

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE YENİLEBİLİR ENERJİYE
DAYALI REZERV OPTİMİZASYONU

Serdal ATİÇ

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Ercan İZGİ

Eş Danışman

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

Mayıs, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE YENİLEBİLİR ENERJİYE
DAYALI REZERV OPTİMİZASYONU

Serdal ATİÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 02.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ercan İZGİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR
Batman Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ercan İZGİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doc. Dr. Recep Yumurtacı, Üye
Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doc. Dr. Altuğ Bozkurt, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kürşat AYAN, Üye
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Ercan İZGİ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Güç Sistemlerinde Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Rezerv Optimizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serdal ATİÇ





Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ercan İZGİ'ye teşekkür ederim. Çalışma alanımdaki uzmanlığı ile sorduğum her detaya titizlikle yanıt veren değerli eş danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR'e teşekkür ederim. Ayrıca destek ve katkılarından dolayı çalışma arkadaşım Sayın Dr. Emre ERKAN'a teşekkür ederim.

Serdal ATİÇ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iiiv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Motivasyonu ve Kapsamı	1
1.2 Literatür Özeti	2
1.3 Orjinal Katkı	8
2 ELEKTRİK PİYASALARI, FREKANS KONTROLÜ VE GÜVENİLİRLİK	10
2.1 Giriş.....	10
2.2 Elektrik Piyasaları	11
2.3 Frekans Kontrolü.....	23
2.4 Güç Sistemlerinde Güvenilirlik	27
3 KESİNTİLİ YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	29
3.1 Giriş.....	29
3.2 Rüzgâr Enerji Sistemleri	30
3.3 Güneş Enerji Sistemleri	38
4 ÜRETİLEN VE TÜKETİLEN ELEKTRİK GÜCÜ TAHMİNLERİ İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER	48
4.1 Giriş.....	48
4.2 Kullanılan Tahmin Yöntemleri	48
4.3 Veri Kaynakları ve Veri Ön İşleme	52
4.4 Tahmin için Kullanılacak Parametrelerin Belirlenmesi.....	55
4.5 Kullanılan Tahmin Yöntemlerine İlişki Sinir Ağı Yapıları	59
4.6 Hata Ölçüm Metrikleri	64
4.7 Uygulama Sonuçları.....	65
4.8 Değerlendirmeler	73
5 SAĞLANAMAYAN GÜÇ BEKLENTİSİ BAĞINTISI VE AKILLI REZERV PLANLAMASI YAKLAŞIMI	75

5.1 Giriş.....	75
5.2 Sağlanamayan Güç Beklentisi Bağıntısı	75
5.3 Akıllı Rezerv Planlaması Yaklaşımı	77
5.4 Uygulama Sonuçları.....	80
5.5 Değerlendirmeler	85
6 SONUÇ	87
KAYNAKÇA	90
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	99



SİMGE LİSTESİ

V_{oc}	Açık devre gerilimi
v'	Anlık rüzgâr hızı dalgalanması
v	Anlık rüzgâr hızı
$CuInSe_2$	Bakır indiyum di-selenid
$\bar{v}$	Belirli zaman aralıklarındaki ortalama rüzgâr hızı
k_B	Boltzmann sabiti
p	Bölgesel hava basıncı
D	Dünyanın çapı
q	Elektron yükü
E_g	Elektronları serbest bırakmak için gerekli olan enerji miktarı
$GaAs$	Galyum arsenit
G	Gaz sabiti
C_o	Geleneksel üretim birimlerinin işletme maliyeti
C_r	Geleneksel üretim birimlerinin rezerv sağlama maliyeti
x_i	Gerçek değer
$\bar{x}_i$	Gerçek değerlerin ortalaması
l_A	Gerçek tüketilen güç
Ge	Germanyum
α	Güç aktarılamayan tüketicilerin olup olmadığını gösteren değişken
SGB_{max}	Güç sistemi yöneticisinin belirlediği güvenilirlik sınır değeri
$\eta_u P_s$	Güneş ışıınının ürettiği elektron-delik çiftlerinin gücü
I	Güneş pili akımı
V	Güneş pilindeki gerilim
P_s	Güneş pilinin aldığı güneş ışıını gücü
I_{sc}	Güneş pilinin maksimum kısa devre akımı
T	Hava sıcaklığı
τ	Hava yoğunluğu
$CdTe$	Kadmiyum tellür
KYD	Kayıp yük değeri
P_r	Konvansiyonel üretim ünitelerinden elde edilen toplam rezerv
P_t	Konvansiyonel üretim ünitelerinin toplam güç çıkışı
$KOKH$	Kök ortalama karesel hata

OKH	Ortalama karesel hata
OMH	Ortalama mutlak hata
$OMYH$	Ortalama mutlak yüzde hata
λ	Ortalama rüzgâr hızıyla yakından ilişkili olan ölçek faktörü
n	Örnek sayısı
R^2	R-kare
P_w	Rüzgâr gücü
σ_v	Rüzgâr hızına ilişkin standart sapma
∂	Rüzgâr kesme katsayısı
r	Rüzgâr türbini göbeğinin yarıçapı
l	Rüzgâr türbini kanatlarının uzunluğu
A	Rüzgâr türbininin kanat süpürme alanı
m	Rüzgâr türbininin kanatlarını hareket ettirecek rüzgâr kütlesi
I	Rüzgâr türbülansı yoğunluğu
E_k	Rüzgârın kinetik enerjisi
SGB	Sağlanamayan güç beklentisi
Si	Silisyum
x_i^*	Tahmin edilen değer
w_f	Tahmin edilen rüzgâr gücü
$THGK$	Tahmin hatalarının güç kapasitesi
I_0	Ters akım doyum akımı
TiO_2	Titanyum di-oksit
W_l	Toplam kurulu rüzgâr gücü
TM	Toplam maliyet
k	Tüketilen güç tahmin aracının doğruluk yüzdesi
P_l^f	Tüketilen güç tahmini
$OMYH_l$	Tüketilen güç tahmini için ortalama mutlak yüzde hata
σ_l	Tüketilen güç tahminine ilişkin standart sapma
P_s^f	Üretilen güneş gücü tahmini
$OMYH_s$	Üretilen güneş gücü tahmini için ortalama mutlak yüzde hata
P_w^f	Üretilen rüzgâr gücü tahmini
$OMYH_w$	Üretilen rüzgâr gücü tahmini için ortalama mutlak yüzde hata
σ_w	Üretilen rüzgâr gücü tahminine ilişkin standart sapma
X_{actual}	Veri setleri için gerçek değer

N_{min}	Veri setleri için normalizasyon aralığının en küçük değeri
N_{max}	Veri setleri için normalizasyon aralığının en yüksek değeri
X_{scaled}	Veri setleri için normalleştirilmiş değer
X_{max}	Veri setlerindeki parametreler için en büyük değer
X_{min}	Veri setlerindeki parametreler için en küçük değer
k	Weibull dağılımı genişliğinin bir ölçümü olan şekil faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
p_0	Yerdeki hava basıncı
T_0	Yerdeki sıcaklık
g_0	Yerdeki yerçekimi ivmesi
z	Yeryüzüne olan uzaklık
z_0	$v(z_0)$ rüzgâr hızı için referans yükseklik

KISALTMA LİSTESİ

ARP	Akıllı Rezerv Planlaması
ATK	Anlık Talep Kontrol
BR	Bekleme Rezervi
ÇKA	Çok Katmanlı Algılayıcı
DGP	Dengeleme Güç Piyasası
EGS	Elektrik Güç Sistemleri
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EPO	Elektrik Piyasası Operatörü
ESA	Evrişimsel Sinir Ağı
GİP	Gün İçi Piyasası
GÖP	Gün Öncesi Piyasası
GSO	Güç Sistemi Operatörü
KOKH	Kök Ortalama Karesel Hata
KYD	Kayıp Yük Değeri
KYEK	Kesintili Yenilenebilir Enerji Kaynakları
MERRA-2	Küresel Modelleme ve Asimilasyon Ofisi
OKH	Ortalama Karesel Hata
OMH	Ortalama Mutlak Hata
OMYH	Ortalama Mutlak Yüzde Hata
OÜK	Otomatik Üretim Kontrolü
PFKÜ	Primer Frekans Kontrol Ünitesi
PK	Piyasa Katılımcıları
PTF	Piyasa Takas Fiyatı
PTM	Piyasa Takas Miktarı
SFKÜ	Sekonder Frekans Kontrol Ünitesi
SGB	Sağlanamayan Güç Beklentisi
SMF	Sistem Marjinal Fiyatı
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TFKÜ	Tersiyer Frekans Kontrol Ünitesi
TG	Tüketilen Güç
THGK	Tahmin Hatalarının Güç Kapasitesi
TSA	Tekrarlayan Sinir Ağı

UKSB	Uzun-Kısa Süreli Bellek
ÜGG	Üretilen Güneş Gücü
ÜRG	Üretilen Rüzgâr Gücü
VEP	Vadeli Elektrik Piyasası
YAL	Yük Alma
YAT	Yük Atma
YEK-G	Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti Piyasası
YH	Yan Hizmetler
YSA	Yapay Sinir Ağı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Elektrik piyasaları işleyiş yapısı.....	13
Şekil 2.2	PTF'nin belirlenmesi.....	16
Şekil 2.3	YAL ve YAT teklifleri.....	18
Şekil 2.4	Sistem marjinal fiyatı.....	53
Şekil 2.5	Güç sistemlerinde frekans kontrolü şeması.....	53
Şekil 2.6	Frekans kontrolüne ilişkin hizmetlerin aşama sıralaması.....	25
Şekil 3.1	Farklı ortalama rüzgâr hızlarına ilişkin Weibull dağılımları.....	33
Şekil 3.2	Rüzgâr gülü diyagramı.....	34
Şekil 3.3	Güneş pilleri için yaygın olarak kullanılan yarı iletkenlerin absorpsiyon spektrumları.....	40
Şekil 3.4	Güneş pili ile elektrik gücünün üretilmesi.....	41
Şekil 3.5	Solar hücre elektriksel eşdeğer devresi.....	42
Şekil 3.6	Güneş pili teknolojilerinin sınıflandırılması.....	44
Şekil 4.1	ÇKA yöntemine ilişkin şematik algoritma.....	50
Şekil 4.2	Uzun-Kısa Süreli Bellek hücresi.....	51
Şekil 4.3	ESA yöntemine ilişkin ağ yapısı.....	52
Şekil 4.4	Modellenen rüzgâr enerjisi santrali konumu.....	53
Şekil 4.5	Modellenen güneş enerjisi santrali konumu.....	53
Şekil 4.6	TG tahmini için korelasyon matrisi.....	55
Şekil 4.7	ÜRG tahmini için korelasyon matrisi.....	56
Şekil 4.8	ÜRG tahmini için çıkışa etkisi az olan parametrelerin çıkarıldığı korelasyon matrisi.....	56
Şekil 4.9	ÜGG tahmini için korelasyon matrisi.....	57
Şekil 4.10	ÜGG tahmini için çıkışa etkisi az olan parametrelerin çıkarıldığı korelasyon matrisi.....	58
Şekil 4.11	TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için ÇKA algoritmasına ilişkin ağ yapısı.....	60
Şekil 4.12	TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için UKSB algoritmasına ilişkin ağ yapısı.....	62
Şekil 4.13	TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için ESA algoritmasına ilişkin ağ yapısı.....	64
Şekil 4.14	TG tahmini için ÇKA modelinin eğitim süreci eğrileri.....	66
Şekil 4.15	TG tahmini için UKSB modelinin eğitim süreci eğrileri.....	66
Şekil 4.16	TG tahmini için ESA modelinin eğitim süreci eğrileri.....	67

Şekil 4.17 ÜRG tahmini için ÇKA modelinin eğitim süreci eğrileri	67
Şekil 4.18 ÜRG tahmini için UKSB modelinin eğitim süreci eğrileri	68
Şekil 4.19 ÜRG tahmini için ESA modelinin eğitim süreci eğrileri	68
Şekil 4.20 ÜGG tahmini için ÇKA modelinin eğitim süreci eğrileri	69
Şekil 4.21 ÜGG tahmini için UKSB modelinin eğitim süreci eğrileri	69
Şekil 4.22 ÜGG tahmini için ESA modelinin eğitim süreci eğrileri	69
Şekil 4.23 TG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin doğruluk karşılaştırması	70
Şekil 4.24 ÜRG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin doğruluk karşılaştırması	71
Şekil 4.25 ÜGG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin doğruluk karşılaştırması	71
Şekil 5.1 THGK denklemine ilişkin akış şeması.....	76
Şekil 5.2 ARP yaklaşımına ilişkin akış şeması.....	79
Şekil 5.3 Tahmin yöntemlerine göre rezerv gerekliliği eğrileri	81
Şekil 5.4 Tahmin yöntemlerine göre toplam maliyet eğrileri.....	81
Şekil 5.5 Farklı KYEK penetrasyon seviyelerine göre rezerv gerekliliği eğrileri.	82
Şekil 5.6 Farklı KYEK penetrasyon seviyelerine göre toplam maliyet eğrileri....	83
Şekil 5.7 Farklı SGB_{max} değerleri için rezerv gerekliliği eğrileri	84
Şekil 5.8 Farklı SGB_{max} değerleri için oluşan toplam maliyet eğrileri.....	84

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 YAL ve YAT talimatları sonucunda oluşan net hacim.....	19
Tablo 2.2 Temel yan hizmetler ve özellikleri	21
Tablo 3.1 Türkiye'nin farklı bölgelerindeki yıllık ortalama rüzgâr hızları.....	31
Tablo 3.2 Rüzgâr gücü yoğunluk sınıflandırması	38
Tablo 4.1 ÇKA algoritmasına ilişkin sinir ağı yapısı.....	60
Tablo 4.2 UKSB algoritmasına ilişkin sinir ağı yapısı	61
Tablo 4.3 ESA algoritmasına ilişkin sinir ağı yapısı.....	62
Tablo 4.4 Tahminlere ilişkin hata metrikleri değerleri	72



Güç Sistemlerinde Yenilebilir Enerjiye Dayalı Rezerv Optimizasyonu

Serdal ATİÇ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ercan İZGİ

Eş-Danışman: Doç. Dr. Mehmet Rıdâ TÜR

Elektrik güç sistemlerinin işletilmesinde tüketilen enerji, üretilen enerji ile karşılanarak, frekans dengede tutulmakta ve arz güvenilirliği sağlanmaktadır. Bu dengenin sürekli olarak sağlanabilmesi için güç sistemine bağlı üretim birimlerinin üretim kapasitelerine ek olarak her an devreye alabilecekleri belirli bir miktarda rezerv tutmaları gerekmektedir. Bu rezervler ile oluşabilecek beklenmedik durumlar nedeniyle tüketiciye aktarılamayan enerji miktarının azalması sağlanmaktadır. Rezerv miktarının yüksek tutulması ile rezerv sağlama maliyeti artmakta; düşük tutulması ile de tüketiciye sağlanamayan enerji miktarı artmaktadır. Bu nedenle elektrik güç sistemlerinin ekonomik ve güvenilir bir şekilde işletilebilmesi için optimum rezerv miktarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Ayrıca güç sistemlerindeki kullanımları hızlı bir şekilde artmaya devam eden rüzgâr ve güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güçteki belirsizlik ve değişkenlik de rezerv miktarının belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Bu kaynakların kurulu güçteki payı arttıkça, güç sistemlerinin işletilmesinin karmaşıklığı da artmaktadır. Bu durum, güç sistemlerinde üretim ve tüketim dengesinin sağlanması amacıyla gereken rezerv kapasitesinin

belirlenmesine yönelik yeni yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir.

Rüzgâr ve güneş gibi kesintili yenilenebilir üretim kaynaklarından elde edilen gücün doğru tahmini, bu kaynakların elektrik güç sistemlerine dâhil edilebilmesi için oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında, elektrik güç sistemleri için bir güvenilirlik kriteri olan sağlanamayan güç beklentisi bağıntısı, kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen güç ve güç sisteminde tüketilen güç tahmin hatalarını dikkate alan yeni bir yaklaşımla geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımda ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleriyle yapılan üretilen rüzgâr ve güneş gücü ile güç sisteminde tüketilen güç tahminleri sağlanamayan güç beklentisi bağıntısına dâhil edilmiştir. Bu amaçla, tahmin doğruluğunu ölçen hata parametrelerinden biri olan, ortalama mutlak yüzde hata değeri kullanılmıştır. Geliştirilen sağlanamayan güç beklentisi bağıntısı, çalışmada önerilen akıllı rezerv planlaması yaklaşımında kullanılmıştır.

Tahmin için kullanılan çok katmanlı algılayıcı, uzun-kısa süreli bellek ve evrimsel sinir ağı yöntemleri ile başarılı tahmin sonuçları elde edilmiş ve bu sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı yöntemler ile yapılan tahminler için akıllı rezerv planlaması yaklaşımı kullanılarak; tahmin doğruluğunun, rezerv gerekliliği ve toplam maliyetle ilişkisi ortaya konulmuştur. Tahmin yöntemleri arasında en doğru sonucu sağlayan evrimsel sinir ağı yöntemi ile akıllı rezerv planlaması yaklaşımı kullanılarak; kesintili yenilenebilir enerji kaynağı penetrasyon miktarının, rezerv gerekliliği ve toplam maliyete etkisi incelenmiştir. Güç sistemi yöneticisi tarafından belirlenen, sistem güvenilirliği için izin verilen en yüksek sağlanamayan güç beklentisi değerinin arttırılmasının, yani sistem güvenilirliğinin azaltılmasının, rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkisi açıklanmıştır. Bu çalışmada, güneş ve rüzgâr gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine dâhil olması için faydalı bir öneri sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında öncelikle elektrik enerji piyasalarının yapısı ve işleyişi hakkında bilgilere yer verilmiş, frekans kontrolü için sağlanan hizmetlerden bahsedilmiş ve güvenilirlik kavramı açıklanmıştır. Sonrasında rüzgâr ve güneş enerji sistemlerine ilişkin temel kavramlara yer verilmiştir. Sonraki bölümde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen güç ve tüketilen güç tahminleri için kullanılan yöntemler açıklanmış ve bu yöntemlerle elde edilen tahminlere ilişkin

sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak tez çalışmasında önerilen akıllı rezerv planlaması yaklaşımı açıklanmış ve önerilen yaklaşım kullanılarak örnek güç sistemi için elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, sağlanamayan g beklentisi, güvenilirlik, rezerv optimizasyonu, makine ęrenimi.



Reserve Optimization Based on Renewable Energy in Power Systems

Serdal ATİÇ

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ercan İZGİ

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Rıdâ TÜR

The energy consumed in the operation of electrical power systems is met by the energy produced, keeping the frequency balanced and ensuring supply reliability. In order to ensure this balance continuously, the production units connected to the power system must keep a certain amount of reserves that they can put into operation at any time, in addition to their production capacity. These reserves reduce the amount of energy that cannot be transferred to the consumer due to unexpected situations that may occur. By keeping the reserve amount high, the cost of providing reserves increases, and by keeping it low, the amount of energy that cannot be provided to the consumer increases. Therefore, it is very important to determine the optimum reserve amount in order to operate electrical power systems economically and reliably. In addition, the uncertainty and variability in the power obtained from intermittent renewable energy sources such as wind and solar, whose use in power systems continues to increase rapidly, should also be taken into account when determining the reserve amount. As the share of these resources in installed power increases, the operational complexity of power systems also increases. This situation makes it necessary to develop new methods to determine the required reserve capacity in order to ensure the balance of production and consumption in power systems.

Accurate estimation of the power obtained from intermittent renewable generation sources such as wind and solar is very important to include these sources in electrical power systems. In this thesis study, the expected power not served formula, which is a reliability criterion for electrical power systems, has been developed with a new approach that takes into account the power produced from intermittent renewable energy sources and the consumed power estimation errors. In the proposed approach, estimates of the wind and solar power produced and the consumed power, made with advanced machine learning methods, are included in the expected power not served formula. For this purpose, the mean absolute percentage error value, which is one of the error parameters measuring the prediction accuracy, was used. The developed expected power not served formula was used in the smart reserve planning approach proposed in the study.

Successful prediction results were obtained with the multilayer perceptron, long-short term memory and convolutional neural network methods used for prediction and these results were compared. Using forecasts made with different methods in the smart reserve planning approach, the relationship between forecast accuracy, reserve requirement and total cost has been revealed. The effect of the intermittent renewable energy source penetration amount on the reserve requirement and total cost was examined by using the convolutional neural network method, which provides the most accurate result among the estimation methods, in the smart reserve planning approach. The effect of increasing the highest expected power not served value determined by the power system manager for system reliability, that is, reducing system reliability, on the reserve requirement and total cost is explained. In this study, a useful suggestion is presented for the inclusion of intermittent renewable energy sources such as solar and wind in power systems.

In this thesis study, first of all, information about the structure and functioning of electrical energy markets is given, the services provided for frequency control are mentioned and the concept of reliability is explained. Afterwards, basic concepts regarding wind and solar energy systems are included. In the next section, the methods used to estimate the power produced from intermittent renewable energy sources and consumed power are explained and the results of the predictions obtained by these methods are evaluated. Finally, the smart reserve planning

approach proposed in the thesis study is explained and the results obtained for the sample power system using the proposed approach are discussed.

Keywords: Renewable energy, expected power not served, reliability, reserve optimization, machine learning.



1.1 Tezin Motivasyonu ve Kapsamı

Elektrik üretimi için son bir kaç yüzyıl boyunca kömür, petrol ve doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynakları kullanılmıştır. Fosil yakıtlar olarak da bilinen bu enerji kaynaklarının en önemli avantajı enerji yoğunluklarının yüksek olmasıdır. Fakat bu kaynakların kullanılmasıyla karbon ve diğer sera gazları atmosfere yayılmaktadır. Küresel enerji talebi her geçen yıl artmaktadır ve 2040 yılına kadar enerji talebinin 2010 yılına göre %56 oranında artacağı tahmin edilmektedir [1]. Küresel ısınmaya ilişkin endişelerin artması ve özellikle fosil yakıtlara dayalı olan geleneksel enerji kaynaklarının çevreye zararlı etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin Elektrik Güç Sistemleri (EGS)’nde kullanımına ilişkin uygulamalar hızla yaygınlaşmaktadır [1,2]. Rüzgâr ve güneş enerjisi; su kaynaklarına bağımlılıklarının bulunmaması, modüler ve esnek kurulum imkânları ve düşük işletme ve bakım maliyetleri gibi özellikleri ile hidroelektrik santrallerinden ayrılmaktadır. Fakat bu kaynaklardan üretilen enerji doğası gereği kesintilidir. Rüzgâr enerjisi rüzgârın varlığına ve gücüne bağlı olarak değişirken, güneş enerjisi de güneşin konumuna, hava şartlarına ve mevsimlere bağlı olarak değişmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi Kesintili Yenilenebilir Enerji Kaynakları (KYEK)’nın ürettiği enerji doğal olarak dalgalanma göstermekte ve belirli zaman dilimlerinde kesilmektedir. Bu nedenle rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan kaynakların güç sistemlerine dâhil edilmesinde bu tür farklılıkların dikkate alınması gerekmektedir [3, 4].

Rüzgâr ve güneşten üretilen gücün doğru tahmin edilmesi bu kaynakların güç sistemine entegrasyonu için önemli bir husustur. Tahminlerdeki önemli hatalar bazı olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu olumsuzluklar, talebe uygun üretim yapılmaması sonucu ortaya çıkan frekans kararsızlığı, santral verimliliğinin azalması ve öngörülemeyen durumların üstesinden gelmek için enerji depolama sistemleri gibi pahalı teknolojilere ihtiyaç duyulması şeklinde özetlenebilir. Tahmin hataları, rezerv planlamasına yönelik spesifik stratejilerin oluşturulmasını gerektirmektedir. Rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan birimler için beklenen ve

gerçekleşen üretim arasındaki farklar dikkate alınarak enerji rezervlerinin en aza indirilmesi veya daha esnek kullanımının sağlanması için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [5].

Bu tez, güç sistemlerinde rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan kaynakların sebep olduğu üretim belirsizliği sorununun üstesinden gelmek için kullanabilecek yaklaşımlara odaklanmaktadır. Bu tezin amacı, rüzgâr ve güneş gibi KYEK'lerin bulunduğu güç sistemlerinde, enerji ve rezerv planlaması üzerinedir. Rüzgâr ve güneş kaynaklı üretim birimlerinin önemli ölçüde yayılması, güç sisteminin ek esnekliğe sahip olmasını gerektirmektedir.

Rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan santrallerin bulunduğu güç sistemlerinde, Üretilen Rüzgâr Gücü (ÜRG) ve Tüketilen Güç (TG) tahmin hatalarının dikkate alındığı rezerv planlama çalışmaları oldukça yaygındır. Bu çalışmalarda, ÜRG ve TG tahmin hataları Sağlanamayan Güç Beklentisi (SGB) olarak hesaplanmakta ve sistem yöneticisi tarafından belirlenen; güç sistemi için izin verilen en yüksek SGB değeri ile elde edilen değerlendirme kriteri dikkate alınarak rezerv planlaması yapılmaktadır [6-10]. ÜRG ve TG tahmin hatalarını dikkate alan SGB hesabı yaklaşımlarında, gelişmiş tahmin yöntemlerinin kullanılmaması yüksek SGB değerlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen SGB formülasyonunda rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan birimlerden üretilen güç ve TG tahmin hataları için ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Geliştirilen formül ile rüzgâr ve güneş kaynaklı üretim yapan birimlerin sebep olduğu SGB değerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Geliştirilen SGB formülünün kullanıldığı Akıllı Rezerv Planlaması (ARP) yaklaşımı ile güç sistemlerinde rüzgâr ve güneş kaynaklı üretim santrallerinin bulunması durumunda planlanan rezerv miktarı ve işletme maliyetinin azaltılması amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Özeti

1.2.1 Tahmin Yöntemleri

KYEK'lerin üreteceği gücün doğru bir şekilde tahmin edilmesi, bu kaynakların EGS'lere entegrasyonu açısından çok önemlidir [11]. Rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinden üretilen gücü dikkate değer bir başarıyla tahmin etmek için gelişmiş makine öğrenimi yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle yapılan tahminler

için genellikle tahmin sonucuyla yüksek düzeyde korelasyona sahip parametrelerin kullanılması da önemlidir. Aksi takdirde tahmin algoritmasına birçok parametrenin dâhil edilmesi, modelin daha karmaşık hale gelmesine ve hesaplama süresinin önemli ölçüde artmasına neden olacaktır [12-15]. Bu olumsuzluklar, talebe uygun üretim yapılmaması, santral verimliliğinin azalması ve öngörülemeyen durumların üstesinden gelmek için depolama sistemleri gibi pahalı teknolojilere ihtiyaç duyulması sonucu ortaya çıkan frekans istikrarsızlığı olarak özetlenebilir. KYEK'lerin EGS'lere kapsamlı entegrasyonunun bir sonucu olarak, olasılıksal tahmin araçları da dâhil olmak üzere yeni tahmin yöntemleri geliştirilmiştir [16].

KYEK'lerden üretilen güç tahmin yöntemleri, zaman ölçeğine göre sınıflandırılabilir. Mevsimsel veya uzun vadeli tahmin; üretim kaynağı planlaması, kapasite faktörünün belirlenmesi, yatırım yönetimi ve enerji portföyü yönetimi için kullanılmaktadır. Gün öncesi tahmin; enerji piyasası ticareti, gün öncesi birim taahhüdü ve gün öncesi planlaması için kullanılmaktadır. Kısa vadeli tahmin; saat öncesi birim taahhüdü, güç dengelemesi, enerji depolama yönetimi ve enerji piyasası ticareti için kullanılmaktadır [17].

Rüzgâr ve güneşten üretilen güç meteorolojik verilere bağlıdır. Meteorolojik verilerin değişken doğası nedeniyle, bu kaynaklardan elde edilen güçte de sürekli değişkenlikler olacaktır. Bu nedenle rüzgâr ve güneş gibi KYEK'lerden üretilen gücün tahmini oldukça zordur. Bu tahminler için kullanılan teknikler; fiziksel yöntemler, istatistiksel yöntemler, yapay zekâ teknikleri ve hibrit yöntemler olmak üzere dört sınıfa ayrılabilir [18,19]. Fiziksel veya sayısal hava tahmini yöntemleri, atmosferik dinamikleri fiziksel ve mekanik prensiplere göre simüle eden matematiksel modellerdir. Bu modeller gelişmiş bilgisayarlar gerektirmekte ve uzun vadeli tahminler için kullanılmaktadır [20]. İstatistiksel modeller, giriş ve çıkışlar arasında doğrusal ilişki varsayımı ile matematiksel ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Bu modeller literatürde yaygın olarak kullanılmalarına karşın doğrusal olmayan ilişkileri belirlemek için uygun değildir. Bu nedenle de performansları düşüktür. Yapay zekâ yöntemleri, doğrusal olmayan ilişkileri belirleme yetenekleri ve üstün performansları nedeniyle araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Makine öğrenmesi yöntemleri, genelleştirme yeteneği ve denetimsiz özellik öğrenmesi gibi üstünlüklerinden dolayı oldukça başarılı sonuçlar vermiştir [19].

Rahman vd. nin çalışmasında, güneş, rüzgâr veya hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim için doğru tahminleri sağlayabilen Yapay Sinir Ağı (YSA) yaklaşımlarının farklı veri odaklı modellerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada, Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA), Tekrarlayan Sinir Ağı (TSA), Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) ve Uzun-Kısa Süreli Bellek (UKSB) gibi çeşitli iyileştirilmiş sinir ağı mimarileri, yenilenebilir enerji üretim tahmini uygulamalarında kullanılmıştır [16]. Singla vd. nin çalışmasında, rüzgâr türbinleri ve güneş panellerinin güç tahmininin yanı sıra tüketilen enerji tahmini için geliştirilen mevcut derin öğrenme tabanlı yaklaşımların kapsamlı bir incelemesini sunulmuştur. Çalışmada farklı derin öğrenme tabanlı tahmin modellerini eğitmek ve test etmek için kullanılan veri kümeleri de tartışılarak gelecekteki çalışmalar için uygun veri kümelerinin belirlenmesine olanak tanınmıştır. Ayrıca çalışmada akıllı şebeke uygulamalarında enerji yönetimine ilişkin üretim ve tüketim tahmin planları bir arada incelenmiştir [21]. Azadeh vd. nin çalışmasında, çevresel ve ekonomik faktörler dikkate alınarak yenilenebilir enerji tahminine yönelik bir YSA yaklaşımı sunulmaktadır. Çalışmada veriler ÇKA yaklaşımıyla eğitilmiş ve test edilmiştir. Önerilen yaklaşım ölçüm ekipmanlarının bulunmadığı yerler için kullanışlıdır [22]. Rodrigues vd. nin çalışmasında, yenilenebilir enerji üretim tahmini ve yapıllı çevreyi etkileyen diğer değişkenlerin tahmini için sinir ağlarının uygulanmasına ilişkin bir inceleme sunulmuştur. Bu çalışmanın temel amacı güneş, atmosferik, hidrolojik ve jeolojik gibi doğal olarak bağlantılı olan ancak literatürde genellikle ayrı ayrı ele alınmış konuları birbiriyle ilişkilendirmektir [23]. Lahouar vd. nin çalışmasında, saatlik rüzgâr gücü tahmini için rastgele orman yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, yapay zekâ yöntemleri için temel sorun olan parametre ayarlama sorununun çözümüne odaklanmaktadır [24]. Liu vd. nin çalışmasında rüzgâr hızı tahmini için; hızlı topluluk deneysel mod ayrıştırma algoritması, zihin evrimsel algoritması, genetik algoritma ve ÇKA algoritmasının birleştirilmesiyle iki yeni hibrit tahmin yöntemi önerilmektedir [25]. Meng vd. nin çalışmasında, çift evrişim katmanına sahip bir ESA ağı inşa edilmiş ve çok katmanlı özellik yakalayıcı ve maksimum havuzlama yapısı ile girişin, belirsiz zaman serilerinin özelliğini etkili bir şekilde çıkarması sağlanmıştır. Ayrıca, önemli bilgilerin etki ağırlığını artırmak için dikkat mekanizması tanıtılmıştır. Bu mekanizma, modelin özellikleri öğrenmesine etkili bir şekilde yardımcı olarak tahmin doğruluğunu artırmaktadır [26]. Singla'nın çalışmasında; meteorolojik

değişkenlerin, zaman ufkunun, iklim bölgesinin, ön işleme tekniklerinin, hava kirliliğinin ve örnek boyutunun güneş enerjisi tahmin performansına etkisi araştırılmış ve literatürde tartışılan çeşitli metodolojilere dayalı güneş enerjisi tahmin modellerinden bazıları analiz edilmiştir [27]. Karaman'ın çalışmasında, YSA, TSA, ESA ve UKSB ağları gibi ileri teknoloji makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuştur. Çalışmada, skada verilerini ve meteorolojik verileri içeren iki bağımsız veri seti birleştirilmiş ve rüzgâr gücünü tahmin etmek için kullanılmıştır [28]. Wang vd. nin çalışmasında; rüzgâr, güneş ve tüketilen elektrik enerjisi tahmin yöntemlerine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunulmaktadır. Çalışmada, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve tüketilen elektrik enerjisi tahminlerinin zorlukları ve gelecekteki araştırma yönleri tartışılmaktadır [29].

Tez çalışmasında önerilen ARP yaklaşımında saatlik; TG, ÜRG ve Üretilen Güneş Gücü (ÜGG) tahminleri için ileri seviye yapay zekâ yöntemleri olan ÇKA, UKSB ve ESA algoritmaları kullanılmıştır.

1.2.2 Rezerv Planlaması

KYEK'lerin bulunduğu güç sistemlerinde bu kaynaklardan üretilen gücün doğru tahmin edilmesi, rezerv planlaması açısından oldukça önemlidir. KYEK'lerden üretilen güçteki tahmin hataları, rezerv planlamasına yönelik spesifik stratejilerin oluşturulmasını gerektirmektedir.

Karar vermede yardımcı olan bir dizi risk değerlendirmesini kullanan Matos ve Bessa'nın risk değerlendirme çalışması, her bir potansiyel rezerv seviyesinin sonuçlarını belirlemenin mümkün olduğunu göstermiştir. Söz konusu çalışmada önerilen yeni rezerv yönetimi yaklaşımı, Güç Sistemi Operatörü (GSO)'ne günlük ve gün içi piyasalar için işletme rezerv gerekliliklerini belirlemede yardımcı olmaktadır [30]. Güç sistemi rezerv piyasasında iletim hatlarının acil durum kapasitesinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kullanılmasına yönelik bir planlama modeli Azami vd. tarafından önerilmiştir. Bunu amaçla öncelikle bir iletim hattını nominal gücünden daha yüksek bir güçte çalıştırmanın etkileri değerlendirilmiş ve bu koşullar altında iletim hatlarını çalıştırmanın yol açtığı ömür azalmaları ölçülmüştür. Daha sonra ömür azalma oranına dayalı olarak maliyet hesaplaması yapılmıştır [31]. Belirsiz ve kesintili güç çıkışı korelasyonları altında yenilenebilir

enerjinin hâkim olduğu bir güç sisteminde optimum enerji ve rezerv planlamasının zorluğu Zhang vd. tarafından incelenmiştir. Önerilen çalışmada toplam maliyeti en aza indirmek için, dağıtımsal olarak sağlam bir şans kısıtlaması modeli geliştirilmiştir [6]. Xu vd. yenilenebilir enerji üretiminin çok zamanlı belirsizliğini dikkate alan, olasılıksal tahmine dayalı bir rezerv belirleme yaklaşımı geliştirmiştir. Rezerv miktarı, bu belirsizlikle başa çıkacak şekilde iki aşamalı bir optimizasyon çerçevesinde gerçekleştirilen rezerv belirleme prosedürü aracılığıyla ayarlanmaktadır [32]. Augadra vd. tarafından yapılan çalışmada, yüksek düzeyde yenilenebilir enerji üretimine sahip EGS’lerde güç talebini karşılamak için enerji depolama sistemleri ihtiyaçlarının bir değerlendirmesi yapılmıştır [33]. Khatami vd. nin çalışmasında, güç sistemi işletiminde gün öncesi piyasasında enerji ve esneklik rezervlerinin çoklu doğrulukta optimizasyonu için stokastik bir optimizasyon modeli anlatılmıştır. Karmaşık bir tam sayılı doğrusal programlama problemi olarak formüle edilen model, tek bir stokastik optimizasyon probleminde gün öncesi ve gerçek zamanlı iş kararlarını farklı doğruluk seviyeleriyle birlikte optimize etmektedir. Bu planlama, tüketilen gücün ve yenilenebilir enerji üretiminin değişkenliği ve belirsizliğinin telafi edilmesine olanak sağlamaktadır [34]. Fernández-Muñoz vd. nin çalışmasında, bir rüzgâr santrali ve bir lityum-iyon pilden oluşan sanal bir enerji santralinin gün öncesi elektrik piyasasına katkıda bulunacak şekilde kısa vadeli programlanması ve bu santralin yeniden dağıtımı için optimizasyon modelleri sunulmaktadır. Önerilen optimizasyon modelleri gerçekçi bir piyasa ortamında öncelikle sanal bir enerji santralinin gün öncesi üretim ve rezerv programını belirlemek ve daha sonra enerji dağıtım zamanına yakın bir zamanda santralin yeniden dağıtımını belirlemek için kullanılmaktadır [35]. KYEK kullanımının önemli ölçüde artmasının optimizasyon modellerinde getirdiği değişikliklere ilişkin araştırma sonuçları Deng ve Lv tarafından açıklanmıştır. Bu amaçla KYEK bulunduran EGS’lerde enerji planlamasına yönelik birçok çalışma incelenmiş ve karşılaştırılmıştır [36]. Roald vd. nin çalışmasında EGS’lerde ortaya çıkan belirsizlikler için optimizasyon problemlerinin modellenmesine yönelik yöntemler üzerine genel bir araştırma yapılmıştır. Çalışmada en sık kullanılan modelleme tekniklerinden bazıları açıklanmakta ve gelecekteki araştırmalar için bir bakış açısı sunulmaktadır [37].

EGS'lerde güvenilirliğin sağlanması amacıyla rezervin belirlenmesinde SGB olarak ifade edilen güvenilirlik kriterinin dikkate alındığı çalışmalar oldukça yaygındır. Bouffard vd. nin çalışmasında sunulan yöntemde, geleneksel deterministik rezerv hesaplama yaklaşımının aksine; SGB nedeniyle GSO'nun ekonomik olarak cezalandırılmasını dikkate alan bir rezerv planlaması yaklaşımı sunulmuştur [38]. Güç sistemi güvenilirliğinin değerlendirilmesi ve üretim planlamasına yönelik maliyet/fayda analizi için metodolojiler ve prosedürler, Al-Shaalan'ın çalışmasında sunulmaktadır. Çalışmada, güç sistemi güvenilirlik değerinin tahmin edilmesini sağlayacak kullanışlı bir yöntem ile SGB'nin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Hem kabul edilebilir enerji kalitesini hem de ekonomik maliyeti sağlayabilecek uygun güvenilirlik düzeyini belirleyecek SGB maliyeti daha sonra sistem maliyetiyle karşılaştırılmıştır [39]. Toh ve Gooi tarafından yürütülen araştırmaya göre, TG ve ÜRG tahmin hatalarını SGB formülüne dâhil etmek için normal dağılım eğrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Daha sonra, artan rüzgâr enerjisi penetrasyonunun toplam enerji maliyeti ve sistem güvenilirliği üzerindeki etkileri tipik bir güç sistemi için incelenmiştir. Bulgular, rüzgâr enerjisinin güç sistemine önemli ölçüde nüfuz etmesinin sistem güvenilirliğinde bir azalmaya yol açtığını göstermektedir [7]. Liu ve Tomsovic tarafından stokastik rüzgâr tahmini sonuçlarını gün öncesi piyasasına dâhil eden yeni bir güvenlik kısıtlamalı birim taahhüt modeli önerilmiştir. Çalışmada açıklanan metodoloji kullanılarak önerilen SGB formülü ile toplam sistem işletme maliyetini en aza indiren ideal rezerv miktarının belirlenmesi sağlanmıştır [40]. Ortega-Vazquez vd. nin araştırmasında, TG ve ÜRG tahmin hatalarının hesaba katıldığı rezerv planlamasına yönelik yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Yük atma ile ilgili işletme maliyetleri ve sosyoekonomik maliyetlerin toplamını en aza indirecek rezerv miktarının belirlendiği yöntemde, kullanılan Monte Carlo simülasyonları, önerilen yöntemin maliyet açısından geleneksel yöntemle göre daha az maliyetli olduğunu göstermiştir [8]. Bouffard ve Galiana'nın çalışmasında, önerilen stokastik rezerv belirleme stratejisi ile geleneksel yöntemlere göre daha esnek ve verimli sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada, ÜRG ile TG seviyeleri arasında saatler arası bir ilişki olması durumunda ve tahmin hatalarının normal dağılım varsayımını aşması durumunda gelişmiş tahmin hatası modellerine ihtiyaç duyulacağı gösterilmiştir [9]. Chaiyabut ve Damrongkulkumjorn tarafından yapılan çalışmada, standart sapma kullanılarak TG ve ÜRG tahmin hatalarının hesaba katıldığı SGB

hesabı ile optimum rezervi bulmak için bir algoritma önerilmiştir. Bu yöntemde rezerv, toplam maliyeti en aza indirecek değişkenlerden biri olarak maliyet denkleminde dâhil edilmiştir [10].

Tez çalışmasında ileri seviye makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yapılan TG, ÜRG ve ÜGG tahmin hatalarının SGB formülüne dâhil edilmesi ile literatürde bildirilen çalışmalara göre avantaj sağlanmıştır. Geliştirilen SGB formülü tez çalışmasında önerilen ARP yaklaşımında kullanılmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Güç sistemi yöneticilerinin, tüketilen gücü tahmin etme ve bunu üretimle dengeleme zorunluluklarının yanı sıra, ilerleyen saatler için rüzgâr ve güneş gibi kesintili kaynaklardan üretilen gücün kullanılabilirliğini de tahmin etmeleri gerekmektedir. Rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan santrallerin bulunduğu güç sistemlerinin tahmin hataları sebebiyle yanlış programlanması, rezerv ihtiyacını ve tüketici maliyetlerini arttıracak; çevreye zarar veren ve daha maliyetli enerji kaynaklarının kullanımını gerektirecektir.

Tez çalışmasında kullanılan ileri makine öğrenmesi yöntemleri ile rüzgâr ve güneş gibi kesintili kaynaklardan üretilen güç için en doğru tahminler yapılarak bu kaynakların sebep olduğu SGB değerinin azaltılması amaçlanmıştır. Üretilen ve tüketilen elektrik gücü tahmin hataları, ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak geliştirilen SGB formülüne dâhil edilmiştir. Geliştirilen SGB formülü, çalışmada sunulan ARP yaklaşımında kullanılmıştır. ARP yaklaşımı kullanılarak, örnek güç sistemi için rezerv gerekliliği ve toplam maliyet analizleri yapılmıştır. Bu amaçla, tahmin doğruluğunun, rüzgâr ve güneşe dayalı üretim yapan santrallerin penetrasyon miktarının ve sistem güvenilirliğinin rezerv gerekliliği ve maliyetle ilişkisi ortaya konulmuştur. Önerilen yaklaşım ile güç sistemlerinde kesintili kaynak kullanımına ilişkin planlanan rezerv miktarı ve toplam işletme maliyetinin azaltılması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasının yenilikleri ve katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- I. Bu tezde, güneş ve rüzgâr enerjisi kaynaklı üretim tesisleri gibi kesintili yenilenebilir üretim kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu için yararlı bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışmada kesintili yenilenebilir üretim

kaynaklarından üretilen gücün ve güç sisteminde tüketilen gücün belirsizliği sorunu ele alınmıştır. Çalışma, yenilenebilir enerji kullanımını en üst düzeye çıkarmayı amaçlarken, güç sistemi güvenilirliğini de artırmaya yönelik bilgiler sağlamaktadır.

- II. Güç sistemleri için bir güvenilirlik kriteri olan SGB, rüzgâr ve güneş gibi kesintili kaynaklardan üretilen güçteki tahmin hatalarını ve güç sisteminde tüketilen güç tahmin hatalarını dikkate alan yeni bir yöntemle geliştirilmiştir.
- III. Geliştirilen SGB bağıntısının kullanıldığı ARP yaklaşımında yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinde güvenilirlik ve esneklik açısından güç sistemi işletmecisi tarafından belirlenen limit SGB değeri (SGB_{max}) dikkate alınmaktadır. ARP süreci, enerji üretimini, rezerv tahsisini ve SGB'yi optimize ederek toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamaktadır.
- IV. Bu tezde, güç sistemlerindeki rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı üretim kaynaklarından üretilen güç ve güç sisteminde tüketilen güç tahminlerinin doğruluğu ile rezerv gerekliliği ve toplam işletme maliyeti arasındaki ilişki araştırılmıştır. Farklı tahmin yöntemlerinin toplam maliyeti ve rezerv gerekliliklerini nasıl etkilediği ortaya koyulmuştur. Güç sistemlerindeki kesintili yenilenebilir enerji kaynağı penetrasyon miktarının rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkisi açıklanmıştır. Ayrıca, güç sistemi yöneticisinin izin verdiği limit SGB değerinin arttırılmasının; yani sistem güvenilirliğinin azaltılmasının rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.
- V. Rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı üretim kaynaklarından üretilen güç ve güç sisteminde TG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA makine öğrenimi yöntemlerinden elde edilen tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan tahmin yöntemlerin doğrulukları değerlendirilmiştir.

ELEKTRİK PİYASALARI, FREKANS KONTROLÜ VE GÜVENİLİRLİK

2.1 Giriş

Elektrik piyasaları, elektrik enerjisinin; üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi için gerekli hizmetlerin organize edilmesini sağlamaktadır [41]. Tüketilen gücün belirsizliği, KYEK'lerden üretilen gücün belirsizliği ve beklenmedik durumların oluşabilmesi gibi faktörlerden ötürü elektrik piyasalarının yapısı oldukça karmaşıktır. İşleyişi kanun ve yönetmeliklerle belirlenen elektrik piyasalarında frekans kontrolü, yan hizmetler ve güvenilirlik çalışmaları; tüketilen enerjinin değişkenliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim belirsizliğinden kaynaklanan entegrasyon problemlerinin de dikkate alınmasıyla, güç sisteminin performans ve dayanıklılığının artırılması amacıyla yapılmaktadır [42].

EGS, elektrik enerjisinin nihai tüketicilere aktarılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle üretim kaynakları ile nihai tüketicilere aktarılması gereken enerjinin karşılanması gerekmektedir. Bu sayede, sistem frekansının istenilen seviyede tutulması sağlanmaktadır. İletim sistemi ile enerjinin tamamı farklı enerji tüketim noktalarına ulaştırılmakta ve dağıtım sistemi ile de bu enerji tüketicilere aktarılmaktadır [43]. EGS'yi oluşturan sistemlerin her biri mevcut tüketilen gücü destekleyebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu yapılandırma için hem üretim santralleri hem de nüfus artışına göre genişleyecek olan bir iletim sistemi planlaması yapılmalıdır.

Yan Hizmetler (YH), EGS'lerde iletim veya dağıtım sistemine bağlı GSO'lar tarafından sağlanacak olan; sistemin güvenilir şekilde işletilmesini ve enerjinin gereken kalitede tüketiciye aktarılmasını sağlamak üzere sunulan hizmetlerdir [44]. Bu hizmetler; güç dengelemesi, rezervin ayarlanması ve frekans kararlılığının sağlanması şeklinde özetlenebilir. YH'ler, EGS'lerde oluşabilecek arızalar sonrasında EGS'nin normal çalışma durumuna geri dönmesine yardımcı olmaktadır. Ülkemiz güç sisteminde, sistemdeki yüksek miktarda KYEK penetrasyonu sonucunda üretimdeki artan değişkenlik ve belirsizlikten kaynaklanan sorunların üstesinden gelmek için ek YH'ler gerekmektedir. Sistemde öngörülemeyen ani; TG ve KYEK'lerden üretilen güç değişimlerini

dengeleyebilmek için, Yük Alma (YAL) ve Yük Atma (YAT) işlemleri yetersiz kalacaktır. Zorunlu ve ticari YH anlaşmaları ile sistemde uygun özelliklere sahip üretim santrallerinin; primer ve sekonder frekans kontrolüne destek vermeleri ve işletme rezervi sağlamaları gerekecektir. Bu anlaşmaların sağlanamaması durumunda, yalnızca YAL ve YAT anlaşmaları ile istenen güvenilirlik ve kararlılık seviyesine ulaşamayacaktır [45].

Bu kısımda, ilk olarak elektrik piyasaları hakkında bilgi verilmiş ve elektrik piyasalarının işleyişi açıklanmıştır. Sonraki bölümde, EGS'lerde frekans kontrolü için sunulan hizmetler verilmiştir. Son bölümde ise güç sistemlerinde güvenilirlik çalışmaları üzerinde durulmuştur.

2.2 Elektrik Piyasaları

Son yıllarda birçok ülkede elektrik enerjisi ticareti karmaşıklaşmış ve rekabetçi kurallar ile yapılmaya başlanmıştır. Bu karmaşıklaşmanın bir parçası olarak da, üretim tesislerinin, ticari işletmelerin ve büyük tüketicilerin organize piyasalarda elektrik enerjisi alıp satabilecekleri yapabilecekleri enerji havuzları kurulmuştur. İlk enerji ticareti girişimleri 1980'lerde Güney Amerika'da gerçekleştirilmiştir. Gelişmiş ülkelerdeki ilk enerji ticareti ise 1990'larda Birleşik Krallık ve İskandinavya'daki elektrik piyasalarında gerçekleştirilerek yaygınlaşmaya başlamıştır. 1990'ların sonunda Avrupa, Kuzey Amerika ve Avustralya'da çeşitli elektrik piyasaları faaliyet göstermeye başlamıştır. Günümüzde dünya genelinde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde bölgeselden uluslararası alana kadar uzanan elektrik piyasaları bulunmaktadır. Elektrik enerjisi için toptan satış piyasalarının ortaya çıkmasıyla birlikte yeni bir tür ürünün ticareti yapılabilir hale gelmiştir. Fakat benzersiz bazı özellikleri nedeniyle elektrik spot fiyatları diğer emtia veya finansal varlık fiyatlarına göre önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklardan en önemlisi, elektrik enerjisinin depolanamaması sorunu ile birlikte farklı fiyat niteliklerine yol açan elektrik enerjisi üretiminin ve tüketimi ile dengelenmesi gerekliliğidir [46, 47].

2.2.1 Elektrik Piyasaları Aktörleri

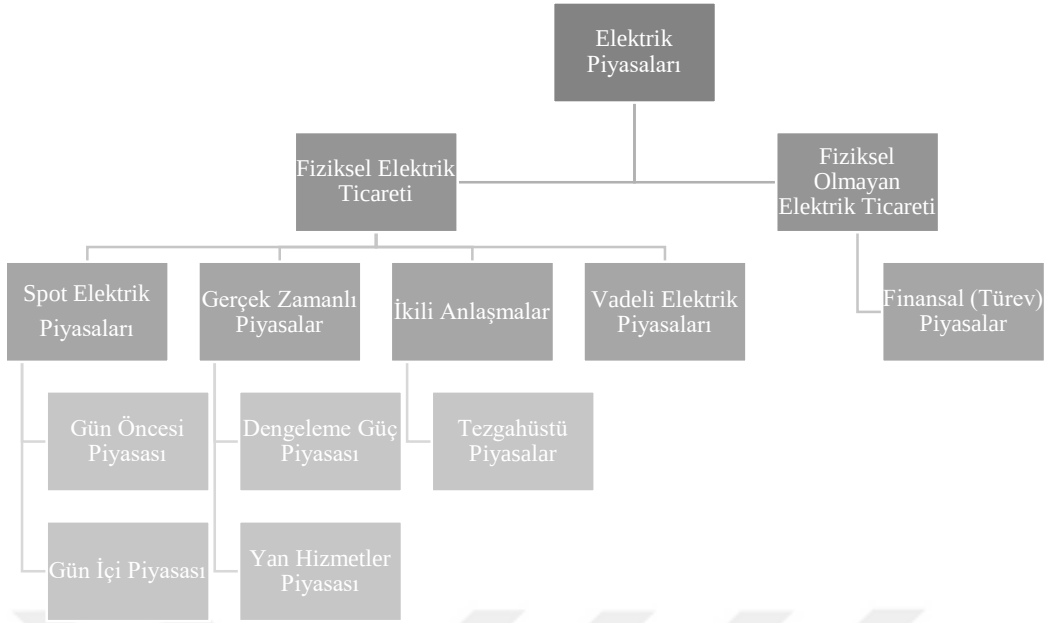
Elektrik Piyasası Operatörü (EPO) ve GSO ile birlikte, lisanslı; üretim, dağıtım, toptan satış ve perakende satış Piyasa Katılımcıları (PK) elektrik piyasası aktörlerini oluşturmaktadır.

Elektrik piyasası aktörlerinden EPO'nun temel amacı; elektrik enerji piyasalarının; etkin, şeffaf, güvenilir, öngörülebilir ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesini ve geliştirilmesini sağlamaktır. EPO, elektrik piyasası katılımcılarına, elektrik enerjisi alış ve satış taleplerinde bulunabilmeleri için gerekli ortamı sunmaktadır. EPO ayrıca, elektrik enerjisi alış ve satış işlemlerinin şeffaf ve düzenlemelere uygun bir şekilde yürütülmesini organize ederek referans fiyat oluşmasını sağlamaktadır. Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti (YEK-G), Spot ve Vadeli elektrik piyasaları EPO bünyesinde bulunmaktadır. Bünyesinde bulundurduğu piyasaların; uzlaştırma, teminat ve faturalama gibi mali işlemlerini gerçekleştirmekte ve merkezi karşı taraf hizmeti vererek bu piyasaların işletilmesini sağlamaktadır. EPO'nun faaliyet gösterdiği alanlar arasında DGP ve YH piyasalarının uzlaştırılması, yenilebilir enerji kaynakları destekleme mekanizmasının işletilmesi ve serbest tüketici işlemleri de bulunmaktadır [48].

GSO ise, güç sisteminde gerekli kalitede enerji ile üretilen güç ve TG dengesinin sağlanması ve DGP'nin işletilmesi ile yükümlüdür. GSO'nun görevleri arasında; yan hizmet alımı, dengeleme mekanizması yolu ile gerekli rezervlerin ayarlanması ve iletim hattı kayıplarının satın alınması işlevleri de bulunmaktadır.

2.2.2 Elektrik Piyasalarının İşleyişi

Elektrik enerjisi piyasalarında yapılan işlemler, uzun dönemli ve kısa dönemli olmak üzere iki çeşittir. Uzun dönemli işlemler bir haftadan bir yıla; kısa dönemli işlemler ise bir saat, bir kaç dakika ya da bir güne kadar olan işlemlerdir. Kısa dönemli işlemler de Gün Öncesi Piyasası (GÖP), Gün İçi Piyasası (GİP) ve Dengeleme Güç Piyasası (DGP) işlemleri olmak üzere üçe ayrılır. Bu işlemler elektrik üretimi ile tüketiminin dengelenmesinin yapıldığı işlemlerdir. Ayrıca bu piyasalara ek olarak elektrik güç sisteminin güvenilir şekilde işletilmesini ve tüketiciye uygun kalitede aktarılmasını sağlayan Yan Hizmetler Piyasası da bulunmaktadır [41]. Şekil 2.1'de elektrik piyasalarının işleyiş yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1 Elektrik piyasaları işleyiş yapısı.

Elektrik piyasalarında sunulan optimizasyon araçları ile üretim tesislerinin ve tüketicilerin fiziksel ve finansal risklerden korunması hedeflenmektedir. Gün öncesine kadar ikili anlaşmalar ve finansal piyasalarda; gerçek zamandan bir gün öncesine kadar ise GÖP işlemleri yapılabilmektedir. Ardından gerçek zamandan bir saat öncesindeki GİP işlemleri yapılabilmektedir. DGP işlemleri ise gerçek zaman ile paralel ilerlemektedir.

2.2.2.1 Vadeli Elektrik Piyasaları

Vadeli Elektrik Piyasası (VEP) PK'leri fiyat riskinden korumaktadır. PK'lerin, tüm ticaretlerini spot elektrik piyasalarından gerçekleştirmeleri durumunda, oluşabilecek fiyat dalgalanmaları ile ciddi bir fiyat riski ile karşı karşıya kalabilmeleri söz konusu olacaktır. Katılımcılar, VEP'de yapacakları vadeli kontratlarla düzenli nakit akışı sağlayarak fiyat risklerinden korunabileceklerdir.

EPO vadeli elektrik piyasasında merkezi karşı taraf hizmeti vermektedir. Alıcı tarafına karşı satıcı; satıcı tarafına karşı ise alıcı konumundadır. PK'lerin VEP'de gerçekleştirdikleri işlemlerden cayma fırsatları bulunmamaktadır. Ticareti gerçekleştiren taraflardan biri temerrüde düşse bile EPO, merkezi karşı taraf rolü gereğince ilgili işlemin karşı tarafı etkilemeyecek şekilde gerçekleşmesi sağlamaktadır. Dolayısıyla VEP'de elektrik enerjisinin teslimatı ve ödeme işlemleri ile ilgili risk bulunmamaktadır.

VEP'nin en önemli özelliklerinden birisi de geleceğe yönelik fiyat beklentilerini göstermesidir. Tezgâh üstü piyasalarda ve ikili anlaşmalarla uzun süreli anlaşmalar yapılmakla birlikte yapılan anlaşmalara dair fiyat bilgileri diğer PK'ler ile paylaşılmamaktadır. Buna karşın, VEP'de yapılan işlemlerin diğer PK'ler ile de paylaşılması geleceğe yönelik fiyat beklentilerini göstermektedir [49].

2.2.2.2 İkili Anlaşmalar

İkili anlaşmalar PK'ler arasında yapılan özel sözleşmelerdir ve tezgâh üstü piyasada işlem görmektedirler. İkili anlaşmalarda karşı taraf riski mevcuttur; satıcı taraf, ikili anlaşma ile belirlenen ürünü teslim etmeyebilmekte veya alıcı taraf, ikili anlaşma ile belirlenen tutarı ödemeyebilmektedir. İkili anlaşma ile ticareti yapılacak elektrik enerjisi miktarının, vadesinden önce üçüncü bir tarafa devredilmesi zordur. İkili anlaşmalar düzenleyeme tabi değildir. Uzlaştırmaya esas ikili anlaşma miktarı, PK'ler tarafından, belirli bir zaman dilimi için aynı teklif bölgesinde almayı ya da satmayı piyasa yönetim sistemine bildirdiği elektrik enerjisi miktarıdır [50].

2.2.2.3 Gün Öncesi Piyasası

GÖP, elektriğin teslimat gününden bir gün öncesine kadar elektrik enerjisi ticareti ve dengeleme faaliyetleri için kullanılan, EPO tarafından işletilen organize bir piyasadır. GÖP, elektrik enerjisi referans fiyatının belirlendiği ve PK'lerin dengeleme işlemleri yapmak amacıyla bir sonraki gün için enerji alışı ve satışı yapabilmelerinin sağlandığı piyasadır. Ayrıca GÖP'de büyük çaplı ve süreklilik arz eden sistem kısıtları için teklif bölgelerinin oluşturulması, GSO'nun gün öncesinden kısıt yönetimi yapabilmesini sağlamaktadır. GÖP'ye üreticiler ve tüketiciler katılmakta ve her katılımcı kendi portföyünü dengelemektedir. Referans fiyat gün öncesinden belirlenmektedir. GÖP işlemleri günlük olarak saatlik bazda gerçekleştirilmekte ve her saat için Piyasa Takas Fiyatı (PTF) hesaplanmaktadır. Üreticiler, üreteceği enerji miktarını tüketiciler ise tüketeceği enerji miktarını, fiyat seviyelerini dikkate alarak ayarlayabilmektedir [47].

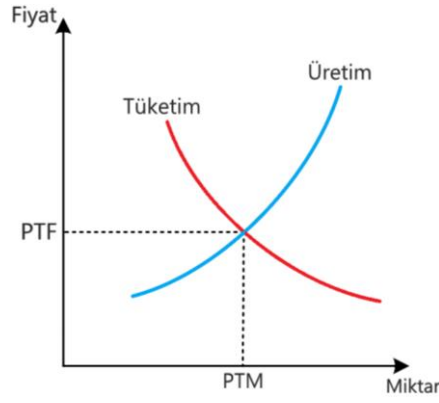
Ekonominin doğası gereği PK'ler elektrik enerjisini düşük fiyatlarda almak ve yüksek fiyatlarda satmak istemektedir. GÖP 'de PK'lerin elektrik enerjisi alım satım işlemleri için farklı teklif türleri bulunmaktadır. Blok teklifler belli bir zaman dilimini kapsayan tekliflerdir ve ardışık tam saatleri içermelidir. Blok teklif için en az, ardışık üç saat için teklif yapılabilir ve yapılan teklif bütünüyle cevaplanır.

Esnek teklifler, PK'lerin, herhangi bir teslim günündeki; aynı veya farklı zaman dilimlerinde, elektrik enerjisi alışı ve satışı için en fazla altı adet verebildikleri teklif türüdür. Esnek teklifler için teklif zaman aralığı en az sekiz, en fazla yirmi dört saati kapsamakta ve teklif süresi de en fazla dört saat olabilmektedir. Esnek teklifler için en yüksek alış ya da satış miktarı 100 MWh'tir. Esnek teklif kabul şartı fiyatı; bir esnek teklifin kabul edilmesi için dikkate alınan eşik fiyat değerini tanımlamaktadır [48].

- **Piyasa Takas Fiyatının Belirlenmesi**

Serbest elektrik enerjisi piyasasında, elektrik enerjisi fiyatını; üretilen ve tüketilen elektrik enerjisi miktarı belirlemektedir. Fiyat-Miktar grafiğinde üretilen elektrik enerjisi ve tüketilen elektrik enerjisi değişimlerinin kesiştiği nokta PTF'nin olduğu noktadır.

GÖP'de her bir işlem saati için, PK'lerin vermiş olduğu tüm elektrik enerjisi alış fiyat tekliflerinin toplamı ile tüketilen elektrik enerjisi değişim eğrisi, tüm elektrik enerjisi satış fiyat tekliflerinin toplamı ile de üretilen elektrik enerjisi değişim eğrisi oluşturulmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi ve tüketilen elektrik enerjisi değişim eğrilerinin kesiştiği nokta PTF ve Piyasa Takas Miktarı (PTM)'nin belirlendiği noktadır. Üretilen elektrik enerjisi ve tüketilen elektrik enerjisi değişim eğrileri oluşturulurken ardı ardına gelen iki fiyat ve iki miktar düzeyleri arasında bulunan boşluklar doğrusal interpolasyon yöntemi ile oluşturulmaktadır [41]. Şekil 2'de, PTM ve PTF'nin belirlenmesine ilişkin grafik gösterilmiştir.



Şekil 2.2 PTF'nin belirlenmesi.

2.2.2.4 Gün İçi Piyasası

GİP; GÖP ve DGP ile eş zamanlı olarak çalışan, ara bir piyasadır. İkili anlaşma işlemlerinin sonlandırılmasının ardından, PK'lerin üretim-tüketim dengesizliklerini azaltabilmeleri yalnızca GİP ile gerçekleştirilir. Bu nedenle GİP, PK'lerin üretim-tüketim dengesizliklerini azaltmak amacıyla işlem yapabildikleri alternatif bir piyasadır. GÖP'de olduğu gibi GİP'de de fiziksel teslimat zorunluluğu bulunmaktadır. Saatlik net durum için alınan veya satılan elektrik enerjisinin, gerçek zamana gelindiğinde üretilmesi veya tüketilmesi gerekmektedir. GİP'de fiziki teslimat başlamadan bir saat öncesine kadar elektrik alımı ve satımı işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. GİP'de sürekli ticaret metodu kullanılmaktadır. Sürekli ticaret, yedi gün yirmi dört saat için işlemlerin yapılabildiği, “ilk başvuru yapana ilk hizmetin verilmesi” prensibinin uygulandığı ve anlık eşleşme imkânının sağlandığı bir ticaret yöntemidir [51].

GİP, GÖP sonrası işlemlerin organize edildiği ve PK'lerin, üretim-tüketim dengesizliklerinin azaltılmasının sağlanmasıyla iletim sisteminin güvenliğine katkı yapan bir piyasadır. Bu özelliği ile GİP, GSO tarafından verilen talimat miktarının azaltılmasını sağlamaktadır. GİP, PK'ler için; alınan elektriğin daha yüksek bir fiyata satılması ve satılan elektriğin daha uygun bir fiyata alınması imkânlarını sağlamaktadır. Ayrıca, beklenmedik durumların oluşması sonucu ortaya çıkan üretim-tüketim dengesizlikleri, GİP aracılığıyla giderilebilmektedir [51].

GİP, GÖP gibi portföy bazlı bir piyasadır. PK'lerin üretim birimlerinin yanında tüketim birimleri de olabilmektedir. GİP'de piyasa katılımcısının sunduğu teklif saniyeler içerisinde eşleşebilmektedir. Uygun fiyatlı teklifin olması durumunda elektrik alış ve satış tekliflerinin eşleşmesi anlık olmaktadır. GİP'de yapılan

işlemler saatlik düzeydedir. Sunulan teklifin süresi bir saati kapsamakta ve bir saat boyunca üretim ve tüketim taahhüdüyle piyasaya sunulmuş olmaktadır [51].

2.2.2.5 Dengeleme Güç Piyasası

GÖP ile GSO'ya her ne kadar üretim ve tüketim dengesi sağlanmış bir piyasa sunulmuş olsa da gerçek zamanda istenmeyen sapmalar olmaktadır. Böyle bir durumda, GSO dengeyi sağlamak için DGP'ye sunulmuş teklifleri kullanarak sistem dengesini sağlamaya çalışmaktadır. DGP, GSO tarafından yönetilmektedir. GSO'nun DGP kapsamında; Sistem Marjinal Fiyatı (SMF)'nin belirlenmesi, PK'lere gerçek zamanlı elektrik enerjisi alışı ve satışı yapma imkânının sunulması, gerçek zamanlı üretim-tüketim dengesinin sağlanması, gerçek zamanlı iletim kısıtlarının yönetilmesi ve YAL ve YAT rezervleri kullanılarak güç sisteminin güvenli bir şekilde işletmesinin sağlanması görevleri mevcuttur. PK'ler DGP'ye elektrik enerjisi alış-satış tekliflerini günlük olarak, saatlik bazda vermektedirler. Sunulan teklif ile uyumlu, teknik olarak gerçekleştirilecek tüm kapasitenin teklif edilmesi gerekmektedir. DGP'de sonuçlandırılan her bir işlem, ilgili talimat süresince, aktif elektrik enerjisinin uzlaştırmaya esas elektrik enerjisi ile teslimat noktasına teslim edilmesi suretiyle gerçekleştirilmektedir [52].

DGP kapsamında, bağımsız olarak 15 dk. içerisinde en az 10 MW yük alabilen ya da yük atabilen üretim ya da tüketim birimleri dengeleme birimi olarak tanımlanmaktadır. Kanal veya nehir tipi hidroelektrik üretim tesisleri, rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri, güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri, dalga enerjisine dayalı üretim tesisleri, gel-git enerjisine dayalı üretim tesisleri, kojenerasyon tesisleri, jeotermal üretim tesisleri ve biokütleyle dayalı üretim tesisleri dengeleme birimi olma yükümlülüğünden muaftırlar. Bu tür birimler ilgili PK'lerin talep etmesi ve GSO'nun da uygun görmesi durumunda dengeleme birimi olabilmektedirler [52].

- **Yük Alma ve Yük Atma Teklif Yapıları**

PK'ler YAL yönünde ve YAT yönünde on beşer düzeyde YAL ve YAT teklifi bildirebilirler. YAL teklif fiyatlarının, ilgili saat için belirlenmiş PTF'den büyük ya da PTF'ye eşit olması; YAT teklif fiyatlarının da ilgili saat için belirlenmiş PTF'den küçük ya da PTF'ye eşit olması gerekmektedir. YAL ve YAT teklif fiyatları arasındaki farkın %20'yi aşmaması gerekmektedir. YAL teklif fiyatlarının bir

önceki seviyesinden yüksek ya da bir önceki seviyesine eşit; YAT teklif fiyatlarının da bir önceki seviyesinden düşük ya da bir önceki seviyesine eşit olması gerekmektedir. YAL ve YAT teklif miktarları en düşük 10 MWh olmalıdır [53].

	Fiyat (TL/MWh)	Miktar (MWh)	
15	...	...	
14	...	...	
...	...	...	
3	150	30	
2	145	60	
1	140	40	
1	95	50	
2	80	30	
3	70	100	
...	...	...	
14	...	...	
15	...	...	

Sistem Satış (YAL)

Sistem Alış (YAT)

Şekil 2.3 YAL ve YAT teklifleri [53].

- **Yük Alma ve Yük Atma Talimatlarının Etiketlendirilme Esasları**

Güç sisteminde üretim-tüketim dengesinin sağlanması amacıyla, artan ya da azalan sıraya göre verilemeyen YAL ve YAT teklifleri; “0” ve “1” kodları ile etiketlenirler. ‘0’ etiket değeri, güç sistemin tamamında üretim ve tüketimin gerçek zamanlı olarak dengelenmesi ve “1” etiket değeri de sistem kısıtlarının giderilmesi amacıyla verilmektedir [41]. Her bir YAL veya YAT talimatının yalnızca bir adet etiket değeri olmalıdır. Etiket değeri, talimatın en fazla ilgili olduğu nedene göre verilmelidir.

YAL ve YAT talimatları verilirken; iletim sistemi kısıtlarının, DGP kapsamındaki dengeleme birimlerine ilişkin teknik kısıtların, üretim güvenilirliğine ve üretim kalitesine ilişkin kriterlerin, tahmini ve mevcut tüketim arasındaki farkların dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca ünitelerin; deneme, kabul ve işletmeye alma testleri esnasındaki durumlarının dikkate alınmasıyla, güç sistemi işletme güvenliği ve bütünlüğünün sağlanması ve dengeleme maliyetlerinin en aza indirilmesi hususları da dikkate alınmalıdır [54].

- **Sistem Marjinal Fiyatının Belirlenmesi**

Güç sisteminde; tüketilen enerjinin üretilen enerjiden yüksek olması durumunda YAL teklif fiyatlarının en düşüğünden; tüketilen enerjinin üretilen enerjiden düşük

olması durumunda ise YAT teklif fiyatlarının en yüksekinden başlanılmak üzere; DGP kapsamında verilmiş olan tüm elektrik enerjisi alış ve satış teklifleri dikkate alınarak belirlenen net talimat hacmine karşılık gelen teklif fiyatı SMF olarak belirlenir [55]. Tablo 2.1’de YAL ve YAT talimatları sonucunda oluşan net hacim gösterilmiştir.

Tablo 2.1 YAL ve YAT talimatları sonucunda oluşan net hacim [55].

Talimat Yönü	Talimat Kodu		Toplam
	0	1	
YAT	300 MWh	200 MWh	500 MWh
YAL	900 MWh	400 MWh	1300 MWh
Sistem Yönü		Enerji Açığı ↑	
Net Talimat		800 MWh	

	Fiyat (TL/MWh)	Miktar (MWh)	Etiket
YAL Teklifleri	500,00	130	-
	440,00	30	-
	320,00	25	-
	300,00	60	-
	210,00	50	1
	207,99	150	0
	198,01	350	1
	180,00	250	-
	170,00	150	0
	153,00	100	-
	147,00	100	0
	140,00	200	0
YAT Teklifleri	140,00	300	0
	140,00	50	0
	138,00	150	0
	135,00	100	0
	133,00	50	-
	130,01	100	-
	130,00	100	-
	130,00	150	-
	60,00	80	1
	58,00	100	1
	50,00	60	-
	0,01	40	-
	0,00	500	-
	0,00	20	1

Şekil 2.4 Sistem marjinal fiyatı [55].

2.2.2.6 Yan Hizmetler

EGS'ler, temel işlevleri olan güvenilirliği sağlayarak tüketicilere enerji aktarmak için YH'lere ihtiyaç duymaktadırlar. YH'ler esas olarak GSO'ların toplam üretilen güç ile tüketilen güç arasında gerekli olan; anlık ve sürekli dengeyi sağlamak için çeşitli zaman dilimlerinde kullandığı, güç üretimi ve mevcut güç kapasitesi kontrol hizmetleridir. EGS'lerin bir asır önce oluşmaya başlamasından bu yana YH'ler sağlanmaktadır. Bu hizmetler yeniden yapılanmalarla birlikte daha iyi tanımlanmış, ölçülmüş ve hizmet bedellerine karşılık ödemeler gerekli hale gelmiştir. YH'ler, üretim tesisi yöneticileri için ek karmaşıklık ve ek gelir potansiyeli oluşturmaktadır [42].

EGS'lerde kararlılığın ve güvenilirliğinin sağlanması için sürekli ve eksiksiz bir şekilde karşılanması gereken iki gereklilik bulunmaktadır: 1) Üretilen güç ve TG arasında bir dengenin kurulması gerekliliği. 2) İletim birimlerinin kısıtlamaları dâhilinde güç akışlarını yönetmek için üretimi veya tüketimi ayarlama gerekliliği. Bu gereklilikler; elektrik enerjisi fiyatlarının değişkenlik göstermesi ve mevcut işlemlerin; çoğunlukla bir sonraki öngörülemez olaya yönelik hazırlık nedeniyle

kısıtlanması sonuçlarına yol açmaktadır. En basit haliyle, enterkonnekte bir güç sisteminin çalıştırılması için aşağıda belirtilen birkaç temel görev bulunmaktadır.

- Normal ve beklenmeyen durumlarda toplam üretimin toplam tüketimle dengelenmesi.
- Normal ve beklenmeyen durumlarda güç sisteminde gerilimin kararlı olması.
- Güç sistemindeki iletim hatlarının aşırı yüklenmesini önlemek için üretimin kontrol edilmesi.
- Yukarıdaki durumlardan birinin oluşması halinde; sistem çöktükten sonra, sistemin yeniden başlatılması.

Üretim birimleri; teknolojileri, verimlilikleri, yakıtları, sermaye maliyetleri, kontrol yetenekleri, tepki hızları ve yukarıdaki işlevleri destekleme yeteneklerine göre farklılıklar göstermektedir. YH'ler, yukarıdaki gereklilikler dikkate alarak sistem güvenilirliğini korumak için tanımlanmıştır [42, 45, 56].

Tablo 2.2 Temel yan hizmetler ve özellikleri [42].

Hizmet	Hizmet Açıklaması			
	Yanıt Hızı	Sürekliliği	Döngü Süresi	Enerji Piyasasındaki Döngüsü
Normal Durumlar				
Düzenleme Rezervi	Generatör çıkışlarını düzenlemek için kullanılan, GSO'nun, güç üretimi değişikliği taleplerine hızlı bir şekilde yanıt verebilen, Otomatik Üretim Kontrolü (OÜK) biriminde çevrimiçi kaynaklardır.			
	Yaklaşık 1 dk.	Dakikalar	Dakikalar	Saatlik

Tablo 2.2 Temel yan hizmetler ve özellikleri [42]. (devamı)

Yük Takibi veya Saatlik Enerji Piyasası	Düzenlemeye rezervine göre daha yavaştır. Saatlik enerji piyasası ile düzenleme hizmeti arasındaki bağlantıyı kurar.			
	Yaklaşık 10 dk.	10 dk.'dan saatlere	10 dk.'dan saatlere	Saatlik
Beklenmedik Durumlar				
Döner Rezerv	Güç sistemi ile senkronize bir şekilde çalışarak, büyük bir üretim birimi ya da hat arızasına yanıt için çıkış gücünü hızlıca ayarlayabilen ve dakikalar içerisinde tam çıkış gücüne ulaşabilen çevrimiçi kaynaklardır.			
	Saniyelerden 10 dk.'ya	10 dk.'dan 120 dk.'ya	Saatlerden günlere	Saatlik
Döner Olmayan Rezerv	Döner rezerv kadar hızlı yanıt vermesi gerekmeyen ve çevrimdışı olabilen kaynaklardır. Fakat bu rezervlerin de 10 dakika içinde tam çıkış gücüne ulaşabilmesi gerekmektedir.			
	10 dk.'nın altı	10 dk.'dan 120 dk.'ya	Saatlerden günlere	Saatlik
Yedek ya da Tamamlayıcı Rezerv	Döner ve döner olmayan rezervleri beklenmedik durum öncesine durumuna getirmek için kullanılan kaynaklardır.			
	30 dk.'nın altı	2 saat	Saatlerden günlere	Saatlik
Diğer Hizmetler				

Tablo 2.2 Temel yan hizmetler ve özellikleri [42]. (devamı)

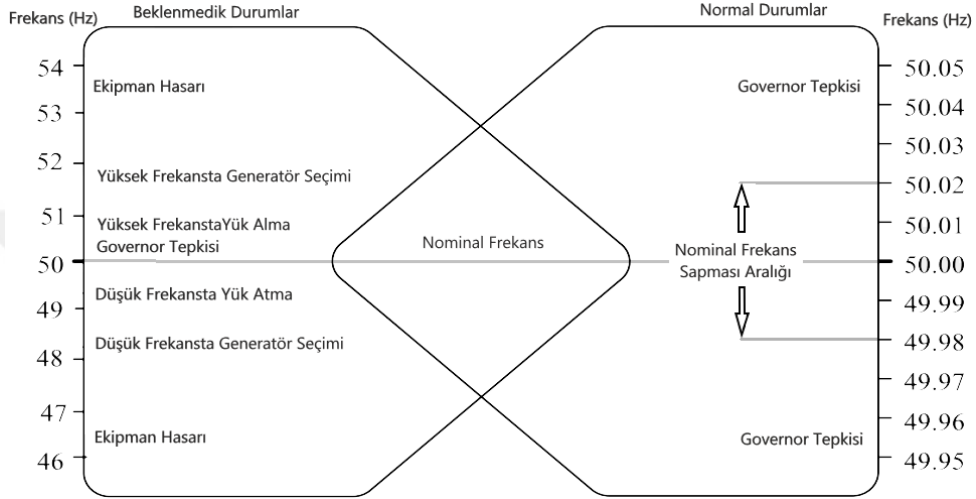
Gerilim Kontrolü	Güç sistemi gerilimlerini gereken aralıklarda tutabilmek amacıyla reaktif gücün ayarlanmasıdır.			
	Saniyeler	Saniyeler	Devamlı	Yıl(lar)
Karanlık Başlangıç	Doğru lokasyonda, şebekeden destek almadan kendi kendine çalışabilen, güç sistemine enerji verilmesinde faydalı olacak yeterli kontrol ile aktif ve reaktif güce sahip üretimdir.			
	Dakikalar	Saatler	Aylardan yıllara	Yıl(lar)

YH'ler için elektrik enerjisi fiyatlarındaki değişkenlik önemlidir. Enerji piyasalarındaki fırsat maliyetleri yan hizmet fiyatlarını etkilediği için yan hizmet fiyatları genellikle enerji fiyatlarından daha değişkendir. Ayrıca, değişen saatlik enerji gereklilikleri ve fiyatları, tüketilen güç takibini zorlaştırmaktadır. EGS'lerde enerji depolama sistemleri olmadığından, mevcut güç kapasitesinin kontrol edilmesi çok önemlidir. Acil tüketilen güç gerekliliklerinin karşılanması ve her türlü beklenmedik durumun sebep olacağı kesintilerin telafi edilmesi için yeterli güç üretim kapasitesinin daima sağlanması gerekmektedir. Kapasite; tüketilen gücü karşılamak, normal ve beklenmedik durumlar için rezervleri sağlamak ve tüketilen güç ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen güç tahmin hatalarına karşı rezerv sağlamak için gereklidir [42, 56].

2.3 Frekans Kontrolü

Güç sistemi frekansının kararlılığı, sistemin düzgün çalışmasının temel bir göstergesidir. Frekans, güç sisteminde, üretilen güç ile tüketilen güç arasındaki dengenin durumunu göstermektedir. Tüketilen güç üretilen güçten büyük olduğunda frekans düşmekte; üretilen güç tüketilen güçten büyük olduğunda ise frekans yükselmektedir. Frekansın, denge durumundaki değerden önemli ölçüde sapması güç sisteminde ekipman hasarına ve sistemin çökmesine neden olur.

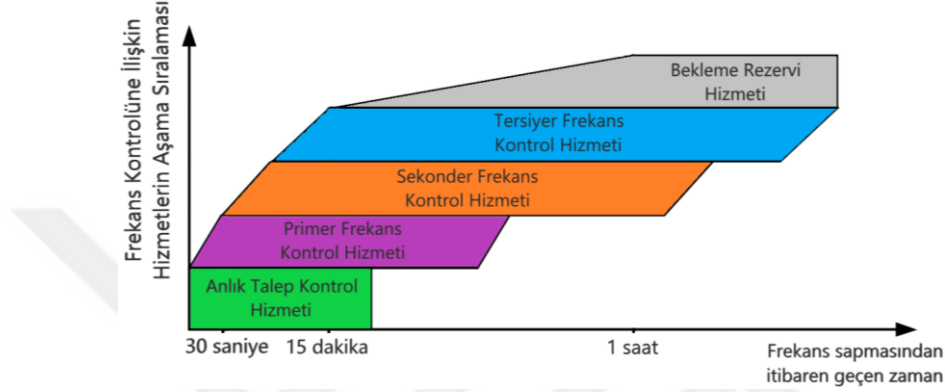
EGS’lerde frekansın kontrolü için iki farklı mekanizma bulunmaktadır. Generatörlere ait regülatörler ± 0.35 Hz ölü banda sahip olduğundan, generatörler normal koşullarda sistem frekansının değişiminden etkilenmemektedir. Her dengeleme yetkilisi, sistem frekansını izlerken üretilen güç ile tüketilen gücü dengelemeye odaklanmaktadır. Üretilen güç ve tüketilen güç dengede olduğunda sistem frekansı kararlıdır. Şekil 2.3 güç sistemlerinde frekans kontrolü şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Güç sistemlerinde frekans kontrolü şeması [45].

Ülkemiz güç sisteminin, 18 Eylül 2010 tarihinde ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) Avrupa Kıtası Senkron Bölgesi şebekesine dâhil edilmesiyle, deneme paralel işletme çalışmaları başlatılmıştır. İki yıldan fazla devam eden senkron paralel deneme işletmesi sürecinin ardından 2014 sonu itibari ile Türkiye güç sisteminin, ENTSO-E Kıta Avrupası Senkron Bölgesi ile kalıcı işletmeye teknik olarak geçişi sağlanmıştır [57]. Ülkemiz güç sisteminin, ENTSO-E’ye dâhil olması sonucunda; güç sisteminin rezerv gerekliliği azalmıştır. ENTSO-E’ye dâhil olunması öncesinde PFKÜ rezerv kapasitesinin, en yüksek kapasiteli üretim santrali kapasitesi değerinde olması gerekiyor iken; ENTSO-E’ye dâhil olunması sonucunda PFKÜ rezervi 500 MW seviyesine düşürülmüştür. ENTSO-E’nin 2014 yılı çalışması sonucunda, Türkiye elektrik güç sisteminde emre amade bulundurulması gereken, frekans kontrolü rezerv miktarının en az 250 MW olması kararlaştırılmıştır. Ayrıca, ENTSO-E senkronizasyonu sonucunda yüksek kapasiteli senkron çalışan bir sisteme bağlanıldığından dolayı, Türkiye güç sisteminin frekans kararlılığı önemli ölçüde artmıştır [45].

EGS’lerde frekans kontrol işlemi; Primer Frekans Kontrol Ünitesi (PFKÜ), Sekonder Frekans Kontrol Ünitesi (SFKÜ), Tersiyer Frekans Kontrol Ünitesi (TFKÜ), Anlık Talep Kontrol (ATK) hizmeti ve Bekleme Rezervi (BR) hizmeti ile sağlanmaktadır. Büyük ölçekli enterkonnekte EGS’lerde bu ünitelerin tümü bulunmaktadır. Bunun yanında SFKÜ’nün bulunmadığı küçük ölçekli EGS’ler de mevcuttur [45]. Şekil 2.3’te frekans kontrolüne ilişkin hizmetlerin aşama sıralaması gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Frekans kontrolüne ilişkin hizmetlerin aşama sıralaması.

2.3.1 Primer Frekans Kontrol Ünitesi

PFKÜ, EGS’lerde sistem frekansındaki değişime karşı, hız regülatörleri ile generatörlerin çıkış gücünün otomatik ayarlanması sonucunda frekansın dengede tutulmasını sağlamaktadır. Primer frekans kontrolünün, GSO etkisi olmaksızın kendiliğinden işleyecek şekilde devamlı sağlanması gerekmektedir. Güç sistemi frekansının uygun seviyelerde tutulabilmesi için uygulanacak YH’ler belirli bir aşama sıralamasına göre uygulanmaktadır. PFKÜ, frekans değişimini sonrası bir kaç saniye içerisinde devreye girmektedir. Primer frekans kontrol yanıtının, 30 s içerisinde en yüksek seviyeye ulaşabilmesi ve 15 dakika boyunca devam edebilmesi gerekmektedir [58, 59].

2.3.2 Sekonder Frekans Kontrol Ünitesi

SFKÜ, EGS’lerde güç sistemi frekansının nominal değere ayarlanması için YH kurallarına göre, sekonder frekans kontrolüne desteği zorunlu olan üretim birimlerinin aktif güç çıkışlarını, GSO bünyesindeki OÜK birimi vasıtasıyla ayarlamaları şeklinde işlev görmektedir. Sekonder frekans kontrolüne destek olan bir santralin; çıkış gücünü değiştirmeye başlaması için yanıt vereceği süre en fazla 30 saniye olmalıdır. Aynı zamanda santral, yapılacak testler ile istenilen yüklenme

hızı için belirlenen üretim seviyesine ulaşabilmelidir. GSO bünyesindeki OÜK biriminden alınan verilere göre; santral, üretim seviyesini sürekli olarak koruyabilmeli ve sekonder frekans kontrolü için desteği sürekli olarak sağlayabilmelidir. Santralin sekonder frekans kontrolüne desteği nedeniyle primer frekans kontrolü performansı olumsuz etkilenmemelidir [60].

2.3.3 Tersiyer Frekans Kontrol Ünitesi

TFKÜ, EGS'lerde frekans kararsızlığının oluşması ile birlikte dakikalar içerisinde etkin olmakta ve saatler süresince etkin kalabilmektedir. TFKÜ, tahmin edilebilir tüketilen güç değişimlerinin önceden ayarlanması şeklinde işlev görmektedir. TFKÜ ile PFKÜ ve SFKÜ rezervlerinin; frekansın dengede olduğu durumdaki seviyelerine geri getirilmesi sağlanmaktadır [45]. Kendi kendine devreye giren ve güç sistemi için kritik öneme sahip olan SFKÜ rezervleri, DGP'de hazır olan ve GSO tarafından manuel olarak devreye alınan TFKÜ rezervleri ile ikame edilmektedir. Böylelikle oluşabilecek yeni arıza için SFKÜ'nün hazır hale getirilmesi sağlanmaktadır [56].

2.3.4 Anlık Talep Kontrol Hizmeti

Güç sistem frekansındaki düşüşün engellenebilmesi amacıyla ATK rezervleri ile ATK hizmeti sunacak tüketim tesisleri, GSO'nun düzenlediği ihaleler vasıtasıyla belirlenmektedir [44]. ATK hizmeti, frekans röleleri düşük düzeyde çalıştığında, çalışma düzeyinin daha fazla düşmesini önlemek amacıyla tüketim tesislerinin yüklerinin dengelenmesi işlevidir. ATK rezervi, güç sistemindeki aktif en yüksek kapasiteli birimin arızalanması durumunda, frekansın 49.0 Hz seviyesine düşmesinin önüne geçmek için PFKÜ rezervine destek olacak şekilde kullanılmaktadır. ATK hizmeti, YH bünyesinde ATK hizmeti sunacak tüketim tesisleri ile gerçekleştirilmektedir.

2.3.5 Bekleme Rezervi Hizmeti

BR hizmeti güç sisteminde aktif olmayan bir üretim santralının, gerekli olması durumunda GSO talimatı ile devreye alınması hizmetidir. BR hizmeti, yenilebilir enerji kaynaklarının üretim belirsizlikleri ya da tüketilen güç tahminlerindeki hatalar nedeniyle TFKÜ rezervinin; frekansın dengede olduğu durumdaki seviyesine getirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca BR hizmeti, TFKÜ rezervinin yetersiz kalması durumunda; bu rezervin oluşturulması ya da tamamlanmasını

sağlamaktadır [41]. BR hizmeti, güç sistemi ile senkronize olmayan fakat GSO'nun düzenlediği ihale ilanlarında belirtilmiş olan zaman dilimi içerisinde güç sistemi ile senkronize olmak üzere, emre amade durumda olan birimler aracılığıyla sağlanmaktadır [41].

2.4 Güç Sistemlerinde Güvenilirlik

Üretim tesisleri, bir elektrik generatörüne bağlı bir ana taşıyıcıyı çevirerek mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir veya daha fazla üretim ünitesinden oluşmaktadır. Ana taşıyıcılar genellikle; kömür, petrol, doğal gaz veya nükleer yakıtla ateşlenen bir kazanda üretilen buharla çalıştırılmakla birlikte; hidroelektrik santraller ve rüzgâr santralleri gibi termal olmayan kaynaklarla da çalıştırılabilmektedir [43].

Üretim tesislerinin tüketicilerin talep ettiği elektriğin tamamını karşılayabilme yeteneğine sistem yeterliliği denir. Sistemin yeterliliğinin sağlanması için üç koşulun karşılanması gerekmektedir.

- 1) Mevcut üretim kapasitesinin, talep edilen yük ile sistem kayıpları toplamından daha büyük olması gerekmektedir.
- 2) Güç sistemi ekipmanlarına aşırı yükleme yapılmadan, talep edilen gücün tüketicilere aktarılabilmesi sağlanmalıdır.
- 3) Tüketicilere aktarılan elektrik enerjisinin, kabul edilebilir bir gerilim seviyesinde olması gerekmektedir.

EGS'lerin, sistem yeterliliği değerlendirmesi doğası gereği olasılıksaldır. Güç sistemindeki her üretim tesisinin; mevcut olma, düşük kapasiteyle mevcut olma ve kullanılamama olasılıkları her zaman vardır. Bu durum, üretim birimlerinin, mevcut olma durumlarının kombinasyonlarına ilişkin olasılıkların hesaplanmasına imkân tanımaktadır. EGS'lerde sistem yeterlilik değerlendirmesi gerçekleştirmek için her mevcut olma durumu kombinasyonu, tüm yıl boyunca saatlik sistem yükleriyle karşılaştırılmaktadır. Eğer mevcut üretim talep edilen yükü karşılayamıyorsa veya kısıtlamalar ihlal ediliyorsa sistem yetersizdir ve yükün azaltılması gerekmektedir. Üretim yeterliliği değerlendirmeleri, her yük hattı için aşağıdaki verileri ortaya koymaktadır [43].

- 1) Yük kesintisine sebebiyet veren üretim ve tüketim kombinasyonları.

2) Bu yetersiz durum kombinasyonlarının her birinin meydana gelme olasılığı.

Bu bilgiler kullanılarak, her yük hattı için; beklenen kesinti sayısı, kesinti süresi ve sağlanamayan enerji hesaplanabilmektedir. Yük hattı sonuçları aşağıdaki verilen güç sistemi güvenilirlik kriterlerini oluşturmak için kullanılabilir.

LOLE (Yük Kaybı Olasılığı - Loss of Load Expectation): Güç sistemi mevcut kapasitesinin, talep edilen tüketimi karşılayamama olasılığıdır.

EENS (Sağlanamayan Enerji Beklentisi - Expected Energy not Served): Güç sistemi mevcut kapasitesinin talep edilen tüketimi karşılayamaması sebebiyle beklenen sağlanamayacak enerji miktarıdır.

EGS'lerin temel amacı tüketicilere; uygun fiyatlı, kaliteli, güvenilir ve kesintisiz enerji sağlamaktır. Güç sistemin çalışma süresi boyunca beklenen bu amaca yönelik görevleri yerine getirebilmesi güvenilirlik olarak tanımlanır [45, 61]. EGS'lerde güvenilirlik çalışmaları; sistemde, güç kesintilerine ve yüklerin enerjisiz kalmasına sebep olabilecek bir arıza meydana geldiğinde ortaya çıkan olası eksiklikleri belirlemek için yapılmaktadır.

EGS'lerde güvenilirlik analizi iki düzeyde gerçekleştirilmelidir: 1) EGS'de üretilen gücün toplam tüketilen gücü karşılayıp karşılamadığını belirlemek için üretim bölgesini de kapsayacak düzeyde güvenilirlik analizi yapılmalıdır. 2) Üretim ve iletim bölgelerini kapsayan büyük yük noktaları seviyesinde yük ihtiyacının karşılanmasına ilişkin güç sistemi değerlendirilmelidir.

EGS'lerde rezervlerin artırılması ile güç sisteminin güvenilirliği artırılır. Ancak rezervlerin artırılmasının güç sistemi işletme maliyetini arttıracak da açıktır. Güvenilirliğin belirli bir seviyenin üzerinde olması oluşacak ek maliyetlerden dolayı GSO için istenmeyen bir durumdur. Bu değerlendirme sonucunda GSO tarafından EGS'nin güvenilirlik seviyesinin belirlenmesi ve bu güvenilirlik seviyesini sağlamanın maliyetinin de dikkate alınması gerekmektedir [62, 63].

3

KESİNTİLİ YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

3.1 Giriş

Rüzgâr ve güneş kaynaklı üretim tesislerinin güç sistemlerindeki payı dünya genelinde hızlı bir şekilde büyümeye devam etmektedir. Rüzgâr ve güneşe dayalı kaynaklardan üretilen gücün kesintili ve olasılıklı olması bu kaynakların güç sistemlerine tam olarak entegre edilebilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, rüzgâr ve güneş gibi KYEK'lerin güç sistemlerine yüksek seviyelerde entegrasyonu yakın gelecekte de dünya genelinde temel zorluklardan biri olmaya devam edecektir [64]. KYEK'lere dayalı üretim tesislerinin EGS'lere dâhil edilmesinin etkileri iki ana kategoride değerlendirilebilmektedir. Birinci etki, EGS'lerde frekans kararlılığının sağlanması amacıyla; üretilen güç ile tüketilen gücün dengelenmesi gerekliliğidir. Bu etki saniyelerden saatlere kadar uzanan tüketilen güç değişimlerinin üretilen güç ile karşılanabilmesi gerekliliği olarak açıklanabilmektedir. İkinci etki ise güvenilirlik etkisidir. Bu etki, beklenmedik durumların oluşma olasılıklarının dikkate alınarak tüketilen gücün karşılanmasına yetecek kadar üretilen gücün olması gerekliliğiyle ilgilidir.

Rüzgâr ve güneşin değişken doğası, GSO'lar için çok sayıda probleme yol açmakta ve bu problemler de güç sistemi güvenilirliğini olumsuz etkilemektedir. Rüzgâr ve güneşin belirsizlikleri ve sürekli mevcut olmamaları, bu kaynaklardan üretilen enerjinin öngörülen miktardan eksik veya fazla olmasına sebep olmakta; bu da üretim-tüketim dengesinin bozulmasıyla EGS frekansının istenilen değerden sapmasına sebep olmaktadır. Rüzgâr ve güneş kaynaklı tesislerden üretilen güçteki değişimlerin EGS'lerdeki etkilerini telafi etmek amacıyla yedek rezervler ve enerji depolama sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Enerji depolama sistemlerinin EGS'lerde kullanımının henüz yeterli seviyede olmaması sebebiyle, frekans kararlılığı için üretim-tüketim dengesinin hızlı bir şekilde sağlanması amacıyla yedek üretim santralleri aktif olmalıdır. EGS'lerde üretim-tüketim dengelemesi ve güvenilirlik çalışmaları istatistiksel hesaplamaları içermektedir. KYEK'lerden üretilen gücün EGS'lere dâhil olması; yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen

elektrik maliyetinin hesaplamasında dikkate alınması gereken ve güç sistemi işletme cezaları açısından değerlendirilebilecek ek belirsizlikler ortaya çıkarmaktadır [65].

Bu bölümde, KYEK'lerden üretilen gücün kaynağı olan; rüzgâr ve güneş enerji sistemlerine ilişkin temel kavramlar açıklanmıştır.

3.2 Rüzgâr Enerji Sistemleri

Rüzgâr, en basit ifade ile havanın hareketi olarak tanımlanabilir. Rüzgâr enerjisi, elektromekanik güç dönüştürücü makineler tarafından elektrik enerjisine dönüştürülebilir ya da su pompalamak ve yelkenli gemileri hareket ettirmek gibi amaçlarla da kullanılabilir.

Bu bölümde rüzgâr enerjisine ilişkin temel kavramlar sunulmuş ve rüzgâr enerjisinin çalışma prensibi ele alınmıştır. Rüzgâr enerjisinin rüzgâr türbinine aktararak üretilen elektrik enerjisinin verimliliğini belirleyen önemli parametreler açıklanmıştır.

3.2.1 Rüzgâr ile İlişkili Temel Kavramlar

Rüzgâr; coğrafi konuma, mevsimlere, yerden yüksekliğe, hava durumuna, bölgesel yer şekillerine ve günün saatine bağlı olarak değişmektedir. Rüzgâra ilişkin özelliklerin anlaşılması; rüzgâr türbininin en uygun şekilde tasarlanmasına, rüzgâr ölçüm tekniklerinin geliştirilmesine ve rüzgâra dayalı üretim tesislerinin kurulumu için uygun bölgelerin seçilmesine yardımcı olmaktadır. Rüzgâra dayalı üretim tesisleri için tesisin kurulacağı lokasyondaki rüzgâr özelliklerinin belirlenmesi, uygun türbininin seçilmesi, rüzgâr türbininin üreteceği gücün tahmin edilmesi ve rüzgâr santralinin ekonomik açıdan değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Rüzgâr türbininden üretilen elektrik enerjisi miktarını hesaplamak için, türbinin kurulacağı bölgeye ilişkin rüzgâr verileri gerekmektedir [67].

3.2.1.1 Rüzgâr Hızı

Rüzgâr hızı, rüzgâr kaynaklı üretim tesisleri için en önemli parametrelerden biridir. Rüzgâr hızı, coğrafi koşullar ve hava koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak hem zamana hem de mekâna göre değişmektedir. Rüzgâr hızının değişkenliği ve belirsizliğinden dolayı, ölçülen rüzgâr hızı verileri genellikle istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmektedir. Rüzgâr hızları gündüzleri daha yüksektir ve en

yüksek hız öğleden sonra saat 3 civarında meydana gelmektedir. Bu durum rüzgâr hızının güneş ışığı ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Birleşik Krallık çevresinde 1970-2003 dönemine ait rüzgâr hızı verilerine dayanarak, aylık ortalama rüzgâr hızının aylık ortalama sıcaklıkla ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır [67]. Maksimum rüzgâr hızı ortalaması Ocak ayında, minimum rüzgâr hızı ortalaması ise Ağustos ayında görülmektedir. Ortalama rüzgâr hızlarının yıllık değişimleri büyük ölçüde ölçümün yapıldığı bölgeler bağlıdır. Dolayısıyla yıllık tahminler için ortak bir ilişki bulunmamaktadır [66].

Dünyada yıllık ortalama rüzgâr hızının en yüksek olduğu yer Antarktika'nın sınırında, Doğu Adalie bölgesinin dağ kenarlarıdır. Yıllık ortalama rüzgâr hızının 18 m/s olduğu bu bölge için mevcut rüzgâr enerjisi, Avrupa'daki tipik bir bölgedeki rüzgâr enerjisinin yaklaşık 200 katıdır. Bu bölgelerdeki rüzgâr hızlarının çok yüksek ve çok düşük olmaları sebebiyle her iki bölge de rüzgâr türbini kurulumu için uygun değildir [68]. Türkiye'nin de coğrafi özelliklerinden dolayı yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir [69]. Tablo 3.1'de Türkiye'nin farklı bölgeleri için yıllık ortalama rüzgâr hızı ve rüzgâr enerjisi potansiyeli gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Türkiye'nin farklı bölgelerindeki yıllık ortalama rüzgâr hızları [69].

Bölge	Yıllık ortalama rüzgâr hızı (m/sn.)	Yıllık ortalama rüzgâr yoğunluğu (W/m²)
Marmara	3,3	51,9
Güneydoğu Anadolu	2,7	29,3
Ege	2,6	23,5
Akdeniz	2,5	21,4
Karadeniz	5,4	21,3
İç Anadolu	2,5	20,1

Tablo 3.1 Türkiye'nin farklı bölgelerindeki yıllık ortalama rüzgâr hızları [69].

(devamı)

Doğu Anadolu	2.1	13.2
---------------------	------------	-------------

Tablo incelendiğinde, Türkiye’de rüzgâra dayalı üretim tesisleri için en uygun bölgelerin Marmara, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgeleri olduğu görülmektedir.

Rüzgâr türbini kurulduğu bölgedeki rüzgâr hızıyla doğru orantılı olarak elektrik enerjisi üretmektedir. Ancak rüzgâr hızı hiçbir zaman sabit olmamaktadır. Her rüzgâr hızı için, türbinin maksimum gücü üretmesini sağlayacak bir rotor dönüş hızı bulunmaktadır. Bu maksimum güç değeri; farklı rüzgâr hızlarında ve farklı dönüş hızlarında meydana gelmektedir. EGS’ler 50 Hz veya 60 Hz gibi sabit bir frekansa ve sabit bir faz açısına sahip olduğundan dolayı bir rüzgâr türbininin güç sistemine entegre edilebilmesi için rüzgâr santralinden üretilen elektriğin de bu özelliklerde olması gerekmektedir. Gerekli sabit frekansını elde etmek için rotor dönüş hızının sabit tutulması gerekmektedir. Türbin generatör türü olarak çift beslemeli asenkron generatörler kullanılarak veya elektronik frekans dönüştürücüler ile rotor dönüş hızı sabit tutulabilmektedir [70].

3.2.1.2 Rüzgâr Analizi

Rüzgâr verilerinin değerlendirmesinde; uzun vadeli, farklı bölgelerdeki ve farklı yüksekliklerdeki rüzgâr özellikleri belirlenmelidir. Bu amaçla rüzgâr hızı olasılık yoğunluk fonksiyonları olan; Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı kullanılmaktadır.

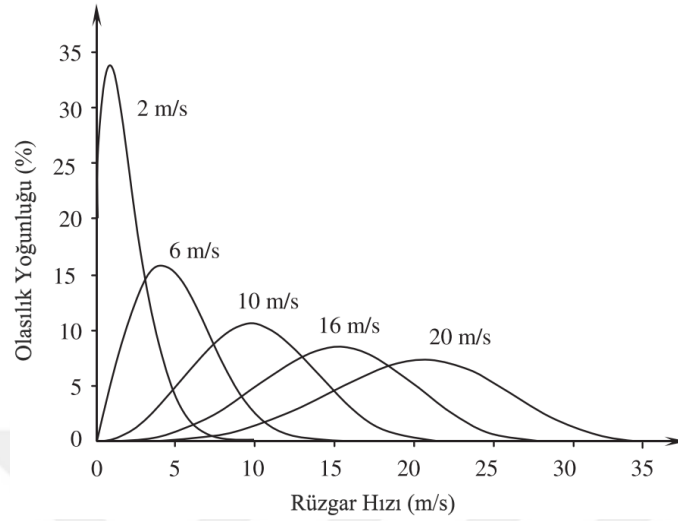
- **Weibull Dağılımı**

Bir bölgedeki rüzgâr hızı değişimi, bölgede belirli bir süre boyunca farklı ortalama rüzgâr hızlarının oluşma olasılığını gösteren Weibull dağılım fonksiyonu kullanılarak tanımlanabilmektedir. Bir Weibull rastgele değişkeni ortalama hız; $\bar{v}$ ’nin olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir [71].

$$f(\bar{v}, k, \lambda) = f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\bar{v}}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\bar{v}}{\lambda}\right)^k\right), & \bar{v} \geq 0 \\ 0, & \bar{v} < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de, $\bar{v}$; rüzgârın belirli bir zaman aralığındaki ortalama hızı, λ ; ortalama rüzgâr hızıyla yakından ilişkili olan ölçek faktörü ve k ; dağılımın

genişliğinin bir ölçümü olan şekil faktörüdür. λ ve k parametreleri, bölgede ölçülen rüzgâr hızı verilerinin istatistiksel analizinden belirlenebilmektedir [72]. Şekil 3.1’de çeşitli ortalama rüzgâr hızlarına ilişkin Weibull dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Farklı ortalama rüzgâr hızlarına ilişkin Weibull dağılımları [66].

- **Raileigh Dağılımı**

Bir bölgede yalnızca ortalama rüzgâr hızı değeri biliniyor ise Rayleigh Dağılım Fonksiyonu ile herhangi bir zaman zaman aralığı için ortalama rüzgâr hızının oluşma yüzdesi hesaplanabilmektedir. Rayleigh Dağılımı ile elde edilen ortalama rüzgâr hızları bir olasılık yoğunluğu dağılımıdır. Dağılım grafiksel olarak çizildiğinde; eğri altında kalan alan 1’e eşit olacaktır. Yalnızca ortalama rüzgâr hızı kullanılarak olasılık dağılımının belirlenmesi Rayleigh dağılımının en önemli faydası olarak ifade edilebilir. Aşağıdaki denklemde Rayleigh dağılım fonksiyonu görülmektedir [73].

$$f(v) = \left(\frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{v}{\bar{v}^2}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{\bar{v}^2}\right)^2\right] \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de, v ; anlık rüzgâr hızıdır.

3.2.1.3 Rüzgâr Türbülansı

Rüzgâr türbülansı, rüzgâr hızının özellikle yatay hız bileşeni için kısa zaman aralıklarındaki dalgalanması olarak tanımlanabilmektedir. Denklem 3.3’te herhangi bir t anındaki rüzgâr hızının; ortalama rüzgâr hızı; $(\bar{v})$ ve anlık rüzgâr hızı dalgalanması; $v'(t)$ bileşenlerinden oluştuğu görülmektedir.

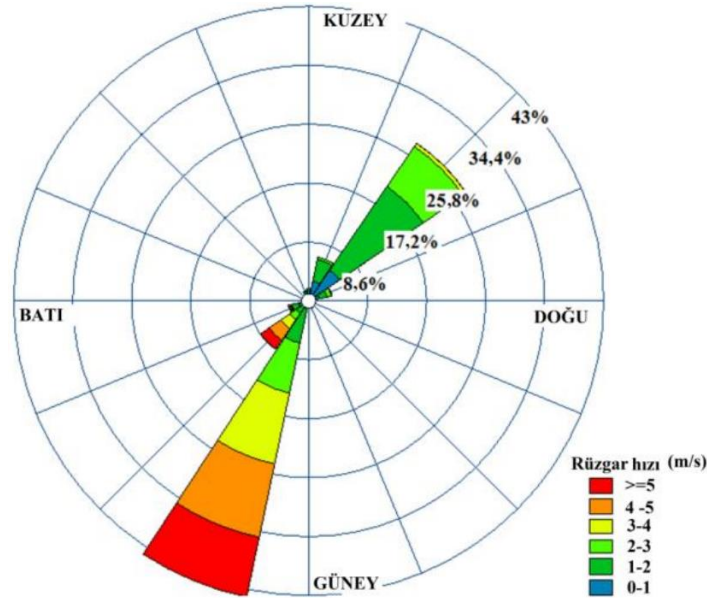
$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (3.3)$$

Rüzgâr türbülansının, rüzgâra dayalı üretim tesislerinin güç çıkışlarındaki dalgalanmalar üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Yüksek türbülans sonucunda türbine büyük dinamik kuvvetler etki etmektedir. Bu durum da, türbin arızalarının meydana gelebilmesine ve türbin ömrünün kısılmasına sebep olabilmektedir. Rüzgâr santrallerinin kurulumu amacıyla uygun bölgelerin seçimi için rüzgâr türbülansının yoğunluğunun bilinmesi, rüzgâra dayalı üretim tesislerinin elektrik enerjisi üretimindeki sürekliliği açısından çok önemlidir. Rüzgâr türbülansı yoğunluğu; I ve standart sapma; σ_v olmak üzere rüzgâr türbülansı yoğunluğu aşağıdaki denklem ile verilmiştir [66].

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \quad (3.4)$$

3.2.1.4 Rüzgâr Yönü

Kurulacak rüzgâr santralının bölge seçiminde ve santraldeki rüzgâr türbinlerin yerleştirilmesinde, rüzgâr yönlerinin uzun süreli istatistiksel verileri oldukça önemlidir. Bu amaçla kullanılabilecek rüzgârgülü diyagramı ile herhangi bir bölge için belirli bir zaman dilimindeki rüzgâr yönleriyle ilgili rüzgâr verileri analiz edilebilmektedir. Dairesel rüzgârgülü diyagramında 8 veya 16 adet ana yönün her birinden esen rüzgâr frekansları gösterilmektedir [74].



Şekil 3.2 Rüzgâr gülü diyagramı [74].

Şekil 3.2’de gösterilen örnek rüzgârgülü diyagramında birbirinden 22.5° aralıklı 16 radyal çizgi bulunmaktadır. Her hattın uzunluğu rüzgâr yönünün frekansı ile orantılıdır.

3.2.1.5 Rüzgâr Kayması

Rüzgârın yerden yükseklikle arttığını ifade eden meteorolojik olaya rüzgâr kayması denir. Yüksekliğin rüzgâr hızı üzerindeki etkisi, yeryüzünün engebeli olmasından kaynaklanmaktadır. İki farklı yükseklikteki rüzgâr hızlarını ilişkilendiren rüzgâr kayması; aşağıda verilen Hellmann güç denklemi kullanılarak tahmin edilebilmektedir [75].

$$v(z) = v(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^\delta \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’te, z ; yeryüzüne olan yükseklik, z_0 ; bilinen $v(z_0)$ rüzgâr hızı için referans yüksekliği ve δ da rüzgâr kesme katsayısıdır. Rüzgâr kayması katsayısı, genellikle gündüzleri daha düşük ve geceleri daha yüksek olmaktadır. Rüzgâr türbininden elde edilen güç, önemli ölçüde türbinin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızına bağlıdır. Bu nedenle daha fazla rüzgâr gücü üretebilmek ve üretilen birim güç başına maliyeti düşürmek için modern rüzgâr türbinleri 80 m’nin üzerindeki yüksekliklerde inşa edilmektedir [66].

3.2.2 Rüzgâr Gücü ile İlişkili Temel Kavramlar

Belirli bir kütleye sahip bir cisim doğrusal hareket ya da dönme hareketi yapıyorsa; bu cismin kütesinden ve hareket hızından kaynaklanan bir kinetik enerjisi mevcuttur. Havanın da hareket etmesi sonucunda sahip olduğu kinetik enerji aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$E_k = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \quad (3.6)$$

Burada, m ; havanın kütesidir. Güç, birim zamanda aktarılan enerji olduğundan; rüzgâr gücü, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin zamana göre değişimi ile elde edilmektedir.

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \bar{v}^2 \quad (3.7)$$

Rüzgâr enerjisinin yalnızca bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Denklem 3.7’de, P_w ; rüzgâr gücü, E_k ; rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji ve $\dot{m}$

ise bir rüzgâr türbininden geçen rüzgârın, türbin kanatlarını hareket ettirmesine karşılık gelen kütlesidir. $\dot{m}$ değeri aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\dot{m} = \tau A \bar{v} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de; τ ; hava yoğunluğu ve A ise türbin kanatlarının hareketi sonucu süpürülen alandır. Denklem 3.8, Denklem 3.7’de yerine koyulursa, rüzgârdan elde edilecek güç aşağıdaki denklem ile verilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \tau A \bar{v}^3 \quad (3.9)$$

Sonuç olarak Denklem 3.9 incelenirse, rüzgâr gücünün; rüzgâr hızına, rüzgâr türbini kanatlarının süpürme alanına ve hava yoğunluğu; τ ’ya bağlı olduğu görülmektedir. Rüzgâr türbini kanatlarının süpürme alanı da rüzgâr kanat uzunluğuna bağlıdır. Rüzgâr gücü çıkışı; P_w , ortalama rüzgâr hızının küpü; $\bar{v}^3$ ile orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki küçük bir değişiklik, rüzgâr gücü çıkışında büyük bir değişikliğe neden olmaktadır.

3.2.2.1 Rüzgâr Türbini Kanat Süpürme Alanı

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi rüzgâr türbini kanatlarının süpürdüğü alan, A ; aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$A = \pi(l + r)^2 - \pi r^2 = \pi l(1 + 2r) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da, l ; rüzgâr türbini kanatlarının uzunluğu ve r ise türbin göbeğinin yarıçapıdır. Eğer; $l \gg 2r$ olursa, hesaplamalarda türbin göbeği yarıçapı ihmal edilebilir ($A \approx \pi l^2$). Sonuç olarak; kanatlarının süpürdüğü alanın, yaklaşık olarak kanat uzunluğunun karesi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

3.2.2.2 Hava Yoğunluğu

Denklem 3.9 ile ifade edildiği gibi rüzgâr gücü üretimini etkileyen bir diğer önemli parametre de hava yoğunluğudur. Hava yoğunluğu aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\tau = \frac{p}{GT} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de, p ; bölgesel hava basıncı, G ; gaz sabiti ve T ise hava sıcaklığıdır. Dikey hareketin olmaması durumunda iki yükseklik arasındaki basınç farkının, havanın kütlesinden kaynaklandığını açıklayan hidrostatik denklem aşağıda verilmiştir.

$$dp = -\tau g dz \quad (3.12)$$

Denklem 3.12’de, g ; yerçekiminin ivmesidir. Denklem 3.11 ve Denklem 3.12 birleştirilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{GT} dz \quad (3.13)$$

Yer çekimi ivmesi; g , yerden yükseldikçe azalmaktadır. Buna göre, yerden z kadar yükseklikteki yer çekimi ivmesi aşağıdaki denklem ile verilir.

$$g = g_0 \left(1 - \frac{4z}{D}\right) \quad (3.14)$$

Denklem 3.14’te, g_0 ; yerdeki yerçekimi ivmesi ve D ise dünyanın çapıdır. Bununla birlikte, $D \gg 4z$ olduğundan yerçekimi ivmesinin yükseklikle değişimi ihmal edilebilir. Sıcaklık yükseklikle ters orantılı olduğundan; $\frac{dT}{dz} = c$ varsayımı ile aşağıdaki denklem elde edilir.

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{g}{cG}} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15’te; p_0 ve T_0 sırasıyla yerdeki hava basıncı ve yerdeki sıcaklıktır. Denklem 3.11 ve Denklem 3.15 kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\left(\frac{g}{cG}+1\right)} = \tau_0 \left(1 + \frac{cZ}{T_0}\right)^{-\left(\frac{g}{cG}+1\right)} \quad (3.16)$$

Denklem 3.16, deniz seviyesinden yükseldikçe hava yoğunluğunun doğrusal olmayan bir şekilde azaldığını göstermektedir [66].

3.2.2.3 Rüzgâr Gücü Yoğunluğu

Rüzgâr gücü yoğunluğu, belirli bir bölgedeki rüzgâr enerjisi kaynağının değerlendirilmesinde kapsamlı bir göstergedir. Rüzgâr gücü yoğunluğu; birim zamanda dik bir birim alandan geçen havadaki mevcut rüzgâr gücü olarak tanımlanmaktadır. 10 m ve 50 m standart rüzgâr ölçüm yüksekliklerindeki rüzgâr gücü yoğunluğu sınıfları Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Bazı rüzgâr kaynağı değerlendirmelerinde, orta seviyelere (10 m, 20 m, vb.) yerleştirilmiş algılayıcılara sahip 50 m’lik kuleler kullanılmıştır. Büyük ölçekli rüzgâr santralleri için 4 ve üzeri sınıf derecelendirmesi tercih edilmektedir [66].

Tablo 3.2 Rüzgâr gücü yoğunluk sınıflandırması.

Rüzgâr gücü sınıfı	10 m yükseklik		50 m yükseklik	
	Rüzgâr gücü yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama rüzgâr hızı (m/sn.)	Rüzgâr gücü yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama rüzgâr hızı (m/sn.)
1	< 100	< 4,4	< 200	< 5,6
2	100 - 150	4,4 – 5,1	200 - 300	5,6 – 6,4
3	150 - 200	5,1 – 5,6	300 - 400	6,4 – 7,0
4	200 - 250	5,6 – 6,0	400 - 500	7,0 - 7,5
5	250 - 300	6,0 - 6,4	500 - 600	7,5 – 8,0
6	300 - 350	6,4 - 7,0	600 - 800	8,0 – 8,8
7	> 400	> 7,0	> 800	> 8,8

3.3 Güneş Enerji Sistemleri

21. Yüzyılın ilk çeyreğinde, tüm dünyada enerji alanında kritik bir dönem yaşanmaktadır. İklim değişikliği sorunları, enerji güvenliği ve ekonomik istikrara duyulan ihtiyaç dikkate alındığında enerji kaynaklarının geleceği hakkında küresel tartışmaların boyutu artmaktadır. Bu tartışmaların odağında, yenilenebilir enerjinin geleneksel güç kaynaklarına bir alternatif olmasının yanı sıra; çevre, ekonomi ve daha geniş toplumsal değerlere olabilecek katkısı da değerlendirilmektedir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biokütle gibi yenilenebilir enerji türleri, bu küresel enerji geçişinin yönünü belirlemektedir [76].

Güneşe dayalı üretim tesisleri; kaynağının bolluğu, işletme maliyetlerinin düşüklüğü, çalışma esnasında gürültü kirliliğine sebebiyet vermemeleri, çevreye

zararlarının çok az oluşu, güç sistemine entegre edilmeden kullanılabilirliği ve uzun ömürlü olmaları gibi avantajlara sahip olmalarıyla fosil yakıt kaynaklı üretim santrallerinin en umut verici alternatiflerinden biri olmaktadır.

3.3.1 Fotovoltaik Etki

Fotovoltaik etki, katı bir malzemede ışık yoluyla doğrudan elektrik enerjisi üretimi olarak tanımlanmaktadır. Fotovoltaik hücre olarak da adlandırılan güneş pilleri ise güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme amacıyla fotovoltaik etkinin kullanıldığı cihazlardır. Güneş pilleri, ilk olarak 1870'lerde selenyum kullanılarak keşfedilmiştir. Fakat düşük verime sahip selenyum güneş pillerinin yerini; 1950'lerde geliştirilen ve selenyum güneş pillerinden on kat daha fazla verimliliğe sahip olan silisyum güneş pilleri almıştır. Güneş pilleri ilk olarak uzayda uygulama alanı bulmuştur. Silisyum güneş pillerinin verimliliği, 2000'li yılların başında yaklaşık %24'e çıkarılmıştır [77].

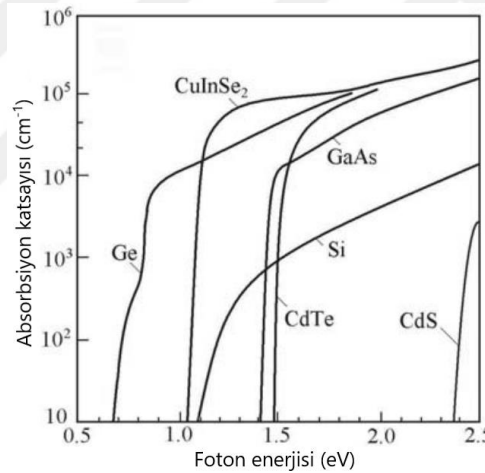
3.3.2 Güneş Enerjisi ile İlgili Temel Kavramlar

3.3.1.1 Temel Güneş Pili Konseptleri

Güneş pili, güneş ışığını foton akışı olarak elektrik enerjisine dönüştüren katı halli bir cihazdır. Güneş pilinin tabanı, bir milimetre kalınlığında, hafif bor katkılı, p tipi silisyumdan oluşmaktadır. p-n jonksiyonunun gerilimi ile elektronlar n tipi bölgeye geçmekte ve elektrokimyasal bataryalarda olduğu gibi bir elektrik gücü üretilmektedir. Kuantum geçişleri teorisine göre, bir foton akışı olarak radyasyon, bir yarı iletkenle iki şekilde etkileşime girmektedir: 1) Yarı iletken malzemenin boşluk enerjisinden daha büyük bir enerjiye sahip olan bir fotonun emilmesiyle bir elektron-delik çifti oluşturulabilir. 2) Bir elektron-delik çifti, yarı iletkenin enerji aralığına kabaca eşit bir enerji fotonunu yeniden birleştirebilir ve yayabilir. Ayrıntılı denge ilkesine göre, iki sürecin olasılıkları eşit olmalıdır. Bu durumun güneş pillerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkisi vardır [78].

Elektron-delik çiftinin potansiyel enerjisi enerji bandının değerine eşit olduğundan, güneş spektrumunun merkezine yakın bir enerji bant aralığına sahip malzemeler güneş pilleri için en iyi malzemelerdir. Güneş pillerinin verimliliğini etkileyen bir diğer faktör ise enerji boşluğu türüdür. Değerlik bandının üst kısmı ile iletim bandının alt kısmının dalga vektör uzayındaki göreceli konumlarına bağlı olarak, Elektron-delik çiftinin potansiyel enerjisi enerji bandının değerine eşit olduğundan,

güneş spektrumunun merkezine yakın bir enerji bant aralığına sahip malzemeler güneş pilleri için en iyi malzemelerdir. Güneş pillerinin verimliliğini etkileyen bir diğer faktör ise enerji boşluğu türüdür. Değerlik bandının üst kısmı ile iletim bandının alt kısmının dalga vektör uzayındaki göreceli konumlarına bağlı olarak, bir yarı iletkenin enerji boşluğu direkt veya endirekt olabilmektedir. *GaAs*, *CuInSe₂* ve *CdTe* gibi direkt boşluğa sahip yarı iletkenler için bir foton, bir elektronu valans bandından iletim bandına doğru direkt olarak uyarabilmektedir. Bu yarı iletkenlerin absorpsiyon katsayısı yüksektir ve tipik olarak $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 'den büyüktür. *Ge* ve *Si* gibi endirekt boşluğa sahip yarı iletkenlerde; valans bandının üstü ve iletim bandının alt kısmı dalga vektör uzayında hizalanmadığından dolayı uyarılmaya bir foton aracılık etmelidir. Endirekt boşluğa sahip yarı iletkenlerin absorpsiyon katsayıları düşüktür ve tipik olarak $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 'den küçüktür [78]. Şekil 3.3'te, güneş pilleri için yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzemelerin absorpsiyon spektrumları gösterilmektedir.

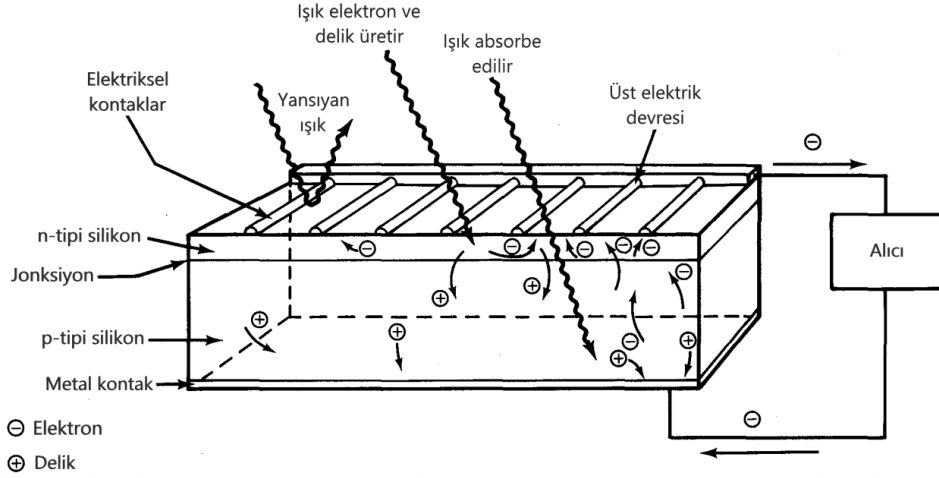


Şekil 3.3 Güneş pilleri için yaygın olarak kullanılan yarı iletkenlerin absorpsiyon spektrumları [78].

3.3.1.2 Elektrik Gücünün Üretimi

Şekil 3.6'da gösterildiği gibi güneş hücresindeki n-tipi kısım p-tipi kısma harici bir elektrik devresi aracılığıyla bağlanırsa, devre boyunca bir akım akar. Bu devre bir bataryadan güç alıyormuş gibi tepki verir. Negatif yükler, devreye bağlanan bir alıcı aracılığıyla, n-tipi taraftaki elektrottan dışarı akar ve alıcı beslenmiş olur. Elektronlar daha sonra p-tipi tarafa geçer ve burada; elektrot yakınındaki deliklerle yeniden birleşirler. Başlangıçta elektronlar tarafından absorbe edilen ışık enerjisi, elektronlar alıcıya güç aktarırken kullanılır. Böylelikle bir denge korunur. Işık

sürekli olarak daha fazla elektron-delik çifti oluşturur ve dolayısıyla daha fazla yük dengesizliği oluşur. Yük dengesizliği, alıcının çektiği akım ile giderilir [79].



Şekil 3.4 Güneş pili ile elektrik gücünün üretilmesi [78].

Elde edilen elektrik akımı miktarı solar hücreye gelen ışık miktarı ile neredeyse orantılıdır. Başlangıçta ışığın elektrona verdiği enerji ile elektronun iletim bandına çıkarılması için gereken enerji aynı miktardadır. Dolayısıyla bu enerji miktarı dış devredeki elektrondan alınabilecek maksimum enerji miktarıdır [79].

3.3.1.3 Solar Hücre Denklemi

Bir güneş pili, bir p-n jonksiyonu diyotuna paralel bağlanan bir akım kaynağı ile temsil edilebilir. Akım kaynağı, solar hücreye gelen güneş ışığı tarafından üretilen fotoakımdır. Bu akım aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$I_{sc} = \frac{q}{E_g} \eta_u P_S \quad (3.17)$$

Denklem 3.17’de, I_{sc} ; güneş pilinin maksimum kısa devre akımı, P_S ; güneş pilinin aldığı güneş ışıınımı gücü, $\eta_u P_S$; güneş ışıınımının ürettiği elektron-delik çiftlerinin gücü, E_g ; elektronları serbest bırakmak için gerekli olan enerji miktarı ve q ise elektron yüküdür. Diyot denklemi değiştirilerek aşağıdaki gibi verilebilir.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_{sc} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de, I ; güneş pili akımı, I_0 ; ters akım doyum akımı, V ; güneş pilindeki gerilim, k_B ; Boltzmann sabiti ve T ise sıcaklıktır. Denklem 3.18, diyot denklemiyle tutarlı bir formatta olan güneş pillerinin temel denklemidir. Ancak bu

denklemden gerilim sürekli pozitif değerde iken akım da sürekli negatif değerdendir. Diyotun enerji tüketen pasif yapısı bu durumu açıklamaktadır. Güneş pilini bir batarya gibi düşünürsek akımın yönünün tersine çevrilmesi gerekmektedir. Bu amaçla güneş pili denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (3.19)$$

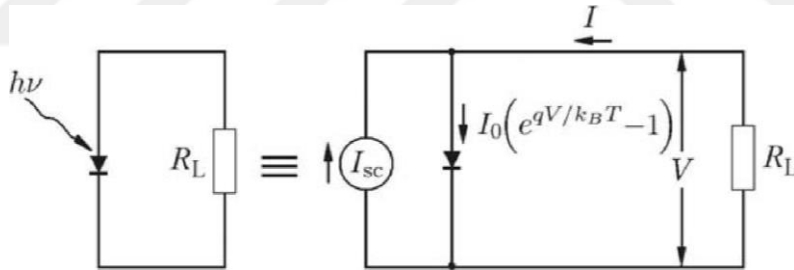
Denklem 3.19’da, gerilim ve akım pozitif değerdendir. Akımın sıfır olduğu durumla tanımlanan açık devre gerilimi; V_{oc} , aşağıda verilmiştir.

$$I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) = I_{sc} \quad (3.20)$$

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.21)$$

I_{sc} , I_0 ’dan çok daha büyük olduğundan ($I_{sc} \gg I_0$) Denklem 3.21 aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (3.22)$$



Şekil 3.5 Solar hücre elektriksel eşdeğer devresi [78].

3.3.1.4 Maksimum Güç ve Doluluk Faktörü

Bir güneş pilinin çıkış gücü her zaman için kısa devre akımı; I_{sc} ile açık devre gerilimi; V_{oc} ’nin çarpımından daha küçüktür. Güneş pilinin çıkış gücü; akım ve gerilimin çarpımı ile elde edilir; $P = IV$. Bir güneş pilinin nominal gücü ise, güneş fotonlarının akışı ile maksimum güç çıkışı veya uygun empedans uyum koşulları altında, 1 kW/m^2 ’dir. Genel olarak maksimum gücün koşulu aşağıdaki denklem ile verilmiştir [78].

$$dP = IdV + VdI = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.24)$$

Denklem 3.18'e göre, çıkış geriliminin bir fonksiyonu olarak çıkış gücü aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$P = IV = \left[I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \right] V \quad (3.25)$$

Güneş pilinin maksimum güç gerilimi, açık devre geriliminden yalnızca biraz daha küçüktür. Gerilim ofseti v olarak ifade edilirse aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$V = V_{oc} - v \quad (3.26)$$

Denklem 3.22 ve Denklem 3.25 kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$P \approx I_{sc}(V_{oc} - v) \left(1 - e^{-\frac{qV}{k_B T}} \right) \quad (3.27)$$

P 'nin v 'ye göre türevi alınır, maksimum güç koşulu denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$e^{\frac{qV}{k_B T}} = 1 + \frac{qV_{oc}}{k_B T} \quad (3.28)$$

Denklem 3.22 ve Denklem 3.25 kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$e^{\frac{qV}{k_B T}} = 1 + \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (3.29)$$

Güneş pilinin kısa devre akımı, açık devre akımından çok daha büyük olduğundan ($I_{sc} \gg I_0$) aşağıdaki denklem elde edilir.

$$v = \frac{k_B T}{q} \ln \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (3.30)$$

Böylelikle maksimum güç gerilimi ve maksimum güç akımı sırasıyla Denklem 3.31 ve Denklem 3.32 ile verilir.

$$V_{mp} = V_{oc} - v = V_{oc} \left(1 - \frac{\ln \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \right) \quad (3.31)$$

$$I_{mp} = I_{sc} \left(1 - e^{-\frac{qV}{k_B T}} \right) = I_{sc} \left(1 - \frac{1}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \right) \quad (3.32)$$

Maksimum güç gerilimi ve maksimum güç akımı denklemleri kullanılarak güneş pilinin maksimum güç denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_{mp} = V_{mp}I_{mp} = V_{oc}I_{sc} \left(1 - \frac{1 + \ln \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \right) \quad (3.33)$$

Doluluk faktörü; η_f aşağıdaki gibi elde edilir [78].

$$\eta_f = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.34)$$

$$\eta_f = 1 - \frac{1 + \ln \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)}{\ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right)} \quad (3.35)$$

3.3.3 Güneş Pillerinin Sınıflandırılması

Fotovoltaik güneş pilleri için kullanılan çeşitli malzeme türleri arasında esas olarak; silisyum, kadmiyum-tellür, bakır-indiyum-galyum-selenid ve bakır-indiyum-galyum-sülfür bulunmaktadır [80]. Bu malzemelere dayanarak, fotovoltaik güneş pilleri Şekil 3.8’de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.6 Güneş pili teknolojilerinin sınıflandırılması.

3.3.3.1 Birinci Nesil Güneş Pilleri

Birinci nesil güneş pilleri kristal silisyum yapılarından faydalanılarak üretilmiştir. Tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bu piller tek kristalli ve çok kristalli olmak üzere iki şekilde üretilmektedir.

- **Tek Kristalli Güneş Pilleri**

Tek kristalli güneş pilleri, tek kristalli silisyuma Czochralski adı verilen bir işlemin uygulanmasıyla üretilmektedir. Üretim aşamasında büyük boyutlu silisyum külçelerinden silisyum kristalleri dilimlenmektedir. Tek kristalli silisyum güneş pillerinin verimliliği; %17 - %18 civarındadır [80].

- **Çok Kristalli Güneş Pilleri**

Çok kristalli güneş pilleri genellikle tek bir hücrede birbirine bağlanan birkaç farklı kristalden oluşmaktadır. Erimiş silisyum içeren bir grafit kalıbın soğutulmasıyla üretilen çok kristalli silisyum güneş pillerinin işlenmesi tek kristalli yapıya göre daha ekonomiktir. Çok kristalli silisyum güneş pilleri günümüzde en yaygın kullanılan güneş pilleridir. Tek kristalli silisyum güneş pilleriyle karşılaştırıldığında; bu pillerin üretim maliyetleri daha az; verimlilikleri ise yaklaşık olarak %12 - %14 arasında daha düşüktür [80].

3.3.3.2 İkinci Nesil Güneş Pilleri

İnce film güneş pilleri ve amorf-silisyum güneş pilleri ikinci nesil güneş pilleri sınıfını oluşturmaktadır. Bu piller birinci nesil güneş pillerine göre daha ekonomiktir. Silisyum levha hücreleri 350 µm kalınlığa kadar ışık soğuran katmanlara sahipken, ince film güneş pilleri genellikle 1 µm kalınlığında çok ince ışık soğuran katmanlara sahiptir [81].

- **Amorf-Silisyum Güneş Pilleri**

Amorf-silisyum güneş pilleri, endüstriyel olarak üretilen ilk ilkel güneş pili türüdür. Bu pillerin düşük sıcaklıklarda üretilebilmesi sayesinde yapılarında düşük maliyetli çeşitli polimerler ve esnek alt tabakalar kullanılabilir. Bu alt tabakaların işlenmesi için daha az miktarda enerji gerekmektedir. Bu nedenle amorf-silisyum güneş pilleri diğer pil teknolojilerine kıyasla nispeten daha düşük maliyetlidir. Amorf-silisyum güneş pillerinin yansıtıcı tarafı genellikle koyu kahverengi, iletken

tarafı ise gümüş rengindedir. Bu pillerin dezavantajı ise verimliliklerinin düşük olmasıdır [80].

- **Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri**

Kadmiyum-tellür, ince film güneş pilleri arasında ekonomik açıdan uygun fotovoltaiik cihazların geliştirilmesinde kullanılmaktadır [82]. Yaklaşık 1,5 eV'luk bir bant aralığına, yüksek optik absorpsiyon katsayısına ve yüksek kimyasal stabiliteye sahip olması ile kadmiyum-tellür, ince film güneş pillerinin tasarımında önemli bir etkiye sahiptir. Bu pillerin verimlilikleri genellikle %9 - %11 aralığındadır [83]. Bu pillerin dezavantajı ise kadmiyumun canlılarda birikebilen ağır bir metal ve potansiyel toksik madde olarak kabul edilmesidir. Kadmiyum bazlı malzemelerin geri dönüştürülmesi oldukça pahalı olabilmekte ve doğaya zarar verebilmektedir [80].

- **Bakır İndiyum Galyum Di-Selenid Güneş Pilleri**

Bu piller; bakır, indiyum, galyum ve selenyum elementlerinden oluşan bir bileşik yarı iletken güneş pilleridir ve kadmiyum-tellür güneş pilleri ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %10 - %12 daha yüksek bir verimliliğe sahiptir. Bu pillerin, yüksek verimlilikleri ile uzun ömürlü ve ekonomik olmaları, diğer ince film güneş pili teknolojilerine göre avantaj sağlamaktadır [80].

3.3.3.3 Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

Üçüncü nesil güneş pili teknolojisi, gelecek vaat eden ve Shockley–Queisser verimlilik sınırını (%31 - %41) aşabilen tek bağlantılı güneş pili teknolojisidir [69].

- **Nanokristal Tabanlı Güneş Pilleri**

Nanokristal tabanlı güneş pilleri, yarı iletken malzemelerden yapılmış, genellikle nanokristal boyutunda, geçiş metali gruplarından oluşan bir yarı iletken oluşmaktadır. Nanoteknolojinin ilerlemesiyle birlikte, yarı iletken malzemeden oluşan bu teknolojinin, diğer pil teknolojilerinin yerini alması hedeflenmektedir [80].

- **Polimer Tabanlı Güneş Pilleri**

Polimer tabanlı güneş pilleri, polimer alt katmanları nedeniyle genellikle esnek yapıdaki güneş pili teknolojileridir. Polimer tabanlı güneş pili, bir polimer folyo veya şerit üzerine kaplanmış, seri olarak bağlanmış ince fonksiyonel katmanlardan

oluşmaktadır. Diğer organik güneş pillerinde de olduğu gibi polimer güneş pilleri de, enerjinin elektromanyetik radyasyon formunda elektrik akımına dönüşmesi prensibiyle çalışmaktadır [84].

- **Boyaya Duyarlı Güneş Pilleri**

Moleküler manipülasyon yoluyla güneş enerjisi verimliliğinin artırılması ve ışık enerjisinin toplanması için nanoteknolojinin kullanılması üzerine yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen boyaya duyarlı güneş pillerinde, genellikle farklı elektrotlar arasında boya molekülleri kullanılmaktadır. Bu piller yarı iletken elektrot, boya duyarlılaştırıcı, redoks aracı ve bir karşı elektrot olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır [80]. Oldukça esnek, şeffaf ve aynı zamanda düşük maliyetli olmalarının yanı sıra basit geleneksel yöntemler ile işlenmeleri boyaya duyarlı güneş pillerinin avantajlarıdır. Bu pillerde nano taneli TiO_2 kaplamalarının ışığa duyarlı hale getirilmesi ile verimlilik %10'un üzerine çıkmaktadır [80]. Ancak boya moleküllerinin bozulması ve dolayısıyla kararlılık sorunlarının olması da bu pillerin dezavantajıdır [80].

- **Konsantre Güneş Pilleri**

Konsantre güneş pilleri güneş pili araştırma ve geliştirmesindeki en yeni teknolojilerden biridir. Konsantre hücrelerin temel prensibi, güneş enerjisini aynalar ve mercek düzenlemesi ile güneş pili üzerindeki küçük bir bölgeye toplamaktır. Böylelikle güneş ışınları güneş pili üzerindeki küçük bir bölgeye düşmektedir. Konsantre güneş pillerinin; verimliliklerinin %40'ın üzerinde olması, yapılarında herhangi bir hareketli parçanın ve termal kütlenin bulunmaması ve tepki sürelerinin hızlı olması gibi avantajları vardır [80].

- **Perovskite Tabanlı Güneş Pilleri**

Perovskiteler, ABX_3 formülüyle tanımlanan ve X'in; iyot, baryum, klor gibi bir halojeni, A ve B'nin de farklı büyüklükteki katyonları temsil ettiği bir bileşik sınıfıdır. Perovskite tabanlı güneş pillerinin verimlilikleri %31'e kadar çıkabilmektedir. Geleneksel silisyum bazlı güneş pillerine göre perovskite güneş pillerinin önemli avantajları vardır. Bu avantajlar; perovskite güneş pillerinin üretim aşamasında yüksek sıcaklıklara, çoklu işlem adımlarına ve vakum tesislerine ihtiyaç duymamaları ve daha düşük maliyetli olmalarıdır. Perovskite güneş pillerinin dezavantajları ise kararlılık ve dayanıklılıklarının düşük olmasıdır [80].

4

ÜRETİLEN VE TÜKETİLEN ELEKTRİK GÜCÜ TAHMİNLERİ İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER

4.1 Giriş

YSA'lar, KYEK'lerden elde edilen gücün tahmininde en yaygın kullanılan teknikler arasındadır. YSA'lar ile giriş ve çıkış verileri arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler tanımlanabilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin mekanik yapılarındaki karmaşıklığın üstesinden gelmek, rüzgâr gücü tahmininde YSA algoritmalarının kullanılmasının temel nedenlerinden biridir [85]. Bir YSA modeli; bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Çıkış katmanı, sinir ağının eğitimi ve test edilmesi için geçmiş verilerle oluşturulmaktadır. YSA modelleri genellikle denetimli ve denetimsiz olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. İstenilen çıkışın sürecin başında belirlenebildiği model denetimli YSA modeli; belirlenemediği model ise denetimsiz YSA modelidir. YSA'lar belirli ağırlıklara sahip işlem birimleri olan nöronlardan oluşmaktadır. Bu nöronların ağırlıkları eğitim süreci boyunca ayarlanmaktadır [86]. Veri formatı, veri ön işleme, öğrenme stratejisi ve giriş-çıkış verileri arasındaki ilişkiler de dâhil olmak üzere çok sayıda değişken, YSA'ların çalışma şeklini etkilemektedir [87].

4.2 Kullanılan Tahmin Yöntemleri

KYEK'lerden elde edilen gücün tahmin edilmesinde genellikle yüksek tahmin performansına sahip olan; ÇKA, ESA ve UKSB gibi YSA teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [88].

YSA'lar, beynin mikro yapısını taklit etmeyi amaçlayan bir programlama paradigmasıdır ve basit örüntü tanıma görevlerinden gelişmiş sembolik manipülasyona kadar yapay zekâ problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. YSA'lar insan beyninin işleyişini modellemeye çalışmaktadır. İnsan beyni nöron adı verilen milyarlarca bireysel hücreden oluşmaktadır. İnsan beyninin bu kadar çok sayıda nörondan oluştuğu göz önüne alındığında, nöronlar arasındaki bağlantıların miktarını ve doğasını değerlendirmek neredeyse imkânsızdır. Bilginin

sinirsel olarak kodlanabileceği varsayımı, yapay zekâ sorunlarının çözümü için bazı zorlu algoritmaların ortaya çıkmasına yol açmıştır [89].

Modern bilgisayarlarda, çok sayıda farklı işlevi yerine getiren, oldukça karmaşık yapıda tek bir işlem birimi kullanılmaktadır. Komutları büyük bir hızla işleyen bu tek işlem birimi ile bilgisayardaki tüm işlemler gerçekleştirilmektedir. İnsan beyni ise milyarlarca basit nörona sahip olması bakımından farklılık göstermektedir. Bu nöronlardan her biri, bilgisayardaki işlem birimi ile karşılaştırıldığında yavaştır. Fakat insan beynindeki nöronlar yalnızca tek bir basit görevi yerine getirmektedir. Bir nöron ya aktif olmakta ya da pasif kalmaktadır. Bu anlamda nöronlar basit anahtarlar olarak modellenebilmektedir. Bu nedenle, bir nöronun aktif ya da pasif olmasını neyin belirlediğini anlamak önemlidir. Nöronlar, bir ağda birbirine bağlanan basit giriş-çıkış aygıtları olarak modellenebilmektedir. Giriş verileri, işlem zincirinin alt kısımlarında bulunan nöronlardan alınmakta ve çıkış verileri de, zincirin üst kısmındaki nöronlara iletilmektedir. Bir nöron aktif olduğunda bilgiyi, işleme zincirinin yukarılarına aktarmaktadır. Bu basit yapı, nöronları modelleme için oldukça basit hale getirmektedir. Buradaki en büyük zorluklar, nöron bağlantılarının modellenmesinde ortaya çıkmaktadır. Sinir ağındaki işlevleri kontrol ederek gelen bilgileri hedef nöronlara aktarmakla görevli olan kimyasal habercilere nörotransmitterler denir. Bu nörotransmitterler bir sonraki nörona giriş olarak uygulanmakta ve nöronların birbirlerine gönderdikleri bilgileri oluşturmaktadır. Bu bilgiler üç farklı türde olabilmektedir. Uyarıcı nörotransmitterler bir sonraki nöronun aktivasyon olasılığını artırmakta; inhibitör nörotransmitterler ise azaltmaktadır. Diğer tür olan potansiyelleşmeyi etkileyici nörotransmitterler ise sinir ağının öğrenme mekanizmasını oluşturmakta ve sonraki nöronun aksiyon potansiyelinin arttırılmasını ya da azaltılmasını sağlamaktadır [89].

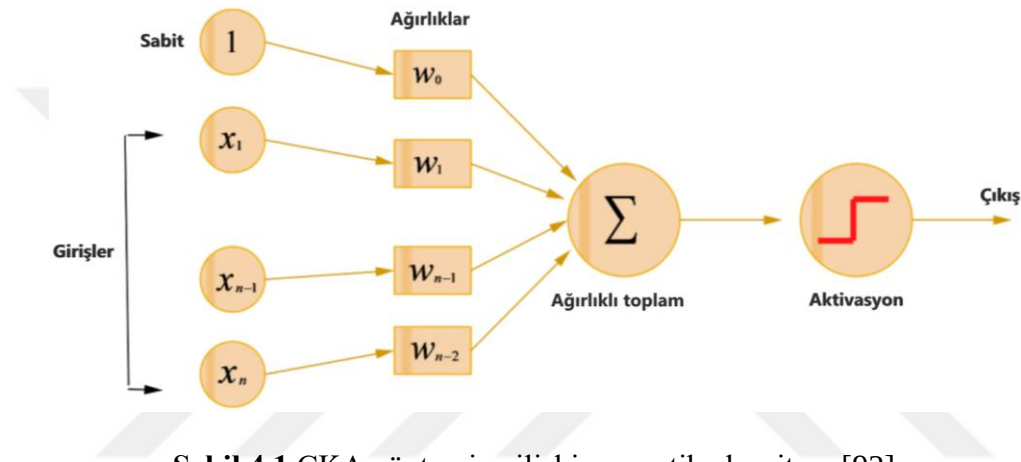
Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri olan ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri açıklanmıştır.

4.2.1 Çok Katmanlı Algılayıcı

ÇKA, yapay sinir ağı algoritmalarının en bilinen ve en sık kullanılan türlerinden biridir. İstenilen çıkışın sinir ağının nasıl eğitileceğini belirlemesinden ötürü, ÇKA algoritması bir tür denetimli sinir ağı modelidir [90]. ÇKA algoritmasının bir

katmanındaki tüm nöronlar, sonraki katmandaki tüm nöronlara bağlıdır. Her bağlantının ayrıca bir ağırlık katsayısı vardır [91].

ÇKA'de giriş değerleri aktivasyon fonksiyonu ile dönüştürülür. ÇKA, bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanı dâhil olmak üzere çeşitli katmanlardan oluşur. ÇKA yönteminde; giriş değişkenlerinin sayısı, gizli katmanların sayısı, aktivasyon fonksiyonu ve öğrenme hızı gibi parametreler sinir ağının tasarımı için oldukça önemlidir [92]. ÇKA sinir ağlarının tanımlanmasında ağ yapısının belirlenmesi ve parametrelerin tanımlanması olmak üzere iki aşama vardır [93]. Şekil 4.1'de ÇKA yöntemine ilişkin şematik algoritma görülmektedir.



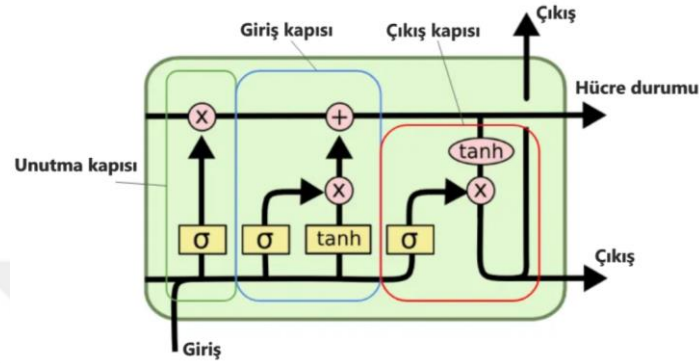
Şekil 4.1 ÇKA yöntemine ilişkin şematik algoritma [92].

Rüzgâr ve güneşe dayalı kaynaklardan elde edilen güç verileri doğrusal olmayan ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu veriler birçok farklı parametreye göre belirlenmektedir. ÇKA yöntemi literatürde bu tür doğrusal olmayan karmaşık problemleri çözmek ve bu tür veriler arasındaki ilişkileri daha iyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Ayrıca ÇKA yönteminin genelleme özelliği sayesinde farklı koşullarda doğru tahminler yapılabilmektedir [94].

4.2.2 Uzun-Kısa Süreli Bellek

UKSB algoritması, TSA'lardaki uzun vadeli bağımlılıkların öğrenilmesindeki yetersizlikten dolayı; yok olan gradyan sorununun çözümü için geliştirilmiştir. [95]. Yok olan gradyan sorunu TSA'ların; bazı ağırlıkları, ağın eğitim süreci boyunca sabitlemesi eğiliminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle güncel bilgilere öncelik vermek, geçmiş olayların gözden kaçırılmasına neden olabilmektedir. Sonuç olarak, tekrarlı bir şekilde karşılaşılan bağlar eğitim aşamasında tam anlamıyla kazanılmaktadır. Nöronların içindeki tüm bilgi akışı UKSB tarafından

yönetilmektedir. Bunu başarmak için UKSB’lerde, yayılan bir hücre durumundan; döngüsel olarak veri eklenmesini ve çıkarılmasını düzenlemeye geçiş mekanizması sunulmaktadır. Sonuç olarak UKSB’lerde, unutma sürecinin düzenlenmesi ve hem kısa hem de uzun vadeli bağımlılığın simüle edilmesi için kullanılabilecek belirli bir hafıza davranışının gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır [96, 97]. Şekil 4.2’de UKSB’ye ilişkin hücre yapısı görülmektedir.

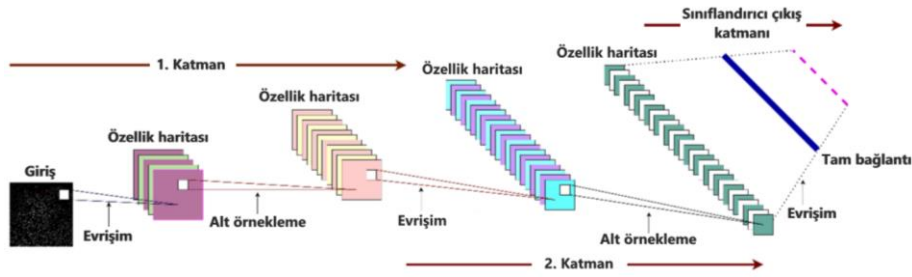


Şekil 4.2 Uzun-Kısa Süreli Bellek hücresi [98].

Rüzgâr ve güneşe dayalı kaynaklardan elde edilen enerji üretim verileri zaman serisi verileridir. UKSB, zaman serisi analizinde oldukça etkili olan bir algoritma türüdür. UKSB yöntemi, geçmiş verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmede başarılı olup aynı zamanda rüzgâr ve güneşteki belirsizlik ve ani değişimlerle de başa çıkabilmektedir [99, 100].

4.2.3 Evrişimsel Sinir Ağı

ESA, denetimli öğrenmeyi kullanan evrişimsel bir yapıya sahip, ileri beslemeli derin bir sinir ağıdır. ESA algoritması; havuzlama katmanları, evrişimli katmanlar ve tam bağlantı katmanlarından oluşmaktadır. Havuzlama katmanları ve evrişim katmanları, ESA'nın ağ özelliğini oluşturan iki temel katmandır. Evrişim katmanları ise giriş bilgisini evriştirmektedir. Havuzlama katmanları, uzamsal boyutu azaltmak için önceki evrişim katmanından verileri örneklemektedir. İki boyutlu özellik daha sonra tam bağlantı katmanları tarafından tek boyutlu çıkış verilerine eşlenmektedir [101]. Şekil 4.3'te ESA yöntemine ilişkin ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 4.3 ESA yöntemine ilişkin ağ yapısı [102].

ESA yöntemi mekânsal ve zamansal ilişkilerin modellenmesinde oldukça başarılıdır. UKSB yöntemi gibi ESA yöntemi de zaman serisi verilerinin işlenmesinde çok etkilidir. Ayrıca ESA yönteminde, verilerden özellikler çıkarılabilmekte ve böylece rüzgâr ve güneşe dayalı kaynaklardan elde edilen üretim verileri ESA yöntemiyle etkin bir şekilde modellenenbilmektedir [103].

4.3 Veri Kaynakları ve Veri Ön İşleme

Bu çalışmada Batman ili Gercüş ilçesinde rüzgâr ve güneş enerjisi santralleri için belirlenen uygun lokasyonlara kurulmak üzere modellenen santraller kullanılmıştır. TG tahmini için 2019 ve 2020 yıllarına ait saatlik TG verileri Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)’nden alınmıştır [104]. Modellenen rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin 2019 ve 2020 yıllarına ait saatlik hava durumu ve üretilen güç verileri referans [105]’tan alınmıştır.

Rüzgâr enerjisi santrali modeli için santralin kurulduğu alanın konum bilgisi: 37.3350 K, 41.2211 D; güneş enerjisi santrali modeli için santralin kurulduğu alanın konum bilgisi: 37.3523 K, 41.2249 D’dir. Bu konumlar Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de gösterilmektedir [106].



Şekil 4.4 Modellenen rüzgâr enerjisi santrali konumu.



Şekil 4.5 Modellenen güneş enerjisi santrali konumu.

TG'yi tahmin etmek için iki giriş parametresini içeren bir veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, Türkiye'nin güneydoğusunda Batman ilinin Gercüş ilçesinde 2019 ve 2020 yıllarına ait saatlik TG değerlerini içermektedir.

ÜRG'yi tahmin etmek için 2019 ve 2020 yılları için aktif güç, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve aktif güç üretimini etkileyebilecek meteorolojik parametrelerin bulunduğu bir veri seti kullanılmıştır. Tahmin modelinin karmaşıklığını önlemek ve tahmin performansını arttırmak için korelasyon matrisine göre çıkışa etkisi çok düşük olan giriş parametreleri kullanılmamıştır. Giriş parametreleri olarak rüzgâr hızı (m/s) ve rüzgâr gücü (kW) olmak üzere iki parametre kullanılmıştır. Modellenen rüzgâr santralinin türbin modeli Vestas V90 2000, türbin yüksekliği 80 m ve türbin kapasitesi 1 MW olarak belirlenmiştir. Meteorolojik veriler Küresel Modelleme ve Asimilasyon Ofisi (MERRA-2 Global)'nden alınmıştır.

Bu çalışmada, ÜGG'yi tahmin etmek için 2019 ve 2020 yıllarına ait aktif güç, direkt ışıınım, yayılı ışıınım ve aktif güç üretimini etkileyebilecek meteorolojik parametreleri içeren bir veri seti kullanılmıştır. Tahmin modelinin karmaşıklaşmasını önlemek ve tahmin performansını arttırmak için korelasyon matrisine göre çıkışa etkisi çok düşük olan giriş parametreleri kullanılmamıştır. Altı parametre; direkt ışıınım (W/m^2), yayılı ışıınım (W/m^2), sıcaklık ($^{\circ}C$), yer seviyesindeki güneş ışıınımı (W/m^2) ve atmosferin tepesindeki güneş ışıınımı (W/m^2) giriş olarak kullanılmıştır. Modellenen güneş enerjisi santrali için panelin baktığı yön 180° (saat yönünde), panelin yatayla eğim açısı 35° olup, sistem bileşenlerinden kaynaklanan toplam kayıp oranı 0,1 olarak belirlenmiştir. Meteorolojik veriler MERRA-2'den alınmıştır.

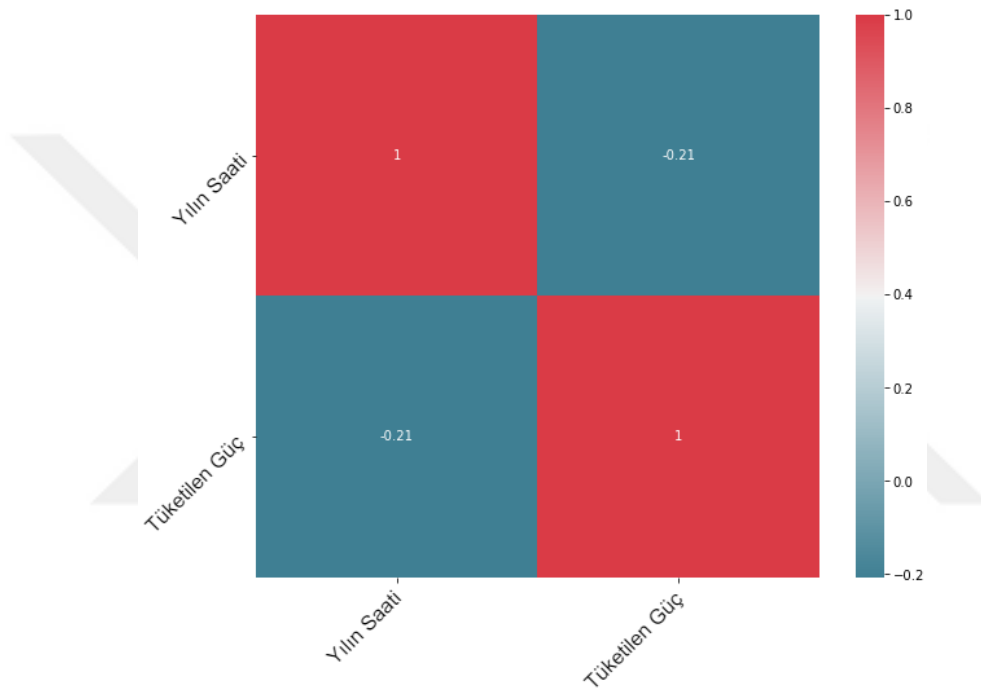
Tahmin yöntemlerinde kullanılan giriş parametreleri farklı vektör değerlerine sahip olduğundan bu parametrelerin standardizasyonu önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışmada, Bölüm 4'te açıklanan; Tahmin Hatalarının Güç Kapasitesi (THGK) denkleminde, tahmin hatası ölçüm metriği olan Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) değeri kullanılmıştır. OMYH denkleminin verildiği Bölüm 4.5'te verilen Denklem 4.7'de paydanın sıfır olması OMYH değerini sonsuza eşitleyecektir. Bu sorunu aşmak ve sıfır değerlerini ortadan kaldırmak için veri setindeki değerler için 0,1 ile 1 aralığında ölçeklendirme yapılmıştır. Böylece OMYH değerlerinin sonsuz hale gelmesi sorununun üstesinden gelinmiştir. Normalleştirilmiş değer aşağıdaki denklemle verilmektedir.

$$X_{scaled} = \begin{cases} N_{min} + \left[\left(\frac{N_{max} - N_{min}}{(X_{max} - X_{min})10} \right) X_{actual} \right], & X_{max} - X_{min} < N_{max} - N_{min} \\ N_{min} + \left[\left(\frac{N_{max} - N_{min}}{(X_{max} - X_{min})} \right) X_{actual} \right], & X_{max} - X_{min} \geq N_{max} - N_{min} \end{cases} \quad (4.1)$$

Burada; X_{scaled} normalleştirilmiş değerdir ve X_{actual} gerçek değerdir. X_{max} ve X_{min} sırasıyla parametrenin en büyük ve en küçük değerleridir. N_{max} ve N_{min} sırasıyla normalizasyon aralığının en düşük ve en yüksek değerleridir. Ölçeklendirme 0,1 ile 1 aralığında olduğundan; $N_{min} = 0,1$ ve $N_{max} = 1$ 'dir.

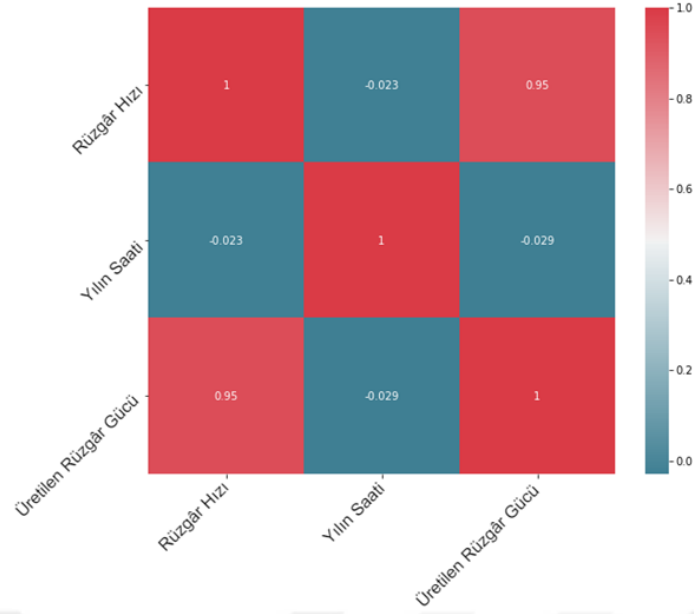
4.4 Tahmin için Kullanılacak Parametrelerin Belirlenmesi

Veri setindeki parametrelerin tahminlere yönelik etkilerinin önemini belirlemek için korelasyon matrisleri kullanılmıştır. Korelasyon matrisleri ile giriş ve çıkış parametreleri arasındaki ilişki -1 ile $+1$ arasındaki değerlerle ifade edilmektedir. Korelasyon matrislerinin incelenmesi sonucunda tahmin performansını artırmak amacıyla çıkışı etkilemeyen giriş parametreleri kullanılmamıştır. Şekil 4.6'da TG tahmini için giriş parametrelerinin çıkışa etkilerini gösteren korelasyon matrisi görülmektedir.



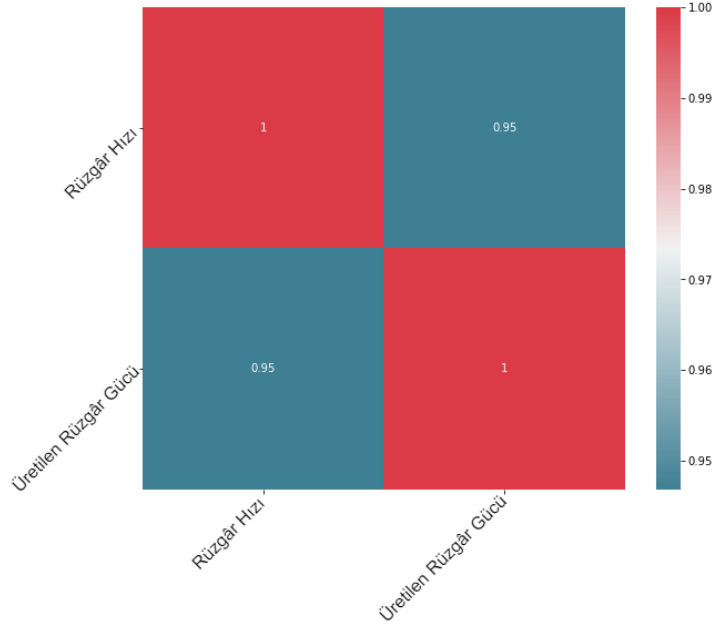
Şekil 4.6 TG tahmini için korelasyon matrisi.

Şekil 4.6 incelendiğinde TG ile yılın saatleri arasında negatif bir korelasyon olduğu görülmektedir. Şekil 4.7'de ÜRG tahmini için giriş parametrelerinin çıkışa etkilerini gösteren korelasyon matrisi görülmektedir.



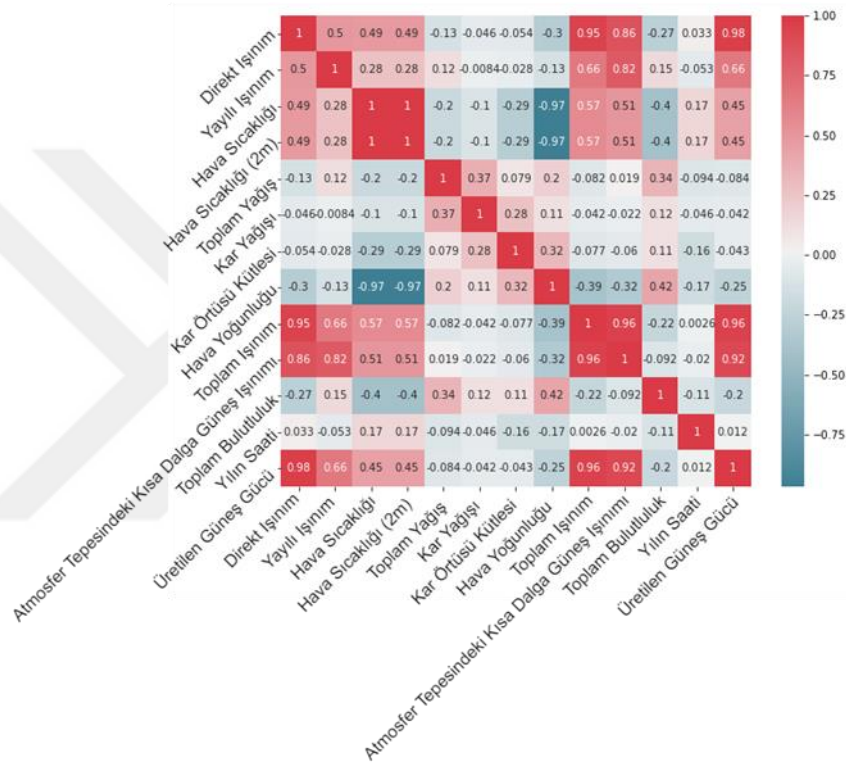
Şekil 4.7 ÜRG tahmini için korelasyon matrisi.

Şekil 4.7 incelendiğinde ÜRG ile rüzgâr hızı arasında 0,95 değerinde çok yüksek bir korelasyonun olduğu görülmektedir. ÜRG ile yılın saati arasındaki korelasyon çok küçük ($-0,029$) olduğundan; ÜRG tahmini için yılın saati parametresi, giriş parametresi olarak kullanılmamıştır. Şekil 4.8’de, Şekil 4.7 dikkate alınarak; çıkışı çok az etkileyen yılın saati parametresinin çıkarılması sonucunda, ÜRG tahmini için kullanılan giriş parametrelerinin bulunduğu korelasyon matrisi görülmektedir.

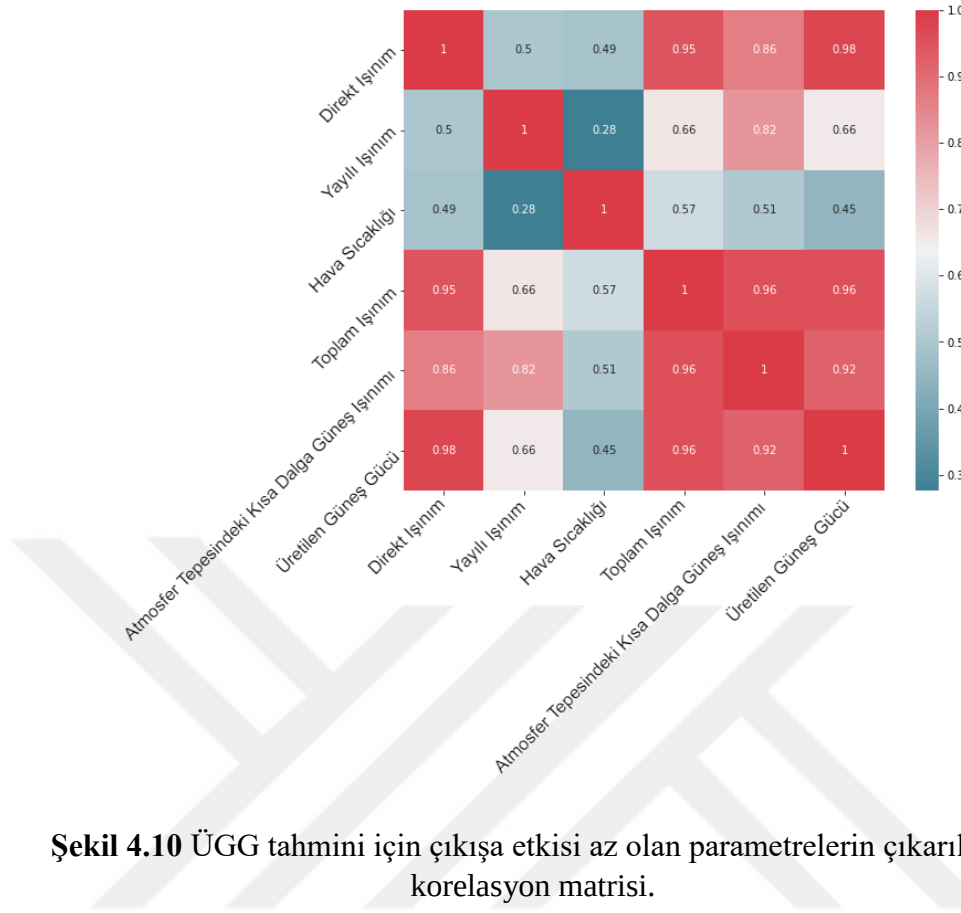


Şekil 4.8 ÜRG tahmini için çıkışa etkisi az olan parametrelerin çıkarıldığı korelasyon matrisi.

Şekil 4.9’da ÜGG tahmini için giriş parametrelerinin çıkışa etkilerini gösteren korelasyon matrisi görülmektedir. Şekil 4.9 incelendiğinde; doğrudan ışıınım, yayılı ışıınım, hava sıcaklığı ve kısa dalga ışıınım parametrelerinin ÜGG’ye etkisinin yüksek olduğu görülmekte; kar yağışı, kar örtüsü kütlesi ve yılın saati parametrelerinin de ÜGG’ye etkisinin çok küçük olduğu görülmektedir. Şekil 4.10’da ise Şekil 4.9 dikkate alınarak; ÜGG tahmini için kullanılan ve çıkışı önemli ölçüde etkileyen giriş parametrelerinin bulunduğu korelasyon matrisi görülmektedir.



Şekil 4.9 ÜGG tahmini için korelasyon matrisi.



Şekil 4.10 ÜGG tahmini için çıkışa etkisi az olan parametrelerin çıkarıldığı korelasyon matrisi.

4.5 Kullanılan Tahmin Yöntemlerine İlişkin Sinir Ağı Yapıları

Tahminler için kullanılan veri setleri 17280 örnekten oluşmaktadır. Veri setinin %75'i eğitim, %25'i ise test için kullanılmıştır. Her yöntem için devir (epoch) sayısı 200 olarak belirlenmiştir. Çalışmada üretilen rüzgâr ve güneş gücü ile tüketilen gücü tahmin etmek için kullanılan veri setlerinde negatif değerler bulunmayıp, bu veriler 0,1 - 1 aralığında ölçeklendirilmiştir. ReLU (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu, negatif değerleri 0'a eşitleyen ve pozitif değerleri doğrudan ileten basit yapısıyla diğer aktivasyon fonksiyonlarından daha hızlı çalışmakta, bilgisayar donanımını zorlamamakta ve eğitim süresini kısaltmaktadır [107 - 109]. ReLU aktivasyon fonksiyonu aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$ReLU(x) = \begin{cases} x; & x > 0 \\ 0; & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

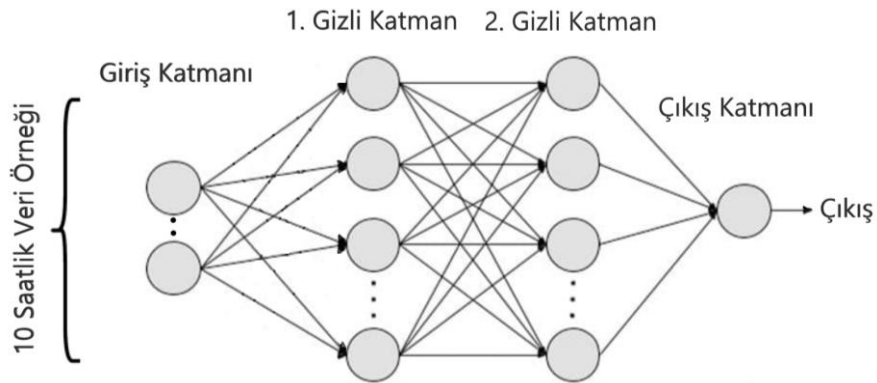
Bu nedenle aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU fonksiyonu seçilmiştir. Adam Optimizatörü, uyarlanabilir öğrenme hızı ve momentum özellikleriyle, her

parametreye özel öğrenme oranlarını kullanarak ve önceki aşamalardaki gradyanları dikkate alarak optimizasyon için başarılı sonuçlar üretmektedir [110, 111]. Bu nedenle tahmin amaçlı kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinde Adam Optimizatörü kullanılmıştır. Öğrenme oranı, modelin her adımda ağırlıkları ne kadar değiştireceğini belirlemektedir. Yüksek bir öğrenme oranı değeri, modelin hızlı bir şekilde eğitilmesine olanak tanırken, yakınsamayı azaltmaktadır. Düşük öğrenme oranı değeri ise modelin yavaş eğitilmesine neden olsa da yakınsamayı artırmaktadır [112]. Araştırmada yüksek yakınsamanın sağlanması amacıyla öğrenme oranı değeri 0,0001 olarak seçilmiştir. Kayıp fonksiyonu olarak verilerdeki rastgele dalgalanmaları ve durağanlıkları tahmin etmedeki üstün performansı nedeniyle rüzgâr ve güneş enerjisi üretim tahminlerine uygun olan MSE kayıp fonksiyonu kullanılmıştır [113]. Tasarlanan ÇKA, UKSB ve ESA mimarileriyle TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri yapılmış ve en doğru tahmin için uygun yöntem belirlenmiştir.

Tablo 4.1; TG, ÜRG ve ÜGG için ÇKA algoritmasının ağ yapısını göstermektedir. Şekil 4.11’de; TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için ÇKA algoritmasına ilişkin ağ yapısı gösterilmektedir. ÇKA algoritmasında, saatlik TG ve ÜRG tahminleri için ikişer adet giriş parametresi ve 10 saatlik veri kullanıldığından dolayı giriş katmanı için nöron sayısı 20; parametre sayısı ise 420’dir. Bu tahminler için, 1. ve 2. gizli katmanlarda sırasıyla; 128 ve 256 adet nöron; 2688 ve 33024 adet de parametre bulunmaktadır. Saatlik ÜGG tahmini için 6 adet parametre ve 10 saatlik veri kullanıldığından dolayı giriş katmanı için nöron sayısı 60; parametre sayısı ise 3660’tır. ÜGG tahmini için, 1. ve 2. gizli katmanlarda sırasıyla; 128 ve 256 adet nöron; 7808 ve 33024 adet de parametre bulunmaktadır. Gizli katmanlar verilerdeki karmaşık ilişkilerin öğrenilmesine yardımcı olmaktadır. Son katman olan çıkış katmanında ise tahmin sonucu üretilemektedir. Tek bir tahmin sonucu olacağından dolayı bu katman tek nöronlu olmaktadır.

Tablo 4.1 ÇKA yöntemine ilişkin ağ yapısı.

Katman	TG		ÜRG		ÜGG	
	Çıkış Şekli	Parametre	Çıkış Şekli	Parametre	Çıkış Şekli	Parametre
1. Gizli Katman	(, 20)	420	(, 20)	420	(, 60)	3660
2. Gizli Katman	(, 128)	2688	(, 128)	2688	(, 128)	7808
3. Gizli Katman	(, 256)	33024	(, 256)	33024	(, 256)	33024
4. Gizli Katman	(, 1)	257	(, 1)	257	(, 1)	257
Toplam		36389		36389		44749



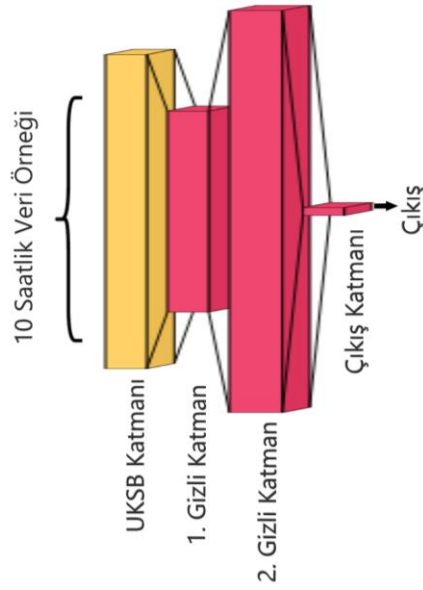
Şekil 4.11 TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için ÇKA algoritmasına ilişkin ağ yapısı.

Tablo 4.2; TG, ÜRG ve ÜGG için UKSB algoritmasının ağ yapısını göstermektedir. Şekil 4.12’de; TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için UKSB algoritmasına ilişkin ağ yapısı gösterilmektedir. Tasarlanan mimarinin ilk katmanı 200 nöron ve 162400 parametre içeren bir UKSB katmanıdır ve bu katmana giriş verilerinin verilmesi ile

mimari başlamaktadır. Giriş verileri olarak, giriş parametrelerine ilişkin 10 saatlik veri örneği kullanılmıştır. UKSB katmanları sıralı veriler arasında anlamsal ilişkileri uzun süreli öğrenebilen bir tür TSA türevidir. İkinci katmanda ise bir gizli katman bulunmaktadır. Bu katman 128 nöron ve 25728 parametre içeren bir tam bağlı katmandır. Bu katmanın ardından yine bir gizli katman gelmektedir. Bu katmanda da 256 nöron ve 33024 parametre bulunmaktadır. Gizli katmanlar verilerdeki karmaşık ilişkilerin öğrenilmesine yardımcı olmaktadır. Tasarımın son katmanında ise tahmin sonucunu üreten çıkış katmanı bulunmaktadır. Tahmin sonucunda tek değer üretileceğinden dolayı bu katman tek nöronlu olmaktadır.

Tablo 4.2 UKSB algoritmasına ilişkin ağ yapısı.

Katman	TG		ÜRG		ÜGG	
	Çıkış Şekli	Parametre	Çıkış Şekli	Parametre	Çıkış Şekli	Parametre
UKSB Katmanı	(, 200)	162400	(, 200)	162400	(, 200)	165600
1. Gizli Katman	(, 128)	25728	(, 128)	25728	(, 128)	25728
2. Gizli Katman	(, 256)	33024	(, 256)	33024	(, 256)	33024
3. Gizli Katman	(, 1)	257	(, 1)	257	(, 1)	257
Toplam		221409		221409		224609



Şekil 4.12 TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için UKSB algoritmasına ilişkin ağ yapısı.

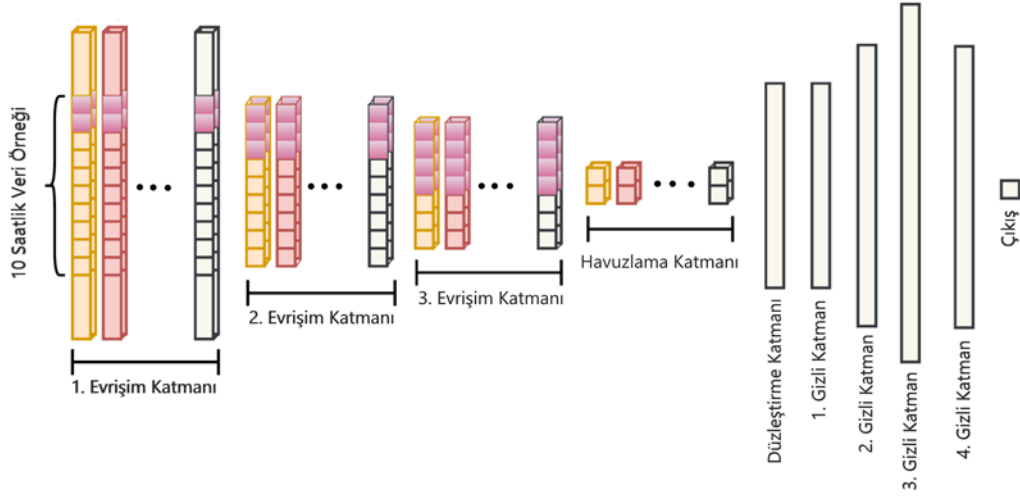
Tablo 4.3; TG, ÜRG ve ÜGG için ESA algoritmasının ağ yapısını göstermektedir. Şekil 4.13’te; TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için ESA algoritmasına ilişkin ağ yapısı gösterilmektedir. 1. evrişim katmanında kullanılan; giriş parametrelerine ilişkin onar saatlik veriler, modelin girişini oluşturmaktadır. 1. 2. ve 3. katmanların her birinde 64 farklı filtre uygulanmış ve ham veriden özellik çıkarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonraki katman olan havuzlama katmanı, eğitilmesi gereken parametre sayısını azaltmaktadır. Özellik çıkarımının yapılmış olmasıyla verinin, sınır ağına uygulanacak forma dönüştürülmesi düzeltirme katmanı ile gerçekleştirilmiştir. Sonraki katmanlar ise çok katmanlı bir ağ olarak değerlendirilebilir.

Tablo 4.3 ESA yöntemine ilişkin sınır ağı yapısı.

Katman	TG		ÜRG		ÜGG	
	Çıkış Şekli	Parametre	Çıkış Şekli	Parametre	Çıkış Şekli	Parametre
1. Evrişim Katmanı	(, 9, 64)	320	(, 9, 64)	192	(, 9, 64)	704

Tablo 4.3 ESA yöntemine ilişkin sinir ağı yapısı. (devamı)

2. Evrişim Katmanı	(, 7, 64)	12352	(, 7, 64)	12352	(, 7, 64)	12352
3. Evrişim Katmanı	(, 4, 64)	16448	(, 4, 64)	16448	(, 4, 64)	16448
Havuzlama Katmanı	(, 2, 64)	0	(, 2, 64)	0	(, 2, 64)	0
Düzleştirme Katmanı	(, 128)	0	(, 128)	0	(, 128)	0
1. Gizli Katman	(, 128)	16512	(, 128)	16512	(, 128)	16512
2. Gizli Katman	(, 256)	33024	(, 256)	33024	(, 256)	33024
3. Gizli Katman	(, 512)	131584	(, 512)	131584	(, 512)	131584
4. Gizli Katman	(, 256)	131584	(, 256)	131328	(, 256)	131328
5. Gizli Katman	(, 1)	257	(, 1)	257	(, 1)	257
Toplam		341825		341697		342209



Şekil 4.13 TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için ESA algoritmasına ilişkin ağ yapısı.

4.6 Hata Ölçüm Metrikleri

Çalışmada, ÇKA, UKSB ve ESA algoritmaları ile yapılan tahminlere ilişkin tahmin doğruluklarının değerlendirilmesi amacıyla R-kare (R^2), Ortalama Karesel Hata (OKH), Kök Ortalama Karesel Hata (KOKH), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve OMYH gibi popüler hata ölçüm metrikleri kullanılmıştır. Tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki tutarsızlığı değerlendirmek için bu metrikler kullanılırken; hataların yönü veya telafi edici etkiler göz ardı edilmiştir. Hata ölçümleri, tahminlerin gerçek verilerle ne ölçüde eşleştiğini ölçmektedir. R^2 , değeri 0 ila 1 arasında değişen istatistiksel bir ölçüdür ve bağımsız değişkendeki değişikliklerin ne kadarının bağımlı değişkendeki değişikliği açıklayabildiğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. OKH ortalama karesel hatayı temsil etmektedir. KOKH, tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki beklenen ortalama farktır. Daha düşük bir KOKH değeri, üstün bir modele işaret etmektedir. Tahmin edilen değişkenler ile gözlemlenenler arasındaki mutlak fark OMH ile ifade edilmektedir. OMYH metriği ise genellikle hata değerlerinin birimlerinin farklı olması durumunda kullanılmaktadır [114]. Bu hata ölçüm metriklerine ait denklemler aşağıda verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (4.3)$$

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i)^2} \quad (4.4)$$

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2 \quad (4.5)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_i^*| \quad (4.6)$$

$$OMYH = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i^* - x_i|}{x_i} \right] \times 100 \quad (4.7)$$

Bu denklemlerde; x_i gerçek değer, x_i^* tahmin edilen değer, $\bar{x}_i$ gerçek değerlerin ortalaması ve n ise örnek sayısını temsil etmektedir.

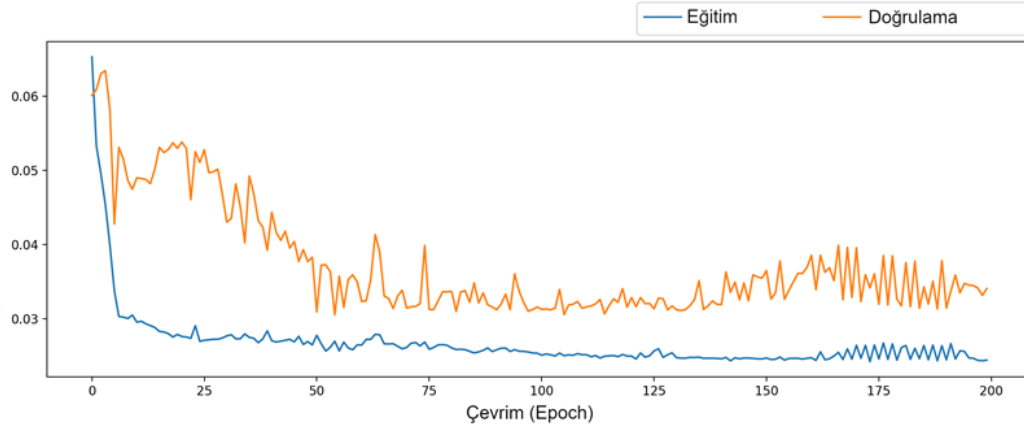
4.7 Uygulama Sonuçları

Bu bölüm, ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri kullanılarak kesintili kaynaklardan üretilen güç ve tüketilen güç tahminlerine ilişkin uygulama sonuçlarını içermektedir. Uygulamalar için Python 3.11 [115] yazılımı kullanılmış ve tahmin algoritmaları TensorFlow 2.3.0 yazılım kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu kütüphane, kodu daha etkileşimli ve anlaşılır hale getirmekle birlikte; gelişmiş performans ve kullanım kolaylığı da sunmaktadır.

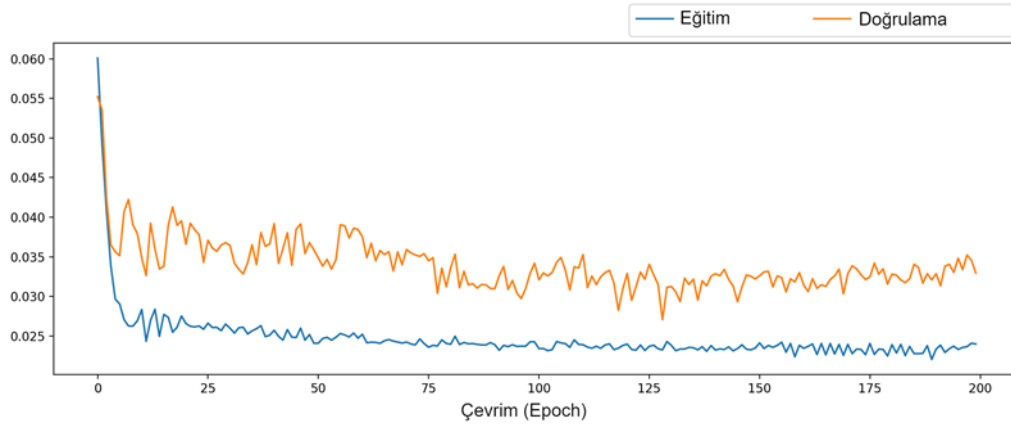
4.7.1 Tahmin Yöntemlerine İlişkin Eğitim Çalışmaları

Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16 TG'yi tahmin etmek için kullanılan yöntemlerin ağ eğitim süreci grafiklerini göstermektedir. Bu grafikler, gerçek değerlerin modelin tahmin değerlerinden ne kadar saptığını göstermektedir. Model veriler ile öğrendiğinden, eğitim süreci devam ettikçe sapmanın azalması gerekmektedir. Eğitim ilk başladığında modelin verilere nasıl uyum sağlayacağını öğrenme deneyimi olmadığından, sapma genellikle yüksektir. Model geliştikçe sapma değeri genellikle ilk dönemden veya yinelemelerden sonra düşmektedir. Tipik olarak kayıp eğrisi en uygun noktaya ulaşmakta ve sonuç olarak bu nokta, modelin en iyi performansı gösterdiği yerdir.

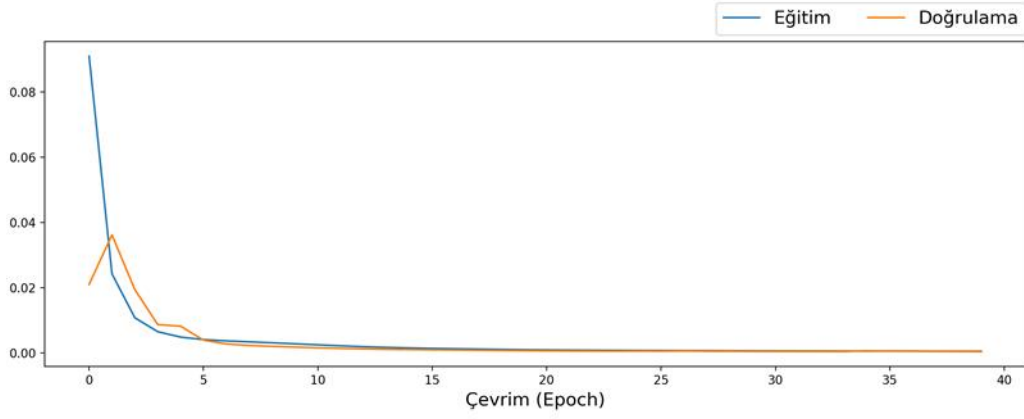
Bu çalışmada TG tahmini için ÇKA ve UKSB yöntemleri 200 çevrim; ESA yöntemi ise 40 çevrim boyunca eğitilmiştir. Grafikler incelendiğinde kullanılan her üç yöntem için de gerçek değerlerin, tahmin değerlerinden sapmasının azaldığı görülmektedir. TG tahmini için modellerin eğitim süreçlerine ilişkin eğriler incelendiğinde en başarılı modelin ESA modeli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14 TG tahmini için ÇKA modelinin eğitim süreci eğrisi.

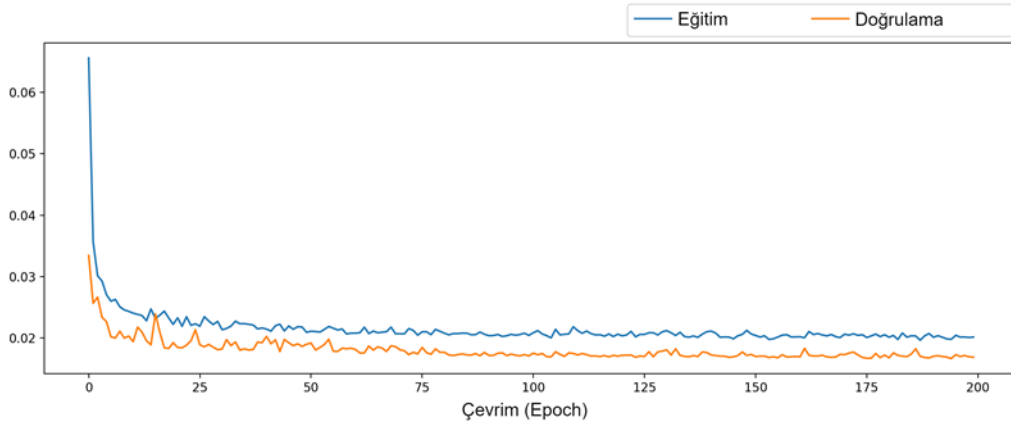


Şekil 4.15 TG tahmini için UKSB modelinin eğitim süreci eğrileri.

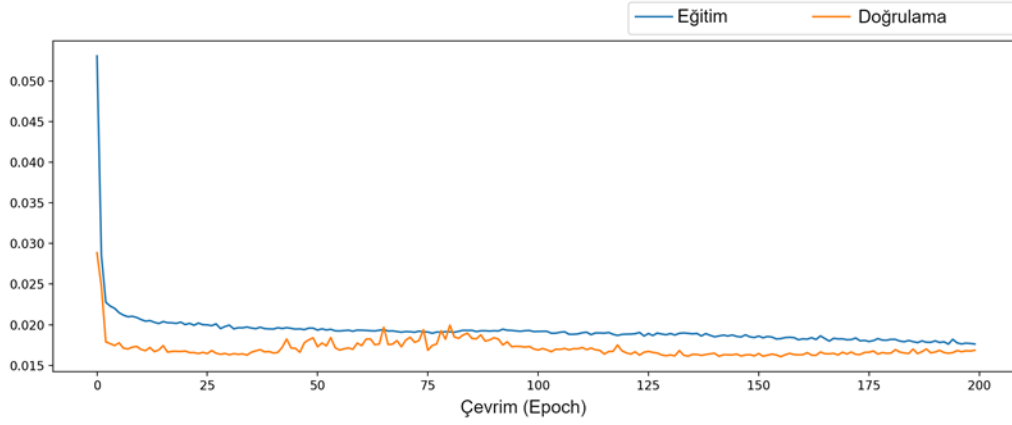


Şekil 4.16 TG tahmini için ESA modelinin eğitim süreci eğrileri.

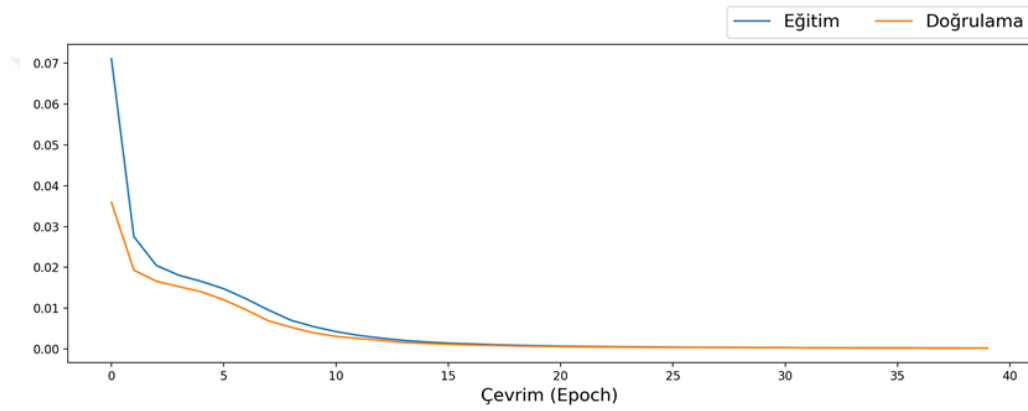
Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19 ÜRG'yi tahmin etmek için kullanılan yöntemlerin ağ eğitim süreci grafiklerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde kullanılan her üç model için de; gerçek değerlerin, tahmin değerlerinden sapmasının azaldığı görülmektedir. Algoritmalar arasında ÜRG'yi tahmin etmede en başarılı modelin ESA modeli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17 ÜRG tahmini için ÇKA modelinin eğitim süreci eğrileri.

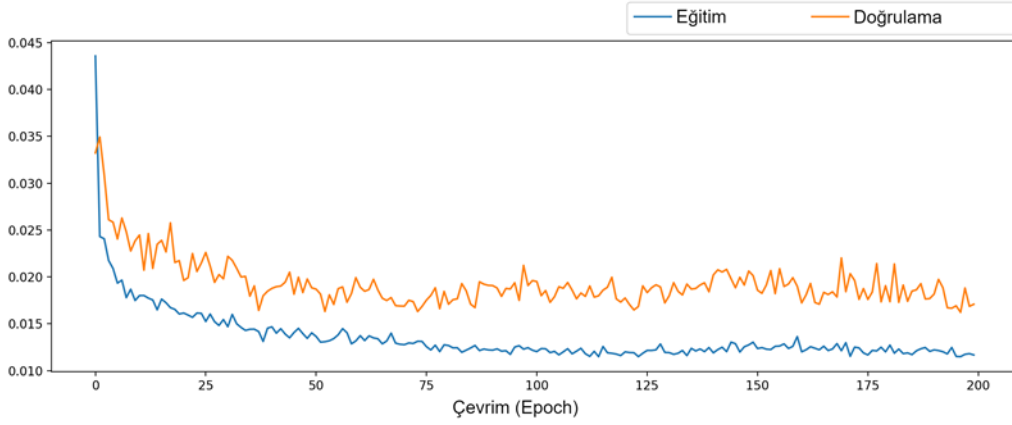


Şekil 4.18 ÜRG tahmini için UKSB modelinin eğitim süreci eğrileri.

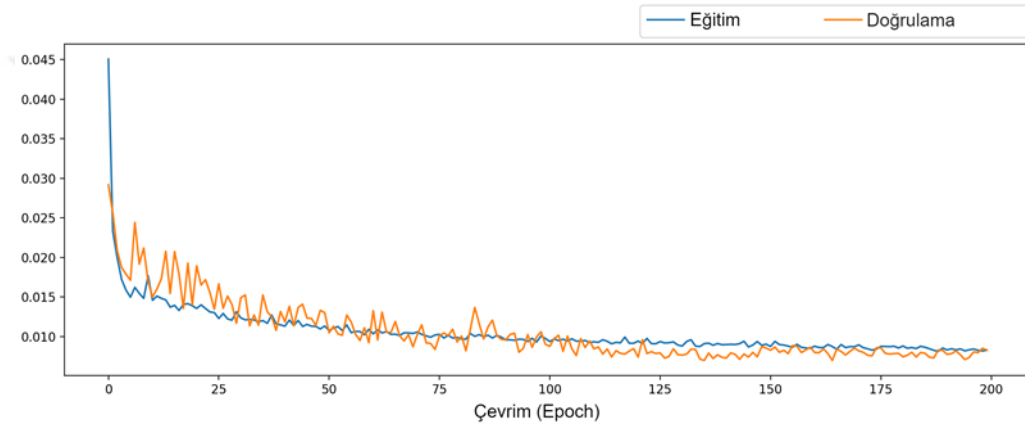


Şekil 4.19 ÜRG tahmini için ESA modelinin eğitim süreci eğrileri.

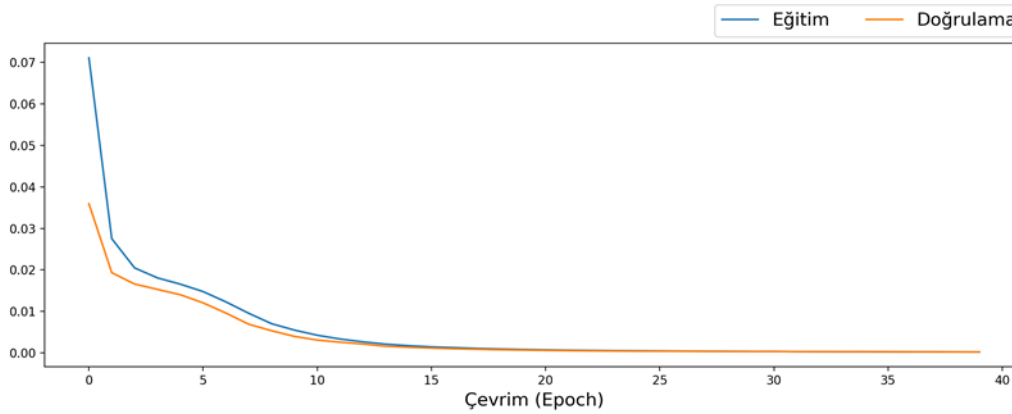
Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22 ÜGG'yi tahmin etmek için kullanılan yöntemlerin ağ eğitim süreci grafiklerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde kullanılan her üç algoritma için de; gerçek değerlerin, tahmin değerlerinden sapmasının azaldığı görülmektedir. Algoritmalar arasında ÜGG'yi tahmin etmede en başarılı modelin ESA modeli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.20 ÜGG tahmini için ÇKA yönteminin eğitim süreci eğrileri.



Şekil 4.21 ÜGG tahmini için UKSB modelinin eğitim süreci eğrileri.

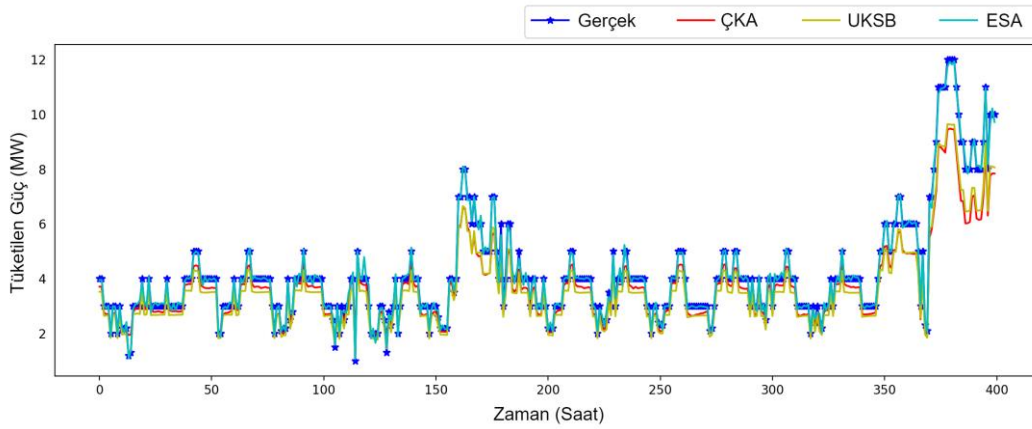


Şekil 4.22 ÜGG tahmini için ESA modelinin eğitim süreci eğrileri.

4.7.2 Tahmin Yöntemlerinin Doğruluk Test Çalışmaları

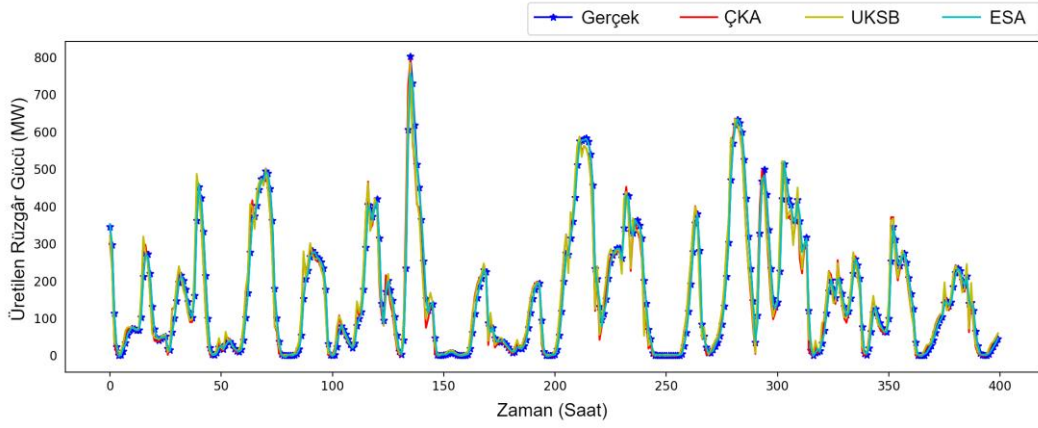
Şekil 4.23'te; TG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri elde edilen tahmin sonuçları ve gerçek TG değerleri görülmektedir. TG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri ile yapılan tahminlerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla test

verilerinin 400 örneği için tahmin sonuçları gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada nispeten küçük bir bölgeyi besleyen bir güç sistemi incelenmiştir. Daha küçük bölge, TG verilerini daha tutarsız hale getirmektedir. Sonuç olarak TG tahmini için ÇKA ve UKSB yöntemlerinin başarısı daha düşük olmasına rağmen ESA yöntemi; yerel bağımlılıkları ve örüntüleri yakalayabilme özelliğinden dolayı yüksek performans göstermiştir. Bu sonuçlara göre ARP yaklaşımı için uygulama sürecinde ESA yöntemi kullanılarak, rezerv gerekliliği ve toplam maliyet analizleri yapılmıştır.



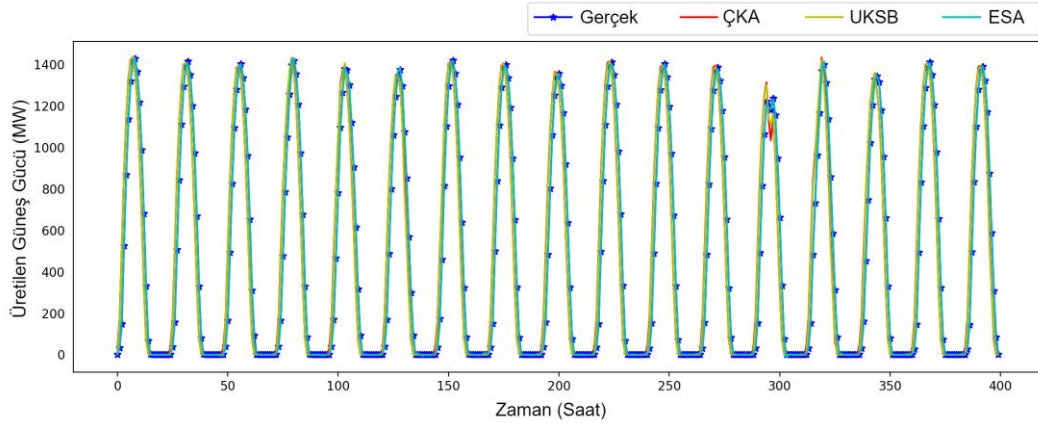
Şekil 4.23 TG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin doğruluk karşılaştırması.

Şekil 4.24'te; ÜRG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri elde edilen tahmin sonuçları ve gerçek ÜRG değerleri görülmektedir. ÜRG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri ile yapılan tahminlerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla test verilerinin 400 örneği için tahmin sonuçları gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde üç yöntem ile de ÜRG'nin yüksek doğrulukla tahmin edildiği görülmektedir. Sonuçlara göre, ARP yaklaşımı için yöntemler arasında en başarılı tahmin sonucunu sağlayan ESA yöntemi kullanılarak, örnek güç sistemi için rezerv gerekliliği ve toplam maliyet analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.24 ÜRG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin doğruluk karşılaştırması.

Şekil 4.25'te; ÜGG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri elde edilen tahmin sonuçları ve gerçek ÜGG değerleri görülmektedir. ÜGG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri ile yapılan tahminlerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla test verilerinin 400 örneği için tahmin sonuçları gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar üç yöntem ile de ÜGG'nin yüksek doğrulukla tahmin edildiğini göstermektedir. ARP yaklaşımı ile örnek güç sistemi için rezerv gerekliliği ve toplam analizlerinin yapıldığı süreçte en doğru tahmin sonucunu sağlayan ESA yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 4.25 ÜGG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin doğruluk karşılaştırması.

Tablo 4.4, tahmin için kullanılan ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerine ilişkin; R^2 , OKH, KOKH, OMH ve OMYH hata metrikleri değerlerini göstermektedir. Tablo incelendiğinde ESA yöntemi ile yapılan tahminlerde hata metriklerinin en küçük değerde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4 Tahminlere ilişkin hata metrikleri değerleri.

Metrik	ÇKA	UKSB	ESA
	TG Tahmini		
R²	0.65218	0.73558	0.99473
OKH	0.00236	0.00179	4×10⁻⁵
KOKH	0.04855	0.04233	0.00598
OMH	0.03707	0.03275	0.00424
OMYH	11.3498	10.6392	1.4961
	ÜRG Tahmini		
R²	0.96038	0.96136	0.99904
OKH	0.00099	0.00097	2×10⁻⁵
KOKH	0.03147	0.03108	0.00491
OMH	0.01712	0.01689	0.00248
OMYH	6.749	6.9987	1.0776
	ÜGG Tahmini		
R²	0.97938	0.99586	0.99959
OKH	0.00152	0.00031	3×10⁻⁵

Tablo 4.4 Tahminlere ilişkin hata metrikleri değerleri.
(devamı)

KOKH	0.03898	0.01748	0.00551
OMH	0.01929	0.00784	0.0032
OMYH	7.4123	2.951	1.4512

4.8 Değerlendirmeler

Rüzgâr ve güneş gibi doğası gereği değişken ve belirsiz enerjisi kaynaklarından üretilecek gücün tahmini oldukça zordur. Bu santrallerin EGS'lere başarılı bir şekilde entegre edilmesi için bu değişkenlik ve belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Bu tez çalışmasında, TG, ÜRG ve ÜGG'yi tahmin etmek için tahmin performansı yüksek olan ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleri incelenmiştir. Kullanılan yöntemlerin performansları; R^2 , OMH, KOKH, OKH ve OMYH gibi istatistiksel hata ölçüm metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan; ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri ile yapılan; TG, ÜRG ve ÜGG tahminlerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde önerilen algoritmaların başarılı tahminlere olanak sağladığı görülmektedir. Tahmin modellerini eğitmek ve test etmek için 1 Ocak 2019 ile 31 Aralık 2020 tarihleri arasında saatlik; TG verileri ve modellenen rüzgâr ve güneş santrallerinden elde edilen ÜRG ve ÜGG verileri kullanılmıştır. Ayrıca, meteorolojik verilerin rüzgâr ve güneş enerjisi üretimindeki etkisini değerlendirmek için Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından sağlanan MERRA-2 veri seti kullanılmıştır.

Giriş parametreleri ile TG arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon matrisi incelendiğinde; TG ile yılın saatleri parametresi arasında -0.21 düzeyinde ters bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Bu sonuç yılın saatleri ile TG arasında zayıf ve ters yönde bir ilişkinin olduğunu ortaya koymaktadır. Giriş parametreleri ile ÜRG arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon matrisinde; rüzgâr hızı ile ÜRG arasında 0.95 düzeyinde güçlü bir korelasyonun olduğu ve yılın saatleri ile ÜRG arasında ise -0.029 düzeyinde çok zayıf ve ters bir korelasyonun olduğu

görülmektedir. ÜRG ile korelasyonu çok zayıf olduğundan tahmin algoritmalarında yılın saatleri parametresi kullanılmamıştır. Giriş parametreleri ile ÜGG arasındaki korelasyon matrisinde; meteorolojik parametrelerden; direkt ışıınım, yer seviyesindeki güneş ışıınımı ve atmosfer tepesindeki güneş ışıınımı parametreleri ile ÜGG arasında güçlü korelasyonların olduğu görülmektedir. ÜGG ile korelasyonları zayıf olan; yağmur, kar, birim yüzeydeki kar miktarı, hava yoğunluğu gibi meteorolojik parametreler tahmin algoritmalarında kullanılmamıştır.

ÜGG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinden elde edilen R^2 değerleri sırasıyla 0.96038, 0.96136 ve 0.99904'tür. Tüm yöntemlerin üstün performansına rağmen en iyi sonuç ESA yöntemiyle elde edilmiştir. ÜGG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleriyle elde edilen R^2 değerleri sırasıyla 0.97938, 0.99586 ve 0.99959'dur. ÜGG tahmini için tüm yöntemler başarılı performans gösterse de en iyi sonuç ESA yöntemiyle elde edilmiştir. Çalışma nispeten küçük bir alanı besleyen bir güç sistemini incelediği için TG verileri tutarsızdır. TG tahmini için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin R^2 değerleri sırasıyla 0.65218, 0.73558 ve 0.99038'dir. Sonuç olarak ÇKA ve UKSB yöntemlerinin performansı düşük olmasına rağmen ESA yöntemi 0.99473 R^2 değeri ile üstün performans göstermiştir. Bu sonuçlara göre ESA yöntemi ile ARP ve toplam maliyet analizleri yapılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde ESA algoritması ile en başarılı tahmin sonucunun elde edildiği görülmektedir. KYEK'lerden üretilen gücün tahmini, enerji üretim ve rezerv planlaması için oldukça önemlidir. ESA ve benzer makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılan doğru tahminler, KYEK'lerin güç sistemlerinde daha verimli kullanılmasını sağlamakla birlikte güç sistemlerinde frekans kararlılığına ve güç sistemi güvenilirliğine katkıda bulunmaktadır. Doğru tahmin algoritmalarının kullanılmasıyla GSO'lar tarafından; üretilen güç ve TG'nin dengelenmesi ve tüketicilere kaliteli enerjinin aktarılması sağlanacaktır.

İlerleyen süreçte, araştırmacılar hibrit tahmin modellerinin geliştirilmesi için de çalışmalar yapacaklardır. Literatürdeki birçok yayında hibrit yaklaşımlar ile daha başarılı tahmin sonuçlarının elde edildiği gösterilmiştir. Yapılacak çalışmalarda hibrit ve normal makine öğrenmesi yaklaşımlarının başarılarının karşılaştırılması ile daha doğru sonuçlar ortaya konulacaktır.

5

SAĞLANAMAYAN GÜÇ BEKLENTİSİ BAĞINTISI VE AKILLI REZERV PLANLAMASI YAKLAŞIMI

5.1 Giriş

Bu tezde KYEK içeren güç sistemlerinde enerji ve rezerv planlaması için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışmada EGS'ler için bir güvenilirlik kriteri olan SGB dikkate alınarak planlama yapılmıştır. Bu amaçla rüzgâr ve güneş gibi kesintili kaynaklara dayalı santrallerden üretilen güç ve tüketilen güç belirsizliklerinin dikkate alındığı bir SGB bağıntısı önerilmiştir. Önerilen SGB bağıntısında ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleri ile yapılan tahminler kullanılmış ve kesintili kaynaklardan üretilen güç ve tüketilen güç tahminlerine ilişkin OMYH değerleri SGB bağıntısına dâhil edilmiştir. Çalışmada sunulan ARP yaklaşımında; geliştirilen SGB bağıntısı ile elde edilen SGB değeri, sistem operatörü tarafından belirlenen sınır değere göre ayarlanarak enerji ve rezerv planlaması yapılmıştır.

Tezin bu bölümünde, ilk olarak geliştirilen SGB bağıntısı açıklanmıştır. İkinci alt bölümde ARP yaklaşımı açıklanmış ve üretim, rezerv ve SGB maliyeti toplamını en aza indiren maliyet fonksiyonu verilmiştir. Uygulama sonuçları alt bölümünde tahmin doğruluğunun, KYEK penetrasyon miktarının ve sistem güvenilirliğinin toplam maliyet ve rezerv gerekliliği üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Son bölümde ise çalışmada önerilen SGB bağıntısı ve ARP yaklaşımına ilişkin sonuçlara yer verilmiştir.

5.2 Sağlanamayan Güç Beklentisi Bağıntısı

Literatürdeki araştırmaların birçoğunda TG ve ÜRG tahmin hataları Ortega-Vazquez vd. tarafından önerilen standart sapmaya dayalı yaklaşım ile hesaplanmaktadır [6 - 10]. Bu yaklaşıma göre Denklem 5.1'de, TG tahminine ilişkin standart sapma, Denklem 5.2'de ise ÜRG tahminine ilişkin standart sapma verilmiştir.

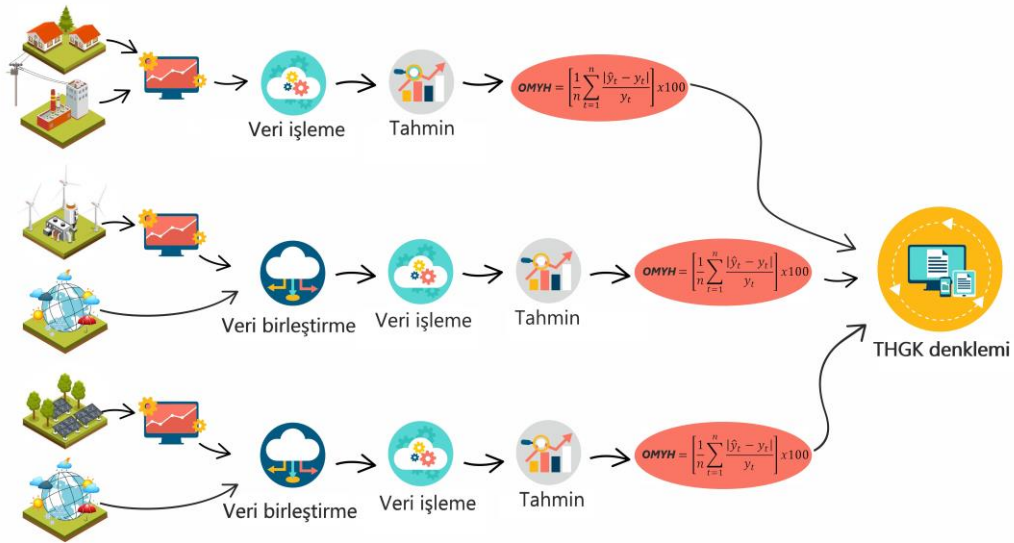
$$\sigma_l = \frac{k}{100} l_A \quad (5.1)$$

$$\sigma_w = \frac{1}{5} w_f + \frac{1}{50} W_l \quad (5.2)$$

Bu denklemlerde; σ_l ve σ_w sırasıyla TG tahminine ilişkin standart sapmayı ve ÜRG tahminine ilişkin standart sapmasını temsil etmektedir. k , yük tahmin aracının doğruluk yüzdesini, l_A gerçek TG değerini, w_f tahmin edilen rüzgâr gücünü ve W_l da toplam kurulu rüzgâr gücünü temsil etmektedir. ÜRG ve TG tahmin hatalarının toplam standart sapması; σ_d Denklem 5.3 ile verilmiştir.

$$\sigma_d = \sqrt{(\sigma_l)^2 + (\sigma_w)^2} \quad (5.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde tahmin doğruluğunu artırılması için katsayılar ihtiyacı duyulmuş ve varsayımlar yapılmıştır. Bu çalışmada, SGB hesaplamasında kullanılmak üzere; TG, ÜRG ve ÜGG'ye ilişkin tahminlerden kaynaklanan THGK hesaplaması için ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Bu amaçla THGK (kW) hesaplamasında bir hata ölçüm metriği olan OMYH değeri kullanılmıştır. Şekil 3'te THGK denkleminin elde edilmesine ilişkin akış şeması görülmektedir.



Şekil 5.1 THGK denklemine ilişkin akış şeması.

ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleriyle yapılan tahminler için OMYH değerleri kullanılarak elde edilen THGK denklemini aşağıda verilmiştir.

$$THGK = P_l^f \times \frac{OMYH_l}{100} + P_w^f \times \frac{OMYH_w}{100} + P_s^f \times \frac{OMYH_s}{100} \quad (5.4)$$

Burada; P_l^f (kW), P_w^f (kW) ve P_s^f (kW) sırasıyla TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri, $OMYH_l$, $OMYH_w$ ve $OMYH_s$ de sırasıyla TG, ÜRG ve ÜGG tahminleri için OMYH değerleridir. Tahmin hatalarından kaynaklanan SGB bağıntısında, üretilen güç ve sağlanan rezerv toplamının tüketilen güç ve tahmin hata kapasitesi toplamından çıkarıldığı; [6 - 8]'de önerilen yaklaşım dikkate alınmaktadır.

$$SGB = [P_l^f + THGK - (P_t + P_r + P_w^f + P_s^f)] \times \alpha \quad (5.5)$$

Burada, SGB (kW) tahmin hatalarından kaynaklanan sağlanamayan güç, P_t (kW) konvansiyonel üretim ünitelerinin toplam güç çıkışı ve P_r (kW) konvansiyonel üretim ünitelerinden elde edilen toplam rezervdir. Rezerv ayarlaması için P_t değeri Denklem 5.6 ile hesaplanmaktadır. α değişkeni, güç aktarılamayan tüketicilerin olup olmadığını göstermektedir. α ; sistem talebinin tahsis edilen toplam kullanılabilir güç artı sağlanan rezerv miktarından büyük olması durumunda 1'e, sistem talebinin toplam kullanılabilir güç artı sağlanan rezerv miktarından az veya buna eşit olması durumunda ise 0'a eşittir. α değişkeninin durumu Denklem 5.7 ile verilmiştir.

$$P_t = \begin{cases} 0; P_l^f \leq P_w^f + P_s^f \\ [P_l^f - (P_w^f + P_s^f)]; P_l^f > P_w^f + P_s^f \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1; P_t + P_r + P_w^f + P_s^f < P_l^f + THGK \\ 0; P_t + P_r + P_w^f + P_s^f \geq P_l^f + THGK \end{cases} \quad (5.7)$$

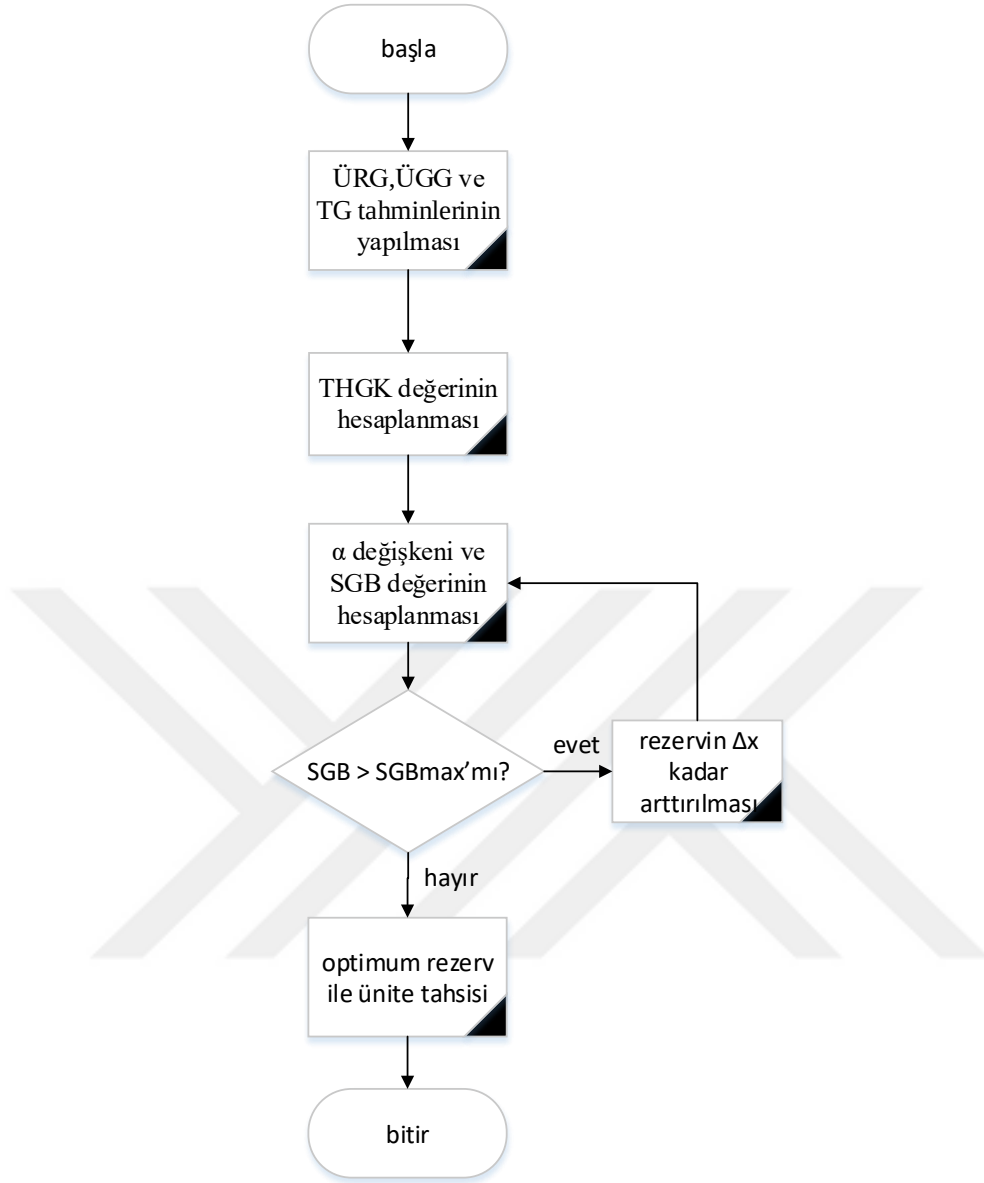
Bu çalışmada bir saat sonrası için rezerv gerekliliği dikkate alınarak ünite tahsisi planlaması yapılmıştır. Her saat için rezerv gerekliliği, güç sistemi işletmecisinin belirlediği güvenilirlik kriteri için sınır değer olan SGB_{max} değerine göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplama Denklem 5.8'de verilen SGB değerlendirme kriteri kullanılarak yapılmaktadır.

$$SGB \leq SGB_{max} \quad (5.8)$$

5.3 Akıllı Rezerv Planlaması Yaklaşımı

Bu çalışmada yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinde güvenilirlik ve esneklik için güç sistemi işletmecisinin belirlediği limit SGB değeri ile rezerv planlaması yapılmıştır. ARP süreci için akış şeması Şekil 5.2'de gösterilmektedir. ARP yaklaşımına ilişkin süreç aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

1. Tahmin yöntemleri arasında en iyi sonuçları veren ESA yöntemi kullanılarak ÜRG, ÜGG ve TG tahminlerinin yapılması.
2. ÜRG, ÜGG ve TG tahminleri kullanılarak THGK değerinin hesaplanması.
3. α değişkeninin hesaplanması ve ardından SGB değerinin hesaplanması.
4. Hesaplanan SGB değerinin, güç sistemi yöneticisi tarafından belirlenen limit SGB değeriyle karşılaştırılması.
5. $SGB > SGB_{max}$ ise rezerv Δx artırılır. α değişkeni ve sonrasında SGB değeri yeniden hesaplanarak işlem devam eder. Bu döngü $SGB \leq SGB_{max}$ koşulu sağlanana kadar devam eder. Çalışmada örnek güç sistemi için Δx değeri 0.1 kW olarak belirlenmiştir.
6. $SGB \leq SGB_{max}$ koşulu sağlandığında ünite tahsisi yapılarak süreç sonlandırılır.



Şekil 5.2 ARP yaklaşımına ilişkin akış şeması.

Ortega-Vazquez ve Kirschen [116] tarafından önerilen maliyet/fayda analizi dikkate alınarak ARP yaklaşımı ile üretilen güç, sağlanan rezerv ve SGB maliyeti toplamını en aza indiren maliyet fonksiyonu Denklem 5.9 ile verilmiştir.

$$TM = \min(P_t \times C_o + P_r \times C_r + SGB \times KYD) \quad (5.9)$$

Burada TM toplam maliyeti, C_o geleneksel üretim birimlerinin işletme maliyetini, C_r geleneksel üretim birimlerinin rezerv sağlama maliyetini temsil etmektedir. Kayıp Yük Değeri (KYD) güç sistemi yöneticisi için tüketiciye sağlanamayan

enerjinin maliyetidir. *KYD* değeri istatistiksel araştırmalar sonucunda hesaplanmakta ve her güç sistemi için farklı bir değerde olabilmektedir [45].

5.4 Uygulama Sonuçları

Bölüm 5.4.1'de yürütülen çalışmalarda, tahmin doğruluğunun rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Bölüm 5.4.2'deki çalışmalarda KYEK penetrasyon miktarının rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bölüm 5.4.3'te, güç sistemi güvenilirliğinin rezerv gerekliliği ve toplam maliyeti nasıl etkilediğine ilişkin çalışmalara yer verilmiştir. Çalışma Batman ili Gercüş ilçesinde modellenen rüzgâr ve güneş enerjisi santralleri üzerinde gerçekleştirilmektedir. Termik üretim ünitelerinin normal işletme maliyetleri 3 sent / kWh, rezerv sağlama maliyetleri ise 15 sent / kWh olarak belirlenmiştir. *KYD* [45]'teki çalışmada Türkiye güç sistemi için 4,03 - 5,53 \$ / kWh olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle *KYD* değeri 4 \$ / kWh olarak belirlenmiştir. ARP için Şekil 5.2'deki Δx değeri 0.1 kW olarak belirlenmiştir. Rezerv gerekliliği, Denklem 5.8'de verilen değerlendirme kriterine göre; uygun SGB değeri ile belirlenmektedir. Sistem güvenilirliğini belirleyen bu kriter gere göre optimum toplam maliyeti belirlemek için maliyet/fayda analizi kullanılmıştır. Sistemin optimum şartlarda çalışması durumunda en düşük toplam maliyete ulaşılır. Sistem işletmecileri, fayda/maliyet analizini kullanarak uygun miktardaki rezervi en ekonomik fiyata satın alabilmektedir. Uygulama sonuçları ilk 150 saatlik test verileri için gösterilmiştir.

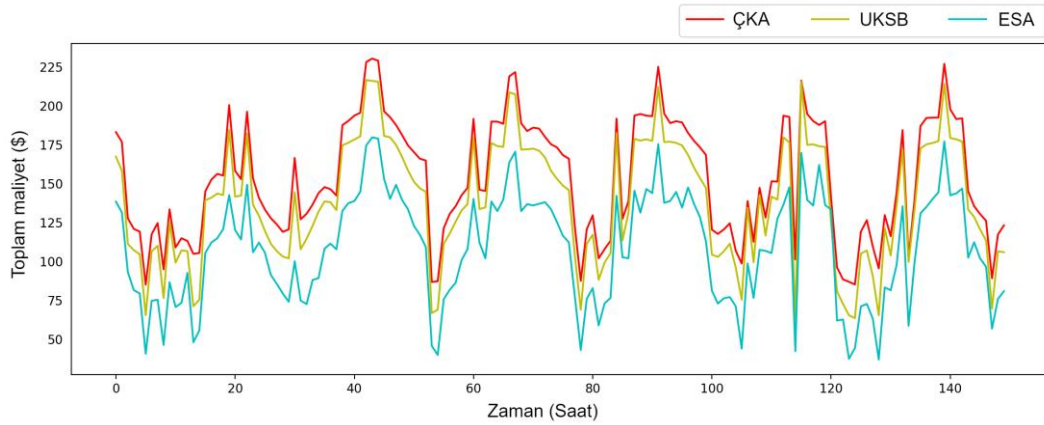
5.4.1 Tahmin Doğruluğunun Rezerv Gerekliliği ve Toplam Maliyet Üzerindeki Etkisi

Bu alt bölümde ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleriyle yapılan tahminlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tahmin doğruluğunun rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmektedir. ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleriyle yapılan tahminlere ilişkin rezerv gerekliliği grafikleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde 5 kW SGB_{max} değeri için en düşük rezerv gerekliliği ESA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu sonuç, tahminlerdeki doğruluğun rezerv gerekliliğini azalttığını göstermektedir.



Şekil 5.3 Tahmin yöntemlerine göre rezerv gerekliliği eğrileri.

Şekil 5.4'te ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleriyle yapılan tahminler kullanılarak ARP sonucunda sisteminin toplam maliyeti gösterilmektedir. Şekil 5.4'te en düşük toplam maliyetin ESA yönteminin kullanılmasıyla elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç, tahminlerdeki doğruluğun toplam maliyeti azalttığını göstermektedir.



Şekil 5.4 Tahmin yöntemlerine göre toplam maliyet eğrileri.

5.4.2 KYEK Penetrasyon Miktarının Rezerv Gerekliliği ve Toplam Maliyet Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, KYEK penetrasyon miktarının rezerv gerekliliği ve toplam maliyete etkisini değerlendirmek için dört farklı durum ele alınmaktadır. Bu durumlar aşağıda belirtilmiştir:

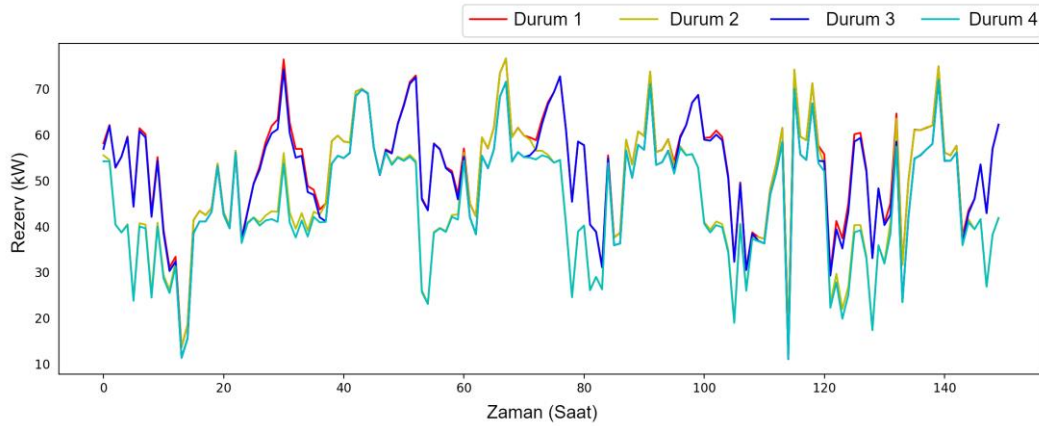
Durum 1: Güç sisteminde konvansiyonel üretim tesislerinin yanı sıra güneş ve rüzgâr santrallerinin varlığı.

Durum 2: Güç sisteminde konvansiyonel üretim tesislerinin yanı sıra sadece 1 MW gücünde rüzgâr enerji tesisinin bulunması.

Durum 3: Güç sisteminde konvansiyonel üretim tesislerinin yanı sıra sadece 2 MW gücünde güneş enerji tesisinin bulunması.

Durum 4: Güç sisteminde sadece konvansiyonel üretim tesislerinin bulunması.

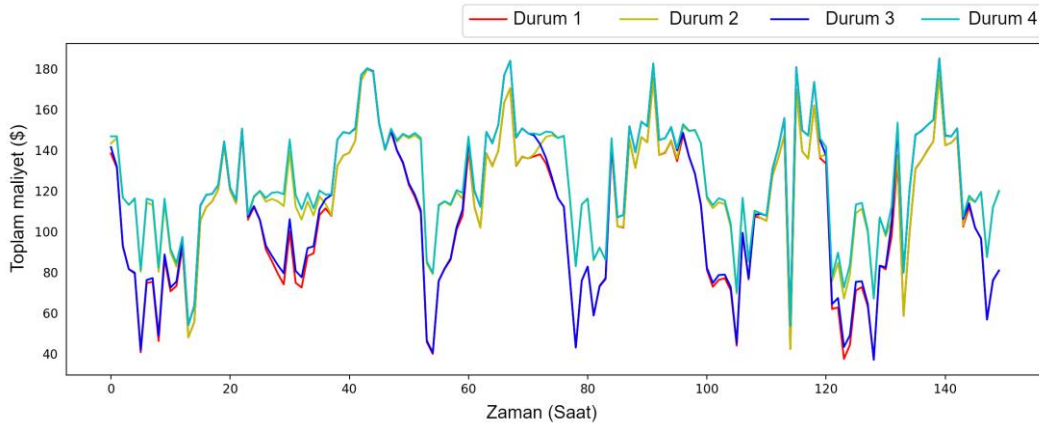
Şekil 5.5'te en doğru tahmin sonucunu sağlayan ESA yöntemi kullanılarak farklı KYEK penetrasyon durumlarına göre rezerv gereklilikleri gösterilmektedir. Şekil 5.5'te 5 kW SGB_{max} değeri için en yüksek rezerv gerekliliğinin sistemde rüzgâr ve güneş enerji santrallerinin bulunması durumunda; yani en yüksek KYEK penetrasyon seviyesinde olduğu görülmektedir. Ayrıca sistemde 2 MW kurulu güce sahip güneş enerji santralinin bulunduğu durumda rezerv gerekliliğinin, 1 MW rüzgâr santralının bulunduğu durumdaki rezerv gerekliliğine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Santrallerin kurulu gücü ile birlikte bulundukları bölgelerdeki ortalama rüzgâr hızı ve ışıınım seviyeleri gibi önemli parametreler bu durumu açıklamaktadır. Sistemde KYEK'lerin olmadığı durumda rezerv gerekliliğinin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, güç sistemlerinde, kesintili yenilenebilir üretim kaynaklarının penetrasyon düzeyinin artmasıyla rezerv gerekliliğinin de arttığı sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.5 Farklı KYEK penetrasyon seviyelerine göre rezerv gerekliliği eğrileri.

Şekil 5.6'da, en doğru tahmin sonucunu sağlayan ESA yöntemi kullanılarak farklı KYEK penetrasyon seviyelerine göre toplam maliyet eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.6 incelendiğinde, 5 kW'lık SGB_{max} değeri için en düşük toplam maliyetin sistemde rüzgâr ve güneş enerji santralleri mevcut olduğu durumda; yani sistemdeki KYEK penetrasyonunun en yüksek seviyede olduğu durumda elde edildiği görülmektedir. Şekilde 2 MW kurulu güce sahip güneş enerjisi santrali içeren sistemin toplam maliyetinin, 1 MW kurulu güce sahip rüzgâr santrali içeren

sistemin toplam maliyetinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum santrallerin, kurulu gücü ile birlikte bulundukları lokasyonlardaki ortalama rüzgâr hızı ve radyasyon seviyeleri gibi temel faktörlerle açıklanabilmektedir. Ayrıca en yüksek toplam maliyetin sistemde kesintili yenilenebilir üretim kaynaklarının bulunmadığı durumda ortaya çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla güç sistemlerinde kesintili kaynaklara dayalı üretim miktarının artması ile toplam maliyetin azalacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

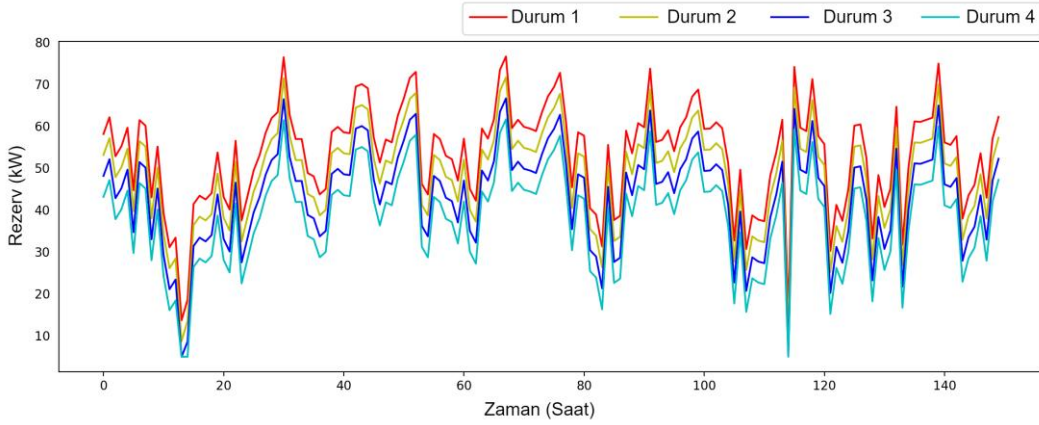


Şekil 5.6 Farklı KYEK penetrasyon seviyelerine göre toplam maliyet eğrileri.

5.4.3 Limit Sağlanamayan Güç Beklentisi Değerinin Rezerv Gerekliliği ve Toplam Maliyet Üzerindeki Etkisi

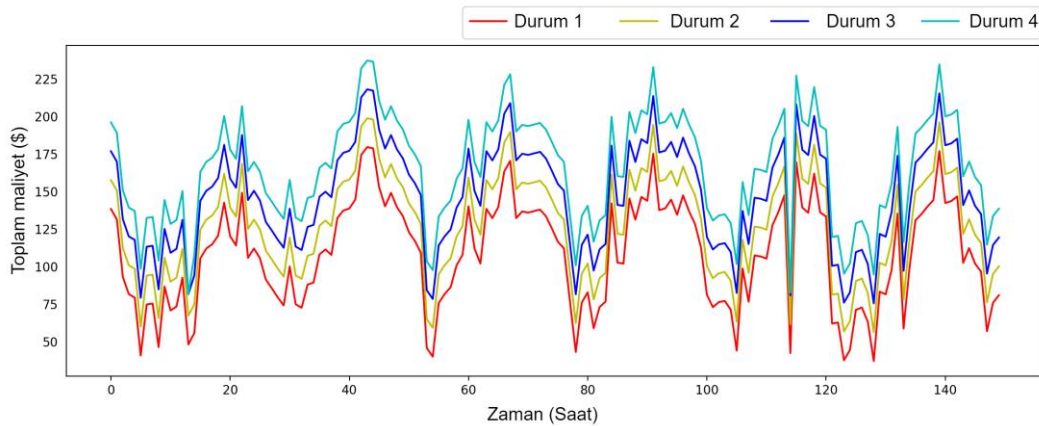
Güç sistemi için güvenilirlik değerlendirme kriterinin verildiği Denklem 5.8'deki SGB_{max} değerinin arttırılması tüketiciye aktarılamayan güçte artışa neden olacaktır. Bu durum, güç sisteminin güvenilirliğini azaltacaktır. Bu bölümde, farklı SGB_{max} değerlerinin kullanıldığı dört durum dikkate alınarak limit SGB değerindeki artışın rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. SGB_{max} değeri; Durum 1'de 5 kW, Durum 2'de 10 kW, Durum 3'te 15 kW ve Durum 4'te 20 kW olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.7'de, en doğru tahmin sonucunu sağlayan ESA yöntemi kullanılarak farklı SGB_{max} değerleri için rezerv gereklilikleri gösterilmektedir. Şekil 5.7'de SGB_{max} değeri 5 kW olduğunda rezerv gerekliliğinin en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca SGB_{max} değerinin artması ile rezerv gerekliliğinin de azaldığı görülmektedir. Fakat SGB_{max} 'ın arttırılması güç sistemi güvenilirliğinin azalmasına neden olacaktır.



Şekil 5.7 Farklı SGB_{max} değerleri için rezerv gerekliliği eğrileri.

Şekil 5.8’de, en doğru tahmin sonucunu sağlayan ESA yöntemi kullanılarak farklı SGB_{max} değerleri için oluşan toplam maliyet eğrileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde SGB_{max} değerinin 5 kW olduğu durumda toplam maliyetin en düşük seviyede olduğu ve SGB_{max} ’ın artması ile toplam maliyetin de arttığı görülmektedir. Önceki bölümden SGB_{max} ’ın arttırılması rezerv gerekliliğini azalttığı sonucu ortaya çıkmıştı. Rezerv gerekliliği azaldıkça rezerv sağlamanın maliyeti azalmakta; fakat tüketicilere sağlanamayan enerji miktarı da artmaktadır. SGB_{max} değerinin arttırılması aynı zamanda güç sistemi güvenilirliğini de azaltmaktadır. Güç sistemi güvenilirliğinin azalması, enerji iletilemeyen tüketici sayısının artmasına yol açacak ve bu da ek cezai maliyetler oluşturacaktır. Sonuç olarak güç sistemi güvenilirliğinin arttırılmasının toplam maliyeti de artıracığı sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.8 Farklı SGB_{max} değerleri için oluşan toplam maliyet eğrileri.

5.5 Değerlendirmeler

Bu çalışmada, rüzgâr ve güneş gibi KYEK'ler içeren güç sistemlerinde enerji ve rezerv planlaması için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda ÜRG, ÜGG ve TG tahmin hataları yeni bir yöntemle SGB hesaplama sürecine dâhil edilmiştir. SGB bağıntısı, makine öğrenmesi yöntemleriyle yapılan tahminler ile elde edilen THGK değeri ile oluşturulmuştur. Önerilen yöntemde THGK hesaplamasında tahmin doğruluğunu ölçen hata parametrelerinden biri olan OMYH değeri kullanılmıştır. SGB bağıntısının kullanıldığı ARP yaklaşımı ile örnek güç sistemi için, tahmin doğruluğunun rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna göre en başarılı tahmin sonuçlarını veren ESA yöntemiyle elde edilen sonuçlar incelendiğinde 20. saatte planlanan rezerv miktarının yaklaşık 52 kW, toplam maliyetin ise yaklaşık 121 \$ olduğu görülmektedir. Çalışmada elektrik güç sistemindeki KYEK penetrasyon miktarının rezerv gerekliliği ve toplam maliyete etkisi incelenmiştir. 20. saat değerlerine bakıldığında en yüksek rezerv gerekliliğinin yaklaşık 42 kW ile en yüksek KYEK penetrasyonu durumunda ortaya çıktığı görülürken, en yüksek maliyetin yaklaşık 135 \$ ile güç sisteminde KYEK'lerin bulunmadığı durumda ortaya çıktığı görülmüştür. Çalışmada ayrıca limit SGB değerinin rezerv gerekliliği ve toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir. 20. saat değerleri incelendiğinde, güç sistemi güvenilirliğinin en yüksek olduğu; yani SGB_{max} 'ın 5 kW olduğu durumda planlanan rezerv miktarının yaklaşık 44 kW ile en yüksek değerde olduğu görülmektedir. En yüksek toplam maliyetin ise yaklaşık 182 \$ ile güç sistemi güvenilirliğinin en düşük olduğu; yani SGB_{max} 'ın 20 kW olduğu durumda ortaya çıktığı görülmektedir.

Bu çalışmada farklı yöntemlerle yapılan tahminler sonucunda tahmin hatalarındaki artışın rezerv gerekliliği ve toplam maliyeti artırdığı ortaya konulmuştur. Güç sistemindeki kesintili kaynak penetrasyon seviyesindeki artışın rezerv gerekliliğini arttırmasına rağmen toplam maliyeti düşürdüğü ve sistem güvenilirliğini olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır. Güç sistemi işletmecisi tarafından belirlenen SGB_{max} değerinin arttırılmasının rezerv gerekliliğini azalttığı ancak sağlanamayan gücün artması ve beklenen kesinti maliyetlerinin artması sonucunda toplam maliyeti arttırdığı sonucu ortaya çıkmıştır.

Yeni SGB bağıntısında gelişmiş tahmin yöntemleri kullanıldığından sağlanamayan güç azaltılacaktır. Bu durum, rezerv gerekliliği ve toplam maliyetin azaltılmasını

sağlayacaktır. Sistem ekonomisi ve güvenilirliği ile ilgili olarak bu çalışma, güneş ve rüzgâr enerjisi santralleri gibi KYEK'lerin güç sistemlerine entegrasyonu için yararlı bir öneri sunmaktadır.



6 SONUÇ

Elektrik enerjisi üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi gibi operasyonlardaki belirsizlikler nedeniyle elektrik enerjisi piyasalarının yapısı ve işleyişi oldukça karmaşıktır. Kanun ve yönetmeliklere göre işletilen elektrik enerji piyasalarında frekans kontrolü, yan hizmetler ve güvenilirlik çalışmaları ile güç sistemi performansının artırılması amaçlanmaktadır. Üretim tesislerinin tüketilen enerjiyi karşılayabilme kapasitesi, güç sistemi güvenilirliğinin temel bir göstergesidir. Bu yeterliliğin sağlanması için güç sistemi bileşenlerinin; aşırı yüklenmeden çalışması, akım üretme kapasitelerinin talep edilen yükün çekeceği akım değerinden yüksek olması ve tüketicilere ulaştırılan elektrik enerjisi gerilim seviyesinin uygun olması gerekmektedir.

YH, tüketicilere kaliteli ve güvenilir enerji sağlamak için gereklidir. YH'ler ile sistem operatörleri ile üretim tesisleri arasındaki dengenin korunması amacıyla enerji üretimi kontrolü ve mevcut kapasite kontrolü görevleri yerine getirilerek EGS'lerin güvenilirliği ve kararlılığı artırılmaktadır. Üretim tesislerinin işletilmesindeki karmaşıklığı arttıran YH'ler; PK'ler için ek gelir potansiyeli de oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerinde artan penetrasyonu ile bu kaynakların üretim belirsizlik ve değişkenlikleri, enerji piyasalarının işletilmesinde ek zorluklar oluşturmaktadır. YAL ve YAT prosedürleri bu zorlukların üstesinden gelmek için yeterli olmadığından zorunlu ve ticari yan hizmet anlaşmalarının yapılması büyük önem taşımaktadır.

Elektrik enerji piyasalarında uzun vadeli ve kısa vadeli piyasa işlemlerinin yapıldığı; GÖP, GİP ve DGP piyasa mekanizmaları ile enerji üretim ve tüketiminin dengelenmesi sağlanarak PK'lerin hem finansal hem de fiziksel tehlikelerden korunması amaçlanmaktadır. EGS'lerin işletilmesinde üretim-tüketim dengesinin sağlanabilmesi ve iletim birimlerinin kısıtlamalar dâhilinde yönetilebilmesi gereklilikleri vardır. Bu gerekliliklerden dolayı elektrik enerjisi fiyatları değişkenlik göstermektedir. Elektrik enerjisi piyasalarındaki fırsat maliyetleri yan hizmet fiyatlarını da etkilemektedir. Yan hizmet fiyatları çoğunlukla elektrik enerjisi fiyatlarından daha fazla değişkenlik göstermektedir.

EGS'lerin sağlıklı işletilebilmesi için, nihai tüketicilere ulaştırılması gereken enerjinin, üretim kaynaklarından elde edilen enerji ile sürekli olarak karşılanabilmesi gerekmektedir. Bu dengenin sağlanması için belirsiz ve değişken güç çıkışına sahip olan KYEK'lerden elde edilen enerjinin ve güç sisteminde tüketilen enerjinin doğru tahmin edilmesi oldukça önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinden elde edilen gücün tahmin edilmesinde makine öğrenmesi yöntemlerinin etkinliği gösterilmektedir. Rüzgâr ve güneş santralleri gibi mekanik yapıları karmaşık olan sistemlerde makine öğrenmesi yöntemleri ile doğrusal olmayan veri ilişkilerinin anlaşılmasıyla daha iyi tahmin sonuçları elde edilmektedir. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda KYEK'lerden elde edilen üretim ve güç sistemindeki tüketim tahminleri için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemleri kullanılmıştır. Tahmin modelleri; dikkatli veri seti seçimi, veri ön işleme ve uygun parametre belirleme sonucunda daha iyi performans göstermiştir. Adam Optimizatörü ve ReLU aktivasyon fonksiyonunun kullanılmasıyla optimizasyon sürecinin başarısı artırılmış ve eğitim süresi kısaltılmıştır. Yüksek yakınsamanın sağlanması amacıyla öğrenme oranı küçük değerde; 0.0001 olarak seçilmiştir. Verilerdeki rastgele dalgalanmaları ve durağanlıkları tahmin etmedeki üstün performansı nedeniyle MSE kayıp fonksiyonu kullanılmıştır.

Çalışmada, KYEK'lerden üretilen gücü ve güç sistemlerinde tüketilen gücü etkili bir şekilde tahmin etmek için ÇKA, UKSB ve ESA yöntemlerinin kullanılabilirliğini gösterilmiş ve ayrıca makine öğrenmesi yöntemleri ile yapılacak, enerji üretim ve tüketim tahminlerinin doğruluğunun nasıl artırabileceği de değerlendirilmiştir. Sonuç olarak makine öğrenmesi yöntemleri ile enerji üretim ve tüketim tahmininde, daha büyük ve daha çeşitli veri setleri kullanılarak tahmin doğruluğunun artırılabilirliği ve bu yöntemlerin enerji alanında yaygın bir kullanım alanı bulacağı öngörülmektedir.

KYEK'lerin dâhil olduğu güç sistemlerinde enerji ve rezerv planlaması için önerilen ARP yaklaşımında, KYEK'lerden üretilen güç ve güç sisteminde tüketilen güç tahmin hataları dikkate alınmıştır. Güç sistemleri için bir güvenilirlik kriteri olan SGB'nin hesaplanma sürecine ileri seviye makine öğrenmesi yöntemleri ile yapılan üretilen ve tüketilen güç tahmin hataları dâhil edilmiştir. ARP yaklaşımı ile örnek güç sistemi için yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Tahmin doğruluğunun rezerv gerekliliği ve toplam maliyet ile ilişkisi ortaya konulmuştur. En doğru tahmin sonucunun elde edildiği ESA yöntemi ile en düşük rezerv gerekliliği ve en düşük toplam maliyet ortaya çıkmıştır. Bu sonuç tahmin doğruluğundaki artışın rezerv gerekliliğini ve toplam maliyeti azalttığını göstermektedir.

KYEK penetrasyon miktarının rezerv gerekliliği ve toplam maliyet ile ilişkisi ortaya konulmuştur. Bunun için dört farklı penetrasyon seviyesi dikkate alınmıştır. En yüksek KYEK penetrasyon seviyesinde rezerv gerekliliğinin de en yüksek seviyede olduğu fakat toplam maliyetin en düşük seviyede olduğu görülmüştür. En düşük KYEK penetrasyon seviyesinde ise rezerv gerekliliğinin en düşük miktarda olduğu ve toplam maliyetin de en yüksek değerde olduğu görülmüştür. Bu sonuç elektrik güç sistemlerinde KYEK penetrasyon miktarının artmasının toplam maliyeti azalttığını fakat rezerv gerekliliğini arttırdığını ortaya koymaktadır.

Elektrik güç sistemi operatörünün belirlediği limit SGB değerinin arttırılmasının rezerv gerekliliği ve toplam maliyetle ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla dört farklı güvenilirlik seviyesi için analizler yapılmıştır. Güç sistemi yöneticisi tarafından izin verilen sınır SGB değeri olan SGB_{max} 'ın arttırılmasının; yani güç sistemi güvenilirliğinin azaltılmasının rezerv gerekliliğini azalttığı ve toplam maliyeti arttırdığı görülmüştür. SGB_{max} 'ın arttırılması rezerv gerekliliğini azaltmıştır. Rezerv miktarı azaldıkça rezerv sağlama maliyeti düşmekte ancak tüketicilere sağlanamayan elektrik enerjisi miktarı da artmaktadır. SGB_{max} değerinin arttırılması aynı zamanda güç sisteminin güvenilirliğini de azaltmaktadır. Güç sistemi güvenilirliğinin azalması, güç sisteminde elektrik enerjisinin aktarılamadığı tüketici sayısının artmasına yol açmakta ve bu da ek ceza maliyetler oluşturmaktadır. Sonuç olarak güç sisteminin güvenilirliğinin arttırılmasının maliyeti de artıracığı sonucuna varılmıştır.

Önerilen ARP yaklaşımı ile KYEK'lerin elektrik güç sistemlerine dâhil edilmesi için avantajlar sağlanmaktadır. Gelişmiş tahmin yöntemleri ile sağlanamayan güç azaltılmaktadır. Bu da rezerv gerekliliği ve toplam maliyeti düşürmektedir. Önerilen yaklaşım sistem yöneticileri için güvenilir ve ekonomik rezerv planlama olanağı sunmaktadır. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı üretim kaynaklarının güç sistemlerine dâhil edilmesi ve rezerv optimizasyonu konusunda faydalı bir öneri sunulmuştur.

- [1] S. Bahramara, M. P. Moghaddam ve M. R. Haghifam, "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 62, pp. 609-620, 2016.
- [2] P. B. L. Neto, O. R. Saavedra ve D. Q. Oliveira, "The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids," *Renewable energy*, vol. 147 pp. 339-355, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.134>.
- [3] M. S. Alam, F. S. Al-Ismael, A. Salem ve M. A. Abido, "High-level penetration of renewable energy sources into grid utility: Challenges and solutions," *IEEE access*, vol. 8 2020 pp. 190277-190299, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031481>.
- [4] J. Jurasz, P. Dąbek, B. Kaźmierczak, A. Kies ve M. Wdowikowski, "Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland)," *Energy*, vol. 161 pp. 183-192, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085>.
- [5] E. B. Ssekulima, M. B. Anwar, A. A. Hinai ve M. S. E. Moursi, "Wind speed and solar irradiance forecasting techniques for enhanced renewable energy integration with the grid: a review," *IET renewable power Generation*, vol. 10 pp. 885-989, 2016, <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0477>.
- [6] M. Zhang, Z. Jiao, L. Ran ve Y. Zhang, "Optimal energy and reserve scheduling in a renewable-dominant power system," *Omega*, vol. 118, pp. 102848, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102848>.
- [7] G. K. Toh, H. B. Gooi, "Incorporating forecast uncertainties into EENS for wind turbine studies," *Electric power systems research*, vol. 81 (2), pp. 430-439. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.10.008>.
- [8] M. A. Ortega-Vazquez, S. D. Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 24 (1), pp. 114-124, 2009, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2004745>.
- [9] F. Bouffard, F. D. Galiana, "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation," in 2008 IEEE power and energy society general meeting-conversion and delivery of electrical energy in the 21st century," pp. 1-11, 2008, <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596307>.
- [10] N. Chaibut, P. Damrongkulkumjorn, "Optimal spinning reserve for wind power uncertainty by unit commitment with EENS constraint," in 2008 IEEE power and energy society general meeting, ISGT, 2014, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/ISGT.2014.6816445>.
- [11] X. Liang, "Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 53 pp. 855-866, 2017, <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253>.

- [12] M. Elsaraiti, A. Merabet, 2021. "A comparative analysis of the arima and lstm predictive models and their effectiveness for predicting wind speed," *Energies*, vol. 14, 20, pp. 6782, 2017, <https://doi.org/10.3390/en14206782>.
- [13] R. Tawn, J. Browell, "A review of very short-term wind and solar power forecasting," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 153, pp. 111758, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111758>.
- [14] R. Ahmed, V. Sreeram, Y. Mishra ve M.D. Arif, "A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 124, pp. 109792, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109792>.
- [15] K. Mason, J. Duggan ve E. Howley, "Forecasting energy demand, wind generation and carbon dioxide emissions in Ireland using evolutionary neural networks," *Energy*, vol. 155, pp. 705-720, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.192>.
- [16] M. Rahman, M. Shakeri, S. Tiong, F. Khatun, N. Amin, J. Pasupuleti ve M. Hasan, "Prospective methodologies in hybrid renewable energy systems for energy prediction using artificial neural networks," *Sustainability*. Vol. 13, 4, pp. 2393, 2021, <https://doi.org/10.3390/su13042393>.
- [17] M. H. Mehdiabadi, flexible reserve margin optimization for increased wind generation penetration, Arizona State University, Doktora Tezi, 2017.
- [18] G. J. Osório, J. C. O. Matias ve J. P. S. Catalão, "A review of short-term wind power forecasting approaches," *Proceedings of IET renewable power generation conference, RPG*, 2013, pp. 1-4.
- [19] G. Alkhayat, R. Mehmood, "A review and taxonomy of wind and solar energy forecasting methods based on deep learning," *Energy and AI*, vol. 4, pp. 100060, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100060>.
- [20] C. Sweeney, R. J. Bessa, J. Browell ve P. Pinson, "The future of forecasting for renewable energy," *WIREs energy environ*, vol. 9 (2), 2020, <https://doi.org/10.1002/wene.365>
- [21] S. Aslam, H. Herodotou, S. M. Mohsin, N. Javaid, N. Ashraf, ve S. Aslam, "A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 144, pp. 110992, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110992>.
- [22] Azadeh, A., Babazadeh, R., & Asadzadeh, S. M. (2013). Optimum estimation and forecasting of renewable energy consumption by artificial neural networks. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 27, pp. 605–612). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.007>.
- [23] E. Rodrigues, Á. Gomes, A. R. Gaspar, ve C. H. Antunes, "Estimation of renewable energy and built environment-related variables using neural networks – A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 94, pp. 959–988, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.060>.
- [24] A. Lahouar, J. B. H. Slama, "Hour-ahead wind power forecast based on random forests," *Renewable energy*, vol. 109, pp. 529–541, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.064>.

- [25] H. Liu, H. Tian, X. Liang, ve Y. Li, “New wind speed forecasting approaches using fast ensemble empirical model decomposition, genetic algorithm, Mind Evolutionary Algorithm and Artificial Neural Networks,” *Renewable energy*, vol. 83, pp. 1066–1075, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.004>.
- [26] Y. Meng, C. Chang, J. Huo, Y. Zhang, H. M. Mohammed Al-Neshmi, J. Xu ve T. Xie, “Research on ultra-short-term prediction model of wind power based on attention mechanism and CNN-BiGRU combined,” *Frontiers in energy research*, vol. 10, pp. 920835, 2022, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.920835>.
- [27] P. Singla, M. Duhan ve S. Saroha, “A comprehensive review and analysis of solar forecasting techniques,” *Frontiers in energy*, vol. 16, 2, pp. 187–223, 2021, <https://doi.org/10.1007/s11708-021-0722-7>.
- [28] Ö. A. Karaman, “Prediction of wind power with machine learning models,” *Applied sciences*, vol. 13 (20), pp. 11455, 2023, <https://doi.org/10.3390/app132011455>.
- [29] H. Wang, N. Zhang, E. Du, J. Yan, S. Han ve Y. Liu, “A comprehensive review for wind, solar, and electrical load forecasting methods,” *Global energy interconnection*, vol. 5 (1), pp. 9–30, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.04.002>.
- [30] M. A. Matos, R. J. Bessa, “Setting the operating reserve using probabilistic wind power forecasts,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 26 (2), pp. 594–603, 2010, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2065818>.
- [31] R. Aazami, H. Iranmehr, J. Tavoosi, A. Mohammadzadeh, M. H. Sabzalian ve M. S. Javadi, “Modeling of transmission capacity in reserve market considering the penetration of renewable resources,” *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 145, pp. 108708. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108708>.
- [32] Y. Xu, C. Wan, H. Liu, C. Zhao ve Y. Song, “Probabilistic forecasting-based reserve determination considering multi-temporal uncertainty of renewable energy generation,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 39, pp. 1019–1031, 2023, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3252720>.
- [33] M. Auguadra, D. Ribó-Pérez ve T. Gómez-Navarro, “Planning the deployment of energy storage systems to integrate high shares of renewables: The Spain case study,” *Energy*, vol. 264, pp. 126275, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126275>.
- [34] R. Khatami, M. Parvania ve A. Narayan, “Flexibility reserve in power systems: Definition and stochastic multi-fidelity optimization,” *IEEE transactions on smart grids*, vol. 11 (1), pp. 644–654, 2019, <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2927600>.
- [35] D. Fernández-Muñoz, I. J. Pérez-Díaz, “Optimisation models for the day-ahead energy and reserve self-scheduling of a hybrid wind–battery virtual power plant,” *Journal of energy storage*, vol. 57, pp. 106296, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106296>.

- [36] X. Deng, T. Lv, “Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models,” *Journal of cleaner production*, vol.246, pp. 118962, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118962>.
- [37] L. A. Roald, D. Pozo, A. Papavasiliou, D. K. Molzahn, J. Kazempour ve A. Conejo, “Power systems optimization under uncertainty: A review of methods and applications” *Electric power systems research*, vol. 214, pp. 108725, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108725>.
- [38] F. Bouffard, F. D. Galiana ve A. J. Conejo, “Market-clearing with stochastic security-part I: formulation,” *Electric power systems research*, vol. 20 (4) pp. 1818-1826, 2005, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857016>.
- [39] M. A. Al-Shaalan, “Reliability evaluation in generation expansion planning based on the expected energy not served,” *Journal of king saud university-engineering sciences*, vol. 24 pp. 11-18, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108725>.
- [40] G. Liu, K. Tomsovic, “Quantifying Spinning Reserve in Systems with Significant Wind Power Penetration,” *IEEE transactions on power systems*, vol. 27 (4), pp. 2385-2393, 2012, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2207465>.
- [41] A. Ajder, Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesislerini içeren güç sistemlerinde optimum yedek rezerv miktarının belirlenmesi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2017.
- [42] B. Kirby, Ancillary services: technical and commercial insights. Wartsila, North America, 2007.
- [43] R. E. Brown, Electric power distribution reliability. CRC Press, 2017.
- [44] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, “Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği,” 26.11.2017 tarihli ve 30252 sayılı resmi gazetede yayımlanmış nüshası, 2017.
- [45] M. R. Tür, Elektrik güç sistemlerindeki döner rezerv gereksiniminin ekonomik yönden incelenmesi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2018.
- [46] K. Mayer, S. Trück, “Electricity markets around the world,” *Journal of commodity markets*, vol. 9, pp. 77–100, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2018.02.001>.
- [47] A. K. Srivastava, S. Kamalasadan, D. Patel, S. Sankar ve K. S. Al-Olimat, “Electricity markets: An overview and comparative study,” *International journal of energy sector management*, vol. 5, issue 2, pp. 169–200, 2011, <https://doi.org/10.1108/17506221111145977>.
- [48] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPIAŞ), Gün Öncesi Piyasası (GÖP) Eğitim Videosu, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=SH85fHNjtj0>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.
- [49] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPIAŞ), EPIAŞ Vadeli Elektrik Piyasası (VEP), YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=KhuYAz0s0j8>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.

- [50] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPİAŞ), EPİAŞ VEP kontratlarının tezgah üstü piyasada işlem gören ikili anlaşmalardan farkı nedir?, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=R-XV0FJl2zY>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.
- [51] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPİAŞ), GİP (Gün İçi Piyasası) 2.0 Eğitimi, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=s1AAEPwWEu0>, 05.04.2024.
- [52] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPİAŞ), Dengeleme güç piyasası ve yan hizmetler eğitimi, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=vNAnQAsgIE>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.
- [53] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPİAŞ), Enerji piyasaları işletme anonim şirketi, dgp teklif kapasitesi – teklif yapıları, <https://www.epias.com.tr/dgp-teklif-kapasitesi-teklif-yapilari/>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.
- [54] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPİAŞ), Enerji piyasaları işletme anonim şirketi, talimat etiketlendirme esasları, <https://www.epias.com.tr/talimat-etiketlendirme-esaslari/>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.
- [55] Elektrik piyasaları işletme A.Ş. (EPİAŞ), Enerji piyasaları işletme anonim şirketi, Sistem marjinal fiyatı (SMF) hesaplanması, <https://www.epias.com.tr/smf-hesaplanmasi/>, Erişim Tarihi: 05.04.2024.
- [56] P. Cramton, “Electricity market design,” Oxford review of economic policy, vol. 33(4), pp. 589–612, 2017, <https://doi.org/10.2307/48539475>.
- [57] Türkiye elektrik iletim anonim şirketi, “2019 Yılı Türkiye Elektrik İletimi Sektör Raporu,” 2020.
- [58] M. Somunkıran, Pembelik barajı ve hidroelektrik santralinde primer frekans kontrolünün uygulanması, Elazığ: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [59] Türkiye elektrik iletim anonim şirketi, “Primer frekans kontrol hizmetinin uygulanmasına ilişkin el kitabı”, Ankara, Türkiye, 2009.
- [60] Türkiye elektrik iletim anonim şirketi, “Sekonder frekans kontrol hizmetinin uygulanmasına ilişkin el kitabı”, Ankara, Türkiye, 2010.
- [61] M. R. Tur, “Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique,” IEEE access, vol. 8, pp. 77962–77971, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990345>.
- [62] B. Murray, Electricity markets: investment, performance, and analysis. Wiley, 1998.
- [63] P. Masache, D. Carrión ve J. Cárdenas, “Optimal transmission line switching to improve the reliability of the power system considering ac power flows. Energies, vol. 14 (11), pp. 3281, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14113281>.
- [64] F. Nadeem, S. M. S. Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami ve T. S. Ustun, “Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems,” IEEE Access, vol. 7, pp. 4555–4585, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888497>.
- [65] A. S. Brouwer, M. van den Broek, A. Seebregts ve A. Faaij, “Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how

- these can be modeled,” Renewable and sustainable energy reviews vol. 33, pp. 443–466, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.076>.
- [66] W. Tong, Wind power generation and wind turbine design. WIT Press, Boston, 2010.
- [67] G. Sinden, “Characteristics of the UK wind resource: long-term patterns and relationship to electricity demand,” Energy policy, vol 35 (1), pp. 112–127, 2007.
- [68] P. Jamieson, Innovation in wind turbine design. Wiley, Sussex, 2011.
- [69] Enerji Sistemleri Analizi, Batman Üniversitesi Yayınevi, Batman, 2023.
- [70] H. J. Wagner, “Introduction to wind energy systems,” EPJ web of conferences, vol. 246, pp. 00004, 2020, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900005>.
- [71] W. Weibull, “A statistical distribution function of wide applicability,” ASME journal of applied mechanics, vol. 18 (3) , pp. 239–297, 1951.
- [72] K. Ulgen, A. Hepbasli, “Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey,” International journal of energy research, vol. 26 (6), pp. 495–506, 2002.
- [73] Y. Kaplan, "Rayleigh ve Weibull dağılımları kullanılarak Osmaniye bölgesinde rüzgâr enerjisinin değerlendirilmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 20.1, pp. 62-71, 2016.
- [74] Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü, www.mgm.gov.tr, Erişim Tarihi: 20.10.2023.
- [75] F. M. Vanek, L. D. Albright, Energy systems engineering: evaluation & implementation, McGraw-Hill, 2008.
- [76] Q. Hassan, P. J. Viktor, T. Al-Musawi, B. Mahmood Ali, S. Algburi, H. M. Alzoubi, A. Khudhair Al-Jiboory, A. Zuhair Sameen, H. M. Salman ve M. Jaszczur, “The renewable energy role in the global energy Transformations,” Renewable energy focus, vol. 48, pp. 100545, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>.
- [77] T. W. Hänsch, G. T. Kamiya, T. F. Krausz, G. B. Monemar, L. H. Venghaus, B. H. Weber ve B. H. Weinfurter, Springer series in OPTICAL SCIENCES. Springer, 2008.
- [78] C. J. Chen, Physics of solar energy. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2011.
- [79] P. Hersch, K. Zweibel, Basic photovoltaic principles and methods. Solar Energy Research Inst.(SERI), Golden, CO (United States), 1982.
- [80] S. Sharma, K. K. Jain ve A. Sharma, “Solar Cells: In Research and Applications—A Review,” Materials sciences and applications, vol. 06 (12), pp. 1145–1155, 2015, <https://doi.org/10.4236/msa.2015.612113>.
- [81] K. L. Chopra, P. D. Paulson ve V. Dutt, “Thin-film solar cells: An overview,” Progress in photovoltaics, vol. 12, pp. 69-92, 2004, <http://dx.doi.org/10.1002/pip.541>.
- [82] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering. 2nd edition. John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, 2003, <http://dx.doi.org/10.1002/0470014008>,

- [83] W. A. Badawy, "A review on solar cells from si-single crystals to porous materials and quantum dots," *Journal of advanced research*, vol. 6, pp. 123-132, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2013.10.001>.
- [84] A. C. Mayer, S. R. Scully, B. E. Hardin, M. W. Rowell ve M. D. Mcgehee, "Polymer-based solar cells," *Materials today*, vol. 10 (11), pp. 28-33, 2007.
- [85] Q. Chen, K. Folly, "Effect of input features on the performance of the ann-based wind power forecasting," 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, pp. 673-678, 2019, <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704725>.
- [86] E. K. Onyari, B. D. Ikotun, "Prediction of compressive and flexural strengths of a modified zeolite additive mortar using artificial neural network," *Construction and building materials*, vol. 187, pp. 1232-1241, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.079>.
- [87] J. Almeida, "Predictive non-linear modeling of complex data by artificial neural networks," *Current opinion in biotechnology*, vol. 13 (1), pp. 72-76, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(02\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00288-4).
- [88] S. Hanifi, X. Liu, X. Lin ve Z. Lotfian, "A critical review of wind power forecasting methods—past, present and future," *Energies*, vol. 13, 15, pp. 3764, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13153764>.
- [89] L. Noriega, "Multilayer perceptron tutorial," *School of computing. Staffordshire University*, vol. 4 (5), pp. 444, 2005.
- [90] Y.S. Park, S. Lek, "Artificial neural networks: multilayer perceptron for ecological modeling," *Developments in environmental modelling*, vol. 28, pp. 123-140, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63623-2.00007-4>.
- [91] A. M. Filippi, J. R. Jensen, "Fuzzy learning vector quantization for hyperspectral coastal vegetation classification," *Remote Sensing of Environment*, vol. 100 (4), pp. 512-530, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.007>.
- [92] M. Zahid, Y. Chen, A. Jamal ve M. Q. Memon, "Short term traffic state prediction via hyperparameter optimization based classifiers," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20 (3), pp. 685, 2020, <https://doi.org/10.3390/s20030685>.
- [93] M. Lechner, R. Hasani, "Learning long-term dependencies in irregularly-sampled time series," *ArXiv*, preprint arXiv:2006.04418, 2020, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.04418>.
- [94] C. Paoli, C. Voyant, M. Muselli ve M. Nivet, "Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural net-works," *Solar energy*, vol. 84, pp. 2146-2160, 2010, <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.08.011>.
- [95] B. Lindemann, B. Maschler, N. Sahlab ve M. Weyrich, "A survey on anomaly detection for technical systems using LSTM networks," *Computers in industry*, vol. 131, pp. 103498, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103498>.
- [96] Q. Wu, F. Guan, C. Lv, Y. Huang, "Ultra-short-term multi-step wind power forecasting based on CNN-LSTM," *IET Renewable power Generation*, vol. 15 (5), pp. 1019-1029, 2021, <https://doi.org/10.1049/rpg2.12085>.

- [97] M. Abumohsen, A. Y. Owda ve M. Owda, “Electrical load forecasting using LSTM, GRU, and RNN algorithms,” *Energies*, vol. 16, 5, pp. 2283, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16052283>.
- [98] Medium.com. www.medium.com, Erişim Tarihi: 27.10.2023.
- [99] J. Zhang, J. Yan, D. Infield, Y. Liu ve F. Lien, “Short-term forecasting and uncertainty analysis of wind turbine power based on long short-term memory network and Gaussian mixture model,” *Applied energy*, vol. 241, pp. 229-244, 2019, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.03.044>.
- [100] A. Shobanadevi, D. Maragatham, M. Prabu, K. Boopathi, “Short-term wind power forecasting using R-LSTM,” *International journal of renewable energy research*, vol. 11 (1), pp. 392-406, 2021, <https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i1.11807.g8144>.
- [101] E. Erkan, M. A. Arserim, “Mobile robot application with hierarchical start position dqn,” *Computational intelligence and neuroscience*, vol. 2022 (1) pp. 4115767, 2022, <https://doi.org/10.1155/2022/4115767>.
- [102] B. F. Ali BH, P. Ramachandran, “Compressive domain deep CNN for image classification and performance improvement using genetic algorithm-based sensing mask learning. *Applied sciences (Switzerland)*, vol. 12 (14), pp. 6881, 2022, <https://doi.org/10.3390/app12146881>.
- [103] M. Solas, N. Cepeda, J. Viegas, “Convolutional neural network for short-term wind power forecasting,” *IEEE PES innovative smart grid technologies europe (ISGT-Europe)*, vol. 12 (14) pp. 1-5, 2019, <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905432>.
- [104] [dataset] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Batman ilinin Gercüş ilçesine ait 2019 ve 2020 yıllarındaki saatlik tüketilen elektrik gücü verileri, 2019.
- [105] Renewables ninja. <https://www.renewables.ninja/>, Erişim Tarihi: 05.11.2023.
- [106] Google earth. <https://earth.google.com/web/>, Erişim Tarihi: 3.11.2023.
- [107] M. Ko, K. Lee, J. Kim, C. Hong, Z. Dong, K. Hur, “Deep concatenated residual network with bidirectional LSTM for one-hour-ahead wind power forecasting,” *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 12 (2), pp. 1321-1335, 2020, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2020.3043884>.
- [108] N. Koh, A. Sharma, J. Xiao, X. Peng ve W. Woo, “Solar irradiance forecast using long short-term memory: A comparative analysis of different activation functions,” *2022 IEEE symposium series on computational intelligence, SSCI*, 2022, pp. 1096-1101, <https://doi.org/10.1109/SSCI51031.2022.10022163>.
- [109] Z. Ling, B. Zhou, S. Or, Y. Cao, H. Wang, Y. Li ve K. Chan, “Spatio-temporal wind speed prediction of multiple wind farms using capsule network,” *Renewable energy*, vol. 175, pp. 718-730, 2021, <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.05.023>.
- [110] G. Kariniotakis, G. Stavrakakis ve E. Nogaret, “Wind power forecasting using advanced neural networks models,” *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 11, pp. 762-767, 1996, <https://doi.org/10.1109/60.556376>.

- [111] Y. Tian, D. Wang, G. Zhou, J. Wang, S. Zhao ve Y. Ni, “An adaptive hybrid model for wind power prediction based on the IVMD-FE-Ad-informer,” *Entropy*, vol. 25 (4), pp. 647, 2023, <https://doi.org/10.3390/e25040647>.
- [112] H. Wang, W. Xue, Y. Liu, J. Peng, H. Jiang, “Probabilistic wind power forecasting based on spiking neural network,” *Energy*, vol. 196, pp. 117072, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117072>.
- [113] M Islam, M. Nagrial, J. Rizk ve A. Hellany, “Solar radiation and wind speed forecasting using deep learning technique. IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering,” *CSDE*, 2021, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/CSDE53843.2021.9718372>.
- [114] Ö. A. Karaman, “Prediction of wind power with machine learning models,” *Applied Sciences*, vol. 13, 20, pp. 11455, 2023, <https://doi.org/10.3390/app132011455>.
- [115] G. van Rossum, Python v3.11 (Version 3.11), Erişim Tarihi: 15.11.2023.
- [116] M. A. Ortega-Vazquez, D. S. Kirschen, “Optimizing the spinning reserve requirements using a cost/benefit analysis,” *IEEE transactions on power systems*, vol. 22, pp. 24-33, 2007, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888951>.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Determination of Optimum Reserve based on Wind Energy in Power Systems

Makaleler

1. Smart Reserve Planning Using Machine Learning Methods in Power Systems with Renewable Energy Sources

