

Yenilenebilir Enerji Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemlerde Elektrik Enerjisi Üretiminde
Tesisin Toplam Verimliliği ile Kapasite Kullanım Oranının İncelenmesi

Ferhat DOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2024

Investigation Of The Total Efficiency Of The Facility and The Capacity Utilization Rate In
Electrical Energy Production In Renewable Energy Source Based Hybrid Systems

Ferhat DOĞAN

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

June 2024

Yenilenebilir Enerji Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemlerde Elektrik Enerjisi Üretiminde
Tesisin Toplam Verimliliği ile Kapasite Kullanım Oranının İncelenmesi

Ferhat DOĞAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji-Termodinamik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP

Haziran 2024

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ferhat DOĞAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yenilenebilir Enerji Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemlerde Elektrik Enerjisi Üretiminde Tesisin Toplam Verimliliği ile Kapasite Kullanım Oranının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP

Üye: Prof. Dr. Haydar ARAS

Üye: Prof. Dr. Hasan YAMIK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yenilenebilir Enerji Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemlerde Elektrik Enerjisi Üretiminde Tesisin Toplam Verimliliği ile Kapasite Kullanım Oranının İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 10/06/2024

Ferhat DOĞAN

İmza

ÖZET

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve mevsime bağlı olmasından kaynaklanan enerji üretim eksikliğinin kapatılması amacıyla iki kaynağın birleştirilerek santralin hibrit sisteme dönüşmesinin önemine değinilmiştir. Bu çalışmada örnek hibrit santral olarak Balıkesir’de tesis edilmiş ve işletilmekte olan Çaypınar Rüzgar/Güneş Hibrit Enerji Santrali seçilmiştir. Bu santralin seçilmesinin sebebi ülkemizde ana kaynak ve yardımcı kaynak olarak kurulan tüm ünitelerin işletmeye alınarak tam kapasitede üretime başlamasının üzerinden bir yıl geçmiş tek santral olmasıdır. Bu yönüyle tez çalışmasının yenilenebilir enerji sektörüne önemli bir bakış oluşturacağı düşünülmektedir. Bu santralin teorik olarak üretebileceği değerler rüzgar ve güneş için ayrı ayrı hesaplanarak gerçek zamanlı üretim verileriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca rüzgar ve güneş için verimlilik ve kapasite faktörü hesabı yapılmıştır. Rüzgar için verim %44,69 ve güneş için verim %81,49 olarak hesaplanmıştır. Rüzgar için kapasite faktörü %37,62, güneş için kapasite faktörü %14,58 olarak hesaplanırken hibrit santralin verimi %46,48 ve kapasite faktörü %33,61 olmuştur. Yani santral, hibrit santrale dönüştükten sonra veriminin arttığı ancak kapasite faktörünün düştüğü görülmüştür. Saat bazlı inceleme yapıldığında ise hibrite dönüşerek yıl içinde santralin hiç çalışmadığı saat sayısının azalarak santrale işlerlik kazandırıldığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Hibrit Santraller, Rüzgar, Güneş, Kapasite Faktörü, Verimlilik

SUMMARY

In this study, the importance of converting the power plant into a hybrid system by combining the two sources in order to close the energy production deficiency caused by the intermittent and seasonal nature of renewable energy sources is emphasized. In this study, Çaypınar Wind/Solar Hybrid Power Plant, which was established and operated in Balıkesir, was selected as an example hybrid power plant. The reason for choosing this power plant is that it is the only power plant in our country where all the units installed as main source and auxiliary source have been put into operation and started production at full capacity for a year. In this respect, it is thought that the thesis study will create an important perspective on the renewable energy sector. The values that this power plant can theoretically produce were calculated separately for wind and solar and compared with real-time production data. Additionally, efficiency and capacity factor calculations were made for wind and solar. The efficiency for wind was calculated as 44.69% and for solar was 81.49%. While the capacity factor for wind was calculated as 37.62% and the capacity factor for solar was 14.58%, the efficiency of the hybrid power plant was 46.48% and the capacity factor was 33.61%. In other words, after the power plant was converted to a hybrid power plant, its efficiency increased but its capacity factor decreased. When an hour-based analysis is made, it is seen that by turning into a hybrid, the number of hours in which the power plant is not in operation decreases and the power plant has become operational.

Keywords: Renewable Energy Sources, Hybrid Power Plants, Wind, Solar, Capacity Factor, Efficiency

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasındaki bilimsel katkılarından dolayı değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Çisil TİMURALP'e, her fırsatta bilgi ve birikimlerinden yararlandığım, görüş ve fikirlerini benimle paylaşan değerli büyüğüm Dr. Ozan SOYDAŞ'a, Ayen Ostim Enerji Üretim A.Ş.'ye, örnek santral olarak incelemiş olduğum Çaypınar Rüzgar/Güneş Hibrit Enerji Santrali hakkında gerekli bilgi ve materyalleri sağlayan değerli Makine Mühendisi Emre KOÇ'a, İnşaat Mühendisi Gökhan SAYGILI'ya, hiçbir zaman güvenini ve desteğini benden esirgemeyen varlığından güç aldığım değerli eşim Neslihan DOĞAN'a, biricik kızım Öykü DOĞAN'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİYE BAKIŞ	2
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	2
2.1.1. Rüzgar enerjisi.....	2
2.1.2. Güneş enerjisi	5
2.1.3. Biyokütle-biyogaz enerjisi.....	7
2.1.4. Jeotermal enerji.....	9
2.1.5. Hidroelektrik enerji	11
2.1.6. Hidrojen enerjisi	12
2.2. Dünyada Yenilenebilir Enerji	14
2.3. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji.....	15
3. HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİ	17
3.1. Konvansiyonel Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemler.....	18
3.1.1. Termik-güneş hibrit sistemler.....	18
3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemler	19
3.2.1. Rüzgar-güneş hibrit sistemler.....	19
3.2.2. Biyokütle/biyogaz-güneş hibrit sistemler.....	20
3.2.3. Jeotermal-güneş hibrit sistemler.....	21
3.2.4. Hidroelektrik-güneş hibrit sistemler.....	22
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
5. MATERYAL VE YÖNTEM	29
5.1. Rüzgar Santrallerinde Kurulum Öncesi Yapılan İşlemler	29
5.1.2. Rüzgar verilerinin analizi	30

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
5.1.3. Rüzgar ölçümü.....	30
5.1.4. Rüzgar sınıfının belirlenmesi.....	32
5.1.5. Rüzgar türbini seçimi.....	33
5.2. Rüzgar Türbinleri.....	33
5.2.1. Yapısı ve tipleri	33
5.2.2. Türbin bileşenleri.....	35
5.2.3. Temel yasa ve kavramlar	36
5.3. Güneş Panelleri.....	39
5.3.1. Güneş panelinin oluşumu	40
5.3.2. Temel yasa ve kavramlar	43
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
6.1. Rüzgar Enerji Santrali İçin Veriler ve Hesaplamalar	46
6.2. Güneş Enerji Santrali İçin Veriler ve Hesaplamalar.....	51
6.3. Rüzgar/Güneş Hibrit Enerji Santrali İçin Veriler ve Hesaplamalar	59
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	74
EK AÇIKLAMALAR	77
Ek Açıklama-A: Rüzgar Türbini Kataloğu.....	77
Ek Açıklama-B: Güneş Paneli Kataloğu	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı.....	3
2.2. 100 metre yükseklikteki kapasite faktörü dağılımı	4
2.3. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası	6
2.4. Türkiye’de aylara göre güneşlenme süreleri	7
2.5. Biyogaz üretimi ve tüketimi	8
2.6. BEPA Hayvansal atık miktarının illere göre dağılımı.....	9
2.7. Jeotermal enerjiden elektrik üretim prosesi.....	10
2.8. Jeotermal Kaynaklar ve Uygulama Haritası.....	10
2.9. Hidroelektrik santralden enerji üretimi.....	11
2.10. Hidrojenden enerji üretimi ve tüketimi	13
2.11. Hidrojen enerjisinin sınıflandırılması.....	13
2.12. Farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretiminin küresel çapta sahip olduğu paylar.....	15
2.13. Türkiye’de kurulu gücün kaynaklara dağılımı	16
3.1. Hibrit TES-GES.....	18
3.2. Hibrit RES-GES	20
3.3. Hibrit BES-GES	21
3.4. Hibrit JES-GES	22
3.5. Hibrit HES-GES	23
3.6. Aşağı Kaleköy Barajı ve HES	24
5.1. Kepçe anemometre	31
5.2. Ultrasonik anemometre.....	31
5.3. Propeller anemometre.....	32
5.4. Rüzgar yön sensörü	32
5.5. Yatay eksenli rüzgar türbini	34
5.6. Dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	35

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7. Rüzgar türbinini oluşturan bileşenler	36
5.8. Rayleigh dağılım fonksiyonu grafiği.....	38
5.9. Güneş paneli	40
5.10. İngot (kütük).....	41
5.11. Wafer (yonga).....	41
5.12. Hücre üretimi	42
5.13. Mono kristal ve poli kristal hücrelerin half-cut kesilmesi.....	42
5.14. Hücreden panele oluşum	43
6.1. Santral sahası	45
6.2. Türbinlerin santral sahası içindeki konumlarının coğrafi görünümü	46
6.3. Balıkesir ili toplam güneş radyasyonu haritası.....	52
6.4. Balıkesir ili global radyasyon değerleri.....	53
6.5. Balıkesir ili güneşlenme süreleri	53
6.6. PVsyst yazılımının panel için eğim açısı tespiti.....	54
6.7. Sankey diyagramı	56
6.8. PVsyst ve sahadaki üretimin kıyaslanması.....	59
6.9. Hibrit santralin aylara göre RES ve GES üretim değerleri.....	61
6.10. Ocak ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	62
6.11. Şubat ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	63
6.12. Mart ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri.....	63
6.13. Nisan ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	64
6.14. Mayıs ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri.....	64
6.15. Haziran ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri.....	65
6.16. Temmuz ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	66
6.17. Ağustos ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	66
6.18. Eylül ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri.....	67
6.19. Ekim ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri.....	67
6.20. Kasım ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.21. Aralık ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri	68
6.22. RES için yıllık saat-kapasite faktör aralığı grafiği	69
6.23. GES için yıllık saat-kapasite faktör aralığı grafiği	70
6.24. Hibrit santral için yıllık saat-kapasite faktör aralığı grafiği	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Rüzgar sınıfına göre toplam kapasite tablosu.....	4
5.1. Türbin sınıfları.....	33
6.1. Aylara göre ortalama rüzgar hızı değerleri.....	47
6.2. Rüzgar için teorik ve gerçekleşen üretim değerleri.....	48
6.3. RES için üretim verileri ve kapasite faktörü	50
6.4. RES verimi	51
6.5. PVsyst yazılımının hesapladığı çıktılar	55
6.6. GES için üretim verileri ve kapasite faktörü	57
6.7. GES verimi	58
6.8. Hibrit santral üretim verileri ve kapasite faktörü.....	60
6.9. Hibrit santral üretim verileri ve verim.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler****Açıklama**

α	Yüzey pürüzlülük katsayısı
I	Akım [Amper]
m	Kütle [kg]
MW	Megawatt
MWh	Megawatt saat
P	Güç [Watt]
v	Hız [m/s]
W_p	Pik güç [Watt]
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
DB	Dışişleri Bakanlığı
DSİ	Devlet Su İşleri
EİGM	Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	Güneş Enerji Santrali
HES	Hidroelektrik Enerji Santrali
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
JES	Jeotermal Enerji Santrali
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgar Enerji Santrali
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TES	Termik Enerji Santrali
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünya nüfusunun artması birçok ihtiyacı beraberinde getirmiştir. Bunlardan bir tanesi de enerjidir. Enerji; tarım, konut, sanayi ve ulaşım gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Enerji, yenilenemeyen kaynaklardan ve yenilenebilir kaynaklardan üretilir. Türkiye'nin de artan enerji talebinin bir sonucu olarak günlük pik güç ihtiyacı hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanmasında yenilenebilir enerjinin kullanımının artması hem karbon emisyonunu hem de dışa bağımlılığı azaltmaktadır.

Yenilenebilir enerji santrallerine bir başka yenilenebilir enerji kaynağı yardımcı kaynak olarak kurularak mevcut santral birden çok kaynaklı elektrik üretim tesisine yani hibrit enerji santrallerine dönüşür. Bu yolla aynı santralde üretilen enerji artmaktadır. Tek bir üretim tesisinde birden fazla kaynaktan elektrik enerjisi üretilebilmesine imkan sağlayan hibrit santrallerin, üretim tesislerinin daha verimli kullanılmasına, elektrik üretim kapasiteleri içerisinde daha fazla elektrik üretilmesine imkân vermektedir.

Bu çalışmada bir rüzgar enerji santrali incelenmiş ardından bu santrale yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali kurulduktan sonra hibrit santrale dönüşerek iki kaynağın da yenilenebilir olduğu senaryoya göre rüzgar-güneş hibrit enerji santrali için üretim verileri incelenmiştir. Örnek olarak seçilmiş Çaypınar Rüzgar/Güneş Hibrit Enerji Santrali'nin rüzgar ve güneş için ayrı ayrı teorik olarak üretebileceği değerler hesaplanarak gerçek zamanlı üretim verileriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca verimlilik ve kapasite faktör hesabı yapılmıştır. Ülkemiz için hibrit santrallerin önemiyle ilgili araştırmalara, hesaplamalara ve çalışmalara yer verilerek bununla birlikte enerji verimliliğinin artırılması konusunda önerilerde bulunulmuştur.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİYE BAKIŞ

Petrol, doğal gaz, linyit, taşkömürü yenilenemeyen kaynaklardır, rezervleri tükenene kadar kullanılabilirler. Kolaylıkla erişilemez, yeryüzündeki dağılımı eşit değildir. Karbon salınımlarından dolayı çevre kirliliğine sebep oldukları için alternatif enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmuştur. Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan üretilen enerji türlerinin genel adıdır. Karbon nötr olmaları sebebiyle temiz enerji kaynaklarıdır. Doğal bir döngü içerisinde süreklilik arz ederler.

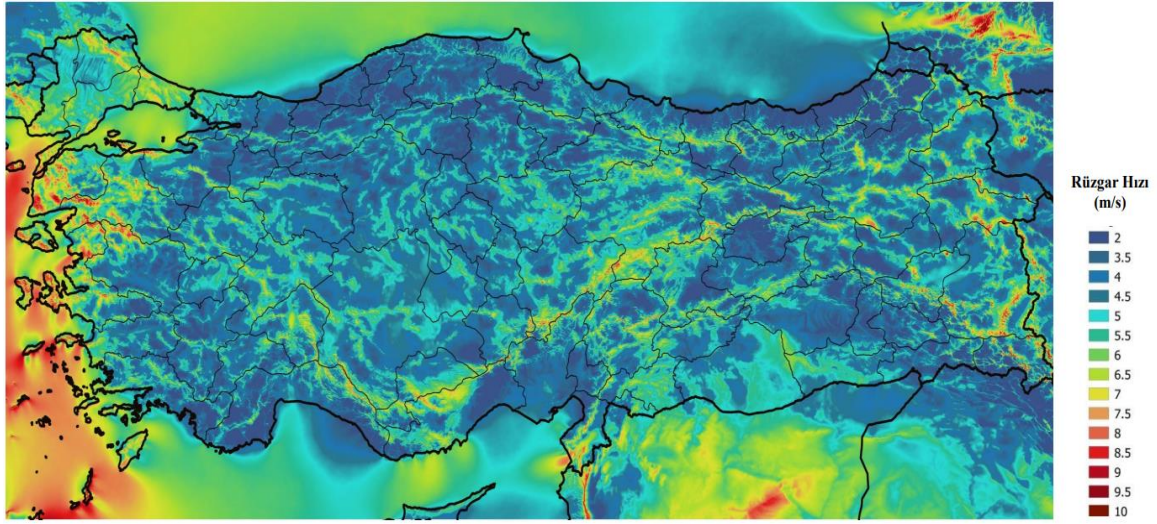
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar, güneş, hidroelektrik, biyokütle (biyogaz), jeotermal olarak kabul edilir. Yenilenebilir enerji kaynakları karbon nötrdür yani kullanıldıklarında karbon salınımına neden olmadıkları gibi kullanım sonrasında da herhangi bir atık açığa çıkarmadıkları için çevre dostu temiz enerji kaynaklarıdır. Fosil enerji kaynakları zamanla tükenirken yenilenebilir enerji kaynakları tükenmeyen enerji kaynaklarıdır.

2.1.1. Rüzgar enerjisi

Rüzgar, yeryüzüne gelen güneşin her bölgeyi eşit ısıtmamasından dolayı ortaya çıkan sıcak-soğuk arasındaki basınç farkından kaynaklanan hava hareketidir. Bu hava hareketinin oluşturduğu kinetik enerji, rüzgar türbinleri kullanılarak elektrik enerjisine dönüşür. Türbin kanatlarına çarpan rüzgar, türbinin dönmesini sağlar ve mekanik enerji açığa çıkar. Jeneratöre bağlı şaft hareket ederek elektromanyetik yolla elektrik enerjisi üretilir (Pınar vd., 2020).

Rüzgar, mevsime ve bölgeye göre değişiklik gösterir. Bu sebeple Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek amacıyla orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak REPA (Rüzgar Enerji Potansiyel Atlası) hazırlanmıştır.



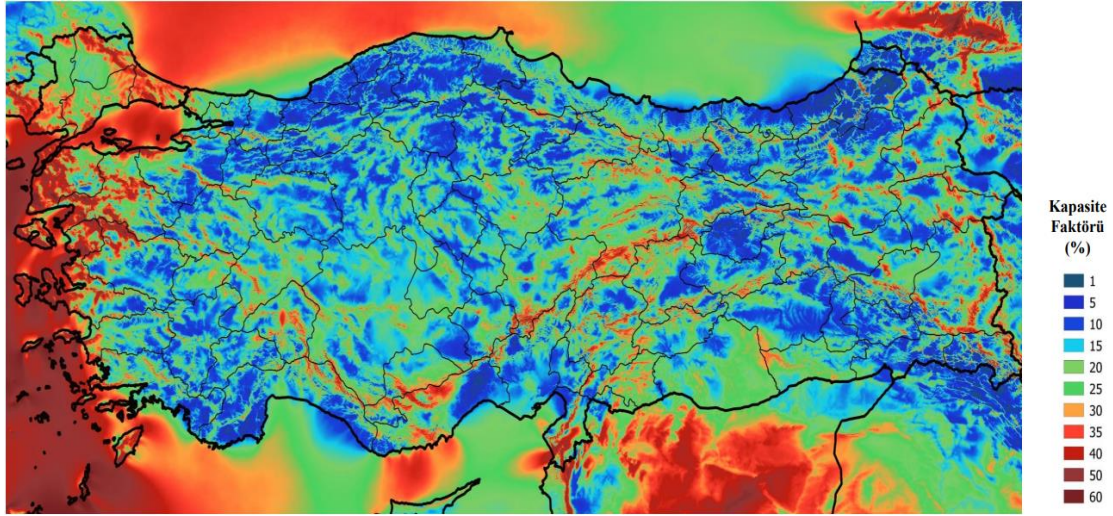
Şekil 2.1. 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı

Şekil 2.1.'deki REPA verilerine göre yer seviyesinden 50 m yükseklikte ve yıllık ortalama rüzgar hızı 7.5 m/s üzeri olan kullanılabilir alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiş ve Türkiye'de kurulabilecek rüzgar elektrik santrallerinin toplam kapasitesinin 47.849,44 MW olduğu belirlenmiştir (ETKB, 2023).

Çizelge 2.1. Rüzgar sınıfına göre toplam kapasite tablosu

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

Çizelge 2.1.'de rüzgar sınıfına göre toplam kapasite tablosu verilmiştir. Buna göre rüzgar sınıfı 4-7 aralığında toplam kapasite 47.849,44 MW iken rüzgar sınıfı 4 bu değerin 29.259,36 MW'lık kısmını oluşturmaktadır.



Şekil 2.2. 100 metre yükseklikteki kapasite faktörü dağılımı

Şekil 2.2. 3 MW gücündeki bir rüzgar türbininin teknik değerleri dikkate alınarak hazırlanmış 100 metre yükseklikteki kapasite faktörü dağılımı haritasını göstermektedir.

Haziran 2022 itibariyle Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu gücü 10.976 MW iken toplam kurulu güç içindeki oranı ise %10,81'dir. Kurulu güç bakımından Türkiye'deki en büyük rüzgar enerji santrali 288 MW kurulu gücüyle Manisa'da bulunan Soma RES'tir (ETKB, 2023).

Rüzgar enerjisinden faydalanmanın en verimli yollarından bir diğeri ise deniz üstü (offshore) rüzgar enerji santralleridir. Çünkü açık denizlerdeki rüzgar hızı daha fazladır ve sürekli bu yüzden enerji üretimi daha yüksek olacaktır. En büyük dezavantajı ise yatırım maliyetinin karadaki rüzgar enerji santrallerine göre çok yüksek olmasıdır.

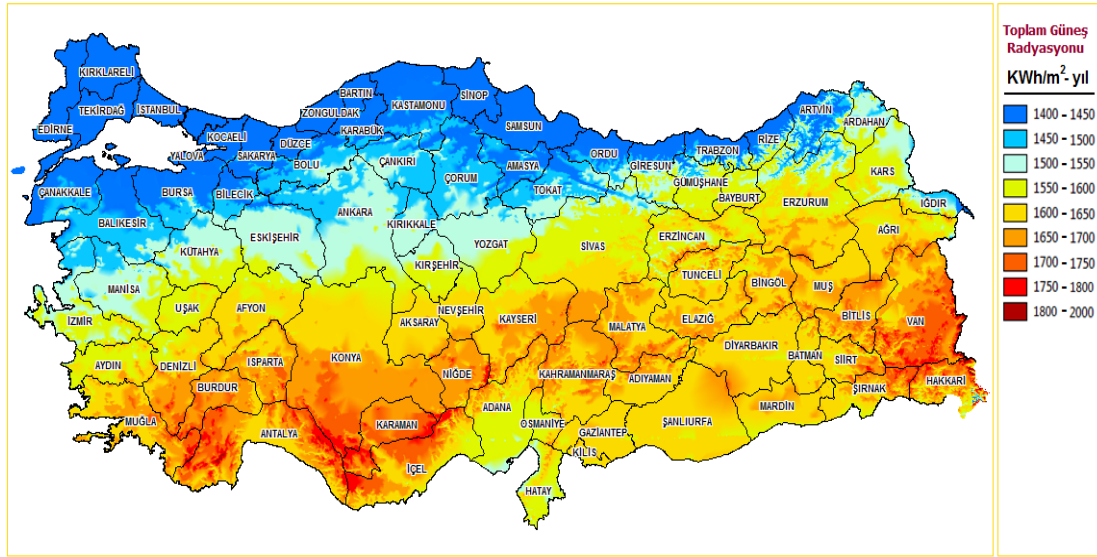
Türkiye'de denizüstü (offshore) RES kurulması için girişimler başlamış olup dört adet saha YEKA ilan edilmiştir. Aday YEKA'lar Karabiga, Bozcaada, Bandırma, Gelibolu bölgelerinin kıyısında yer almaktadır (ETKB, 2023).

2.1.2. Güneş enerjisi

Güneş içerisinde bulunan hidrojenlerin helyuma dönüşmesi yani füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma güneş enerjisidir. Güneş en temiz ve en güçlü enerji kaynağıdır, insanlığın mevcut enerji tüketimi güneş enerjisinin çok çok küçük bir kısmıdır.

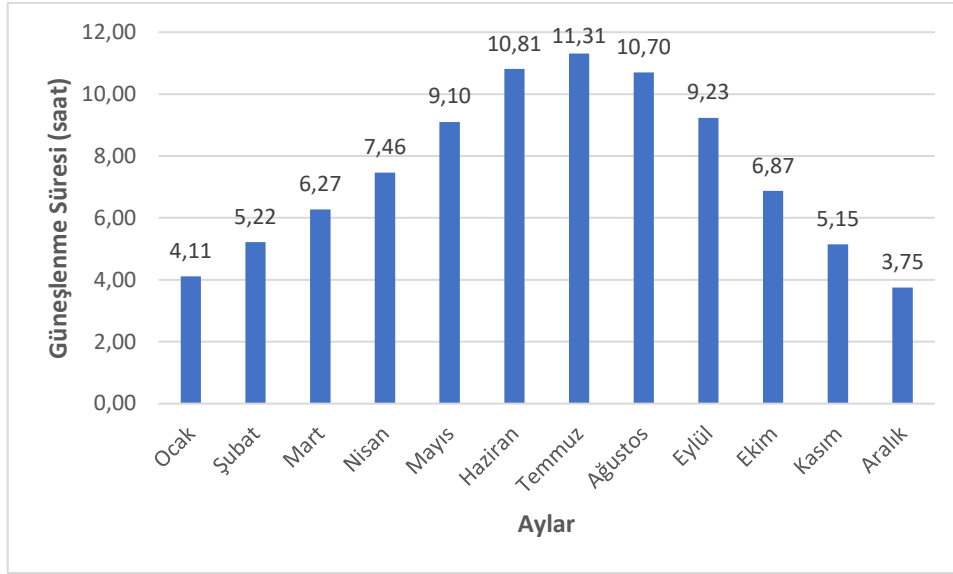
Güneş enerjisi iki şekilde değerlendirilir: Güneş kolektörleri ile ısı enerjisi olarak ve güneş panelleri ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilirler. Güneş panelleri yani PV (fotovoltaik sistemler) bir yarı iletken olan silisyum içerirler. Güneş ışığı yarı iletkenler tarafından emilim gösterdiğinde elektronlar atomlardan ayrılıp serbest kalır ve elektrik akımı meydana gelir. Fotonların voltaja yani elektriğe dönüşümü fotovoltaik etki olarak tanımlanmıştır. Güneş hücreleri seri veya paralel bağlanıp bir yüzeye monte edilerek güneş panelleri oluşur. Güneş panellerinin, kullanılan hücre tiplerine göre monokristal, polikristal ve ince film olarak farklı türleri mevcuttur (Demirtaş, 2008).

Coğrafi konumundan dolayı Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli yüksektir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışıınım değeri 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. GEPA'da yer alan genel potansiyel görünümü ve aylık ortalama global radyasyon dağılımı Şekil 2.3.'te yer almaktadır (ETKB, 2023).



Şekil 2.3. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

Ülkemizin güneşlenme süreleri Şekil 2.4.'te verilmiştir. En fazla güneşlenme sürelerinin Haziran-Temmuz-Ağustos aylarına ait olduğu görülmektedir (ETKB, 2023).



Şekil 2.4. Türkiye’de aylara göre güneşlenme süreleri

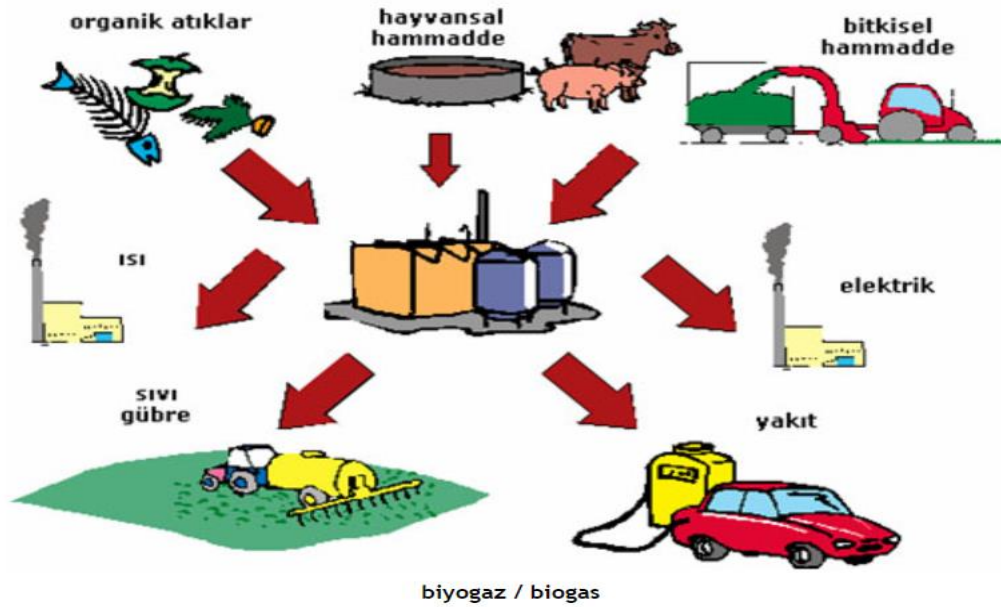
Haziran 2022 itibariyle Türkiye’nin güneş enerjisi kurulu gücü 8.479 MW iken toplam kurulu güç içindeki oranı ise %8,35’tir. Kurulu güç bakımından Türkiye’deki en büyük güneş enerji santrali 1000 MW kurulu güce sahip Konya’da bulunan Karapınar YEKA-1 GES’tir (ETKB, 2023).

2.1.3. Biyokütle-biyogaz enerjisi

Biyokütle, bitki ve hayvan atıkları gibi türlerden elde edilen yenilenebilir organik maddedir. Bu organik maddelerden çeşitli biçimlerde elde edilen enerjiye de biyokütle enerjisi denir (Mohtasham, 2015).

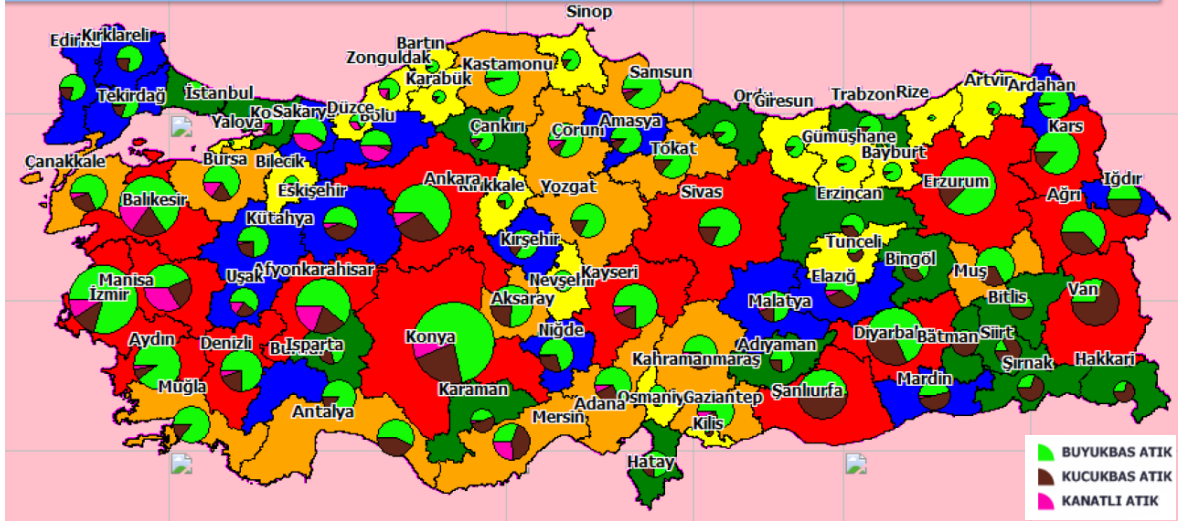
Orman ürünlerinden elde edilen atıklar, hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, endüstri ve kentsel atıklar biyokütle için başlıca kaynaklardır. Bu atıklar fiziksel veya kimyasal işlemlerden geçerek enerji üretimine hazır hale getirilir. Fiziksel işlemler sırasıyla kurutma, öğütme, pelletleme (granül hale getirme) ve paketlemedir. Elde edilen ürünler yakılarak enerji elde edilir. Biyokütle, kimyasal işlemlerden geçtikten sonra ise biyogaz, biyoetanol ve biyodizel elde edilir (Ayan, 2022).

Biyogaz, biyokütlenin (örneğin hayvan atıkları, belediye atıkları) oksijensiz ortamda fermentasyonu sonucunda meydana gelir. Metan gazının yoğunlukta olduğu bu gaz, organik hammaddelerden elde edilen yanıcı bir gazdır. Elde edilen biyogaz, gaz motorlarında yakılarak enerji elde edilmektedir. Fermantasyondan arta kalan gaz dışındaki madde ise sıvı gübredir, verimi yüksek olup tarımda kullanılabilir. Şekil 2.5.'te biyogaz üretimi ve tüketimi şematize edilmiştir.



Şekil 2.5. Biyogaz üretimi ve tüketimi

Türkiye'nin biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası (BEPA) Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Bu atlasta hayvansal, bitkisel, belediye ve orman atık miktarları mevcuttur. BEPA verilerine göre toplanabileceği değerlendirilen atıkların toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3,9 MTEP/yıl'dır.

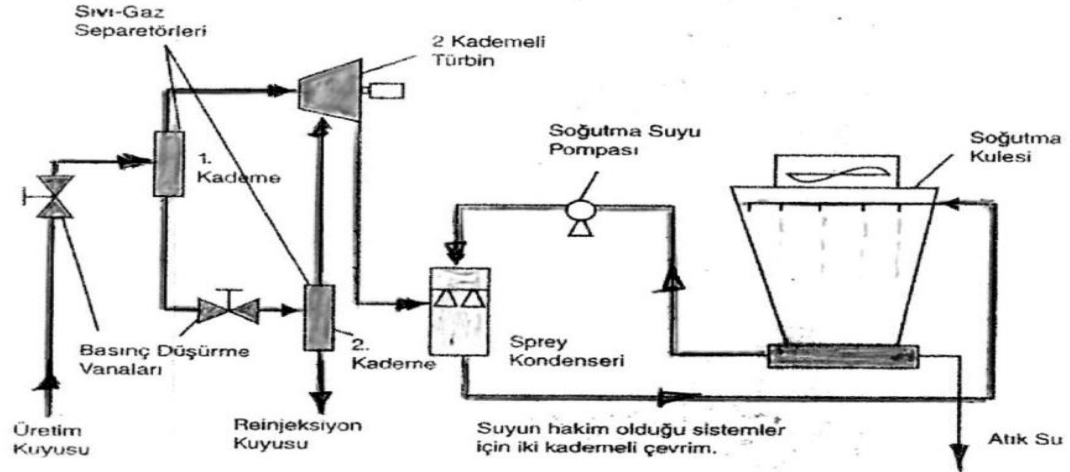


Şekil 2.6. BEPA Hayvansal atık miktarının illere göre dağılımı

Biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç Haziran 2022 sonu itibariyle 2.172 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %2.14'tür. Kurulu güç bakımından Türkiye'deki en büyük biyokütle enerji santrali 86 MW kurulu güce sahip İstanbul'da bulunan İBB Biyokütle Santrali'dir (ETKB, 2023).

2.1.4. Jeotermal enerji

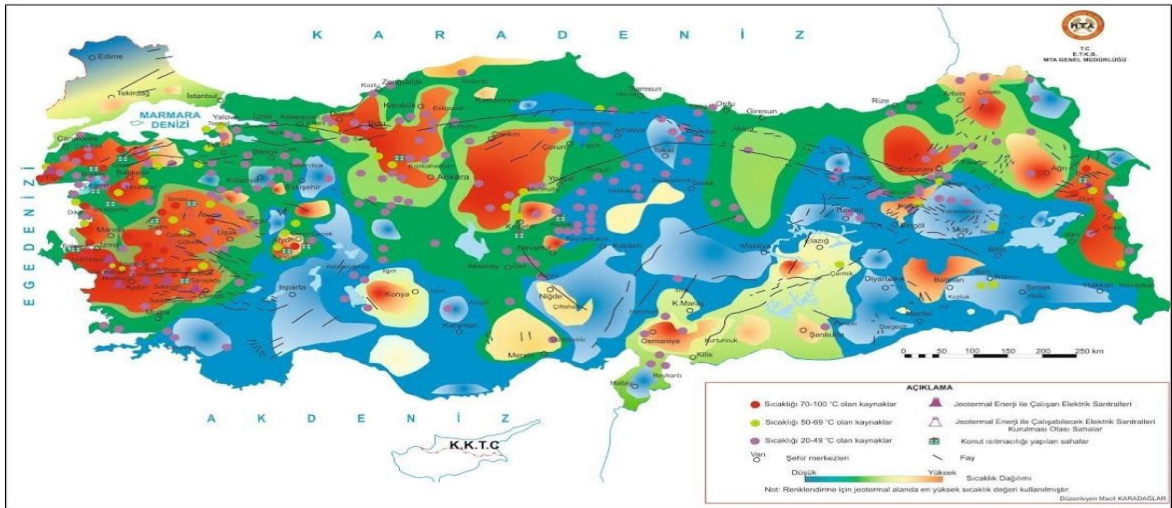
Jeotermal enerji, yeraltından çıkan suyun sıcaklık ve buharından faydalanan temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Jeotermal enerji ile elektrik üretimi yapılırken kuru buhar santrallerinde kaynaktan gelen kuru buhar doğrudan türbinleri döndürmek için kullanılırken, flaş buhar santrallerinde (yoğuşma çevrimli) kaynaktan gelen yüksek basınçlı akışkan buhara çevrilip türbini döndürmek için kullanılır. Çift çevrim santrallerinde (binary) ise ikinci bir akışkan kullanılarak jeotermal akışkanın bu akışkanı ısıtıp buharlaştırmasıyla türbinin dönmesi sağlanarak enerji üretilir (Kaplan, 2008).



Şekil 2.7. Jeotermal enerjiden elektrik üretim prosesi

Jeotermal enerjiden elektrik üretim prosesi Şekil 2.7.'de gösterilmiştir. Burada kaynaktan çıkan jeotermalin sıcaklığı kullanılarak bir çevrimde enerji üretilmektedir.

Jeotermal sürekli ve iklime bağlı değildir. Bu yüzden devamlı, ucuz, güvenilir ve yenilenebilir önemli bir kaynaktır. Şekil 2.8.'de Türkiye'deki jeotermal kaynakların dağılımı (Jeotermal Kaynaklar ve Uygulama Haritası) verilmiştir.



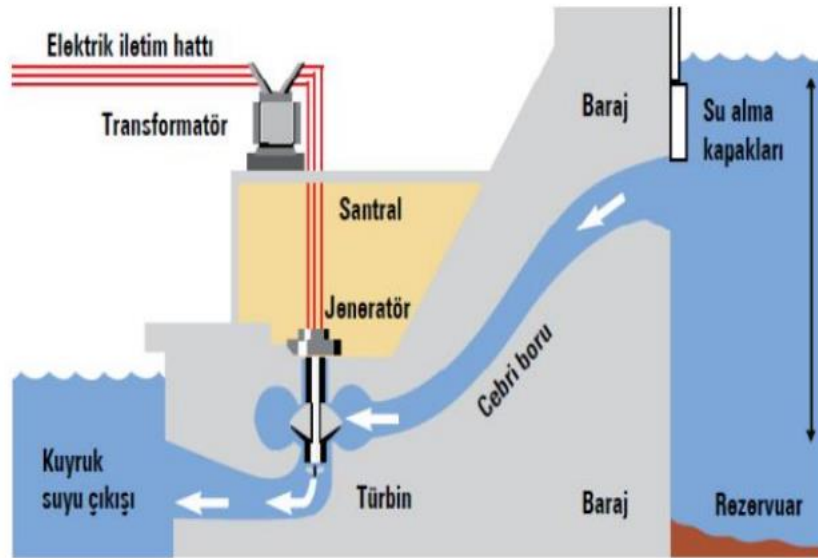
Şekil 2.8. Jeotermal Kaynaklar ve Uygulama Haritası

Bu haritaya göre potansiyeli en fazla olan alan Batı Anadolu'dur. Jeotermal kaynakların %90'ı düşük ve orta sıcaklıktadır, termal turizm ve ısıtmada kullanılır. Geriye kalan %10 ise elektrik enerjisi üretimi için uygundur (ETKB, 2023).

Jeotermal enerjiye dayalı kurulu güç Haziran 2022 sonu itibariyle 1.686 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %1,66'dır. Kurulu güç bakımından Türkiye'deki en büyük jeotermal enerji santrali 165 MW kurulu güce sahip Denizli'de bulunan Kızıldere 3 JES'tir (ETKB, 2023).

2.1.5. Hidroelektrik enerji

Hidroelektrik enerji, suyun durgun (potansiyel) enerjisinin harekete (kinetik enerji) çevrilmesi ile elde edilir. Biriktirilen suyun belli bir yükseklikten akarken türbin çarkını döndürmesi ile elektrik üretimi gerçekleşir. Hidroelektrik santralden enerji üretiminin şematik gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Hidroelektrik santralden enerji üretimi

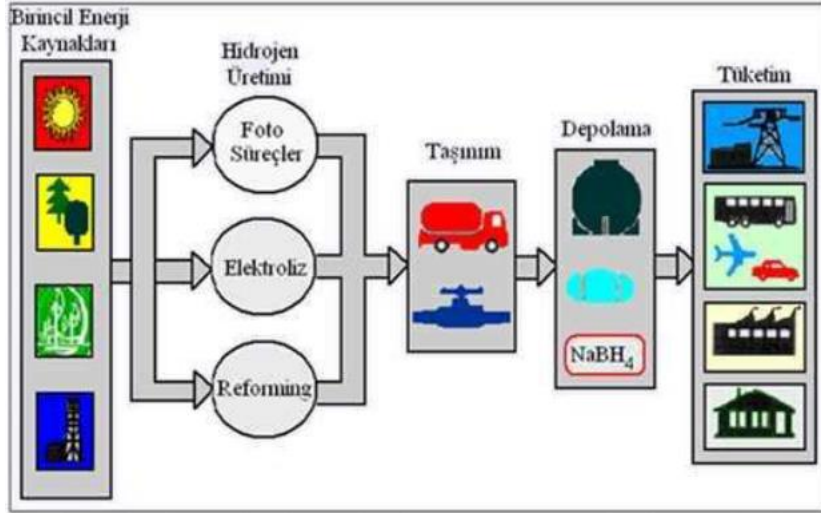
Hidroelektrik santrallerde kullanılan türbinler ikiye ayrılır: Etki tipi türbinler; Pelton, Banki ve Turgo iken tepki tipi türbinler; Francis ve Kaplan'dır (Yavuzdemir, 2012).

Barajların ilk yatırım maliyeti yüksek olmasına karşın üretim maliyeti düşüktür çünkü kaynağı sudur. Çevre kirliliği, hava kirliliği gibi durumlar oluşturmazlar, yenilenebilir ve çevre dostudur. Üretim, mevsime göre değişiklik gösterir.

Hidroelektrik enerjiye dayalı kurulu güç Haziran 2022 sonu itibarıyla 31.558 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı ise %31.09'dur. Kurulu güç bakımından Türkiye'deki en büyük hidroelektrik enerji santrali 2.405 MW kurulu güce sahip Şanlıurfa'da bulunan Atatürk Barajı ve HES'tir (ETKB, 2023).

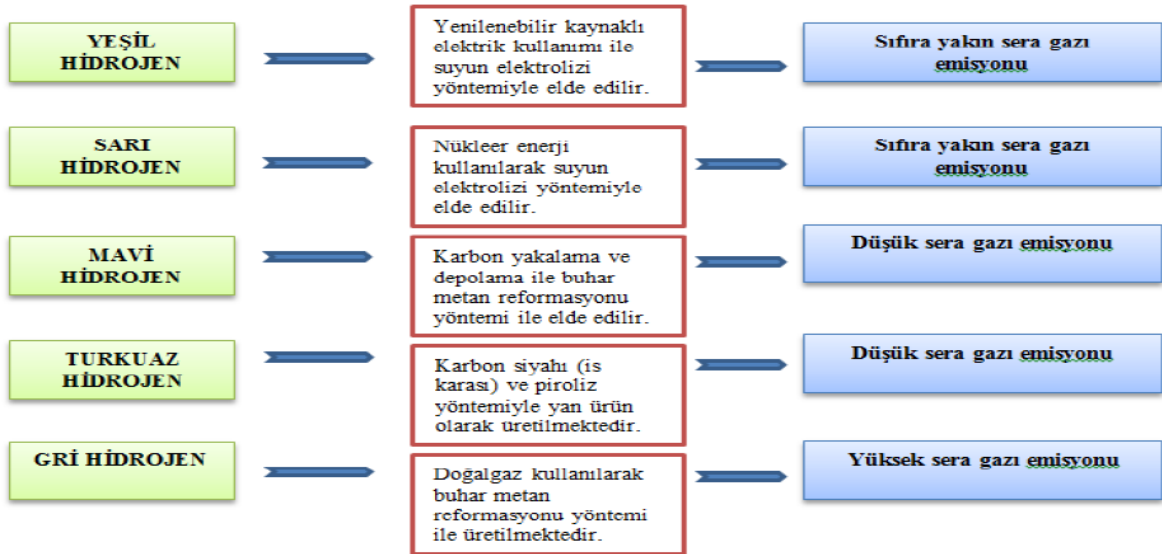
2.1.6. Hidrojen enerjisi

Evrende en çok bulunan element olan hidrojen, doğada serbest halde bulunmayıp bileşik halde bulunmaktadır. Hidrojen enerjisi ise bileşik halin moleküllerine ayrıştırılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Hidrojen hem fosil yakıtlardan hem de yenilenebilir kaynaklardan üretilmektedir. Yenilenebilir olma özelliğini üretildiği kaynak belirlemektedir. Hidrojenin en bilinen bileşiği olan suyun, elektroliz yoluyla hidrojen üretimi yenilenebilirdir. Bu enerji eldesinde su buharı çıktığından çevreye zararlı bir atık ortaya çıkmamaktadır. Hidrojen üretildikten sonra taşıma, depolama ve tüketim süreçleri ile çevrim tamamlanmaktadır (Özgür, 2008). Şekil 2.10.'da hidrojenin üretiminden tüketimine kadar olan süreç gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Hidrojen enerji üretimi ve tüketimi

Şekil 2.11.'de renklerine göre hidrojen üretiminin üretim yöntemleri ve buna bağlı karbon salınım miktarları verilmiştir.



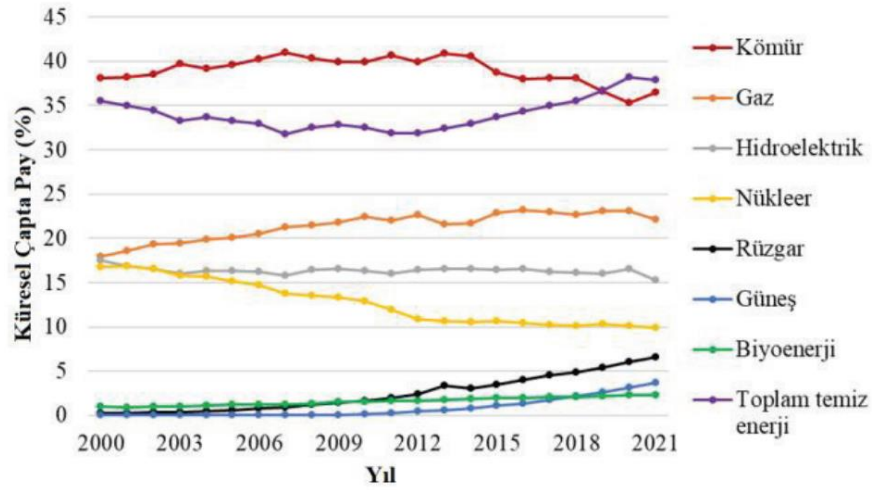
Şekil 2.11. Hidrojen enerjisinin sınıflandırılması

En temiz enerji kaynağı yeşil ve sarı hidrojen iken, doğal gaz kullanılarak üretilen gri hidrojen ise yüksek sera gazı emisyonu açığa çıkarmaktadır. Ülkeler sera gazı emisyonunu azaltmak için hidrojen teknolojilerine yatırımlarını hızlandırmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2019 verilerine göre küresel hidrojen üretimi yaklaşık 120 milyon ton olmuştur. Avrupa Komisyonu, 2020 yılında yayınladığı Hidrojen Stratejisi'nde 2050'ye kadar sıfır karbon hedefi koymuştur (Bektaş vd., 2021).

Türkiye'de ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası yayımlanmıştır. Bu plana göre elektrolizör kurulu güç kapasitesi için 2030'da 2 GW, 2035'te 5 GW, 2053'te ise 70 GW hedef konulmuştur (ETKB, 2023).

2.2. Dünyada Yenilenebilir Enerji

12 Aralık 2015'te iklim değişikliği ile mücadele bağlamında sözleşmeye taraf 195 ülkenin katılımıyla Paris Anlaşması yürürlüğe girmiştir. Paris Anlaşması, Kyoto Protokolü'nün sona erme tarihi olan 2020 ve sonrasındaki iklim değişikliği rejimini düzenlemeyi amaçlamaktadır. Paris Anlaşması'nın gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde sera gazı emisyonlarını azaltarak küresel ısınmayı 1,5°C'de tutma hedefi vardır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 21. Taraflar Konferansı COP21 Paris'te gerçekleşirken ilk defa küresel çapta bütün ülkeler sera gazı emisyonunu azaltma taahhüdünde bulunmuşlardır. Bu hedefe ulaşmak için fosil yakıt kullanımının azaltılması ve yenilenebilir enerji kullanımının artırılması gerekmektedir (DB, 2023).

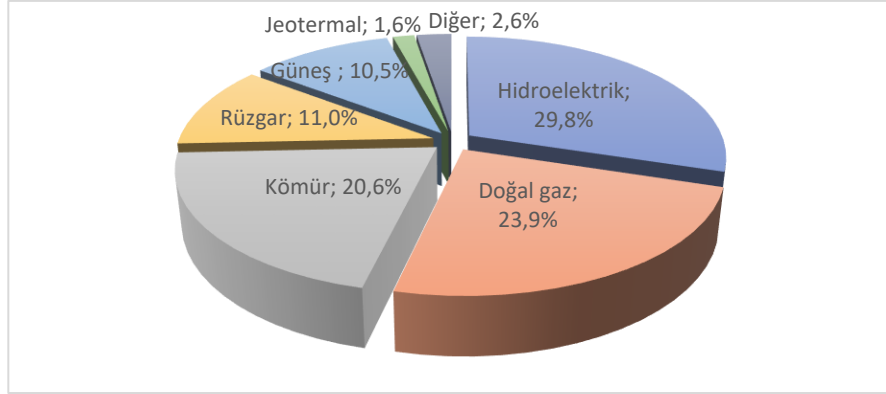


Şekil 2.12. Farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretiminin küresel çapta sahip olduğu paylar

Şekil 2.12.'de küresel çapta elektrik enerjisi üretiminde kullanılan farklı enerji kaynaklarının yıllara göre dağılımı verilmiştir. Buna göre dünyada elektrik enerjisi üretiminde en çok kullanılan kaynak 2018 yılına kadar kömür iken 2018'den itibaren yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen temiz enerji olmuştur. 2018-2021 arası dönemde elektrik enerjisi üretiminde temiz enerjinin payı %40'lara yaklaşmıştır.

2.3. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji

Ülkemizde yenilenebilir enerji yatırımları özellikle son yıllarda kayda değer miktarda artmıştır. Şekil 2.13.'te 2023 yılı Ekim ayı sonu itibariyle Türkiye'de kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Türkiye’de kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı

Yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar, güneş, biyokütle, jeotermal, hidroelektrik ve hidrojenidir. Türkiye’nin kurulu gücü 2023 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla 105.964 MW’a ulaşmış olup bunun %29,8’i hidroelektrik enerji, %23,9’u doğal gaz, %20,6’sı kömür, %11’i rüzgar, %10,5’i güneş, %1,6’sı jeotermal, %2,6’sı diğer kaynaklardır. Bu bilgiler ışığında kurulu gücün %52,9’unun yenilenebilir kaynaklardan oluştuğu görülmektedir.

3. HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİ

Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu, temiz enerji kaynaklarıdır fakat bazı dezavantajları vardır. Bunlardan en önemlisi kesintili enerji üretimidir. Rüzgar, güneş hidroelektrik santraller mevsim koşullarına göre çalışan santraller olduğundan sürekli olarak enerji üretimi gerçekleştiremezler. Bu yüzden yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanılabilmesi için yeni tasarımlara ihtiyaç duyulmuştur. Bunun yanı sıra tam kapasiteden daha az üretim gerçekleştirmeleri, belirli zamanlarda enerji sağlamaları nedeniyle tek kaynaktan elde edilecek enerji miktarının artması için yenilenebilir teknolojileri bir araya getiren hibrit santraller tasarlanmıştır.

Tek bir üretim tesisinde birden fazla kaynaktan elektrik enerjisi üretilmesine imkan sağlayan hibrit santraller, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha efektif kullanılmasını sağlamaktadırlar. Birleşik yenilenebilir elektrik üretim tesisleri yani hibrit santraller ile farklı enerji türleri bir arada kullanılarak aynı tesiste birden fazla kaynak ile üretim kayıpları tolere edilip daha yüksek oranda üretim sağlanmaktadır. Üretim tesislerinin daha verimli kullanılmasına, elektrik üretim kapasiteleri içerisinde daha fazla elektrik üretilmesine imkân vermektedir. Hibrit santraller ile LCOE (Levelized Cost Of Electricity) yani seviyelendirilmiş elektrik maliyeti azaltılır. Aynı zamanda santraldeki boş alanlar değerlendirilerek üretimin kesintisiz devam etmesi sağlanır. Santral için kullanılan enerji nakil hattından (ENH) ve kurulu trafo gücünden azami ölçüde faydalanılırken stabil bir voltaj-frekans kontrolü sağlanır.

Hibrit sistemler şebekeden bağımsız veya şebekeye bağlı olarak tasarlanabilmektedir. Dünyada hibrit santraller genellikle iki kaynaklıdır. Türkiye'deki hibrit santrallerde de genel itibarıyla ana kaynağa kurulan yardımcı kaynak güneş enerjisidir. Hibrit enerji sistemleri uygulamada genel olarak konvansiyonel kaynak tabanlı ve yenilenebilir enerji kaynak tabanlı olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

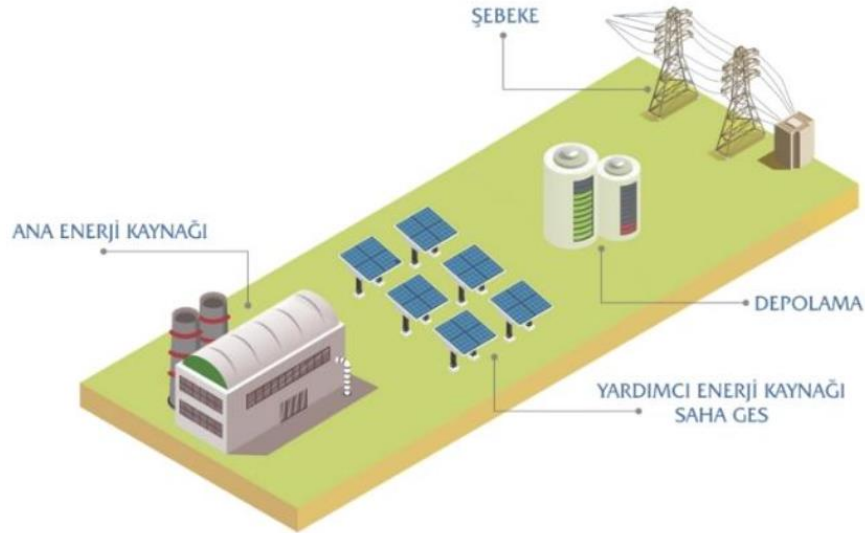
3.1. Konvansiyonel Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemler

Konvansiyonel kaynak tabanlı hibrit sistemlerde ana kaynak termik santraldir. Termik santraller genellikle kömür yakıtlı veya doğal gaz yakıtlıdır. Enerji üretimini artırmak amacıyla yardımcı kaynak kurulup hibrit sisteme çevrilerek toplam üretim artırılır.

3.1.1. Termik-güneş hibrit sistemler

Termik santral, buhar gücüyle çalışan güç santralidir. Kullanılan yakıt türüne göre santral tipi de değişmektedir. Uygulamada genellikle kömür ve doğal gaz yakılarak ısıtılan su, buhara dönüştürülüp türbinin dönmesi sağlanarak enerji üretimi gerçekleşir. Rankine çevrimi ile buhar, yoğunlaştırucuda yoğunlaşarak tekrar suya dönerek çevrim tamamlanır.

Termik santrallere yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali kurularak tesis birden çok kaynaklı elektrik üretim tesisine yani hibrit santrale dönüştürülür. Şekil 3.1.'de hibrit TES-GES şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hibrit TES-GES

Hibrit termik-güneş santral ile termik santralin arıza, bakım gibi durumlardaki üretim kaybı güneş enerjisi ile karşılanarak toplam üretim artırılır. Bununla birlikte santral sahasındaki boş alanlar değerlendirilerek işletme giderleri karşılanır. Termik santralden kaynaklanan sera gazı emisyonu yenilenebilir yardımcı kaynak olan güneş enerjisi ile azaltılabilir. Aynı zamanda santral sahasına depolama sistemi kurularak üretim fazlası, şebekeye verilemediği zamanlarda depolanarak pik saatlerde kullanılabilir.

3.2. Yenilenebilir Enerji Kaynak Tabanlı Hibrit Sistemler

Yenilenebilir enerji kaynak tabanlı hibrit sistemler, ana kaynağın yenilenebilir olduğu santrallerdir. Yenilenebilir santraller rüzgar, güneş, jeotermal ve hidroelektriktir. Bu tip santrallerde üretimde mevsimsel koşullara göre oluşan dalgalanmalar minimum düzeye indirgenir. İki kaynak da yenilenebilir olduğu için tamamen çevre dostudur.

3.2.1. Rüzgar-güneş hibrit sistemler

Rüzgar-Güneş hibrit santraller ana kaynağı rüzgar olan santrale yardımcı kaynak olarak güneş enerjisinin kurulduğu santrallerdir. Rüzgar enerji santrallerinde rüzgar, mevsime göre üretimde değişiklik gösteren kaynaktır. Yardımcı kaynak olarak güneş enerjisi kurulduğunda rüzgar yetersiz olduğunda güneşten, güneş yeterli olmadığı zamanlarda rüzgardan yapılan üretimle açık kapatılarak üretimdeki dalgalanmalar daha stabil hale gelmektedir.

Rüzgar enerji santrallerine yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali kurularak tesis birden çok kaynaklı elektrik üretim tesisine yani hibrit santrale dönüştürülür. Şematik hibrit RES-GES Şekil 3.2.'de verilmiştir.



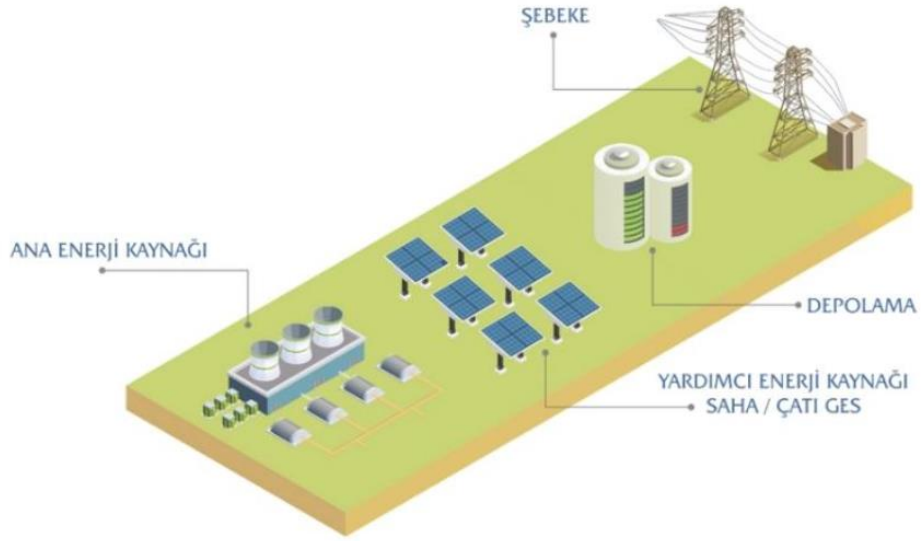
Şekil 3.2. Hibrit RES-GES

Hibrit rüzgar-güneş santrali ile rüzgar enerji santralinin mevsime bağlı üretim kaybı güneş enerjisi ile karşılanarak toplam üretim artırılır. Bununla birlikte santral sahasındaki boş alanlar değerlendirilerek işletme giderleri karşılanır. İki kaynak da yenilenebilir olduğundan sera gazı emisyonu yoktur, karbon nötrdür. Türkiye’de hibrit santraller genellikle rüzgar-güneş kombinasyonuna yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte santral sahasına depolama sistemi kurularak üretim fazlası, şebekeye verilemediği zamanlarda depolanarak pik saatlerde kullanılabilir. Türkiye’de hali hazırda rüzgar-güneş-depolama üçlü hibrit santral bulunmamaktadır.

3.2.2. Biyokütle/biyogaz-güneş hibrit sistemler

Biyokütle enerji santrallerinin, gerekli hammadde bulunamadığı veya az bulunduğu zamanlarda, bakım ve arıza gibi durumların olduğu zamanlarda üretimi azalmaktadır. Bu santrallere yardımcı kaynak olarak kurulacak güneş enerji santraliyle üretimdeki bu açık kapatılmaktadır.

Şekil 3.3.’te gösterildiği gibi biyokütle enerji santrallerine yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali kurularak tesis birden çok kaynaklı elektrik üretim tesisine yani hibrit santrale dönüştürülür.



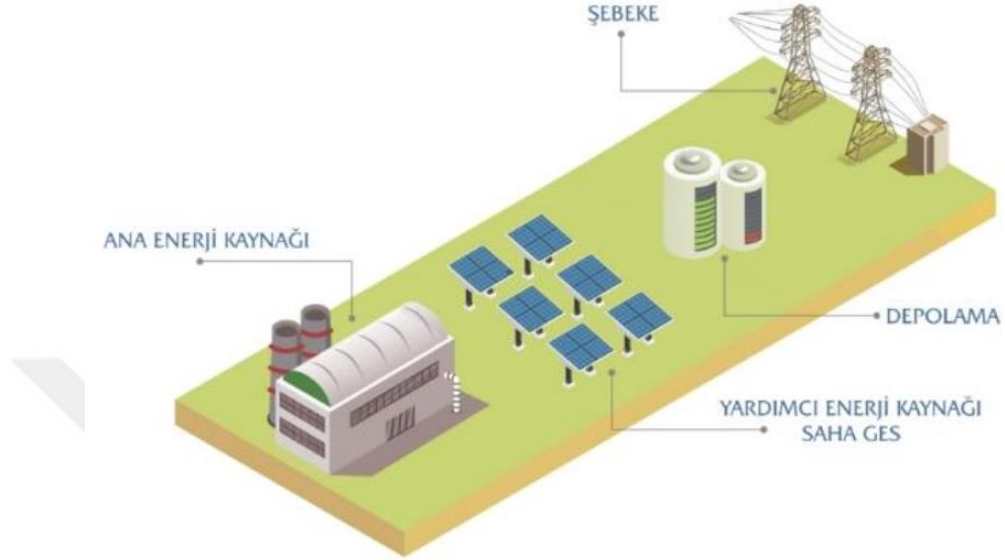
Şekil 3.3. Hibrit BES-GES

Hibrit biyokütle/biyogaz-güneş santral ile biyokütle/biyogaz santralinin gerekli hammadde bulunmadığı veya az bulunduğu zamanlar ile bakım ve arıza gibi durumların olduğu zamanlarda yaşanan üretim kaybı, ilave kurulacak güneş enerji santrali ile karşılanarak toplam üretim artırılır. Ayrıca santral sahasındaki boş alanlara veya idari bina gibi yapılara kurulacak çatı güneş enerji santrali ile işletme giderleri karşılanır. Aynı zamanda santral sahasına depolama sistemi kurularak üretim fazlası, şebekeye verilemediği zamanlarda depolanarak pik saatlerde kullanılabilir.

3.2.3. Jeotermal-güneş hibrit sistemler

Jeotermal enerji santralleri yer altı kaynağının bulunduğu alan itibariyle genellikle Ege bölgesinde yoğunlaşmıştır. Bu bölgede GEPA'ya göre güneş yoğunluğu da oldukça fazladır. Bu potansiyelin aynı santral sahasında değerlendirilmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Jeotermal santralde bakım, arıza gibi durumlarda üretimdeki kayıp da bu yolla telafi edilecektir.

Jeotermal enerji santrallerine yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali kurularak Şekil 3.4.'te gösterildiği gibi tesis birden çok kaynaklı elektrik üretim tesisine yani hibrit santrale dönüştürülür.



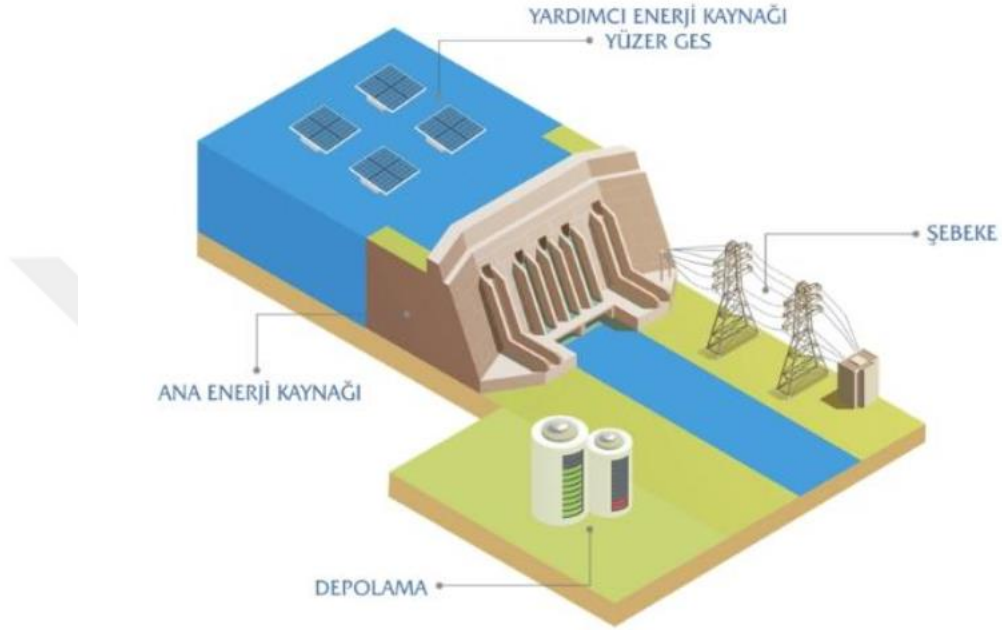
Şekil 3.4. Hibrit JES-GES

Kurulan yardımcı kaynak güneş enerji santrali ile santral işletmedeyken kuyu başı, vakum, re-enjeksiyon ve soğutma suyu pompaları ve soğutma kulesi fanları gibi enerji ihtiyacı oluşturacak ekipmanlarla santral iç ihtiyacının karşılanması sağlanır.

3.2.4. Hidroelektrik-güneş hibrit sistemler

Hidroelektrik santraller mevsim koşullarına bağlı üretim gerçekleştirmektedir. Yaz mevsiminde üretim azalmaktadır. Buradaki enerji açığının, yardımcı kaynak olarak kurulacak güneş enerji santrali ile kapatılması sağlanır. Kurulacak güneş enerji santrali optimum fayda-maliyet analiziyle karada veya yüzer olarak kurulabilmektedir. Yüzer olmasının bazı avantajları vardır. Yaz aylarında buharlaşma miktarı fazla olduğundan kurulacak güneş enerjisinin yüzer olması hem buharlaşma miktarını azaltacak hem de mevsime bağlı üretimdeki azalmayı tolere edecektir. Aynı zamanda panellerin ısınması da azalacağı için verim daha fazla olacaktır.

Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi hidroelektrik enerji santrallerine yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali kurularak tesis birden çok kaynaklı elektrik üretim tesisine yani hibrit santrale dönüştürülür.



Şekil 3.5. Hibrit HES-GES

Türkiye'nin ilk hibrit enerji santrali Bingöl'de bulunan Aşağı Kaleköy Barajı ve HES'tir (Şekil 3.6.). Hidroelektrik 500 MW kurulu güce sahiptir. Yardımcı kaynak olarak kurulan güneş enerji santrali ise 80 MW kapasiteye sahiptir. Aynı zamanda Avrupa'nın en büyük hibrit enerji santralidir (ETKB, 2023).



Şekil 3.6. Aşağı Kaleköy Barajı ve HES

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tina vd. (2017) Danimarka'nın Aalborg ve İtalya'nın Agrigento kentinde kurulmuş olan güneş enerji tesislerinin karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Farklı iklim koşullarında PV sistem performansını güç üretimlerini ve verimi incelemişlerdir. Ayrıca bu verilerin tahmini için bir model önermişlerdir.

Wu vd. (2016) Çin'deki 42 adet büyük ölçekli rüzgar enerji santralinin verimliliğini analiz etmişlerdir. Rüzgar enerji santrallerinin verimliliğini etkileyen en büyük faktörlerin kurulu güç ve rüzgar enerjisi yoğunluğu olduğunu belirtmişlerdir. Uyguladıkları yöntemlerle inceledikleri tüm rüzgar enerji santrallerinin kabul edilebilir düzeyde çalıştığını ortaya koymuşlardır.

Suresh vd. (2020) Hindistan'ın Karnataka eyaletinde bir bölgenin enerji ihtiyacını karşılamak için şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemi kurmayı planlamışlardır. Bu sistemin modellemesi ve optimizasyonu için Genetik Algoritma ve HOMER Pro yazılımı kullanarak farklı senaryolar üzerine çalışmışlardır. Bu farklı senaryoları yatırım ve işletme maliyeti için karşılaştırmışlardır. Genetik Algoritma tabanlı optimizasyon ve HOMER kullanan 4 farklı yenilenebilir hibrit enerji sistemi kıyaslanarak Genetik Algoritmanın HOMER'den daha uygun olduğunu ve daha az karbon emisyonuna sahip olduğunu görmüşlerdir.

Ghenai vd. (2020) bir piroliz reaktörünün enerji talebinin karşılanması amacıyla şebekeden bağımsız bir rüzgar/güneş hibrit sistemin tasarımı yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada katı atıkların yenilenebilir ve alternatif yakıtlara termal dönüşümü için sürdürülebilir ve temiz bir enerji sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Deneysel sonuçlarla, önerilen hibrit güç sisteminin reaktörün tüm enerji talebini karşıladığını ve plastik yağın kalitesinin dizel yakıtla karşılaştırılabilir olduğunu göstermişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre şebekeden bağımsız hibrit güç sisteminin en iyi güç sistemi seçeneği olduğunu ancak elektrik maliyetinin ve elektrik üretiminin iç ihtiyacından da yüksek olduğunu görmüşlerdir. Fazla gücün şebekeye geri satıldığı şebekeye bağlı güneş fotovoltaik/rüzgar türbini hibrit

sistemin, en düşük elektrik maliyetine (70 \$/MWh), ve düşük CO₂ emisyonlarına (44,1 kg CO₂/yıl) sahip olduğunu çalışmalarında hesaplamışlardır.

Yakub vd. (2022) Nijerya'da sürdürülebilir bir enerji geçişini hızlandırmak için hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin performansını optimize etmişlerdir. Kırsal sağlık tesisleri, işletme kapasitelerini zorlayan Covid-19 hastalarının akını nedeniyle ciddi enerji kesintileri yaşamışlardır. Nijerya'nın kuzeyindeki kırsal bir sağlık merkezinde bulunan alternatif enerji kaynaklarını birleştiren bir hibrit enerji sistemi (HES) geliştirmeyi ve bu tür sistemlerin sürdürülebilirliğinin tekno-ekonomik bir analizini yapmışlardır. PV – Dizel ve Rüzgar – Dizel sistem HES konfigürasyonlarını kıyaslayarak PV – Dizel HES'in en makul seçenek olduğunu belirlemişlerdir. Hedef lokasyondaki mevcut enerji kaynaklarının enerji potansiyeli ve çeşitli HES konfigürasyonlarının karşılaştırılması, en uygun seçeneklerin belirlenmesi için HOMER Pro yazılımı ile tahminde bulunmuşlardır. Bu seçimleri, RETScreen Expert kullanarak teknik, finansal ve çevresel uygulanabilirlik açıdan analiz etmişlerdir.

Allouhi vd. (2022) yaptıkları çalışmada, temiz hidrojenin üretimiyle binaların elektrik talebinin karşılanması için mikro şebeke gücü tabanlı hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi (HRES) önermişler ve optimize etmişlerdir. Tasarlanan binaların yıl boyunca elektrik tüketimini tahmin etmek için meteorolojik verilere göre saatlik bina simülasyonu uygulamışlardır. Önerilen hibrit sistem; güç üretimi için elektrolizör, hidrojen depolama tankı, şarj ünitesi ve rüzgar türbiniyle (WT) kombinlenmiş güneş çanağı (SDS) teknolojisi içermektedir. Geleneksel hibrit sistemin yerine düşünülen çalışmanın yeniliği, PV/WT fotovoltaiik bileşimi gibi yüksek verimlilik ve ekonomik rekabet gücüne ulaşma potansiyeline sahip bir SDS/WT sistemiyle değiştirilmesidir. En düşük mevcut net maliyet (NPC) temelli optimum HRES dizaynını kanıtlamak için bir optimizasyon süreci araştırmışlardır. Ayrıca, Fas'ta seçilen iki yerde (Quarzazate ve Dakhla) modelin performansını değerlendirerek entegre sistemin kapsamlı tekno-ekonomik çalışmalarını incelemişlerdir. Sonuç olarak incelenen bölgelerin rüzgar ve güneş enerji potansiyelindeki tutarsızlıkları nedeniyle HRES dizaynı ve konfigürasyonunun bölgeye bağımlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Hassan vd. (2023) rüzgar ve güneş enerjisini kullanan hibrit yenilenebilir enerji sistemini incelemişlerdir. Güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinin bireysel avantajlarını çalışmalarında göstererek bunların aralıklı olması ve coğrafi koşullardan dolayı birbirine entegre edilip hibrit olarak kullanılması durumunu irdelemişlerdir. Hibrit sistemlerin elektrik kesintisi sorunlarını kayda değer ölçüde azalttığını, şebeke istikrarını artırdığını ve aynı alt yapıyı kullandıkları için uygun maliyetli olduklarını göstermişlerdir. Çalışmada sistem optimizasyonu, depolama ve makine öğrenim algoritmaları gibi teknolojik yenilikleri tartışmışlardır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri için hükümetlerin teşvik vermesi ve kamu-özel işbirliği ile bu sistemlerin kullanımının hızlanacağından bahsetmişlerdir.

Amusan vd. (2023) 2003-2020 arası günlük verilerle Güney Afrika'da iki lokasyonda (Johannesburg Üniversitesi, APK kampüsü - L1 ve Zuikerbosch pompa istasyonu - L2) su pompalamak için güneş, rüzgar ve biyokütlenin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Bu üç yenilenebilir enerji kaynağının detaylı fizibilitesini yapmışlardır. L1 hidrofor istasyonundaki enerji ihtiyacı 91 kW iken burada 350 W'lık 882 güneş paneli kullanılmıştır. L2 hidrofor istasyonundaki enerji ihtiyacı 71,331 kW iken burada ise 350 W'lık 692 güneş paneli kullanılmıştır. Güneş panellerinden üretilen gücü ise 0,103 kW olarak bulmuşlardır. L1 için 3729 ton çürütülebilir atık üzerinden 1641 tonluk ortalama atık gıda miktarına göre 47,68 GW biyokütle gücü tahmin edilirken, L2 için 2838,1 ton çürütülebilir atık üzerinden 1248,8 tonluk ortalama atık gıda miktarına göre 99,42 GW biyokütle gücü tahmin edilmiştir. İki lokasyonda 11 farklı boyutta rüzgar türbini kullanarak iki lokasyonda da zayıf rüzgar potansiyeli olduğunu bulmuşlardır. Güneş enerjisi kullanıldığında L1'de suyun birim maliyetinin 17,09 \$/kWh'den 0,33 \$/kWh'ye düştüğünü, L2'de ise 21,20 \$/kWh'den 0,66 \$/kWh'ye düştüğünü göstermişlerdir. Bu çalışmayla düşük maliyetli ve karbon sıfır yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak küresel iklim değişikliğinin azaltılabileceği sonucunu çıkarmışlardır.

Güneş-rüzgar hibrit yenilenebilir enerji sisteminin dizaynı ve analizini konu eden çalışmayı Eltayeb vd. (2023) yapmışlardır. Hindistan'ın Andhra Pradesh eyaletindeki Vaddeswaram kasabasında 2 kW güneş ve 1 kW rüzgar enerjisinden oluşan hibrit bir sistemi tasarlayıp analiz etmişlerdir. Güneş panellerinin farklı sıcaklık ve ışınmada güç-gerilim ve akım-gerilim grafiklerini elde etmişlerdir. Hibrit sistem için güneş panellerinin eğim açısını 10° ile 20° aralığındaki farklı açılar için denemişler en uygun eğim açısının 18,25° olduğunu

bulmuşlardır. Rüzgar-güneş hibrit sistemin yılda 3763 kWh enerji üretebileceğini, önerdikleri şekilde ise eğim açısının $18,25^\circ$ olduğu güneş panellerinin bulunduğu iki eksenli takip sistemiyle yılda 4709 kWh enerji üretebileceğini göstermişlerdir.

Wu ve West (2024) rüzgar ve güneş için ayrı ve rüzgar-güneş hibrit sistem için saha seçimi amacıyla istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında verimi yüksek yenilenebilir enerji sahalarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bunun için 30 yıllık verileri saatlik olarak Avustralya hava durumu özelinde incelemişlerdir. Ayrıca optimum offshore rüzgar sahalarını ve offshore rüzgar-güneş hibrit için potansiyel en iyi sahaları belirlemek üzerine çalışmışlardır. Analiz edilen sahaların mevcut olan sahalarla kıyasla güneş için 67 saha üzerinde ortalama %9, rüzgar için 50 saha üzerinde ortalama %28 daha fazla enerji üreteceğini göstermişlerdir. Rüzgar-güneş hibrit için ise mevcut olan üç saha önerilen en iyi üç sahayla kıyaslanarak önerilen sahaların %3-16 daha fazla enerji üretebileceğini ifade etmişlerdir.

Avustralya'daki beş büyük şehir olan Perth, Adelaide, Melbourne, Sidney ve Brisbane'in enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla Rahimi vd. (2023) optimum hibrit yenilenebilir enerji sistemi modeli önermeyi amaçlamışlardır. Bunun için Avustralya'nın farklı iklim bölgelerinde hastane, okul, ofis, perakende satış, alışveriş merkezi, otel, klinik, apartman, süpermarket, depo olmak üzere on tür binayı analiz etmişlerdir. İnceledikleri vaka çalışmaları için farklı optimal senaryoların uygulanabilirliğini ortaya çıkararak nüfus ve iklim özellikleri bakımından benzer şehirlerde bu hibrit sistemlerin minimum maliyetle tasarlanması amacıyla çalışmanın bir kılavuz olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Komrit ve Zabihian (2023) Tayland'da yenilenebilir enerji kaynaklarının ayrı ayrı incelendiğini fakat literatürde hibrit rüzgar-güneş sistemin detaylı incelenmediğini belirterek bununla alakalı güneş fotovoltaik sistemleri, rüzgar türbini sistemlerini ve güneş-rüzgar hibrit sistemleri modellemek amacıyla SAM, PVSyst, HOMER ve RETScreen olmak üzere dört yenilenebilir enerji modelleme aracı kullanmışlardır. Tahmini yıllık elektrik üretimi ile gerçek sistemlerden elde edilen gerçek zamanlı enerji üretimini kıyaslamışlardır. Modelleme sonuçlarına göre SAM %3,6 PVSyst %6,9 HOMER %5,5 ve RETScreen %-3,9'luk hatalar içerdiğini göstermişlerdir.

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında Çaypınar RES/GES Hibrit Enerji Santrali örnek uygulama olarak incelenmiş olup nicel veri analiz yöntemi kullanılmıştır. Rüzgar enerji santralinde teorik olarak üretilebilecek enerji, rüzgar enerjisi güç hesabı formülüyle; güneş enerji santralinin teorik olarak üretebileceği enerji ise PVsyst programı ile hesaplanmıştır. Santral sahasının 2023 yılı için üretim verileri saatlik olarak alınmış; günlük, haftalık, aylık ve yıllık olarak ürettiği enerji miktarı bulunmuştur. Teorik olarak üretebileceği enerji miktarı, gerçek zamanlı üretim verileriyle kıyaslanmıştır.

5.1. Rüzgar Santrallerinde Kurulum Öncesi Yapılan İşlemler

Rüzgar santralinin kurulum öncesinde teknik, ekonomik ve çevresel olarak incelenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte öncelikle en az bir yıllık rüzgar değerlerinin analiz edilmesi daha sonra türbin seçimi ve sonrasında yıllık üretimin hesaplanması başlıca yapılması gereken işlemlerdir. Rüzgar verileri için yararlanılan kaynak REPA'dır. Ancak bölgenin potansiyeli için küçük farklar oluşmaktadır. Bu yüzden daha tutarlı veri elde edilmesi amacıyla bölgeye rüzgar ölçüm istasyonları kurulmaktadır (Şekerci vd., 2009).

Rüzgar ölçümleri yapıldıktan sonra fizibilite raporu hazırlanması gerekmektedir. Yatırım maliyeti ve amortisman süresi bakımından en uygun seçenek tercih edilmelidir. Trafo merkezine yakınlık yatırım maliyetini etkileyen önemli bir faktör olduğundan özellikle bu husus göz önünde bulundurulmalıdır. Fizibilitede ilk aşama etüd proje hazırlanmasıdır. Daha sonra inşaat harcamaları kısmı hesaplanmaktadır. İnşaat harcamaları kısmında türbinlere ulaşım yollarının açılması, türbin temeli için kazı çalışmaları ile çelik taban, kule, nacelle ve kanatların montajı bulunmaktadır. Fizibilitede ayrıca makine teçhizat, işçilik bedelleri, işletmeye alma ve genel giderler yer almaktadır.

Rüzgar enerji santrali kurulması için yasal prosedürler ise şunlardır:

- Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED)
- Teknik Etkileşim Analizi (TEA)
- İmar Planı
- Lisans / Çağrı Mektubu Alınması
- Mülkiyet Edinimi
- Kamulaştırma
- Kurum Görüşleri
- Jeolojik Etüt Raporu

5.1.2. Rüzgar verilerinin analizi

Rüzgar enerji santrali kurulması planlanan bölgenin en az 1 yıl boyunca rüzgar ölçümü yapıp verilerin toplanması gerekmektedir. Santral kurulmadan önce bölgenin elektrik üretim potansiyeli ve saha için en uygun türbinlerin seçilmesi çok önemlidir.

5.1.3. Rüzgar ölçümü

Ölçüm cihazları, ölçüm direkleri ve paratoner, ölçüm istasyonlarını oluşturan elemanlardır. Santral sahasının belirli yerlerinde bir ya da birden çok sayıda ölçüm istasyonu için nokta belirlenmektedir. Ölçüm direkleri hakim rüzgar yönüne dik olarak konumlandırılmaktadır.

Rüzgar hızı anemometre ile ölçülmektedir. Anemometrelerin üç çeşidi vardır:

1) Kepçe Anemometre: Kepçe rotorunun bir tam turundaki geçen süre üzerinden rüzgar hızı ölçümü yapılmaktadır (Şekil 5.1.). Ölçümlerde en yaygın kullanılan bu tip anemometre düşük hassasiyetlidir.



Şekil 5.1. Kepçe anemometre

2) Ultrasonik Anemometre: Bir uçtan yayılan ses dalgasının diğer uçlar tarafından alınması esnasında geçen sürenin ölçülmesi mantığıyla çalışmaktadır (Şekil 5.2.). Hassas değillerdir.



Şekil 5.2. Ultrasonik anemometre

3) Propeller Anemometre: Pervaneli tip anemometredir (Şekil 5.3.). Yatay ve dikey olarak rüzgar hızını ölçebilir.



Şekil 5.3. Propeller anemometre

Rüzgar Yön Sensörü: Hakim rüzgar yönünü bulmaya yarar (Şekil 5.4.). Meteorolojik bir sensördür. Gövde ve kanattan oluşmaktadır. (Durak ve Özer, 2008)



Şekil 5.4. Rüzgar yön sensörü

5.1.4. Rüzgar sınıfının belirlenmesi

Santral kurulumu için rüzgar sınıfının belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgar sınıfının belirlenmesinden sonra rüzgar türbinlerinin seçimi yapılmaktadır. Burada türbin konumlandırması yapılırken çevresel etkilerden ve her türbinin birbirinden minimum etkilenmesi baz alınarak çalışmaların yapılması gerekmektedir (Keçecioğlu vd., 2016). Her türbinin konumlandırılacağı yer mini ölçekte farklılıklar göstermektedir.

5.1.5. Rüzgar türbini seçimi

Bölgenin rüzgar potansiyeli ve rüzgar sınıfı belirlendikten sonra rüzgar hızı ve yönü rüzgar türbininin tipini, boyutunu ve konumunu belirlemek için önemlidir. Rüzgar türbininin kurulacağı arazinin fiziksel özellikleri, arazi eğimi, engelleri, toprak yapısı, iklim koşulları rüzgar türbininin tasarımı ve montajı için önemlidir. IEC rüzgar türbin sınıflandırması Çizelge 5.1.'de gösterildiği gibi rüzgar hızına göre Sınıf I, Sınıf II, Sınıf III, Sınıf IV ve Sınıf S olarak yapılmaktadır. Türkiye'de genellikle Sınıf III rüzgar türbinleri kurulmaktadır (Şekerci vd., 2009).

Çizelge 5.1. Türbin sınıfları

Türbin Sınıfları	Sınıf I	Sınıf II	Sınıf III	Sınıf IV	Sınıf S
Ortalama hız (m/s)	10	8,5	7,5	6	Özel
Dayanılabilir azami rüzgâr hızı (10 dakika ortalaması) (m/s)	50	42,5	37,5	30	Özel
Dayanılabilir azami rüzgâr hızı (3 saniye ortalaması) (m/s)	69,5	59,5	52,5	42	Özel

5.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Rüzgar türbinleri, dönüş eksenlerine, güçlerine, kanat sayılarına ve kurulum konumlarına göre çeşitli tiplerde olabilir. Elektrik üretimi rüzgar hızının durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Santral sahasının yüksek bir yerde olması, çevrede rüzgarın hızını kesecek engellerin olmaması gerekir. Yükseklerde bulunan rüzgar türbinleri yüksek hızlarda enerji üretir durumda olmaktadır. Bu da daha stabil frekans aralığı oluşturacak olup dalgalanmaları en aza indirmektedir.

5.2.1. Yapısı ve tipleri

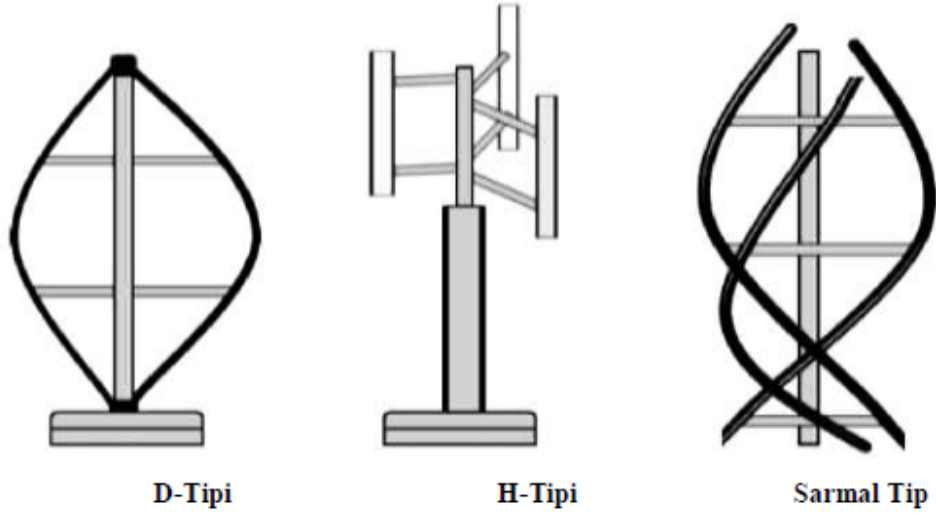
Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre sınıflandırılır. İki farklı tipi vardır. Bunlar yatay eksenli rüzgar türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) ve dikey eksenli rüzgar türbinleridir (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT).

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde (HAWT) dönme eksenini rüzgara paralel, kanatlar ise rüzgara diktir. Kanat sayısı azaldıkça rotorun dönme hızı artmaktadır. Verim ise yaklaşık %45 civarındadır. En fazla kullanılan bu tip türbindir. Kanat sayısı olarak iki, üç, dört kanatlı olanlar vardır fakat pratikte üç kanatlı olanlar kullanılmaktadır. Optimum elektrik üretimi minimum maliyet ve maksimum güven için üç kanatlı tasarım önerilmektedir. Şekil 5.5.'te yatay eksenli bir rüzgar türbini verilmiştir.



Şekil 5.5. Yatay eksenli rüzgar türbini

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde (VAWT) kanatlar pervane şeklinde olmayıp mil şeklindedir. Ticari olarak kullanılmamaktadır. Doğrudan yerleştirilebildikleri için kule maliyeti yoktur. Verimleri ise düşüktür. Şekil 5.6.'da gösterildiği gibi D-Tipi (Darrieus), H-Tipi (Helisel Darrieus), Sarmal Tip (Savonius) olmak üzere üç tipi vardır. (Nurbay ve Çınar, 2005)



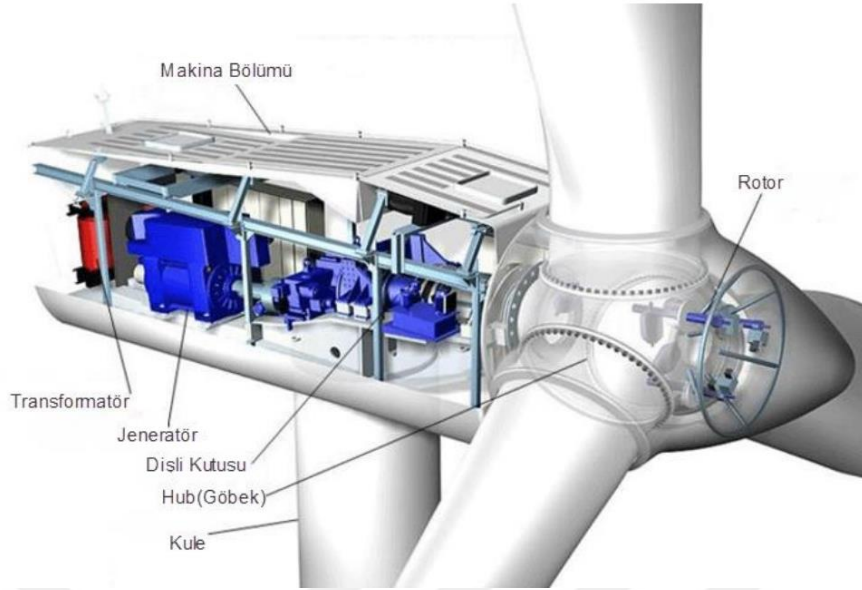
Şekil 5.6. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri her rüzgar hızında üretim yapamamaktadır. Elektrik üretiminin başlaması için ortalama en az 3 m/s rüzgar hızı gerekmektedir. Optimum rüzgar hızı ortalama 10 m/s iken üst limit hız ise ortalama 35 m/s'dir. Bu hızdan daha yüksek hızlarda türbin güvenlik için kendini kapatmakta ve üretim yapmamaktadır.

Ülkemizde 50 m yükseklik ve hızın 7,5 m/s olduğu bir bölgede km^2 'ye 5 MW gücünde rüzgar santrali kurulabileceği kabul edilmektedir. (ETKB, 2023)

5.2.2. Türbin bileşenleri

Bir rüzgar türbini temel olarak kanat, rotor, dişli kutusu, jeneratör, fren, transformatör ve kuleden oluşmaktadır. Rüzgar türbinini oluşturan bileşenler Şekil 5.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Rüzgar türbinini oluşturan bileşenler

Bu bileşenlerden rotorun görevi rüzgardan gelen kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirmektir. Dişli kutusunda ise rotorun hızı artırılmaktadır. Rüzgar hızının düşük olduğu zamanlar kanatlar da düşük hızda dönmektedir. Dişli kutusu bu yavaş dönüşlü milin dönüş hızını artırmaktadır. Mekanik enerji jeneratörde elektrik enerjisine çevrilir. Fren, türbini gerekli durumlarda yavaşlatma ve durdurma görevine sahiptir. Kule ise türbini taşıyan parçadır. Genellikle çelik veya betondan yapılır. Kule yüksekliği arttıkça rüzgar hızı da artmaktadır fakat bu durum maliyeti de artırmaktadır. Bu yüzden optimum fayda maliyet çalışmasıyla en uygun yükseklik belirlenmelidir. Transformatorde ise jeneratördeki gerilim şebeke gerilimine çevrilmektedir.

5.2.3. Temel yasa ve kavramlar

Rüzgar türbinlerinde ilk kuram Albert Betz'e aittir ve kendisi buna Betz teoremi ismini vermiştir. v hızı ile hareket etmekte olan m kütleye sahip havanın kinetik enerjisi;

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.1)$$

formülü ile bulunur. Kinetik enerjinin zamana bağlı türevi ise gücü vermektedir.

$$P_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) \quad (5.2)$$

$$P_r = \left(\frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{dt} \right) \quad (5.3)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho A v \quad (5.4)$$

Kütlesel debi ifadesi Denklem (5.4)'te verilmiştir. Burada ρ havanın yoğunluğu ve A ise kesit alanı olarak ifade edilir. Rüzgarın gücü Denklem (5.4)'ün Denklem (5.3)'te yerine yazılmasıyla

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5.5)$$

olarak yazılır. Birimi ise Watt'tır. Rüzgar enerjisinin tamamı güce çevrilmez. Çevrilen kısmı türbin gücü olarak ifade edilirse;

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A (v_g - v_\varphi) \quad (5.6)$$

olarak bulunur. v_g türbine giren rüzgar hızı, v_φ ise türbinden çıkan rüzgar hızıdır. Türbin içindeki rüzgar hızı V ise türbine giren ve türbinden çıkan rüzgar hızlarının aritmetik ortalamasıdır.

$$V = \frac{(v_g + v_\varphi)}{2} \quad (5.7)$$

C_p güç faktörü olarak tanımlanır. Şafttan gelen gücün türbine gelen rüzgar gücüne oranıdır. Maksimum değeri yani rüzgardan elde edilebilecek teorik maksimum verimlilik değeri %59,26'dır ki bu da Betz limiti olarak tanımlanır (0,5926). Günümüzdeki teknolojisi ile tasarlanmış bir rüzgar türbini için C_p ortalama 0,40 civarındadır.

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} \quad (5.8)$$

Rüzgar gücü hızın küpü ile orantılı olacak şekilde artarken rüzgar hızı yükseklikle artmaktadır. Türbinler ortalama 50 m yüksekliğe inşa edilirler. 10-30 m aralığındaki yüksekliklerde rüzgar hızlarının yerleştirilecek yükseklikteki tahmini Hellman Yükseltme Bağıntısı ile hesaplanır.

$$\frac{v_{rist}}{v_{rölç}} = \left(\frac{H_{ist}}{H_{ölç}} \right)^{\alpha} \quad (5.9)$$

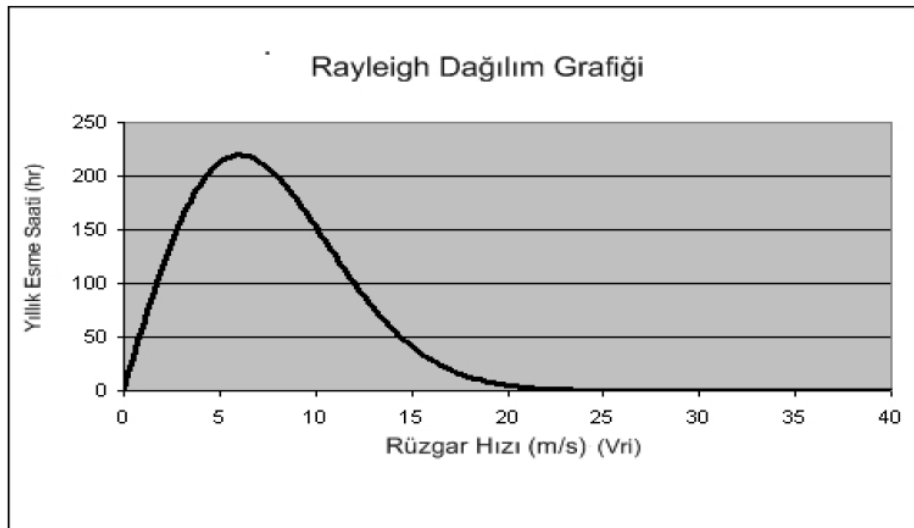
Denklem (5.9)'da yer alan α yüzey pürüzlülük katsayısıdır. Ortama göre değişiklik göstermektedir. Örneğin deniz kıyı şeridinde ve ağaçlı alanda bu değerler birbirinden farklı olacaktır.

Rüzgarın bir bölgede belirli bir zaman aralığında dağılımı enerji üretiminin tahmini ve kıyaslanması için gereklidir. Türbin araştırma-geliştirme çalışmalarında bu bilgi kıymetlidir. Bir bölgede ortalama rüzgar hızı biliniyorsa Rayleigh Dağılım Fonksiyonu ile herhangi bir zamandaki rüzgarın hızı v_{ri} ve esme saati h_r hesaplanabilir (Şekil 5.8.). Sonuç olarak açığa çıkmış olan rüzgar hızları bir olasılık yoğunluğu dağılımı olarak ifade edilmektedir.

Rayleigh Dağılım Fonksiyonuna göre;

$$h_r = \frac{\pi}{2} \frac{v_{ri}}{v_{rort}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \right] \left(\frac{v_{ri}}{v_{rort}} \right)^2 \quad (5.10)$$

ifadesi esme saatini vermektedir.



Şekil 5.8. Rayleigh dağılım fonksiyonu grafiği

Türbin araştırma-geliştirme çalışmalarında rüzgar dağılımı ile ilgili verilere ulaşmak büyük önem arz eder. Bir bölgenin rüzgar dağılımı en az bir yıl boyunca ölçüm yapılarak veya yapılan ölçümlerden hareketle farklı yüksekliklerdeki noktalarda Weibull dağılımı ile saptanır.

$$f(v_r) = \frac{k}{A} \left(\frac{v_r}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v_r}{A} \right)^k \right] \quad (5.11)$$

$f(v_r)$ rüzgar hızının frekansıdır. k burada bir sabit olup boyutsuz şekil parametresidir. A ise ölçek parametresidir.

Belirli bir yer için yıllık rüzgar enerjisi;

$$E = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} P_g \times f(v) \times 8760 \times dv \quad (5.12)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada P_g rüzgar türbininin güç eğrisi fonksiyonu, $f(v)$ rüzgar hızı olasılık fonksiyonu, $V_{\max}$ türbin devreden çıkma hızını ifade ederken, $V_{\min}$ ise türbinin devreye girme hızıdır (Gökçınar, 2008).

5.3. Güneş Panelleri

Seri bağlı fotovoltaik hücrelerin bir araya gelmesiyle oluşurlar (Şekil 5.9.). Güneş enerjisini soğurarak doğru akıma (DC) dönüştürürler yani güneş ışınlarını doğrudan elektriğe çevirmiş olurlar. Oluşan DC akım invertörler vasıtasıyla alternatif akıma (AC) çevrilir. İlk yatırım maliyetleri görece yüksek olmasına karşın gelişen teknolojiyle beraber maliyetler düşmektedir.

Rüzgar hızının 1 m/s, sıcaklığın 25°C, ışıınının 1000 W/m² olduğu ortam koşullarındaki panelin pik yani maksimum gücü W_p 'dir. Ancak gün boyunca bu ortam koşulları sabit bir şekilde sağlanmamakta olup sürekli değişkenlik göstermektedir. Bu da güneş panellerinin ürettiği enerjinin kesintili olması anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle enerji arz güvenliğinin sağlanmasında yetersizdir. Mevsimsel koşullara göre oldukça farklılık gösteren güneş enerji sistemini daha verimli hale getirmek için eğim açısı, mevsim koşullarına göre en uygun lokasyon, depolama sistemi kurulması, ikinci bir enerji kaynağı

ile desteklenerek hibrit santrale dönüşmesi gibi etkenler de değerlendirilerek en uygulanabilir ölçekte dizayn yapılabilmektedir.



Şekil 5.9. Güneş paneli

Güneş panellerinin yapısı, ham maddesi kum olan silisyumun çok yüksek sıcaklıkla silikona dönüşmesi, oluşan silikonun eritilip şekil verilmesiyle meydana gelen hücrelerin soğutulduktan sonra parlatma ve taşlama işlemlerinin tamamlanarak elde edilen hücreye dayanmaktadır.

5.3.1. Güneş panelinin oluşumu

Güneş paneli üretim aşamaları sırasıyla ingot (kütük), wafer (yonga), hücre (cell) ve panel üretimidir. Ingot yüksek saflıktaki çok kristalli polisilisyumun yüksek sıcaklıklarda monokristal yapıya dönüştüğü ürün olarak tanımlanır. Ingot üretiminde polisilisyum 1500°C sıcaklıkta özel ingot fırınlarında eritilir. Daha sonra seed kristaliyle çekme metoduyla çekilerek 3,5 m uzunluk ve yaklaşık 350 kg ağırlığa sahip ingota dönüştürülür (Şekil 5.10.).



Şekil 5.10. İngot (kütük)

Ürün kalitesi doğrudan saflığa bağlıdır. Mono kristal hücreler enerji üretiminde daha verimlidir. İkinci aşamada üretilen ingotlar hassas kesim ve dilimleme işlemleriyle önce külçe sonrasında ise dilim yani wafer (yonga) biçimine getirilmektedir (Şekil 5.11.).



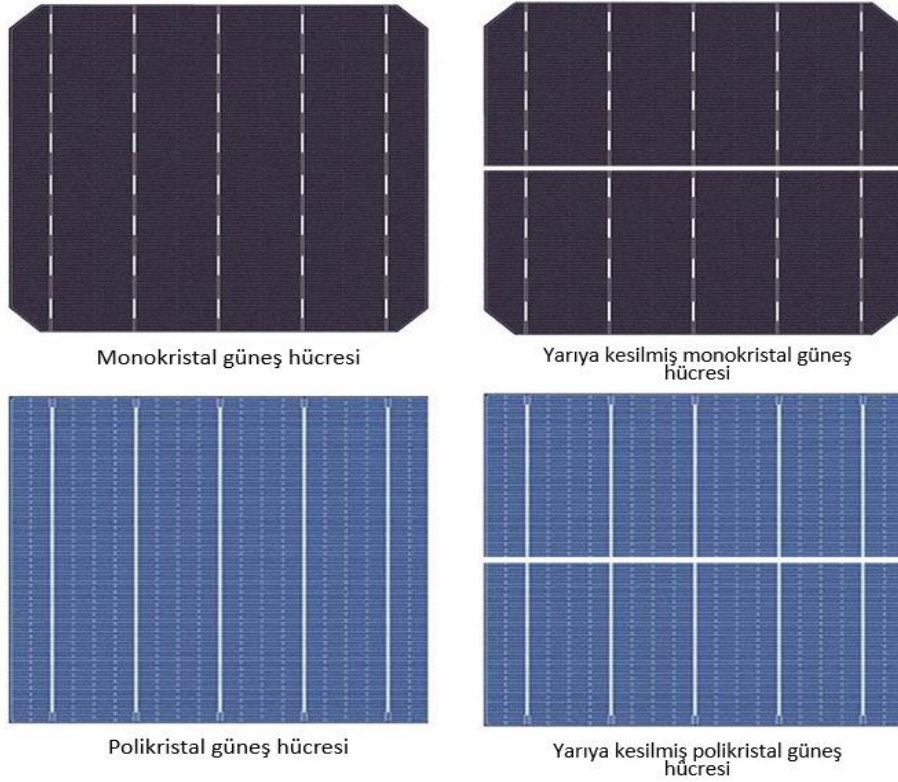
Şekil 5.11. Wafer (yonga)

Hücre (cell) üretiminde ise yarı iletken özelliğe sahip wafer, güneş hücresine dönüştürülmektedir (Şekil 5.12.). Farklı fiziksel ve kimyasal süreçlerden geçerek yansıma azaltacak bir yüzey elde edildikten sonra iletken bağlantılar ilave edildikten sonra hücre biçimine getirilir. Bu da enerji üretimine hazır olduğu anlamına gelmektedir. Hücre üretim safhasında temiz oda koşullarında üretim yapılması gerekmektedir



Şekil 5.12. Hücre üretimi

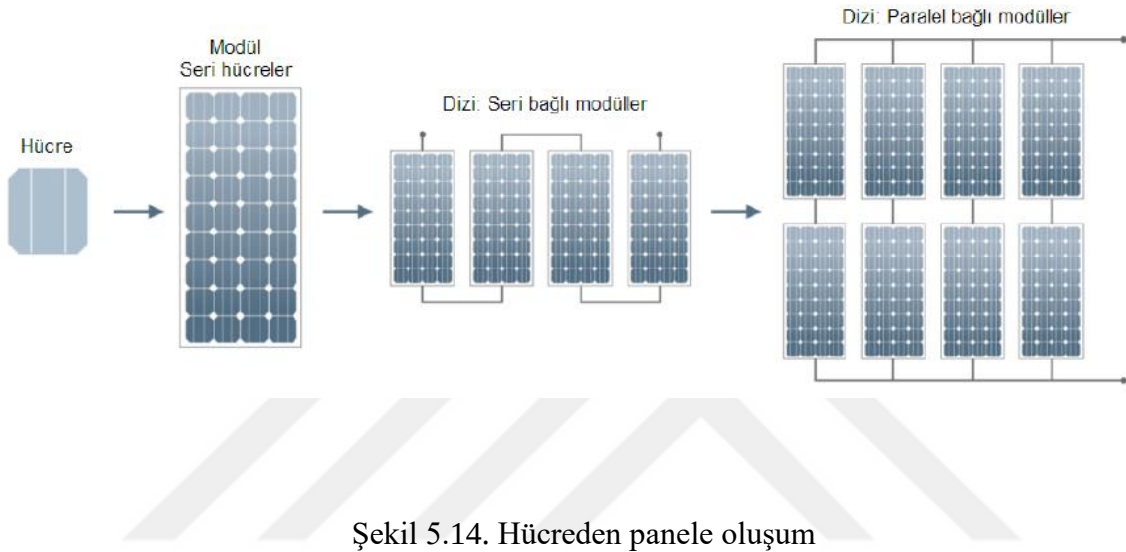
Son aşamada güneş hücreleri half-cut teknolojisi ile yarıya kesilmektedir (Şekil 5.13.). Bu durum hücrelerin boyutunu küçültüp panellerin enerji çıkışını artırmaktadır. Hücreler panellere dizilerek elektrik bağlantısı yapıldıktan sonra enerji üretimine hazır hale gelmektedir (Kalyon PV, 2023).



Şekil 5.13. Monokristal ve polikristal hücrelerin half-cut kesilmesi

Hücreler birleşerek modülleri, modüller birleşerek panelleri, paneller birleşerek dizileri oluşturmaktadır (Şekil 5.14.). Güneş panellerinin verimi ise %5-20 arasındadır.

Monokristal paneller siyah, polikristal paneller mavi renkte olup polikristal panellerin verimliliği monokristal panellerin verimliliğinden daha düşüktür fakat uygun maliyetlidir.



Şekil 5.14. Hücreden panele oluşum

5.3.2. Temel yasa ve kavramlar

Güneş enerjisinde akım aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$I = I_{ph} + I_d \quad (5.13)$$

Burada "I" güneş hücresi tarafından üretilen akımı, I_{ph} emilen fotonlar nedeniyle üretilen fotoakımı, I_d ise karanlık akımı temsil etmektedir. Üretilen akımın miktarı I, gelen güneş ışığının yoğunluğuyla orantılıdır.

Güç çıkışı aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$P = I \cdot V \quad (5.14)$$

Burada P güç çıkışı, I akım, V ise güneş hücresi tarafından üretilen gerilimdir.

Güneş hücreleri arasındaki voltaj Shockley diyot eşitliği ile ifade edilir.

$$V = V_{oc} - I \cdot R_s \quad (5.15)$$

V_{oc} açık devre voltajı, R_s ise seri dirençtir.

Solar PV sistemin verimi

$$\eta_{PV} = P_{max}/P_{inc} \quad (5.16)$$

ile hesaplanır. P_{max} güneş paneli maksimum güç çıkışı, P_{inc} gelen güneş enerjisidir. Verimi etkileyen faktörler sıcaklık, güneşin parlaklığı ve malzeme özellikleridir. (Öztürk, 2012)

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yenilenebilir enerji kaynak tabanlı bir santralin hibrit enerji santraline dönüştüğündeki etkileri incelemek amacıyla Balıkesir ili, Merkez ve Susurluk ilçeleri sınırları içerisinde tesis edilip işletilmekte olan 30,7 MW_m / 24 MWe lisans gücündeki Çaypınar RES/GES örnek uygulama olarak seçilerek üretim verileri analiz edilmiştir. Bu santralde 3,6 MW gücünde 7 adet rüzgar türbini, 400 W gücünde 13752 adet güneş paneli bulunmaktadır. Rüzgar için kurulu güç 25,2 MW iken güneş için 5,5 MW olup toplam kurulu güç 30,7 MW'tır. Santral sahası Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Santral sahası

Bu santral özelinde 2023 yılı için saatlik rüzgar ve güneş üretim verileri incelenmiştir. 12 ayda 8760 saat için elde edilen verilerle üretim miktarları üzerinden kapasite faktörü ve verim; rüzgar, güneş ve rüzgar-güneş hibrit sistem için ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca rüzgar için Betz limitine göre teorik üretim hesaplanarak gerçekleşen üretimle kıyaslaması yapılmıştır.

Söz konusu santral hibrit rüzgar-güneş olarak yapıldıktan sonra tam kapasitede çalışırken 2024 yılı itibariyle üzerinden 1 yıl geçmiş olan tek santraldir. Bu yönüyle bakılacak olursa bu çalışmanın ülkemizde bu tarz santrallerin yapılması üzerine önemli bir bakış oluşturacağı düşünülmektedir.

İncelemesi yapılan Çaypınar Hibrit Enerji Santralinde ana kaynak olarak rüzgar, yardımcı kaynak olarak güneş kullanılmıştır. Bu çalışma içerisinde santraldeki RES için teorik olarak üretilebilecek enerji, Betz limitine göre üretilebilecek enerji, sahada gerçekleşen üretim, kapasite faktörü ve verim hesaplanmıştır. GES için PVsyst programı vasıtasıyla ışıınım değerleri ve kayıplar hesaplandıktan sonra teorik olarak üretilebilecek enerji, sahada gerçekleşen üretim, kapasite faktörü ve verim hesaplanmıştır. Ayrıca hibrit santralin kapasite faktörü ve verimi hesaplandıktan sonra her ay için saatlik bazda üretim miktarını gösteren grafikler oluşturulmuş, santralin yıl içerisinde kaç saat hangi kapasite faktör aralığında çalıştığı hesaplanmıştır.

6.1. Rüzgar Enerji Santrali İçin Veriler ve Hesaplamalar

RES için sahadaki yerleşim Şekil 6.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Türbinlerin santral sahası içindeki konumlarının coğrafi görünümü

Çaypınar RES için Vestas firmasının V136-3600 kW türbin modeli kullanılmıştır. Türbini karakterize eden parametreler aşağıda gösterilmektedir.

Rotor çapı	: 136 m
Kule yüksekliği	: 82 m
Devreye girme hızı	: 3 m/s
Devreden çıkma hızı	: 22,5 m/s
Süpürme alanı	: 14.527 m ²
Kanat uzunluğu	: 66,7 m
Karbon ayak izi	: 7,6 g CO ₂ /kWh

Santral sahasının 2023 yılı için aylara göre ortalama rüzgar hızı değerleri Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Aylara göre ortalama rüzgar hızı değerleri

Aylar	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Ocak	6,4
Şubat	7,1
Mart	6,9
Nisan	5,8
Mayıs	6,7
Haziran	6,8
Temmuz	7,2
Ağustos	8,4
Eylül	8,6
Ekim	5,9
Kasım	6,5
Aralık	6,3

Çizelge 6.1.'e göre 2023 yılı için en yüksek ortalama rüzgar hızları sırasıyla 8,6 m/s ile Eylül ve 8,4 m/s ile Ağustos aylarında görülmüştür. Bu santral rüzgar-güneş hibrit santral olduğu için ortalama rüzgar hızının en yüksek olduğu aylardan Ağustos ayında mevsim yaz olup güneşten de yüksek bir enerji üretimi olması beklenmektedir. Yani hibrit santral için toplam enerji üretiminin Ağustos ayında diğer aylara göre daha yüksek olması tahmininde bulunulabilir. Ortalama rüzgar hızının en düşük olduğu ay 5,8 m/s ile Nisan ayıdır.

Hava yoğunluğu, kanat yarıçapı ve rüzgar hızının küpüyle orantılı olarak hesaplanan rüzgardan teorik olarak üretilebilecek enerji, Denklem (6.1)'de verilmiştir.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (6.1)$$

Teorik olarak üretilebilecek enerji hesabında, Denklem (6.1)'de hız olarak her ay için tabloda verilmiş olan ortalama rüzgar hızı değerleri, A türbin rotorunun süpürdüğü alan olup hesaplanmasında rotor yarıçapı kullanılmıştır. Hava yoğunluğu 1,225 kg/m³ olarak kabul edilmiştir. Buna göre her ay için teorik olarak üretilebilecek enerji (MWh) hesaplanmıştır.

Rüzgardan elde edilebilecek teorik maksimum verimlilik değeri %59,26'dır ki bu da Betz limiti olarak tanımlanır. Betz limitine göre üretilebilecek enerji (MWh) teorik olarak üretilebilecek enerjinin maksimum %59,26'sıdır. Teorik olarak üretilebilecek enerji ve Betz limitine göre üretilebilecek enerji hesabı yapıldıktan sonra saatlik olarak elde edilen sahada gerçekleşen üretim verileri ay ay hesaplanarak Çizelge 6.2.'de verilmiştir. Teorik olarak gerçekleşen en yüksek üretim sırasıyla Eylül ve Ağustos aylarıdır.

Çizelge 6.2. Rüzgar için teorik ve gerçekleşen üretim değerleri

Aylar	Teorik Olarak Üretilebilecek Enerji (MWh)	Betz Limitine Göre Üretilebilecek Enerji (MWh)	Sahada Gerçekleşen Üretim (MWh)
Ocak	12.147,44	7.198,57	5.820,80
Şubat	14.980,15	8.877,24	6.508,07
Mart	15.222,71	9.020,98	7.202,25
Nisan	8.749,60	5.185,01	4.483,60
Mayıs	13.937,00	8.259,06	7.361,99
Haziran	14.100,39	8.355,89	7.235,11
Temmuz	17.295,86	10.249,53	7.684,77
Ağustos	27.465,19	16.275,87	9.446,25
Eylül	28.523,29	16.902,90	9.619,44
Ekim	9.517,02	5.639,78	5.274,68
Kasım	12.315,28	7.298,04	5.981,41
Aralık	11.586,88	6.866,38	6.430,25
TOPLAM	185.840,81	110.129,27	83.048,60

Burada sahada gerçekleşen üretim değerleri SCADA sisteminden saatlik olarak alınmıştır. Rüzgar hızının yetersiz olduğu saatlerde türbin dönmeyeceği için enerji üretimi olmayacaktır fakat iç ihtiyaç için şebekeden enerji çekilmektedir. Bu da SCADA ekranında eksi değer olarak görünmektedir. Bu çalışmada, hesapların daha amaca yönelik ve doğru olması adına eksi üretim değerleri sıfır kabul edilmiştir. 8760 saat için elde edilmiş olan üretim verileri aylara göre hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2.'ye göre 1 yıl için sahada gerçekleşen üretim 83.048,60 MWh'tir. Betz limitine göre üretilebilecek enerji ise 110.129,27 MWh'tir. Sahadaki üretim Betz limitine göre üretilebilecek enerjinin yaklaşık 0,75 katıdır. 1 yıl için sahada gerçekleşen üretim ile teorik olarak üretilebilecek üretim kıyaslanırsa sahada gerçekleşen üretim, teorik olarak üretilebilecek üretimin yaklaşık 0,45 katıdır.

Çizelge 6.2.'deki veriler aylık olarak incelenirse teorik hesaba göre en fazla enerji üretilmesi beklenen aylar sırasıyla 28.523,29 MWh ile Eylül ve 27.465,19 MWh ile Ağustos aylarıdır. Sahada gerçekleşen üretimler ise Eylül ve Ağustos ayları için sırasıyla 9.619,44 MWh ve 9.446,25 MWh olmuştur. Teorik olarak en yüksek enerji üretilmesi beklenen aylar ile sahada gerçekleşen üretimde enerjinin en yüksek üretildiği aylar aynıdır bu da hesaplanan ve gerçekleşen üretim değerlerinin en fazla olduğu ayların aynı olduğunu göstermektedir. Yine aynı şekilde teorik olarak en düşük enerji üretilmesi beklenen ay 8.749,60 MWh ile Nisan ayıdır. Sahada gerçekleşen üretim verilerine bakıldığında 4.483,60 MWh üretim Nisan ayında gerçekleşmiştir. Yine hesaplanan ve gerçekleşen üretim değerlerinin en az olduğu ayın aynı olduğu görülmektedir.

Kapasite kullanım oranı ifadesinin enerji santrallerindeki karşılığı kapasite faktörüdür. Kapasite faktörü, santralin belirli bir zaman aralığında ürettiği toplam enerjinin tam kapasitede üretebileceği enerjiye oranıdır (Akkaş, 2001). 1 yıl içerisinde 8760 saat olduğundan yıllık kapasite faktörü hesabı Denklem 6.2.'deki gibidir.

$$KF = \frac{\text{Üretilen Enerji (MWh)}}{\text{Kurulu Güç (MW)} \times 8760 \text{ (saat)}} \quad (6.2)$$

Çizelge 6.3. RES için üretim verileri ve kapasite faktörü

Aylar	Kurulu Güç (MW)	Aylık Üretim (MWh)	Kapasite Faktörü (%)
Ocak	25,2	5.820,80	31,05
Şubat	25,2	6.508,07	38,43
Mart	25,2	7.202,25	38,41
Nisan	25,2	4.483,60	24,71
Mayıs	25,2	7.361,99	39,27
Haziran	25,2	7.235,11	39,88
Temmuz	25,2	7.684,77	40,99
Ağustos	25,2	9.446,25	50,38
Eylül	25,2	9.619,44	53,02
Ekim	25,2	5.274,68	28,13
Kasım	25,2	5.981,41	32,97
Aralık	25,2	6.430,25	34,30
YILLIK	25,2	83.048,60	37,62

Çizelge 6.3.'te RES için aylık üretim verileri ve kapasite faktörü verilmiştir. Verilere ay bazlı bakıldığında en çok üretimin gerçekleştiği Eylül ve Ağustos aylarında kapasite faktörü sırasıyla %53,02 ve %50,38 olarak hesaplanmıştır. Yıl bazlı değerlendirme yapıldığında 25,2 MW kurulu güç ve 83.048,60 MWh yıllık üretimle kapasite faktörü %37,62 olarak bulunmuştur.

Bir santralin yüzdelik olarak verimi sahada gerçekleşen üretim değerinin teorik olarak gerçekleşebilecek üretim değerine bölünmesiyle elde edilen sonucun 100 ile çarpılmasıyla bulunur.

$$\text{Santral Verimi \%} = \frac{\text{Gerçekleşen Üretim (MWh)}}{\text{Teorik Üretim (MWh)}} \times 100 \quad (6.3)$$

Çizelge 6.4.'te RES için aylık ve 2023 yılı santral verimi gösterilmektedir.

Çizelge 6.4. RES verimi

Aylar	Teorik Olarak Üretililecek Enerji (MWh)	Sahada Gerçekleşen Üretim (MWh)	Üretim Verimi (%)
Ocak	12.147,44	5.820,80	47,92
Şubat	14.980,15	6.508,07	43,44
Mart	15.222,71	7.202,25	47,31
Nisan	8.749,60	4.483,60	51,24
Mayıs	13.937,00	7.361,99	52,82
Haziran	14.100,39	7.235,11	51,31
Temmuz	17.295,86	7.684,77	44,43
Ağustos	27.465,19	9.446,25	34,39
Eylül	28.523,29	9.619,44	33,72
Ekim	9.517,02	5.274,68	55,42
Kasım	12.315,28	5.981,41	48,57
Aralık	11.586,88	6.430,25	55,50
YILLIK	185.840,81	83.048,60	44,69

Santral verimi aylık bazda incelenirse santralin en verimli dönemi %55,50 ile Aralık ayıdır. Sahada gerçekleşen üretimin en yüksek olduğu ay Eylül olmasına rağmen en düşük verim %33,72 ile yine bu aydadır. Bunun nedeni teorik olarak üretililecek enerji değeri ile sahada gerçekleşen üretim değerinin birbirinden uzak oluşudur. Yıl için sahada gerçekleşen üretim 83.048,60 MWh ve verim %44,69 olarak hesaplanmıştır.

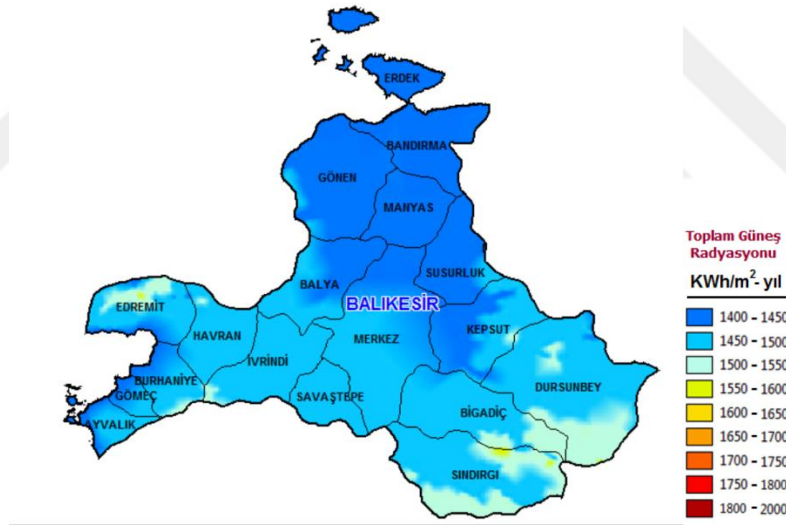
6.2. Güneş Enerji Santrali İçin Veriler ve Hesaplamalar

GES için PVSyst programı vasıtasıyla ışıınım değerleri ve kayıplar hesaplandıktan sonra teorik olarak üretililecek enerji, sahada gerçekleşen üretim, kapasite faktörü ve verim hesapları yapılmıştır.

GES için Alfa Solar firmasının 72 hücreli A3S72M400 model güneş paneli kullanılmıştır. Güneş panelini karakterize eden parametreler aşağıda gösterilmektedir.

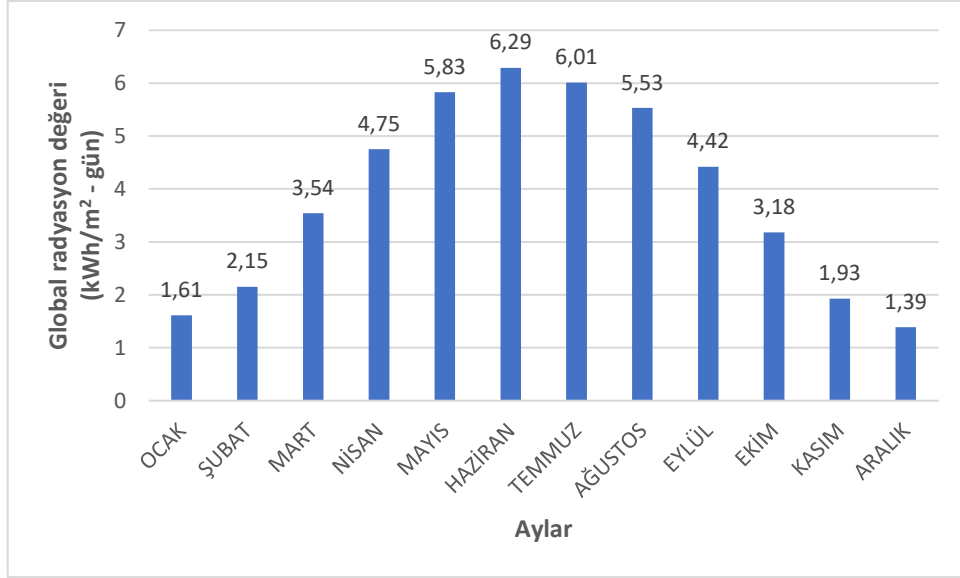
Maksimum Güç	: 400 W
Modül Verimi	: % 20
Ağırlık	: 24 kg
Güneş Hücresi	: Monokristal
Ön Cam	: Temperli
Mekanik Dayanım	: 5400 Pa
Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı	: $44^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

Balıkesir ilinin toplam güneş radyasyonu haritası Şekil 6.3.'te verilmiştir.



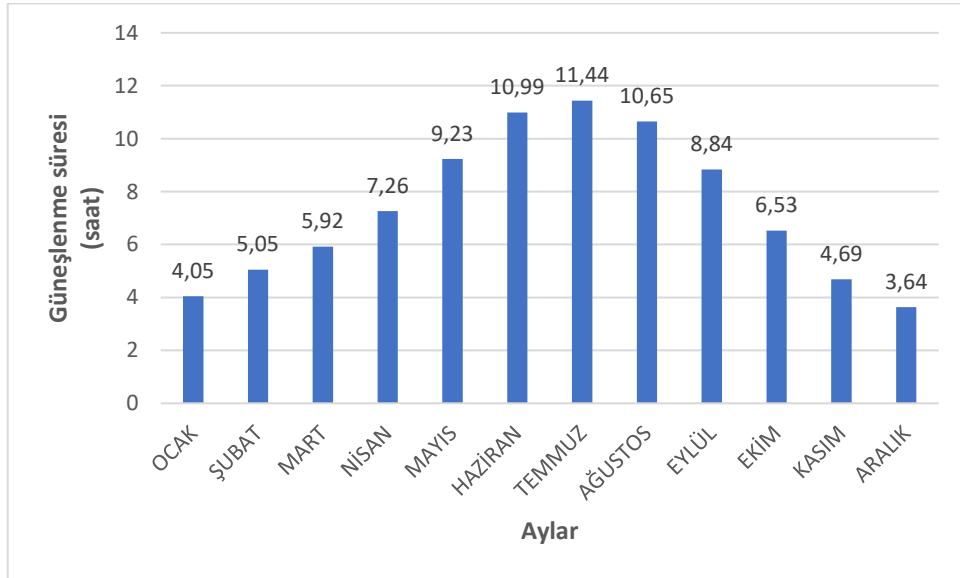
Şekil 6.3. Balıkesir ili toplam güneş radyasyonu haritası (ETKB, 2023)

Burada en düşük ışıınım değeri $1400\text{-}1450 \text{ kWh/m}^2$ iken en yüksek ışıınım değeri $1800\text{-}2000 \text{ kWh/m}^2$ aralığı olarak görölmektedir. Şekil 6.4.'te günlük global radyasyon değerlerine bakılacak olursa en yüksek değeri Haziran ayındadır. Bu ayda günlük ortalama $6,29 \text{ kWh/m}^2$ ışıınım değeri görölmektedir. En düşük günlük ortalama ışıınım $1,39 \text{ kWh/m}^2$ değeri ile Aralık ayına aittir.



Şekil 6.4. Balıkesir ili global radyasyon değerleri

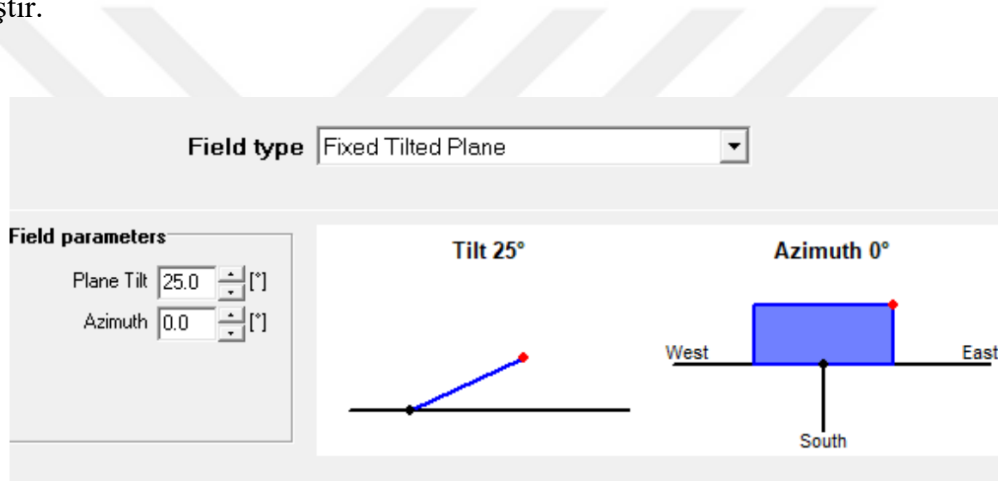
Şekil 6.5.'e göre güneşlenme süresi günlük ortalama 11,44 saat ile en yüksek Temmuz ayındadır. En düşük değer, günlük ortalama 3,64 saat ile global radyasyon sürelerinde olduğu gibi Aralık ayında görülmektedir.



Şekil 6.5. Balıkesir ili güneşlenme süreleri

GES için teorik üretim verilerinin elde edilebilmesi amacıyla PVsyst programı kullanılmıştır. Programa santral sahasının koordinatları girilmiş, yıllık ışıınım değeri olarak toplamda 1653 kWh/m² hesaplanmıştır. 764 string 18 dizi olmak üzere her biri 400 W güce sahip toplam 13752 adet panel mevcut olup bunların kapladığı alan 27502 m²'dir.

Bir cismin, güney referansından olan açısal uzaklığının bir ölçüsüne azimut açısı adı verilir. Güney konumunda 0° batı konumunda ise 90°'dir. Sistemin güneye olan açısı kritiktir. En yüksek verimin elde edildiği güneye dönük yüzey (azimut açısı) 0°'dir (Öztürk, 2012). Bu yüzden Şekil 6.6.'da gösterildiği gibi PVsyst programı da en yüksek verim için güneye dönük yüzey 0° olacak şekilde panelin eğiminin 25° açı ile olması gerektiği çıktısını vermiştir.



Şekil 6.6. PVsyst yazılımının panel için eğim açısı tespiti

Gerekli veriler girildikten sonra PVsyst yazılımının hesapladığı çıktılar ve enerji üretim değerleri ise Çizelge 6.5.'te gösterilmiştir.

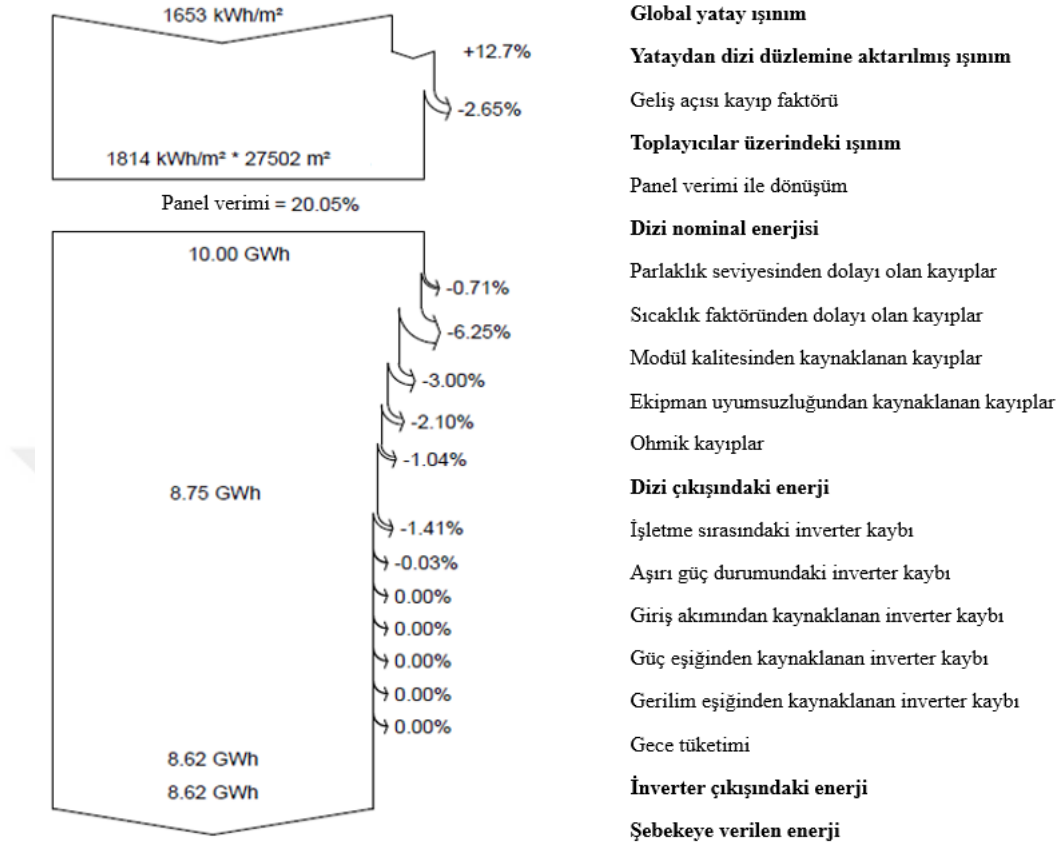
Çizelge 6.5. PVsyst yazılımının hesapladığı çıktılar

	Global Yatay Işınım (kWh/m ²)	Yatay Dağılık Işınım (kWh/m ²)	Ort. Sıc. (°C)	Yataydan Dizi Düzl. Aktarılan Işınım (kWh/m ²)	Toplayıcı Üzerindeki Işınım (kWh/m ²)	Dizi Çıkışı Enerji (GWh)	Şebeke Verilen Enerji (GWh)	Perf. Oranı
Ocak	60,80	27,70	3,90	91,40	88,70	0,455	0,449	0,893
Şub.	71,10	36,50	5,37	93,50	91,00	0,463	0,456	0,887
Mart	119,40	59,50	8,64	139,70	136,10	0,678	0,668	0,869
Nisan	157,50	73,20	12,11	171,10	166,60	0,817	0,806	0,856
May.	205,80	77,90	17,76	207,70	202,40	0,968	0,955	0,836
Haz.	220,50	78,00	22,86	213,70	208,00	0,979	0,966	0,822
Tem.	231,50	66,90	26,60	228,00	221,80	1,025	1,011	0,806
Ağst.	205,20	63,20	26,54	219,10	213,60	0,988	0,974	0,808
Eylül	155,40	47,90	21,03	183,00	178,30	0,841	0,830	0,824
Ekim	103,70	45,70	15,55	132,50	129,00	0,629	0,620	0,851
Kas.	69,20	31,60	9,53	102,80	99,90	0,502	0,495	0,875
Ara.	53,10	26,90	5,16	80,60	78,20	0,400	0,394	0,889
YIL	1.653,20	635,00	14,64	1.863,00	1.813,60	8,747	8,623	0,841

Çizelge 6.5.'e göre ilk sütunda 2023 yılı için aylara göre global yatay ışınlm değerleri verilmiştir. Bu değer yıl için toplam 1653,2 kWh/m²'dir. İkinci sütunda yatay dağılık ışınlm değerleri mevcuttur ve yıl için toplam 635 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Devamındaki sütunlarda sırasıyla aylık ortalama ortam sıcaklıkları, yataydan dizi düzlemine aktarılmış ışınlm, toplayıcılar üzerindeki ışınlm, dizi çıkışındaki enerji, şebekeye verilen enerji ve performans oranı verilmiştir.

GES'ler için performans oranını etkileyen faktörler sıralanacak olursa; sıcaklık, gölge, toz, yansıyan parlama, ışınlm, inverter ve kablodan kaynaklanan kayıplar vb. durumlardır. Sayılan faktörler teorik olarak üretilebilecek enerjiyi büyük oranda düşürmektedir. Çizelge 6.5.'ten görüleceği üzere güneşten en fazla oranda yararlanılan yaz aylarında performans oranı en düşüktür. Bunun sebebi sıcaklıkla beraber verimin düşmesidir.

Simülasyona göre ortalama ortam sıcaklığı 2023 yılı için 14,64 °C'dir. En yüksek değer 26,60 °C ile Temmuz ayında en düşük değer 3,90 °C ile Ocak ayında görülmektedir. Toplayıcılar üzerindeki ışınlm yıl için toplam 1813,6 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.7. Sankey diyagramı

Şekil 6.7.'deki Sankey diyagramı incelenecek olursa simülasyon ilk olarak yatay ışıınım değerini 1653 kWh/m^2 kabul ederek hesap yapmıştır. Toplayıcılar üzerindeki ışıınım için toplam 1814 kWh/m^2 bulunmuştur. Güneş panellerinin kapladığı toplam alan 27502 m^2 'dir. Bu iki değer çarpılarak panellerin kayıplar olmadan toplamda üretebileceği değere dönüştürülmüştür. Simülasyon panel verimini %20,05 olarak kabul ederek kayıpların hesabına geçmiştir. Panellerde ışıınım seviyesi %0,71, sıcaklık %6,25, panel kalitesi %3, modül ve stringlerde uyumsuzluk %2,10 ve kablolamadan dolayı %1,04 kayıp kabul edilerek kayıplar hesaplanıp dizi çıkışındaki enerji 8,75 GWh olarak bulunmuştur. Daha sonra çalışma sırasında inverterden dolayı %1,41 ve nominal inverter gücünün üzerinde %0,03 kayıp kabul edilerek inverter çıkışındaki enerji 8,62 GWh olarak hesaplanmıştır. Bundan sonra herhangi bir kayıp unsuru ön görülmeyip şebekeye verilebilecek enerji 8,62 GWh

olarak bulunmuştur. Hesaplanan bu değer GES için yılda teorik olarak üretilebilecek enerjidir.

GES kurulu gücü için hesaplamalarda mekanik güç baz alınmıştır. GES için kapasite faktörü hesabı Denklem (6.2.) kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.6. GES için üretim verileri ve kapasite faktörü

Aylar	Kurulu Güç (MW)	Aylık Üretim (MWh)	Kapasite Faktörü (%)
Ocak	5,5	379,24	9,27
Şubat	5,5	321,81	8,71
Mart	5,5	454,41	11,10
Nisan	5,5	613,60	15,49
Mayıs	5,5	720,72	17,61
Haziran	5,5	867,93	21,92
Temmuz	5,5	913,99	22,34
Ağustos	5,5	877,49	21,44
Eylül	5,5	738,81	18,66
Ekim	5,5	548,93	13,41
Kasım	5,5	297,07	7,50
Aralık	5,5	292,57	7,15
YILLIK	5,5	7.026,56	14,58

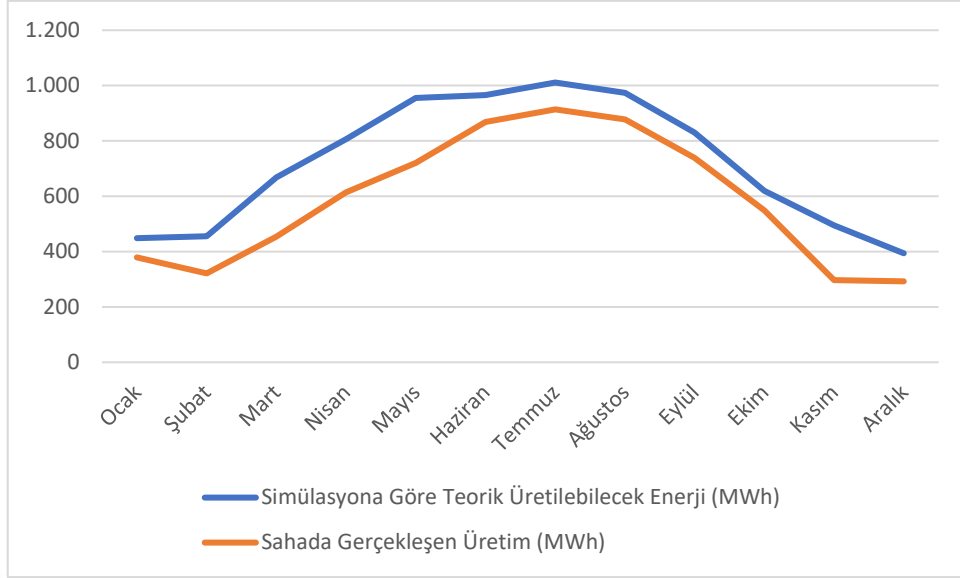
Çizelge 6.6.'da GES için aylık üretim verileri ve kapasite faktörleri verilmiştir. GES için kapasite faktörü değerlendirilecek olursa ay bazlı bakıldığında en çok üretimin gerçekleştiği Temmuz ayında kapasite faktörü %22,34 olarak hesaplanmıştır. Yıl bazlı değerlendirme yapıldığında 5,5 MW kurulu güç ve 7.026,56 MWh yıllık üretimle kapasite faktörü %14,58 olarak bulunmuştur. Ayrıca kapasite faktörü yaz aylarında yüksek kış aylarında ise düşüktür.

Çizelge 6.7. GES verimi

Aylar	Simülasyona Göre Teorik Üretililecek Enerji (MWh)	Sahada Gerçekleşen Üretim (MWh)	Üretim Verimi (%)
Ocak	449,00	379,24	84,46
Şubat	456,00	321,81	70,57
Mart	668,00	454,41	68,03
Nisan	806,00	613,60	76,13
Mayıs	955,00	720,72	75,47
Haziran	966,00	867,93	89,85
Temmuz	1.011,00	913,99	90,40
Ağustos	974,00	877,49	90,09
Eylül	830,00	738,81	89,01
Ekim	620,00	548,93	88,54
Kasım	495,00	297,07	60,01
Aralık	394,00	292,57	74,26
YILLIK	8.623,00	7.026,56	81,49

Teorik olarak üretililecek enerji aylık olarak Çizelge 6.7.'de verilerek sahada gerçekleşen üretimle kıyaslanmış ve santral verimi aylık bazda hesaplanmıştır. Simülasyona göre en çok enerji üretililecek ay 1.011 MWh ile Temmuz ayı olarak görülmektedir ve sahada gerçekleşen üretimde de en çok enerji üretilen ay 913,99 MWh üretim ile yine Temmuz ayı olmuştur. Bu yüzden aylık bazda en yüksek verim %90,40 ile Temmuz ayındadır. Simülasyona göre en az enerji üretililecek ay 394 MWh ile Aralık ayı olarak görülmektedir ve sahada gerçekleşen üretimde de en az enerji üretilen ay yine aynı ay olan Aralık'tır (Şekil 6.8.).

GES için santral verimi incelendiğinde aylık bazda sahada en yüksek üretimin gerçekleştiği Temmuz ayında simülasyona göre de yine en yüksek üretim gerçekleşmiş olup üretim verimi en yüksek bu aydadır ve %90,4 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.8. PVsyst ve sahadaki üretimin kıyaslanması

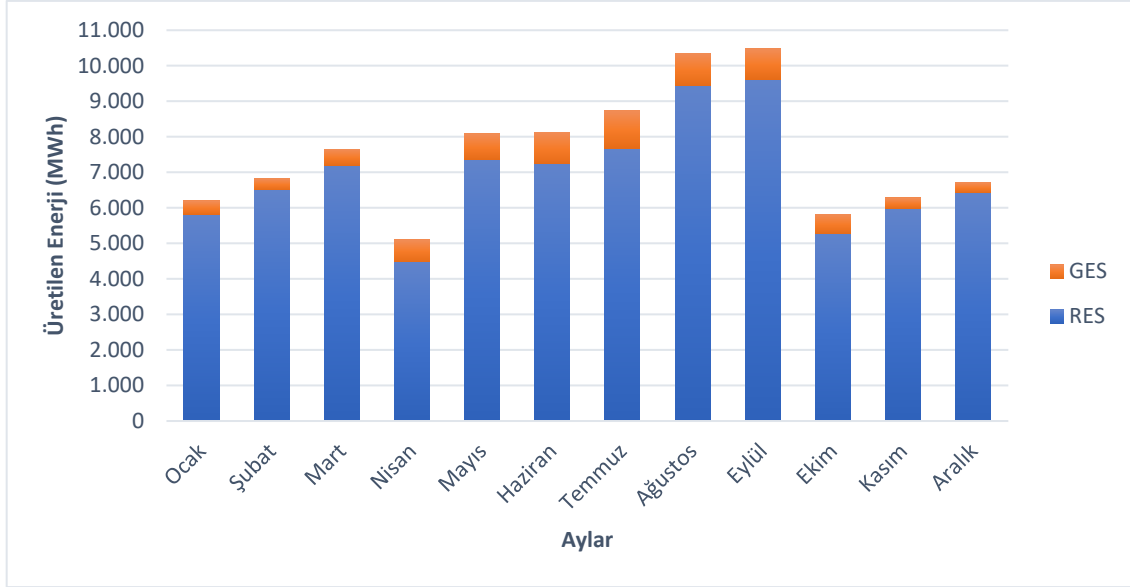
6.3. Rüzgar/Güneş Hibrit Enerji Santrali İçin Veriler ve Hesaplamalar

Hibrit santral ana kaynak RES yardımcı kaynak GES'ten oluşmaktadır. 25,2 MW RES ve 5,5 MW GES ile toplam kurulu güç 30,7 MW'tır. RES ve GES için sahada gerçekleşen üretimler toplanarak ay bazında hibrit santralin ürettiği enerji hesaplanmıştır.

Çizelge 6.8. Hibrit santral üretim verileri ve kapasite faktörü

Aylar	Toplam Kurulu Güç (MW)	RES Üretim (MWh)	GES Üretim (MWh)	Hibrit Üretim (MWh)	Hibrit Kapasite Faktörü(%)
Ocak	30,7	5.820,80	379,24	6.200,04	27,14
Şubat	30,7	6.508,07	321,81	6.829,88	33,11
Mart	30,7	7.202,25	454,41	7.656,66	33,52
Nisan	30,7	4.483,60	613,60	5.097,20	23,06
Mayıs	30,7	7.361,99	720,72	8.082,70	35,39
Haziran	30,7	7.235,11	897,93	8.133,03	36,79
Temmuz	30,7	7.684,77	1.042,99	8.727,76	38,21
Ağustos	30,7	9.446,25	909,49	10.355,73	45,34
Eylül	30,7	9.619,44	858,81	10.478,25	47,40
Ekim	30,7	5.274,68	548,93	5.823,61	25,50
Kasım	30,7	5.981,41	297,07	6.278,48	28,40
Aralık	30,7	6.430,25	292,57	6.722,82	29,43
YILLIK	30,7	83.048,60	7.337,56	90.386,17	33,61

Çizelge 6.8.'e göre hibrit santralin ürettiği enerji 2023 yılı için 90.386,17 MWh olmuştur. Hibrit santralin aylık olarak kapasite faktörü incelendiğinde en yüksek olan ay %47,40 ile Eylül ayı olmuştur. Bu ayda rüzgardan elde edilen enerji diğer aylara kıyasla en yüksektir. Kapasite faktörünün en düşük olduğu ay %23,06 ile Nisan ayıdır. Çizelge 6.8.'e göre enerji üretim verileri incelendiğinde Kasım-Aralık-Ocak-Şubat ayları, güneşten yararlanmanın en az olduğu aylardandır. Nisan ayı için rüzgardan elde edilen enerjinin diğer aylara kıyasla düşük üretim yapılan aylardan biri olduğu söylenebilir. Hibrit santralin kapasite faktörü ise 2023 yılı için %33,61 olarak hesaplanmıştır.



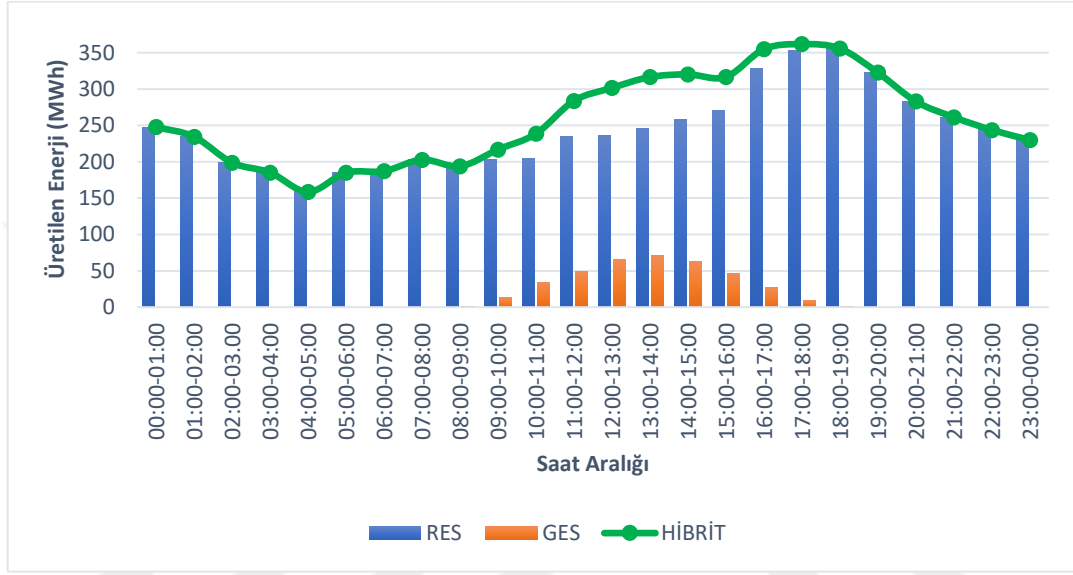
Şekil 6.9. Hibrit santralin aylara göre RES ve GES üretim değerleri

Şekil 6.9.'daki aylara göre RES ve GES üretim değerleri birlikte incelendiğinde RES için üretim Eylül ve Ağustos aylarında en fazlayken Nisan ayında en azdır. Hibrit santrale GES'in katkısı en fazla yaz aylarındayken kış aylarında dahi üretim yaparak santrale işlerlik kazandırmıştır.

Çizelge 6.9. Hibrit santral üretim verileri ve verim

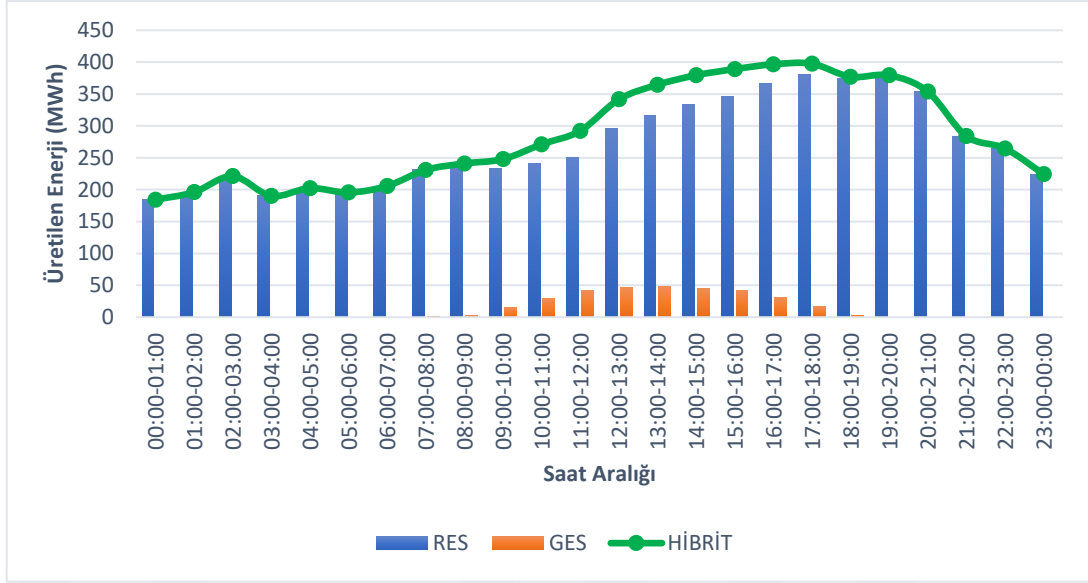
Aylar	Hibrit Santral Teorik Olarak Üretililecek Enerji (MWh)	Hibrit Santral Sahada Gerçekleşen Üretim (MWh)	Hibrit Santral Verim (%)
Ocak	12.596,44	6.200,04	49,22
Şubat	15.436,15	6.829,88	44,25
Mart	15.890,71	7.656,66	48,18
Nisan	9.555,60	5.097,20	53,34
Mayıs	14.892,00	8.082,70	54,28
Haziran	15.066,39	8.133,03	53,98
Temmuz	18.306,86	8.727,76	47,67
Ağustos	28.439,19	10.355,73	36,41
Eylül	29.353,29	10.478,25	35,70
Ekim	10.137,02	5.823,61	57,45
Kasım	12.810,28	6.278,48	49,01
Aralık	11.980,88	6.722,82	56,11
TOPLAM	194.463,81	90.386,17	46,48

Çizelge 6.9.'a göre hibrit santralin teorik olarak üretebileceği enerji 194.463,81 MWh olarak hesaplanmıştır. Sahada gerçekleşen üretim ise 2023 yılı için 90.386,17 MWh olmuştur. Hibrit santralin aylık olarak verim hesabı incelendiğinde verimi en yüksek olan ay %57,45 ile Ekim ayı olmuştur. Verimin en düşük olduğu ay %35,70 ile Eylül ayıdır. Hibrit santralin verimi 2023 yılı için %46,48 olarak hesaplanmıştır.



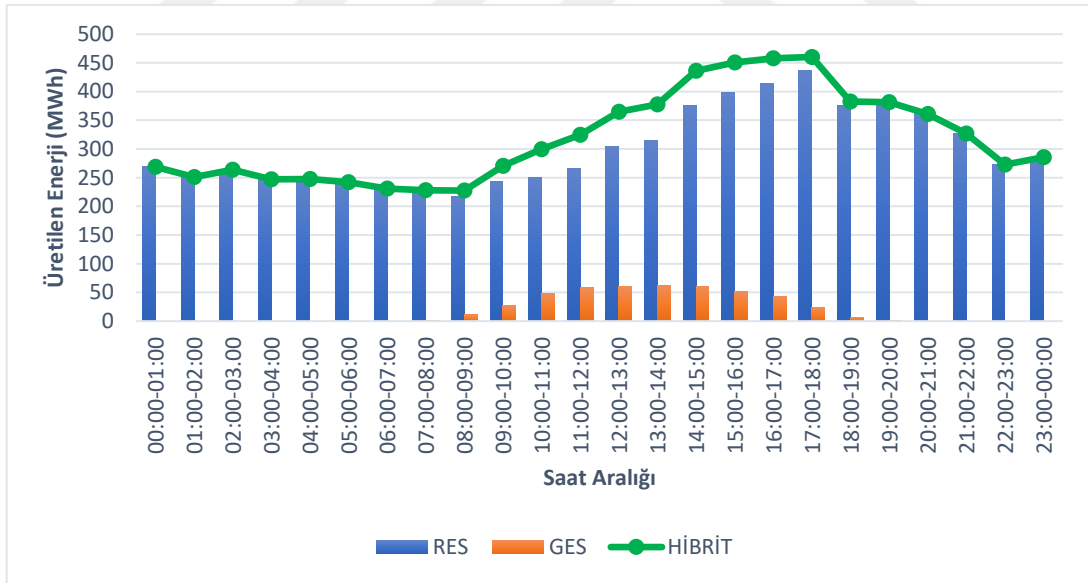
Şekil 6.10. Ocak ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Aylara göre saatlik bazda üretim verileri Ocak ayı için Şekil 6.10.'da verilmiştir. Buna göre RES Ocak ayında 17:00-18:00 ve 18:00-19:00 saatleri arasında en fazla üretimi yaparken GES en fazla üretimi 12:00-13:00 ve 13:00-14:00 saatleri arasında yapmıştır. Ayrıca GES üretimi 09:00-18:00 saatleri arasında gerçekleşmiştir.



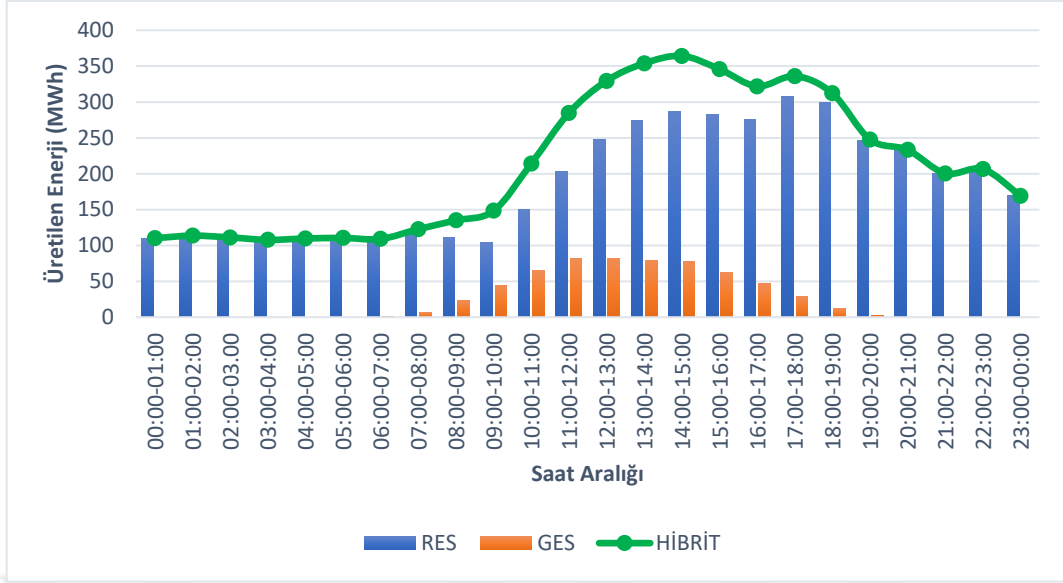
Şekil 6.11. Şubat ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Şubat ayı üretim verileri Şekil 6.11.'de gösterilmektedir. Buna göre GES 09:00 ve 18:00 saatleri arasında üretim yaparak santrale katkı sağlamıştır.



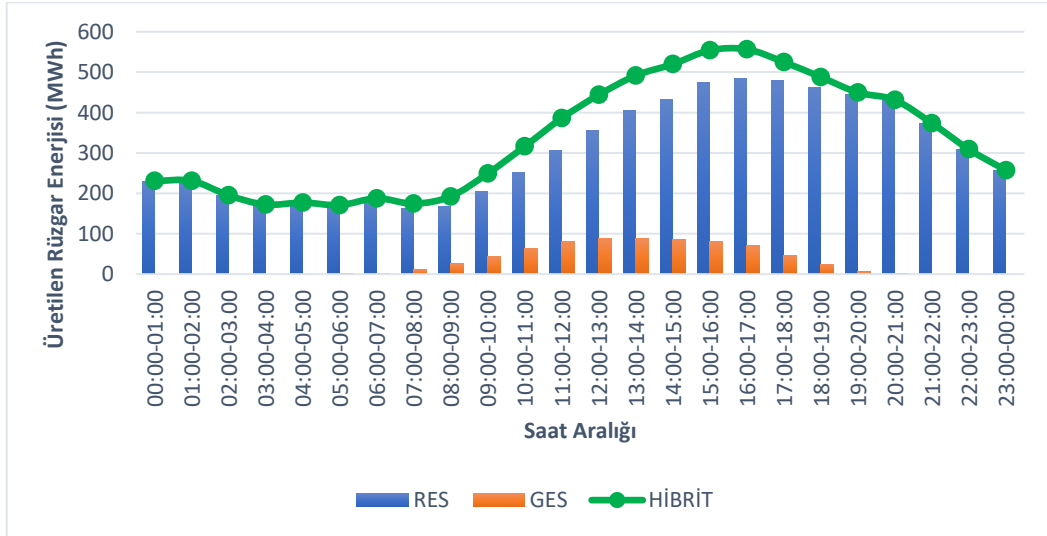
Şekil 6.12. Mart ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Şekil 6.12.'ye göre Mart ayında RES en fazla üretimi 17:00-18:00 ve en az üretimi 08:00-09:00 saatleri arasında yaparken GES, 08:00 ile 19:00 arasında üretim yapmıştır.



Şekil 6.13. Nisan ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

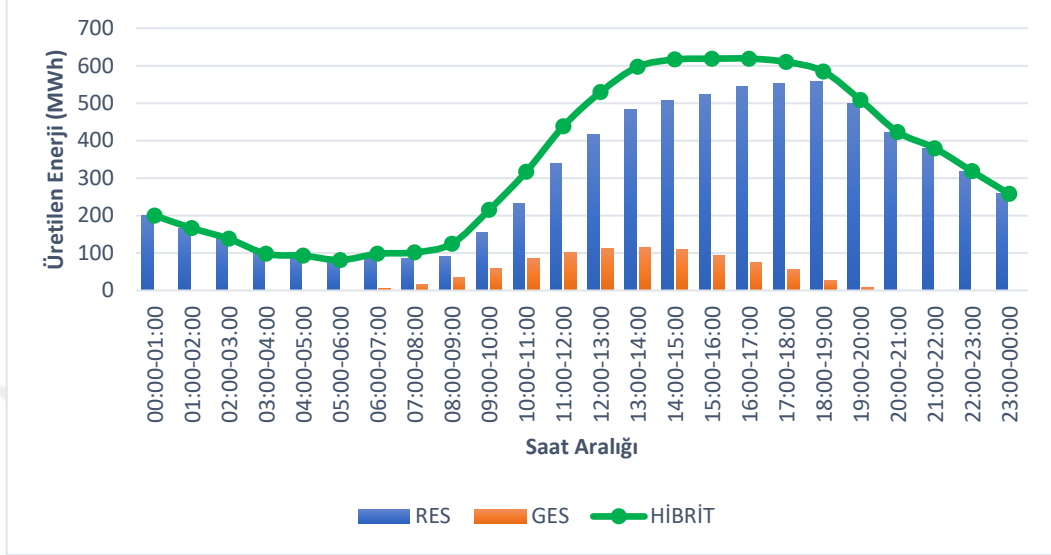
Şekil 6.13.'e göre Nisan ayında rüzgar hızı saat 10:00'dan itibaren artışa geçmiştir, en yüksek üretim 17:00 ile 19:00 saatleri arasında gerçekleşmiştir. GES ise artık 06:00-07:00 saat aralığında üretime başlamış ve üretimini 20:00'ye kadar devam ettirmiştir. GES için Ocak-Şubat-Mart aylarına kıyasla üretim artmıştır.



Şekil 6.14. Mayıs ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

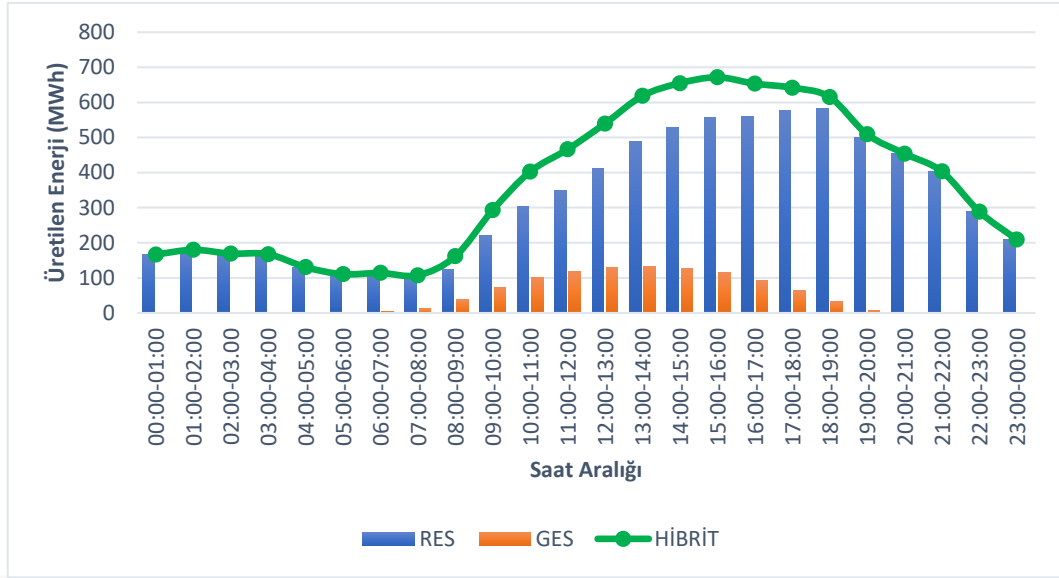
Şekil 6.14.'te Mayıs ayında RES ve GES üretiminin önceki aylara göre arttığı görülmektedir. RES üretimi saat 07:00'den 17:00'ye kadar sürekli artmıştır, gün bitimine

kadar azalmış fakat saat 10:00'daki üretim verisinin altına düşmemiştir. GES ise artık 05:00 gibi üretime başlamış 21:00'e kadar üretime devam etmiştir.



Şekil 6.15. Haziran ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Yaz mevsiminin ilk ayı olan Haziran ayı üretim verileri Şekil 6.15.'te verilmiştir. Buna göre rüzgar hızı sabah 08:00'e kadar düşüktür. 08:00'den itibaren 18:00'e kadar sürekli artmıştır. GES ise artık ilk defa saatlik olarak 100 MWh'nin üzerinde üretmeye başlamıştır.



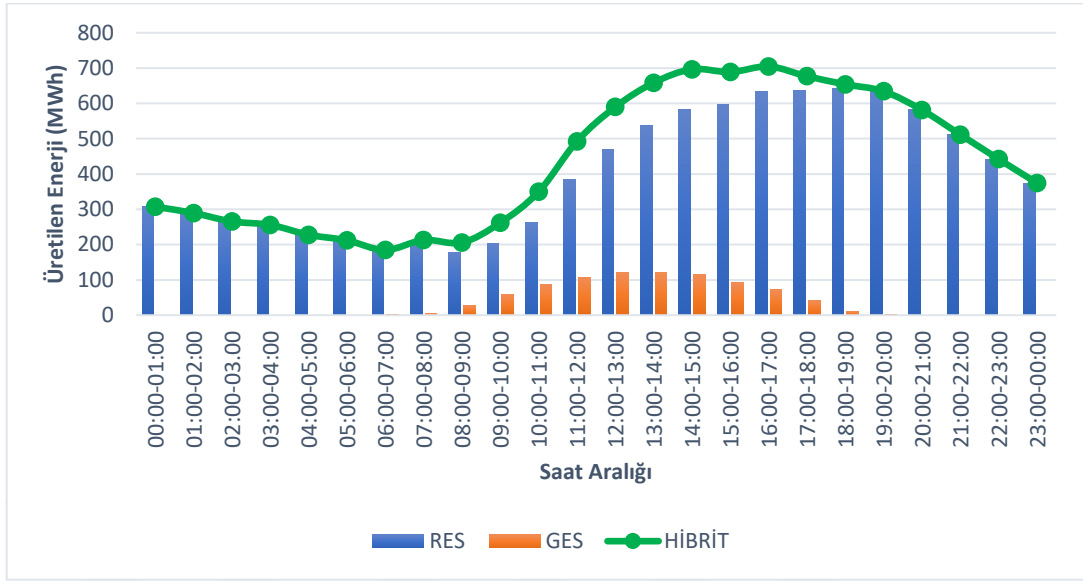
Şekil 6.16. Temmuz ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Şekil 6.16.'ya göre Temmuz ayında rüzgar hızı sabah 08.00'e kadar düşüktür. 08:00'den itibaren 18:00'e kadar sürekli artmıştır. GES üretimi en fazla bu aydır.



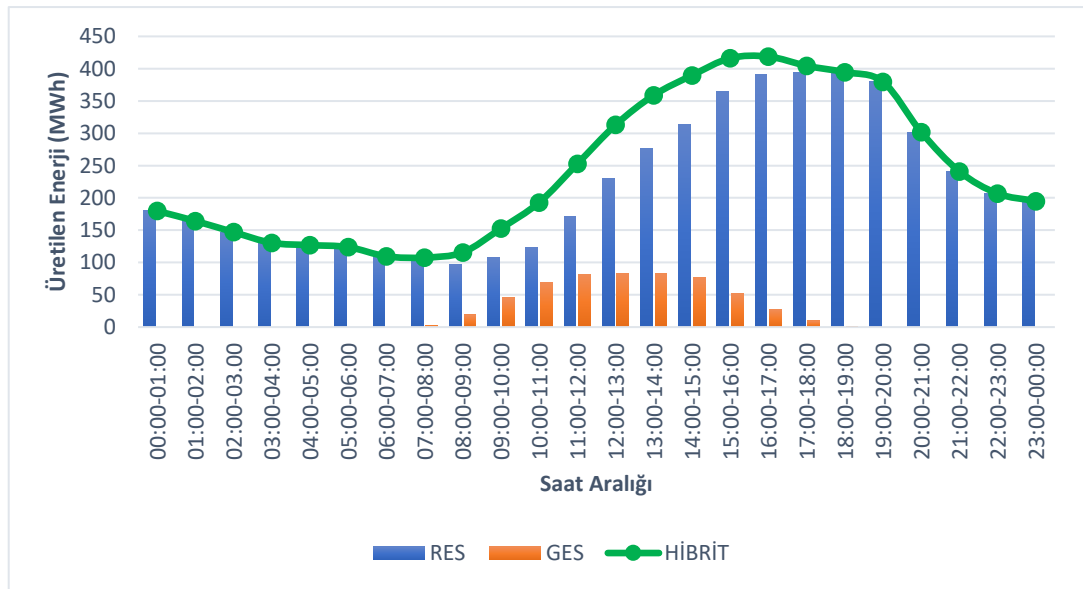
Şekil 6.17. Ağustos ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Şekil 6.17.'ye göre Ağustos ayında RES'in en düşük üretimi 07:00-08:00 saat aralığında olup en yüksek üretimi ise 18:00-19:00 saatleri arasındadır.



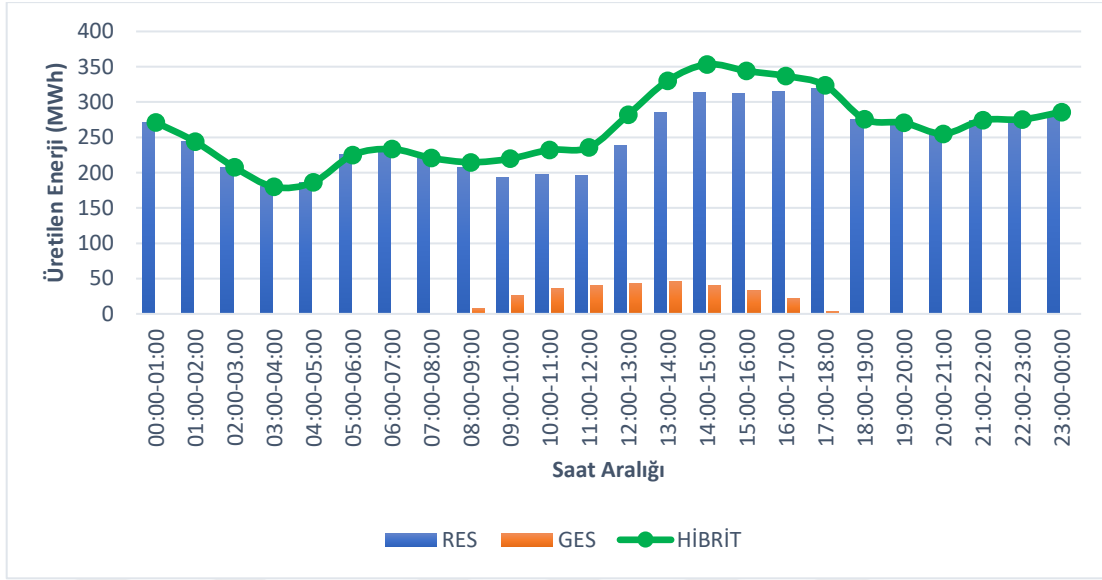
Şekil 6.18. Eylül ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Eylül ayı üretim verileri Şekil 6.18.'de gösterilmiştir. 15:00 ile 20:00 arasında RES üretim değerleri birbirine yakın ve en yüksektir.



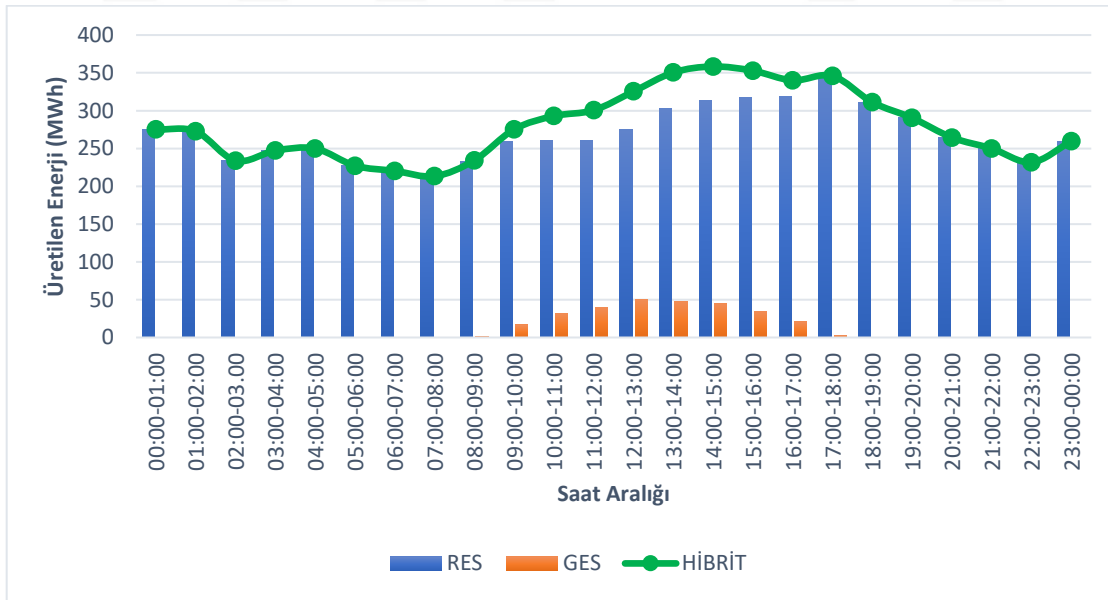
Şekil 6.19. Ekim ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

Ekim ayı üretim verileri Şekil 6.19.'da gösterilmiştir. RES sinüs eğrisine benzer bir grafik vermiştir.



Şekil 6.20. Kasım ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

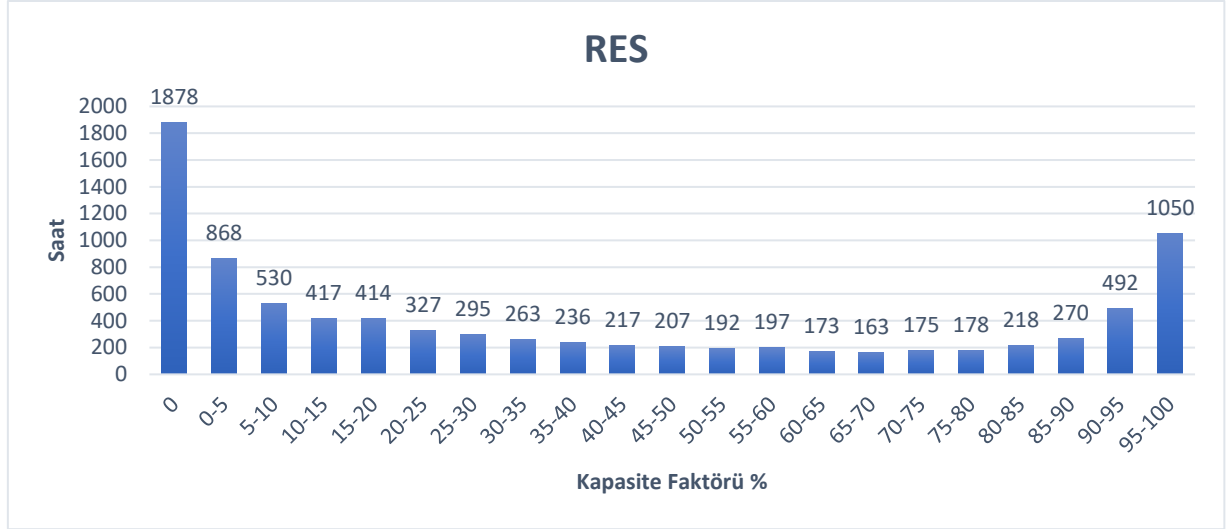
Şekil 6.20.'ye göre Kasım ayı için RES üretim verileri daha stabil bir görünümündedir. GES ise 08:00-18:00 saat aralığında üretime katkıda bulunmuştur.



Şekil 6.21. Aralık ayı saatlik RES ve GES üretim değerleri

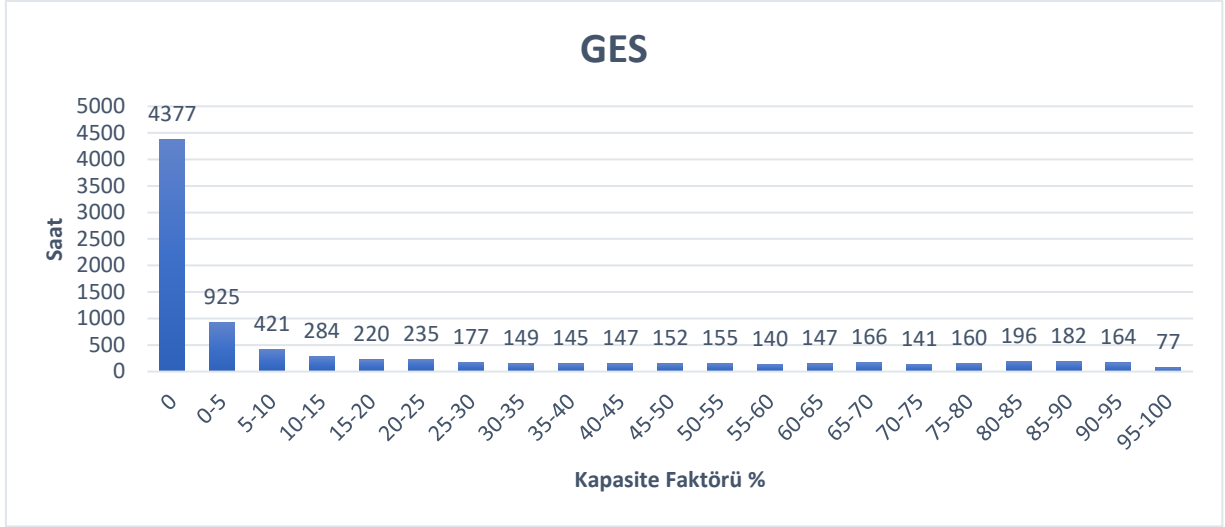
Aralık ayı üretim verileri Şekil 6.21.'de gösterilmiştir. RES daha dengeli bir görünümündedir. Saatlik bazda üretim değerleri birbirine yakındır.

Şekil 6.22. Şekil 6.23. ve Şekil 6.24.'te santralin 1 yılda hangi kapasite faktör aralığında kaç saat çalıştığı RES, GES ve hibrit santral için ayrı ayrı verilmiştir.



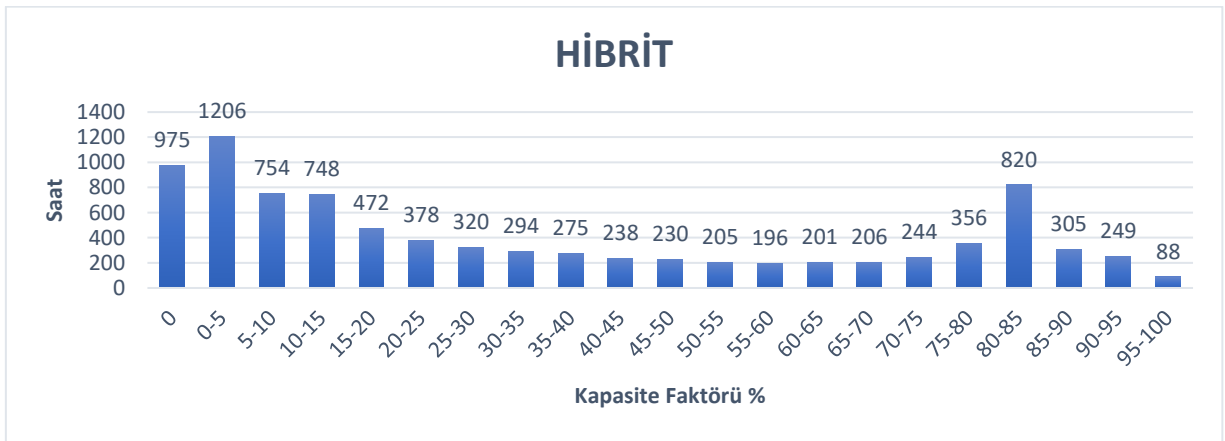
Şekil 6.22. RES için yıllık saat-kapasite faktör aralığı grafiği

Şekil 6.22.'ye göre bu santral sadece RES olarak değerlendirilirse 1 yıl içerisindeki 8760 saatin 1878 saati santral çalışmamıştır. Yani rüzgar, enerji üretecek güçte esmemiştir. İstisnai olarak türbinlerin bakım ve arıza zamanlarında da türbin çalışmayacağından yine bu aralıkta olduğu değerlendirilmesi yapılabilir. Yine benzer şekilde 868 saat RES %0-5 kapasite faktör aralığında çalışmıştır. Santral ana kaynak olarak RES iken yardımcı kaynak GES kurularak hibrit santrale dönüşmüştür.



Şekil 6.23. GES için yıllık saat-kapasite faktör aralığı grafiği

Şekil 6.23.'e göre GES tek başına değerlendirildiğinde bir günün neredeyse yarısı gece olduğundan ve kış mevsimi de hesaba katıldığında 8760 saatin 4377 saati %0 kapasite faktöründe, 925 saat %0-5 kapasite faktör aralığında çalışması olağandır. Diğer kapasite faktör aralıklarında ise yaklaşık aynı saat sayısı yayılmış durumdadır.



Şekil 6.24. Hibrit santral için yıllık saat-kapasite faktör aralığı grafiği

Şekil 6.24.'e göre inceleme yapıldığında hibrit santral için 975 saat santralin çalışmadığı görülmektedir. Sadece RES olsaydı 1 yıl içerisindeki 8760 saatin 1878 saati santral çalışmamıştı fakat santral yardımcı kaynak GES ilavesiyle birlikte hibrit santrale dönüştüğünde santralin yıl içindeki hiç çalışmadığı saat sayısı 975 saate düşmüştür. RES-GES bir bütün olarak enerji üretim santrali olduğuna göre bu yatırımın yıl içerisindeki enerji üretmediği saat sayısının azalması santralin daha işler bir hale geldiğini göstermektedir. Bu yönüyle değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji kaynak tabanlı bir santralin farklı bir yenilenebilir enerji kaynağının yardımcı kaynak olarak kullanılmasıyla hibrit santrale dönüşmesi santralin çalıştığı saat sayısını artırmıştır ve bu da bir yatırım için istenen önemli bir durumdur.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynak tabanlı hibrit bir santral olan Çaypınar Rüzgar/Güneş Hibrit Enerji Santrali'nin üretim verileri incelenerek kapasite faktörü ve verim hesabı yapılmıştır. Ayrıca üretim verileri RES ve GES için ayrı ayrı ve hibrit için birlikte değerlendirilmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgarın enerji üretimi mevsime bağlı olarak değişkenlik gösterir yani doğal davranışından dolayı üretimi aralıklıdır. Bir rüzgar enerji santraline yardımcı kaynak olarak güneş enerji santrali eklenerek hibrit santrale dönüşmesi ile rüzgarın aralıklı üretiminin telafi edildiği görülmüştür. Ayrıca RES için türbin arıza, bakım gibi durumlarda enerji üretiminde yaşanacak azalmanın yardımcı kaynak GES ile hibrit santrale dönüştüğünde GES'ten gelecek ilave üretimle telafi edileceği aşıkardır. GES'in özellikle yaz aylarında üretimi artırdığı, kış aylarında katkısının yaz aylarına kıyasla daha düşük olduğu, saat bazlı değerlendirildiğinde ise güneşin dik geldiği saatlerde üretimin pik yaptığı, günün belirli saatlerinde ise enerji üretmediği görülmüştür.

RES'in teorik olarak üretebileceği enerji 185.840,81 MWh, Betz limitine göre üretebileceği enerji 110.129,27 MWh olarak hesaplanırken sahada gerçekleşen üretim ise 83.048,60 MWh olmuştur. GES'in PVsyst yazılımına göre teorik olarak üretebileceği enerji 8.623 MWh olarak hesaplanırken sahada gerçekleşen üretim ise 7.026,56 MWh olmuştur. Santral RES iken RES/GES hibrit santrale dönüşerek ürettiği enerji 90.386,17 MWh'ye çıkmıştır ve santralin ürettiği enerji artmıştır.

Verim aylık bazda RES için %33,72 ile en düşük Eylül ayında iken %55,50 ile en yüksek Aralık ayında görülmüştür. GES için verim aylık bazda incelenirse %60,01 ile en düşük Kasım ayında iken %90,40 ile en yüksek Temmuz ayında görülmüştür. Yıllık bazda verim RES için %44,69 ve GES için %81,49 olarak hesaplanırken hibrit santralin verimi %46,48 olarak hesaplanmıştır.

Santralin sadece rüzgar kaynaklı olduğu duruma kıyasla hibrit santral olduğunda verimi artmıştır. Ayrıca hibrit santralin verimi %35,70 ile en düşük Eylül ayında iken %57,45 ile en yüksek Ekim ayında görülmüştür.

Kapasite faktörü aylık bazda RES için %24,71 ile en düşük Nisan ayında iken %53,02 ile en yüksek Eylül ayında görülmüştür. Aynı şekilde GES için kapasite faktörü %7,15 ile en düşük Aralık ayında iken %22,34 ile en yüksek Temmuz ayında görülmüştür. Hibrit santral için kapasite faktörü aylık bazda %23,06 ile en düşük Nisan ayında iken %47,40 ile en yüksek Eylül ayında görülmektedir. Yıllık bazda bakılacak olursa RES için kapasite faktörü %37,62, GES için %14,58 olarak hesaplanırken hibrit santralin kapasite faktörü %33,61 olmuştur.

Santral sadece rüzgar kaynaklı olduğu durumda 1878 saat hiç çalışmamışken hibrit santrale dönüştükten sonra hiç çalışmadığı saat sayısı 975 saate düşerek santral daha işler bir duruma geçmiştir. Yani santral, hibrit santrale dönüştükten sonra kapasite faktörü düşmüştür fakat saat bazlı inceleme yapıldığında ise santralin hiç çalışmadığı saat sayısının azalarak santrale işlerlik kazandırıldığı görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynak tabanlı bir santralin farklı bir yenilenebilir enerji kaynağının yardımcı kaynak olarak kullanılarak hibrit santrale dönüşmesi ile üretilen enerji ve santralin çalıştığı saat sayısı artmıştır.

Sonuç olarak bu santral özelinde enerji üretimi ve verimin arttığı fakat kapasite faktörünün düştüğü ancak santralin hiç çalışmadığı saat sayısının azaldığı görülmüştür. Neticede kapasite faktörü belirli bir periyotta üretilen toplam enerjinin tam kapasitede üretebileceği enerjiye yani kurulu güce oranı olarak tanımlanan bir katsayıdır. Santralin hibrit santrale dönüşerek üretim yapmadığı saat sayısının azalmasıyla yatırımın daha işler hale geldiği görülmüştür. Bu yüzden öneri olarak ülkemizdeki hibrit enerji santrallerinin sayısının artırılarak enerji üretiminin ve santral veriminin artmasının, mevcut santrale işlerlik kazandırılmasının ve üretimdeki açığımızın kapanmasının ülkemiz adına faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akkaş, A.A., (2001, 5-7 Nisan). *Rüzgar Enerjisi Sistemleri Performans Değerlendirmesi*, Rüzgar Enerji Sempozyumu, İzmir, Türkiye.
- Allouhi, H., Allouhi, A., Almohammadi, K. M., Hamrani A., & Jamil A. (2022). *Hybrid renewable energy system for sustainable residential buildings based on Solar Dis Stirling and wind türbine with hydrogen production*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116261>
- Amusan, O. T., Nnamdi, I., Nwulu, S., & Gbadamosi, S. L. (2023). *Techno-economic analysis of hybrid solar-biomass-wind for water pumping considering carbon tax and renewable energy rebate*. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.054>
- Ayan, A. (2022). *Biyokütle enerjisinin Türkiye'deki kullanım olanaklarının değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. Maltepe Üniversitesi Kütüphanesi.
- Bektaş, B., Hakyemez, C., Özçelik Yanık, D., & Yıldızca, O. (2021). *Hidrojen Enerjisi Bilgilendirme Notu [Hydrogen Energy Information Note]*. TSKB. Erişim: <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/hidrojen-enerjisi-bilgilendirme-notu-120721.pdf>
- Demirtaş, M. (2008). *Güneş ve rüzgâr enerjisi kullanılarak şebeke ile paralel çalışabilen hibrit enerji santral tasarımı ve uygulaması*. [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Gazi Üniversitesi Kütüphanesi.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2023) *Aşağı Kaleköy Barajı ve HES*. Erişim: <https://bolge09.dsi.gov.tr/Haber/Detay/4432> Erişim tarihi: 15.12.2023
- Dışişleri Bakanlığı. (2023) *Türkiye'nin Uluslararası Enerji Stratejisi [Turkey's International Energy Strategy]*. Erişim: https://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa Erişim tarihi: 16.01.2023
- Durak, M., & Özer, S., (2008) *Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama*, Enermet Yayınları.
- Eltayeb, W. A., Somlal, J., Kumar, S., & Rao, S. K. (2023). *Design and analysis of a solar-wind hybrid renewable energy tree*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100958>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023) *Elektrik*. Erişim: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> Erişim tarihi: 10.11.2023
- Genç, H. S., (2019). *Yenilenebilir Enerjili Hibrit Enerji Santrallerinin Modellenmesi ve Analizi*. [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Fırat Üniversitesi Kütüphanesi.
- Ghenai, C., Rasheed, M. A., Maitha, J., Alkamali, M. A., Ahmad, F., & Inayat, A. (2020). *Design of Hybrid Solar Photovoltaics/Shrouded Wind Turbine Power System for Thermal Pyrolysis of Plastic Waste*. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100773>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Gökçınar, R. E. (2008). *Rüzgar Enerjisi Fayda-Maliyet Analizi Ve Hibrit Sistemler*. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, & H., Jaszczur M. (2023). *A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications* <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- Kaplan, S. (2008). *Power Plants Characteristics and Costs Report*, Congressional Research Service, 108 p.
- Kalyon PV Güneş Teknolojileri, (2023) *Entegre Fabrika*, Erişim: <https://kalyonpv.com/> Erişim tarihi: 03.08.2023
- Keçecioğlu, Ö.F., Açıkgöz, H., & Şekkeli, M., (2016). *Power Quality Improvement Using Hybrid Passive Filter Configuration for Wind Energy Systems*. <https://doi.org/10.5370/jeet.2016.11>.
- Komrit, S., & Zabihian, F. (2023). *Comparative analyses of solar photovoltaic, wind turbine, and solar photovoltaic and wind turbine hybrid systems: Case study of Thailand* <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117479>
- Kontek Kontrol Teknolojileri ve Otomasyon. (2023). *Hibrit Enerji Santrali*. Erişim: <https://kontekenerji.com.tr/hibritenerjisantralleri/> Erişim tarihi: 21.10.2023
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2023) *Enerji Haritaları*. Erişim: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita> Erişim tarihi: 22.03.2023.
- Mohtasham, Javid. (2015). *Renewable energies*. Energy Procedia, 74, 1289-1297.
- Nurbay, N., & Çınar, A. (2005, 19-21 Ekim). *Rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması*. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin, 19–21.
- Oral, F., Behçet, R., & Aykut, K. (2017). *Hidroelektrik Santral Rezervuar Verilerinin Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi*, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 29-38.
- Özgür, D. (2008). *Gliserinden sıvı faz katalitik reforming yöntemi ile hidrojen üretimi*. [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Gazi Üniversitesi Kütüphanesi.
- Öztemir, M. H. (2011). *Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi ve Aydın-Salavatlı Sahası Elektrik Üretim Santrali*, MMO Tesisat Mühendisliği 9-15.
- Öztürk, H. (2012). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*, Birsen Yayınevi.
- Patel, M. R. (2006). *Wind and Solar Power Systems Design, Analysis and Operation*, Second Edition. Taylor & Francis Group.
- Pınar, A., Buldur, A., & Tuncer, T. (2020). *Türkiye'deki rüzgar enerji santralleri dağılışının coğrafi perspektiften analizi*. Doğu Coğrafya Dergisi, 25(43), 167-182.

KAYNAKLAR DİZİNİ

PVsyst Photovoltaic Software version 7.2.15.

Rahimi, I., Nikoo, M. R., & Gandomi A. H. (2023) *Techno-economic analysis for using hybrid wind and solar energies in Australia*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101092>

Ritchie, H., Max, Roser, & Rosado, P., (2022) *Global Electricity Review*. BP Statistical Review of World Energy. Erişim: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>

Scita, R., Noussan, M., & Mattei, F. E. (2020). *Green Hydrogen: The Holy Grail Of Decarbonisation? An Analysis Of The Technical And Geopolitical Implications Of The Future Hydrogen Economy*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3709789>

Suresh, V., Muralidhar, M., & Kiranmayi R. (2020). *Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.01.013>

Şekerci, E., Elfarra, M., Albasan, C. (2009, 4-5 Haziran). *Rüzgar Türbini Tahmini Yıllık Enerji Üretim Hesaplama Yöntemleri Ve Araziye Uygun Rüzgar Türbini Seçimi*, RÜGES 2. Rüzgar Sempozyumu, Samsun, Türkiye.

TEİAŞ. (2023). *Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri*. Erişim: <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> Erişim tarihi: 02.02.2024

Tina, G. M., Ventura, C., Sera, D., & S. Spataru, (2017). *Comparative assessment of PV plant performance models considering climate effect, Electric Power Components and Systems*. <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1362072>.

Yakub, A. O., Same, N. N., Owolabi, A. B., Nsefon, B. E. K., Suh, D., & Jeung-Soo, H. (2022). *Optimizing the performance of hybrid renewable energy systems to accelerate a sustainable energy transition in Nigeria: A case study of a rural healthcare centre in Kano*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100906>

Yavuz İ., Özbay H., (2020) *Rüzgar Türbinlerinde Kurulum ve Bakım Süreçleri: Bandırma Örneği*, Müh . Bil . ve Araş. Dergisi, 20: 58-68.

Yavuzdemir, M. (2012). *Hidrolik Santrallerin Sınıflandırılması ve Hidrolik Türbin Çeşitleri*, Enerji Piyasası Bülteni, 24: 59-63.

Wu, H. & West, S. R. (2024). *Co-optimization of wind and solar energy and intermittency for renewable generator site selection*. <https://doi.org/10.1016/j.helion.2024.e26891>

Wu, Y., Hu, Y., Xiao, X., Mao, C. (2016). *Efficiency assessment of wind farms in China using twostage data envelopment analysis*. Energy Conversion and Management, 46-55.

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A: Rüzgar Türbini Kataloğu

APPENDIX B – WIND TURBINE SPECIFICATIONS CHECKLIST

Specifications	Details
Wind Turbine Information	
Manufacturer	Vestas
Model	V136
Hub Height (m)	132 m
Operation Information	
Speed regulation	Pitch Control – Pitch regulated with variable speed
Rotational Speed (rpm)	5.6 – 15.3 rpm
Version Software for control of wind turbine	VOB
Rotor Information	
Type (Default is a 3 blade, horizontal, upwind turbine)	3 blade, horizontal, upwind turbine
Horizontal Distance from rotor centre to tower axis (m)	2.4 m
Diameter of Rotor (m)	136 m
Rotor Control Devices	microprocessor pitch control system OptiTip®
Blade Modifications	Trailing Edge Serrations
Blade Length (m)	66.7 m
Gearbox Information (expected)	
Type	Two planetary stages and one helical stage
Manufacturer	ZF Wind Power
Model Number	Not known at this time.
Generator Information (expected)	
Manufacturer	Vestas (VND)
Model Number	DASG 560/6M
Nominal Power (MW)	Up to 3.6 MW
Sound Data for tested wind turbine	
Overall sound power level IEC61400-11 test at hub height	Mode P01
	At 7.5 m/s: 101.0 dBA
	At 8.0 m/s: 102.2 dBA
	At 8.5 m/s: 102.8 dBA
	At 9.0 m/s: 103.1 dBA
	At 9.5 m/s: 103.5 dBA
	At 10.0 m/s: 103.6 dBA
	At 10.5 m/s: 103.6 dBA
	At 11.0 m/s: 103.8 dBA
	At 11.5 m/s: 103.5 dBA
	At 12.0 m/s: 103.8 dBA
	At 12.5 m/s: 103.9 dBA
	At 13.0 m/s: 103.4 dBA
Measurement Uncertainty (dB)	0.8 to 1.3
Grid Terminal Frequency of Tester	N/A

Sound Data for tested wind turbine	Mode S01
Overall sound power level IEC61400-11 test at hub height	At 7.0 m/s: 100.5 dBA
	At 7.5 m/s: 101.4 dBA
	At 8.0 m/s: 103.7 dBA
	At 8.5 m/s: 104.0 dBA
	At 9.0 m/s: 104.1 dBA
	At 9.5 m/s: 104.7 dBA
	At 10.0 m/s: 104.6 dBA
	At 10.5 m/s: 104.6 dBA
	At 11.0 m/s: 104.4 dBA
	At 11.5 m/s: 104.4 dBA
	At 12.0 m/s: 104.3 dBA
	At 12.5 m/s: 104.4 dBA
	At 13.0 m/s: 104.4 dBA
	At 13.5 m/s: 104.5 dBA
	At 14.0 m/s: 104.4 dBA
	At 14.5 m/s: 104.4 dBA
	At 15.0 m/s: 104.7 dBA
	At 15.5 m/s: 104.5 dBA
Measurement Uncertainty (dB)	0.7 to 1.2
Grid Terminal Frequency of Tester	N/A
Sound Data for tested wind turbine	Mode S02
Overall sound power level IEC61400-11 test at hub height	At 7.0 m/s: 99.8 dBA
	At 7.5 m/s: 101.3 dBA
	At 8.0 m/s: 102.1 dBA
	At 8.5 m/s: 102.2 dBA
	At 9.0 m/s: 102.2 dBA
	At 9.5 m/s: 101.7 dBA
	At 10.0 m/s: 102.1 dBA
	At 10.5 m/s: 101.9 dBA
	At 11.0 m/s: 101.9 dBA
	At 11.5 m/s: 102.2 dBA
	At 12.0 m/s: 102.7 dBA
	At 12.5 m/s: 103.1 dBA
	At 13.0 m/s: 102.7 dBA
Measurement Uncertainty (dB)	0.8 to 1.2
Grid Terminal Frequency of Tester	N/A



Additional Specifications	Details
Operating Information	
Swept Area (m ²)	14,527 m ²
Rated Power Output (MW)	Up to 3.6 MW
Aerodynamic Brakes	Full blade feathering with 3 pitch cylinders
Cut-in Wind Speed (m/s)	3 m/s
Cut-out Wind Speed (m/s)	22.5 m/s
Nominal Power Wind Speed (m/s)	11.5 m/s
Rotor Information	
Aerodynamic Profile of Blade	N/A
Sound Data for tested wind turbine	
Maximum tonal audibility (dB)	-2.9 to -1.1, otherwise No relevant Tone
Provide a Power Curve for each wind turbine proposed for the Project	N/A

Ek Açıklama-B: Güneş Paneli Kataloğu

[illegible]