın Gerilim Açısı
r_{ij}	: i . Bara ile j . Bara Arasındaki Hattın Direnci.
x_{ij}	: i . Bara ile j . Bara Arasındaki Hattın Reaktansı
P_i	: i . Baranın Aktif Gücü
Q_i	: i . Baranın Reaktif Gücü
P_{loss}	: Aktif Güç Kaybı
Q_{loss}	: Reaktif Güç Kaybı
VDA	: Ortalama Gerilim Sapması
n	: Hat Sayısı
$ObjFun$: Amaç Fonksiyonu
CAES	: Basınçlı Hava İle Enerji Depolama
CO ₂	: Karbondioksit
DP	: Dinamik Programlama
EPIAŞ	: Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
FES	: Valonlar (Flywheel Energy Storage)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
GA	: Genetik Algoritma
GAMS	: General Algebraic Modeling System
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
kVAr	: Kilovolt Amper Reaktans
kVA	: Kilovolt Amper
kW	: Kilowatt

KWh	: Kilowat saat
LCOE	: Seviyelendirilmiş Enerji Maliyet (Levelized Cost of Energy)
LCOS	: Net seviyelendirilmiş depolama maliyeti (Levelized Storage Cost)
LI-ION	: Lityum iyon
MWh	: Megawat saat
NaS	: Sodyum Sülfür
NLO	: Nonlineer Optimizasyon
OPF	: Lineer Olmayan Optimizasyon (NonLinear Optimization)
PHS	: Pompalanmış Hidrolik Depolama
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
PU	: Per Unit
SEDAŞ	: Sakarya Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
SMES	: Süper iletken Manyetik Enerji Depolama
TKDK	: Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu
TTY	: Talep Tarafı Yönetimi
PV	Fotovoltaik
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: EDS'li Güç Sistemi Görseli.	13
2.2: Örnek PV Üretim ve Yük Profili.	17
2.3: Enerji depolama sisteminin etkisi.	19
2.4: Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması.	16
2.5: Pompalanmış depolama sistemlerin Çalışma Mekanizması.	17
2.6: CAES Sistemlerin Çalışma Mekanizması.	18
2.7: Valon Sistemlerin Çalışma Mekanizması.	19
2.8: Bazı EDS'lerin LCOE Karşılaştırılması.	27
2.9: Bazı EDS'lere ait 2030 LCOE Tahminleri.	27
2.10: TLDK Teşvik Programında Yer Alan İller.	31
2.11: Türkiye Güneş Radyasyon Dağılım Haritası.	32
2.12: Kayseri İli Güneş Radyasyon Dağılım Haritası.	32
2.13: Kayseri ilinin güneşlenme süresi ve Kayseri ilinin global radyasyon değerleri.	33
2.14: PVsyst programın yönlendirme ekranı.	34
2.15: PVsyst programından elde edilen sentetik veriler.	35
2.16: PVsyst programı genel sonuçları.	36
2.17: PVsyst programı kayıplar dizini.	37
3.1: 2 Baralı Radyal Dağıtım Sistem .	43
3.2: Akış şeması.	47
4.1: 33 Baralı test sistemi.	49

4.2:	PV üretim eğrisi.	50
4.3:	Yük eğrisi.	51
4.4:	Ortalama aktif güç kaybı karşılaştırılması.	52
4.5:	Ortalama reaktif güç kaybı karşılaştırılması.	53
4.6:	Ortalama gerilim değişimi karşılaştırılması.	54
4.7:	Çok amaçlı amaç fonksiyonu sonuçları.	54
4.8:	Batarya şarj durum grafiği.	55
4.9:	Batarya şarj-deşarj gücü.	55
4.10:	Üretim sistemleri ve bataryanındeşarj durumu eğrisi.	56
4.11:	Yükler ve bataryanın şarj durumu eğrisi.	58
5.1:	Temel durum-optimal durum gerilim sapması karşılaştırılması.	65
5.2:	Temel durum-optimal yerleşim durumu aktif güç kayıpları.	65
5.3:	Temel durum-optimal yerleşim durumu reaktif güç kayıpları.	66
5.4:	Temel durum-optimal durum gerilim sapması karşılaştırılması.	67

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Literatürdeki çalışmalar.	8
2.2: EDS uygulama alanları.	16
2.3 EDS teknolojilerinin teknik ve ekonomik incelemesi.	35
2.4 PV sistem maliyetler tablosu.	36
2.5: PV sistem toplam maliyet ve gelir tablosu.	29
4.1: Temel durum analiz sonuçları.	49
4.2: Batarya boyutu analiz sonuçları.	50
7.1 Amaç fonksiyonu durum dağılımı.	58

1. GİRİŞ

İklim değişikliği ve küresel ısınma tüm insanlığı etkileyen ortak problemlerdendir. Çevresel sorunların aşılmasında ekonomik ve politik olarak küresel önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu bağlamda Paris Anlaşması 196 katılımcı ile iklim değişikliği ve küresel ısınmanın önüne geçilmesine yönelik en büyük küresel eylem olmuştur. Son yıllarda artan enerji ihtiyacının karşılanması ve çevresel faktörlerinde etkisiyle temiz enerji anlayışıyla enerji üretimi bütün dünyanın gündemindedir. Bu doğrultuda Paris Anlaşması sürdürülebilir enerji sistemleri konusunda ekonomik ve politik olarak küresel hedeflerin alınması gerektiği vurgulamaktadır [1], [2]. İklim değişikliği ve küresel ısınmanın en büyük sebeplerinden biri fosil yakıt kullanımındır, bunu bildiğimiz halde fosil yakıtlar bizim için vazgeçilemez üretim kaynakları haline gelmiştir. Elektrik enerjisi ihtiyacımızın büyük bir bölümünü kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil kaynaklardan karşılamaktayız. Fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar, sınırlı rezervlerinin dengesiz dağılımları, yenilenebilir enerji kaynaklarını enerji ihtiyacımızın karşılanması için daha da çekici hale getirmektedir. Bu doğrultuda Paris anlaşması ile çevresel sorunlarla mücadele kapsamında ve enerji ihtiyacımızın temiz enerji anlayışıyla karşılayabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyon oranının artırılmasına yönelik çeşitli projeler sunmaktadır ve rüzgâr türbinleri, fotovoltaik paneller gibi yenilenebilir enerji üretimi hükümetler tarafından teşvik edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [16].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliğe ve küresel ısınmayla mücadelede sağlamış olduğu bütün bu katkılara rağmen güç sistemlerine entegre edilmesinde büyük zorluklarla karşılaşmaktadır. Güç çıktılarının meteorolojik olaylara bağlı ve kesintili oluşu YEK'lerin şebekeye entegrasyonundaki en büyük zorluktur. YEK'lerin kesintili güç çıkışları ve meteorolojik olaylardan etkileniyor olması şebekede güvenilirlik problemlerine yol açmaktadır. İkinci büyük problem ise mevcut güç sistemlerinin yüksek seviyede YEK entegrasyonuna uygun olmaması ve yüksek seviyede YEK entegrasyonunun yüksek yatırım maliyetlerine sebep oluyor olmasıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde YEK'lerin şebekeye entegrasyonu ile ilgili karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelmek için şebekeye esneklik katkısında bulunacak enerji depolama sistemleri ile talep tarafı yönetimi stratejilerinin çözüm

olabileceği görülmektedir. EDS'ler için hem boyutlandırma hem de konumlandırma ile ilgili optimizasyon çalışmaları hız kazanmıştır. Bu temelde YEK'lerin ve EDS teknolojilerinin optimal kullanımıyla ilgili çalışmalar literatürde, matematiksel modelleme ve enerji piyasaları açısından geniş yer aldığı görülmektedir [4], [5].

Bu tez çalışmasında enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine katkıları incelenmiş, depolama sistemlerinin türleri incelenerek işletim ve kurulum maliyetleri karşılaştırılmıştır ve dağıtım şebekelerinde aktif, reaktif güç kayıplarını ve gerilim sapmalarını dikkate alınarak güç akışı ve gerilim kısıtlarıyla birlikte güneş santralleri ile beraber kullanılan batarya sistemleri için optimal konum ve büyüklükleri belirlenmiştir. Batarya sistemlerinin şarj-deşarj durumlarını içeren şebeke işletim modeli oluşturulmuştur. Batarya sisteminin şarj-deşarj işlemleri, yükler dikkate alınarak, PV sistemden ve şebekelerden gelen enerjinin kullanılabilirliğine göre oluşturulmuştur. Oluşturulan sistem ekonomik açıdan değerlendirilmiştir.

1.2. Tezin Amacı, Sınırları ve Bölümleri

Bu tez çalışmasında EDS'lerin dağıtım şebekelerinde sağlamış oldukları esneklik gibi katkılarıyla YEK kapasitesinin artırılması ve TTY'de kullanımı araştırılmış, EDS'lerin ve PV Sistemler tekno-ekonomik olarak incelenmiş ve karşılaştırılmış ek olarak YEK ve EDS'lerin optimal yerleşimi ve kurulu kapasitesinin belirlenmesi için çok amaçlı optimizasyon algoritması geliştirilerek GAMS programında sistem modellenmiş ve 24 saatlik çalışma modeli oluşturulmuştur.

Çalışmada şebekenin aktif, reaktif güç kayıplarını ve gerilim sapmasını en aza indirecek batarya sisteminin en uygun büyüklüğünü ve en uygun konumunu belirlenmesini amaç edinilmiştir. Bu işlemler yapılırken amaç edilen aktif-reaktif güç kayıpları ve gerilim sapma parametreler tek tek minimize edildikten sonra bu üç parametre içim çok amaçlı bir optimizasyon fonksiyonu oluşturularak çok amaçlı amaç fonksiyonu için en uygun batarya büyüklüğü ve en uygun batarya konumu tespit edilmiştir. Daha sonra planlanması yapılan şebeke için lineerleştirilmiş AC güç akışı denklemleri kullanılarak işletim modeli oluşturulmuştur ve planlanan PV sistem ve

batarya sistemin boyutları ve işletim modeli göz önüne alınarak oluşturulan sistemin maliyet analizleri yapılmıştır.

Bu tez kapsamında zamana bağlı değişen yük ve üretim için 33 baralı radyal test dağıtım şebekesinde analizler yapılmıştır. Batarya büyüklüğünün ve konumuna ilişkin sonuçlar ve batarya sistemlerinin şebekeye olan etkileri değerlendirilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde güç sistemlerinden ve dağıtım şebekelerinden bahsedilmiş, ayrıca güç sistemleri için enerji depolama sistemlerinin önemi ve uygulamaları anlatılmış, enerji depolama sistemleri teknolojilerinden bahsedilmiş ve ekonomik ve teknik özellikleri karşılaştırılmıştır, daha sonra Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli değerlendirilmiş ve seçilen bir ilde kurulması planlanan güneş santrali için fizibilite çalışması yapılarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde geliştirilen metodoloji ve geliştirilen metodolojinin uygulanması anlatılmış beşinci bölümde ise oluşturulan optimizasyon fonksiyonları için yapılan analizler sonuçları verilmiş, analizlerde kullanılan sistem ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Dağıtım sistemlerine optimal şekilde yerleştirilecek batarya sistemlerinin şebekeye etkileri tartışılmıştır. Tezin içeriğinde ele alınan konular aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Yenilenebilir temelli dağıtım şebekelerin de teknik sorunlar açısından EDS'lerin ve TTY stratejilerinin kullanılması gerekliliği
- EDS teknolojileri ve tekno-ekonomik özellikleri
- Türkiye'de güneş enerji potansiyeli
- Dağıtım şebekelerinde bara gerilimleri iyileştirilmesinde, aktif ve reaktif güç kayıplarının azaltılması için YEK ve EDS'lerin şebeke üzerindeki en uygun konum ve boyut optimizasyonu
- Planlanması yapılan sistemin işletim modelinin oluşturulması ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtım şebekelerine entegrasyonu, sürdürülebilir temiz enerji üretimine katkısıyla küresel ısınmayla mücadelede kritik bir role sahiptir. YEK'ler artan enerji talebini karşılarken çevresel sorunlara katkılarıyla öne çıkıyor olmalarına karşın güç sistemlerine entegre edilmesiyle birtakım sorunlara da yol açmaktadırlar. Son zamanlarda enerji depolama sistemleri YEK'lerin yol açtığı bu sorunlarla baş etmedeki başarısıyla dikkat çekmektedirler. EDS'ler YEK'lerin şebekelere entegrasyonunu destekleyerek, güç sistemlerine daha fazla YEK dahil edilmesine katkıda bulunurlar ve çevresel sorunlarla mücadelede etkin bir rol üstlenebilirler. Talep edilen enerjiyi karşılamak için kullanılan YEK'lerle birlikte uygun yere ve uygun boyutta yerleştirilen EDS'ler aynı zamanda sistemin gerilim profilini iyileştiren, ömrünü uzatan, güvenilirliğini ve enerji verimliliğini arttıran ve minimum güç kaybı gibi ekonomik yarar sağlayan bir yöntemdir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, [6]'da, yüksek seviyeli YEK entegrasyonu için belirsizlik ve teknik zorluklar rapor edilirken, talep tarafı yönetimi (TTY) stratejilerinin ve EDS'lerin avantajları ve mevcut zorlukların üstesinden gelmek için şebekeye sağlamış olduğu esneklik katkılarından bahsedilmiştir. [7]'de PV sistemlerinin şebekelere entegrasyonunun artırılabilmesi ve TTY'ye olan katkıları sayesinde şebekenin daha verimli bir şekilde işletilebilmesi için batarya sistemlerinin rolünden bahsetmiştir. [8]'de en yüksek elektrik taleplerini azaltmak için termal enerji depolama ve şebekeden bağımsız PV sistemle birlikte TTY stratejilerini ele almaktır, çalışma sonuçlarında PV sistemi ve EDS'lerin birlikte kullanımı, birbirinden bağımsız olarak kullanımına kıyasla daha tasarruflu olduğu görülmektedir. EDS'ler, şebekeye esneklik sağlamada ve enerji sisteminde YEK entegrasyonunu desteklemede önemli bir bileşendir, merkezi ve dağıtılmış elektrik üretimini dengelerken aynı zamanda enerji güvenliğine de katkıda bulunurlar ve TTY uygulamalarında, sağladıkları esneklik katkılarıyla şebekenin gelişmesinde tamamlayıcı role sahiptirler [9]. Ayrıca YEK entegrasyonuna katkılarıyla karbon emisyonu ile mücadeleye de katkı sunarlar [9], [10].

Enerji depolama sistemleri, şebekelere sağlamış oldukları esneklik sayesinde YEK'lerin oluşturabilecekleri olumsuzlukları ortadan kaldırarak, güç sistemlerine yüksek seviyede YEK entegrasyonuna olanak sağlar, ayrıca sağlamış oldukları

esneklik, yatırım öteleme gibi avantajlarıyla şebekenin daha verimli işletilmesine katkıda bulunurlar [11]. EDS'ler YEK'lerin kesintili güç üretimlerinden kaynaklanan olumsuzlukları kaldırmalarına ek olarak arbitraj, tepe tıraşı, güç kalitesi iyileştirilmesi ve talep tarafı yönetimi uygulamaları gibi bir çok uygulamada da kullanılırlar [11], [12].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında fotovoltaik (PV) teknolojisi, PV modüllerinin verimliliğindeki artış, birçok ülkede yüksek güneş ışınım seviyelerinin mevcudiyeti ve PV modüllerinin kullanım ve bakım kolaylığı gibi unsurlar sayesinde daha yaygın kullanıma ulaştırmaktadır [13], [14]. PV sistemlerinin kesintili güç üretimleri batarya sistemleri ile kararlı hale getirilebilir. Batarya depolama sistemleri sayesinde PV üretimi enerji talebinden fazla olduğunda, talep fazlası enerji depolanabilir, ve talep arttığında depolanan enerji kullanılabilir bu sayede şebekeye daha yüksek seviyede PV sistemler dahil edilebilir [15]. [16] ve [1]’de ise depolama sistemleri karşılaştırılmış, batarya sistemlerinin birkaç saatlik depolamadaki avantajları sayesinde PV sistemler ile kullanılabilceği görülmektedir ayrıca batarya sistemlerinin karşılaştırılmasında sodyum ve li-ion bataryalar sahip oldukları uzun çevrim ömrü, yüksek enerji yoğunluğu gibi özelliklerle öne çıktığı ancak li-on pillerin işletim kolaylığı ve bakım maliyetlerinin az olması sayesinde daha yaygın kullanıldığı görülmektedir.

[17] ve [8]’de ,yüksek güçlü YEK kullanımı için belirsizlik ve teknik zorluklar rapor edilirken, TTY stratejilerinin ve EDS'lerin avantajları ve mevcut zorlukların üstesinden gelmek için şebekeye sağlamış olduğu esneklik katkılarından bahsedilmiştir. [18] ve [19]’da, son kullanıcı abonelerini TTY programlarının ve YEK'lerin entegrasyon hızının artırılmasına yönelik projelere katılmaya teşvik etmek amacıyla, TTY stratejisinin üç ana dalı yani, enerji verimliliği, düzenli güç kullanımı ve talep yanıt programları araştırılmıştır. Aynı çalışmalarda, optimizasyon hedeflerine, sosyal ve ekonomik refah endekslerine ve teknik kısıtlamalara göre TTY stratejilerinin, özellikle talep yanıt programlarının optimum şekilde uygulanması da eklenerek çeşitli optimizasyon modelleri geliştirilmiştir.

[20]'nin yazarları, farklı zamanlama periyotlarında yenilenebilir enerjiyi depolamak ve depolanan enerjiyi serbest bırakan gelecekteki yenilenebilir güç sistemleri için çeşitli EDS türlerinin önemini araştırmış. Bu çalışmada belirtildiği gibi, EDS'ler, YEK'lerin güç dalgalanmalarını yumuşatarak, arz ve talebi eşleştirerek ve şebekedeki güç akışını dengeleyerek YEK'lerin kullanımının dezavantajlarını

azaltmak için dağıtım şirketlerine benzersiz fırsatlar sunabileceği gösterilmektedir ve YEK entegrasyonunun artırılmasında, teknik, çevresel ve ekonomik kısıtlarla başa çıkabilmek için şebeke operatörleri tarafından öncelik verilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır.

Bu amaçla, [21]'de teknik özellikler, enerji politikaları, yenilikçi teknolojiler ve düzenleyici rejimler açısından çeşitli EDS'ler kategorize edilmiştir, böylece dağıtım şebekesi operatörleri farklı coğrafi konumlara bağlı olarak en uygun EDS tipini kullanabilmelerine olanak sağlamıştır. Bu doğrultuda başka bir çalışma olan [22]'de, EDS'lerin optimal konumlarını ve EDS'lerin güç derecesini belirlemek için yüksek güçlü YEK'lerin varlığında radyal dağıtım ağlarında EDS'lerin optimal tahsisi değerlendirilmiştir. Mevcut tüm çalışmalar, yüksek güçlü YEK'lerin verimli kullanımı için TTY stratejileriyle birlikte EDS'lerin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.

Başka bir çalışma grubu, yüksek güçlü YEK'lerin, EDS'lerin ve TTY stratejilerinin şebekeye entegre edilmesindeki teknolojik ve ekonomik engelleri araştırmıştır ve YEK'lerin elektrik şebekelerinde kullanımını en üst düzeye çıkarmak için sistem planlayıcıları ve politika yapıcılar tarafından hazırlanan çalışmalar, teşvik politikaları ve ekonomik yol haritaları analiz edilmiştir [23]. Örneğin, [24]'e, Çin'deki yönetim politikaları talep yanıt programları, YEK'leri yüksek oranda şebeke entegrasyonu değerlendirilmiş ve enerji piyasalarını mevcut politikalarla uyumlu hale getirmek için acil ve gerekli reformlar önerilmiştir. Ayrıca, YEK'lerle birlikte EDS'lerin kullanımına yönelik destekleyici politikalar son zamanlarda birçok sanayileşmiş ülkede kabul edilmiş ve teşvik edilmiştir. [25]'in yazarları, EDS'leri ve TTY stratejilerini geliştirmek için destekleyici politikalar kullanarak, elektrik şebekelerine yüksek oranda YEK' in entegrasyonunu engelleyen kısıtlamaları ortadan kaldırmanın mümkün olduğu noktasına ulaşmıştır. Çok sayıda çalışmada elde edilen teknik sonuçlar, son kullanıcıların TTY stratejilerine katılmaları ve EDS'leri kurmaları için tahsis edilen teşvik politikalarının yeşil altyapı uygulamasında ve düşük karbon emisyonları için önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

[26]' da tipik bir elektrik gücü profili üzerinde 24 saatlik süre boyunca arz-talep ilişkisi üzerinden EDS'ler ile dengeleme senaryosu modeli gösterilmiştir. Bu Dengeleme senaryosunda EDS'ler düşük güç talebi dönemlerinde enerji depolayacak ve yüksek güç talebi dönemlerinde deşarj olacaktır böylece güç profilinin tepe ve dip noktaları kapanacağından enerjinin daha verimli kullanılacağından ve üretim tesislerinin kapasite yatırımlarının ertelenebileceğinden bahsedilmiştir ve EDS'ler

enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu gibi özellikleri karşılaştırılarak uygulama türleri hakkında bahsedilmiştir.

YEK'lerin güç sistemlerine entegrasyonu ile birlikte kullanımı artan EDS'ler için dikkat edilmesi gereken diğer noktalardan biri ise buldukları konum ve büyüklükleridir. Bütün faydalarına karşın EDS'ler yüksek yatırım maliyetlerine sahip oldukları için en uygun büyüklükte kullanılmaları, ayrıca reaktif ve aktif güç kayıpları ve bara gerilimleri içinde konumlandıkları noktalar kritiktir [15], [1]. Bu doğrultuda literatürde değişik EDS teknolojileri için birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin [27]'de, artan YEK'ler ile birlikte EDS'ler ekonomik ve teknik açıdan ele alınmış ve sezgisel yöntem ile güç kayıplarının ve ekonomik maliyetlerin minimize edilmesi için optimal EDS boyut ve konumlandırma çalışması yapılmıştır. Bir diğer çalışmada ise yüksek seviyede fotovoltaik üretimine sahip dağıtım şebekesinde güç dengesi denklemlerine dayanan sezgisel yöntemlerle optimal batarya boyutlandırılması ve konumlandırılması yapılmıştır [28]. [29]'da benzer şekilde sistemin daha ekonomik işletilebilmesi için güç kayıplardan oluşan ekonomik kaybı, bakım ve işletim maliyetini parçacık sürüsü optimizasyonu ile minimize edecek şekilde EDS'ler için en uygun konum ve boyut çalışması yapılmıştır.

[30]'da bir EDS sahibinin gün öncesi piyasasında enerji arbitrajına katılabileceği ve karını artırmak için gerçek zamanlı piyasada ekstra teklifler ve teklifler sunabileceği optimizasyon yaklaşımı önermektedir. Stokastik programlama, gün öncesi piyasalarında fiyat belirsizliklerini modellemek için kullanılırken, gün içi piyasada yüksek değişken fiyatları göz önüne alındığında daha doğru karar verme için robust optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir [30].

Literatürde EDS boyutlandırma ve konumlandırma problemini ele alan birçok çalışma vardır. Örneğin [59]'da en çok kullanılan yenilenebilir enerji santrallerinden olan güneş ve rüzgar enerjisi santrallerini hibrit bir şekilde batarya grubuyla optimal planlanması için parçacık sürüsü optimizasyonunu ile bir tasarım modeli oluşturulmuştur. [60]'ta hibrit rüzgâr santrali, güneş enerji santrali ve batarya sistemi için sistemin şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı modlarda çalıştırılmasını göz önünde tutarak bir boyutlandırma optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında güç kaynağı güvenilirliği, yenilenebilir enerjinin tamamlayıcı özellikleri, güç kalitesi, bataryanın şarj-deşarj optimizasyonu ve sistemin toplam maliyeti dikkate alınmıştır. [61]'de YEK'lerin ürettiği talep fazlası enerjiyi depolayarak sonradan kullanılabilmesi için şebekeye dahil edilecek EDS'nin optimal

boyutlandırılması için çalışılmış, çalışmada EDS'nin maliyeti, çıktı gücünün maliyeti ve depolama maliyetini içeren bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Problemin çözülmesinde kullanılan ana yöntem doğrusal olmayan programlama kullanılmıştır. [62]'de TYT stratejileri ile birlikte şebekedeki bir EDS'nin optimal yerleşimi ve boyutlandırılması yapılmıştır. Yapılan çalışma da iki amaçlı bir optimizasyon modeli oluşturulmuş, birinci amaç toplam yatırım maliyetini ve işletme maliyeti minimizasyonu, ikinci amaç yük kaybı beklentisinin (LOLE- Loss of load expectation) minimizasyonudur. Oluşturulan fonksiyon doğrusal olmayan programlama tekniği ile General Algebraic Modeling System (GAMS) programında çözülmüştür. [63]'de YEK'lerin dağıtım şebekelerine yerleştirilmesiyle ortaya çıkan sorunlarla baş etmek için EDS'den bahsetmiş ve güneş santrali içeren bir dağıtım şebekesinde optimal güç akışı algoritmalarıyla şebekeye yerleştirilecek batarya sisteminin optimal konum ve boyut tayini yapılmıştır, batarya sisteminin işletilmesi için yeni stratejiler geliştirilmiştir. [64]'de hibrit güneş ve rüzgâr santralleri içeren şebekenin güç güvenilirliği için batarya sistemlerinin en uygun boyut optimizasyonu geliştirilmiştir. Geliştirilen metotta genetik algoritma kullanılmıştır.

Şebekenin ekonomik bir şekilde çalışmaya devam etmesi için yapılacak planlamayla birlikte oluşturulacak şebeke işletim modeli de çok önemlidir. [65]'te şebekeye bağlı PV-Batarya sistemi için kısa süreli işletim modeli oluşturulmuş, batarya sisteminin şarj-deşarj durumunu belirlemek için oluşturulan modelde Lagrange Gevşetmesi Tabanlı algoritma kullanılmıştır. Oluşturulan model tepe yükü tıraşı, iletim sıklığı ve fiyatlandırma sisteminde test edilmiştir. [66]'da şebekeye daha fazla PV sistem dahil edilebilmesi amacıyla EDS'lerle birlikte şebekeye bütünleşmiş PV sistemler için optimal güç yönetim mekanizması geliştirilmiştir. Optimizasyon dinamik programlama kullanılarak geliştirilmiştir. [67]'de PV-Batarya sisteminin optimal işletilmesi için oluşturulan çok amaçlı fonksiyon, doğrusal olmayan minimizasyon problemi halinde dinamik programlama ile çözümlenerek, depolama sisteminin şarj-deşarj ve işletim modeli oluşturulmuştur. [68]'de fosil yakıtların neden olduğu sera gazı salınımları ve çevresel kaygılar ile birlikte güç sistemlerine YEK entegrasyonunun artırılması gerekliliği ve güç sistemlerinde YEK entegrasyonunu arttırılmasında EDS'lerin gerekli esnekliği sağlayabileceği vurgulanmıştır. Çalışmada EDS türlerinden CAES'i ele alarak şebekenin dağıtılmış üretim kapasitesini arttırabilecek bir işletim modeli önerilmiştir, güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi varlığında işletme maliyetleri ve bakım maliyetleri de göz önüne alınarak GAMS

programında doğrusal olmayan programlama tekniği ile bir işletim modeli oluşturulmuştur.

Güç sistemlerinin ekonomik olarak işletilmesinin temelinde elektrik üretim, iletim ve dağıtım maliyetlerinin en aza indirilmesi amaçlanır. Genel olarak üretim maliyeti fonksiyonu; yakıt maliyetleri, boş çalışma maliyetleri ve kurulum maliyetlerinin bir araya getirilmesiyle elde edilir. Ekonomik yük dağıtım analizinde genellikle hesaplaması karmaşık olduğu için hat kayıplarının ihmal edildiği görölmektedir ancak hat kayıpları ekonomik üretim üzerinde oldukça etkilidir. Birim yakıt maliyeti en düşük olan santral yüke en uzak noktaya, maliyeti en yüksek olan santral ise en yakın noktaya yerleştirilebilse ekonomik bir üretim (hat kayıp maliyeti göz önüne alındığında) sağlanabilmektedir. Fakat pratik koşullar altında böyle bir seçenek imkânsız görölmektedir. Bunun nedeni enerji kaynaklarının bulunduğu üretim merkezleri ile tüketim merkezlerinin farklı yerlerde bulunmalarıdır [69].

Aşağıdaki tabloda literatür incelemesinde araştırılan çalışmalarda ve bu tez çalışmasında kullanılan metotlar ve elde edilen çıktıları karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1: Literatürdeki çalışmalar.

Kaynak	Boyutlandırma	Konumlandırma	İşletim Modeli	YEK Tipi	Kullanılan Metot
[28]	✓	✓	•	Güneş	Sezgisel
[29]	✓	✓	•	Güneş- Rüzgâr	PSO
[59]	✓	✓	•	Güneş- Rüzgâr	PSO
[27]	✓	✓	•	Güneş- Rüzgâr	Sezgisel
[53]	✓	•	•	Güneş- Rüzgâr	NLP
[54]	✓	•	•	Güneş- Rüzgâr	NLP
[55]	✓	✓	•	Rüzgâr	NLP
[56]	✓	✓	✓	Güneş	OPF
[57]	✓	•	•	Güneş- Rüzgâr	GA
[58]	•	•	✓	Güneş	Lagrange Gevşetmesi
[59]	•	•	✓	Güneş	DP
[60]	•	•	✓	Güneş	NLP
[61]	•	•	✓	Güneş- Rüzgâr	NLP
Bu Tez Çalışması	✓	✓	✓	Güneş	NLP

Tablo da görüldüğü üzere literatürde hem konum, boyut optimizasyonu hem de optimal şebeke işletim modeli için çözüm sunan çalışmaların sayısı azdır. Bu çalışma aktif-reaktif güç kayıplarıyla birlikte gerilim sapsmasını minimize ederek ve optimal işletim modeli oluşturmayı hedeflemektedir.

Dağıtım şebekelerine optimal şekilde yerleştirilecek olan enerji depolama sistemleri güç kayıplarını ve gerilim profilini olumsuz etkilemeyeceği gibi yapılan optimizasyon sonucunda en uygun EDS büyüklüğü ve en uygun EDS konumu güç kayıplarının azalmasına ve gerilim profilinin iyileştirilmesine büyük katkıda bulunabilirler. Sisteme yerleştirilmek üzere seçilecek enerji depolama sisteminin en uygun konumunun ve büyüklüğünün belirlenmiş tezin amaçlarından biri olarak

belirlenmiştir. Tezin diğer amacı ise optimal olarak belirlenen EDS boyutu ve konumu için şebekenin optimal şeklide işletim modelini oluşturmaktır. Diğer bir deyişle tezin ana amacı yenilenebilir enerji barındıran dağıtım şebekelerinde EDS'lerin optimal planlanması ve EDS'lerin şarj-deşarj zamanlamalarını elde ettiğimiz optimal işletim modelini oluşturmaktır.

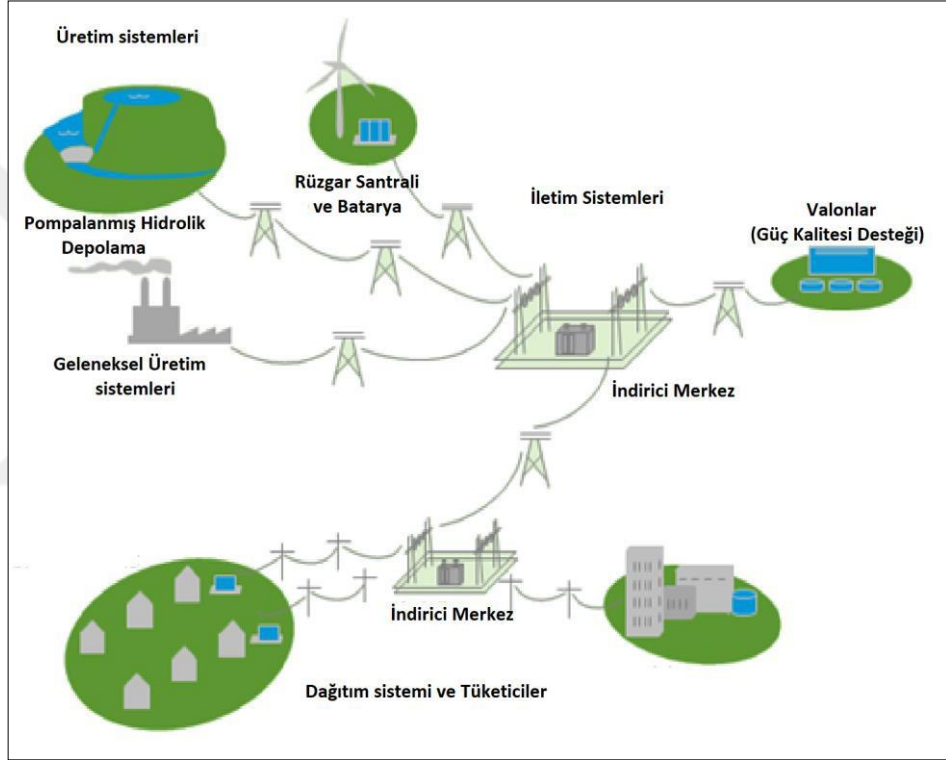
Bu tez çalışmasında 33 baralı test dağıtım şebekesinde aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve gerilim regülasyonunu ayrı ayrı minimize edecek şekilde ve farklı katsayılarla bu üç parametreyi minimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı optimizasyon fonksiyonu oluşturularak GAMS programında lineer olmayan programlama tekniği ile şebekeye dahil edilecek en uygun batarya büyüklüğü ve konumlandırılması yapılmıştır. Ayrıca planlanması yapılan batarya sisteminin PV santral ile optimal işletim planlanması yapılacaktır. Yapılan işletim modeli 24 saatlik zaman dilimi için uygulanacak, yük profili için EPIAŞ'ın sitesinden alınan gerçek veriler ile çalışılacaktır [72].

İncelenen çalışmalarda görüldüğü gibi, bara gerilimleri iyileştirilmesinde, aktif ve reaktif güç kayıplarının azaltılmasında, arbitraj uygulamalarında, enerji verimliliğinin ve YEK entegrasyonunun artırılması için enerji depolama sistemleri büyük bir potansiyele sahiptir. Bu tez çalışmasında da batarya depolama sistemi ile birlikte kullanılan PV sistemin şebekenin aktif-reaktif güç kayıpları ve gerilim değişim indeksi minimizasyonu için ele alınmış ve şebeke işletim modeli oluşturulmuştur.

2.1. Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama Sistemleri

Elektrik şebekeleri, teknolojik gelişmeler, artan dağıtık üretim ve YEK entegrasyonlarına karşın artan tüketime ve tüketici beklentilerine yanıt vermekte güçlük çekmektedir. EDS'ler geleneksel şebeke sorunlarına iyi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktalar. Fosil kaynaklardan elektrik üretiminin payının yüksek olmasına bağlı olarak CO₂ emisyonunda katkısının büyük oluşu ve artan talebe karşın yetersiz kaldıkları için son yıllarda temiz ve sürdürülebilir enerji gelişimi hızlanmaktadır. YEK'ler şebekeye giderek daha fazla entegre olurken, şebekenin işletilmesi ve planlaması için yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır [31]. YEK'lerin meteorolojik olaylara bağlı olarak aralıklı ve değişken güç çıkışları güç kalitesi, güvenilirlik, üretim dağılımı ve koruma gibi bir dizi sorunlarında beraberinde

getirmektedirler [33], [34]. EDS'ler yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim belirsizliklerini ve YEK'lerden kaynaklanan diğer sorunlarla başa çıkmak için güçlü bir seçenektir [35]. EDS'lerin bu katkıları sayesinde şebekeye yüksek oranda YEK entegrasyonu ve TTY stratejileri planlanarak artan talebi karşılamak için, ek yatırımlardan kaçınılarak mevcut enerjiyi ve şebekeyi verimli bir şekilde kullanabilmek mümkündür [36]. Şekil 1.2'de depolama sistemlerinin dahil olduğu bir güç şebekesini temsil eder. Şekilde görüldüğü gibi EDS'ler üretim sistemlerinden tüketiciye kadar elektrik güç sisteminin her noktasında kullanılabilirler.



Şekil 2.1: Enerji depolama sistemi dahil edilmiş güç sistemi görseli.

Enerji depolama sistemlerinin iletim sistemlerinden son kullanıcılara kadar geniş bir kullanım alanı vardır. Farklı kullanım alan ve uygulamaları için farklı avantaj-dezavantajlara sahip enerji depolama sistemleri ön plana çıkmaktadır, Sonraki bölümlerde bu enerji depolama sistemleri sınıflandırılarak enerji depolama sistemlerinin farklı uygulamalarda sahip oldukları avantaj-dezavantajlarından ve sosyoekonomik açıdan değerlendirilmesi yapılacaktır.

2.1.1 EDS'lerin Dağıtım Şebekelerindeki Yeri ve Önemi

Dağıtım şebekelerinde artan YEK'lerle birlikte sistemi sabit tutmak ve arz-talep ilişkisini ayarlayabilmek için daha fazla esnekliğe ihtiyaç duyulur. Yüksek oranda yenilenebilir enerji üretimine sahip şebekelerde EDS'ler güç çıkışlarını düzenlemede, tepe yükleri sağlamada, üretim tarafında tepe tıraşı uygulamalarında ve yedek güç kaynağı olarak kullanılmasıyla TTY stratejileri için hayati rol oynamaktadır[37]. Ayrıca aktif güç rezervleri, yük takip kapasitesi, frekans kontrolü, gerilim profili, reaktif güç, şebeke kayıpları, koruma unsurları, sistem güvenliği gibi farklı uygulamalarda da kullanılabilirler [38], [34].

EDS'lerin dağıtım şebekelerine olan katkıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- **Esnek Kapasite:** YEK'lerin pik üretimleri depolayarak sonrasında tepe talepleri karşılayarak ve seyrek görülen ani güç ihtiyaçlarını karşılamak için enerji depolama sistemleri kullanıma hazır enerji kaynağı olarak güç sistemleri için önemli bir esnek kapasite seçeneğidir.
- **Enerji Arbitrajı:** Enerji depolama sistemleri; elektriğin fiyatının düşük olduğu zaman aralığında elektrik enerjisini depolanarak, depolanan enerjinin elektrik satış fiyatının pahalı olduğu zaman aralığına kaydırılması için kullanılabilirler. Bu uygulama arbitraj olarak adlandırılır.
- **Güç Sistemi Dengeleme ve Yardımcı Hizmetler:** Elektrik güç sistemlerinde oluşan ani yüklenmeler veya devreden çıkan yükler üretim-tüketim dengesizliği gibi sorunlara neden olabilirler, bu durumlarda enerji depolama sistemleri sistemin daha kararlı çalışmasına olanak sağlayabilirler. Devreye ani girip çıkan yükler için valonlar gibi hızlı tepki veren enerji depolama çeşitleri kullanılmaktadır. Reaktif güç desteği, gerilim kontrolü, şebeke kararlılığı, başlangıç gücü sağlama gibi uygulamalar bu hizmetlerdendir.
- **Arıza Yedeği:** Güç üretim sistemlerinde oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda karşılaşılabilecek üretim kaybı enerji depolama sistemleri ile telafi edilerek sistemin kararlılığının sürdürülmesi sağlanabilir.
- **Güç Kalitesi:** Enerji depolama sistemleri YEK entegrasyonunun artmasına bağlı güç kalitesi problemlerine ve diğer güç kalitesi problemlerine seçilecek enerji

depolama teknolojisine bağı olarak sadece saniyeler ya da daha kısa süre içerisinde devreye girerek gerilimin daha kararlı olmasını ve güç kalitesini iyileştirerek sistemin daha verimli işletilmesine olanak sağlayabilirler.

- Enerji İletim Yönetimi: Su kuvveti ile enerji üreten hidroelektrik santraller gibi elektrik üretim sistemlerinin kaynaklarına yakın ve genellikle kaynaklarına bağı olarak nüfus yoğunluğunun olmadığı bölgelerde kurulmuştur. Bu kaynakların tüketim bölgelerine taşınması mümkün olmadığı için bu santrallerden üretilen enerjinin dağıtılabilmesi için tüketim alanlarına iletilmesi gerekmektedir. Talebin yüksek olduğu dönemlerde iletim hatlarında yoğunluk yaşanmaktadır. Tüketicilere yakın bölgelerde üretilen enerjinin depolanması ve ihtiyacın yerel enerji depolarından karşılanması verimli olmanın yanında iletim hatlarının kapasite aşımının önüne geçer ayrıca bu özelliği yatırım ihtiyacını öteleyerek maddi tasarrufta sağlar.
- Şebeke Frekans Desteği: Elektrik üretimi ve tüketimi arasındaki oluşabilecek dengesizliğin giderilmesi için kısa süreli güç ve frekans desteği gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artması ile şebekeye bağı frekans rezervi olarak kullanılan geleneksel jeneratör sayısı azalmakta, frekans kontrolünü zorlaşmaktadır. Enerji depolama sistemleri ile sistem güvenilirliğini artırmak için daha hızlı bir frekans kontrol rezervi oluşturulabilir. Frekans kontrolü yan hizmet faydasının yanı sıra aynı zamanda üretim birimlerinin ana indirici merkezlerine entegre edilerek santralin frekans kontrolüne de katkıda bulunabilir bu sayede santralin yatırım, işletme ve bakım maliyetleri minimum düzeyde tutulabilir.

Enerji depolama teknolojileri ve özellikleri, gerekli kapasite, şarj ve deşarj süresi göz önünde bulundurularak uygulamaların amacına göre değışir. Güç sistemi operatörleri, avantaj ve dezavantajların yanı sıra her sistemin teknik özelliklerine göre farklı uygulamalar için uygun EDS'yi seçebilir [48] –[50]. Aşağıdaki tabloda enerji depolama sistemleri kullanım alanlarına ve amaçlarına göre sınıflandırılmıştır.

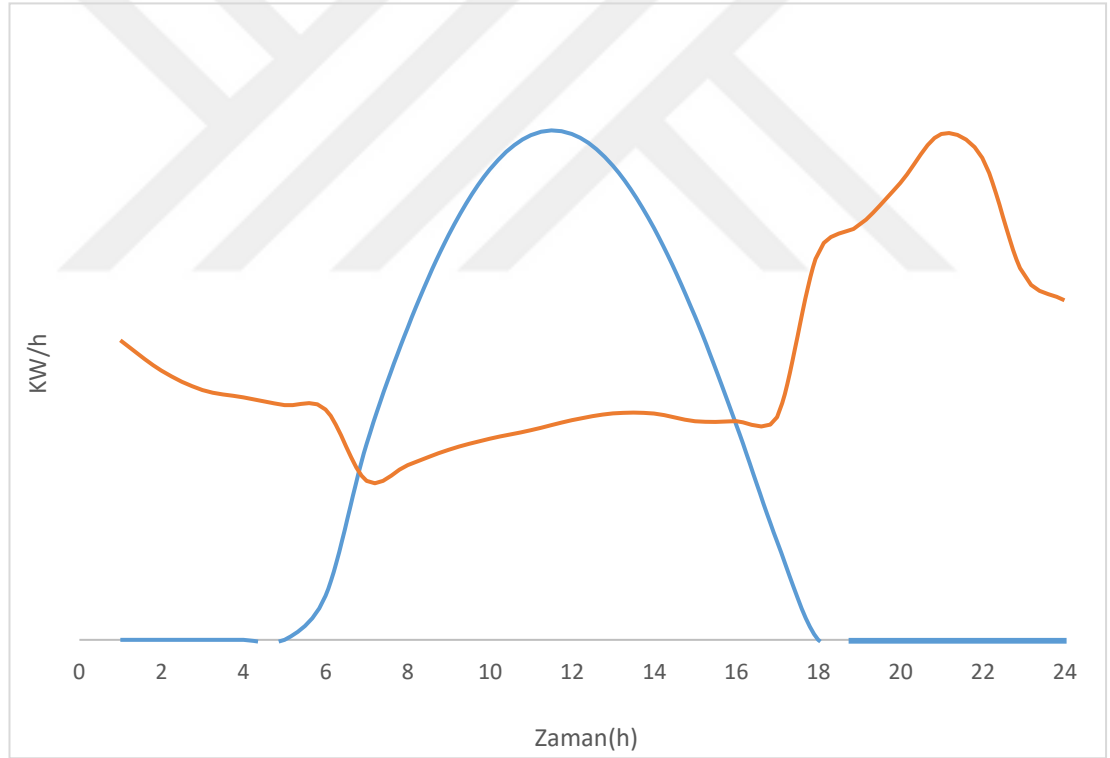
Tablo 2.2: EDS uygulama alanları.

HİZMETLER	UYGULAMA ALANLARI
Toplu enerji Servisi	<ul style="list-style-type: none"> • Arbitraj • Elektrik Destek Kapasitesi • Tepe Tıraşı
Yan Hizmetler	<ul style="list-style-type: none"> • Frekans Dengeleme • Voltaj Desteği • Ek Kapasite • Sistem Toparlanması (Black Start) • Yük Dengeleme
İletim ve Dağıtım Desteği	<ul style="list-style-type: none"> • İletim Servisi • Dağıtım Servisi • Tepe Nokta Desteği
Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu	<ul style="list-style-type: none"> • YEK Zaman Kaydırma Uygulamaları • YEK Kapasite artırımı • YEK Şebeke Entegrasyonu
Son Kullanıcı Enerji Yönetimi	<ul style="list-style-type: none"> • Güç Kalitesi • Talep Kaydırma • Tepe Kaydırma • PV Kullanım Arttırılması

2.1.2. Talep tarafı Yönetimi ve Enerji Depolama Sistemleri

TTY programları ve EDS'ler, enerji sistemlerini ekonomik olarak işletmek için tepe tıraş ve enerji kaydırma gibi uygulamalarla büyük avantajlar sağlanabilmektedir. Oluşabilecek ani yük artımları elektrik üretim maliyetini arttırabilmektedir. Genel olarak, kömür santralleri gibi geleneksel jeneratörler ile, oluşan bu tepe yükü karşılamamanın maliyetleri daha yüksektir ve bu tip santrallerin esneklikleri daha düşüktür. Kömür santralleri gibi geleneksel jeneratörler, yüksek sermaye maliyetlerine

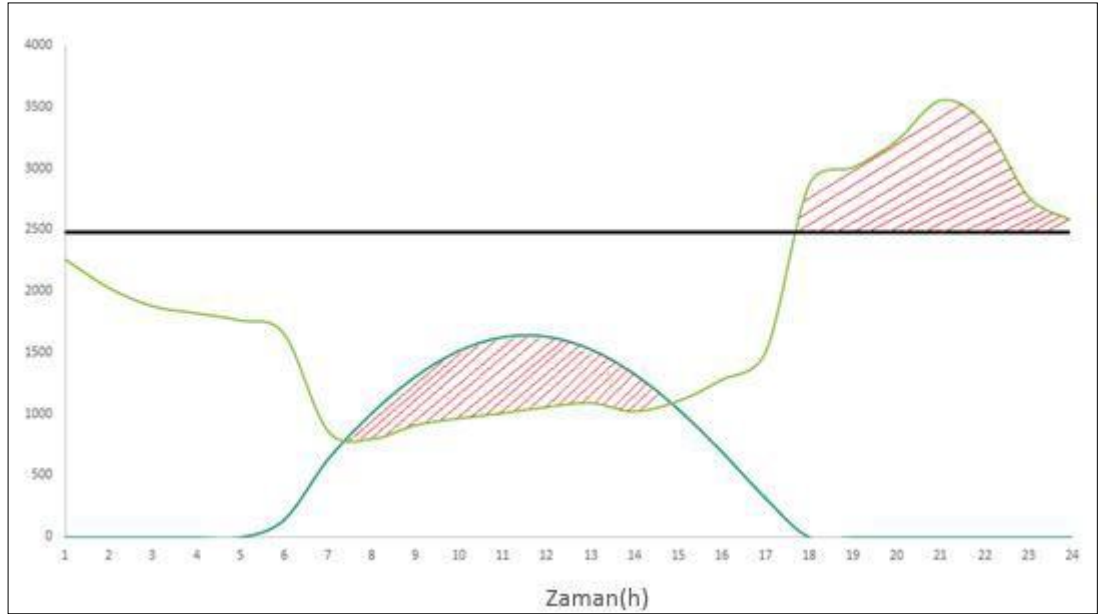
rağmen düşük gelire sahip oldukları için operatörler tarafından düşük kapasite kullanmaları istenmez ve dolayısıyla genellikle yüksek kapasite çalıştırıldıkları için oluşan tepe yüklerle cevap veremezler [39]. Ayrıca YEK'lerin elektrik üretimindeki payı hızla artmakta ve bu artışın gelecekte de hızla devam edeceği öngörülmektedir. Bu artışla karşılaşılan sorunlar ve EDS'lerin bu sorunların çözümüne katkılarından birinci bölümde bahsedilmiştir. YEK'lerin sisteme dahil edilmesiyle elde edilen esneklik sadece ekoloji açısından değil ekonomik açıdan da faydalıdır. Şekil 2.1'de örnek bir PV sistemi üretim eğrisi ve şebekenin yük eğrisinin 24 saatlik trendi görülmektedir. Öğlen saatlerindeki talep fazlası üretilen enerji, enerji depolama sistemleri ile depolanarak akşam saatlerinde talebin tepe yaptığı zaman aralıklarında kullanılmak üzere kaydırılabilir böylece şebekelerdeki yenilenebilir enerjisinden en üst düzeyde faydalanılabilir.



Şekil 2.2: PV üretim ve yük profili.

[16]'da YEK'lerin artan payının enerji fiyatı üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve 2008 ve 2014 yıllarında enerji fiyatlarındaki düşüş değerlendirilmiştir. EDS'lerin kurulum maliyetleri şu anda yüksek olsa da gelecekte elektrik fiyatlarını düşürme potansiyeline sahiptir oldukları vurgulanmaktadır. [40]'ta mikro şebekelerde frekans regülasyonu ve tepe tıraşını sağlayan ve birbirine bağlı mikro şebekelerde ekonomik

operasyon için bir optimizasyon modeli geliştiren EDS'nin ekonomik bir değerlendirmesi sunulmuştur. Aynı çalışmada dağıtım sistemlerinde EDS'ler kullanılarak farklı sistem güvenlik uygulamaları sağlanmıştır. Benzer şekilde, [41]'de, yedek üretim kapasitesinin ekonomik olarak planlanmasını sağlayabilen EDS'ler kullanılarak yüklerin tepe taleplerinin karşılanması veya üretim sistemlerinde tepe tıraşı sağlanarak dağıtım şebekelerinin ekonomik çalışması sağlandı. [42]'de rüzgâr santralleri ve EDS'ler incelenmiş ve gerçekleştirilen senaryolarda, düşük kurulum maliyeti, düşük bakım ve işletme maliyetleri ve toplu enerji depolamaya olanak sağlayan basınçlı hava enerji depolaması (CAES) ve pompalı hidroelektrik depolaması (PHS), kullanılmış. [43]'de klasik güç sistemleri, yenilenebilir enerji üretimindeki belirsizliği telafi etmek için geleneksel jeneratörlere dayandığı ve yenilenebilir enerji entegrasyon seviyeleri arttıkça, geleneksel jeneratörler daha düşük gelire sahipken daha yüksek işletme maliyetlerine sahip olduğu vurgulanmaktadır. Buna karşılık, toplu EDS'ler, üretimdeki belirsizliği ortadan kaldırarak ve daha sonra kullanmak üzere temiz enerjiyi depolayarak yenilenebilir enerjinin yaygınlaşmasında ekonomik bir seçenek olabilir. [36]'da farklı yenilenebilir entegrasyon seviyeleri için skolastik bir model sağlandı. Yazarlar, artan yenilenebilir entegrasyonları ile geleneksel jeneratörlerin ve EDS'lerin kısa vadeli karlılığını araştırarak, toplu EDS'lerin yenilenebilir enerji entegrasyonu ile ön plana çıktığını vurguladılar.



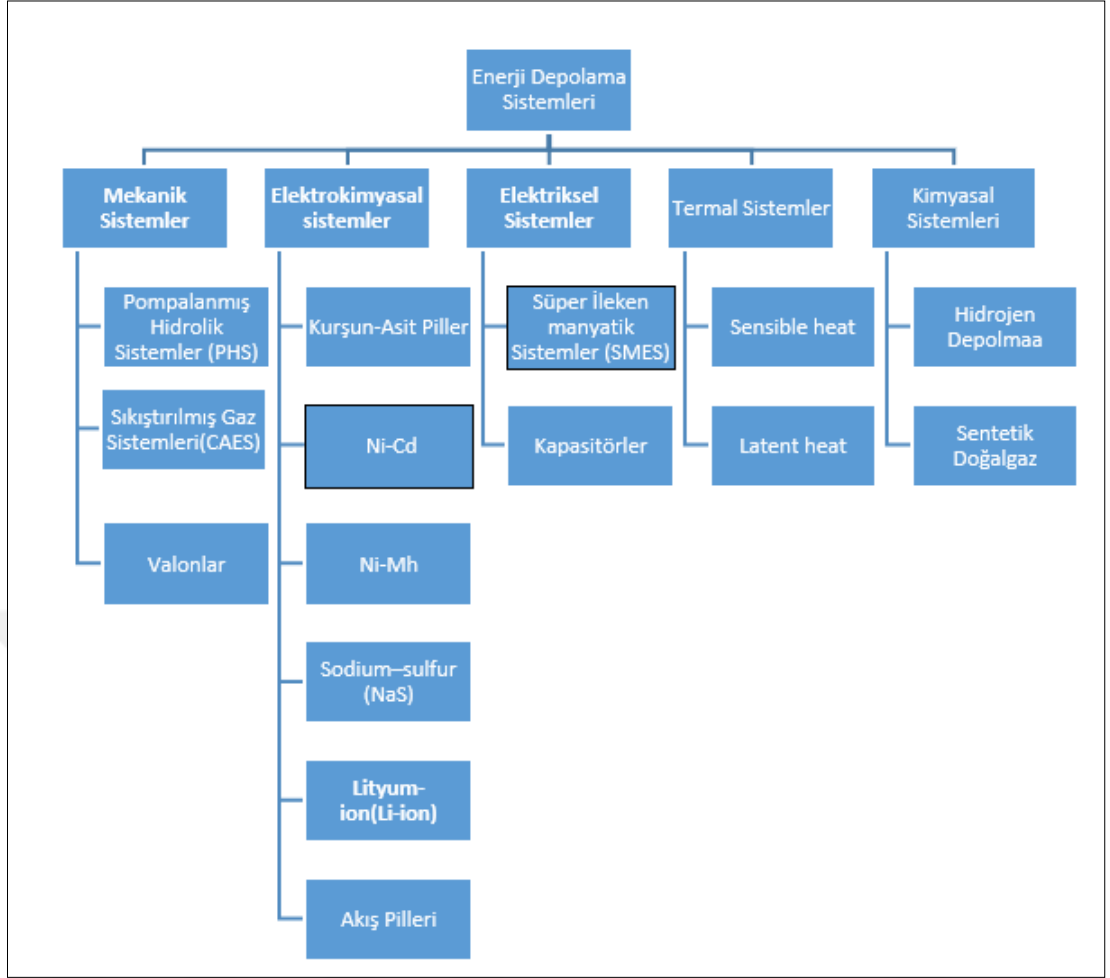
Şekil 2.3: Enerji Depolama uygulamasının güç sistemine etkisini gösteren günlük elektriksel güç-zaman grafiği.

Şekil 2.2’de tipik bir elektrik güç sistemine ile sisteme entegre edilmiş EDS’nin 24 saatlik zaman dilim için güç profili görülmektedir. Görselde senaryoda üzere sabah saatlerinde talep az olduğu zaman şarj edilerek akşam saatlerinde talebin tepe yaptığı zamanlarda deşarj olacaktır, böylece üretim sistemi için tepe yükleri devre dışı bırakacaktır. Bu uygulamalar sayesinde üretim birimlerinin tepe yükleri için güç kapasitesi barındırmasına gerek kalmayacaktır ve kapasite zorlamaları olmadan daha verimli işletilebileceklerdir [26].

2.2. Enerji Depolama Teknolojileri

Elektrik enerjisi, depolama için mekanik, elektrokimyasal, elektromanyetik, termodinamik veya kimyasal enerjiye dönüştürülebilir. Bu dönüşüm sırasında oluşabilecek kayıplar ekonomik olarak değerlendirilmelidir.

Enerji depolama teknolojileri genellikle depolama prensibine göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırma teknolojik gelişmelere göre değişebilmektedir. Bu yazıda, ana depolama sistemleri Şekil 3.1'deki gibi sınıflandırılmıştır. Bu bölümde mevcut enerji depolama teknolojilerine, yatırım maliyetlerine, çalışma prensiplerine, avantajlarına, dezavantajlarına ve farklı EDS türlerinin uygulamalarına genel bir bakış sunulmaktadır.



Şekil 2.4: Enerji depolama sistemleri sınıflandırılması.

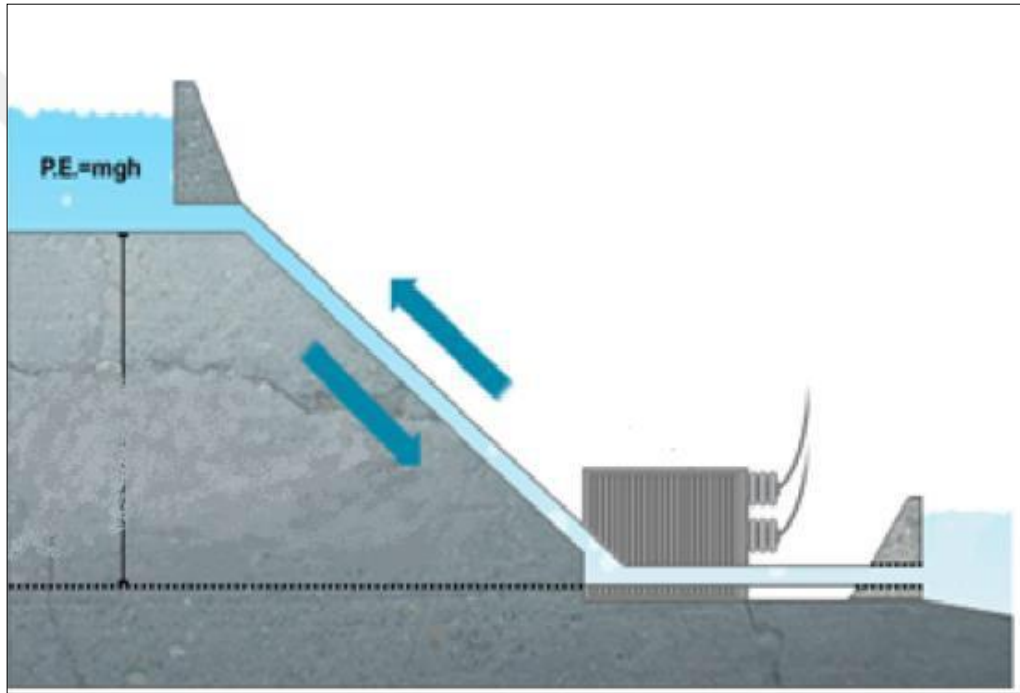
Enerji depolama sistemleri Elektrokimyasal batarya sistemleri, mekanik depolama sistemleri, kimyasal depolama sistemleri ve elektro-mekanik depolama sistemleri olarak sınıflandırılabilirler ve her depolama teknolojisi kullandıkları uygulamalar için avantaj-dezavantajlara sahiptirler. Örneğin mekanik enerji depolama türü olan pompalanmış su depoları arbitraj uygulamasında kullanılırken gene mekanik depolama türü olan valonlar güç kalitesi iyileştirme uygulamalarında kullanılabilirler [10].

2.2.1. Mekanik Enerji Depolama Sistemleri

Bu bölümde enerji depolama teknolojilerinin çalışma mekanizmalarından bahsedilerek ekonomik olarak ve kullanım alanlarına göre karşılaştırılması yapılacaktır.

2.2.1.1. Pompalanmış Su ile Depolama Sistemleri (PHS)

Pompalanmış su depolama ile sistemleri kısaca suyun depolanmak istenilen elektrik enerjisinin kullanarak alt seviyeden üst seviyeye pompalanması ve ardından ihtiyaç duyulduğunda yüksek seviyedeki suyun türbinden geçirilerek elektrik üretilmesi prensibi ile çalışır. Bu sistemler genellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemleridir [12],[44].

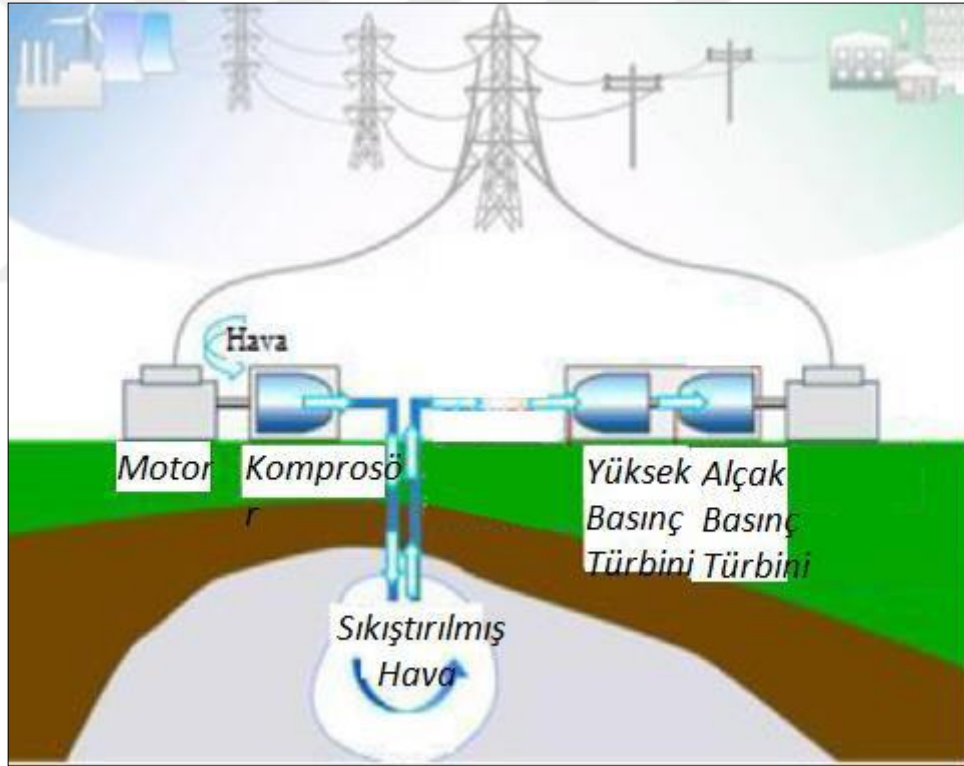


Şekil 2.5.: Pompalanmış depolama sistemleri mekanizması[73].

2017 yılı ortasına kadar kurulu olan 176 giga watt EDS'nin %96 sı ile Pompalanmış Su ile Depolama Sistemleri toplam kurulu depolama gücü kapasitesine sahiptir. Çin, Japonya ve ABD PHS sistemlerinin %48 ine sahiptirler. Yeni ve gelişmekte olana depolama sistemleri gelecek vadedyor olsalar da PHSler en fazla kurulu güce sahip EDS'lerdir [43],[10].

2.2.1.2. Basınçlı Hava ile Enerji Depolama (CAES)

CAES, basınçlı hava biçiminde enerji depolama kavramına dayanmaktadır. Elektrik, bir kompresör yardımıyla havayı sıkıştırmak için kullanılır ve sıkıştırılmış hava, mevcut veya özel olarak yapılmış kapalı bir alanda depolanır. Enerji talebi yüksek olduğunda, basınçlı hava rezervuardan serbest bırakılır ve bir türbinden geçirilerek elektrik üretilir. CAES, gazın depolandığı bölgelere göre yer altı ve yer üstü alanlara ayrılabilir. Yeraltı basınçlı hava depolama ünitesi ile ilgili olarak, tuz mağaraları, doğal Akifer ve tükenmiş doğal gaz rezervuarları sırasıyla en uygun maliyetlidir. Yerüstü CAES, yani tipik olarak bir basınçlı kap, yeraltı tipine kıyasla daha yüksek maliyetli ancak proje uygulamaları daha kolaydır [36], [44], [10], [45].



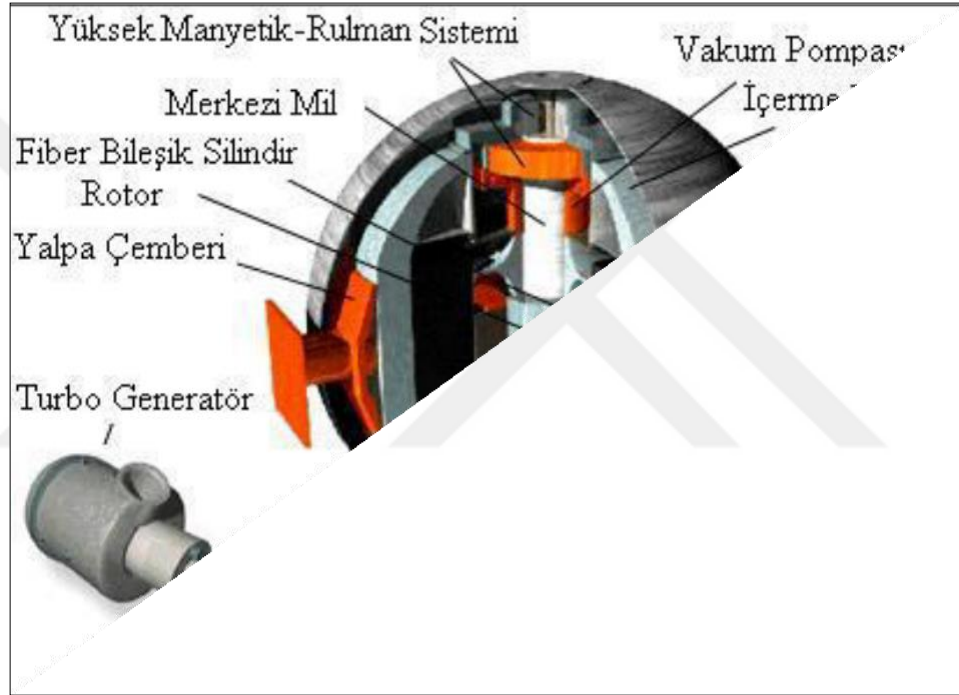
Şekil 2.6.: CAES sistemlerin çalışma mekanizması [73].

CAES sistemlerinin maliyet tahminleri, sahaya özel oldukları ve çevresel kısıtlamalardan etkilendikleri için çok zordur. Kurulum maliyetinin 50 USD/kWh civarında olduğu ve mevcut bir rezervuar varsa muhtemelen 40 USD/kWh'ye düşeceği tahmin edilmektedir. CAES sistemlerinin dezavantajları, düşük deşarj oranları ve

düşük verimlidir. Bu teknolojinin 2030 yılına kadar maliyette %17'lik bir azalmaya sahip olacağı tahmin edilmektedir [10],[36].

2.2.1.3. Volanlar (FES)

Volan teknolojisi, dönen bir nesne üzerinde enerjinin aktarılması ve bu aktarılan enerjinin dönen gövdenin momentumunun üzerinde tutulması olarak da tanımlanabilir [12],[44]. Sürtünme kayıpları azaldıkça ve verimlilik arttıkça çevrim ömrü artacaktır.



Şekil 2.7.: Volan sistemlerin çalışma mekanizması [74].

Volanlar yüksek güç potansiyeline sahiptir. 1500 USD ile 6000 USD/kWh arasında değişen yüksek enerji kurulum maliyetleri ve saatte %15'e varan çok yüksek kendi kendine deşarj olması nedeniyle kısa süreli depolama uygulamaları için daha uygundur. Bir volan sisteminin enerji kurulum maliyetinin 2030 yılına kadar %30 oranında azalması beklenmektedir [12],[10].

2.2.2. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

2.2.2.1. Lityum-İyon (Li-ion) Bataryalar

Li-ion piller, lityum metal oksit katottan ve grafit anottan şarj ve deşarj reaksiyonlarına dayanan bir pilden oluşur. Li-ion piller, tüketici elektroniğinden YEK'lerin şebeke desteğine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir [12]. Bu teknoloji, zorlu şarj/deşarj döngüleri nedeniyle sabit kullanımda elektrik makineleri kullanılanlardan daha maliyetlidir. Öte yandan, 2014-2017 yılları arasında küçük ölçekli Li-ion pil sistemlerinin maliyetlerinin %60 oranında azaldığı görülmektedir. Sabit uygulamalarda bu maliyetin 2030 yılına kadar %54-60 oranında azalacağı tahmin edilmektedir [23]

2.2.2.2. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asitli aküler geniş bir kullanım alanına sahiptir. Su basmış havalandırılmalı kurşun asit (VRLA) ile valf ayarlı kurşun asit (VRLA) tasarım tiplerine sahip bu piller, birkaç MW güç aralığına ve 10 MWh'ye kadar enerji aralığına sahiptir. Bu teknolojinin, düşük sermaye maliyetine rağmen yüksek verimliliğe ve düşük bakım maliyetlerine sahip olması nedeniyle gelecekte daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Ayrıca kurşun asitli pillerin geri dönüşümü ekonomiktir ve günümüzde çoğunlukla geri dönüştürülmektedir [12], [10].

2.2.2.3. Sodyum -Sülfür (NaS) Bataryalar

NaS piller, yüksek enerji yoğunluğuna sahip nispeten olgun, kanıtlanmış teknolojilerdir [44], [10]. Pilin erimiş halini korumak için yüksek sıcaklıklarda çalıştırılırlar. En büyük kurulum, rüzgâr stabilizasyonu için kurulmuş olan Japonya'nın Aomori kentinde bulunan 34 MW / 245 MWh'lik bir sistemdir [12]. NaS pillerinin gelecekte çok daha uygun fiyatlı hale geleceği tahmin ediliyor. NaS'nin kurulum maliyetleri 2030 yılına kadar %56-60 oranında azaltılabilir. Bu pillerin nispeten düşük

kurulum maliyetleri, yüksek enerji yoğunluğu gibi avantajlarına rağmen yüksek sıcaklıklarda çalıştırıldıkları için bakım ve işletme maliyetleri yüksektir [44], [10].

2.2.2.4. Akış Pilleri

Akış pilleri, katot ve anot olmak üzere iki elektrolit solüsyon ünitesinden oluşur. Elektrolitik membrandan geçerek enerji depolar. Halen geliştirme aşamasında olan bu piller, uzun kullanım ömrü ve kolay ölçeklenebilirlik gibi avantajlara sahiptir [12], [23]. Akış pil maliyetlerinin büyük ölçüde azalması bekleniyor. Bu pillerin toplam kurulum maliyetinin 2030 yılına kadar yaklaşık %65 oranında azalacağı tahmin edilmektedir [23].

2.2.3. Elektriksel Enerji Depolama Sistemleri

2.2.3.1. Ultrakapasitörler / Süperkapasitörler

Genel olarak kapasitörler, yalıtkan bir dielektrik malzeme ile ayrılmış iki iletken karbon bazlı elektrottan oluşur. Bir kapasitöre voltaj uygulandığında, her elektrotun yüzeyinde zıt yükler birikir. Yükler dielektrik tarafından ayrı tutulur, böylece kapasitörün enerji depolamasına izin veren bir elektrik alanı yaratır. Süper kapasitörler, enerjiyi depolamak için bir elektrokimyasal çift katmanlı yük kullanır. Süper kapasitörler, çok hızlı tepki veren düşük enerjili ve yüksek güçlü cihazlardır. Diğer pil türlerinden farklı olarak kimyasal reaksiyona girmedikleri için çok yüksek sayıda çevrime dayanabilirler. Bu tip EDS'lerin teknik ve ekonomik avantajlarına ek olarak, sistemdeki yük ile voltaj lineer olarak değiştiğinden, güç elektroniği cihazlarının sabit bir çıkışa sahip olmasını gerektirir [44], [1].

2.2.3.2. Süper iletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)

SMES cihazları, elektriği süper iletken bir bobinden geçen akımın ürettiği manyetik alanda depolar. Süper iletken bir malzemedен yapılmış olan bobin, içinden

akım geçtiğinde hiçbir direnci yoktur ve kayıpları neredeyse sıfırdır. Süper iletken durumu korumak için bir soğutma sistemi kullanılır ve güç elektroniği ekipmanına ihtiyaç duyar [1], [46]. SMES'ler yüksek tepki hızına ve çok yüksek çevrim ömrüne sahiptir. Ayrıca SMES sistemleri yüksek verimliliğe sahiptir ve tükenmişlik süreleri uzundur. Ancak soğutma gereksinimleri ve sistem karmaşıklığı gibi teknik faktörler nedeniyle geliştirme aşamasındadırlar ve maliyetleri yüksektir. Bu nedenle, SMES sistemleri yalnızca kısa süreli depolama için kullanılmaktadır [44],[46].

2.2.4. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri

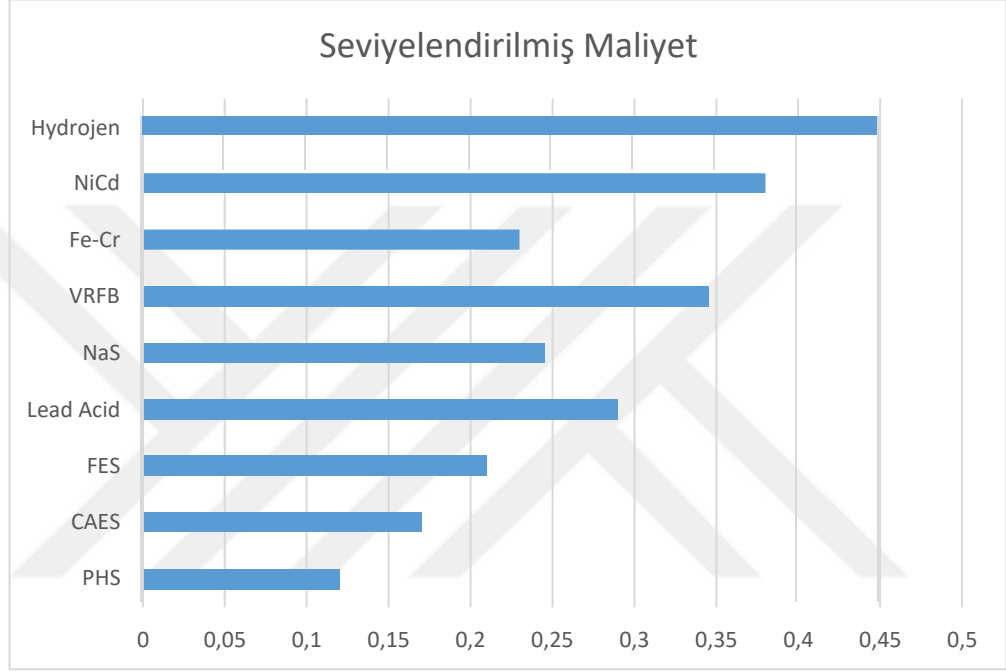
2.2.4.1. Hidrojen ile Enerji Depolama

Hidrojen EDS'leri, elektriği kimyasal olarak hidrojene dönüştürme ilkesine dayanır. Elektroliz ile su bileşenlerine ayrılarak depolanır. Yenilenebilir enerji üretiminde ucuz elektrik fazlalığı elektrolizörleri beslemek için kullanılabilir ve bu fazla enerji hidrojene dönüştürülerek depolanabilir [44], [47]. Hidrojen, her biri sistemin enerji kapasitesi ve yerleşimi için farklı etkileri olan üç ana yolla depolanabilir: (1) Jeolojik oluşumlar içindeki çok büyük yeraltı mağaralarında veya yüksek basınçlı tanklarda gaz olarak; (2) Kriyojenik tanklarda sıvı olarak; veya (3) Katı veya sıvı idridler olarak. Elektroliz, elektriği geri kazanmak için ters yönde çalıştırılır. Bu teknolojiler minimum çevresel etkiye sahiptir ve son derece güvenilir ve hassastır. Ancak dönüştürme işleminde bazı kayıplar vardır ve kurulum maliyetleri çok yüksektir [44], [36].

2.3. Enerji Depolama Sistemleri Karşılaştırılması

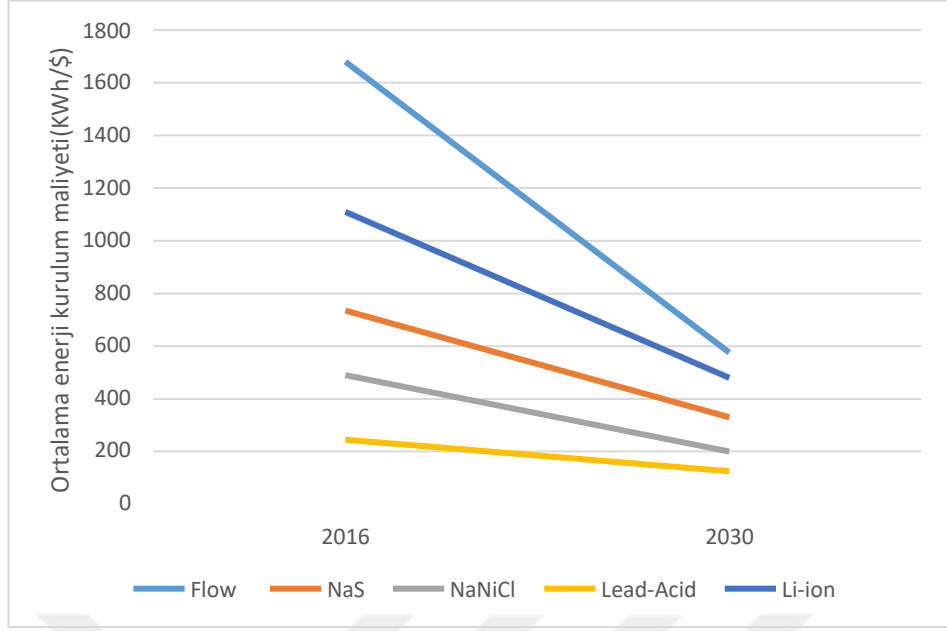
Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimindeki belirsizlik ve kesintileri daha iyi aşma ve hızlı tepki verme yeteneğine sahip olsa da toplu enerji depolamanın önündeki en büyük engel yüksek yatırım maliyetleridir. Şebeke ölçeğinde EDS'lerin doğru seçimi, sistem kapasitesi, gerekli performans, EDS'nin maliyeti ve güvenilirliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır ve Tablo 2.1'de uygulama türü bu özellikleri göstermektedir.

[48]'de PHS'lerin ve CAES'lerin seviyelendirilmiş maliyetlerinin en az olduğu gör÷lmektedir ancak bu teknolojiler gelişimini tamamlamış nispeten olgun teknolojiler oldukları için gelecekte maliyet düşüşlerinin kısıtlı olacağı düşün÷lmektedir. Buna karşı bataryalar gibi gelişmekte olan depolama teknolojilerinin yaşanan gelişmelerle birlikte maliyetlerinde azalma beklenmektedir. Mevcut seviyelendirilmiş maliyetler için karşılaştırma tablosu aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.8: Bazı depolama sistemlerinin LCOE karşılaştırılması.

Şekil 2.8'te gör÷ldüğü üzere şebeke ölçekli enerji depolama sistemleri için PHS'ler ve CAES'ler en makul çözümler olarak karşımıza çıkmaktalar ancak teknolojik gelişmelerle birlikte diğ er depolama türlerinin maliyet düşüm potansiyelleri çok daha fazladır. Bununla ilgili olarak 2030 yılı için yapılan seviyelendirilmiş maliyet tahminleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [50]-[53],[11].



Şekil 2.9: 2030 yılı LCOE tahminleri.

Enerji depolama sistemlerinin detaylı karşılaştırılması, aşağıda tablo 2.3'te yapılmıştır. Bu tabloda EDS'ler olgunluk seviyesi, kapasitesi, kullanım süresi, bakım ve kurulum maliyetleri, avantaj ve dezavantajları ve avantaj ve dezavantajlarına bağlı olarak tercih edilebilecekleri uygulama alanları karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.3: EDS teknolojilerinin teknik ve ekonomik incelemesi.

EDS Teknolojileri	Olgunluk Seviyesi	Kapasite (MW)	Kullanım süresi(Yıl)	Güç Sermayesi Maliyeti(\$/KW)	Enerji Sermayesi Maliyeti(\$/kWh)	O&M (\$/(kWhyear))	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulama Alanları
PHS	Gelişmiş	100-5000	40-60	2000-4300	5-100	0,75	Daha yüksek kapasite ve daha düşük maliyet/birim kapasite	Yatan hayatına ve doğal su seviyesine etkisi	Sezonluk depolama, Şebeke rahatlama, YEK entegrasyonu, Tepe tırışı, Tüketici hizmetleri
CAES	Olgunlaşmakta	5-1000	20-40	400-1000	2-120	2,5-10	Daha yüksek kapasite ve daha düşük maliyet/birim kapasite	Uygulama alan seçimi zorluğu	Sezonluk depolama, Enerji yönetimi, Tepe tırışı, YEK entegrasyonu
FES	Olgunlaşmakta	0.1-20	15+	250-350	1000-14000	5-1000	Hızlı Tepki Süresi	Daha düşük enerji yoğunluğu	Güç kalitesi uygulamaları, Tüketici hizmetleri, Şebeke rahatlama, YEK entegrasyonu, Kısa süreli frekans ve güç rezervi
Kursun asit	Olgunlaşmakta	0-40	3-15	300-600	200-400	10-15	Daha düşük sermaye maliyeti	Daha düşük enerji yoğunluğu	Sezonluk depolama, Şebeke rahatlama, YEK entegrasyonu, Güç kalitesi, Tepe tırışı, Tüketici hizmetleri
NAS	Olgunlaşmakta	0.05-34	10-15	350-3000	300-500	20-25	Daha yüksek enerji yoğunluğu ve enerji verimliliği, çok düşük kendi kendine deşarj oranı	Yüksek iletim maliyeti ve Na için geri dönüşüm sorunu	Sezonluk depolama, Şebeke rahatlama, YEK entegrasyonu, Güç kalitesi, Tepe tırışı, Tüketici hizmetleri, Kısa süreli frekans ve güç rezervi
Li-ION	Olgunlaşmakta	0-100	5-15	1200-4000	600-3800	25	Daha yüksek güç ve enerji yoğunluğu ve yüksek verimlilik	Lityum oksit ve tuzun yüksek geri dönüşürülmesini maliyeti	Şebeke rahatlama, YEK entegrasyonu, Güç kalitesi, Tüketici hizmetleri, Kısa süreli frekans ve güç rezervi
VRFB	Gelişme Aşamasında	0.03-3	5-10	600-1500	150-1000	20	Uzun çevrim ömrü, hızlı tepki süresi	Daha düşük enerji yoğunluğu, düşük şarj ve deşarj oranı	Sezonluk depolama, Güç kalitesi, Tepe tırışı, Tüketici hizmetleri
Süper kapasitörler	Gelişme Aşamasında	0-0.3	25-30	100-450	300-2000	5	Uzun çevrim ömrü, hızlı tepki süresi	Zehirli ve aşındırıcı madde içeriği, düşük enerji yoğunluğu	Güç kalitesi uygulamaları, Tüketici hizmetleri
SMES	Gelişme Aşamasında	0.1-10	20-30	250-350	1000-10000	10	Yüksek güç ve verimlilik, uzun ömür ve 2000+ MW kapasite potansiyeli	Büyük ölçekli kullanımlarda sağlığa etkisi	Şebeke rahatlama, YEK entegrasyonu, Güç kalitesi, Tüketici hizmetleri, Kısa süreli frekans ve güç rezervi

Tabloda 2.3’de görüldüğü üzere EDS teknolojileri farklı yeteneklere sahiptirler, bu nedenle EDS teknoloji seçimi yapılırken hangi uygulamada kullanacağını belirlemek kırıktır. Çalışmadaki analizlerde YEK entegrasyonuna olan katkısı nedeniyle lityum iyon batarya türü seçilmiştir.

Çalışmanın sonraki bölümünde Türkiye’nin güneş enerji potansiyeli incelenmiş ve sonraki bölümlerdeki analizlerde kullanacak güneş santrali modeli için PVsyst programında fizibilite çalışması yapılmıştır.

2.3. Türkiye’de Güneş Enerjisi ve Tekno Ekonomik Analizi

Son yıllarda artan enerji ihtiyacının karşılanması ve çevresel faktörlerinde etkisiyle temiz enerji anlayışıyla enerji üretimi, bütün dünyanın gündemindedir. Bu doğrultuda Paris Anlaşması sürdürülebilir enerji sistemleri konusunda ekonomik ve politik olarak küresel hedeflerin alınması gerektiğini vurgulamaktadır [2].

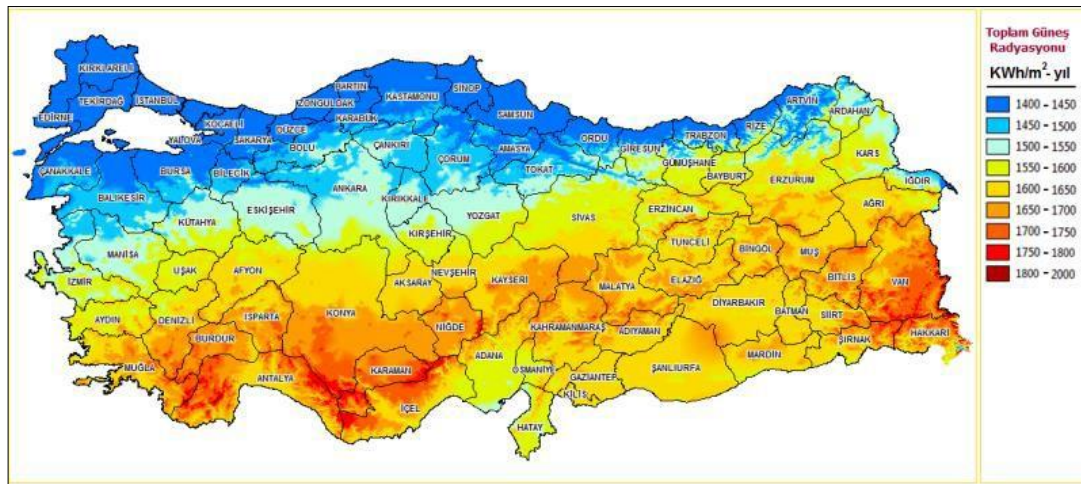
Yenilenebilir enerji kaynakları arasında fotovoltaik (PV) teknolojisi, PV modüllerinin verimliliğindeki artış, birçok ülkede yüksek güneş ışınım seviyelerinin mevcudiyeti ve PV modüllerinin kullanım ve bakım kolaylığı gibi unsurlar sayesinde daha yaygın kullanıma ulaşmaktadır. PV sistemlerinin kesintili güç üretimleri batarya sistemleriyle kararlı hale getirilebilir. Batarya depolama sistemleri sayesinde PV üretimi enerji talebinden daha fazla olduğunda, talep fazlası enerji depolanabilir ve talep arttığında depolanan enerji kullanılabilir, bu sayede şebekeye daha yüksek seviyede PV sistemleri dahil edilebilir [13], [14].

Tesis kurulumunda en önemli ölçütlerden biri de kurulacak tesisin teşvik kapsamında olup olmamasıdır. Bu bağlamda Türkiye’de de YEKDEM, Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu (TKDK) gibi teşvik programları bulunmaktadır. Şekil 4.1’de TKDK’nın güneş santrali yatırım teşviklerini de kapsayan Türkiye’deki teşvik sağlanan illerin teşvik haritası verilmiştir [54].



Şekil 2.10: Tarım ve kırsal kalkınmayı destekleme kurumu (TKDK) teşvik programında yer alan iller [75].

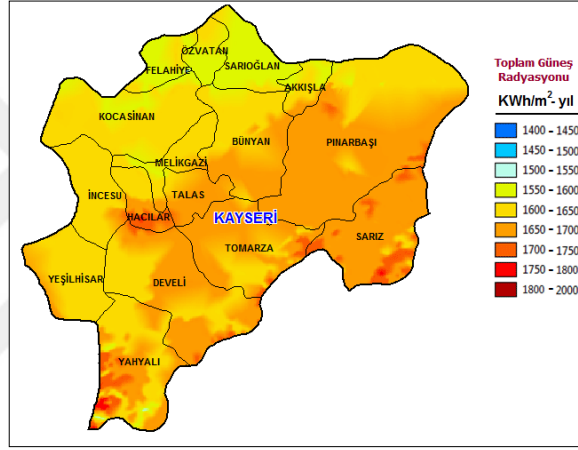
Bu çalışmada 1 MW lık bir güneş santrali kurulum fizibilite çalışması gerçekleştirmek için İç Anadolu bölgesinde bulunan Kayseri ili seçilmiştir. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) incelendiğinde Türkiye'nin güney illerinde toplam güneş radyasyonunun daha fazla olduğu ve böylece güneş enerjisi potansiyelinin yükseldiği, bunun birlikte iklim ve coğrafi konum özelliklerinden dolayı aynı enlemdeki yerler arasında da güneş enerjisi potansiyeli farklılıkları bulunduğu gözlenmektedir. Örneğin, Türkiye'nin en kuzeyinde yer alan illerde toplam güneş radyasyon dağılımı 1400-1450 kWh/m² -yıl arasında iken, Türkiye'nin en güneyinde yer alan Antalya, Adana gibi illerde 1600 kWh/m² -yılın üzerindedir [51], [52].



Şekil 2.11: Türkiye güneş radyasyon dağılımı haritası.

Şekil 4.2’de Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyelini gösteren ve Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’nün internet sitesinden alınan Küresel Güneş Radyasyon Dağılımı haritaları verilmiştir. Kayseri ili, güneş enerji potansiyeli olan bölgelerden biridir. Şekil 4.2’deki tüm haritalarda görüldüğü gibi, tüm iller için farklı bölgelerin güneş enerjisi potansiyelleri farklı olduğundan, sistem tasarımı yapılmadan önce yer bilgilerinin belirlenmesi gereklidir.

Türkiye’nin yıllık güneş enerjisi potansiyeli 380 milyar kWh’tir. Metrekareye düşen ortalama yıllık güneşlenme süresi ise 2640 saat ve ortalama yıllık güneş enerji potansiyeli 1303 kWh’tir. Bu veriler günlük metrekareye takribi 7,2 saat güneşlenme süresi ile 3,6 kWh’lik bir güce denk gelmektedir [57].

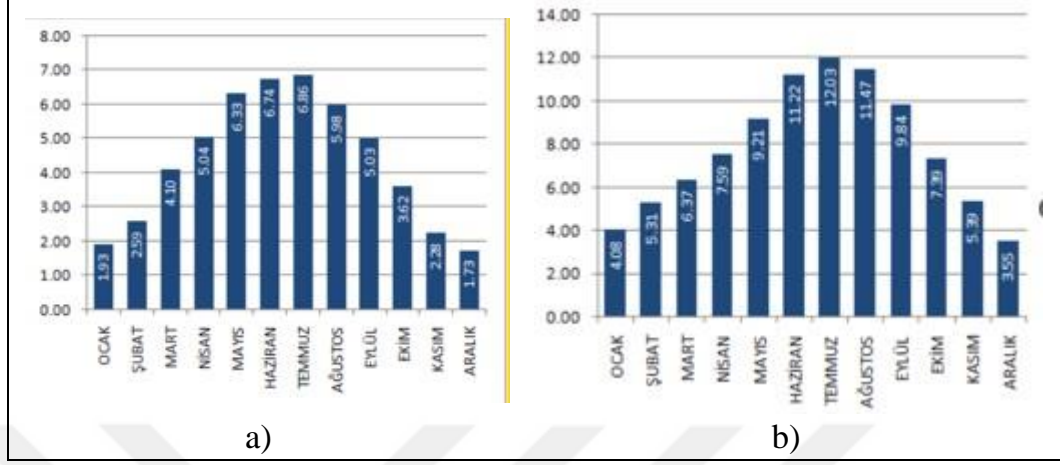


Şekil 2.12: Kayseri ili güneş radyasyon dağılımı haritası.

Güneş santralının kurulması planlanan arazinin seçilmesinde arazinin verimsizliği, düşük hava kirliliği, yıllık yağış miktarının azlığı, ormanlık ve gölge almaması, rüzgar hızının az olması ve demografik yapı özellikleri dikkate alınmalıdır [55].

Kayseri, Orta Kızılırmak bölümünde, İç Anadolu’nun güney bölümü ile Toros dağlarının birbirine yaklaştığı alanda yer alır. Kayseri ili yüzölçümü toplamı 16.917 km²’dir. İl yüz ölçümünün yaklaşık yüzde 40’ını tarım arazisi oluşturmaktadır. En düşük arazi oranı ise orman ve fundalık alanlardır. Kayseri orman arazisi yönünden oldukça fakirdir. Kayseri bölgesinde maksimum 12 saat güneşlenme süresi, minimum 2,6 saat güneşlenme süresi olduğu görülmektedir. Sıcaklık olarak en düşük-31.4 C, en yüksek sıcaklık ise 40.7 C olarak ölçülmüştür. Bir bölgeyi GES açısından değerlendirebilmek için öncelikli olarak radyasyon oranlarına bakmamız gerekir.

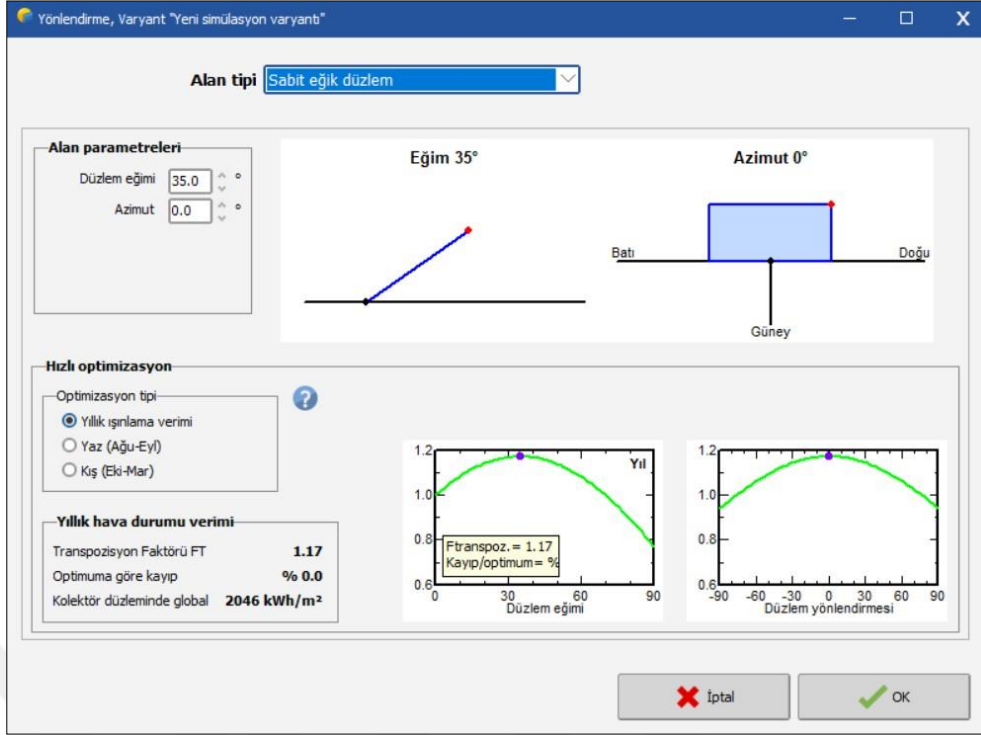
Kayseri bölgesindeki radyasyon haritasına baktığımızda 1550-1800 KWh/m²-yıl arasında olduğu görülmektedir [56].



Şekil 2.13: a) Kayseri ilinin güneşlenme süresi (saat), b) Kayseri ilinin global radyasyon değerleri (kWh/m²- gün).

Bir GES'in ekonomiklik analizi yapımında en önemli kriterlerden biri santralin yıllık enerji üretimidir. Yıllık enerjinin üretilmesi konusunda çalışılırken hassasiyetin oldukça yüksek değerde tutulması gerekmektedir. Çok yaygın olarak kullanılan, güncel ve gerçekçi veri bankası kullanarak simülasyon gerçekleştiren PVsyst programı bu çalışmada kullanılmıştır.

Güneş santrallerinde kullanılan fotovoltaik panellerden maksimum güç elde edilebilmesi için yatay düzlemde bir eğim açısı oluşturacak şekilde yerleştirilmekte ve güneş ışınlarının dik açı ile düşmesi hedeflenmektedir. Panellerin üzerine düşen ışınım seviyesi, panellerin yerleştirildiği yerin enlem ve boylamına bağlı olmaktadır. Çalışmada kurulacak güneş santrali için sabit eğik düzlem planlanmış ve güneş açılarını dik alabilmesi için panel açıları PVsyst programı ile 35 derece olarak belirlenmiştir. Panellerin azimut açısı, güneşe yöneldiklerini gösterecek şekilde sıfır derece olarak alınmıştır.



Şekil 2.14: PVsyst Programının panel yönlendirme ekranı.

Program üzerinde güneş santralinin tasarımı için coğrafi konum belirlendikten sonra, bölgenin meteorolojik verileri PVsyst içinde veri tabanı bulunan Metenorm 8.0 üzerinden sentetik olarak üretilmiştir. Şekil 4.5'te gösterildiği üzere kurulum yapılacak alanın yatay düzleme düşen aylık küresel ışınım ve sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır.

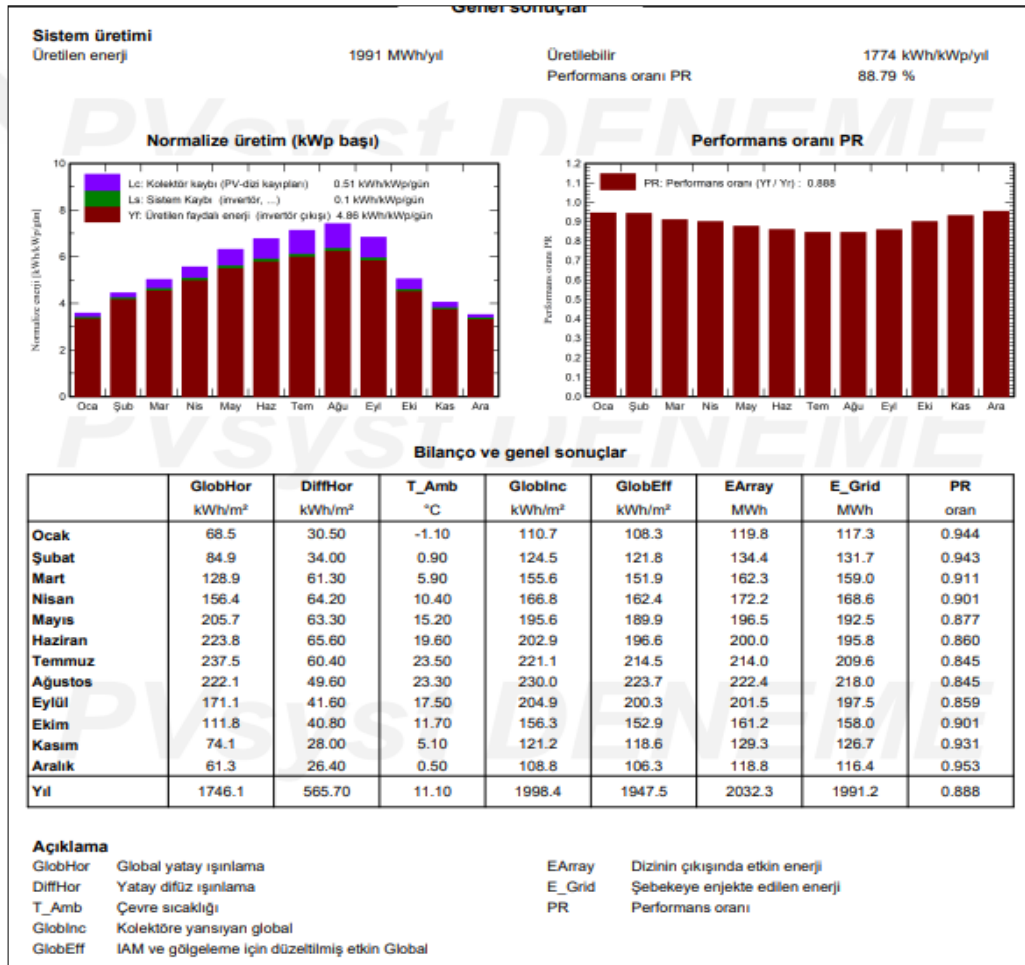
Kayseri/Argıcık için hava durumu - Aylık değerlerden üretilen sentetik veriler.

Aralık başlangıcı	GlobHor kWh/m ² /ay	DiffHor kWh/m ² /ay
Ocak	68.5	30.50
Şubat	84.9	34.00
Mart	128.9	61.30
Nisan	156.4	64.20
Mayıs	205.7	63.30
Haziran	223.8	65.60
Temmuz	237.5	60.40
Ağustos	222.1	49.60
Eylül	171.1	41.60
Ekim	111.8	40.80
Kasım	74.1	28.00
Aralık	61.3	26.40
Yıl	1746.1	565.70

Şekil 2.15: PVsyst programından elde edilen sentetik veriler.

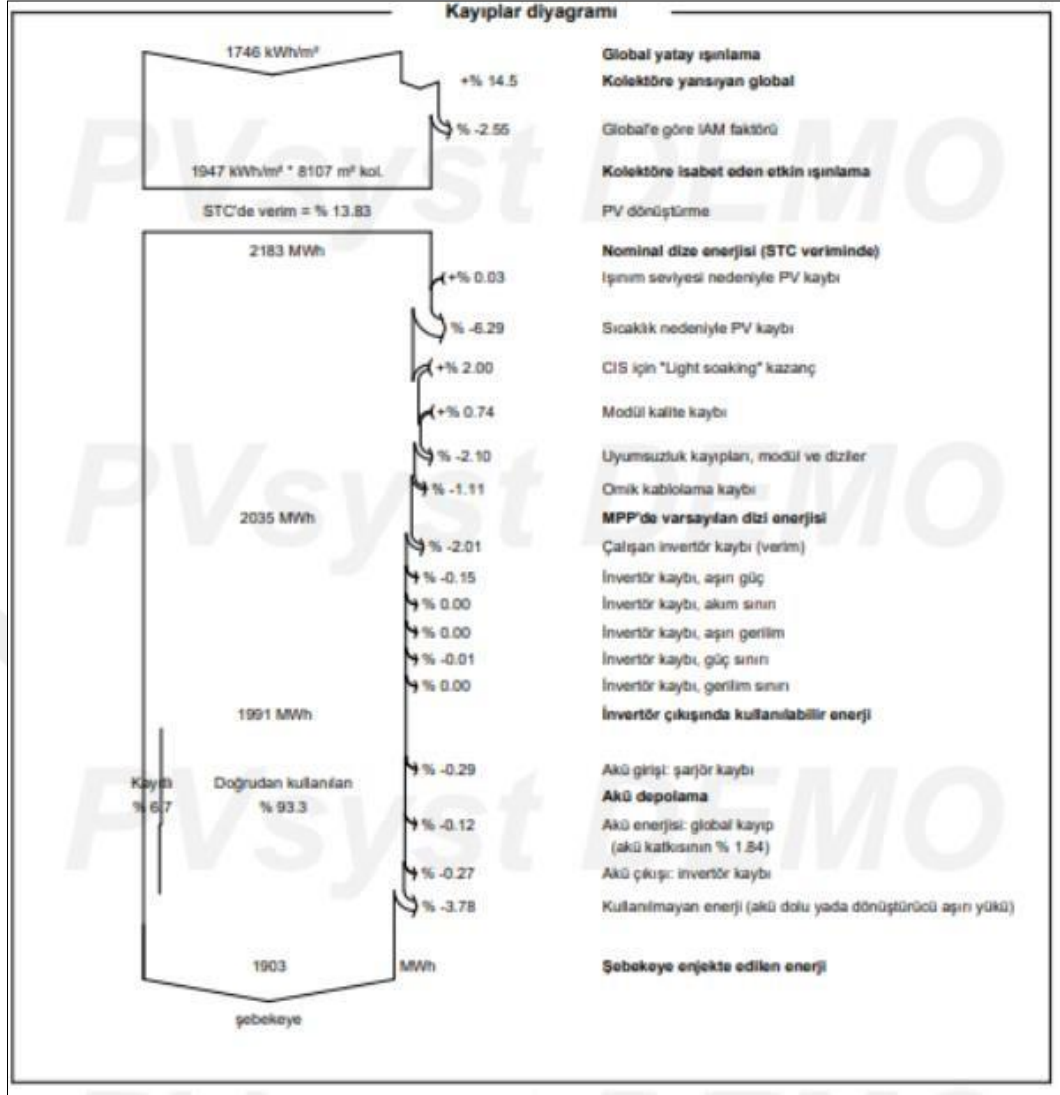
PVsyst yazılımını gerekli işlemleri gerçekleştirirken meteorolojik veriler, kurlum yapılacak alanın hava kirliliği oranı, ışınım değerleri, gölgeleme değerlendirmeleri, yer yansıma oranları, güneş panellerinin yön ve açısı, güneş panelinin özellikleri ve yıllık kayıp oranları, invertörlerin verim özellikleri gibi detayları dikkate almaktadır.

PVsyst programından Kayseri GES tesisi için aylık ve yıllık üretim ve performans değerlerini elde etmek mümkündür. Programdan elde edilen simülasyon değerlerine göre santralin bulunduğu konumda yatay düzleme gelen küresel ışınım miktarı yıllık 1746 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Elde edilen genel sonuçlar şekil 2.16' da görülmektedir.



Şekil 2.16: PVsyst programı genel sonuçları.

35 derece eğime sahip paneller için simülasyon sonuçlarında verilen kayıplar şeması şekil 2.17' de verilmiştir.



Şekil 2.17: PVsyst kayıplar dizini.

PVsyst programı sahip olduğu veri bankası sayesinde enerji verimliliği analizlerine ek olarak maliyet analizi yapabilmektedir. Maliyet analizi için dikkat edilmesi gereken noktalar:

- Teşvik programları
- Yatırım büyüklüğü (Bu çalışma için 1 MW)
- Yatırım için arazi ihtiyacı
- Sistem ömrü
- Sistem kayıp oranı
- Satış fiyatı
- Yıllık verim kaybı

- Bakım ve personel maliyetleri

Olarak sıralanabilir.

Bu bilgiler doğrultusunda İç Anadolu bölgesinin Güneş santrali uygulamaları için uygun iklim ve coğrafi konuma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 4.1’de Kayseri ili için 1 MW’lık güneş santrali projesinin yaklaşım maliyetleri verilmiştir.

Tablo 2.4: PV sistem maliyetler tablosu.

Santral Bilgileri	
Kurulu Kapasite(kWp)	1000
İlk Yıl Net Yıllık Elektrik Üretimi (KWh)	1746
Ortalama Net Yıllık Elektrik Üretimi (KWh)	1484
İşletme Giderleri (Yıllık)	
Personel Giderleri	20000 USD
Bakım ve Onarım Giderleri	10000 USD
Sigorta Giderleri	10000 USD
Diğer	10000 USD
Santral Kurulum Maliyetleri	
Panel	6601*72 USD
İnvertör	675*2 USD
Konstrüksiyon/İnşaat/Arazi Düzenleme	200000 USD
Arazi İhtiyacı	15000 m ² ≈ 150000 USD
Proje/Başvuru/Harç	50000 USD
KDV (%18)	216 000 USD
Elektrik Satış Tutarı (Kwh)	45,94 CENT

Santralin ilk yılı satış fiyatı için EPIAŞ Şeffaflık Platformu referans alınarak 2015-2020 yılı ortalama piyasa takas fiyatı (ABD doları/MWh) olarak varsayılmış ve

sonraki yıllar için IMF veri tabanından alınan 2021- 2025 ortalama ABD doları enflasyon oranı beklentisine dayalı olarak artırılmıştır. Fiyatların belirlenmesinde 30.01.2021 tarihli Resmî Gazete’de yer alan karar gereği YEKDEM fiyatında güncellemeye esas üst sınır olan 51 \$/MWh dikkate alınmıştır. Yukarıdaki tabloda bu hesapların ortalaması olarak 0,4594 \$/KWh kabul edilmiştir [58].

Arazi Maliyeti dahil edilmeden yapılan hesaplamalarda santralin kurulum maliyeti, elektrik satışından elde edilecek gelir ve yıllık işletim maliyeti aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.5: PV sistem toplam maliyet ve gelir tablosu.

Toplam Kurulum maliyeti	1.416.000USD
Yıllık İşletim Maliyeti	50000 USD
Elektrik Satışından Elde Edilen Yıllık Gelir	681749 USD

$$Geri \ Ödeme \ Süresi = \frac{Yatırım \ Bedeli}{Yıllık \ Gelir - Yıllık \ Gider} \quad (4.1)$$

Yapılan maliyet varsayımları doğrultusunda yaklaşık hesaplamalarla santralin geri ödeme süresi yaklaşık 2,5 yıl olarak hesaplanmıştır.

Tezin bu bölümünde Türkiye’nin ve Kayseri ilinin güneş enerjisi potansiyeli araştırılmış. Kayseri iline kurulacak olan bir güneş santrali için PVsyst üzerinden fizibilite ve yaklaşık maliyet çalışması yapılmıştır. Çalışma sonuçları gösteriyor ki Kayseri ili güneş enerji potansiyeline sahiptir ve yapılacak olan yatırımları kısa sürede geri ödemesi gerçekleştirebilecek elektrik üretim potansiyeline sahiptir.

3. GELİŞTİRİLEN METODOLOJİLER

Destekleyici politikalar ve teşvikler sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu hızla artmaktadır. Bölüm 2’de Yenilenebilir enerji kaynaklarının beraberinde getirdiği sorunlarla ve şebekenin daha ekonomik işletilmesi için enerji depolama kaynaklarının avantajlarından bahsedilmişti. Enerji depolama sistemlerinin ekonomik faydalarını arttırmak için farklı operasyon stratejileri göz önüne alınmalıdır. Bölüm 3’te farklı stratejiler için enerji depolama sistemleri hem teknik hem ekonomik olarak karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasının amacı elektrik dağıtım şebekelerinde kullanımı gittikçe artmakta olan yenilenebilir enerji kaynaklarının, şebekeye dahil olmasıyla birlikte ortaya çıkan sorunların önüne geçilmesi için şebekeye optimal şekilde PV-Batarya dahil ederek, PV-Batarya sistemlerinin şebekenin işletilmesinde ve şebekenin verimliliğinin artırılmasındaki etkilerini ortaya koymaktır. Bunu yaparken şebekenin aktif-reaktif güçlerin ve gerilim sapmalarını minimize edecek amaç fonksiyonu oluşturulmuş ve daha sonrasında bu üç parametreyi optimize edecek dördüncü çok amaçlı bir optimizasyon fonksiyonu oluşturulmuş. Bu bölümde Batarya-PV sisteminin 33 baral test sistemi için planlanma ve işletme optimizasyon problemi çözümünde kullanılan metodoloji tanıtılacaktır.

3.1. Matematiksel Modeller

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş paneli (PV) ve enerji depolama sistemlerinden batarya enerji depolama sistemi içeren dağıtım şebekesinin analizlerinde kullanılacak matematiksel ifadeler bu bölümde verilmiştir. Güneş paneli eğrisi kurulu olan güneş santrali verilerinden elde edilmiştir. Yük eğrisi ise EPIAŞ’ın internet sitesinden alınmıştır [72]. Enerji depolama sistemlerinden batarya depolama sistemi ele alınmış, PV üretim karakteristikleri, yük eğrisi, güç akışı denklemleri, batarya kısıtları için kullanılan matematiksel model bu bölümde gösterilmiştir.

3.1.1. Sistem Kısıtları

Yapılan çalışmada en uygun batarya büyüklüğü ve yeri elde edilirken güç akış dengesi yanında çeşitli kısıtlamalarla optimizasyon problemi çözülmüştür. Dağıtım sisteminin bara gerilimleri 0,9 pu ve 1,1 pu arasında tutulmuştur (Denklem 3.1). Dağıtım sistemi indirici merkezden sadece güç çekebilmekte, güç akışı indirici merkezden dağıtım sistemine doğru tek yönlü olmaktadır bu sebeple PV üretim birimi dağıtım şebekesinin maksimum toplam yüküne yakın değer olan 3 MW ile sınırlandırılmıştır (Denklem 3.2), benzer sebepten ve aynı zamanda batarya birimleri için yüksek yatırım maliyetleri düşünülerek batarya birimi kapasitesi en fazla PV üretim biriminin yarı kapasitesi olacak şekilde sınırlandırılmıştır (Denklem 3.3). Bataryanın şarj seviyesi (SOC) %20 ile %90 aralığı ile sınırlandırılmıştır. Batarya sisteminin şarj seviyesi durumu (SOC) Denklem 3.4'te verilmiştir. Batarya sisteminde depolanan enerji bir önceki zaman dilimine bağlıdır. A_{t-1}^{SOC} ve A_t^{SOC} batarya sisteminin SOC seviyesini göstermektedir (Denklem 3.5). η_{dis}^{SOC} CAES'in deşarj verimliliğini temsil etmektedir. Uygulanan batarya birimleri 250 KW paketler halinde planlanmıştır.

$$V_{min} \leq V \leq V_{max}$$

$$0.9 \text{ pu} \leq V \leq 1.1 \text{ pu} \quad (3.1)$$

$$P^{PV} \text{ min} \leq P^{PV} \leq P^{PV} \text{ max}$$

$$0 \leq P^{PV} \leq 3 \text{ MW} \quad (3.2)$$

$$20 * P^{SOC} \leq SOC \leq \%90 * P^{SOC} \quad (3.3)$$

$$A_t^{SOC} = A_{t-1}^{SOC} + \eta^{caes} \cdot P_t^{ch} - \frac{P_t^{dis}}{\eta^{SOC}} \quad (3.4)$$

$$0 < P_t^{şarj} < u_t^{şarj} * P^{şarj} \quad (3.5)$$

$$0 < P_t^{deşarj} < u_t^{deşarj} * P^{deşarj} \quad (3.6)$$

$$u_t^{şarj} + u_t^{deşarj} < 1 \quad (3.7)$$

Denklem 3.5 ve Denklem 5.6 şarj-deşarj seviye limitlerini ifade etmektedir. Bu eşitlikler deki u , 0 ve 1 değerlerini alabilen ikili bir değişkendir ve batarya sisteminin şarj ve deşarj durumlarını belirleyen değişkendir. Denklem 3.7 ise batarya sisteminin t anında şarj ve deşarj modalarından birinin gerçekleşebileceğini ifade eder.

3.1.2. Modelleme Güç Akışı Denklemleri

Güneş santrali ve lityum iyon batarya sistemleri işe optimal şekilde işletim analizleri sırasında Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'da verilen lineerleştirilmiş AC güç akışı denklemleri kullanılmıştır [71]. Bu eşitliklerde $P_{i,t}^{MG}$ elektrik şebekesinden çekilen aktif gücü, $P_{i,t}^{pv}$ PV sistemin ürettiği aktif gücü, $P_{i,t}^{load}$ yüklerin şebekeden çektiği aktif gücü, $Q_{i,t}^{MG}$ indirici merkezden çekilen reaktif gücü ve $Q_{i,t}^{load}$ yüklerin reaktif gücünü, V gerilimleri θ ise gerilim açısını ifade etmektedir.

$$P_{i,t}^{MG} + P_{i,t}^{wind} + P_{i,t}^{pv} - P_{i,t}^{load} = \sum_j [A_{ij} \frac{v_{i,t} - v_{j,t}}{x_{ij}} + B_{ij} \frac{\sigma_{i,t} - \sigma_{j,t}}{x_{ij}}] \quad (3.8)$$

$$Q_{i,t}^{MG} - Q_{i,t}^{load} = \sum_j [B_{ij} \frac{v_{i,t} - v_{j,t}}{x_{ij}} + A_{ij} \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}}] \quad (3.9)$$

Bu eşitsizliklerdeki A_{ij} ve B_{ij} terimleri de sırasıyla Denklem 3.10 ve Denklem 3.11'de ifade edilmiştir, r_{ij} ve x_{ij} sırasıyla hatların resistans ve reaktansını ifade etmektedir.

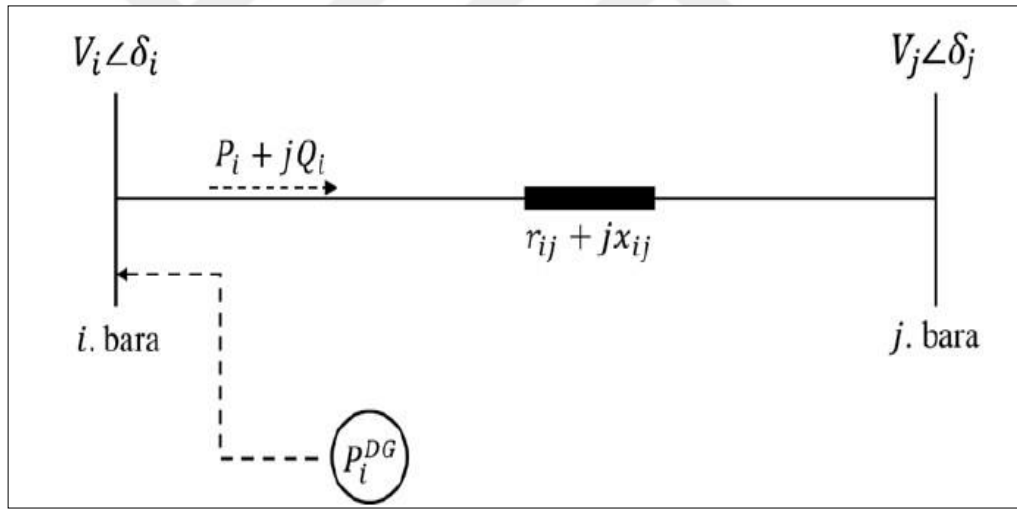
$$A_{ij} = \frac{x_{ij} * r_{ij}}{x_{ij}^2 + r_{ij}^2} \quad (3.10)$$

$$B_{ij} = \frac{x_{ij} * x_{ij}}{x_{ij}^2 + r_{ij}^2} \quad (3.11)$$

3.2. PV-Batarya Sisteminin Optimum Kapasitesinin ve Konumunun Belirlenmesi

Çalışmada dağıtım şebekesine yerleştirilecek olan PV-Batarya sisteminin dağıtım şebekesinin aktif ve reaktif güç kayıplarını düşürülmesi ve gerilim profilini iyileştirilmesi için en uygun konumun ve boyutunun belirlenmesini yapılarak şebekenin daha verimli işletilmesi amaçlanmıştır.

Aşağıdaki şekilde eşdeğer devresi verilen radyal dağıtım şebekesi için güç akışı hesaplama denklemleri ve kısıt denklemleri verilmiştir. P_{loss} Aktif güç kayıplarını temsil eder ve Denklem 3.12 açık ifadesi verilmiştir, benzer şekilde Q_{loss} reaktif güç kayıplarını ifade eder ve Denklem 3.13, VDA ise gerilim sapma indeksini temsil eder ve Denklem 3.14'te açık ifadesi verilmiştir. Şekil 19'daki sistem kullanılarak ifadeler anlatılmıştır.



Şekil 3.1:2 Baralı radyal dağıtım sistemi [32].

Şekil 5.1'de 2 baralı bir dağıtım sisteminin tek hat şeması verilmiştir. Bu eşdeğer devrede i bara numarasını j ise i barasından güç akışı sağlanan barayı ifade etmektedir. $V \angle \delta$ bara gerilimlerini ve açılarını, İki bara arasındaki hattın rezistans ve reaktansı ise sırasıyla r_{ij} ve x_{ij} ile ifade edilmiştir. n dağıtım şebekesinin bara sayısını göstermektedir. Sistemin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı ve ortalama gerilim sapması sırasıyla Denklem 3.12, Denklem 3.13, Denklem 3.14'te tanımlanmıştır.

$$P_{loss} = \sum_t \sum_{i=2}^n \left(\frac{(P(i,t)^2 + Q(i,t)^2)}{|V(i,t)|^2} \right) * r_{ij} \quad (3.12)$$

$$Q_{loss} = \sum_t \sum_{i=2}^n \left(\frac{(P(i,t)^2 + Q(i,t)^2)}{|V(i,t)|^2} \right) * x_{ij} \quad (3.13)$$

$$VDA = \sum_t \sum_{i=2}^n \left(\frac{(1 - |V(i,t)|)^2}{n-1} \right) \quad (3.14)$$

Dağıtım şebekelerinde aktif güç kaybını reaktif güç kaybını ve ortalama gerilim sapmasını düşürmek için PV-Batarya sisteminin en uygun yerini ve en uygun büyüklüğünü bulmak bu tez çalışmasını birinci hedefidir.

Belirlenen hedef doğrultusunda amaç fonksiyonu olarak aktif güç kayıplarının minimize edilmesi Denklem 3.15'te reaktif güç kayıplarının minimize edilmesi eşitlik Denklem 3.16'da ortalama gerilim sapması Denklem 3.17 ifade edilmiştir. Denklem 3.18' de ise bu üç parametreyi içeren çok amaçlı bir amaç fonksiyonu oluşturularak, üç parametre için optimum sonucun bulunması hedeflenmiştir. $Objfun_4$ fonksiyonundaki w_1, w_2 ve w_3 ağırlık katsayılarıdır ve toplamaları 1'e eşittir.

$$Objfun_1 = \min P_{loss} \quad (3.15)$$

$$Objfun_2 = \min Q_{loss} \quad (3.16)$$

$$Objfun_3 = \min VDA \quad (3.17)$$

$$Objfun_4 = \min(w_1 P_{loss} / P_{loss}^{base} + w_2 Q_{loss} / Q_{loss}^{base} + w_3 VDA / VDA^b) \quad (3.18)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

3.3. Dağıtım Şebekelerinin EDS'ler ile Optimal İşletilmesi

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimin artmasıyla şebekelerde enerji depolama sistemleri şebekelere sağladıkları esneklik sayesinde ön plana çıkmaktadır. Bu doğrultuda EDS'lerin işletim problemleri sistem operatörleri için çok önemli bir hale gelmiştir. Bu bölümde optimal planlanması yapılan PV-Batarya sistemi için optimal işletim modeli tanıtılacaktır. Yapılan çalışmada batarya depolama sistemi kullanılarak ve deterministik bir programlama optimizasyonu ile modellenecektir.

Batarya sisteminin şarj deşarjı programlanırken YEK'ler den yani bu çalışma için PV sistemden sağlanan talep fazlası enerjiiyi daha sonra talebin arttığı saatlerde kullanılması amaçlanmıştır. Böylece enerji ihtiyacının karşılanmasında YEK'lerin payı artarak temiz enerjiye geçişe katkı sağlanacak ve sistemin işletim maliyetleri azalacaktır.

Çalışmada PV-Bataryanın en uygun yer, büyüklük seçimi ve batarya işletme planlaması Denklem 3.15-Denklem 3.18 ifade edilen amaç fonksiyonlarından anlaşılacağı üzere aktif güç kaybını, reaktif güç kaybını ve gerilim sapsması endeksini birini veya birkaçını aynı anda minimize etmek için yapılmaktadır. Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'da verilen lineerleştirilmiş güç akışı denklemleri dağıtım şebekesine enerji depolama sistemi ve güneş santrali eklenmesiyle Denklem 3.19 ve Denklem 3.20'deki şekilde güncellenmiştir.

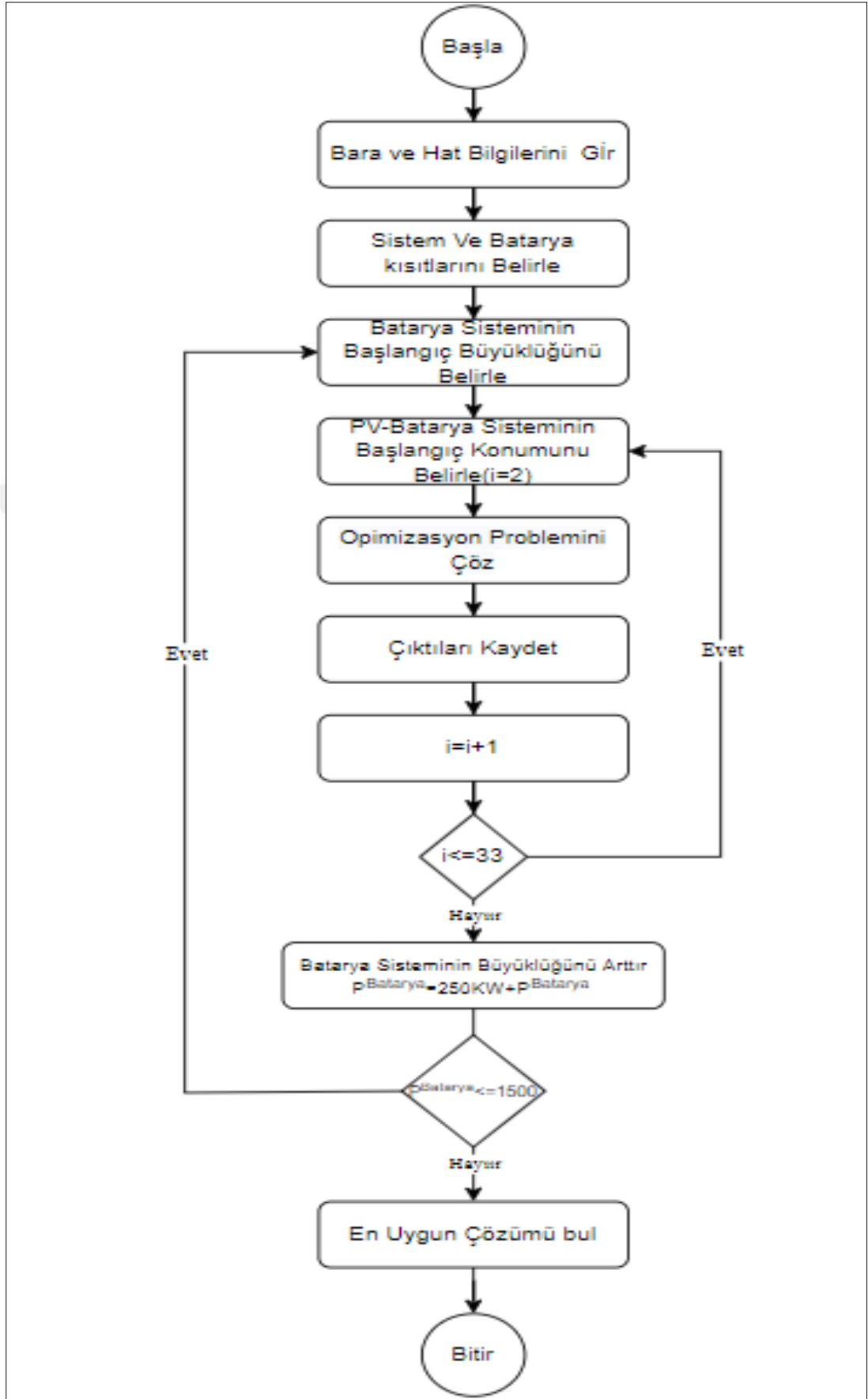
$$P_{i,t}^{MG} + P_{i,t}^{pv} + P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch} - P_{i,t}^{load} = \sum_j [A_{ij} \frac{v_{i,t} - v_{j,t}}{x_{ij}} + B_{ij} \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}}] \quad (5.19)$$

$$Q_{i,t}^{MG} - Q_{i,t}^{load} = \sum_j [B_{ij} \frac{v_{i,t} - v_{j,t}}{x_{ij}} + A_{ij} \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}}] \quad (5.20)$$

3.4. Akış Şeması

PV-Batarya sisteminin optimum yerleşimi için GAMS programında oluşturulan algoritma Şekil 3.12’te verilmiştir ve geliştirilen model doğrusal olmayan programlama metoduyla çözülmüştür

Oluşturulan algoritma ile şebekenin bara ve hat bilgileri ile belirtilen kısıtlar baz alınarak oluşabilecek her durum için bir örnek uzayı oluşturulur ve oluşturulan bu örnek uzayında amaç fonksiyonunu sağlayan çözüm PV-Batarya sisteminin optimum yerleşim ve boyutlandırılması probleminin çözümü olarak bulunur. Aynı zamanda oluşturulan örnek uzayında her bir çözüm için lineerleştirilmiş AC güç akışı ile şebekenin batarya şarj-deşarj ve PV üretim sisteminin işletim modeli de oluşturulmuş olur ve PV üretim sisteminin maksimum üretime ulaştığı noktada kesime girmeyeceği optimum PV üretim gücü elde edilir bu sayede PV üretim biriminin gücü ile batarya kapasitesi optimal şekilde planlanmış olur.



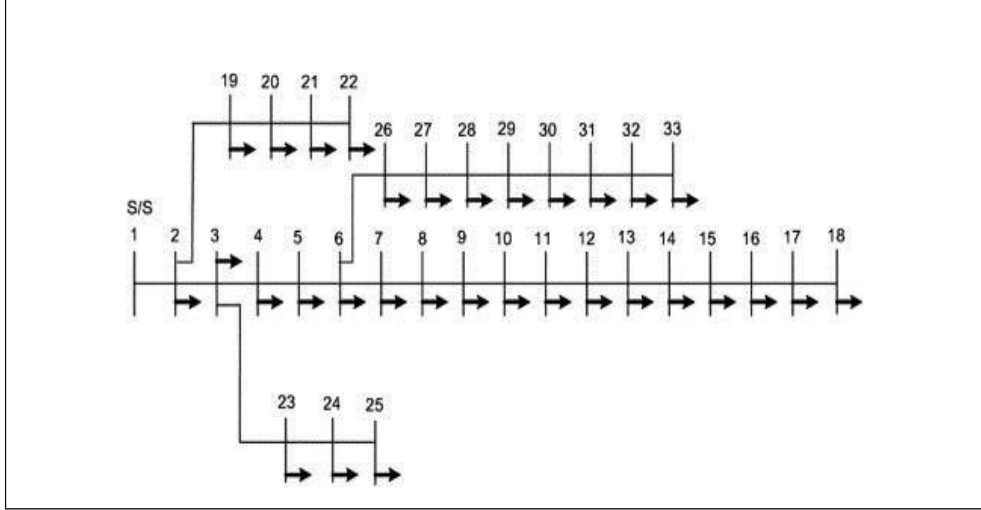
Şekil 3.2: Akış şeması.

4. METODOLOJİNİN UYGULANMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde elektrik dağıtım şebekelerinde kullanımı gittikçe artmakta olan yenilenebilir enerji kaynaklarının, şebekeye dahil olmasıyla birlikte ortaya çıkan sorunların önüne geçilmesi için şebekeye optimal şekilde PV-Batarya dahil edilmesi ve optimal işletim modeli probleminin çözümü için oluşturulan metodolojinin uygulanması anlatılmıştır. Bunu yaparken şebekenin aktif-reaktif güçlerin ve gerilim sapsmalarını birini veya birkaçını minimize edecek amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Çalışmalarda 33 baralı test dağıtım sistemi ve Kayseri bölgesi için PVsystem programında elde edilen güneş santrali verileri ile EPIAŞ'tan alınan yük verileri işlenerek şebekenin 24 saat için optimal işletim modeli oluşturulmuştur. Sonuçta batarya sistemi için en uygun konum ve boyut belirlenmesine ek olarak, batarya boyutu için en uygun PV gücü tespit edilmiş ve 24 saatlik zaman dilimi için batarya sisteminin optimal şarj-deşarj işletim planlaması yapılmıştır.

4.1. Sistem Tanıtımı

Bu çalışmada analizler için Şekil 4.1'de gösterilen 33 baralı test dağıtım sistemi kullanılmıştır [70]. Analizler 24 saatlik zaman dilimi için yapılmıştır. Dağıtım sisteminin yükleri Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketinin (EPIAŞ) sitesindeki Sakarya Elektrik Dağıtım Anonim Şirketine (SEDAŞ) ait Nisan ayı mesken aboneli yük profil katsayı ile oluşturulmuştur [11]. Yük profili ve PV sisteme ait üretim profili sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sistemin pik yükü 3,715 MW ve yüklerin güç faktörü 0,9 olarak alınmıştır.

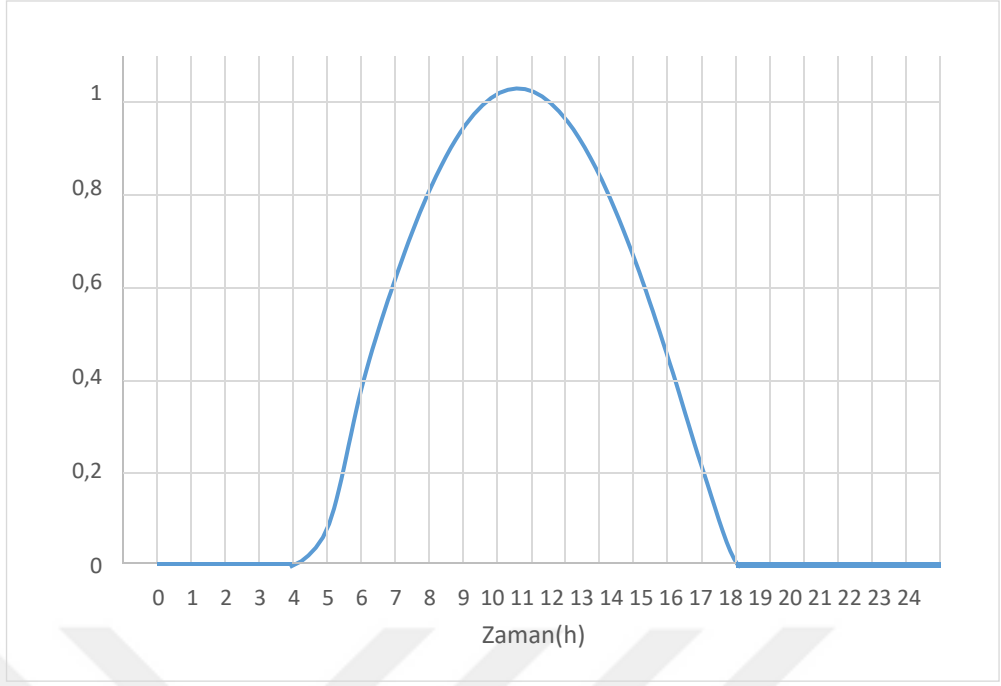


Şekil 4.1: 33 baralı test sistemi[35].

Çalışmada Şekil 4.1’de verilen 33 baralı dağıtım sisteminin temel hali ve optimal PV üretim birimi ve batarya birimi eklenmiş halleri için aktif-reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmaları karşılaştırılması yapılmıştır.

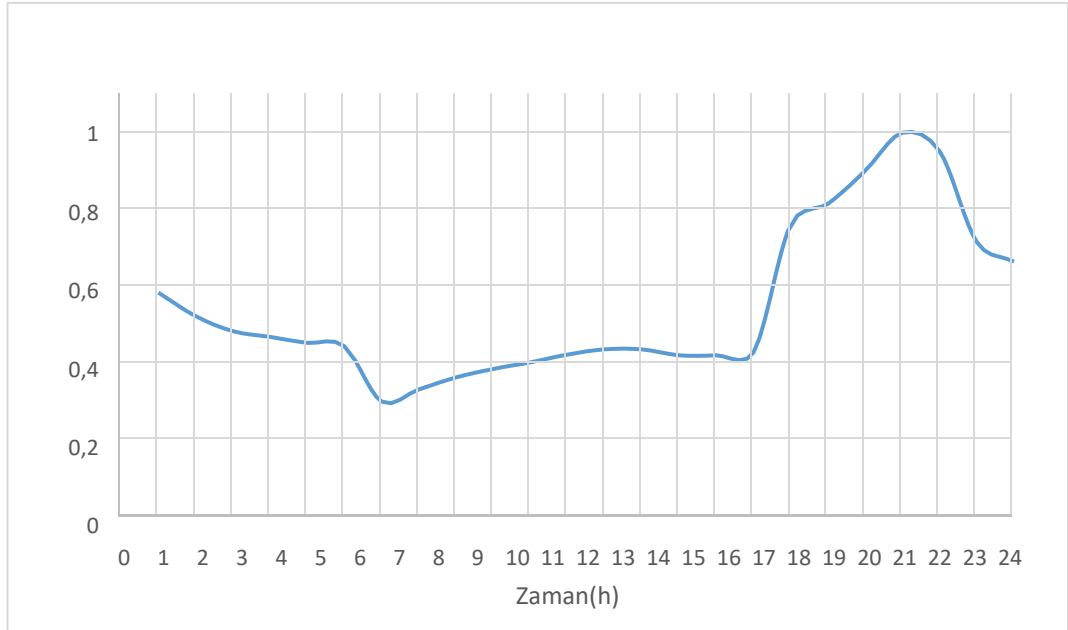
Enerji depolama sistemlerinin şebekeye optimal yerleşimi ve kapasitesinin belirlenmesi için kurulan optimizasyon algoritmaları zamana bağlı değişen yük ve üretim durumları için analiz edilmiştir. Şekil 4.2’de kurulu bir güneş santralinin üretim eğrisi görülmektedir, beklendiği gibi gün ortasında üretim artarak maksimum düzeye ulaşarak ve güneşin batmaya başlamasıyla birlikte üretim azalmaya başlamaktadır.

24 saatlik PV üretim ve yük profilleri 0-1 aralığına normalize edilerek aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.2: PV üretim eğrisi.

Şekil 4.3'te ülkemizin 21 elektrik dağıtım şirketinden biri olan SEDAŞ'ın EPIAŞ üzerinden elde edilmiş nisan ayı mesken verilerinin ortalama değerlerinin normalize edilmiş hali görülmektedir. Analiz çalışmalarında normalize edilen bu veriler kullanılmıştır. Görselde görüldüğü üzere elektrik enerjisi talebi akşam saatlerinde artmakta ve sabah saatlerinde güneşin doğmasıyla birlikte azalmaktadır.



Şekil 4.3: Yük eğrisi.

Sistemde PV ve batarya bağı olmadığı temel durumda bir günlük toplam aktif ve reaktif güç kaybı 57.63 KW ve 39,15 kVAR'dır. Dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapma indeksi 0,011'dir.

4.2. Temel Durum Analizleri

Bu bölümde şekil 6.1'de verilen PV-Batarya sistemi içermeyen, temel durumda 33 baralı test dağıtım sistemi için analizler yapılmıştır. Şebekeye dahil edilecek PV-Batarya sistemiyle birlikte elde edilecek sonuçlarla karşılaştırılmak amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Temel durum için analiz sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1: Temel Durum Analiz Sonuçları

Aktif Güç Kaybı(P) kW	Reaktif Güç Kaybı(Q) kVAR	Gerilim Değişim İndeksi(VDA) pu
57,63	39,15	0,0011

Elde edilen sonuçlarda temel durum için aktif güç kayıplarının toplam 57,63 kW, Reaktif güç kayıplarının 39,15 kVAR, gerilim değişim indeksi de 0,0011 pu olarak bulunmuştur.

4.3. Batarya Sisteminin Büyüklüğünün ve Konumunun Belirlenmesi

Yapılan optimizasyon çalışmasının akış şeması Şekil 3.2'te gösterilmiştir. Batarya sistemin büyüklüğünün ve konumunun belirlenmesinde kısıtları sağlayan her durum için bir örnek uzayı oluşturulmuş daha sonrasında bu örnek uzayından amaç fonksiyonunu sağlayan en uygun seçim çözüm olarak sunulmuştur.

4.3.1. Batarya Büyüklüğünün Belirlenmesi

Batarya sisteminin büyüklüğü belirlenirken 0,75 MW ile 1,5 MW alt ve üst sınır olarak belirlenmiştir. Üst sınır belirlenmesindeki amaç şebekede güç akışı indirici merkezden tek yönlü oluşudur. Oluşturulan program akışı her bara için çalıştırılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde en uygun çözüm olan 14. baraya ait farklı batarya büyüklükleri için aktif ve reaktif güç kayıpları ve gerilim değişim grafikleri verilmiştir.

Tablo 4.2: Batarya Boyutu Analiz Sonuçları

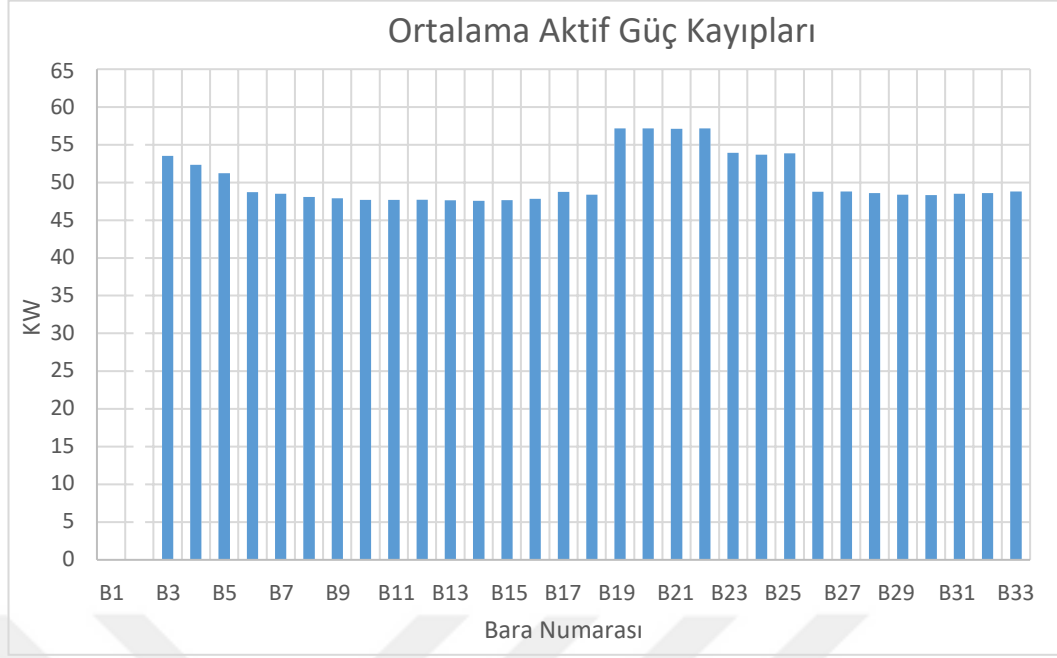
Batarya Boyutu KWh	Aktif Güç Kaybı(P) kW	Reaktif Güç Kaybı(Q) kVAR	Gerilim Değişim İndeksi(VDA) pu
Temel Durum	57,63	39,15	0,0011
750	48,98	33,93	0,00091
1000	49,13	33,31	0,00088
1250	48,32	32,72	0,0086
1500	47,57	32,21	0,0084

Analizler de görüldüğü üzere en uygun batarya sistemi büyüklüğü 1500 kW'dır. Sonraki bölümlerde bu büyüklük için konum analizleri sonuçları paylaşılacaktır.

4.3.2. Aktif Güç Kaybı İçin En Uygun PV-Batarya Konum Analizleri

Sadece aktif güç kayıplarını minimize etmeyi amaçlayan durumdur. Bu durumda 1000 kW PV, 1500 kW batarya grubu her baraya sırasıyla yerleştirildiğinde oluşacak aktif güç kayıplarından minimum olanı seçer.

Yapılan analizlerde aktif güç kaybının minimum olarak belirlendiği konumun 14. bara olduğu görülmektedir. Analiz sonuçları aşağıdaki gibidir.

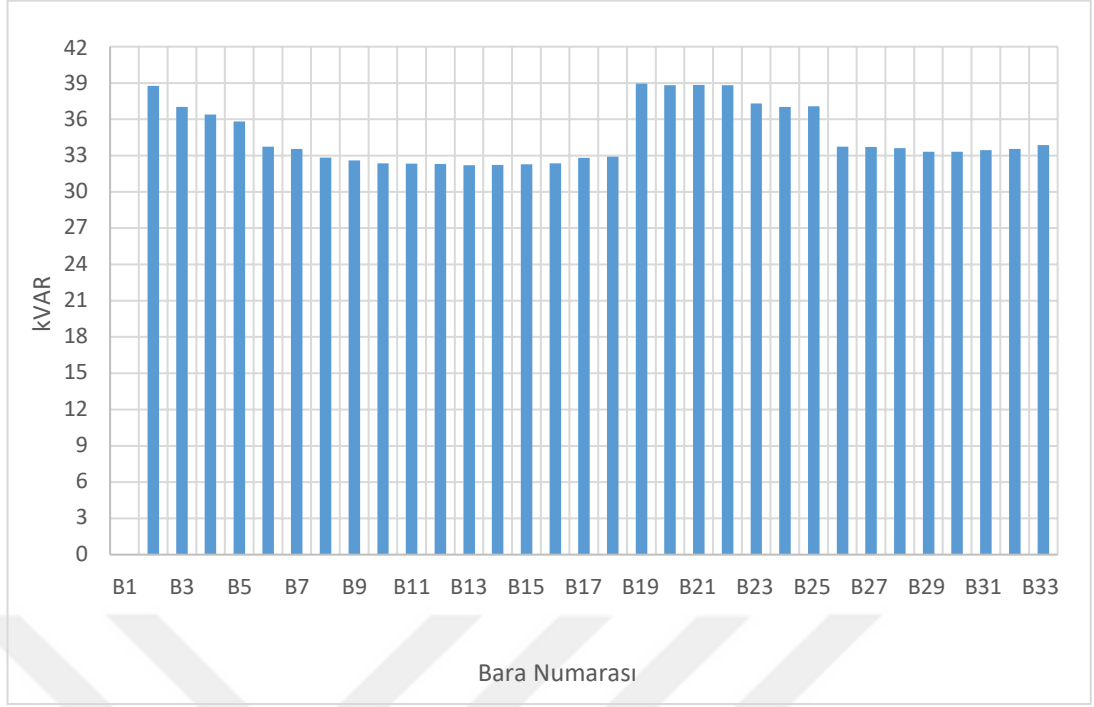


Şekil 4.4: Ortalama aktif güç kaybı karşılaştırılması.

1000 kW PV, 1500 kW batarya grubunun her bir baraya yerleştirildiği durumdaki ortalama güç kaybı Şekil 4.4'te verilmiştir. Temel durumda 57,53 kW seviyesinde olan aktif güç kayıplarının, PV-Batarya sisteminin 14. baraya yerleştirilmesiyle %17,45'lik azalma ile 47,57 kW seviyesine gerilediği görülmektedir.

4.3.3. Reaktif Güç Kaybı İçin En Uygun PV-Batarya Konum Analizleri

Çalışmada bu senaryo ise reaktif güç kayıplarını minimize etmeyi amaçlar. Her bir bara için en uygun büyüklükteki PV-Batarya sistemi yerleştirildiğinde oluşacak reaktif güç kayıpları şekil 4.5'te verilmiştir.

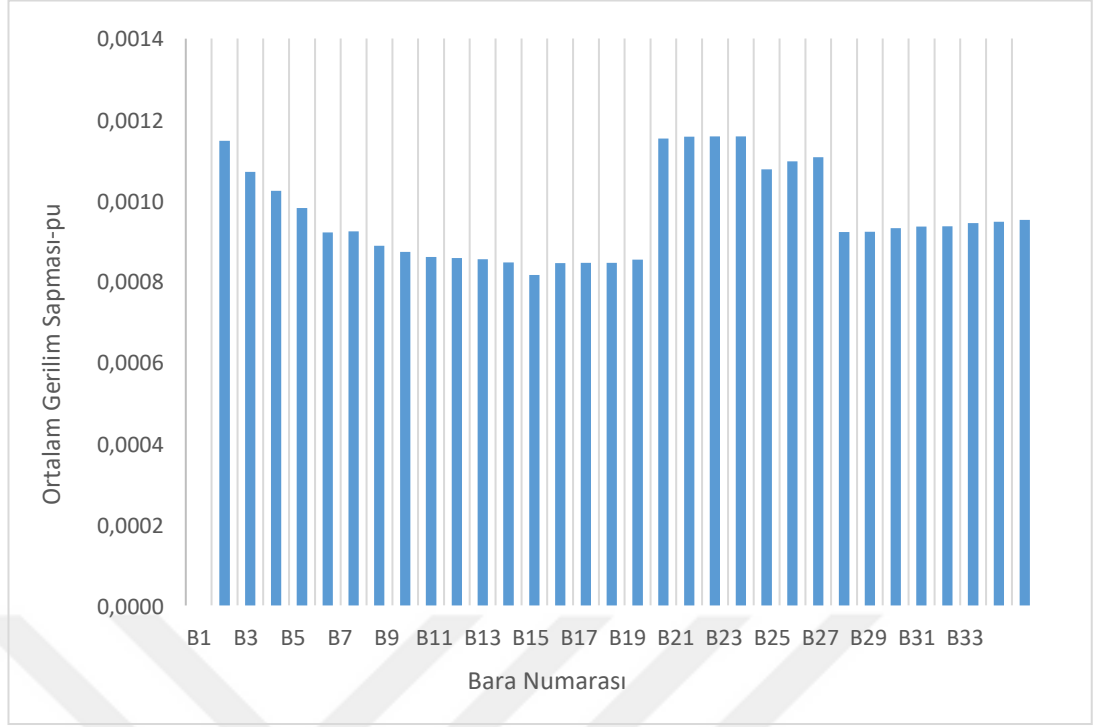


Şekil 4.5: Ortalama reaktif güç kaybı karşılaştırması.

Temel durumda 39,15 kVAR reaktif güç kayıplarını, PV-Batarya sisteminin reaktif güç kaybını minimize eden durum için en uygun çözüm olan 13.bara yerleştirilmesiyle %17,75'lik azalma ile 32,2 kVAR seviyelerine düştüğü görülmektedir.

4.3.4. Ortalama Gerilim İçin En Uygun PV-Batarya Konum Analizleri

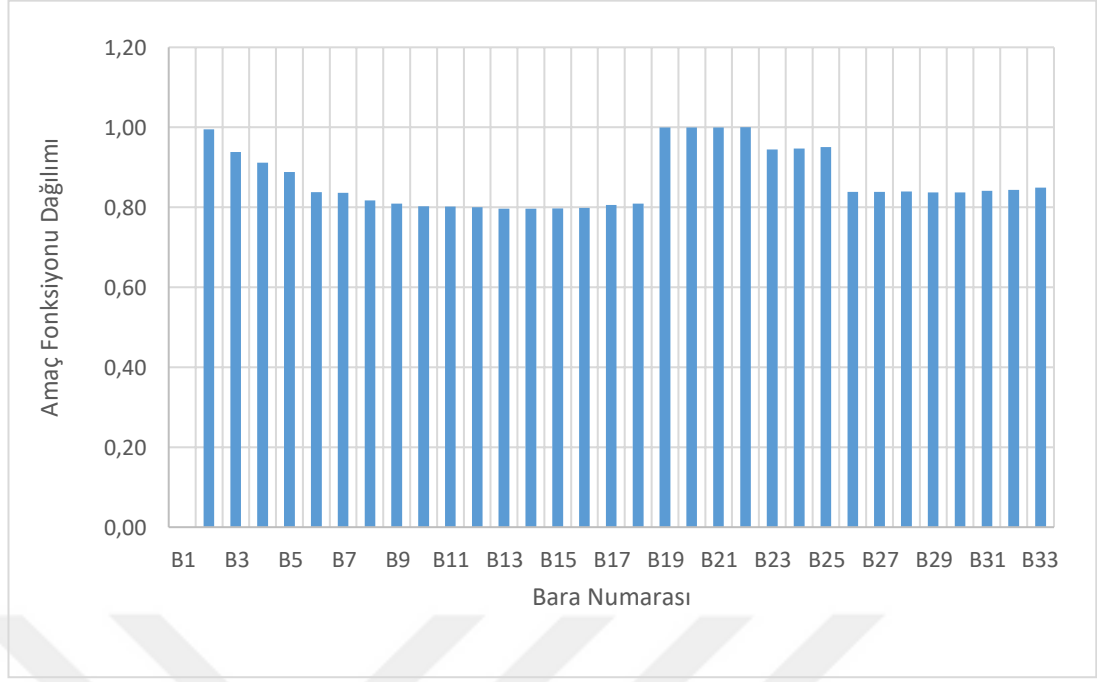
Gerilim değişim endeksini minimize etmeyi amaçlayan durum içinde optimal çözüm aktif güç kaybını minimize eden duruma benzer şekilde 14. bara olarak elde edilmiştir. Optimal büyüklükteki PV-Batarya sisteminin 14. bara yerleşimiyle birlikte gerilim değiş endeksinde temel duruma göre %27 oranında iyileşme görülmüştür. Her bir bara için elde edilen sonuçlar Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 4.6: Ortalama gerilim değişimi karşılaştırması.

4.3.5. Çok Amaçlı Amaç Fonksiyonu İçin En Uygun PV-Batarya Konum Analizleri

Çalışmanın bu durumunda çok amaçlı amaç fonksiyonu uygulanmıştır, bu çok amaçlı amaç fonksiyonu diğer durumların toplamının minimize edilmesi olarak özetlenebilir. Analiz sonuçlarında bir değişkenin fonksiyon sonucuna etkisi temel durum sonuçlarına bölünerek verilmiştir. Değişkenlerin katsayıları değiştirilerek bir önem sırası oluşturulabilir. Aşağıdaki şekilde verilen analiz sonuçlarında aktif-reaktif güç kayıpları ve gerilim indeksinin kat sayılarının eşit olduğu durum içindir. Çok amaçlı amaç fonksiyonun dağılımı aşağıdaki şekilde görülmektedir ve PV-Batarya sisteminin yerleştirilmesi için en uygun baranın 14. bara olduğu görülmektedir. Bu durum için günlük ortalama aktif güç kayıpları 47,57 kW, reaktif güç kayıpları 35,21 kVAR ve ortalama gerilim sapması 0,008 pu olarak hesaplanmıştır.

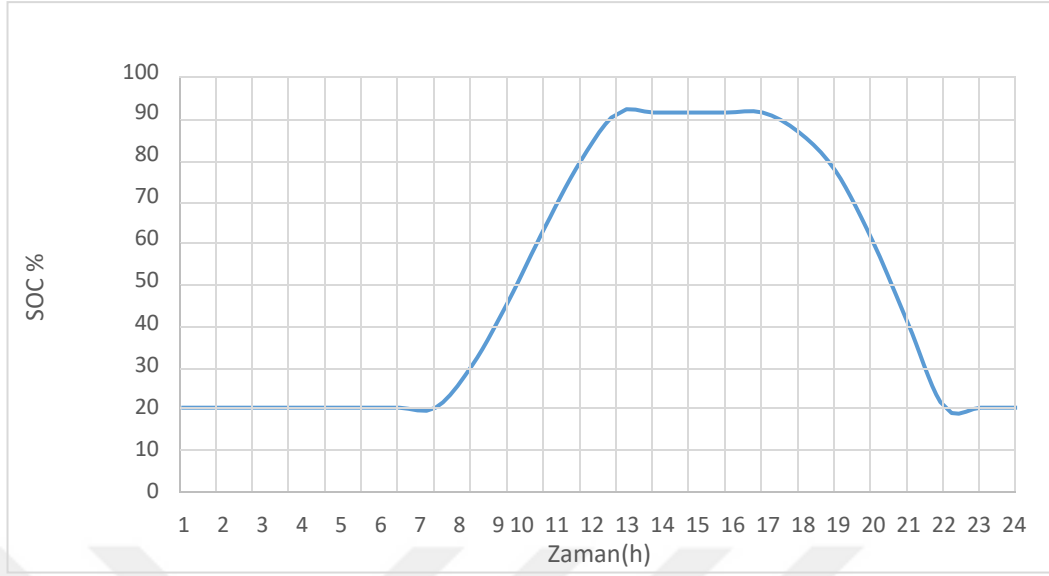


Şekil 4.7: Çok amaç fonksiyonu sonuçları.

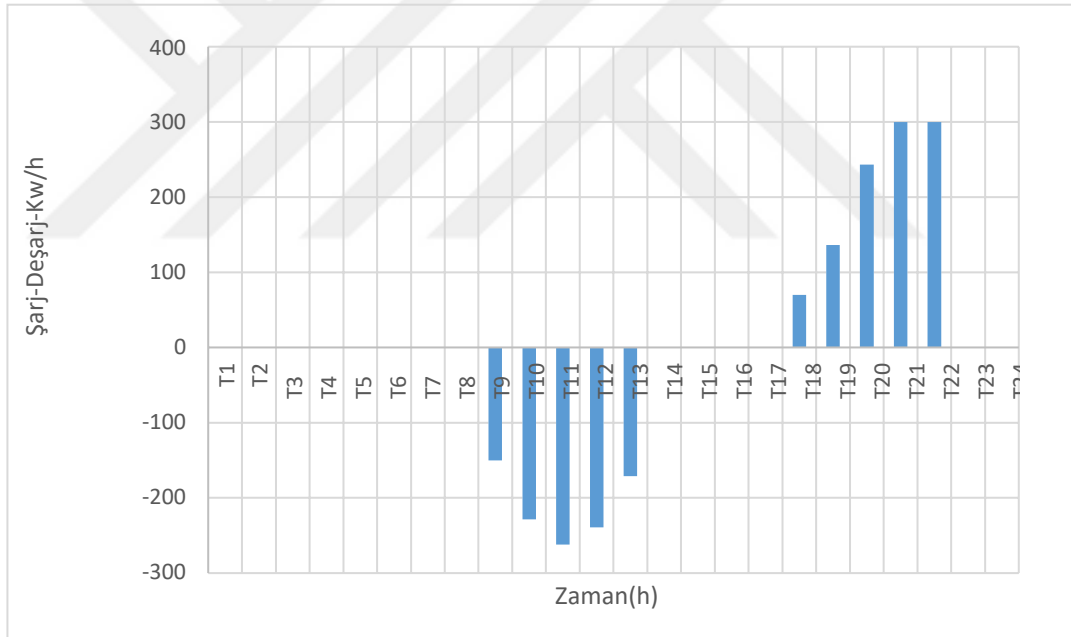
Analiz sonuçlarında batarya ve PV sistem için optimal konumun 14. bara olduğu ve batarya için optimum kapasitenin 1,5 MW, PV sistemin kapasitesi içinse 0,816 MW olduğu bulunmuştur.

4.4. Şebeke İşletim Modelinin Oluşturulması

Batarya sisteminin en uygun yerleşim ve büyüklüğünün belirlenmesi probleminde oluşturulan örnek uzayındaki her durum için aynı zamanda batarya sisteminin şarj-deşarj sürelerini de içeren şebekenin işletim modeli de oluşturulmuş, bu model Denklem 5.8 ve Denklem 5.9 verilen güç akış denklemini ve şebeke kısıtlarını sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Bulunan optimal büyüklük ve konum için elde edilen işletme modeli analiz sonuçlarında verilmiştir.



Şekil 4.8: Şarj durum grafiği.

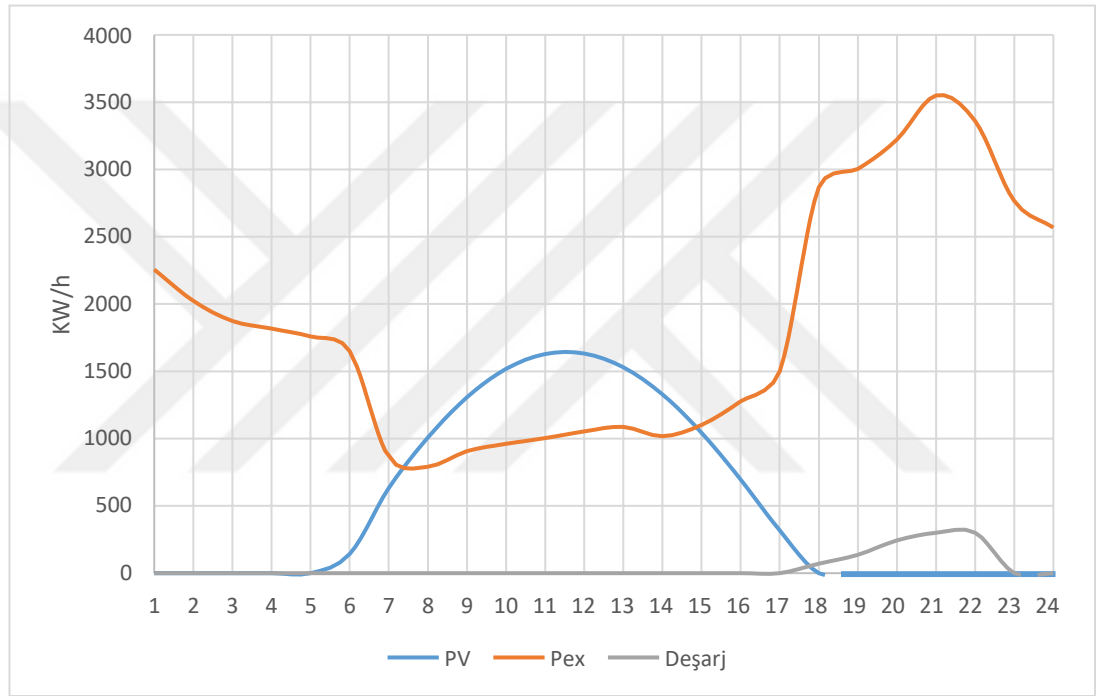


Şekil 4.9: Batarya şarj-deşarj gücü.

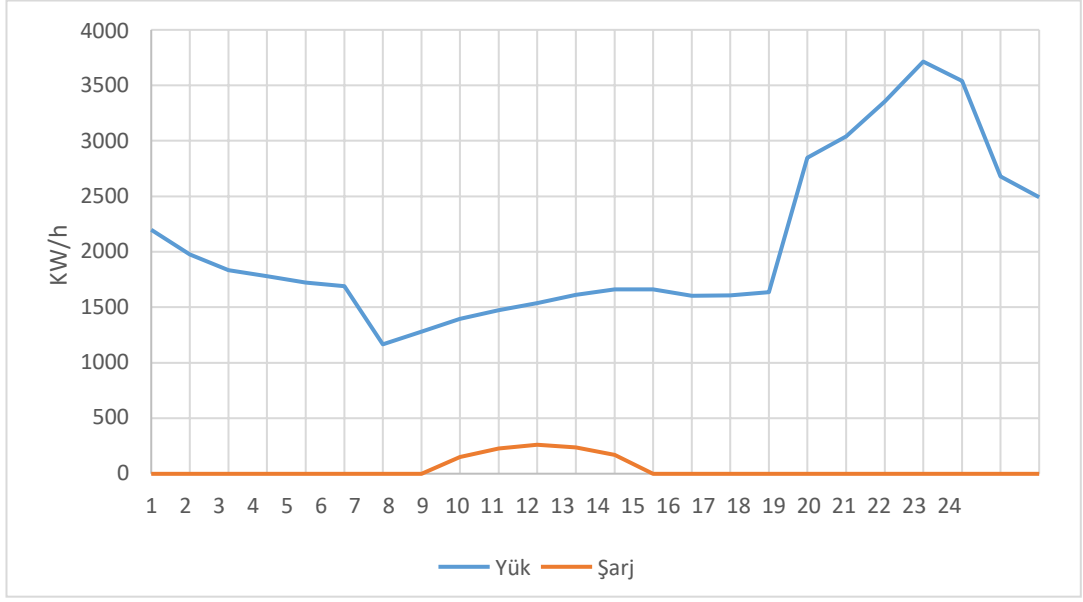
Yukarıdaki Şekil 4.8’de bataryanın doluluk oranı 24 saatlik dilim için verilmiştir. Bataryanın daha verimli kullanılabilmesi için doluluk oranı %20 ile %90 arasında sınırlandırılmıştır. Şekil 4.9’da ise 24 saatlik zaman dilimi için saatlik şarj ve deşarj güç durumu verilmiştir. Anlaşılacağı üzere öğlen saatlerinde PV üretim biriminin tepe noktalarına ulaştığı zaman dilimlerinde(T9-T10-T11-T12-T13) üretilen

talep fazlası enerji batarya biriminde depolanmış, akşam saatlerinde yükün arttığı PV üretim biriminin devreden çıktığı saatlerde(T18-T19-T20-T21-T22) ise batarya deşarj olarak talebin karşılanması için kullanılmıştır.

Şekil 4.10, Şekil 4.11’de sırasıyla sistemin üretim birimlerinin profilleri ve tüketim birimlerinin profilleri verilmiştir. Görüldüğü üzere PV biriminin üretiminin olduğu saatlerde batarya sistemi yük gibi davranarak üretilen fazla enerji depolanmış, akşam saatlerinde ise batarya birimi üretim birimi gibi davranarak talep edilen enerjiyi karşılanması için kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Üretim sistemleri ve bataryanın deşarj durumu eğrisi.



Şekil 4.11: Şebeke yükü ve batarya şarj eğrisi.

5. ANALİZ SONUÇLARI

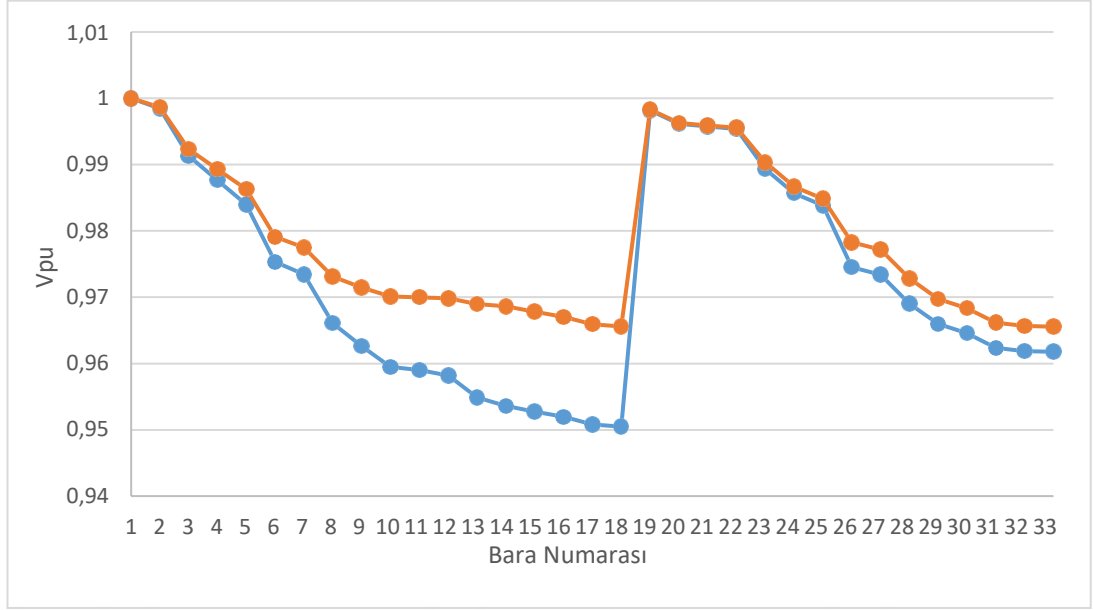
Çok amaçlı amaç fonksiyonu Denklem 5.8’de ifade edilmişti, çok amaçlı amaç fonksiyonunda her bir amaç, PV-Batarya birimi eklenmeden elde edilen temel durum sonuçlarına bölünerek fonksiyon çıktısına etkileri eşitlenmesi amaçlanmıştır. Amaç fonksiyonu çok amaçlı değil tek amaçlı olması durumunda elde edeceğimiz sonuçlar amaç fonksiyonundaki her bir parametre için tek tek hesaplanmıştır ve çok amaçlı fonksiyon sonucu ile bu üç fonksiyon durumu karşılaştırılmıştır. Toplamda dört durum için analizler yapılarak analiz sonuçlarında şebekenin aktif, reaktif güç kayıpları karşılaştırılmış ve dördüncü durum için şebekenin işletim planlaması analiz sonuçlarında verilmiştir. Sonuçlar 24 saatlik gün dilimi için ortalama değerlerdir.

Tablo 5.1: Amaç fonksiyonu durum dağılımı.

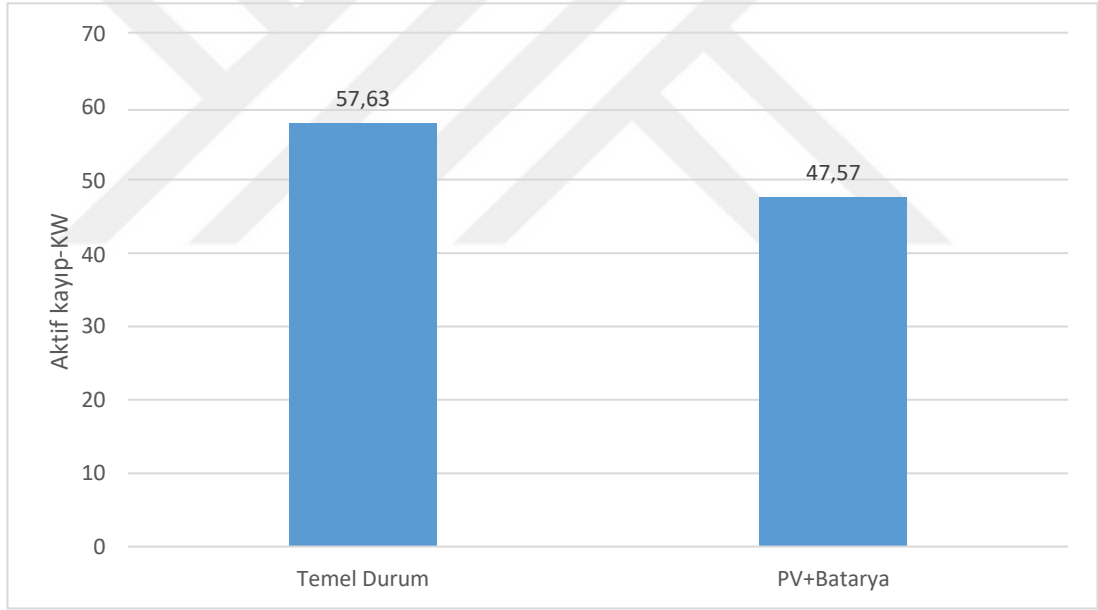
Durum	w_1	w_2	w_3
1.	1	0	0
2.	0	1	0
3.	0	0	1
4.	1/3	1/3	1/3

$$\sum_i w_i = 1$$

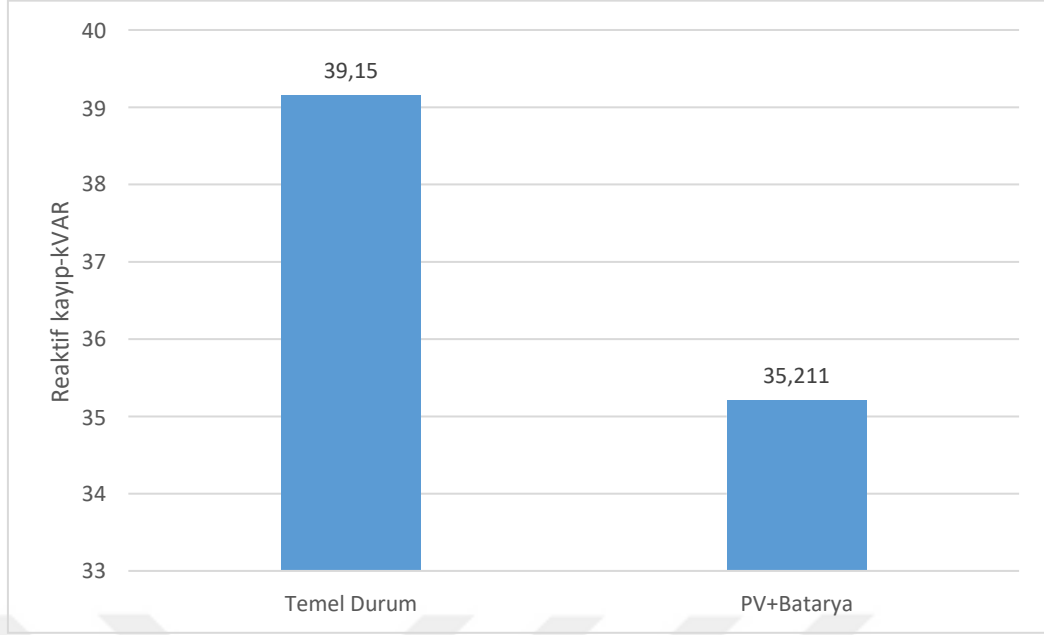
Şekil 5.1’de sistemin PV-Batarya birimi eklenmeden önceki temel durum için gerilim profili ve optimum PV-Batarya yerleştirildikten sonraki gerilim profili görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi optimum yerleşimden sonra gerilim profilinde iyileşme görülmüştür.



Şekil 5.1: Temel durum-optimal durum gerilim saptması karşılaştırması.

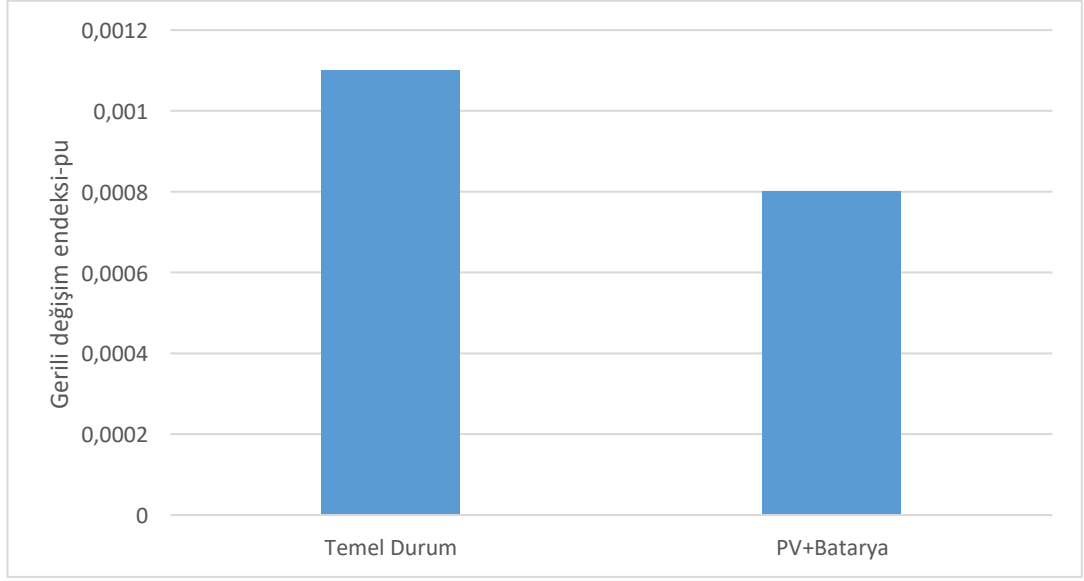


Şekil 5.2: Temel durum-optimal yerleşim durumu aktif güç kayıpları.



Şekil 5.3: Temel durum-optimal yerleşim durumu reaktif güç kayıpları.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te optimal yerleşimi yapılmış PV-Batarya sistemi ve PV-Batarya birimi yer almayan temel durum ortalama aktif ve reaktif güç kayıpları karşılaştırılmıştır. Temel durumda aktif güç kayıpları 57.63 kW seviyesindeyken optimal yerleşimi yapılmış PV-Batarya birimi içeren sistemde 47.57 kW seviyelerine düştüğü görülmektedir. Benzer şekilde reaktif güç kayıplarının da 39,15 kVAR seviyesinden 35,21 kVAR seviyesine düştüğü görülmektedir. Şekil 5.4'te ise her iki durum için gerilim sapma endeksi iki durum için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar 24 saatlik zaman dilimi ortalamalarıdır.



Şekil 5.4: Temel durum-optimal yerleşim durumu gerilim değişim endeksi.

Şekil 5.4’te depolama sistemi içermeyen temel durum için ve batarya depolamalı sistem için yapılan seviyelendirilmiş enerji maliyetleri görülmektedir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada dağıtım şebeklerinde toplam güç kayıplarını azaltmak ve gerilim profilini iyileştirmek için şebekeye dahil edilecek PV-Batarya sisteminin optimum boyutlarını ve yerleşimi belirlenmiştir, yapılan çalışmalarda 33 baralı dağıtım sistemi kullanılmıştır. Bu belirleme işlemi oluşturulan çok amaçlı bir optimizasyon fonksiyonu GAMS programında doğrusal olmayan programlama yöntemiyle çözülmüştür. Bulunan optimal batarya boyutuna ek olarak indirici merkezden tek yönlü yük akışı olacağı için talep fazlası ve depolanamayacak bir PV üretimi olmaması amaçlanarak PV sistemi için de optimal boyut belirlenmiştir. Bu işlemler yapılırken oluşturulan örnek uzayında her bir durum için şebekenin 24 saatlik işletim modeli oluşturulmuştur ve yapılan analizlerde en uygun yerleşim barasının 14. bara en uygun batarya boyutunun 1,5 MW ve en uygun PV üretim kapasitesinin 0,816 MW olduğu görülmüştür. Bu en uygun durumlar ile sistemin temel hali karşılaştırılmış, yapılan en uygun PV-Batarya birimi yerleşimi ile güç kayıplarının azaldığı ve gerilim profilinin iyileştiği görülmüştür.

Çalışmada elde edilen sonuçlardan, şebekeye optimal PV-Batarya yerleşimi yapıldığında şebekenin temel haline göre aktif güç kayıplarında %17,45 azalma, reaktif güç kayıplarında %10,06 azalma gerilim sapma endeksinde ise %27,2 oranında iyileşme görülmüştür.

Çalışma kapsamında şebekenin işletilmesi ve optimal PV-Batarya sistemi yerleştirilmesi için yapılan işlemler batarya sistemlerini teknik ve ekonomik açıdan ele almıştır. Ancak batarya sistemlerinin PV sistemlere dahil edilmesi oluşturulan PV-Batarya sisteminin yatırım, işletme ve bakım maliyetlerini değişken olabileceği ön görülmektedir. Bu sebeple PV-Batarya sistemleri ile ilgili gelecekteki çalışmalarda batarya sistemlerinin güncel maliyetlerinin dikkate alınmasını ve sadece PV-Batarya sistemi değil diğer YEK ve EDS türleri için hibrit sistemlerde benzer çalışmaların yapılması önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2017), [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA Electricity Storage Costs 2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf), (Erişim Tarihi: 01/09/2021).
- [2] Liobikienė G., Butkus M.,(2017) “The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy”, *Renew. Energy*, 106(2017), 298–309,
- [3] Howlader A. M., Sadoyama S., Roose, Chen L. R., (2019), “Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters”, *Appl. Energy*, 15(6), 235.
- [4] ResGaz 1, (2005), "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanılmasına Dair Kanun." Türkiye Büyük Millet Meclisi, 2005.
- [5] Oskouei MZ A. M., Mohammadi-Ivatloo B., (2019), “Two-Stage Stochastic Model for Optimal Scheduling of Reconfigurable Active Distribution Networks with Renewable Energy”, 2019 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Perth, WA, Australia, 10-12 December.
- [6] Atzeni I., Ordóñez L. G., Scutari G., Palomar D. P., Fonollosa J. R., (2013), “Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization”, *IEEE Trans. Smart Grid*, 4(2), 866 - 876.
- [7] Akbari H., Browne M.C., Ortega A., Huang M.J., Hewitt N.j., Norton B., McCormack S.j., (2019), “Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems”, *Sol. Energy*, 192(1), 144–168.
- [8] Saffari M., de Gracia A., Fernández C., Belusko M., Boer D., Cabeza L. F., (2018), “Optimized demand side management (DSM) of peak electricity demand by coupling low temperature thermal energy storage (TES) and solar PV”, *Appl. Energy*, 11(1), 79.
- [9] European Commission, (2013), “Energy storage – the role of electricity”, Commission Staff Working Document, 1–25.
- [10] Web 2, (2020), https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Five_steps_to_energy_storage_v301.pdf, (Erişim tarihi: 30/01/2023).
- [11] Nadeem F., Member S., Hussain S. M. S., (2019), “Comparative Review of Energy Storage Systems , Their Roles and Impacts on Future Power Systems”, *IEEE Access*, 4(2), 1401-1407.
- [12] Web 3, (2021), https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM_Final_Report_05-Nov-2019.pdf, (Erişim Tarihi 01/09/2021).

- [13] Harnandez R.R, Easter S.B., Mariscal M.M, Maestre F.T., (2014), “Environmental impacts of utility-scale solar energy”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 29(32), 766–779.
- [14] Shahsavari A., Akbari M., (2018), “Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions”, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90(2017), 275–291.
- [15] Nor N. M., Ali A., Ibrahim T., Romlie M. F., (2017), “Battery Storage for the Utility-Scale Distributed Photovoltaic Generations”, *IEEE Access*, 6(1), 1137–1154.
- [16] Zakeri B., Syri S., (2015), “Electrical energy storage systems : A comparative life cycle cost analysis”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 42(2015), 569–596.
- [17] Web 4, (2021), http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6297498, (Erişim Tarihi 01/09/2021).
- [18] Aghajani G. R., Shayanfar H. A., Shayeghi H., (2019), “Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response”, *Energy*, 126(2017), 622–637.
- [19] Li D., Chiu W. Y., Sun H., Poor H. V., (2018), “Multiobjective optimization for demand side management program in smart grid”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 14(4), 482 - 1490.
- [20] Krishan O., Suhag S., (2019), “An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources”, *Int. J. Energy Res*, 43(15), 248-434.
- [21] Koohi-Fayegh S., Rosen M. A., (2020), “A review of energy storage types, applications and recent developments”, *J. Energy Storage*, 27(2020), 298-309.
- [22] Zheng Y., Hill D. J., Dong Z. Y., (2017), “Multi-Agent Optimal Allocation of Energy Storage Systems in Distribution Systems”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 91(2018), 1205-1230.
- [23] Groppi D., Pfeifer A., Garcia D. A., Krajačić G., Duić N., (2021), “A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 135(2021), 1401-1407.
- [24] Guo P., Li V. O. K., Lam J. C. K., (2017), “Smart demand response in China: Challenges and drivers”, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 107(2017), 1-10.
- [25] Mlecnik E., Parker J., Ma Z., Corchero C., Knotzer A., Perneti R., (2019), “Policy challenges for the development of energy flexibility service”, *Energy Policy*, 137(2020), 14-19.

- [26] Whittingham B. M. S., (2012), “WhittinghamIEEE2012energystorage”, Proc. IEEE, 100, 1518–1534.
- [27] Motalleb M., Reihani E., Ghorbani R., (2016), “Optimal placement and sizing of the storage supporting transmission and distribution networks”, Renew. Energy, 94, 651–659.
- [28] Matthiss B., Momenifarahani A., Binder J., (2021), “Storage placement and sizing in a distribution grid with high pv generation”, Energies, 14, 1–10.
- [29] Lata P., Vadhera S., (2020), “Optimal placement and sizing of energy storage systems to improve the reliability of hybrid power distribution network with renewable energy sources”, J. Stat. Manag. Syst., 23(1), 17–31.
- [30] Akbari-Dibavar A., Zare K., Nojavan S., (2019), “A hybrid stochastic-robust optimization approach for energy storage arbitrage in day-ahead and real-time markets”, Sustain. Cities Soc., 49(2019), 101600.
- [31] Tu, Z. Yin, Y. Xu, (2018), “Study on the evaluation index system and evaluation method of voltage stability of distribution network with high DG penetration”, Energies, 11(1), 79.
- [32] Gözel T., (2009), “Dağıtım Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerinin Yerleştirilmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [33] Le X., Pedro M., Luis F.M.F., Juhuna L., Bruce K., N.pum P., (2010), “Wind Integration in Power Systems: Operational Challenges and Possible Solutions”, Proc. IEEE, 99(1), 214–232.
- [34] Varaiya P. P., Wu F. F., Bialek J. W., (2010), “Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch”, Proc. IEEE, 99(1), 40–57.
- [35] Teleke S., Baran M. E., Huang A. Q., Bhattacharya S., Anderson L., (2009), “Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching”, IEEE Trans. Energy Convers., 24(3), 725–732.
- [36] Sa S., (2020), “Energy storage domain roles & classification”, Technical Report no: European Union's Horizon 2020 research and innovation programme 645963.
- [37] Ersen Akdeniz E. A. Y., Adnan Kaypmaz, (2006),“Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi”, EMO Bilim. Dergi, 5(2), 2–6.
- [38] Huan Z., Hu L., Guojing L., Yi G., Jing S., Hai L., Ning Z., (2020), “Energy storage in high renewable penetration power systems: Technologies, applications, supporting policies and suggestions”, CSEE J. Power Energy Syst, 4(2), 1-9.

- [39] Zheng M., Meinrenken C. J., Lackner K. S., (2015), “Smart households: Dispatch strategies and economic analysis of distributed energy storage for residential peak shaving”, *Appl. Energy*, 147(2015), 246–257.
- [40] Sigrist L., Lobato E., and Rouco L., (2013), “Energy storage systems providing primary reserve and peak shaving in small isolated power systems: An economic assessment”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, 53, 675–683.
- [41] Sarkar J., Bhattacharyya S., (2012), “Application of graphene and graphene-based materials in clean energy-related devices Minghui”, *Arch. Thermodyn.*, 116, 23–40.
- [42] Nazaripouya, H.; Wang, Y.; Chu, P.; Pota, H.R.; Gadh, R. "Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation." In *Proceedings of the 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 26–30 July*, 1–5.
- [43] Mongird K., Fotedar V., Viswanathan V, Koritarov P., Balducci B., Hadjerioua J., (2019), “Energy Storage Technology and Cost Characterization Report”, Department of Energy, Technical Report no: PNNL-28866.
- [44] Sahay K., Dwivedi B., (2009), “Supercapacitors energy storage system for power quality improvement: An overview”, *J. Electr. Syst*, 5(4), 1-8.
- [45] Zhang F., Zhao P., Niu M., Maddy J., (2016), “The survey of key technologies in hydrogen energy storage”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41(33), 14535–14552.
- [46] Web 4, (2018), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf, (Erişim Tarihi: 01/009/2021).
- [47] Oskouei MZ., Şeker AA., Tunçel S., Demirbaş E., Gözel T., Hocoğlu MH., Abapour M., Mohammadi-Ivatloo B., (2022) “A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network”, *Journal of sustainability*, 14(4), 2110.
- [48] Das C. K., Bass O., Kothapalli G., Mahmoud T. S., Habibi D., (2018), “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, 91(2018), 1205–1230.
- [49] AL Shaqsi A. Z., Sopian K., Al-Hinai A., (2020), “ Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits”, Elsevier, *Energy Reviews*, 6(7), 288-306.
- [50] Michiorri A., Pelaez M. G., Bessa R., Gouveia C., Urteaga L. C., and Rautiainen T., (2015), “Energy storage domain roles & classification”, Technical Report no: European Research and innovation programme 645963.

- [51] Maltaş M., (2017), “Manisa İli İçin 1 MW Güneş Enerjisi Sanralı Fizibilitesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi
- [52] Oğuz M., Akkurt Ş., (2017), “Kayseri İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli”, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6, 362–374.
- [53] Keskin E., (2012), “The Design and Economical Analysis of Pv Power Systems in Turkey ’ S Climate Conditions” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- [54] Lai C. S., McCulloch M. D., (2017), “Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage”, Appl. Energy, 190(2017), 191–203.
- [55] Yang H., Wei Z., Chengzhi L., (2009), “Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system,” Appl. Energy, 86(2), 163–169.
- [56] Xu L., Ruan X., Mao C., Zhang B., Luo Y., (2013), “An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system”, IEEE Trans. Sustain. Elsevier Energy, 4(3), 774–785.
- [57] Chen S. X., Gooi H. B., (2010), “Sizing of energy storage system for microgrids”, IEEE Transactions on Smart Grid,3(1), 142-151 .
- [59] Nojavan S., Majidi M., Esfetanaj N. N., (2017), “An efficient cost-reliability optimization model for optimal siting and sizing of energy storage system in a microgrid in the presence of responsible load management”, Elsevier Energy, 139(15), 89–97.
- [60] Grover-Silva E., Girard R., Kariniotakis G., (2018), “Optimal sizing and placement of distribution grid connected battery systems through an SOCP optimal power flow algorithm”, Appl. Energy, 219(2018), 385–393.
- [61] Yang H., Zhou W., Lu L., Fang Z., (2008), “Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm”, Sol. Energy, 82(4), 354–367.
- [62] Lu B., Shahidehpour M., (2005), “Short-term scheduling of battery in a grid-connected PV/battery system”, IEEE Trans. Power Syst, 20(2), 1053–1061.
- [63] Riffonneau Y., Bacha S., Barruel F., Ploix S., (2011), “Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries”, IEEE Trans. Sustain. Energy, 2(3), 309–320.
- [64] Li J., Danzer M. A., (2014), “Optimal charge control strategies for stationary photovoltaic battery systems”, J. Power Sources, 258, 365–373.
- [65] Tunçel S., Seker A. A., Oskouei M. Z., Gozel T., Mohammadi-Ivatloo B., Abapour M., (2021), “Optimal scheduling of ESS in distribution system with multiple DG”, 2021 13th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. ELECO 2021, Bursa, Turkey, 25-27 November.

- [66] Öztürk A., Tosun S., Erdoğan P., Hasırcı U., (2009), “Elektrik Enerji Dağıtım Sisteminde Ekonomik Aktif Güç Dağıtımının Genetik Algoritma İle Belirlenmesi”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimar. Fakültesi Derg., 3, 185–197.
- [67] Gopiya Naik S., Khatod D. K., Sharma M. P., (2013), “Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks”, Int. J. Electr. Power Energy Syst, 53, 967–973.
- [68] Yuan H., Li F., Wei Y., Zhu J., (2018), “Novel linearized power flow and linearized OPF models for active distribution networks with application in distribution LMP”, IEEE Trans. Smart Grid, 9(1), 438–448.
- [69] Schill W., (2014), “Residual load , renewable surplus generation and storage requirements”, Energy Policy, 73, 65–79.
- [70] Poonpun P., Member S., Jewell W. T., (2008), “Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 23(2), 529–534.
- [71] Lai C. S., McCulloch M. D., (2017)“Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage”, Appl. Energy, 190(15), 191–203.
- [72] WEB 5, <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/tuketim/profil-katsayilari/carpan-degeri.xhtml>, (Erişim Tarihi:01.02.2023).
- [73] WEB 6, <http://www.eseslab.com/ESsensePages/PHS-page>, (Erişim Tarihi: 01.02.2023).
- [74] WEB 7, <https://www.greenoptimistic.com/mechanical-battery-flywheel>, (Erişim Tarihi: 01.02.2023).
- [75] WEB 8, <https://www.tkd.gov.tr/Content/File/Ipard/IPARD%20II%20Prog-mod7-10th%20call.pdf>, (Erişim Tarihi: 01.02.2023).

ÖZGEÇMİŞ

Emin Demirbaş. 2012 yılında başladığı Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2017 yılında başarıyla tamamlayarak 2018 yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2022 yılı itibariyle Yokogawa Türkiye şirketinde otomasyon kontrol mühendisi olarak çalışmaktadır.



EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Oskouei, M.Z.; Şeker, A.A.; Tunçel, S.; Demirbaş, E.; Gözel, T.; Hocaoğlu, M.H.; Abapour, M.; Mohammadi-Ivatloo, B. A, (2022), “Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network.”, Sustainability, 14(4), 2110.

T.Gözel., S.Tuncel., E.Demirbaş., (2021) “Determining the Optimal Size and Location of Battery Systems in the Distribution System” International Imascon Sciences Congress, Kocaeli, Turkey, 10-13 December.

Ek B: Test Dağıtım Sisteminin Hat ve Yük Bilgileri

Tablo B1.1: 33-baralı test dağıtım sisteminin hat ve yük bilgileri.

Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
			R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	0,0575	0,0293	0,1000	0,0600
2	2	3	0,3076	0,1566	0,0900	0,0400
3	3	4	0,2284	0,1163	0,1200	0,0800
4	4	5	0,2378	0,1211	0,0600	0,0300
5	5	6	0,5110	0,4411	0,0600	0,0200
6	6	7	0,1168	0,3861	0,2000	0,1000
7	7	8	1,0680	0,7710	0,2000	0,1000
8	8	9	0,6426	0,4617	0,0600	0,0200
9	9	10	0,6514	0,4617	0,0600	0,0200
10	10	11	0,1227	0,0406	0,0400	0,0300
11	11	12	0,2336	0,0772	0,0600	0,0350
12	12	13	0,9159	0,7206	0,0600	0,0350
13	13	14	0,3379	0,4448	0,1200	0,0800
14	14	15	0,3687	0,3282	0,0600	0,0100
15	15	16	0,4656	0,3400	0,0600	0,0200

Tablo B1.1: Devam

16	16	17	0,8042	1,0738	0,0600	0,0200
17	17	18	0,4567	0,3581	0,0900	0,0400
18	18	19	0,1023	0,0976	0,0900	0,0400
19	19	20	0,9385	0,8457	0,0900	0,0400
20	20	21	0,2555	0,2985	0,0900	0,0400
21	21	22	0,4423	0,5848	0,0900	0,0400
22	22	23	0,2815	0,1924	0,0900	0,0500
23	23	24	0,5603	0,4424	0,4200	0,2000
24	24	25	0,5590	0,4374	0,4200	0,2000
25	25	26	0,1267	0,0645	0,0600	0,0250
26	26	27	0,1773	0,0903	0,0600	0,0250
27	27	28	0,6607	0,5826	0,0600	0,0200
28	28	29	0,5018	0,4371	0,1200	0,0700
29	29	30	0,3166	0,1613	0,2000	0,6000
30	30	31	0,6080	0,6008	0,1500	0,0700
31	31	32	0,1937	0,2258	0,2100	0,1000