**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

# İŞLETİLMEKTE OLAN BİR RÜZGÂR SANTRALİNE HİBRİT GÜNEŞ SANTRALİ TASARIMI VE ANALİZİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali OKUR**

**EYLÜL 2024**
**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

# İŞLETİLMEKTE OLAN BİR RÜZGÂR SANTRALİNE HİBRİT GÜNEŞ SANTRALİ TASARIMI VE ANALİZİ

**Ali OKUR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**
**" ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİS"**
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14/ 08 / 2024**

**Tezin Savunma Tarihi : 20 / 09 / 2024**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ**

**Trabzon 2024**

# ÖNSÖZ

“İşletilmekte Olan Bir Rüzgâr Santraline Hibrit Güneş Santrali Tasarımı ve Analizi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ’ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması boyunca bana her türlü desteği sunan ,biricik kızım Aybüke OKUR’un annesi, hayat arkadaşım, değerli eşim Kübra OKUR’a ve doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Şirin OKUR ve babam Mehmet OKUR’a, kardeşlerim Gülbahar ve Ahmet OKUR’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ali OKUR

Trabzon 2024

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "İşletilmekte Olan Bir Rüzgâr Santraline Hibrit Güneş Santrali Tasarımı ve Analizi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım

Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

20/09/2024

Ali OKUR

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa No**

ÖNSÖZ ..... III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ ..... IV
İÇİNDEKİLER ..... V
ÖZET ..... VII
SUMMARY ..... VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... IX
TABLOLAR DİZİNİ ..... XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... XII
1. GENEL BİLGİLER ..... 1
1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ..... 3
1.1.1. Hidroelektrik Enerji ..... 3
1.1.2. Rüzgâr Enerjisi ..... 4
1.1.3. Güneş Enerjisi ..... 4
1.1.4. Jeotermal Enerji ..... 5
1.1.5. Biyokütle Enerjisi ..... 5
1.1.6. Hidrojen Enerjisi ..... 6
1.1.7. Dalga Enerjisi ..... 6
1.2. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli ..... 7
1.3. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli ..... 9
1.4. Hibrit Elektrik Santralleri ..... 11
1.5. Rüzgâr Güneş Hibrit Elektrik Santrali ..... 12
1.5.1. Rüzgâr Türbini ..... 13
1.5.2. Orta Gerilim Hücreleri ..... 16
1.5.3. Orta Gerilim Kabloları ..... 17
1.5.4. Güneş Paneli ..... 17
1.5.5. DC Kablolar ..... 24
1.5.6. DC Combiner Box ..... 24
1.5.7. Evirici ..... 25
1.5.8. Güç Trafosu ..... 28
1.5.9. Şalt Sahası ..... 30
1.5.10. Otomasyon Sistemi ..... 31
1.5.11. Meteorolojik Ölçüm İstasyonları ..... 31

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ..... 33
2.1. Santral Bölgesi Seçimi ..... 33
2.1. Ana Kaynak Santralin (RES) Tanımı ..... 34
2.2. Yardımcı Kaynak Gücünün Belirlenmesi ..... 37
2.3. Hibrit Santralin Tasarımı ..... 40
2.3.1. Güneş Paneli ..... 40
2.3.2. Evirici ..... 42
2.3.3. GES Tesisi DC Güç Hesabı ve DC Tek Hat Şeması ..... 44
2.3.4. RES-GES Hibrit Santral Bağlantısı ..... 46
2.4. Hibrit Santralin İşletme Algoritması ..... 47
3. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 50
3.1. Bölgenin Rüzgar Potansiyeli ..... 50
3.2. Bölgenin Güneş Potansiyeli ..... 52
3.3. Hibrit Santralin Analizi ve Analiz Çıktılarının Değerlendirilmesi ..... 55
4. SONUÇLAR ..... 66
5. ÖNERİLER ..... 67
6. KAYNAKLAR ..... 68
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

# ÖZET

## İŞLETİLMEKTE OLAN BİR RÜZGÂR SANTRALİNE HİBRİT GÜNEŞ SANTRALİ TASARIMI VE ANALİZİ

Ali OKUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ
2024, 70 Sayfa

Artan elektrik ihtiyacının karşılanması için kamu kurumları ve elektrik üretim sektörü, yapılan uygulamaların yenilenebilir enerji alanında yapılması adına büyük çaba sarf etmektedir. Son yıllarda popüler olan hibrit elektrik santral uygulamaları da bu çalışmalara büyük katkılar sunarak güzel örnekler teşkil etmektedir.

Çalışılan bu tez çalışmasında ise, daha önce kurulumu tamamlanmış ve halihazırda işletmede olan bir rüzgâr elektrik santrali ele alınmaktadır. İşletmede olan bu rüzgâr santraline hibrit bir güneş santralinin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Çalışmada kurulu olan bir rüzgâr santraline ait yerleşim, tasarım, kurulum ve işletme verileri incelenmiştir. Ardından bu rüzgâr enerji santrali ile, şebeke bağlantısı aynı bağlantı noktasına ve aynı trafoya sahip olacak bir güneş santrali tasarımı yapılmıştır. Yapılacak yeni güneş santraline ait yer seçimi, yerleşim ve teknik tasarım çalışmaları yürütülmüştür. Tasarımı yapılacak yeni tesisin kurulum ve işletme yönünden teknik analizleri çeşitli programlar vasıtasıyla incelenerek analiz sonuçları yorumlanmıştır. Bunun yanı sıra kurulum ve işletmeye yönelik olarak santralin maliyeti ile işletme sürecindeki ekonomik getirisi analiz edilmiştir. Ayrıca mevcut mevzuatsal yükümlülüklere de uygun olarak işletilecek olan yeni hibrit tesisin lisans gücünü aşmaksızın nasıl işletilmesi gerektiği ile ilgili olarak bir işletme mantığı çalışılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları neticesinde, bir hibrit santralin tesis edilebilirliği ve işletilebilirliği ortaya konulmuştur. Sektörde yapılacak bu tür yatırımlara ve yatırımlar sonrasında yapılacak hibrit işletme operasyonlarına yol gösteren bir tez çalışması ortaya koyulmuştur.

**Anahtar Kelimeler**: Güneş, rüzgâr, hibrit santral, enerji, elektrik, üretim

Master's Thesis

**SUMMARY**

DESIGN AND ANALYSIS OF A HYBRID SOLAR POWER PLANT
FOR AN OPERATING WIND POWER PLANT

Ali OKUR

Karadeniz Technical University
Institute of Science and Technology
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ
2024, 70 Pages

To meet the increasing electricity need, public institutions and the electricity generation sector are making great efforts to implement applications in the field of renewable energy. Hybrid power plant applications, which have become popular in recent years, also make great contributions to these studies, and constitute good examples.

In this thesis study, a wind power plant, which has already been installed and is currently in operation, is discussed. A hybrid solar power plant was designed and analyzed for this wind power plant, which is in operation. In the study, layout, design, installation, and operation data of an established wind power plant was examined. Then, a solar power plant design was made that would have the same connection point and the same transformer as the wind power plant. Site selection, layout and technical design studies for the new solar power plant were carried out. The technical analysis of the new facility to be designed in terms of installation and operation was examined through various programs and the analysis results were interpreted. In addition, the cost of the power plant for installation and operation and its economic return during the operation process were analyzed. In addition, a business logic has been studied on how the new hybrid facility, which will be operated in accordance with current legislative obligations, should be operated without exceeding its license power. As a result of the analysis results, the feasibility and operability of a hybrid power plant has been demonstrated. A thesis study has been presented that guides such investments to be made in the sector and the hybrid business operations to be carried out after the investments.

**Key Words:** Solar, wind, hybrid power plant, energy, electricity, production

## ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa No**

Şekil 1. 100 Metre Yükseklik İçin Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı ..... 7
Şekil 2. 100 Metre Yükseklik İçin Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı ..... 8
Şekil 3. 100 Metre Yükseklik İçin Kapasite Faktörü Dağılımı ..... 8
Şekil 4. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası ..... 9
Şekil 5. Yıllara Göre Güneş Santralleri Kurulu Gücü ..... 10
Şekil 6. Hibrit Elektrik Santrali Temel Şeması ..... 11
Şekil 7. Rüzgâr-Güneş Hibrit Santral Tek Hat Şeması Diyagramı ..... 12
Şekil 8. Yatay Eksenli ve Üç Kanatlı Modern Rüzgâr Türbinleri (VESTAS, 2024) ..... 13
Şekil 9. Rüzgâr Türbini Kesiti (Resolt Enerji, 2024) ..... 14
Şekil 10. Türbin Kanatları Süpürme Alanının Şematik Gösterimi ..... 15
Şekil 11. Orta Gerilim Hücreleri (SchneiderElectric, 2024) ..... 16
Şekil 12. 36 kV Orta Gerilim Kablo Kesiti (HES Kablo, 2024) ..... 17
Şekil 13. Güneş Paneli (Jinko, 2024) ..... 18
Şekil 14. FV Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi ..... 19
Şekil 15. Fotovoltaik Pil Panelinin Çıkış Akım ve Çıkış Gerilim Ölçümü (Altas, 1998) ..... 20
Şekil 16. Fotovoltaik Pil Pilin Akım-Gerilim (I-V) Karakteristiğinin Yükle Değişimi ..... 20
Şekil 17. FV Pilin I-V ve P-V Karakteristikleri (Altas, 1998) ..... 22
Şekil 18. Yıllara Göre Panel Veriminin Gelişimi (Independent, 2024) ..... 23
Şekil 19. Solar Kablo (3DE3, 2024) ..... 24
Şekil 20. DC Combiner Box (Weidmüller, 2024) ..... 25
Şekil 21. Tek Fazlı Tam Dalga Köprü Evirici ..... 26
Şekil 22. Merkezi Evirici (ABB, 2024) ..... 27
Şekil 23. String Evirici (ABB, 2024) ..... 27
Şekil 24. Güç Trafosu Şematik Gösterimi ..... 28
Şekil 25. Güç Trafosu (BEST Trafo, 2024) ..... 29
Şekil 26. Sanko Enerji Sanibey Barajı Şalt Sahası (Sanko Enerji, 2024) ..... 30
Şekil 27. Anenometre (Ölçüm Cihazları, 2024) ..... 32
Şekil 28. Piranometre (EIF, 2024) ..... 32
Şekil 29. Santral Bölgesinin Seçimi ..... 34
Şekil 30. Rüzgâr Santrali Genel Yerleşim Planı ..... 36

Şekil 31. Rüzgâr Santrali Tek Hat Şeması ..... 36
Şekil 32. Sanko Enerji Yıllık Üretim Miktarları (Sanko Enerji, 2024) ..... 39
Şekil 33. Güneş Panelinin Mekaniksel Özellikleri (Kalyon PV, 2024) ..... 40
Şekil 34. Güneş Paneli Ön Yüz Akım-Gerilim Eğrisi (Kalyon PV, 2024) ..... 41
Şekil 35. Güneş Paneli Arka Yüz Akım-Gerilim Eğrisi ..... 42
Şekil 36. ABB PVS-980 Merkezi Evirici (Fimer SPA, 2024) ..... 43
Şekil 37. GES Tesisi DC Tek Hat Şeması Şematik Gösterimi ..... 46
Şekil 38. RES-GES Hibrit Santrali Tek Hat Şeması Şematik Gösterimi ..... 47
Şekil 39. Hibrit Santralin İşletme Algoritması ..... 49
Şekil 40. Karaman Rüzgâr Hızı Dağılımı ..... 50
Şekil 41. Karaman Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı ..... 51
Şekil 42. Karaman Rüzgâr Kapasite Faktörü Dağılımı ..... 52
Şekil 43. Karaman Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası ..... 53
Şekil 44. Karaman Güneşlenme Süresinin Aylara Göre Değişimi ..... 54
Şekil 45. Karaman Yıllık Üretilebilecek Enerji Miktarı ..... 54
Şekil 46. Santral Bölgesine Ait Karakteristikler ..... 55
Şekil 47. Sistem Özeti ..... 56
Şekil 48. PV String Karakteristikleri ..... 57
Şekil 49. String Kayıpları ..... 57
Şekil 50. Sistemin Ana Çıktıları ..... 59
Şekil 51. Kayıp Diyagramı ..... 60
Şekil 52. Sistem Giriş Çıkış Güç Diyagramları ..... 61
Şekil 53. Enerji Üretim Analiz (P50) Değerlendirme Sonuçları ..... 62
Şekil 54. Sistemin Tek Hat Şeması ..... 62

## TABLOLAR DİZİNİ

**Sayfa No**

Tablo 1. Yerli Enerji Kaynaklarına Ait Kurulu Gücün Türkiye Toplam Kurulu Gücü İçindeki Payının Yıllar İtibariyle Gelişimi (2000-2022) ..... 2
Tablo 2. Rüzgâr Elektrik Santrali Özellikleri ..... 35
Tablo 3. N131/3600 Türbin Özellikleri (Nordex, 2024) ..... 35
Tablo 4. Karaman Aylık Bazda Güneşlenme Süresi ..... 38
Tablo 5. Güneş Panelinin Elektriksel Özellikleri (Kalyon PV, 2024) ..... 41
Tablo 6. SMA Sunny Central 4400 UP Merkezi Evirici Teknik Özellikleri ..... 43
Tablo 7. SMA Sunny Central 4400 UP Merkezi Eviriciye Entegre Trafo Teknik Özellikleri ..... 44
Tablo 8. SMA Sunny Central 4400 UP Merkezi Trafoya Entegre Kesici Teknik Özellikleri ..... 44
Tablo 9. Karaman Rüzgâr Hızı Verileri ..... 50
Tablo 10. Karaman Rüzgâr Güç Yoğunluğu Verileri ..... 51
Tablo 11. Karaman Rüzgâr Kapasite Faktörü Verileri ..... 52
Tablo 12. PVsyst Programından Alınan GES Saatlik Üretim Çıktısı ..... 63
Tablo 13. RES Tesisine Ait 1 Günlük Saatlik Üretim Verileri ..... 64
Tablo 14. RES Üretimi ve GES Simülasyon Üretimi Üzerinden Toplam Üretim Değerinin Hesaplanması ..... 65

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| $MWh$ | : Megawatt saat (1 saatte üretilen enerji miktarı) |
| GW | : Gigawatt |
| $CO_2$ | : Karbon di-oksit |
| GES | : Güneş Enerji Santrali |
| RES | : Rüzgâr Enerji Santrali |
| PR | : Performance Ratio (Performans Oranı) |

# 1. GENEL BİLGİLER

Dünya üzerinde sürekli olarak artan nüfusun tüketim ve modern yaşam koşulları doğrultusunda elektrik enerjisine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Öyle ki; son yıllarda elektrik yaşamın adeta vazgeçilmezi haline gelmiştir. Bu vazgeçilmezin karşılanması için ise farklı kaynaklar kullanılmakta olup, yüksek oranda kullanılan fosil yakıtlar nedeniyle de elektrik enerjisi üretimi en büyük $CO_2$ kaynağı olarak başı çekmektedir. Artan elektrik talebinin karşılanması adına fosil yakıtlı elektrik enerjisi üretim son yıllarda yerini giderek daha temiz kaynaklara bırakmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirdiğimiz bu kaynakların kullanımının giderek artması, elektrik enerjisi her ne kadar $CO_2$ üretimi konusunda büyük pasta dilimine sahip olsa bile, elektrik enerjisini net sıfır emisyon geçişinde lider bir konuma yerleştirmiştir. Hali hazırda elektrik üretiminin %60'ından fazlası fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bu oranın düşürülmesi ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının arttırılması adına ülkeler üzerine düşenleri yapmalı ve bu konudaki destekleyici tutumlarını arttırmalıdır. (IEA, 2024)

Fosil yakıtların kullanımının azaltılması gerekliliği Dünya da ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi ve bu yönelimin sonuçları olarak bu alanda yapılan yatırımları giderek arttırmaktadır. 2000 yılından 2022 yılına kadar olan süreçte Türkiye'de yerli kaynaklara ait kurulu gücün değişimi Tablo 1 ile verilmiştir. Bu veriler ışığında görüleceği üzere su gücüne dayalı üretim yapan tesisler 22 yıllık süreçte sürekli bir artma eğilimi göstermiştir. Bunun yanında 2007 yılı itibariyle rüzgâr santralleri, 2010 itibariyle jeotermal santraller ve 2014 itibariyle de güneş santralleri kurulumları hızlı bir ivme yakalamıştır. Yakalanan bu ivmenin de sonucu olarak gelinen noktada yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi hatırı sayılır bir konuma yerleşmiştir. 2022 yılı itibariyle 103.809 MWh'lik kurulu güç içerisinde hidrolik güç %30 ile yenilenebilir enerji kaynaklarında lider konuma yerleşirken, rüzgâr enerjisi %11, güneş enerjisi %9 gibi azımsanamayacak bir kurulu güç oranıyla hizmet vermeye devam etmektedir. Tabloda açıkça görülmektedir ki ülkemizde yıllar geçtikçe yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapma talebi giderek artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik oluşan bu yatırım talebinin son yıllardaki en somut verileri olarak, 2022 yılı içerisinde lisanslı/lisanssız üretim yapacak 15 MWh jeotermal santral, 101 MWh hidroelektrik santral, 813 MWh

rüzgâr santrali, 1609 MWh güneş santralinin imalatı tamamlanarak işletmeye alınmıştır. (Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2024)

Tablo 1. Yerli Enerji Kaynaklarına Ait Kurulu Gücün Türkiye Toplam Kurulu Gücü İçindeki Payının Yıllar İtibariyle Gelişimi (2000-2022)
(Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2024)

**YERLİ ENERJİ KAYNAKLARINA AİT KURULU GÜCÜN TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜCÜ İÇİNDEKİ PAYININ YILLAR İTİBARİYLE GELİŞİMİ**
*ANNUAL DEVELOPMENT OF DOMESTIC RESOURCES BASED INSTALLED CAPACITY SHARE IN TURKEY TOTAL INSTALLED CAPACITY*
**(2000-2022)**

Birim (Unit) : MW

| YILLAR *YEARS* | BARAJLI *DAM* | D.GÖL VE AKARSU *N.LAKE AND RUN OF RIVER* | HİDROLİK TOPLAM *TOTAL HYDRO* | JEOTERMAL *GEOTERMAL* | RÜZGAR *WIND* | GÜNEŞ *SOLAR* | YENİLENEBİLİR+ ATIK +ATIK ISI *RENEW.+WASTES + WASTE HEAT* | LİNYİT *LIGNITE* | TAŞKÖMÜRÜ+ ASFALTİT *HARD COAL +ASPHALTITE* | YERLİ KAYNAK KURULU GÜCÜ *DOMESTIC RESOURCES INSTALLED CAPACITY* | TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜCÜ *TOTAL INSTALLED CAPACITY* | YERLİ KAYNAK PAYI % *DOMESTIC RESOURCES SHARE %* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **2000** | 10.501,4 | 673,8 | 11.175,2 | 17,5 | 18,9 | | 23,8 | 6.508,9 | 335,0 | 18.079,3 | 27.264,1 | 66,3 |
| **2001** | 10.959,4 | 713,5 | 11.672,9 | 17,5 | 18,9 | | 23,6 | 6.510,7 | 335,0 | 18.578,6 | 28.332,4 | 65,6 |
| **2002** | 11.469,4 | 771,5 | 12.240,9 | 17,5 | 18,9 | | 27,6 | 6.502,9 | 335,0 | 19.142,8 | 31.845,8 | 60,1 |
| **2003** | 11.752,4 | 826,3 | 12.578,7 | 15,0 | 18,9 | | 27,6 | 6.438,9 | 335,0 | 19.414,1 | 35.587,0 | 54,6 |
| **2004** | 11.752,4 | 893,0 | 12.645,4 | 15,0 | 18,9 | | 27,6 | 6.450,8 | 335,0 | 19.492,7 | 36.824,0 | 52,9 |
| **2005** | 11.967,4 | 938,6 | 12.906,1 | 15,0 | 20,1 | | 35,3 | 7.130,8 | 335,0 | 20.442,3 | 38.843,5 | 52,6 |
| **2006** | 11.966,9 | 1.095,8 | 13.062,7 | 23,0 | 59,0 | | 41,3 | 8.210,8 | 335,0 | 21.731,7 | 40.564,8 | 53,6 |
| **2007** | 12.262,0 | 1.132,9 | 13.394,9 | 23,0 | 147,5 | | 42,7 | 8.211,4 | 335,0 | 22.154,5 | 40.835,7 | 54,3 |
| **2008** | 12.422,8 | 1.405,9 | 13.828,7 | 29,8 | 363,7 | | 59,7 | 8.205,0 | 335,0 | 22.821,9 | 41.817,2 | 54,6 |
| **2009** | 12.681,7 | 1.871,7 | 14.553,3 | 77,2 | 791,6 | | 86,5 | 8.199,3 | 470,0 | 24.177,9 | 44.761,2 | 54,0 |
| **2010** | 13.067,1 | 2.764,2 | 15.831,2 | 94,2 | 1.320,2 | | 107,2 | 8.199,3 | 470,0 | 26.022,1 | 49.524,1 | 52,5 |
| **2011** | 13.529,3 | 3.607,7 | 17.137,1 | 114,2 | 1.728,7 | | 125,7 | 8.199,3 | 470,0 | 27.775,0 | 52.911,1 | 52,5 |
| **2012** | 14.744,6 | 4.864,8 | 19.609,4 | 162,2 | 2.260,6 | | 168,8 | 8.193,3 | 470,0 | 30.864,3 | 57.059,4 | 54,1 |
| **2013** | 16.142,5 | 6.146,6 | 22.289,0 | 310,8 | 2.759,7 | | 235,0 | 8.223,2 | 470,0 | 34.287,7 | 64.007,5 | 53,6 |
| **2014** | 16.606,9 | 7.036,3 | 23.643,2 | 404,9 | 3.629,7 | 40,2 | 299,1 | 8.281,3 | 470,0 | 36.768,4 | 69.519,8 | 52,9 |
| **2015** | 19.077,2 | 6.790,6 | 25.867,8 | 623,9 | 4.503,2 | 248,8 | 370,1 | 8.663,4 | 755,0 | 41.032,2 | 73.146,7 | 56,1 |
| **2016** | 19.558,6 | 7.122,5 | 26.681,1 | 820,9 | 5.751,3 | 832,5 | 496,4 | 9.126,5 | 755,0 | 44.463,7 | 78.497,4 | 56,6 |
| **2017** | 19.776,0 | 7.497,1 | 27.273,1 | 1.063,7 | 6.516,2 | 3.420,7 | 641,9 | 9.129,1 | 782,5 | 48.827,2 | 85.200,0 | 57,3 |
| **2018** | 20.536,1 | 7.755,3 | 28.291,4 | 1.282,5 | 7.005,4 | 5.062,8 | 818,9 | 9.456,1 | 782,5 | 52.699,6 | 88.550,8 | 59,5 |
| **2019** | 20.642,5 | 7.860,5 | 28.503,0 | 1.514,7 | 7.591,2 | 5.995,2 | 1.170,5 | 9.966,0 | 782,5 | 55.523,1 | 91.267,0 | 60,8 |
| **2020** | 22.925,0 | 8.058,9 | 30.983,9 | 1.613,2 | 8.832,4 | 6.667,4 | 1.502,8 | 9.988,7 | 782,5 | 60.370,9 | 95.890,6 | 63,0 |
| **2021** | 23.280,4 | 8.212,2 | 31.492,6 | 1.676,2 | 10.607,0 | 7.815,6 | 1.642,7 | 9.988,7 | 812,5 | 64.035,3 | 99.819,6 | 64,2 |
| **2022** | 23.275,2 | 8.296,3 | 31.571,5 | 1.691,3 | 11.396,2 | 9.425,4 | 1.921,3 | 10.066,3 | 812,5 | 66.884,5 | 103.809,3 | 64,4 |

Bu santral yatırımlarına ilave olarak yatırımcılar son yıllarda hibrit enerji santralleri kurulumuna ciddi bir ilgi ve araştırma eforu göstermişlerdir. Buna destek olarak ise 2020 yılı mart ayında yapılan mevzuat değişikliği yapılacak yeni hibrit yatırımların önünü açmıştır. (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020) Ana kaynak ile aynı bağlantı noktasının ve aynı lisans gücünün kullanıldığı hibrit santrallerin planlanmasında ve kurulumunda ana kaynak liderliğini rüzgâr santralleri üstlenirken, yardımcı kaynak olarak güneş santralleri başı çekmektedir. Öyle ki; 2023 yıl sonu verilerine göre üretim aşamasında olan ve planlanan hibrit santrallerin tamamına yakınının yardımcı kaynağı güneş olmuştur. Ana kaynak entegrasyonunun yapılabilmesi için sunduğu kolay imalat ve tasarım koşulları da bu kaynağın popülaritesini arttırmıştır. Sıkça yatırımcıların iştahını kabartan rüzgâr-güneş hibrit tesisleri giderek daha da popüler bir hale gelmektedir. Sıkı bir rekabet içerisinde kurulumları devam eden rüzgâr ve güneş santralleri arasındaki yarış 2023 yıl sonu itibariyle, hibrit kurulumları da göz önüne aldığımızda, güneşin üstün olduğu

bir noktaya evrilmiştir. 12,2 GW kapasiteye ulaşan güneş santrallerine karşın rüzgâr santralleri 11,7 GW seviyesine ulaşabilmiştir. Rüzgâr-güneş hibrit santrallerinin popülaritesini arttıran en önemli özelliklerden bir tanesi de rüzgâr ile güneş kaynağı arasında bulunan ters ilişkidir. Bu ters ilişki, üretim kapasitesi düşen kaynak eksikliğini diğer kaynağın tamamlaması ile yatırımcıyı avantajlı bir noktaya konumlandırmaktadır. Bu gelişmelerin yanında yüzer güneş santrallerinin de yakın gelecekte benzer bir şekilde değerlendirilmesi ihtimali güçlü bulunmaktadır. Tüm bunlara ilave olarak her ne kadar yatırımcılar hibrit santral kurulumu için iştahlı olsalar da yapılacak mevzuat düzenlemeleri hibrit santral kurulumlarını bir başka üst seviyeye taşıyabilir. (EMBER, 2024)

## 1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, sürekliliği doğal yollardan elde edilebilen enerjiye verilen genel bir isimlendirmedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise bu enerjinin üretilmesi için gerekli olan kaynaklar için tabir edilmektedir. Doğa yenilenebilir enerji üretimi için gerekli kaynağı farklı şekiller ile insanların kullanımına sunmaktadır. Bu kaynaklar su, rüzgâr, ışınım, dalga, jeotermal gibi kaynaklardır. Bu kaynakların sürekli olarak kullanımı doğanın getirdiği iklimsel ve mevsimsel koşullar nedeniyle mümkün olmaktadır. Bu kaynakların doğru kullanılması ve doğanın korunması son derece elzemdir. Kirliliğe neden olmayan ve kullanımı son derece güvenli olan bu kaynakların kullanılması sırasında bu kaynakların korunması büyük önem arz etmektedir. (Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği, 2024)

Başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarını şu şekilde sıralamak mümkündür.

### 1.1.1. Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerji kaynakları suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin kullanıldığı kaynaklardır. Bu kaynaklar barajlı, regülatörlü, pompaj depolamalı tiplerde hidroelektrik santrallerde kullanılmaktadır. Hidroelektrik santraller, potansiyel enerji olarak depolanmış olan suyun kinetik enerjiye dönüştürülerek belirli bir yükseklikten, belirlenen ve değiştirilebilen debilerde su türbinlerinden geçirilmesi ile elektrik enerjisi üretim esasına dayanır. Dünya da ve ülkemizde hidroelektrik enerjisinden elektrik üretimi en büyük paya sahiptir.

2022 yılı itibariyle ülkemizde bulunan hidroelektrik santral kurulu gücü 31.571 MWh seviyesine ulaşmıştır. Aynı zamanda arz güvenliği noktasında çok önemli bir kaynak olarak şebekeye kararlı enerji sağlanması için hizmet veren en güvenilir kaynakların başında gelmektedir. (Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2024)

### 1.1.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisini oluşturan, havanın yarattığı sürekli kinetik enerjidir. Bu kinetik enerjiyi rüzgâr türbinleri vasıtasıyla kullanmak mümkündür. Yüzyıllardır farklı amaçlar için kullanılmış olan rüzgâr enerjisi son yıllarda ağırlıklı olarak elektrik enerjisi üretimi için kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik enerjisi üretimi için kullanılan rüzgâr türbinlerinin ana üretim mantığı, kinetik enerji ile türbin kanatlarının bulunduğu bölgeden geçen rüzgârın türbin kanatlarına çarparak türbin şaftında bir hareket meydana getirmesi ve buna bağlı olan asenkron jeneratörde bir gerilim indüklenmesi esasına dayanmaktadır. (Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği, 2024)

Rüzgârdan maksimum yararlanılması ve kaynakların doğru kullanımı için kullanılacak rüzgâr türbini ve lokasyonunun seçiminin doğru yapılması oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde kayda değer bir yer edinen rüzgâr enerjisinden uzun yıllar yararlanmak mümkün olacaktır.

### 1.1.3. Güneş Enerjisi

En büyük enerji kaynağı olan güneşten yararlanmak insanların artan enerji ihtiyacına cevap verebilmek adına oldukça önemlidir. Dünya yüzeyine çok az bir kısmı ulaşmasına rağmen sonsuz ve temiz bir kaynak olarak insanlığın kullanımına sunulan bu enerji kaynağının farklı alanlarda kullanımları mevcuttur. Fakat son yıllarda tıpkı rüzgâr enerjisi gibi ağırlıklı olarak elektrik enerjisi üretiminde kullanımı giderek yaygınlaşmıştır ve yaygınlaşmaya devam etmektedir. Güneşten elektrik üretmek amacıyla kurulan elektrik santrallerinin özellikle kurulum, tasarım ve işletme aşamaları diğer elektrik santrallerine nazaran daha kolay ve avantajlı durumdadır. Dünya üzerinde birçok alan güneş enerjisinden elektrik üretmek için oldukça verimli iken ülkemizde bu konuda son derece yeterli sayılabilecek bir konumda yer almaktadır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan “Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına” baktığımızda ülkemizin ortalama yıllık güneşlenme süresinin 2.741 saat ve ortalama ışınım miktarının

1.527 kWh/m² olduğunu görmekteyiz. Bu göz ardı edilemeyecek derecede önemli olan potansiyelimizin kullanımın teşvik edilmesi ve arttırılması geleceğimiz için büyük önem arz etmektedir. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

### 1.1.4. Jeotermal Enerji

Yer altının enerjiye sunduğu en büyük katkılardan olan jeotermal enerji, yerkabuğu içerisinde çeşitli derinlik ve lokasyonlarda biriken atmosfer sıcaklığından çok daha fazla derecedeki sıcak suyun yeryüzüne taşınması ile elde edilen bir enerji türüdür. Yer altında bulunan bu sıcak su çeşitli mineraller, gazlar, tuzlar içerebilir. Ülkemiz jeotermal enerji bakımında oldukça zengin kaynaklara sahiptir. Bu kaynakların büyük çoğunluğu Batı Anadolu bölgesinde yer almaktadır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Elektrik üretiminde son dönemde kullanımı artan bu kaynakların doğru kullanılması oldukça önemlidir. Bu santrallerin işletilmesi sırasında açılan üretim kuyuları ve re-enjeksiyon kuyuları bulunmaktadır. Üretim kuyuları vasıtasıyla yer altından sıcak su ve sıcak su buharı enerji kaynağı olarak üretim prosesine taşınmaktadır. Bu taşıma esnasında kullanılan ekipmanların ve üretim sırasında yapılan kontrol otomasyon sistemlerinin önemi büyük olup, doğru yönetilmeyen bir kuyu işletim prosesi sonucu yüksek maliyetler sonucunda üretime açılan kuyuların kaybedilmesi olasıdır. Bunun yanı sıra enerjisi alınan suyun re-enjeksiyon kuyuları vasıtasıyla yer altına geri kazandırılması gerekmektedir. Bu hususa dikkat edilmesi yer altı su dengesi ve üretim devamlılığı açısından oldukça önemlidir.

### 1.1.5. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, genel itibariyle belediye girişimleri ile belediyelerde toplanan çöplerin kullanımı yoluyla gelişim göstermiştir. Bu enerji türü çöp gazı, bitkisel yağ atıkları, tarım ve hayvancılık faaliyetinden kaynaklanan atıklar, gıda, endüstride işlenmesi mümkün olmayan orman ürünleri ve atık lastik işlenmesi ile ortaya çıkan kaynaklar olarak tanımlanabilir. Ülkemizdeki kurulu gücü son 10 yıllık süreçte yaklaşık 18 kat artarak ciddi bir gelişme göstermiştir. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

### 1.1.6. Hidrojen Enerjisi

Doğada en fazla bulunan elementler arasında büyük pay sahibi olan hidrojeni saf halde bulmak mümkün olmamaktadır. Fakat bu element içerdiği ısıl değeri ile bilinen yakıtlar içerisinde en yüksek enerji potansiyeli barındıran elementtir. Üretim prosesine göre farklı isimlerle anılan hidrojen enerjisine birçok firma eğilim göstermektedir. Temiz bir enerji türü olması, yanma olayı sonrası ortaya su çıkarması, yüksek verimlilik, nakliye ve depo avantajları gibi birçok avantajlar barındıran bu enerji türünün gelişen teknoloji ile birlikte yakın dönemde adından daha fazla bahsettireceği açıktır. Günümüz teknolojisi ile pahalı ve işletilmesi zor bir üretim prosesi sunması henüz bu ürünün kullanımının önündeki küçük engeller olsa da bilim insanlarının hidrojen konusundaki fikirleri, bu enerji türünün yüzyılın en önemli enerji kaynağı olabileceğini göstermektedir. Geleceğimizi teminat altına almak adına temiz uygulamalara yönelen bilinçli ülkelerin yanında yer alan ülkemizin hidrojen konusunda da büyük bir potansiyeli olduğu açıktır. Yapılan mevzuatsal düzenlemeler de bu enerji türünün desteklenmesi yönünde çalışmalar içermektedir. (Doğu, 2024)

### 1.1.7. Dalga Enerjisi

Büyük bir enerji potansiyeline sahip dalga enerjisi üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke için şüphesiz en değerli kaynaklar arasında bulunmaktadır. Potansiyel dalga üreten deniz alanlarında dalga enerjisinden elektrik üretimi mümkündür. Genellikle gelgit hareketi, rüzgâr etkisiyle veya diğer denizlerden kaynaklanan etkilerle oluşurlar. Oluşan bu dalga enerjisinden dalga enerjisi dönüştürücü ekipmanları vasıtasıyla elektrik üretimi yapılabilir. Bu dönüştürücüler dalganın oluşturduğu mekanik hareketleri elektrik enerjisine çevirirler. Çeşitli türlerde tasarlanarak üzerinde çalışmalar yapılan dönüştürücüler, yüzer platformlar, çubuklar, denizin dibine sabitlenen cihazlar olabilirler. (Energy Is Future, 2024)

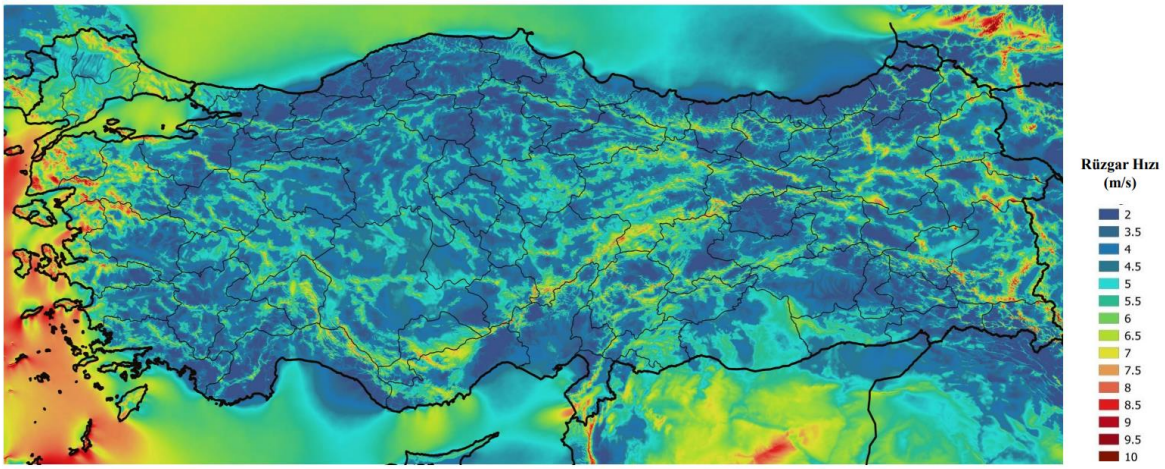
Bu tür özellikle denize kıyısı olan ülkeler için çok önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Her ne kadar temiz ve sonsuz bir enerji türü olarak karşımıza çıksa da ticari olarak dalga enerjisinden elektrik üretimi halen gelişme ve tasarım aşamasındadır. Ülkemizde ve dünya da bu konuda birçok bilim insanı mesai harcamaktadır.

### 1.2. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli

Ülkemiz coğrafi konumunun getirmiş olduğu avantajları her alanda değerlendirdiği gibi rüzgâr enerjisi de ülkemiz için elektrik üretim potansiyeli açısından büyük bir kaynak sunmaktadır. Öyle ki; ülkemiz sınırları dahilinde bulunan rüzgâr potansiyeli yaklaşık 47.850 MWh'dir. 2006 yılında bakanlık tarafından yapılan çalışmalar ışığında bulunan bu potansiyel 200 m yatay çözünürlük, 50 metre yerden yükseklik, 7,5 m/s üzerindeki rüzgâr hızına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MWh gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilerek hesaplanmıştır. Bu kadar yüksek bir potansiyelin kurulumu için çok büyük alanların gerektiği ilk akla gelen sorular arasında olmasına rağmen gerekli olan alan sadece ülkemiz yüzölçümünün %1,30'luk kısmı kadardır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

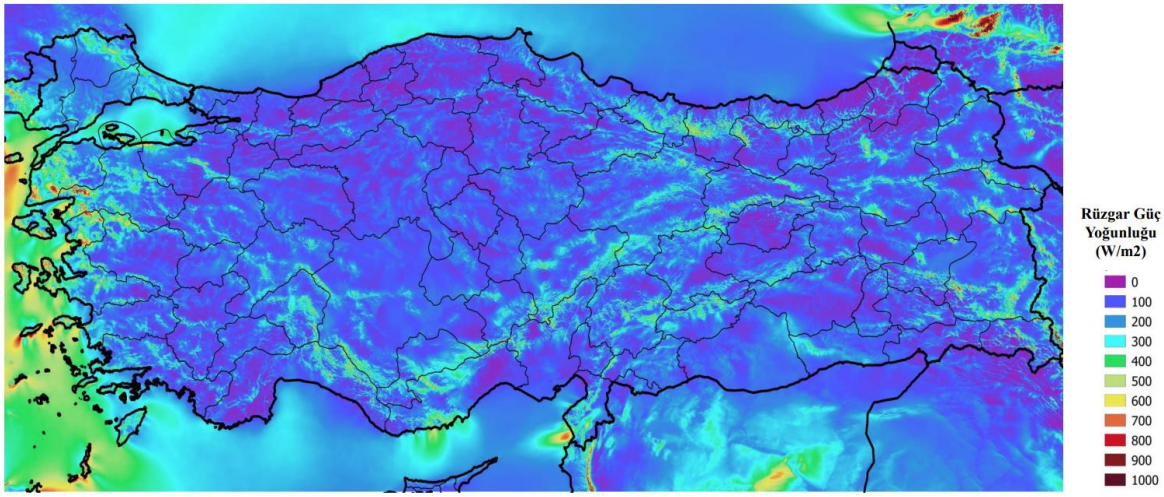
2023 yıl sonu itibariyle 11.700 MWh kurulu güç ile henüz belirlenen bu yüksek potansiyelin çeyreğine bile ulaşmamış olan rüzgâr santralleri kurulu gücü her geçen gün artmaktadır. (EMBER, 2024)

Rüzgâr santrallerinin kurulumu için en önemli parametrelerin başına rüzgâr hızı gelmektedir. Rüzgâr hızı yönünden bakıldığında Şekil 1'de görüleceği üzere Türkiye geneline yayılan bir potansiyel içermesi, rüzgâr enerjisinin ülkemiz için ne denli uygulanabilir olduğunu desteklemektedir.



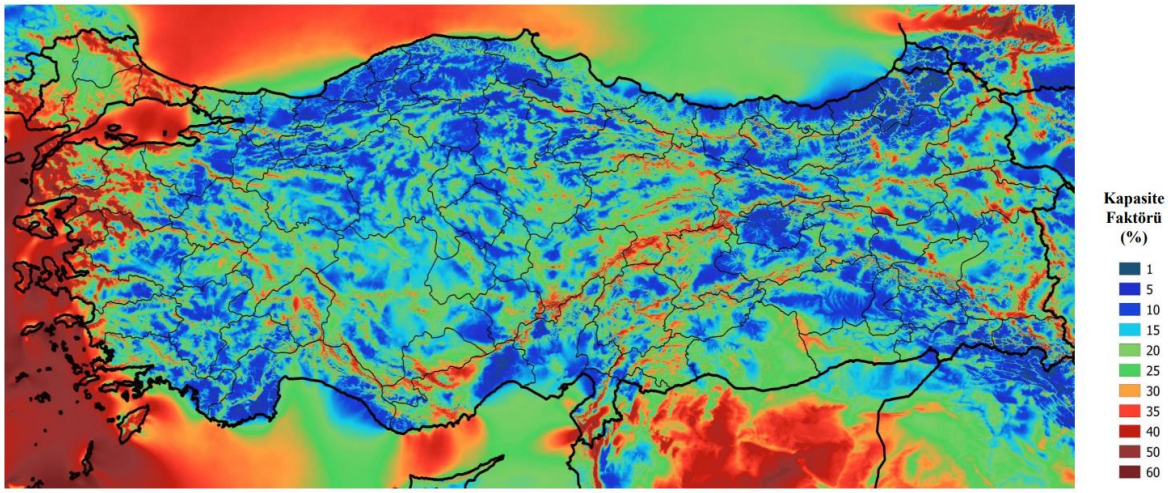

Şekil 1. 100 Metre Yükseklik İçin Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı

Rüzgâr hızının getirmiş olduğu dengeli dağılımın etkisi benzer biçimde Şekil 2'de görülen güç yoğunluğu haritasına da yansımaktadır.




Şekil 2. 100 Metre Yükseklik İçin Yıllık Ortalama Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı

Kurulan santrallerin en önemli üretim göstergesi olan kapasite faktörü rüzgâr enerjisi için rüzgâr hızına ve güç yoğunluğuna bağlı olarak şekillenmektedir. Şekil 3 ile ülkemiz genelinde rüzgâr enerjisi kapasite faktörü görülmektedir.




Şekil 3. 100 Metre Yükseklik İçin Kapasite Faktörü Dağılımı

Dünya'nın birçok bölgesine nazaran dar bir bölgede bu kadar yüksek üretim kapasitesine sahip olan ülkemizin rüzgâr enerjisinde gelecekte en önemli oyunculardan olacağı açıktır. Enerjiye olan sürekli talebin karşılanması adına bu potansiyelin kullanılması elzemdir. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Geçtiğimiz son 10 yıllık süreçte kurulu gücünü yaklaşık 10 kat arttırarak, ülkemiz kurulu gücünün %11'lik kısmını karşılayan rüzgâr santrali yatırımları gün geçtikçe istikrarlı ilerleyişine devam etmektedir. Hibrit tesisler, batarya depolamalı tesisler gibi yeni

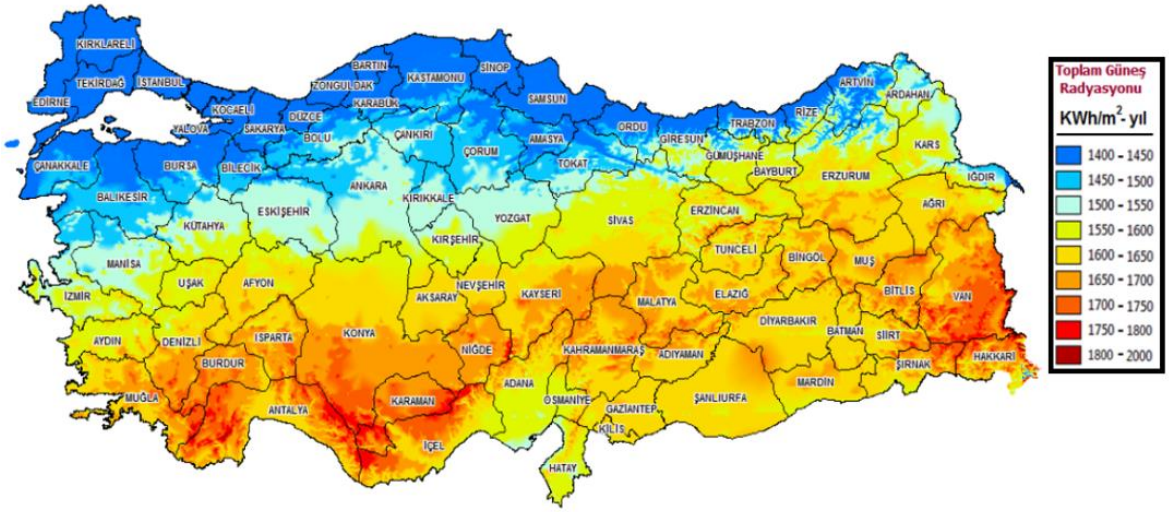
tesislerinde hayatımıza girmesi ile bu tesis türünün ürettiği enerji arz güvenliğinin giderek artacağı ve ülkemizde yakın gelecekte oldukça gözde bir konuma yerleşeceğinden şüphe yoktur. (Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2024)

Bunun yanı sıra gelişen teknoloji sayesinde rüzgâr türbinlerinin üretim kapasitesi giderek artmaktadır. Birçok üretici bu alanda ciddi gelişmeler kaydetmiştir. Bu gelişmeler de eskiyen santrallerin modernizasyonu yapılırken güç artışlarının yapılması için teşvik oluşturacaktır.

### 1.3. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli

Birçok bilim insanının yıllardır ortaya koyduğu çalışmaların yolu aydınlatmasına rağmen ülkemiz güneş enerjisinden elektrik üretiminde geç kalmıştır diyebiliriz. Dünya üzerinde 1980 yılından itibaren ivmelenen ticari güneş santrali kurulumları ülkemiz için daha geç başlayan bir yatırım aracı olmuştur. (Karayaka, 2024)

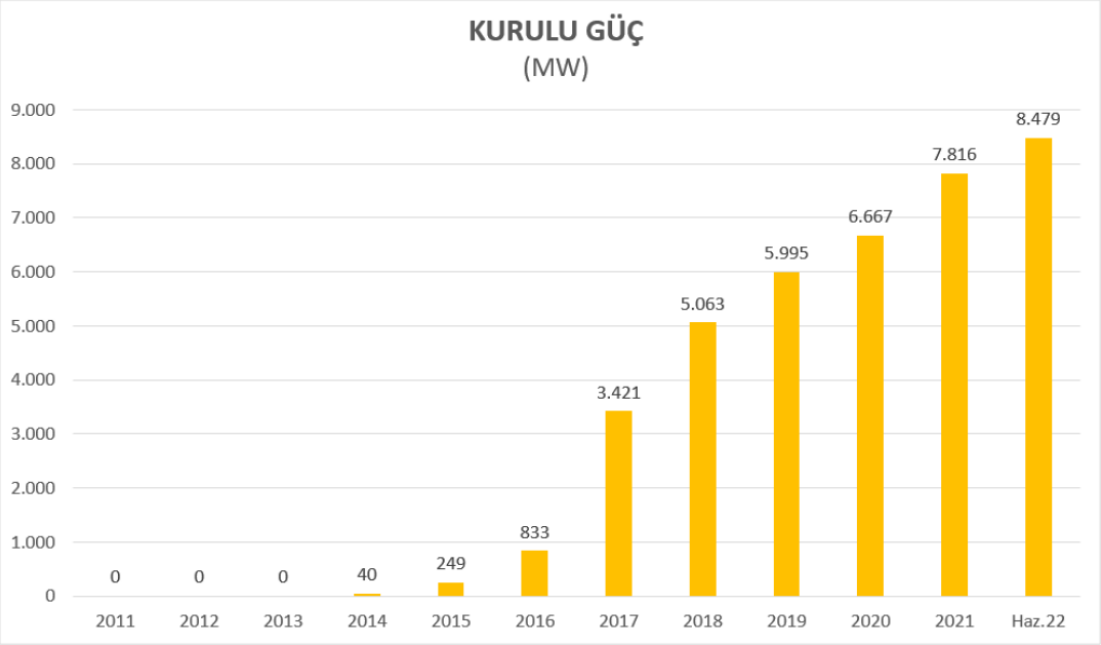
Güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye nazaran çok iyi ışınım değerlerine sahip olan ülkemizde ortalama yıllık güneşlenme süresi 2.741 saattir. Bununla birlikte ortalama yıllık ışınım değeri ise metrekare başına 1.527 kWh seviyesindedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülen çalışmalar neticesinde "Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)" oluşturulmuş olup Şekil 4'te verilmektedir.




Şekil 4. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

Bakanlık tarafından verilmiş olan GEPA incelendiğinde özellikle ülkemizin güney kesimlerinde ciddi bir güneş potansiyeli mevcuttur. Yılın son ayında 1,59 kWh/m² ile en

düşük seviyelerde seyreden ışınım miktarı giderek artan bir eğri ile yılın ortasına gelindiğinde pik seviyeye çıkarak 6,57 kWh/m² değerine ulaşmaktadır. Ticari olarak güneş enerjisinden elektrik üretimi ilk olarak 40 MWh'lik kapasite ile 2014 yılında başlamıştır. Fakat bu geç kalınmış başlangıca rağmen çok hızlı bir yol katetmiştir. Şekil 5'te yıllara göre kurulu güç artışı görülen güneş santralleri ilk kurulumdan henüz iki yıl geçmişken 2016 yılında yaklaşık 21 kat bir artış göstererek 833 MWh'lik bir kapasiteye ulaşmıştır.




Şekil 5. Yıllara Göre Güneş Santralleri Kurulu Gücü

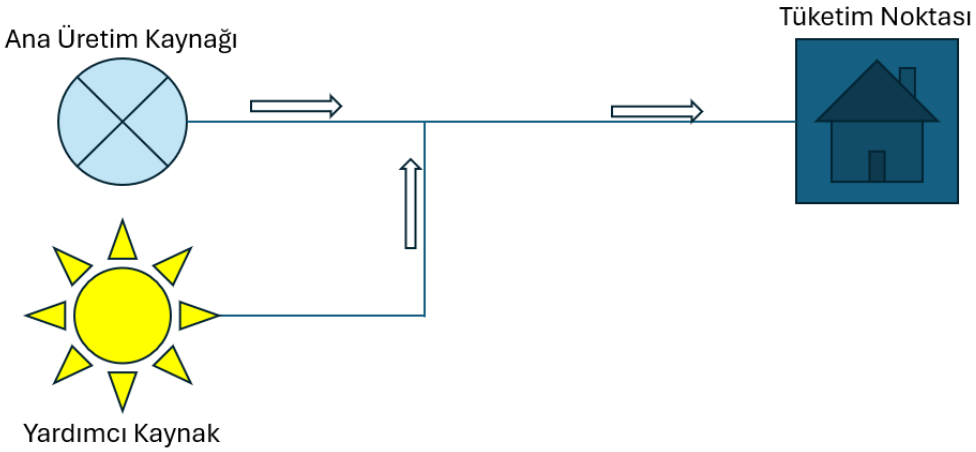
Bu artış kapasitesi takip eden iki yılda gene katlanarak devam etmiş ve yıllara göre istikrarlı yükselişini sürdürmüştür. 2022 yılı haziran ayı itibariyle 8.749 MWh kapasiteye ulaşan santral kurulumları giderek artmakta ve Türkiye elektrik şebekesine arz sağlamaya devam etmektedir. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Bunlara ilave olarak son yılların gözde yatırımlarından olan hibrit santrallerde de güneş enerjisi lider konumdadır. Fakat bakanlık tarafından sunulan verilerde yer verilmemiştir. Hibrit santral kurulumlarını da göz önüne alacak olur isek; 2023 yılı sonuna gelindiğinde güneş santrallerinin kapasitesi 12.200 MWh seviyesine ulaşabilmiştir. Gelecek yıllarda daha da yaygınlaşacak olan güneş santrali yatırımlarını gittikçe sayısı artan çatı uygulamaları ve cephe uygulamalarının desteklemesi beklenmektedir. (EMBER, 2024)

### 1.4. Hibrit Elektrik Santralleri

Dünya üzerinde farklı uygulamalar ile karşımıza çıkan santral tasarımları mevcuttur. Tek tip enerji türünden üretim yapan santral uygulamalarından farklı olarak iki veya daha fazla tipte santralin birlikte elektrik ürettiği santral tiplerine hibrit elektrik santralleri ismi verilmektedir. Hibrit elektrik santralleri doğru tasarımlar yapıldığında elektrik arz güvenliğinin korunmasında ve arttırılmasında büyük rol oynamaktadır. Kararlılığı yüksek ama iklim koşullarından fazla etkilenen bir santrali ele alırsak, bu santrale eksi yönde etkilendiği iklim koşullarından pozitif yönde etkilenecek bir santral entegre edildiğinde elektrik üretimi arttırılarak sürekli bir üretim gerçekleşmesi sağlanabilir. Örnek ile açıklayacak olursak; bir hidroelektrik santralin genel olarak yaz aylarında veya kurak giden dönemlerde en az üretimi gerçekleştireceğini söyleyebiliriz. Fakat bu hidroelektrik santrale entegre edilecek bir güneş santrali aynı koşullar söz konusu olduğunda daha fazla elektrik üretimi gerçekleştirecektir. Gerçekleştireceği bu üretim ile de hidroelektrikten eksik kalan elektrik enerjisini tamamlayıcı bir etki gösterecektir. Bu tür uygulamalar ile hibrit santrallerin tasarımının yapılması yaklaşımı oldukça karlılığı yüksek bir yöntem olacaktır. Bu tür hibrit tasarımlar yapılırken bölgenin coğrafi ve meteorolojik koşullarını dikkate almak çok önemlidir. Coğrafi ve meteorolojik koşullar güneş enerjisini yardımcı kaynak için uygun kılıyorsa güneş santrali kurulumuna, rüzgâr enerjisini yardımcı kaynak için uygun kılıyorsa rüzgâr santrali kurulumuna yönelmek gibi tüm yenilenebilir enerji kaynakları yardımcı kaynak olarak belirlenebilir. (Jafarzadeh, 2017)

Hibrit elektrik santralleri için şematik gösterim Şekil 6'da verilmiştir.



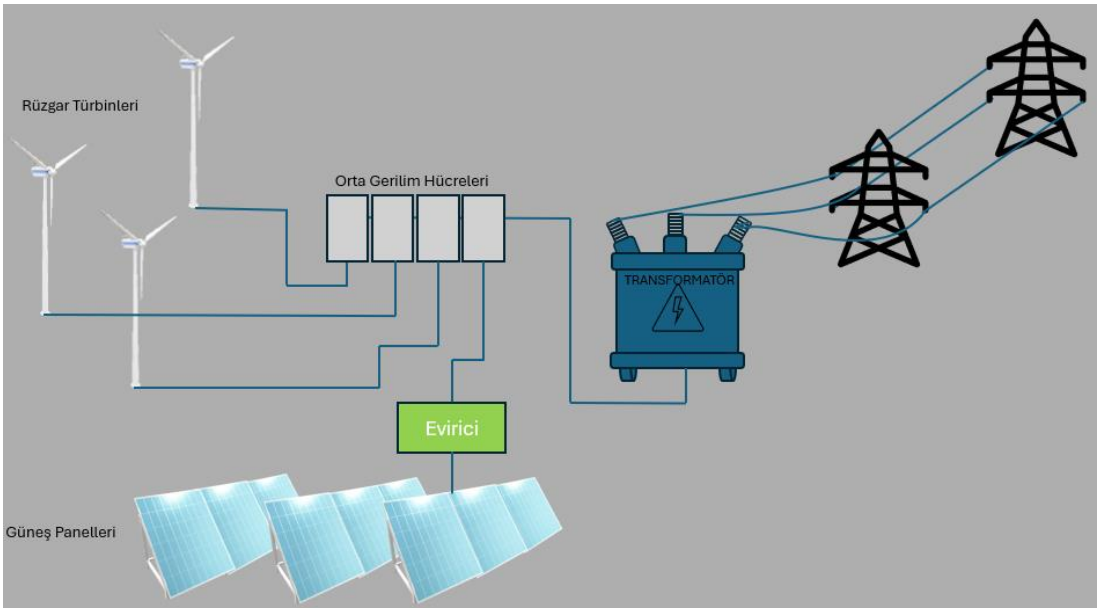

Şekil 6. Hibrit Elektrik Santrali Temel Şeması

### 1.5. Rüzgâr Güneş Hibrit Elektrik Santrali

Bu tez çalışması kapsamında çalışılacak olan rüzgâr-güneş hibrit elektrik santrali şu ana kadar planlanan ve uygulanan hibrit santraller açısından ülkemizde en çok tercih edilmiş hibrit enerji santral tipidir. Tercih edilmesinin en büyük nedenleri arasında, rüzgâr santrallerinin yapısı gereğince güneş santralleri için imalat alanlarının genişletilebilir olması, güneş ile rüzgâr enerjisi arasındaki ters meteorolojik ilişki, özellikle ülkemiz coğrafyası ele alındığında rüzgâr açısından güçlü bölgelerde güneş potansiyelinin de iyi seviyelerde olması sayılabilir. (EMBER, 2024)

Kurulu bulunan bir rüzgâr santraline hibrit bir güneş santralinin entegre edilmesi ve işletilmesi, ülkemiz için geçerli mevzuatlar nedeniyle aynı bağlantı noktasından ve TEİAŞ tarafından aksi talep edilmedikçe mevcut lisans kapasitesini aşmayacak şekilde üretim yapılması ile mümkün olmaktadır. (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020)

Rüzgâr-güneş hibrit enerji sistemleri şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında şebeke bağlantılı santraller üzerine gidilecektir. Bu nedenle de rüzgâr-güneş hibrit enerji sistemi ve sistem ekipmanları şebeke bağlantılı sistem üzerinden ele alınarak incelenecektir. Rüzgâr-güneş hibrit sistemlerinde rüzgâr türbinleri ve kurulu bulunan güneş panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi genellikle orta gerilim hücrelerinde birleştirilerek aynı bağlantı noktası üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. Bu hibrit santral tipine ait tek hat şeması diyagramı Şekil 7 ile verilmiştir.




Şekil 7. Rüzgâr-Güneş Hibrit Santral Tek Hat Şeması Diyagramı

Şekil 7’ de görüleceği üzere rüzgâr-güneş santralinde rüzgâr türbinleri ve güneş panellerinden gelen DC akımı AC akıma çeviren evirici ünitesi orta gerilim hücrelerine bağlıdır. Orta gerilim hücrelerinde aynı baraya birleşen hibrit üretilen elektrik enerjisi ana güç trafosuna aktarılır. Buradan da şalt ekipmanları vasıtasıyla enterkonnekte şebekeye gönderilir.

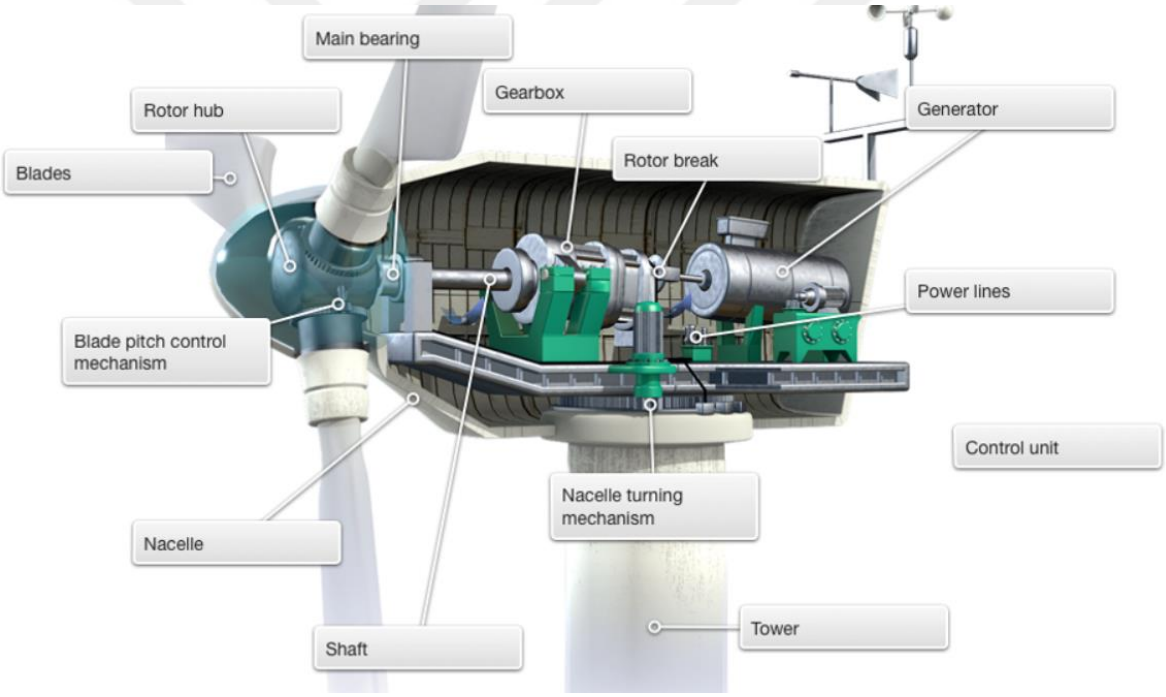
### 1.5.1. Rüzgâr Türbini

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisinden kaynaklanan havanın kinetik enerjisini mekanik aksamları ve ekipmanlarının sahip olduğu yetenekler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştüren elektrik üretim ekipmanlarıdır. Türbinlerin ürettiği enerji rüzgâr hızına bağlı olarak değişeceği için türbinin ürettiği elektrik enerjisinin kararlılığı olmayacaktır. Bunun yanında rüzgâr türbinlerinin konumu belirlenirken sürekli rüzgârların engellenmeyeceği coğrafi konumlar seçilmelidir. Bu alanlar genellikle yüksek hâkim tepeler ve geniş düz ovalar olabilmektedir. (Engin, 2010)

Türbinlerin yapısına göre tipleri değişmekle birlikte modern elektrik üretim santralleri genellikle yatay eksenli ve üç kanatlı türbin tiplerinden oluşmaktadır. Şekil 8’de elektrik üretim santralleri için kullanılan türbin tipi verilmiştir.

Şekil 8. Yatay Eksenli ve Üç Kanatlı Modern Rüzgâr Türbinleri (VESTAS, 2024)

Kullanılan bu türbin tipleri dünya üzerinde birçok sahanın vazgeçilmezi olan verimli bir türbin tipi olup, oldukça profesyonel mühendislik çalışmaların sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Yıllardır kullanılmakta olan bu türbinlerin giderek boyutları ve buna bağlı olarak da güçleri artmaktadır. Rüzgâr türbinlerine baktığımızda türbin ped alanı, kule, kanatlar, dişli kutusu, rotor, alternatör, elektrik elektronik ekipmanlardan meydana gelmektedir. Modern türbinlerde rüzgâr enerjisinin gücü kanatlara çarpan hava akımı ile kanatların ve kanatlara bağlı rotorun dönmesini sağlamaktadır. Rüzgâr hızının sürekli değişmesinden kaynaklanan sebeplerden dolayı asenkron jeneratörler tercih edilmektedir. Bu jeneratörlerden çıkan AC elektrik enerjisi öncelikle DC olarak dönüştürülmekte ardından elde edilen DC güç tekrar AC güce çevrilerek iletilmektedir. Rüzgâr türbini içerisinde bulunan türbin ekipmanları Şekil 9'da gösterilen türbin kesitinde görülmektedir.




Şekil 9. Rüzgâr Türbini Kesiti (Resolt Enerji, 2024)

Şekil 9'da verilen kesiti incelediğimizde türbin içinde bulunan rotor, alternatör, rotor mili, kanatlar ve kanat bağlantıları, dişli kutusu, kule, kontrol ünitesi, döndürme ekipmanları gibi detayları görmekteyiz. Buradaki tasarım ve uygulamalar ileri mühendislik gerektiren çalışmalar bütünüdür.

Rüzgâr türbinlerinde güce etki eden faktörler göz önüne alınarak güç hesaplaması yapılabilmektedir. Bu gücün hesaplanması şu formül ile ifade edilebilir.

$$W = \frac{1}{2} \cdot r.A.C_p.v^3$$

Burada;

W : Hesaplanan gücü,

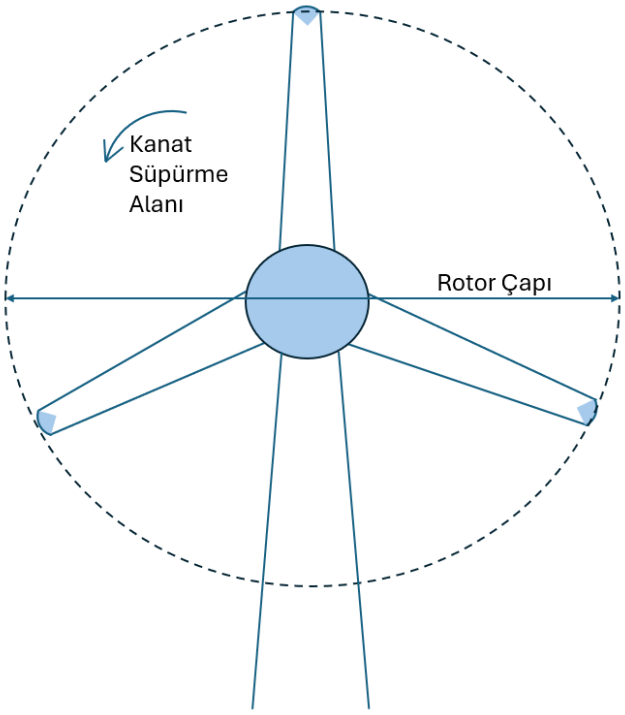
r : Hava yoğunluğunu,

A : Kanatların süpürme alanını,

v : Rüzgâr hızını,

Cp : Türbin verimini ifade etmektedir.

Formülde A ile ifade edilen türbin kanatlarına ait süpürme alanı şematik gösterimi Şekil 10 da görülmektedir.




Şekil 10. Türbin Kanatları Süpürme Alanının Şematik Gösterimi

Modern rüzgâr santralleri kurulurken türbine ait türbin gücü eğrisini, rüzgâr hızına bağlı olarak türbinin üretime başlayacağı ve üretimden çıkacağı rüzgâr hızı bilgilerini üreticiler tarafından verilmektedir. Formülde bulunan bir diğer parametre hava yoğunluğu yükseklik, sıcaklık ve havanın koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. (Hau, 2005)

Pratik uygulamalara baktığımızda bir santral işletilirken türbin kanat süpürme alanı yatırım aşamasında belirleneceği için işletme sırasında bu durumun işletme açısından

değiştirilebilir bir durumu olmamaktadır. Dolayısıyla işletilen bir rüzgâr santralinde en önemli parametre rüzgâr hızı ve hava yoğunluğu olmaktadır.

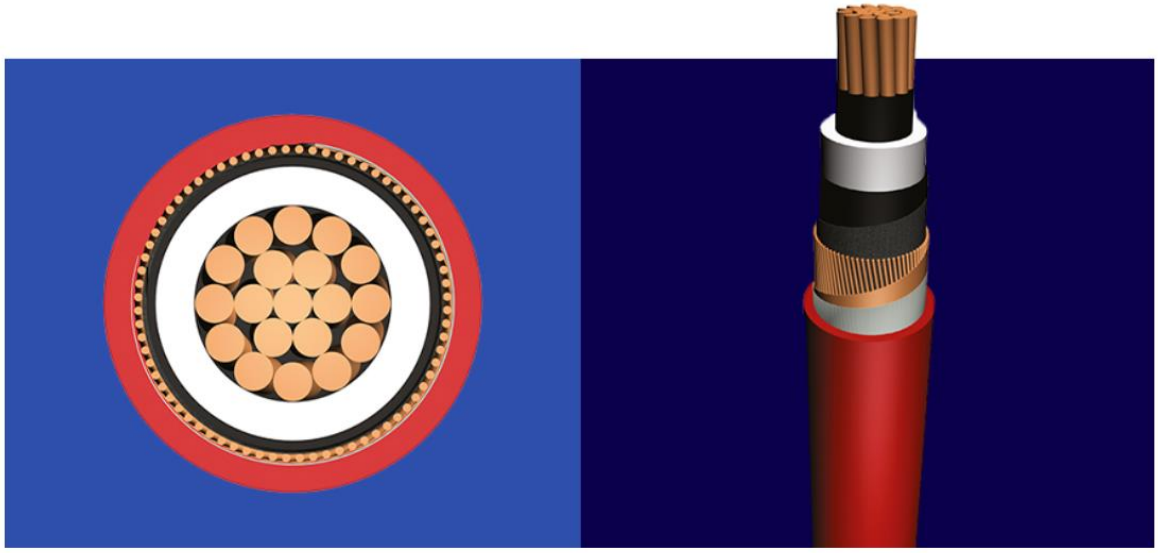
### 1.5.2. Orta Gerilim Hücreleri

Orta gerilim hücreleri, giriş, ölçü, trafo hücresi gibi hücrelerin bir araya gelmesiyle gruplar halinde kullanılan modüler yapıda anahtarlama elemanlarıdır. Kararsız ve düzensiz güç akışını stabilize etmek için kullanılırlar. Hava veya gaz izoleli olarak üretilmekte olan bu hücreler ark oluşturmadan ve hataya mahal vermeden anahtarlama yapmak, bağlı bulunduğu türbini, eviriciyi, üniteyi sistemden güvenle ayırmak veya sisteme bağlamak için kullanılan vazgeçilmez bir elektrik teçhizatıdır. Genellikle 36 kV gerilim seviyesine kadar kullanılmakta ve bu gerilim seviyesine kadar pratikte orta gerilim hücreleri olarak isimlendirilmektedir. Şekil 11 ile orta gerilim hücreleri gösterilmiştir. (SchneiderElectric, 2024)

Şekil 11. Orta Gerilim Hücreleri (SchneiderElectric, 2024)

### 1.5.3. Orta Gerilim Kabloları

Üretilen elektrik enerjisinin en önemli unsurlarından birisi de şüphesiz kararlı ve sağlıklı bir şekilde iletilmesidir. Rüzgâr ve güneş santrallerinde orta gerilim seviyesindeki bu iletim işini orta gerilim kabloları üstlenir. Orta gerilim kablolarının imalat, test, kalite, montaj, montaj sonrası test, devreye alma gibi üretimden kullanıma tüm aşamaları oldukça önemli ve hassasiyet gerektiren aşamalardır. Bu aşamaların herhangi birisinde sorun meydana gelmesi ve fark edilmemesi nedeniyle alınacak her hata santral emre amadeliğini düşüren bir arıza etkisi olarak karşımıza çıkacaktır. Orta gerilim kabloları farklı renk seçenekleri ve kullanım alanları ile karşımıza çıkmaktadır. Kablo tipine bağlı olarak yer altında, boru içinde hatta su altında bile kullanılabilmektedir. Şekil 12'de 36 kV seviyesine ait bir orta gerilim kablosu kesiti görülmektedir.

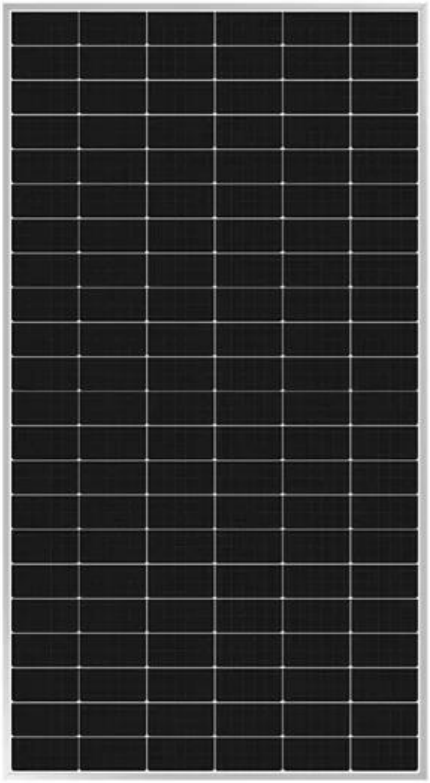


Şekil 12. 36 kV Orta Gerilim Kablo Kesiti (HES Kablo, 2024)

### 1.5.4. Güneş Paneli

Enerjiye olan ihtiyacın her geçen gün arttığı dünyamızda en büyük enerji kaynağından yararlanmak oldukça makul ve avantajları olan bir fikirdir. Bu fikrin gerçekleşmesine imkân veren yarı iletken malzemeler güneş pilleridir. Bu güneş pilleri bir araya gelerek fotovoltaik hücreleri, bu hücreler de bir araya gelerek fotovoltaik güneş panellerini oluşturmaktadır. Güneş panelleri farklı renk seçenekleri ile üretilmekte olup,

cam bir tabaka ile tasarıma göre önden, arkadan veya hem önden hem arkadan kaplanmaktadır. Şekil 13'te bir güneş paneli gösterilmiştir.



Şekil 13. Güneş Paneli (Jinko, 2024)

Güneş panellerinin ilk temelleri 19. Yüzyılda atılmış olmasına karşın, güneş enerjisi %6 verimlilik ile elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisinden elektrik elde etmede bir dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihlerden sonra araştırmalar fotovoltaik elektrik üretiminin uzay araçlarında kullanılmasına yönelik olarak devam etmiştir. Oldukça başarı sağlanan bu alanda 1960 yılından beridir fotovoltaik güç sistemleri hizmet vermektedir. (Karamanav, 2007)

Fotovoltaik güneş panellerinin çalışma prensibini anlamak için öncelikle fotovoltaik güneş pillerinin yapısını ve çalışma mantığını anlamak gerekir. Bir fotovoltaik güneş panelini oluşturan fotovoltaik güneş pillerinin davranışlarını inceleyebilmek için fotovoltaik güneş pili eşdeğer devre modelini oluşturmak gerekir. Literatürde kullanılan en yaygın fotovoltaik güneş pili eşdeğer devre modeli Şekil 14'te verilen bir akım kaynağı ile temsil edilen tek diyotlu devre modelidir.

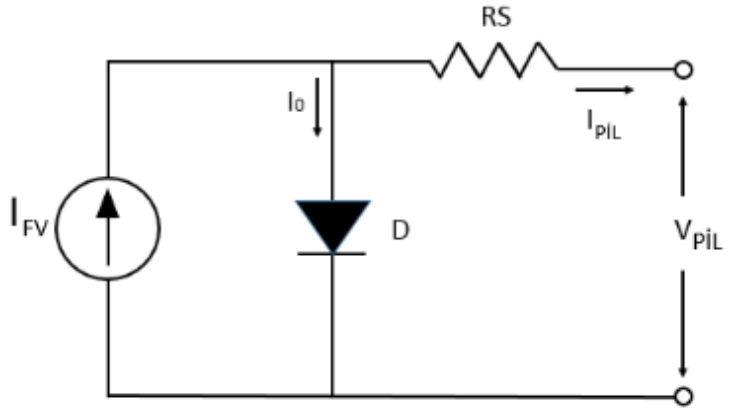
Bu modelde;

$I_{FV}$ : Günışığı ile gelen fotonların etkisiyle üretilen elektrik akımını,

$I_0$ : Fotovoltaik pilde diyot ters doyma akımını,

Ipil : Fotovoltaik pilin çıkış akımını,

Rs : Isıl kayıpları ifade etmektedir.




Şekil 14. FV Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi

Bu eşdeğer devreyi oluşturan parametrelerin değişimi ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlıdır. Dolayısıyla hesaplanacak her çıkış değeri için ışık ve sıcaklık seviyelerinin bilinmesi gerekir. Bu şekilde verilen devre modeli çıkış voltajı matematiksel olarak denklem (1) ile temsil edilebilir.

$$V_{PİL} = \frac{k.Tpil}{e} \times \ln\left(\frac{I_{FV}+I_0-I_{PİL}}{I_0}\right) - R_S.I_{PİL} \qquad (1)$$

Aynı koşullar altında denklem 1'den yararlanarak bir fotovoltaik pilin ürettiği akım ifadesi aşağıdaki eşitliklerdeki gibi elde edilir.

$$I_{PİL} = I_{FV} - I_0\left(e^{\frac{e.(V_{PİL}+R_S.I_{PİL})}{k.T_{PİL}}} - 1\right) \qquad (1)$$

Burada;

$I_{PİL}$: Fotovoltaik pilin çıkış akımı (A),

$V_{PİL}$: Fotovoltaik pilin çıkış gerilimi (V),

$I_{FV}$: Işık seviyesi ve P-N birleşim noktası, sıcaklığının fonksiyonu, Fotoakım (A),

$I_0$: diyot ters doyma akımı (A),

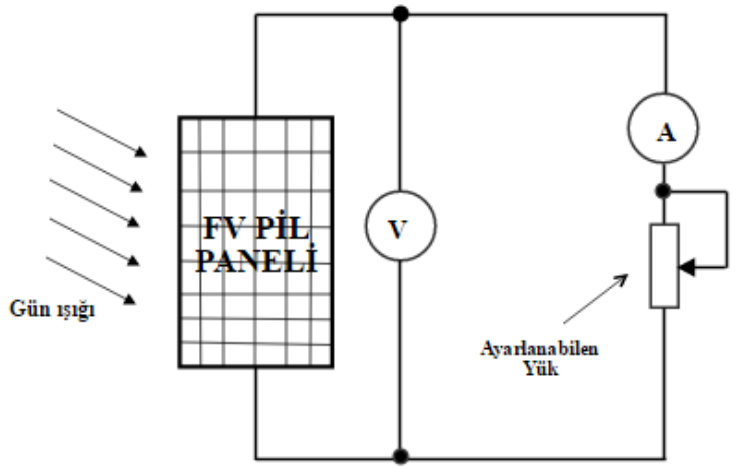
Rs: Eşdeğer devrenin seri direnci (ohm),

e: Elektron yükü (1.6021917x10-19C),

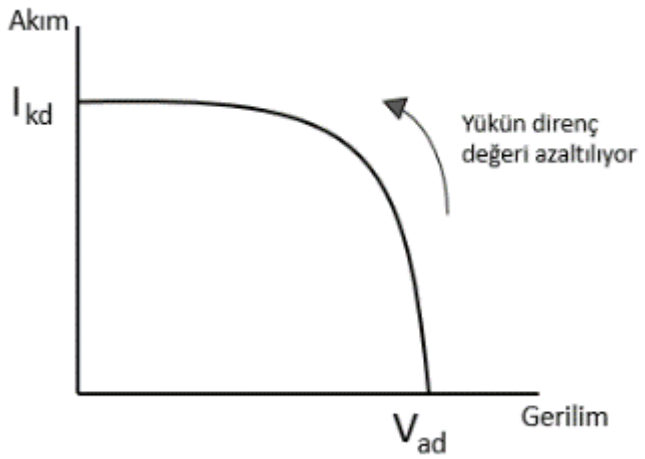
k: Boltzmann sabiti (1.380622x10-23 J/ ºK),

$T_{PİL}$: Referans çalışma sıcaklığı (ºK)'nı ifade etmektedir.

Denklem (1) de verilen fotovoltaik güneş pili çıkış gerilimi; Boltzmann sabiti (k) ve Elektron yükü (e) gibi sabit değerlerin yanında değişken değerler olan pil çalışma sıcaklığı ($T_{PİL}$), günışığı oranınca üretilen fotoakım ($I_{FV}$), ve yük tarafından belirlenen pil akımına ($I_{PİL}$) bağlıdır. Boltzman sabiti(k) ve referans çalışma sıcaklığı ($T_{PİL}$) hesaplamalardaki kararlılığın korunması açısından aynı sıcaklık birimine sahip olmalıdır. Bu çalışmada sıcaklık birimi Kelvin (ºK) olarak alınmıştır.




Şekil 15. Fotovoltaik Pil Panelinin Çıkış Akım ve Çıkış Gerilim Ölçümü (Altas, 1998)




Şekil 16. Fotovoltaik Pil Pilin Akım-Gerilim (I-V) Karakteristiğinin Yükle Değişimi

Denklem (1) ile verilen ifade bir tek fotovoltaik pilin çıkış gerilimini temsil etmektedir. Fotovoltaik güneş pili, güneş panelini oluşturulurken gerekli çıkış gerilimini elde etmek için yeterli sayıda (mesela Ns adet) pil seri bağlanırken, gerekli akımı elde edebilmek için de pillerin seri bağlanmasıyla meydana gelen yeterli sayıda (mesela Np adet) kol paralel bağlanır. Dolayısıyla, Şekil 15'te verilen fotovoltaik pil paneli ve bağlantı devresi kullanılarak yapılan ölçümler, bu fotovoltaik pil panelinin kısa devre akımını ($I_{kd}$) ve açık devre gerilimini ($V_{ad}$) verir. Şekil 16'te de fotovoltaik pilin güç karakteristiği verilmiştir. Bu karakteristikten görüleceği gibi akım veya gerilimin sıfır olması durumunda pilin gücüde sıfır olmaktadır. Akım veya gerilimin belirli değerlerinde güç maksimum değerini almaktadır. Eğer panelin akımı $I_{PANEL}$, gerilimi de $V_{PANEL}$ ile gösterilirse, paneli oluşturan her bir pilin akım ve gerilimi sırasıyla,

$$I_{PİL} = \frac{I_{PANEL}}{N_P} \tag{3}$$

$$V_{PİL} = \frac{V_{PANEL}}{N_S} \tag{4}$$

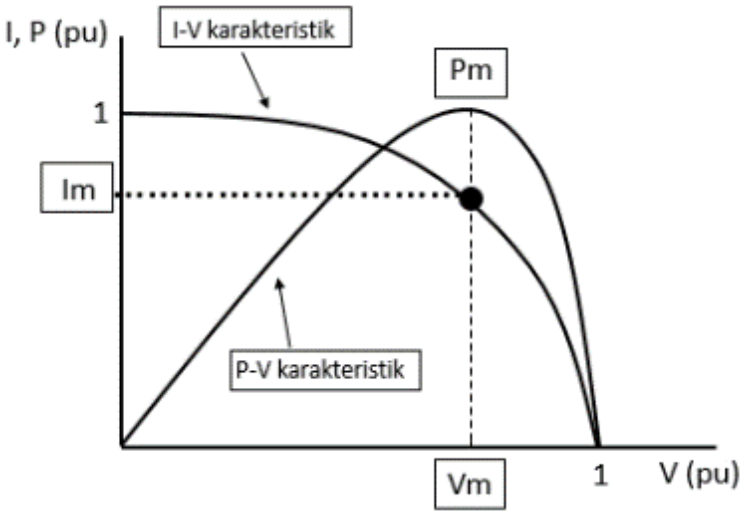
bağıntıları kullanılarak belirlenebilir. Panelin çıkış gücü:

$$P_{PANEL} = V_{PANEL} \text{ x } I_{PANEL} \tag{5}$$

olarak elde edilirken, bir tek pilin gücü de;

$$P_{PİL} = V_{PİL} \text{ x } I_{PİL} = \frac{V_{PANEL}}{N_S} \times \frac{I_{PANEL}}{N_P} = \frac{P_{PANEL}}{N_S \times N_P} \tag{6}$$

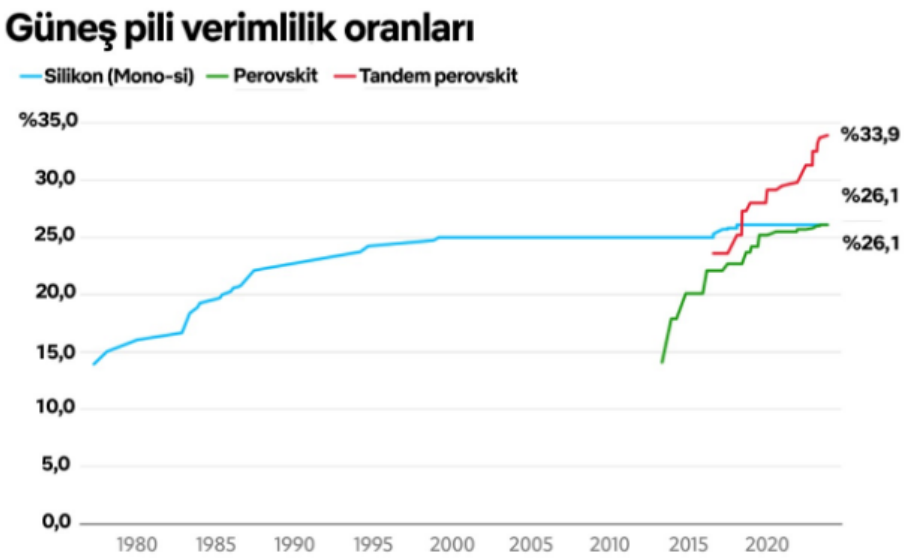
bağıntısı kullanılarak belirlenebilir.




Şekil 17. FV Pilin I-V ve P-V Karakteristikleri (Altas, 1998)

Güneş panelinin bulunduğu ortamın sıcaklığı ve güneş radyasyonu seviyesi değişince, paneldeki fotovoltaik pillerin çalışma sıcaklığı ($T_{PİL}$) de değişerek yeni bir fotoakımı ve yeni bir çıkış gerilimi oluşturur. Fotovoltaik pillerin çalışma sıcaklığı, güneş radyasyonu seviyesi ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir. Ayrıca verimleri çok yüksek değerlerde olmayan fotovoltaik sistemlerin kurulum maliyetleri geleneksel elektrik üretim sistemlerine göre pahalı olduğundan, maksimum gücü elde edebilecek şekilde çalıştırılmaları oldukça önem taşımaktadır.

Güneş panelleri temelde bu hesaplamalar ve denklemler doğrultusunda yapılan ARGE faaliyetleri ile geliştirilmektedir. Paneller için üretici tarafından verilen verim değeri en önemli unsurdur. Buna ilave olarak ise kaç yıllık bir garantinin % kaç verim için sunulduğu da çok önemlidir. Yıllardır yapılan birçok çalışma ve kullanılan birçok hammadde sayesinde güneş panellerinin verimi giderek artmıştır. Ülkemizde de bu konuda ciddi çalışmalar kaydedilmiştir. Yıllara ilişkin panel verimliliğindeki artışı gördüğümüz grafik Şekil 18 ile verilmiştir.




Şekil 18. Yıllara Göre Panel Veriminin Gelişimi (Independent, 2024)

Bu grafiğe baktığımızda son yıllarda üzerine çalışmalar yapılan Tandem Perovskit panel verimliliğinde bir atak gösterilmesine imkân tanımıştır. Güneş verimliliğinin arttırılmasında mucize malzeme olarak nitelendirilen silikon-perovskit tandem ile güneş pillerinde %33,9'luk yeni bir dünya rekoruna imza atılmıştır. Bu rekorun sahibi Çinli bir güneş teknoloji firması, daha önce Suudi Arabistan Kral Abdullah Bilim ve Teknoloji Üniversite'sinin elinde bulunan rekoru kırmıştır. Bunun yanı sıra bu rekor ticari güneş panellerindeki standart tek eklemli pillerin teorik sınırı olan %33,7 değerini de geride bırakmıştır. Bu rekor ile güneş panellerinin üretiminde yeni bir yol kanıtlanmış oldu. Her ne kadar bilim insanları ticari ölçekte gerçekleştirilmesine imkân vermese de silikon-perovskit tandem güneş pillerinin teorik olarak verimlilik sınırı %43 seviyesindedir. (Independent, 2024)

Bu konuda dünyada olduğu gibi ülkemizde de çalışmalar mevcuttur. Son yıllarda ülkemizde yapılan çalışmalar sonucunda hücre üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Güneş paneli verimliliği noktasında da ülkemizde ticari olarak satışa sunulan %25,11 verimliliğe ulaşan güneş panelleri mevcuttur. Her geçen gün yürütülen ARGE çalışmaları sayesinde bu oranın giderek artması beklenmektedir. (Kalyon, 2024)

### 1.5.5. DC Kablolar

Güneş panellerinde üretilen elektrik enerjisinin iletilmesinde karşımıza DC kablolar çıkmaktadır. DC kablolar paneller ile DC Combiner Box arasında ve DC Combiner Box ile eviriciler arasında tasarım koşullarına uygun kesitlerde kullanılmaktadır.

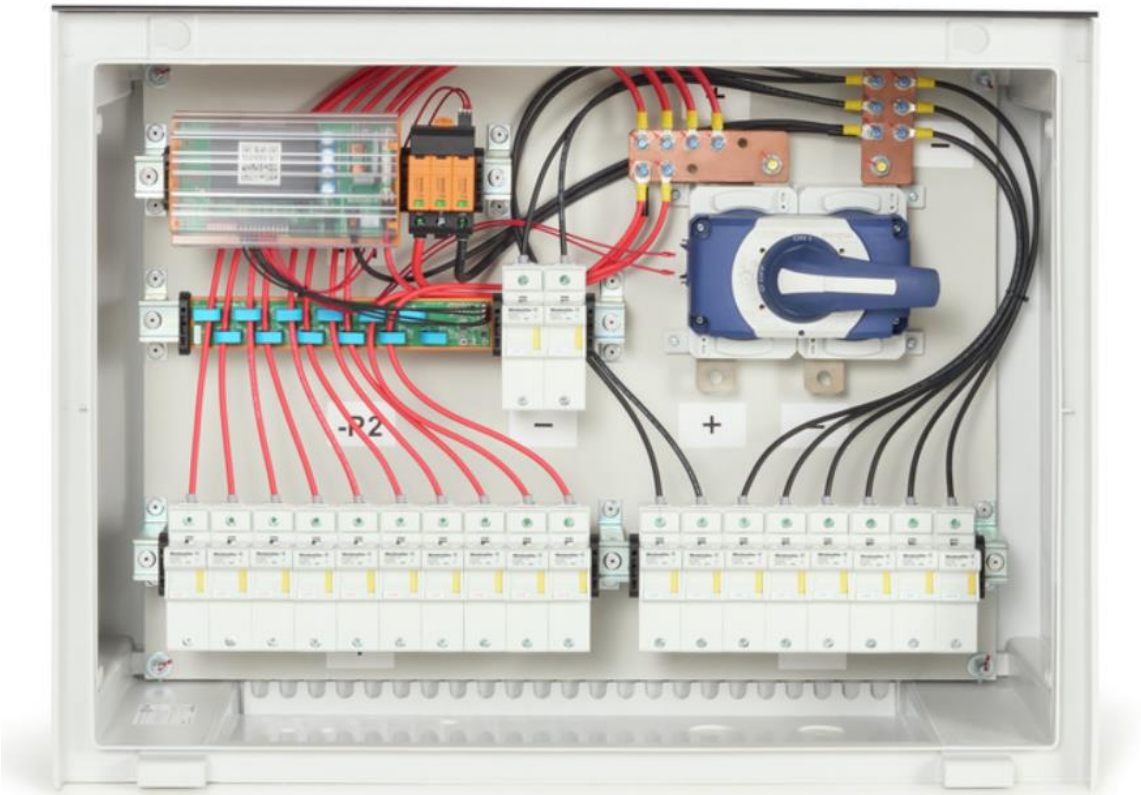
Solar kablolar yüksek verimde çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Bu kabloların izolasyonu çift katmanlı olarak tasarlanmıştır. Dış etmenlere karşı oldukça dayanıklı olan bu kablolar yüksek sıcaklık ve aşırı soğuk koşullara oldukça dayanıklı yapıya sahiptir. Bunun yanında en önemli özellikleri güneş ışığına karşı UV dayanımlı olarak üretilirler. Zorlu dış etkenlere karşın dayanıklı bir yapıya sahiptirler. Kemirgenler de dahil olmak üzere birçok dış etkenin kablolara zarar vermemesi için nitelikli olarak üretilirler. Genel yapıları şekil 19'da gösterilmiştir. (HES, 2024)

Şekil 19. Solar Kablo (3DE3, 2024)

### 1.5.6. DC Combiner Box

Pratik uygulamalarda çokça DC Combiner Box olarak anıldığı için burada da bu şekilde isimlendirilen bu ekipmanlar temel olarak bir kablo bağlantı kutusudur. Her ne kadar yapıları bu kadar basit söylenegelse de güneş santralleri için önemi büyüktür. Bu bağlantı ekipmanları panellerden düşük kesitli kablolar ile gelen elektrik enerjisinin burada toplanarak daha yüksek kesitli kablolar ile eviricilere iletilmesi için vazgeçilmez bir araçtır. Bu bağlantı görevini güvenli bir şekilde gerçekleştirirler. Kullanılan DC Combiner Box'lara aşırı akım koruması ve kısa devre koruması gibi entegrasyonlar yapmak mümkündür. Bu yetenekleri sayesinde de güvenliği üst seviyeye taşımaktadır. Bunun yanında güneş paneli gruplarının (stringlerin) izlenmesi gibi eklentilere de olanak

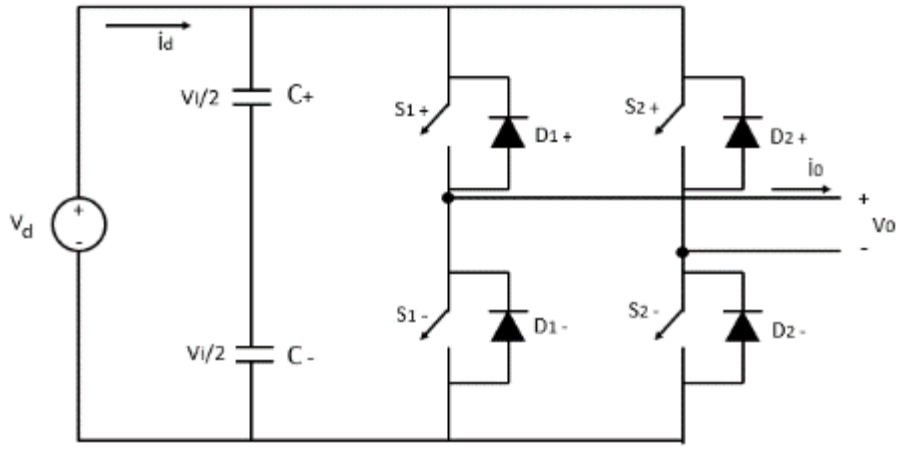
tanımaktadır. Bu izlemeler santral performansının takibi, arızaların takibi gibi önemli parametreler içerir. Bu parametrelerin izlenmesi de santral emre amadeliğini en üst seviyede tutmak ve enerji kaybının önüne geçmek için oldukça önemlidir. Şekil 20'de örnek bir DC Combiner Box görüntüsü verilmektedir.




Şekil 20. DC Combiner Box (Weidmüller, 2024)

### 1.5.7. Evirici

Eviriciler, girişindeki doğru akımı çıkışında genlik ve frekansı kontrol edilebilen alternatif akıma çeviren cihazlardır. Bu kontrol işlemini güç anahtarlama elemanları ile gerçekleştirirler. Eviricilerde yüksek hız ve güçlerde çalışma kapasitesine sahip BJT, GTO, IGBT ve güç mosfetleri gibi güç anahtarlama elemanları kullanılır. Eviriciler, güç gereksinimlerine ve çıkış gerilimlerine göre bir fazlı ya da üç fazlı olarak tasarlanırlar. Düşük güç gerektiren uygulamalarda tek fazlı eviriciler yeterli olurken, orta ve yüksek güç uygulamalarında üç fazlı eviriciler kullanılmaktadır. Aşağıda Şekil 21 ile tek fazlı evirici prensip şeması görülmektedir (I.H.Altas, 2007)




Şekil 21. Tek Fazlı Tam Dalga Köprü Evirici

Eviricilerin sahaya uygun olarak seçilmesi oldukça önem arz etmektedir. Güneş santrallerinde en sık kullanılan iki tip evirici vardır. Bunlar string eviriciler ve merkezi eviriciler olarak ayrılmaktadır. Temelde aynı anlama gelseler de tasarım açısından farklılıklar göstermektedir. String eviriciler genellikle düşük güçlü uygulamalarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte merkezi eviriciler ise daha çok yüksek kapasiteye sahip uygulamalarda tercih edilmektedir. Sahanın koşullarına göre tasarlanan bu ekipmanlar elektrik enerjisinin trafodan önce son çıkış noktası ve şebekede kullanılabilecek olan alternatif akım formuna dönüşüm noktası olduğundan bu ekipmanların verimi ve kararlılığı çok önemli bir unsurdur.

Tez kapsamında çalışılacak olan merkezi eviriciler olup, son yıllarda yapılan hibrit projeler için maliyet optimizasyonu anlamında değerli bir ürün ailesi bulunmaktadır. Birçok firmanın üretimini gerçekleştirdiği bu eviriciler arıza olasılığı düşük ve verimliliği yüksek cihazlardır. Bu cihazlar ileri seviyede şebeke ve üretim tesisi için koruma özellikleri barındırmaktadır. Birçok haberleşme protokolünü ve altyapısını destekleyen bu ekipmanlar veri toplama veya izleme alanlarında da hizmet sunmaktadır. Şekil 22’de merkezi bir evirici gösterilmektedir. Esnek modüler yapıda olan bu ekipmanların genişletilebilir olması uygulaması yapılan projelere ek projeler ile genişletme yapılmasına da imkân vermektedir.

Şekil 22. Merkezi Evirici (ABB, 2024)

Bunun yanında daha küçük uygulamalar için tercih edilen string evirici Şekil 23’te gösterilmiştir.

Şekil 23. String Evirici (ABB, 2024)

### 1.5.8. Güç Trafosu

Elektrik enerjisinin uzak mesafelere iletimi ve bu iletim sırasında güç kaybının en aza indirgenmesi şüphesiz gerilim artışı ile mümkündür. Eğer elektrik enerjisini gerilim seviyesini arttırmadan iletmek isteseydik elektriğin temel denklemlerinden olan

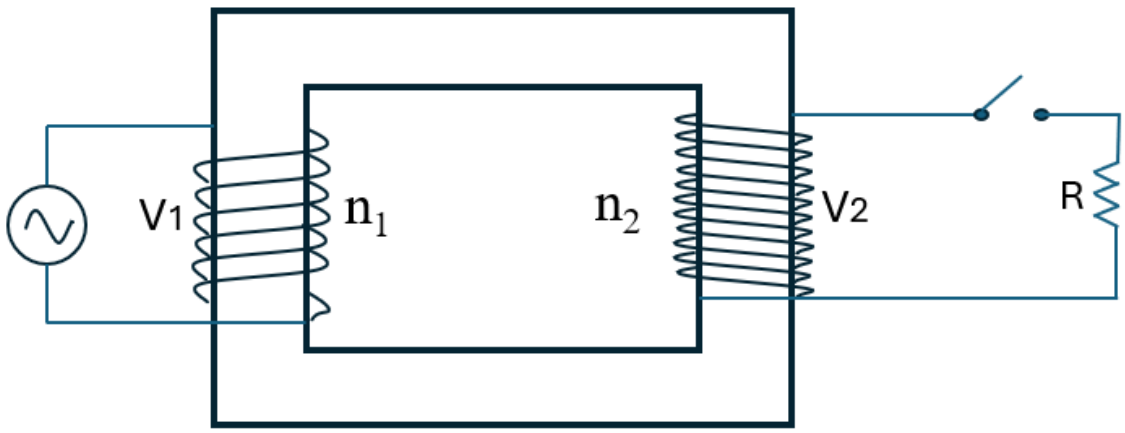
$$P = VxI \tag{7}$$

formülü gereğince yüksek bir güç iletimi için gerilimin düşük kalması durumunda akım oldukça büyüyecek bu da yüksek kesitlere sahip iletkenler kullanılmasını gerektirecekti. Güç kaybı hususunda ise gene temel denklemlerden olan

$$P_{kayıp} = I^2xR \tag{8}$$

formülüne dayanarak düşük gerilime bağlı olarak taşınacak yüksek akımların kayıpları da akımın karesi oranında arttıracaktı. Bu denli bir kablo üretiminin ve uygulanmasının birçok santral uygulaması için hem imkânsız hem de anlamsız olduğu açıktır. Üstelik uygulanabilirliği olsa bile bu kadar kayıp gücünde göze alınması pek mümkün olmayacaktı. Bu zorlukların üstesinden gelmek için gerekli olan gerilim artışını gerçekleştiren, elektrik sistemlerinin vazgeçilmezi tam bu noktada hizmet veren güç trafoları olmaktadır. Güç trafoları iletim sistemleri için gerilim seviyesini yükselterek elektriğin çok uzak mesafelere taşınmasını kolaylaştırmaktadır.

Güç trafoları iki sargıdan meydana gelmekte olup Şekil 24'te şematik olarak gösterilmektedir.




Şekil 24. Güç Trafosu Şematik Gösterimi

Bu şematik gösterimde;

$V_1$ : Primer sargı gerilimini,

$V_2$ : Sekonder sargı gerilimini,

$n_1$ : Primer sargı sayısını,

$n_2$ : Sekonder sargı sayısını,

R : Yükü temsil etmektedir.

Güç trafosunun temel olarak dönüştürme prensibi

$$k = \frac{n1}{n2} = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1} \tag{9}$$

şeklindedir. Bu formülde yer alan k: dönüştürme oranını, $I_1$: primer akımı, $I_2$ sekonder akımı ifade etmektedir. Burada da görüldüğü üzere trafonun sarım sayısı gerilim ile doğru orantılı iken akım ile ters orantılıdır.

Güç trafolarına elektrik santralinin her gerilim seviyesinde karşılaşmak mümkündür. Bir hibrit tesisi ele alacak olursak; rüzgâr türbininde üretilen elektriğin uygun gerilim seviyesine çıkarılması için, güneşten üretilen elektriğin uygun gerilim seviyesine çıkarılması için, üretilen hibrit enerjinin enerji nakil hattına çıkışı öncesi uygun gerilim seviyesine çıkarılması için, iç ihtiyaçta uygun gerilim seviyesine düşürülmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Güç trafosuna ait örnek bir görsel Şekil 25'te verilmektedir.

Şekil 25. Güç Trafosu (BEST Trafo, 2024)

### 1.5.9. Şalt Sahası

Tehlikeli bir ürün elde ediliyorsa şüphesiz bu ürünün kontrollü bir şekilde üretilmesi oldukça önemlidir. Elektrik enerjisi her ne kadar hayatımızı kolaylaştıran bir etken olsa da el ile tutulamayan, göz ile görülemeyen bu enerjinin kontrolü nitelikli ve üst düzey güvenlik tedbirleri barındıran ekipmanlar gerektirmektedir. Bu ekipmanlar basit tabir edilirse bir dizi anahtarlama elemanlarıdır. Özellikle yüksek gerilim için ayırıcılar, kesiciler gibi anahtarlama elemanları elektrik ve mekanik kilitleme önlemleri ile elektrik enerjisinin iletim/dağıtım hattına güvenle yönlendirilmesi ve kontrol edilmesi için önemli bir görev üstlenirler. Bu elemanların yanında akım trafoları, gerilim trafoları, parafudrlar, hat tıkaçları, baralar, iletkenler gibi bu operasyonların gerçekleştirilmesine hizmet eden yardımcı ekipmanlarda mevcuttur. Bu anahtarlama ve yardımcı ekipmanları bünyesinde barındıran, yüksek gerilimin vazgeçilmez alanlarına şalt sahası adı verilmektedir. Şalt sahaları tüm bu ekipmanları barındıran, elektrik operasyonlarının yakından veya uzaktan gerçekleştirilebildiği yüksek gerilim alanlarıdır. Şalt sahalarına bir veya birden çok hat bağlanabilir. Trafo merkezi olarak da kullanılan şalt sahaları üretim veya tüketim bazlı kurulmuş olan trafo merkezlerini iletim hattı vasıtasıyla birbirine bağlamaktadır. Tesisin niteliğine bağlı olarak açık veya kapalı olarak tasarlanabilmektedir. Şekil 26'da kurulu bulunan bir şalt sahası gösterilmektedir.

Şekil 26. Sanko Enerji Sanibey Barajı Şalt Sahası (Sanko Enerji, 2024)

### 1.5.10. Otomasyon Sistemi

Elektrik hızının yaklaşık saniyede 300.000 km olduğunu göz önüne aldığımızda bu enerjinin kontrolünün manuel olarak yapılabilirliği imkansızdır. Bu kontrol için çeşitli kontrol ve otomasyon sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji santrallerinde ise santral türü ve niteliği ne olursa olsun otomasyon sistemi kurulumu kaçınılmazdır. Hele ki rüzgâr gibi kompleks bir üretim tesisi ele alındığında üretim, tüketim, koruma, iletim ve hatta raporlamanın tamamen otomasyon sistemleri ile yapıldığı uygulamalar mevcuttur. Bu durum sadece rüzgâr ile sınırlı olmayıp güneş santrallerinde de tüm bu faaliyetler otomasyon sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel otomasyon sistemleri PLC, koruma ve kontrol röleleri gibi ana ekipmanlar ve sensörler, kontaktörler, anahtarlama röleleri gibi yardımcı elemanların bir araya gelerek iletişim halinde çalışması ile mümkün olmaktadır. Bununla birlikte santral ve ekipmanlarına ait durum izleme, SCADA ve raporlama sistemleri de otomasyon sisteminin bir parçası olarak santrallerde hizmet vermektedir.

### 1.5.11. Meteorolojik Ölçüm İstasyonları

Üretimin birçok kolunda olduğu gibi elektrik üretiminde de en önemli unsurlardan bir tanesi kaynak saptama ve izleme metotlarıdır. Bu kaynak saptama metodu rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji santrallerinde genellikle meteorolojik verilerin izlenmesi ile mümkündür. Rüzgâr santrallerinde rüzgâr hızı, hava sıcaklığı gibi veriler izlenirken güneş santrallerinde rüzgâr hızı, ışınım miktarı, hava sıcaklığı verileri izlenmektedir.

Meteorolojik veriler alınmadan bir rüzgâr veya güneş santralinde üretim tahmini yapmak imkansızdır. Hele ki hibrit bir tesiste üretim gerçekleştirebilmek için anlık, dakikalık, saatlik, günlük, aylık, yıllık olarak verilerin izlenmesi ve kayıt altına alınması elzem bir husustur. İzlenen ve kayıt altında tutulan veriler ışığında üretim tahminleri yapılabilmektedir. Bu üretim tahminleri kısa vadede piyasaya yapılan elektrik satışını yönetmenizi sağlarken uzun vadede şirket kaynaklarınızın kullanımı, gelir gider, bütçe durumlarının tahmini ve izlenmesi gibi konuları yönetmenizi sağlamaktadır. Rüzgâr hızı ölçümü için kullanılan ölçü aleti Şekil 27’de gösterilmiş olup anenometre olarak isimlendirilir.

Şekil 27. Anenometre (Ölçüm Cihazları, 2024)

Güneş ışınımı ölçmek için kullanılan ölçü aleti Şekil 28’de gösterilmiş olup, piranometre olarak isimlendirilir.

Şekil 28. Piranometre (EIF, 2024)

# 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

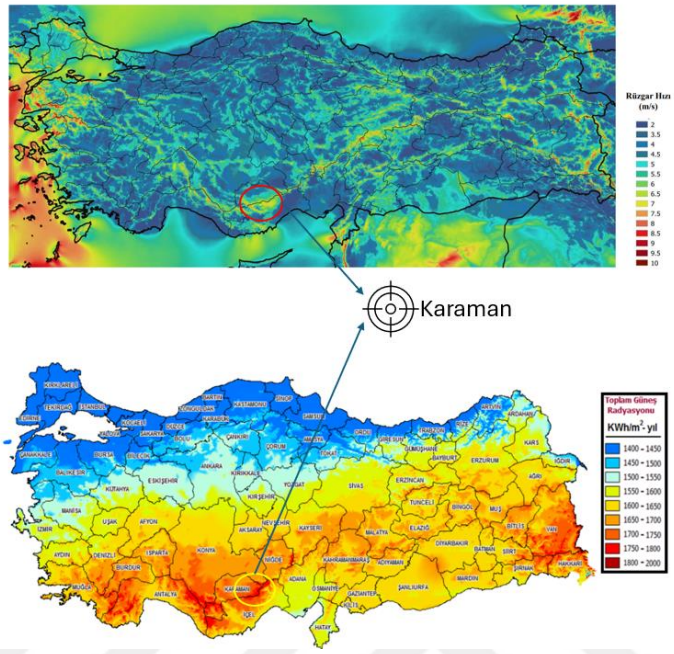
Bu tez çalışması kapsamında hali hazırda kurulu bulunduğu öngörülen bir rüzgâr santraline yardımcı kaynak olarak destek verecek bir güneş santralinin tasarımı ve analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar için öncelikle Türkiye'nin rüzgâr ve güneş potansiyeli haritalarından faydalanılarak iki yenilenebilir kaynak yönünden de güçlü bir bölge seçilmeye çalışılmıştır. Seçilen bölgede var olan bir rüzgâr santraline ait tasarım koşulları aktarılmıştır. Ardından bu bölgeye dair olası üretim senaryoları incelenerek kurulacak güneş santralinin gücüne karar verilmiştir. Kurulacak güneş santraline ve nihai olarak da kurulacak olan bu hibrit santrale ait tasarımlar ortaya koyulmuştur. Bu hibrit santrale ait bir üretim algoritması üzerine çalışılmıştır. Bu üretim algoritması santralin üretimi nasıl gerçekleştireceği ve lisans gücü oranında hangi kaynağın kullanılması gerektiğinin kararını verecek bir algoritma olarak tasarlanmıştır. Bu algoritma doğrultusunda da tasarlanan yeni hibrit tesisin üretim analizleri yapılmıştır.

## 2.1. Santral Bölgesi Seçimi

Santral tasarımları için yapılan bütün fizibilite çalışmalarının en öncelikli amacı santral için doğru kurulum alanının belirlenmesidir. Bu belirleme işlemi için birçok farklı metot mevcuttur. Fakat bu çalışma kapsamında santral bölge seçiminden ziyade santral tasarım ve analizi üzerinde çalışmalar yapılacağından santral bölgesi seçimi için bir yöntem üzerinde çalışılmamıştır. Bu çalışma için rüzgâr potansiyeli ve güneş potansiyelinin yüksek olduğu bir bölge seçilecektir. Bölgenin seçimi yapılırken Şekil 29 ile verilen haritalardan faydalanılmıştır. Verilen haritalarda rüzgâr ve güneş kaynakları yönünden güçlü olan bölge belirlenmiştir. Bu belirlemenin sonucu olarak her iki kaynak yönünden güçlü olan Karaman bölgesi seçilmiştir.

Karaman, 37.11 kuzey enlemleri ile 33.15 doğu boylamları arasında İç Anadolu Bölgesinin güneyinde yer almaktadır. Merkezi deniz seviyesinden yaklaşık 1000 metre olup santralin kurulması planlanan bölgelerin dağlık ve tarıma elverişli olmayan bölgelerden seçileceği öngörülerek santral bölgesi yaklaşık 1500 metre kotunda varsayılmıştır. Karaman ilinde kışları soğuk ve karlı geçerken yazları sıcak ve kurak geçmektedir. Bu iklim koşullarına uygun olarak ekipman seçimi ve santral tasarımı yapılacaktır. Genel olarak düz olan Karaman, çevresinde birçok dağ bulundurmaktadır.

Bununla birlikte jeolojik açıdan oldukça sağlam bir zemine sahip olup deprem riskinin en az olduğu bölgelerimizdendir. (T.C. Karaman Valiliği, 2024)




Şekil 29. Santral Bölgesinin Seçimi

Yapılan tez çalışması bu bölgede kurulu bulunan bir rüzgâr santralinin varlığı düşünülerek yapılmıştır.

## 2.1. Ana Kaynak Santralin (RES) Tanımı

Tez çalışması kapsamında Türkiye'de en fazla kullanılan türbin tipleri incelenmiştir. Tez çalışmasının mevcut santrallere ve yapılacak hibrit çalışmalara ışık tutması amacıyla ülkemizde en fazla kurulmuş olan türbin markası ile tasarım ve analizler yapılacaktır. 2022 yılı temmuz ayı itibariyle ülkemizde en fazla kurulum yapılmış olan türbin markası Nordex olmuştur. (TÜREB, 2022 )

Çalışmada incelenmek ve analizlerde kullanılmak üzere Nordex N131/3600 türbin tipi seçilmiştir. Seçilen türbin tipi ile ana kaynak olarak kabul edilen santralin 40 MWh lisans gücüne sahip olduğu varsayılmıştır. Bu tesisin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Rüzgâr Elektrik Santrali Özellikleri

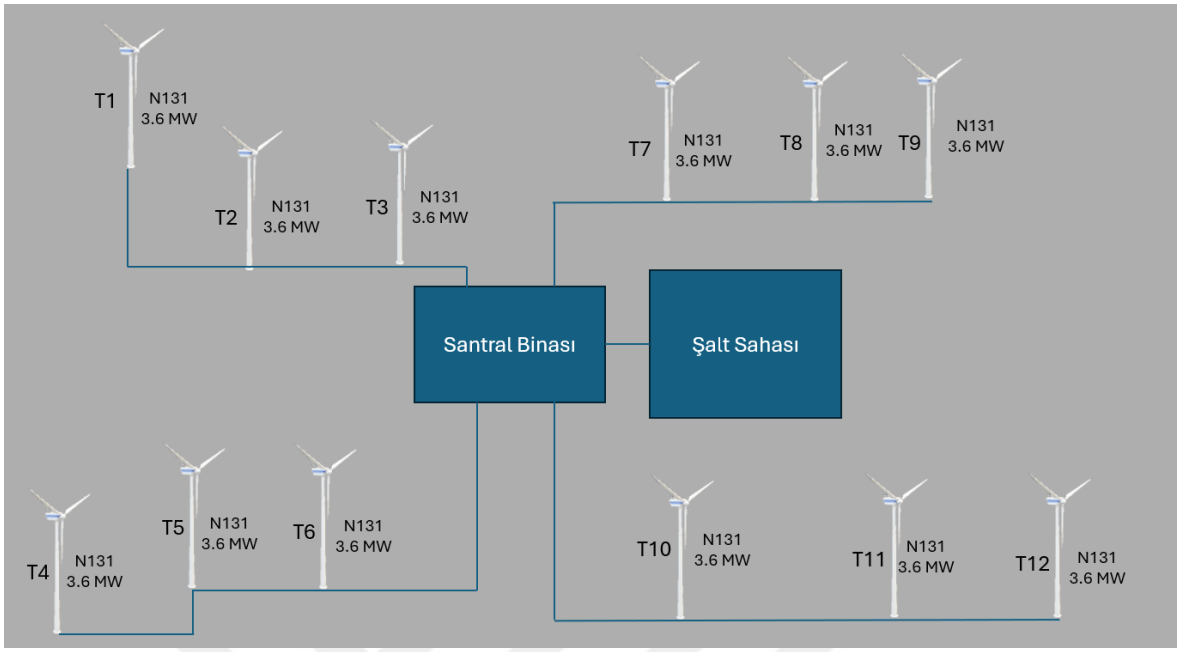
| Türbin Tipi | Türbin Gücü | Türbin Sayısı | Toplam RES Kurulu Gücü | Lisans Gücü |
|---|---|---|---|---|
| N131/3600 | 3600 kWh | 12 | 43200 kWh | 40000 kWh |

12 adet türbine sahip bu RES tesisi 43,2 MWh kurulu güce sahip olacaktır. Seçilen türbin Nordex N131/3600 çıkış gücü ayarlanabilen, göbek yüksekliği sahaya uygun olarak seçilebilen bir türbin tipidir. Orta rüzgâr sahaları için idealdir. Seçilen türbin tipine ait teknik özellikler Tablo 3 ile verilmiştir. (Nordex, 2024)

Tablo 3. N131/3600 Türbin Özellikleri (Nordex, 2024)

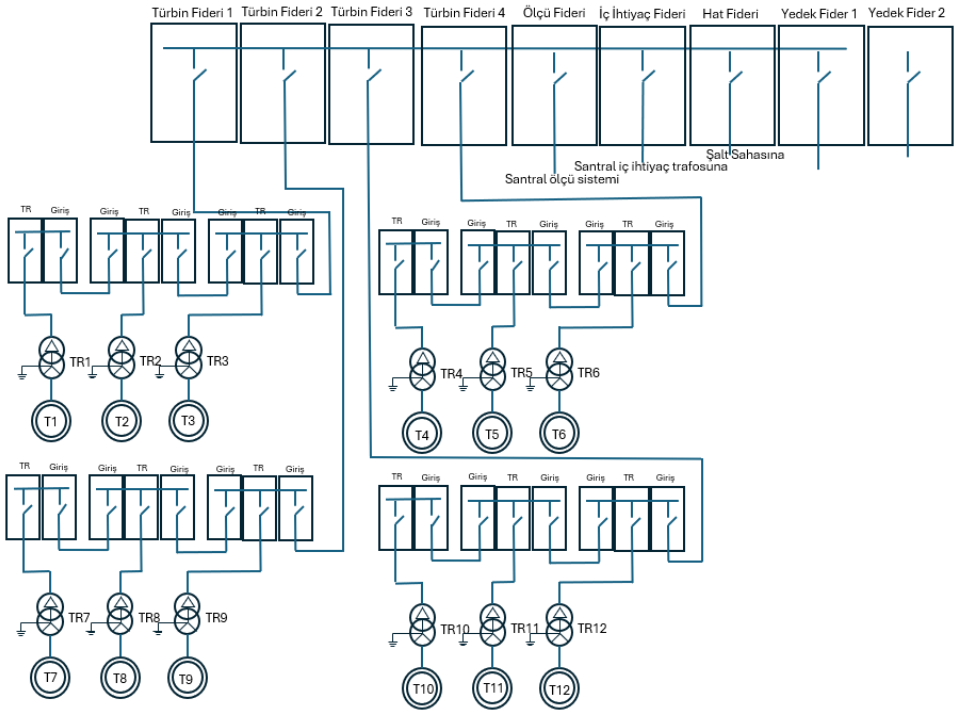
| | |
|---|---|
| Türbin Tipi | N131/3600 |
| Anma Gücü | 3.6 MW |
| Üretime Başlama Rüzgâr Hızı | 3 m/s |
| Üretimi Kesme Rüzgâr Hızı | 25 m/s |
| Kaçak Hız | 81,6 m/s |
| Rotor Çapı | 131 m |
| Süpürme Alanı | 13.478 m² |
| Çalışma Aralığı Dönüş Hızı | 7,5-13,6 dev/dk |
| Nominal Dönüş Hızı | 11,9 dev/dk |
| Soğutma Sistemi | Sıvı + Hava Soğutmalı |
| Generatör | Çift Beslemeli Asenkron Generatör |
| Gerilim | 660 V |
| Frekans | 50/60 Hz |
| Göbek Yüksekliği | 86-136 m<br>(Projeye uygun olarak değişebilir.) |
| Fren Sistemi | Aerodinamik fren + Disk fren |
| Dişli | 3 Kademeli Dişli Kutusu |
| Ses Seviyesi | 104,9 dB |

Ana kaynak rüzgâr santraline ait santral genel yerleşim planı Şekil 30'da verilmiştir.




Şekil 30. Rüzgâr Santrali Genel Yerleşim Planı

Yerleşim planına uygun olarak çizilmiş olan santral tek hat şeması Şekil 31'de verilmiştir.




Şekil 31. Rüzgâr Santrali Tek Hat Şeması

Tek hat şeması incelendiğinde 12 adet rüzgâr türbini sahanın koşulları gereğince dağınık yerleştiğinden dolayı RMU hücreler vasıtasıyla türbinlerden gelen orta gerilim kabloları birleştirilerek türbin grupları halinde veya tek başına orta gerilim hücrelerine giriş yapmaktadır. Tek hat şemasına göre türbin 1, türbin 2 ve türbin 3 birlikte 1 numaralı fideri oluştururken türbin 4, türbin 5, türbin 6 iki numaralı fideri, türbin 7, türbin 8, türbin 9 üç numaralı fideri, türbin 10, türbin 11, türbin 12 dört numaralı fideri grup halinde birbirine bağlanarak oluşturmuştur. Bu fiderlere ilave olarak ölçüm yapılabilmesi için ölçü fideri, santral iç ihtiyaç beslemesine hizmet edecek olan iç ihtiyaç trafosu çıkışı için ölçü fideri ve üretilen enerjinin şalt sahasına transferinin sağlanması için hat fideri bulunmaktadır. İleride oluşacak genişleme projeleri kapsamı düşünülerek rüzgâr santrallerinde sıklıkla bırakılan yedek fider hücreleri de projeye ilave edilmiştir. Hibrit olarak yardımcı kaynak ilave edilecek olan ana kaynak santral bu şekilde kabul edilerek çalışmalara devam edilmiştir.

## 2.2. Yardımcı Kaynak Gücünün Belirlenmesi

Ana kaynak santralinin lisans gücünü aşmayacak şekilde üretime destek sağlayacak olan yardımcı kaynak gücünün hesaplanması için hali hazırda kurulu bulunan rüzgâr santraline ait yaklaşık üretim verileri bilinmelidir. Bu veriler için fiili olarak yenilenebilir enerji santralleri ile üretim yapan Sanko Enerji firmasının 2022 yılı faaliyet raporu verilerinden yararlanılmıştır. Bu verilere göre firmanın Karaman da bulunan 40 MW gücündeki Akyel 1 tesisi 3 yıllık ortalamaya bakıldığında yıllık ortalama 158.356 MWh üretim yapmıştır. Şekil 33'te bu üretim verileri gösterilmektedir. Bu üretim verileri ışığında 156.700 MWh fizibilitesi bulunan tesisin fizibilite oranında üretim yaptığını söylemek mümkündür. (Sanko Enerji, 2024)

Bu veriler ışığında tasarımı yapılan 40 MWe lisans gücüne sahip tesisin yaklaşık 160.000 MWh yıllık üretim yapacağı öngörülmektedir. Tesise entegre edilecek olan güneş santrali gücünün belirlenmesi için santral lisans gücü üzerinden gündüz satılabilir enerji miktarı hesaplanmalıdır. Bunun için tablo güneşlenme süresi boyunca lisans gücünü göz önünde bulundurarak ne kadar enerji satılabilir olduğu Denklem 10 ile hesaplanmıştır. Ortalama güneşlenme süresi Tablo 4 verilerinin ortalaması alınarak bulunmuştur. Yaklaşık güneşlenme süresi 8 saat kabul edilmiştir.

Tablo 4. Karaman Aylık Bazda Güneşlenme Süresi

| **Aylar** | **Güneşlenme Süresi(saat)** |
|---|---|
| Ocak | 4,46 |
| Şubat | 5,85 |
| Mart | 7,14 |
| Nisan | 8,44 |
| Mayıs | 9,84 |
| Haziran | 11,51 |
| Temmuz | 12,02 |
| Ağustos | 11,47 |
| Eylül | 10,11 |
| Ekim | 7,77 |
| Kasım | 5,95 |
| Aralık | 4,31 |
| Ortalama | 8,24 |

8 saatlik güneşlenme süresi üzerinden hesap yapıldığında;

$$\text{Lisans gücü x Ortalama Güneşlenme Süresi} = \text{Satılabilir Enerji Miktarı} \quad (10)$$

$$40 \text{ x } 8 = 320 \text{ MWh} \quad (11)$$

Bu durumda günlük olarak satılabilir enerji miktarı güneşlenme süresi boyunca yaklaşık olarak 320 MWh olarak bulunmuştur. Buna ilave olarak Şekil 32'de verilen rüzgâr üretim verilerine baktığımızda toplam yıllık üretimi, günlük olarak 3'e bölerek güneşlenme süresi boyunca rüzgâr üretimine gidilmiştir.

$$160.000 / 365 = 438 \text{ MWh} \quad (12)$$

$$438 / 3 = 146 \text{ MWh} \quad (13)$$

Günlük olarak güneşlenme süresi boyunca hesaplanan rüzgâr santrali üretimi ortalama 145 MWh'tir. Bulunan değeri satılabilir enerji miktarından çıkardığımızda;

$$320 – 146 = 174 \text{ MWh} \quad (15)$$

Bulunan bu değer ise kabul ettiğimiz 8 saatlik güneşlenme süresi için 21,75 MWh'lik bir santral tasarımının uygun olduğunu göstermektedir. Fakat yatırımın geri dönüşünün hızlı olması önemli bir parametre olduğundan toplam hibrit gücün 10 MWh olması planlanmıştır.

**Üretim Miktar (MWh)**

| | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | Toplam | Ortalama |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sanibey | 58.612 | 944.071 | 997.794 | 708.590 | 497.394 | 1.056.284 | 653.471 | 708.805 | 812.349 | 1.123.862 | 962.403 | 590.426 | 752.443 | 9.866.504 | 817.324 |
| Tepekışla | | | | | | 49.334 | 239.224 | 134.568 | 142.158 | 206.347 | 159.542 | 90.678 | 143.635 | 1.165.486 | 159.450 |
| Cevizlik | 168.982 | 283.448 | 288.955 | 264.693 | 252.329 | 276.977 | 302.290 | 286.389 | 291.977 | 242.887 | 263.400 | 216.941 | 285.964 | 3.425.233 | 271.354 |
| Kalkandere | | 137.879 | 136.943 | 129.531 | 125.810 | 136.785 | 148.260 | 143.413 | 140.589 | 117.165 | 127.581 | 112.515 | 133.995 | 1.590.465 | 132.539 |
| Kızılağaç | | | | 16.705 | 16.902 | 18.593 | 21.156 | 19.387 | 18.418 | 15.256 | 16.488 | 14.231 | 17.215 | 174.352 | 17.435 |
| Koçlu | | | | | 37.408 | 108.795 | 111.797 | 106.082 | 88.160 | 90.509 | 72.202 | 60.393 | 88.066 | 763.412 | 90.751 |
| Çatalca | 161.708 | 178.544 | 192.203 | 166.789 | 153.820 | 168.899 | 191.664 | 258.652 | 292.832 | 268.714 | 288.581 | 273.591 | 274.995 | 3.028.329 | 276.227 |
| Hilal-2 | | | | | | 7.519 | 37.562 | 35.797 | 35.136 | 35.536 | 31.907 | 35.796 | 36.310 | 255.563 | 35.435 |
| Akyel-1 | | | | | | | | | | | 6.458 | 164.188 | 152.525 | 323.170 | 158.356 |
| Akyel-2 RES | | | | | | | | | | | 3.671 | 38.852 | 36.546 | 79.069 | 37.699 |
| Akyel-2 GES | | | | | | | | | | | | | 4.526 | 4.526 | 4.526 |
| Gazi-9 | | | | | | | | | | | 6.026 | 166.539 | 186.224 | 358.789 | 176.381 |
| Güney-1 | | | | | | | | | | | 3.027 | 71.460 | 178.734 | 253.221 | 125.097 |
| Salihli JES-1 | | | | | | | | 14.668 | 106.192 | 107.934 | 109.295 | 99.803 | 103.287 | 541.178 | 105.302 |
| Salihli JES-2 | | | | | | | | | | 44.000 | 178.376 | 171.224 | 163.738 | 557.339 | 171.113 |
| Salihli JES-3 | | | | | | | | | | 50.306 | 198.406 | 205.142 | 194.027 | 647.882 | 199.192 |
| TOPLAM ENERJİ GRUBU | 389.302 | 1.543.941 | 1.615.896 | 1.286.308 | 1.083.662 | 1.823.186 | 1.705.424 | 1.707.761 | 1.927.810 | 2.302.516 | 2.427.361 | 2.311.780 | 2.752.230 | 23.034.517 | 2.778.182 |

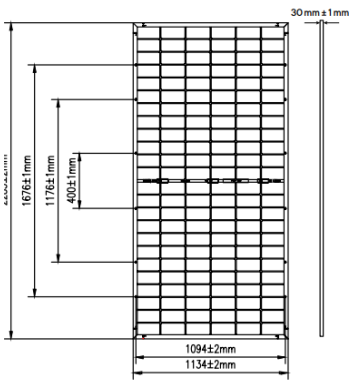
Şekil 32. Sanko Enerji Yıllık Üretim Miktarları (Sanko Enerji, 2024)

Yardımcı kaynak GES tesisine ait lisans gücü 8,80 MWe olarak belirlendiğinden tüm hesaplamalar ve çalışmalar bu güç üzerine yapılmıştır. Bu gücü elde edebilmek için kurulacak olan MWm mekanik güç (DC panel gücü) için DC/AC oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bu belirleme içinde ülkemizde çokça kabul gören 1,12 DC/AC oranı kullanılacaktır. Bu orana göre kurulacak olan santralin DC gücü 10 MWm, AC gücü ise 8,80 MWe olacaktır.

## 2.3. Hibrit Santralin Tasarımı

### 2.3.1. Güneş Paneli

Hibrit santral kurulumu için GES tasarımı yapılırken verimliliği yüksek bir panel tipi seçimi yapılarak, ülkemizde Kalyon PV tarafından üretimi yapılan 540 Wp M10-144 Cam-Cam model güneş paneli kullanılmıştır. Kullanılan panel monokristal yapıdadır. Bu panel 182x91 mm'lik 144 adet yarım hücreden meydana gelmektedir. Temperli cam teknolojisi ile sahalarda yüksek dayanıklılıkları ile öne çıkan bu ekipmana ait mekanik özellikler Şekil 33'te verilmiştir. (Kalyon PV, 2024)




**MEKANİK ÖZELLİKLER**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hücre | Tip | Mono-C Silicon Bifacial PERC | Modül Boyutları | Uzunluk | 2285 mm ± 2 mm |
| | Adet | 144 Adet Yarım Hücre | | Genişlik | 1134 mm ± 2 mm |
| | Boyut | 182 mm x 91 mm | | Kalınlık | 30 mm ± 1 mm |
| Bağlantı Kutusu | Bypass Diyot | 3 Adet | Montaj Deliği | Adet | 12 |
| | Koruma Sınıfı | IP68 | | Boyut | 9 mm x 14 mm Yarıçap 4.5 mm |
| | Çıkış Kabloları | 30 cm | | Montaj Deliği Aralığı (Uzun Kenar) | 1676/1176/400 ± 1 mm |
| | Konnektör | MC4 ile Uyumlu | | Montaj Deliği Aralığı (Yatay Eksen) | 1094 ± 2 mm |
| | Nominal Akım | 30 A | Ağırlık | 30 mm Çerçeve | 32 kg ± %5 |
| Cam | AR Kaplama Yarı Temperli, 2.0 mm Kalınlık | | Topraklama Deliği | Adet | 8 |
| | | | | Boyut | En: 4 mm |

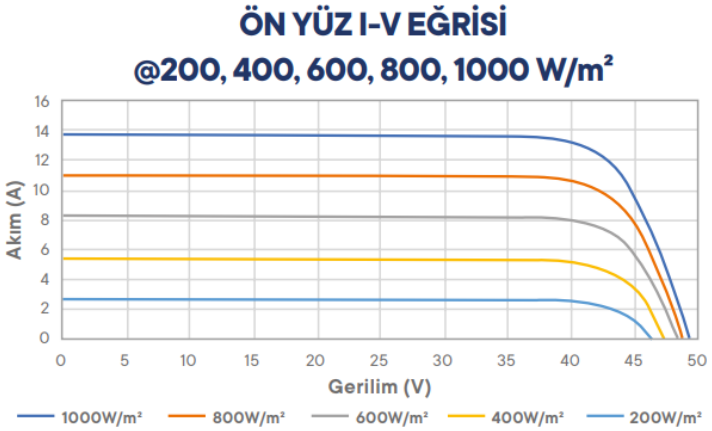
Şekil 33. Güneş Panelinin Mekaniksel Özellikleri (Kalyon PV, 2024)

Santralin tasarımına direkt olarak etki edecek parametrelerin başında kullanılacak güneş paneline ait elektriksel bilgiler gelmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda santral tasarımları yapılmakta olup, string düzeni, string de bulunacak panel sayısı gibi bilgiler panelin elektriksel verilerine doğrudan bağlıdır. Kullanılacak olan panelin elektriksel verileri Tablo 5 ile verilmiştir.

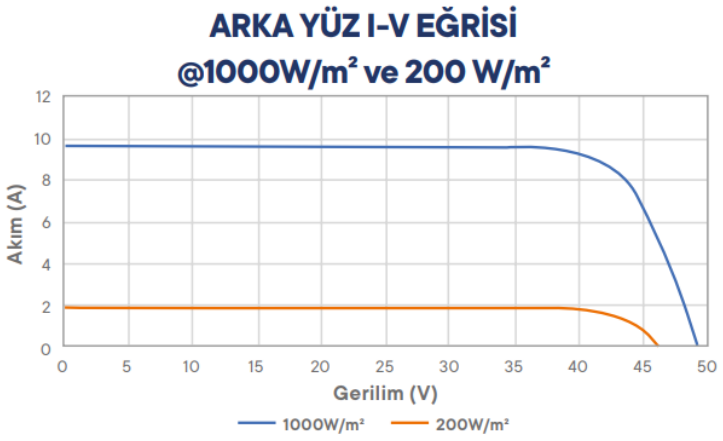
Tablo 5. Güneş Panelinin Elektriksel Özellikleri (Kalyon PV, 2024)

| | |
|---|---|
| Maksimum Güç ($P_{max}$) | 540 W |
| Açık Devre Gerilimi | 49,68 V |
| Kısa Devre Akımı | 13,71 A |
| Maksimum Güç Gerilimi | 41,35 V |
| Maksimum Güç Akımı | 13,06 A |
| Modül Verimliliği | %20,83 |
| Kısa Devre Akımı ($I_{SC}$) | 16,55 A |
| Çift Yüzeylilik Oranı | +0,69 ±0,03 |

Bununla birlikte panelin farklı ışınım koşulları altında ön ve arka yüz akım-gerilim eğrileri Şekil 34 ve Şekil 35 de verilmiştir.




Şekil 34. Güneş Paneli Ön Yüz Akım-Gerilim Eğrisi (Kalyon PV, 2024)




Şekil 35. Güneş Paneli Arka Yüz Akım-Gerilim Eğrisi

Kullanılan bu panel teknoloji akım-gerilim eğrilerinden de görüleceği üzere cam-cam yapısı sayesinde hem ön yüzeyden gelen hem de arka yüzeye yansıyan ışınımlar ile elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Bu avantaj ve verim artışı gerçekten yatırımlara olumlu yansımaktadır.

### 2.3.2. Evirici

Santralin kurulacağı bölgenin coğrafik koşulları, kullanılacak ekipmanların seçiminde en önemli faktörlerden birisidir. Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan hibrit tesiste bölgenin coğrafi koşulları göz önünde bulundurularak seçimler yapılmıştır. Seçilen bölge kış koşulları bakımından genellikle yoğun karlı geçtiği için kurulacak olan güneş santralinde merkezi eviriciler kullanılmıştır. Bu tercih ile string eviricilerin sahada dağınık şekilde ulaşılmayı güçlendiren dezavantajının önüne geçilmiştir. Kullanılması planlanan merkezi evirici SMA firması tarafından üretilen 4,4 MVA gücünde, Sunny Central 4400 UP modelidir. Bu modelde eviriciye entegre olarak bir adet trafo ve dağıtım panosu birlikte gelmektedir. Eviricinin genel görseli Şekil 36'da verilmiştir.

Şekil 36. ABB PVS-980 Merkezi Evirici (Fimer SPA, 2024)

Kullanılan evirici modeli modüler yapıdadır. Bu rack tipindeki modüler yapısı sayesinde herhangi bir arıza yaşanması durumunda yedek modüller hızlıca devreye alınabilmektedir. Evirici için teknik bilgiler Tablo 6 ile verilmiştir.

Tablo 6. SMA Sunny Central 4400 UP Merkezi Evirici Teknik Özellikleri

| | |
|---|---|
| Maksimum Güç | 4400 kVA |
| Maksimum DC İşletme Voltajı | 1500 V DC |
| Maksimum DC İşletme Akımı | 4750 A |
| MPPT Çalışma Aralığı | 962-1325 V DC |
| Başlangıç Gerilimi | 934 V DC |
| AC Çıkış Voltajı | 528-759 V AC |

Evirici ile entegre olarak çalışan trafo için teknik bilgiler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. SMA Sunny Central 4400 UP Merkezi Eviriciye Entegre Trafo Teknik Özellikleri

| | |
|---|---|
| Trafo Soğutma Tipi | ONAN |
| AC Çıkış Gücü 25°C | 5000 kVA |
| AC Çıkış Gücü 35°C | 4864 kVA |
| AC Çıkış Gücü 50°C | 4421 kVA |
| Sekonder Voltajı | 690 V |
| Primer Voltajı | 36 kV |
| Frekans | 50/60 Hz |
| Yağ Tipi | Mineral |
| Kademe Değiştirici | ±2 x 2,5 % |

Trafo ile entegre olarak çalışan kesicili dağıtım panosu için teknik bilgiler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. SMA Sunny Central 4400 UP Merkezi Trafoya Entegre Kesici Teknik Özellikleri

| | |
|---|---|
| Kesici Tipi | SF6 Gaz İzoleli |
| Anma Akımı | 630 A |

Bu teknik bilgiler doğrultusunda santralin tasarımı yapılmıştır.

### 2.3.3. GES Tesisi DC Güç Hesabı ve DC Tek Hat Şeması

Kurulacak olan hibrit GES tesisine ait gücü 10 MWp/8,80 MWe olacak şekilde belirlemiştik. Bu belirleme de kullanılan DC güç 10 MWp yaklaşık bir değer olup net güç yapılan hesaplar doğrultusunda çıkarılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken eviriciye ait MPPT çalışma voltaj aralığı önemli olacaktır. Şöyle ki;

Kullanılacak olan güneş paneline ait maksimum güç gerilimi 41,35 V DC olarak üretici tarafından verilmektedir. Buna göre panellerin seri olarak bağlandığı string yapılarının çalışma voltajı üzerinden panel sayısı belirlenmiştir. Çalışma da kullanılması

planlanan eviricinin 35 °C de verilen voltaj aralığının kullanılması uygundur. 50 °C ile verilen voltaj aralığının kullanımı anormal koşulları ifade etmektedir. Bu nedenle 35 °C sıcaklıkta çalışması için voltaj seviyesi yaklaşık olarak ~1200 V DC olarak belirlenmiştir.

Bu durumun hesaplanması için şu denklemler geçerli olmaktadır.

$$1200 / 41{,}35 = 29{,}02 \tag{16}$$

Burada bulunan 29,02 sayısı panel adeti için geçerli olmayacağından dolayı her stringde bulunacak panel adeti 30 olarak seçilmiştir. Bu hesap üzerinden hesabı yenilediğimizde ise Denklem 16 da verilen 1240 V DC çalışma gerilimine ulaşılmaktadır.

$$30 \text{ x } 41{,}35 \sim 1240 \text{ V} \tag{17}$$

Bulunan bu gerilim değeri yeni kurulacak GES tesisinin çalışma voltajı olmakla birlikte kullanılacak olan merkezi inverterin MPPT çalışma aralığı içinde uygundur. Bununla birlikte bir diğer parametre olan santralin toplam DC kurulu gücünü 1,12 bir DC/AC oranı ile 10.000 MWp belirlemiştik. Bu belirlenen toplam DC güç için ise gerekli olan net güneş paneli hesabına şu şekilde gidilmektedir.

$$10.000.000 \text{ Wp} / 540 \text{ Wp} \sim 18304 \text{ Modül} \tag{18}$$

Burada bulunan panel adeti tam net rakam olmayacağı için, her stringde 26 panel bulunacak şekilde, 26'ya tam bölünebilen toplam panel sayısı 18304 olarak belirlenmiştir. Buradan da hareketle santraldeki toplam string sayısı Denklem 18'de hesaplandığı üzere 771 adet olacaktır.

$$18.304 / 26 = 704 \tag{19}$$

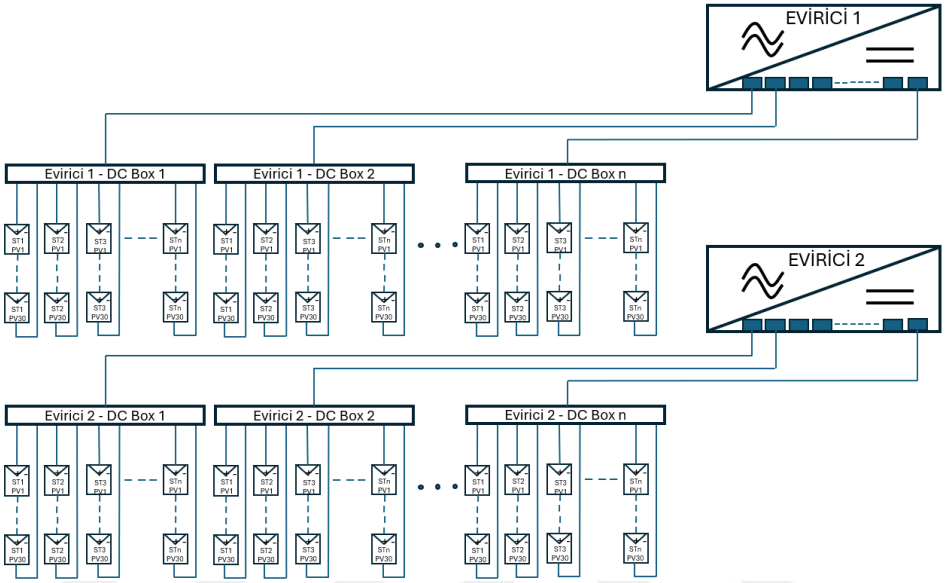
String sayısı, her bir stringde bulunan panel sayısının belirlenmesinin ardından santralin tam olarak DC kurulu gücü Denklem 19 ile 9.884.160 Wp belirlenmiştir.

$$704 \text{ x } 26 \text{ x } 540 = 9.884.160 \text{ Wp} \tag{20}$$

Santralin tasarımında AC gücümüz 8,80 MWe olacaktı. Öyleyse; bu gücü seçtiğimiz evirici tipine uygun olarak böldüğümüz de iki adet evirici kullanmamız gerekecektir. Bu durumda da her bir evirici için 352 adet string bağlantısı yapılacaktır. Bir tane eviricide bu bağlantıyı yapmak ve bu kadar büyük alanda solar kablolar ile bu enerjiyi taşımak

mümkün olmadığı için stringlerden gelen enerji öncelikle santralin belirli bölgelerinde DC Box noktalarında birleştirilmiştir. Birleştirilen enerji ardından eviricilerin DC noktalarına daha yüksek kesitli kablolar ile taşınacaktır.

Bu bilgiler doğrultusunda GES tesisine ait DC tek hat şeması şematik gösterimi Şekil 37 ile verilmektedir.



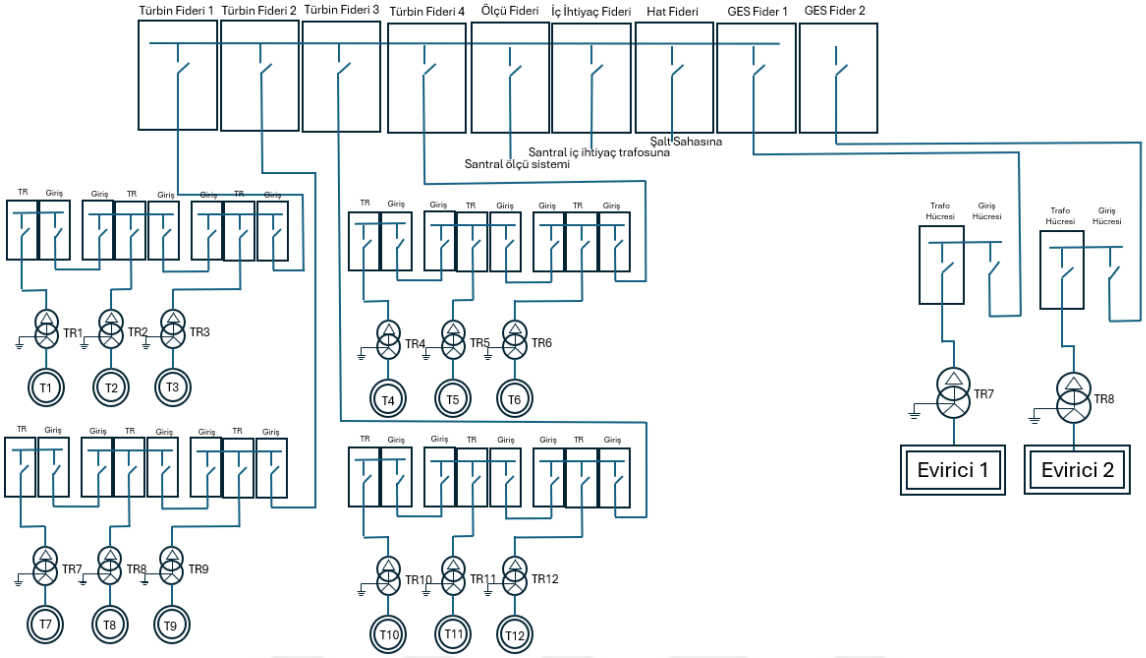

Şekil 37. GES Tesisi DC Tek Hat Şeması Şematik Gösterimi

Kurulacak olan hibrit GES tesisinin RES tesisi ile bağlantısına kadar olan süreçte güneş enerjisinden üretilen DC güç eviriciler vasıtasıyla AC güce evrilmekte ve iki tesisin bara bağlantısı AC tarafta birleştirilmektedir.

### 2.3.4. RES-GES Hibrit Santral Bağlantısı

Tasarımı yapılan RES-GES Hibrit Santrali aynı güç trafosu üzerinden, şebeke ile aynı bağlantı noktasından bağlı olacaktır. Şöyle ki; hali hazırda kurulu bulunan ana kaynak rüzgâr santrali türbinlerden gelen elektrik enerjisini orta gerilim hücreleri vasıtasıyla güç trafosuna, buradan da şebekeye aktarmaktadır. Burada bulunan orta gerilim hücrelerinde yedek bulunan hücrelere yardımcı kaynak olarak kurulumu yapılan güneş santralinin orta gerilim tarafı bağlanacaktır. Güneş santralinin orta gerilim tarafını ise evirici sonrasında bulunan eviriciye entegre edilmiş trafo primeri oluşturmaktadır. Burada bahsi geçen orta gerilim hücreleri birbiri ile kısa devre olduğundan dolayı rüzgâr ve güneş santrali aynı

bağlantı noktasında toplanmış olacaktır. Bu bağlantıya ait tek hat şeması şematik gösterimi Şekil 38 ile verilmiştir.




Şekil 38. RES-GES Hibrit Santrali Tek Hat Şeması Şematik Gösterimi

## 2.4. Hibrit Santralin İşletme Algoritması

Hibrit bir şekilde çalışacak olan tesisimiz ana kaynak üretimini öncelikli olarak değerlendirecektir. Bu değerlendirmeyi yaparken Şekil 39'da gösterilen algoritmayı kullanacaktır. Bu algoritmaya göre öncelikle rüzgâr hızının okunması ardından da rüzgâr türbini gücünün hesaplanması yapılacak ve toplam türbin gücü ($P_T$) hesaplanacaktır. İlk olarak rüzgârdan üretilen güç lisans gücünden büyük ise üretilen enerji lisans gücüne göre sınırlanarak şebekeye gönderilecektir. Rüzgârdan üretilen enerji lisans gücünden küçük ise güneş enerjisinden üretilecek enerjinin hesaplanması için ışınım değeri okunacaktır. Bu ışınım değeri vasıtasıyla da güneşten üretilen enerji hesaplanacaktır. Eğer rüzgâr ve güneşten üretilen enerjinin toplam gücü lisans gücünün üzerinde değil ise üretilen enerji şebekeye gönderilecektir. Fakat bu güç lisans gücünün üzerinde ise rüzgârdan üretilen enerji ile lisans gücü arasında kalan üretim boşluğunun bulunması için bir $P_{fark}$ değeri hesaplanacaktır. Eğer güneşten üretilen güç bu fark güçten küçük ise üretilen toplam enerji şebekeye gönderilecektir. Fakat güneşten üretilen güç fark güçten büyük ise evirici modülleri devreden çıkarılarak bu fark ile üretilen enerji değeri karşılaştırılmaya devam

edilecektir. Böylece güneşten gelen güç değeri lisans gücünü aşmayacak şekilde sınırlandırılmış olacaktır. Bu algoritma sürekli olarak tekrarlanarak nihai üretim değeri lisans gücüne bu yöntem ile sınırlandırılarak şebekeye gönderilecektir. Bu algoritma şeması Şekil 39 ile aşağıda verilmiştir.

Burada;

$v_T$ : Rüzgar hızı (m/s)

$P_T$: Toplam RES gücü (MW)

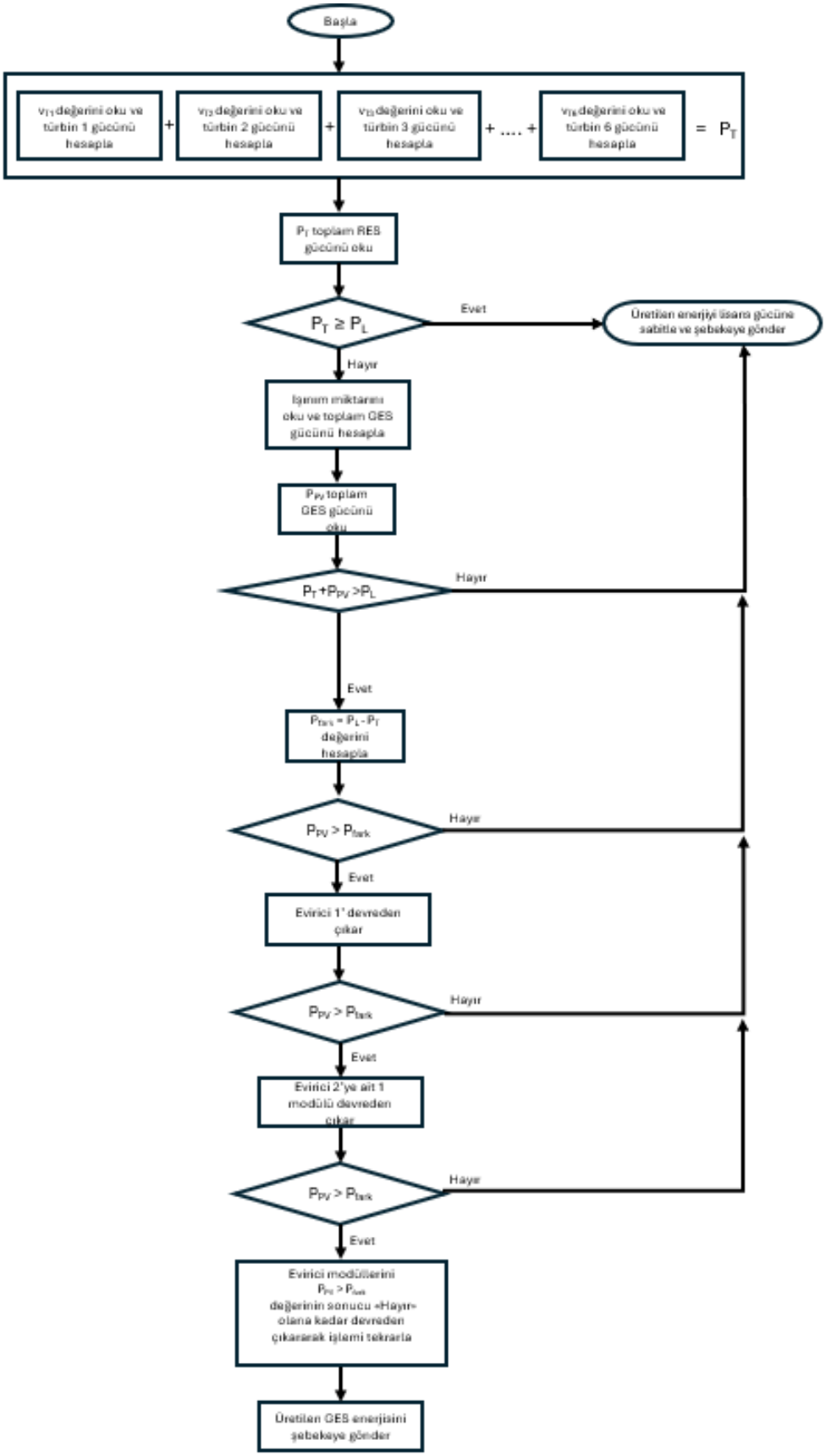
q : Işınım miktarı (W/m²)

$P_{PV}$: Toplam GES gücü (MW)

$P_L$: Lisans Gücü (MW)

$P_{fark}$: Seçili kaynak ile lisans gücü arasındaki fark (MW)

değerlerini temsil etmektedir.




Şekil 39. Hibrit Santralin İşletme Algoritması

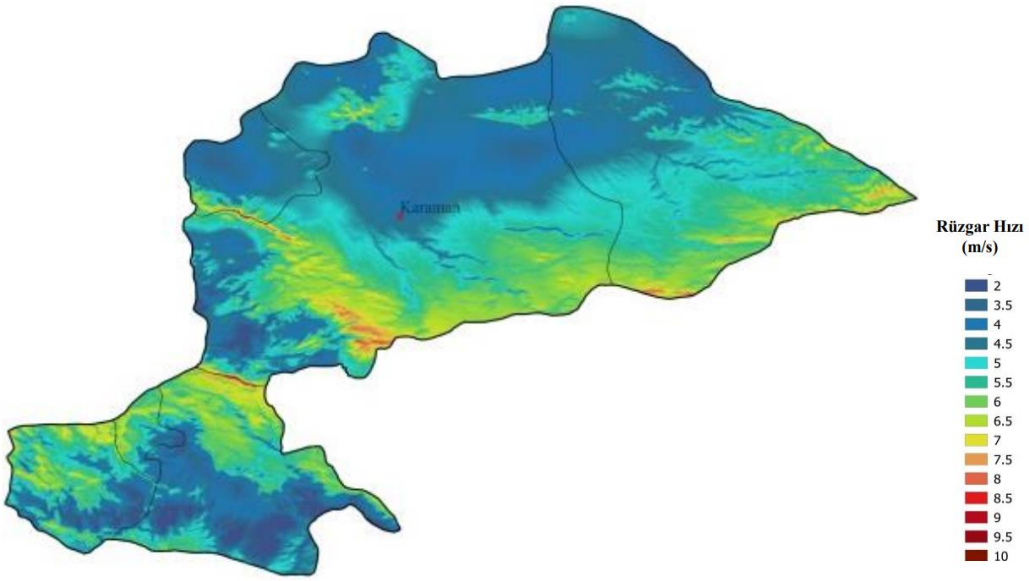
# 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

## 3.1. Bölgenin Rüzgar Potansiyeli

Ülkemizin güney kesimlerinde rüzgâr potansiyeli genel itibariyle güçlüdür. Karaman bölgesi de bu güçlü rüzgarlardan yüksek oranda faydalanan bir bölgedir. Bu bölgenin rüzgâr potansiyeli 4,94 m/s olup, şehre ait rüzgâr verileri Tablo 9'da ve 100 metredeki rüzgâr hızı dağılımı Şekil 40'ta verilmiştir.

Tablo 9. Karaman Rüzgâr Hızı Verileri

| | |
|---|---|
| Minimum Rüzgâr Hızı (m/s) | 1,99 |
| Maksimum Rüzgâr Hızı (m/s) | 8,74 |
| Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s) | 4,94 |



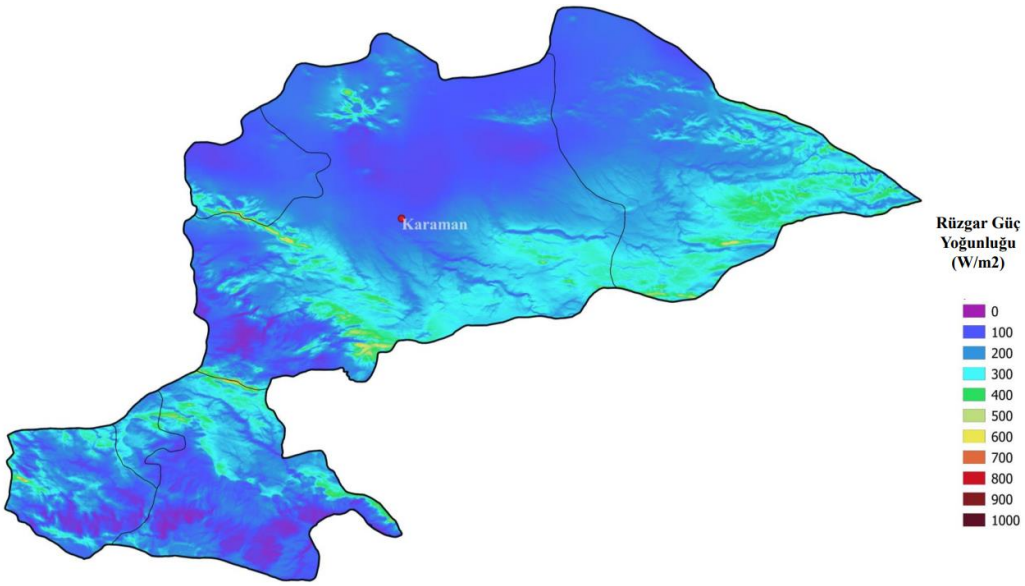

Şekil 40. Karaman Rüzgâr Hızı Dağılımı

Karaman, ülkemizin enerji potansiyelini kullanılabilmesi adına önemli şehirler arasındadır. Özellikle dağlarında bulunan tarıma elverişli olmayan alanlar enerji santrali kurulumları için biçilmiş kaftan bölgelerdendir. Metre kare başına ortalama 193,026 W güç

vaat eden Karaman iline ait güç yoğunluğu verileri Tablo 10'da ve 100 metredeki rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı Şekil 41'de gösterilmiştir.

Tablo 10. Karaman Rüzgâr Güç Yoğunluğu Verileri

| | |
|---|---|
| Minumum Güç Yoğunluğu (W/m²) | 17,479 |
| Maksimum Güç Yoğunluğu (W/m²) | 745,872 |
| Ortalama Güç Yoğunluğu (W/m²) | 193,026 |

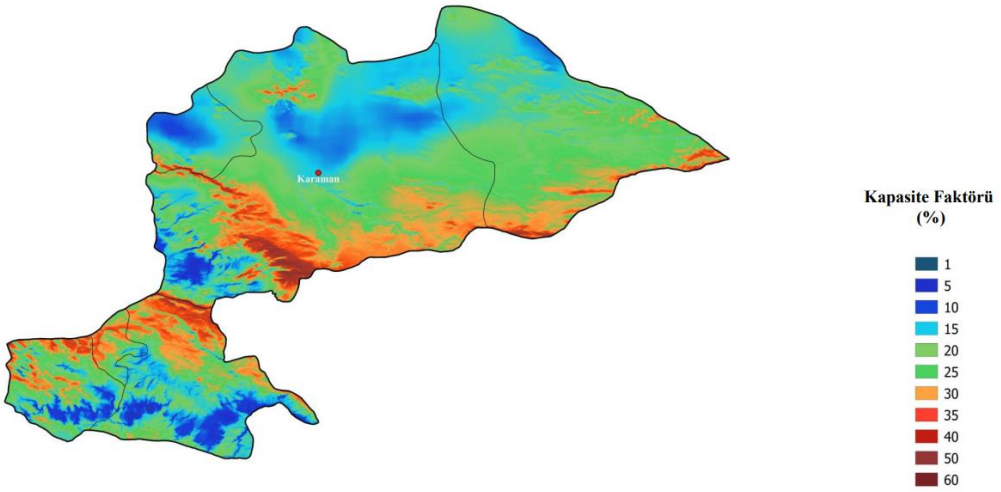



Şekil 41. Karaman Rüzgâr Güç Yoğunluğu Dağılımı

Ülkemizin birçok şehrinde ciddi rüzgâr potansiyeli mevcuttur. Bu şehirlerin sahip olduğu coğrafi konumunun getirmiş olduğu avantajları her alanda değerlendirdiği gibi rüzgâr enerjisi de ülkemiz için elektrik üretim potansiyeli açısından büyük bir kaynak sunmaktadır. Öyle ki; ülkemiz sınırları dahilinde bulunan rüzgâr potansiyeli yaklaşık 47.850 MWh'dir. Rüzgâr santralleri için en önemli parametrelerden bir tanesi de kapasite faktörüdür. Karaman iline ait kapasite faktörü verileri Tablo 11'de ve 100 metredeki kapasite faktörü dağılımı Şekil 42'de verilmiştir.

Tablo 11. Karaman Rüzgâr Kapasite Faktörü Verileri

| | |
|---|---|
| Minimum Kapasite Faktörü (%) | 2,04 |
| Maksimum Kapasite Faktörü (%) | 51,08 |
| Ortalama Kapasite Faktörü (%) | 21,50 |



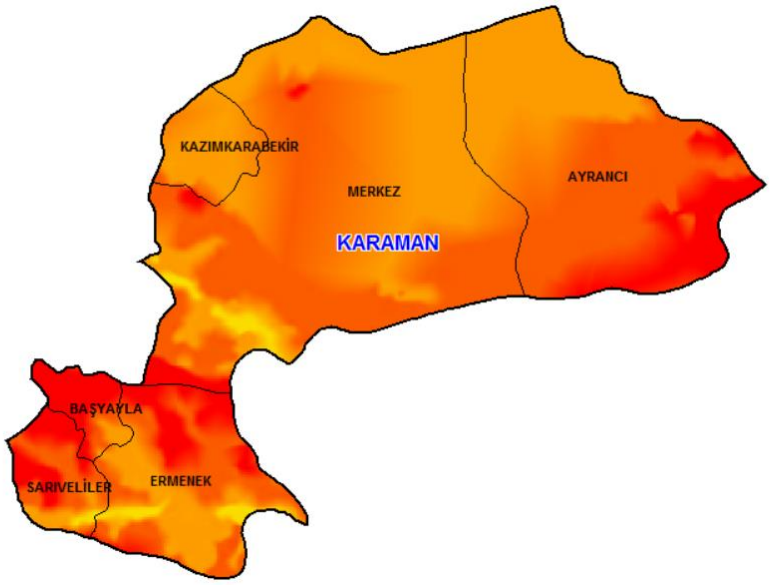

Şekil 42. Karaman Rüzgâr Kapasite Faktörü Dağılımı

Verilerden de görüleceği gibi Karaman ili rüzgâr enerjisi bakımından ülkemizin oldukça güçlü şehirlerindendir. Bu şehirde yapılacak enerji üsleri ülkemizin dışa bağlılığının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının arttırılması adına güzel bir gelecek sergilemektedir. Bu şehre ait arazilerin verimli projeler ile kullanımı oldukça değerli ve önemlidir. Keza enerjiye olan ihtiyacın her gün arttığı dünyada bu denli potansiyeli bulunan alanların sunduğu fırsatlardan yararlanmak yerinde olacaktır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

### 3.2. Bölgenin Güneş Potansiyeli

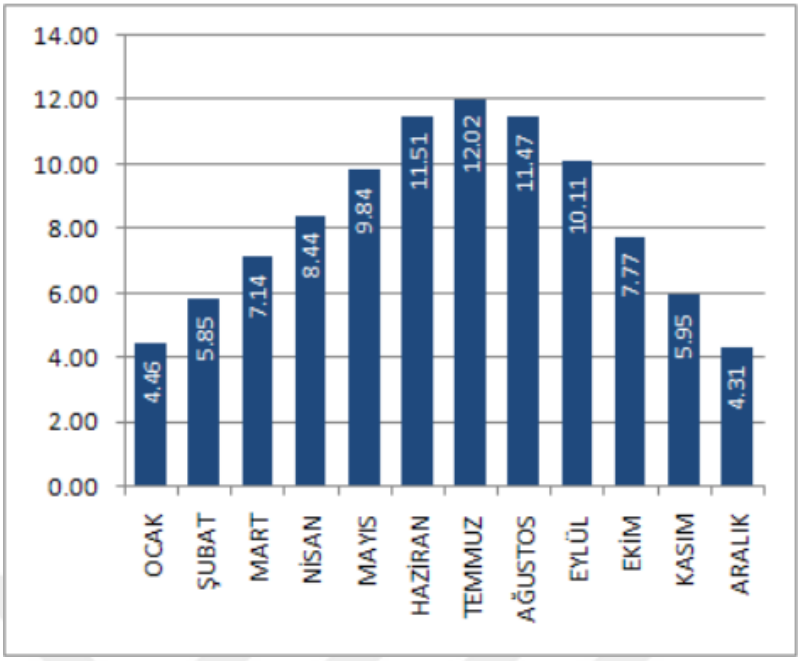
Güneş enerjisi potansiyeli en yüksek şehirler arasında yer alan Karaman, geniş arazileri ile bu enerji türü için birçok avantajı bir arada sunmaktadır. Ortalama 8 saatin üzerinde güneşlenme süresi ise bu şehir için güneş potansiyeline güçlü bir destektir.

Karaman iline ait güneş enerjisi potansiyel atlası Şekil 43'te verilmiş olup, güneş enerjisi açısından çok verimli bir bölge olduğunu söylemek mümkündür.



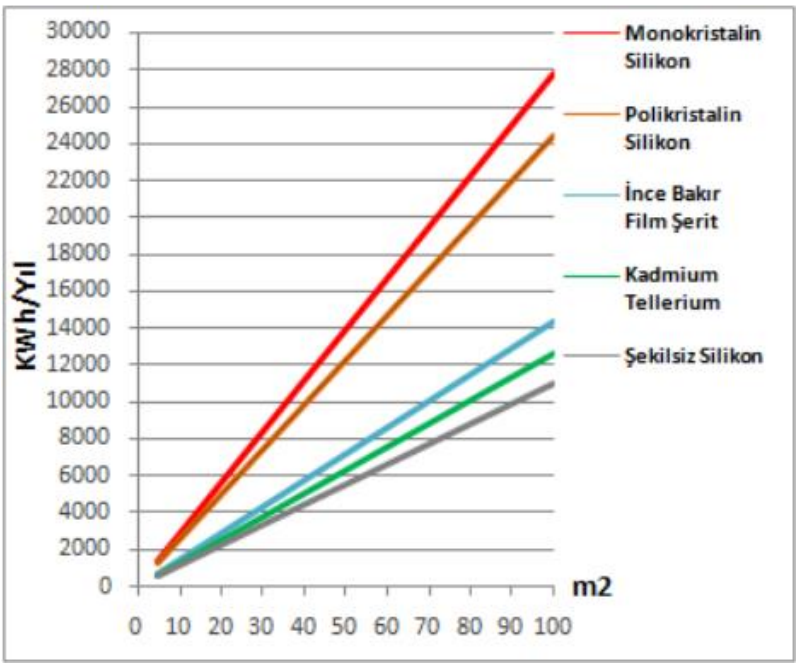

Şekil 43. Karaman Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası

Güneş açısından güçlü olan bu şehirde hali hazırda güneş enerjisinden faydalanılmakta olmasına rağmen değerlendirilebilecek birçok alan mevcuttur. Ülkemizde yıllık güneşlenme süresinin 2,74 saat olduğunu göz önüne aldığımızda da Karaman şehrinin ülkemiz ortalamasına ciddi katkı sağladığı açıktır. Karaman iline ait güneşlenme süresinin aylara göre değişimi Şekil 44 ile verilmiştir.




Şekil 44. Karaman Güneşlenme Süresinin Aylara Göre Değişimi

Bununla birlikte ülkemizde ortalama ışınım değeri 1547 kWh seviyesindedir. Karaman'da ise bu değer Şekil 45'te görüleceği üzere, farklı panel tiplerine göre değişiklik gösterse bile, ülke ortalamasından oldukça yüksektir.




Şekil 45. Karaman Yıllık Üretilebilecek Enerji Miktarı

Bu potansiyel ile ülkemizde öne çıkmakta olan şehir, dünya da bulunan şehirlere baktığımızda da açık ara birçok lokasyondan daha değerlidir. Bu değerli şehrin güneş enerjisi yönünden kullanılmasının önünde engel olmayıp yatırımcılarında bu şehre yönlenmeleri oldukça anlaşılır bir durumdur. Ülkemiz enterkonekte şebeke ağının güçlenmesi ile gelecek yıllarda daha fazla enerji santrali kurulumu ile adından söz ettireceği açıktır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

### 3.3. Hibrit Santralin Analizi ve Analiz Çıktılarının Değerlendirilmesi

Tasarımı yapılan GES tesisinin analizi için sıklıkla kullanılmakta olan PVsyst simülasyon programı kullanılmıştır. PVsyst programı, İsviçre Cenevre Üniversitesi tarafından tasarlanmıştır. PV sistemlerin simülasyonlarını şebeke bağlantılı veya şebeke bağlantısız şekilde simüle edebilen program gerçek değerlere çok yakın sonuçlar çıkararak bu sonuçları grafikler ile yorumlamaya imkân sunmaktadır. Birçok programa nazaran daha detaylı sonuçlar ve yorumlar veren bu program piyasada adından çokça söz ettirmekte ve kabul görmektedir. (PVSYST, 2024)

Yapılan bu simülasyon çalışmasında da hibrit olarak kurulumu tasarlanan GES tesisinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar gerçekleştirilirken PVsyst programı içerisinde panel, inverter, azimut açısı, string sayısı, stringde bulunacak panel sayısı gibi parametreler seçilmektedir. Tez çalışması kapsamında incelenen Karaman bölgesi için bu simülasyon çalışmasında Barutkavuran bölgesi tercih edilmiştir. Karaman bölgesinin genel potansiyelini görmek açısından için oldukça uygun bir seçimdir. Projenin seçim bölgesine ait PVsyst çıktısı görüntüsü Şekil 46 ile verilmektedir.

**Project summary**

| Geographical Site | Situation | | Project settings | |
|---|---|---|---|---|
| **Barutkavuran** | Latitude | 37.16 °N | Albedo | 0.20 |
| Turkey | Longitude | 33.36 °E | | |
| | Altitude | 1179 m | | |
| | Time zone | UTC+3 | | |

**Meteo data**
Barutkavuran
Meteonorm 8.1 (2003-2010), Sat=100% - Synthetic

Şekil 46. Santral Bölgesine Ait Karakteristikler

Simülasyon çalışması kapsamında tercih edilen ekipmanlara ait özellikler ise şu şekildedir;

- Panel seçiminde 540 Wp gücünde paneller,
- Panel eğimleri için 30° azimut açısı,
- İnverter seçiminde 4400 kW AC inverterler,
- String başına panel sayısı 26 adet,
- String sayısı 704 adet,
- DC/AC yüklenme oranı 1.12,

olarak tercih edilmiştir. Bu tercihler doğrultusunda programdan aldığımız sistem özeti Şekil 47'de gösterilmiştir.

**System summary**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Grid-Connected System** | | **No 3D scene defined, no shadings** | | | |
| **PV Field Orientation** | | **Near Shadings** | | **User's needs** | |
| Fixed plane | | No Shadings | | Unlimited load (grid) | |
| Tilt/Azimuth | 30 / 0 ° | | | | |
| **System information** | | | | | |
| **PV Array** | | | **Inverters** | | |
| Nb. of modules | 18304 units | | Nb. of units | | 2 units |
| Pnom total | 9884 kWp | | Pnom total | | 8800 kWac |
| | | | Pnom ratio | | 1.123 |

Şekil 47. Sistem Özeti

Yapılan panel tasarımına ait programdan alınan genel parametreler ve PV string karakteristikleri ise Şekil 48'deki gibidir. Buradan da görüleceği üzere fotovoltaik paneller 30° azimut açısı ile konumlandırılmıştır. 540 Wp gücündeki panellerden 18304 adet kullanılarak her biri 26 panel içeren toplamda 704 string elde edilmiştir. Panellerin toplam kapladığı alan 48284 m² olarak program tarafından hesaplanmaktadır. 1.12 DC-AC oranı ile tasarlanan tesis 2 adet merkezi inverter ile enerji üretimi yapmaktadır. Bununla birlikte toplamda 9884 kWp güce sahip olan tesisin 50°C ortam sıcaklığına ulaşıldığında gösterdiği performansa da yer verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere bu sıcaklık değerine ulaşıldığında güç düşümü yaşanarak toplam güç 9073 kWp olarak gerçekleşmektedir.

**General parameters**

**Grid-Connected System** — **No 3D scene defined, no shadings**

**PV Field Orientation**

| **Orientation** | | **Sheds configuration** | **Models used** | |
|---|---|---|---|---|
| Fixed plane | | No 3D scene defined | Transposition | Perez |
| Tilt/Azimuth | 30 / 0 ° | | Diffuse | Perez, Meteonorm |
| | | | Circumsolar | separate |

| **Horizon** | **Near Shadings** | **User's needs** |
|---|---|---|
| Free Horizon | No Shadings | Unlimited load (grid) |

**PV Array Characteristics**

| **PV module** | | **Inverter** | |
|---|---|---|---|
| Manufacturer | JA Solar | Manufacturer | SMA |
| Model | JAM72-D30-540-MB | Model | Sunny Central 4400 UP |
| (Original PVsyst database) | | (Original PVsyst database) | |
| Unit Nom. Power | 540 Wp | Unit Nom. Power | 4400 kWac |
| Number of PV modules | 18304 units | Number of inverters | 2 units |
| Nominal (STC) | 9884 kWp | Total power | 8800 kWac |
| Modules | 704 string x 26 In series | Operating voltage | 962-1325 V |
| **At operating cond. (50°C)** | | Pnom ratio (DC:AC) | 1.12 |
| Pmpp | 9073 kWp | | |
| U mpp | 981 V | | |
| I mpp | 9246 A | | |

| **Total PV power** | | **Total inverter power** | |
|---|---|---|---|
| Nominal (STC) | 9884 kWp | Total power | 8800 kWac |
| Total | 18304 modules | Number of inverters | 2 units |
| Module area | 47284 m² | Pnom ratio | 1.12 |

Şekil 48. PV String Karakteristikleri

Sıcaklık artışı panel verimlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun sonuçlarını görmek için Şekil 49 ile verilen simülasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Bu kayıpları incelediğimizde sıcaklığa bağlı olarak verimliliğin düştüğünü açıkça görmekteyiz.

**Array losses**

| **Thermal Loss factor** | | **DC wiring losses** | | **Module Quality Loss** | |
|---|---|---|---|---|---|
| Module temperature according to irradiance | | Global array res. | 1.7 mΩ | Loss Fraction | -0.8 % |
| Uc (const) | 20.0 W/m²K | Loss Fraction | 1.5 % at STC | | |
| Uv (wind) | 0.0 W/m²K/m/s | | | | |

| **Module mismatch losses** | | **Strings Mismatch loss** | |
|---|---|---|---|
| Loss Fraction | 2.0 % at MPP | Loss Fraction | 0.2 % |

**IAM loss factor**

Incidence effect (IAM): User defined profile

| 0° | 30° | 50° | 65° | 70° | 75° | 80° | 85° | 90° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.000 | 1.000 | 0.989 | 0.945 | 0.890 | 0.821 | 0.681 | 0.439 | 0.000 |

Şekil 49. String Kayıpları

Santralin üretim yapmasında değerlendirilmesi gereken en önemli analiz çıktılarının başında gelen performans oranı (PR) oranı bu tesis için %86,71 gibi çok iyi bir sonuç

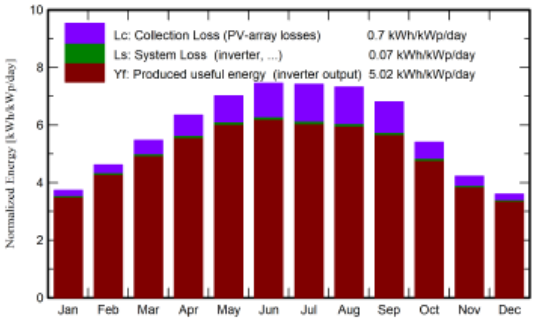
vermektedir. Şekil 50 ile verilen ana çıktılarda da görüleceği gibi performans oranı sıcaklığın arttığı aylarda düşüş eğiliminde iken sıcaklığın daha az olduğu aylarda %90 değerinin dahi üzerinde bir performans göstermektedir. Her ne kadar performans oranı düşse bile çıktılara baktığımızda santralin en fazla üretimi Haziran, Temmuz, Ağustos gibi sıcak yaz dönemlerinde yapacağını görmekteyiz. Bunun nedeni bu aylarda üretime direkt katkısı olan ışınım miktarının yüksek olmasıdır. Işınım miktarının tersi yönde düşmesinin santral üretimi üzerindeki etkisinin ne derece olumsuz etkilediğini ise Kasım, Aralık, Ocak aylarına baktığımızda açıkça görüyoruz. Işınımın düşük olduğu bu aylar performans oranı yüksek olsa bile üretim oranı daha düşük seyretmektedir. Yıllık ortalamalara baktığımızda ise ortalama ortam sıcaklığının 12,55°C oldukça düşük bir değer olduğunu görmekteyiz. Bununla birlikte ortalama ışınım miktarının 2000 kWh/m²‘nin üzerinde kaldığını söylemek mümkündür. Bu şartlar altında tasarlanan hibrit santral tesisinin %86,71 gibi yüksek bir performans oranı ile yıllık 18114 MWh’lik bir üretim gerçekleştireceğini öngörmek mümkündür.

**Main results**

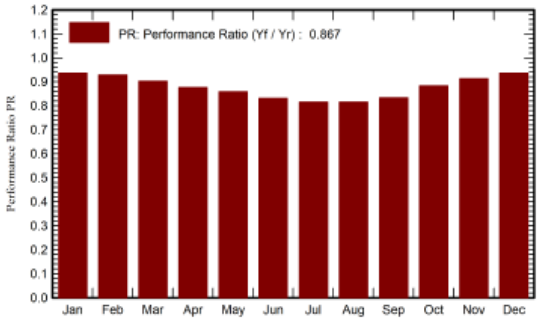
**System Production**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Produced Energy | 18114005 kWh/year | Specific production | 1833 kWh/kWp/year |
| | | Perf. Ratio PR | 86.71 % |

**Normalized productions (per installed kWp)**




**Performance Ratio PR**




**Balances and main results**

| | GlobHor kWh/m² | DiffHor kWh/m² | T_Amb °C | GlobInc kWh/m² | GlobEff kWh/m² | EArray kWh | E_Grid kWh | PR ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| January | 75.2 | 30.49 | -0.71 | 116.0 | 114.2 | 1089071 | 1073033 | 0.936 |
| February | 92.2 | 38.08 | 1.56 | 129.3 | 127.1 | 1204885 | 1187420 | 0.929 |
| March | 140.2 | 56.16 | 6.98 | 169.5 | 166.3 | 1534501 | 1512337 | 0.903 |
| April | 177.0 | 61.34 | 11.52 | 190.4 | 186.0 | 1674073 | 1649971 | 0.877 |
| May | 223.9 | 63.91 | 16.59 | 217.7 | 212.6 | 1874374 | 1847739 | 0.859 |
| June | 242.8 | 53.42 | 21.34 | 223.6 | 218.1 | 1865187 | 1838985 | 0.832 |
| July | 242.6 | 58.90 | 25.30 | 229.9 | 224.3 | 1880243 | 1854253 | 0.816 |
| August | 217.9 | 59.58 | 25.27 | 227.1 | 221.8 | 1855828 | 1830220 | 0.816 |
| September | 173.5 | 47.64 | 19.95 | 204.3 | 200.0 | 1706289 | 1682368 | 0.833 |
| October | 125.7 | 47.84 | 13.93 | 167.6 | 164.6 | 1484662 | 1463948 | 0.884 |
| November | 83.9 | 34.51 | 6.80 | 126.5 | 124.6 | 1158712 | 1142194 | 0.913 |
| December | 68.6 | 28.34 | 1.27 | 111.6 | 109.8 | 1046783 | 1031537 | 0.936 |
| Year | 1863.5 | 580.20 | 12.55 | 2113.5 | 2069.6 | 18374607 | 18114005 | 0.867 |

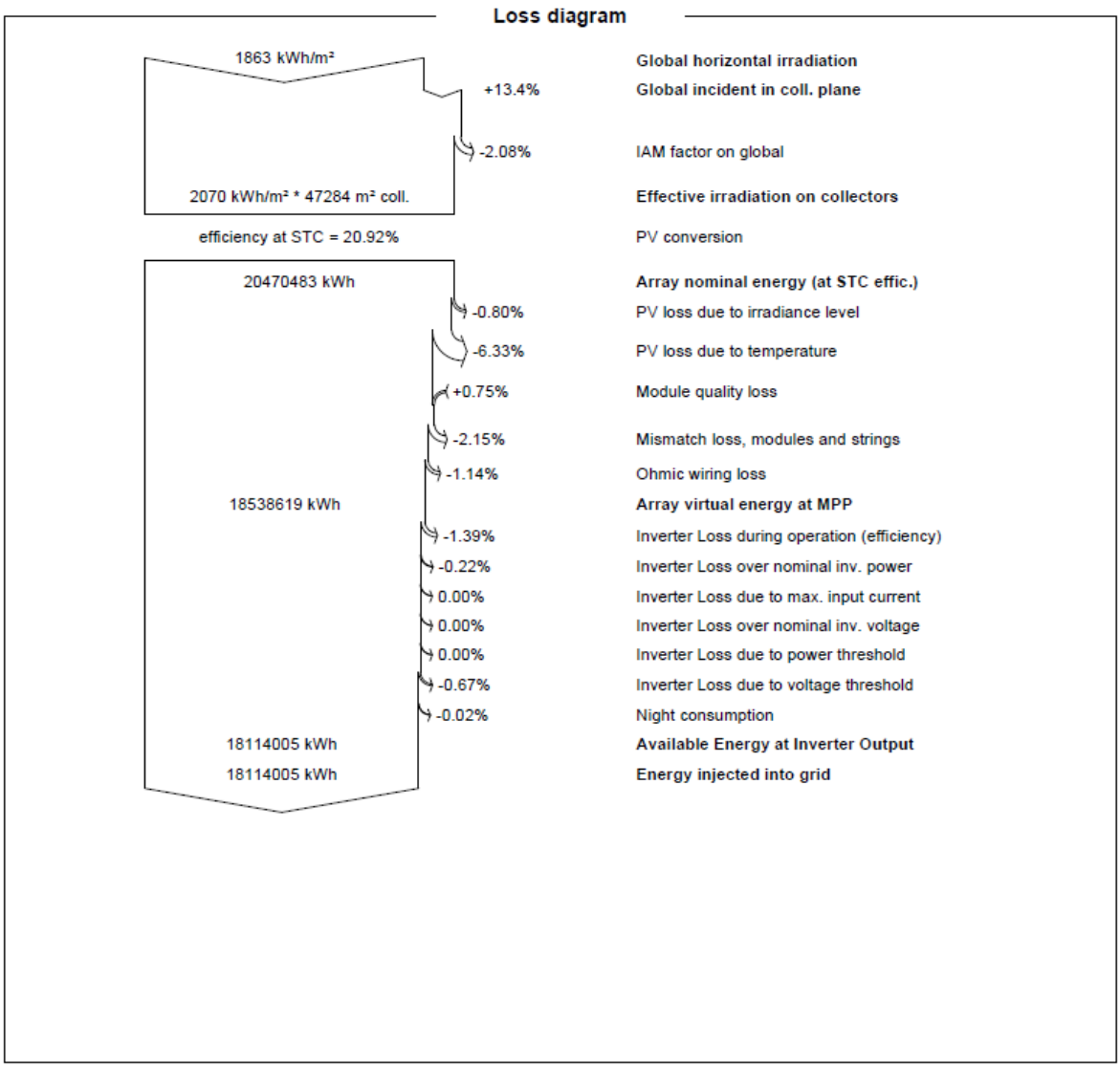
**Legends**

| | | | |
|---|---|---|---|
| GlobHor | Global horizontal irradiation | EArray | Effective energy at the output of the array |
| DiffHor | Horizontal diffuse irradiation | E_Grid | Energy injected into grid |
| T_Amb | Ambient Temperature | PR | Performance Ratio |
| GlobInc | Global incident in coll. plane | | |
| GlobEff | Effective Global, corr. for IAM and shadings | | |

Şekil 50. Sistemin Ana Çıktıları

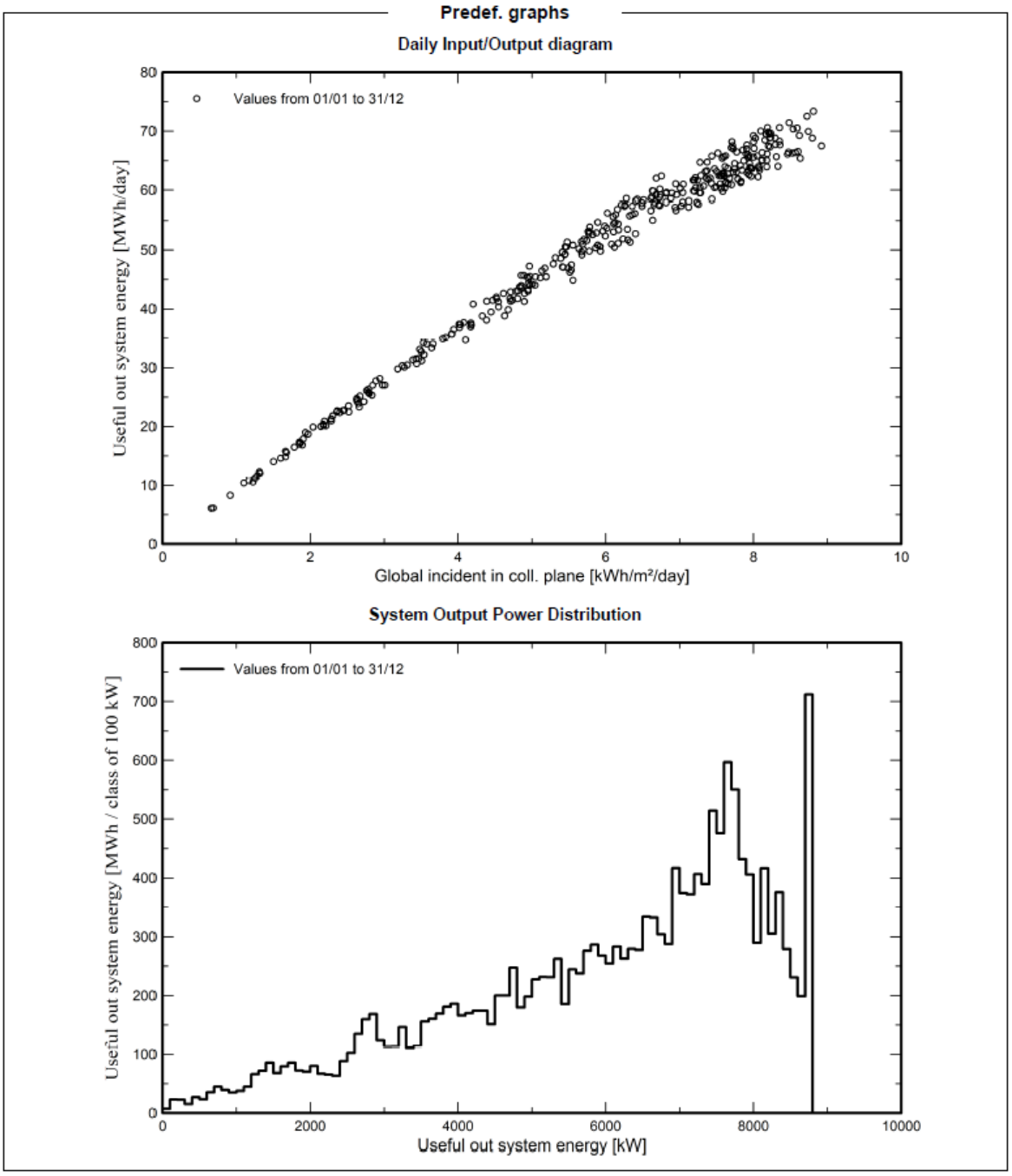
Bu güçlü üretim parametrelerinin yanında kayıpları da göz önüne almak gerekmektedir. Şekil 51'de kayıp diyagramı verilmiştir. Bu diyagrama baktığımızda en büyük kaybın sıcaklık etkisi ile %6,33 seviyesinde olduğunu görüyoruz. Bu yüksek seviyesi kullanılan ekipmanlar arasındaki uyumsuzlukları ifade eden %2,15'lik kayıp takip etmektedir. Bunlara ek olarak kablo kayıpları %1,14, inverter kaybı %1,39, ışınım seviyesi kaynaklı modül kayıpları %0,80, modül kalitesi kaynaklı verim kaybı %0,75, %0,2 gece tüketimi gibi kayıpların varlığından söz etmek mümkündür. Her enerji tesisinde bulunduğu gibi bu tesis özelinde de verim, ekipman, kalite, tasarım kaynaklı kayıpların varlığı

oldukça doğaldır. Bu kayıplar kabul edilebilir kayıplar olup sistemin tasarlanmasında ve uygulanmasında bir engel teşkil etmemektedir.




Şekil 51. Kayıp Diyagramı

Analiz çıktılarında bunlara ilave olarak sistemin 1 günlük ve 1 yıllık süreçte göstereceği giriş-çıkış güç diyagramlarını görebiliriz. Bu analiz sonuçları Şekil 52 ile verilmektedir.




Şekil 52. Sistem Giriş Çıkış Güç Diyagramları

Enerji üretim analizi için çeşitli yöntemler kullanan Pvsyst programının üretim değerlendirme kriteri olarak kullandığı P50 değerlendirmesine göre üretebileceği maksimum yıllık enerji miktarı 18.814 MWh olup, Şekil 53 ile detaylı analiz sonucu verilmektedir.

**P50 - P90 evaluation**

**Meteo data**

| | |
|---|---|
| Source | Meteonorm 8.1 (2003-2010), Sat=100% |
| Kind | Not defined |
| Year-to-year variability(Variance) | 0.0 % |
| **Specified Deviation** | |

**Global variability (meteo + system)**

| | |
|---|---|
| Variability (Quadratic sum) | 1.8 % |

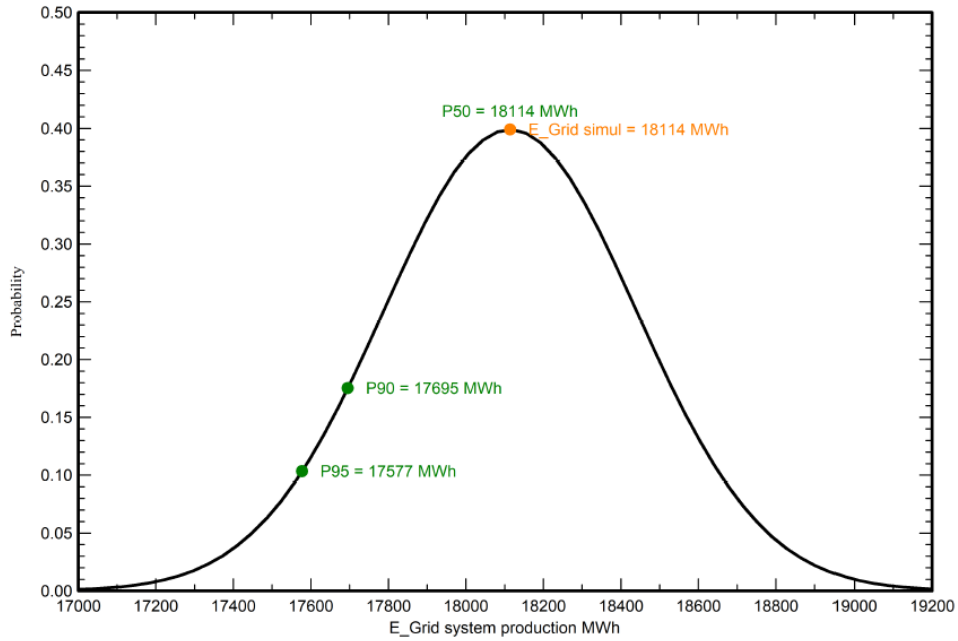
**Simulation and parameters uncertainties**

| | |
|---|---|
| PV module modelling/parameters | 1.0 % |
| Inverter efficiency uncertainty | 0.5 % |
| Soiling and mismatch uncertainties | 1.0 % |
| Degradation uncertainty | 1.0 % |

**Annual production probability**

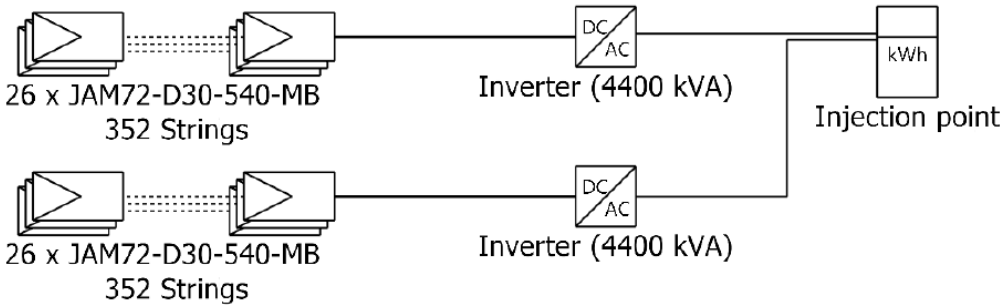
| | |
|---|---|
| Variability | 327 MWh |
| P50 | 18114 MWh |
| P90 | 17695 MWh |
| P95 | 17577 MWh |

**Probability distribution**




Şekil 53. Enerji Üretim Analiz (P50) Değerlendirme Sonuçları

İlave olarak sistemin tek hat şeması da program çıktılarında yer almakta olup Şekil 54 ile verilmiştir.




Şekil 54. Sistemin Tek Hat Şeması

Tasarlanan ve analiz sonuçları verilen bu hibrit santralin asıl amacı ana kaynak olan rüzgâr santralinin üretiminin düşük olduğu zamanlarda lisans gücüne erişebilmesi için yardımcı kaynak güç olarak destek sağlamaktır. Bu nedenle analiz sonuçlarına bağlı olarak rüzgâr-güneş hibrit santralinin nasıl bir üretim sonucu vereceği oldukça elzemdir. Güneş santralinin ürettiği saatlik değerleri görmek için ise PVsyst tarafından verilen 1 yıllık saatlik üretim verileri kullanılmaktadır. PVsyst programından alınan saatlik verilere ilişkin örnek 1 güne ait üretim tablosu Tablo 12 ile verilmiştir.

Tablo 12. PVsyst Programından Alınan GES Saatlik Üretim Çıktısı

| PVSYST 7.4.5 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | File | File date | Description | | |
| Proje | GES Hibrit Santrali_Project.PRJ | 11/06/24 16h23 | GES Hibrit Santrali | | |
| Cografi konum | Barutkavuran_MN81.SIT | 11/06/24 16h23 | Barutkavuran | Turkey | Europe |
| Hava durumu verileri | Barutkavuran_MN81_SYN.MET | 11/06/24 16h23 | Barutkavuran | Meteonorm 8.1 (2003-2010), Sat=100% | Synthetic |
| Simülasyon varyanti | GES Hibrit Santrali_Project.VC0 | 11/06/24 16h36 | New simulation variant | | |
| Simulation date | | 11/06/24 16h40 | | | |
| | | | | | |
| Simulation: | Saatlik degerler | 01/01/23 | den 31/12/23'ye | | |
| | | | | | |
| Tarih | GlobInc | GlobEff | EArray | E_Grid | PR |
| | W/m² | W/m² | kW | kW | oran |
| | | | | | |
| 1.01.2023 00:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 01:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 02:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 03:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 04:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 05:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 06:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 07:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 08:00 | 7,7479 | 7,6614 | 43,885 | 39,309 | 0,5133 |
| 1.01.2023 09:00 | 89,317 | 86,299 | 823,28 | 807,38 | 0,9145 |
| 1.01.2023 10:00 | 147 | 142,63 | 1388,4 | 1367,3 | 0,941 |
| 1.01.2023 11:00 | 198,01 | 192,5 | 1883,6 | 1857,6 | 0,9491 |
| 1.01.2023 12:00 | 211,15 | 205,33 | 2007,4 | 1980,1 | 0,9488 |
| 1.01.2023 13:00 | 200,6 | 194,92 | 1901,7 | 1875,6 | 0,946 |
| 1.01.2023 14:00 | 153,09 | 148,42 | 1437,8 | 1416,3 | 0,936 |
| 1.01.2023 15:00 | 109,58 | 106,08 | 1014,4 | 996,98 | 0,9205 |
| 1.01.2023 16:00 | 54,562 | 52,683 | 480,93 | 468,06 | 0,8679 |
| 1.01.2023 17:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 18:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 19:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 20:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 21:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 22:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |
| 1.01.2023 23:00 | 0 | 0 | 0 | -0,74 | 0 |

RES-GES arasında üretim analizleri yapılırken PVsyst tarafından verilen bu saatlik GES üretim verileri kullanılmıştır. Bu çalışmanın yapılabilmesi için rüzgâr santralinin üretim değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında ise ana santralin üretim verilerinin simüle edilebilmesi için Sanko Enerji tarafından hali hazırda işletilmekte

olan Akyel RES tesisinin saatlik üretim değerleri kullanılmıştır. Tesise ait 3 yıllık saatlik üretim verileri alınmıştır. Bu verilerin 1 günlük üretimlerini örnek olarak Tablo 13'te görebiliriz.

Tablo 13. RES Tesisine Ait 1 Günlük Saatlik Üretim Verileri

| RES (MWh) | | | |
|---|---|---|---|
| Saat | 2021 | 2022 | 2023 |
| 1 | 15,7 | 10,4 | 9,3 |
| 2 | 17,9 | 11,0 | 7,2 |
| 3 | 17,2 | 10,0 | - |
| 4 | 11,4 | - | 19,8 |
| 5 | 9,6 | 9,9 | 3,4 |
| 6 | 6,1 | 4,0 | 7,1 |
| 7 | 5,7 | 2,1 | 19,0 |
| 8 | 8,0 | 13,3 | 2,1 |
| 9 | 9,5 | 8,0 | 8,1 |
| 10 | 9,7 | 8,5 | 9,2 |
| 11 | 8,3 | 9,1 | 4,8 |
| 12 | 7,3 | 3,8 | 17,8 |
| 13 | 9,4 | 10,9 | 9,8 |
| 14 | 8,4 | 9,2 | 17,8 |
| 15 | 12,1 | 15,5 | 6,7 |
| 16 | 11,2 | 9,8 | 12,0 |
| 17 | 9,2 | 8,6 | 10,1 |
| 18 | 9,0 | 4,3 | 19,3 |
| 19 | 4,4 | 8,8 | 16,6 |
| 20 | 3,0 | 10,4 | 14,8 |
| 21 | 3,0 | 10,3 | 14,8 |
| 22 | 2,6 | 10,5 | 15,7 |
| 23 | 3,1 | 12,0 | 20,4 |
| 24 | 6,7 | 18,7 | 3,0 |

Bu üretim değerlerini göz önüne alarak Microsoft Excel programı yardımıyla yapılan değerlendirmelerde sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır. Bu analiz sonuçları yorumlanırken ilk olarak faydalanılan tesisin 3 yıllık üretim verisi göz önüne alınmıştır. Bunun yanında ise GES tesisinde elde edilebilecek olan simülasyon verisi tabloya yerleştirilmiştir. Son tabloda ise bu iki üretimden elde edilebilecek olan toplam enerji miktarı toplanmış fakat burada 40 MWh lisans gücü ile sınırlandırılmıştır. Örnek olarak gösterilen 1 günlük veri seti Tablo 14 ile verilmektedir.

Tablo 14. RES Üretimi ve GES Simülasyon Üretimi Üzerinden Toplam Üretim Değerinin Hesaplanması

| | RES Üretimi (MWh) | | | GES Üretimi (MWh) | | | RES + GES Üretimi (MWh) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Saat | 1. Yıl | 2. Yıl | 3. Yıl | 1. Yıl | 2. Yıl | 3. Yıl | 1. Yıl | 2. Yıl | 3. Yıl |
| 1 | 15,7 | 10,4 | 9,3 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 15,7 | 10,4 | 9,2 |
| 2 | 17,9 | 11,0 | 7,2 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 17,8 | 11,0 | 7,2 |
| 3 | 17,2 | 10,0 | - | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 17,2 | 10,0 | - 0,0 |
| 4 | 11,4 | - | 19,8 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 11,4 | - 0,0 | 19,8 |
| 5 | 9,6 | 9,9 | 3,4 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 9,6 | 9,9 | 3,4 |
| 6 | 6,1 | 4,0 | 7,1 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 6,1 | 4,0 | 7,0 |
| 7 | 5,7 | 2,1 | 19,0 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 5,7 | 2,1 | 19,0 |
| 8 | 8,0 | 13,3 | 2,1 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 8,0 | 13,3 | 2,1 |
| 9 | 9,5 | 8,0 | 8,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 9,5 | 8,0 | 8,1 |
| 10 | 9,7 | 8,5 | 9,2 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 10,5 | 9,3 | 10,0 |
| 11 | 8,3 | 9,1 | 4,8 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 9,7 | 10,5 | 6,1 |
| 12 | 7,3 | 3,8 | 17,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 9,2 | 5,7 | 19,7 |
| 13 | 9,4 | 10,9 | 9,8 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 11,4 | 12,8 | 11,8 |
| 14 | 8,4 | 9,2 | 17,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 10,3 | 11,1 | 19,6 |
| 15 | 12,1 | 15,5 | 6,7 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 13,6 | 16,9 | 8,1 |
| 16 | 11,2 | 9,8 | 12,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 12,1 | 10,8 | 13,0 |
| 17 | 9,2 | 8,6 | 10,1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 9,7 | 9,0 | 10,6 |
| 18 | 9,0 | 4,3 | 19,3 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 9,0 | 4,3 | 19,3 |
| 19 | 4,4 | 8,8 | 16,6 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 4,4 | 8,8 | 16,5 |
| 20 | 3,0 | 10,4 | 14,8 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 2,9 | 10,3 | 14,8 |
| 21 | 3,0 | 10,3 | 14,8 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 3,0 | 10,3 | 14,8 |
| 22 | 2,6 | 10,5 | 15,7 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 2,6 | 10,5 | 15,7 |
| 23 | 3,1 | 12,0 | 20,4 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 3,1 | 12,0 | 20,3 |
| 24 | 6,7 | 18,7 | 3,0 | - 0,0 | - 0,0 | - 0,0 | 6,7 | 18,7 | 3,0 |

Bu veriler doğrultusunda RES tesisinin 1 yıllık üretim verisi ile GES tesisinin simülasyon verisi toplanarak üretilebilecek olan maksimum enerji hesaplanmaktadır. Bu hesaplamayı gerçekleştirdiğimizde GES tesisinden elde edilecek olan 18814 MWh elektrik enerjisinin 16880 MWh'lik kısmı bu hibrit tesis için lisans gücü sınırlarına uyarak üretilebilecek faydalı enerji miktarı olarak hesaplanmaktadır. Kullanılabilecek olan enerji miktarına baktığımızda üretilebilecek olan enerjinin yaklaşık %90'a yakın kısmı şebekeye enerji olarak satılabilmektedir. Bu durumda kurulacak hibrit tesisin ne denli fayda sağlayacağını açıkça göstermektedir.

# 4. SONUÇLAR

Yapılan simülasyonlar ve kullanılan veriler ışığında rüzgâr santraline hibrit olarak tasarlanan güneş santrali hem kurulum kolaylıkları açısından hem de sisteme entegrasyon açısından kolaylıklar sağlamaktadır. Tez çalışması kapsamında tasarımı ve analizi yapılan hibrit GES tesisinin kurulumunun ana kaynak olan RES tesisine büyük katkılar sunduğunu açıkça söylemek mümkündür. Tasarlanan hibrit yardımcı kaynak tesisin yıllık üretebileceği maksimum enerjinin %90'a yakın kısmının şebekeye satılabilir faydalı enerji olduğu baz alınan tesisin üretim değerleri ve simülasyonları yapılan tesisin üretim değerleri üzerinden hesaplanmıştır. Bu da gösteriyor ki yardımcı kaynaktan üretilen enerjinin büyük kısmı tesisin elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bu durum yatırımcı ve işletmeci açısından oldukça faydalıdır. Tasarlamış olduğumuz hibrit santralin ürettiği elektrik enerjisinden yüksek oranda fayda sağlandığı analizlere bağlı hesap sonuçlarında görülmüştür.

Hibrit tesis için seçilen santral gücünün yeterli olduğu ve optimum bir seçim olduğu simülasyon sonuçlarından açıkça görülmektedir. Daha büyük veya daha küçük tesislerin kurulumu mümkün olmakla birlikte optimum bir tasarım boşa yatırımların ya da eksik yatırımların önüne geçmektedir. Bu optimum seçimi yapabilmek için ana kaynaktan üretilen enerjiye ait verilerin istatistiki olarak tutulmasının büyük önem arz ettiğini söylemek mümkündür. Ayrıca kurulacak tesis için de mutlaka simülasyon sonuçları ile birlikte değerlendirmeler yapılması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında seçilen Karaman bölgesinin rüzgâr ve güneş enerjisi yönünden güçlü üretim verileri elde edilebilen bir bölge olduğu ve burada kurulacak santrallerin yatırımcılar için verim alınacak tesisler olacağı açıktır. Bununla birlikte bu bölgenin ışınım değerlerine bağlı olarak simülasyon çalışmaları uyumlu sonuçlar vermiştir. Işınım değerinin arttığı aylarda üretimde artışlar görülmüş, ışınım değerlerinin azaldığı aylarda ise üretimde azalmalar simülasyon sonuçlarında görülmüştür. GES tesisinin üretiminde en büyük kayıpların başını çeken sıcaklık kayıpları ise bu tesisler üzerinde sıcaklıkların ne denli etkili olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Simülasyon sonuçlarına da baktığımızda ışınım ve sıcaklığın fazla olduğu aylarda üretim artışı ile kayıplarında artış gösterdiğini ve performans oranının düştüğü açıkça görülmüştür.

# 5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması bir kez daha göstermiştir ki bu tür tesislerin tasarımında en fazla dikkat edilmesi gereken hususların başında ana santralin üretim yaptığı saatlerde veya günlerde üretim yapacak bir yardımcı kaynak çok faydalı bir yatırım olmayacaktır. Şöyle ki ana kaynaktan açıkta kalan bir üretim açığı var ise bu kısım için bir yardımcı kaynak tasarımı gerçekten gerekli ve daha faydalıdır. Bu nedenle santral yatırımı yapan işletmecilerin üretim verilerini saatlik bazda tutmaları oldukça elzemdir. Bu veriler ışığında yapılacak simülasyonlar ve çalışmalar doğrultusunda doğru yatırımın şekillendirilmesi daha kolay olacaktır. Ayrıca santral bölgesinin seçiminin doğru yapılması ve kurulu bulunan bölgede seçilecek yardımcı kaynağın tıpkı bu tez çalışmasında da olduğu gibi gene bu coğrafyada verimli bir üretim gerçekleştirmesi oldukça önemlidir. Tez çalışmasında Karaman bölgesinin hem rüzgâr hem de güneş açısından verimli bir bölge olduğu için seçilmiş olması bu hususa örnek teşkil etmekte ve yatırımcıların bu hususlara dikkat etmesi önerilmektedir. Tüm bunların yanında santral kurulumunda tercih edilecek olan ekipman seçimleri de oldukça önemlidir.

## 6. KAYNAKLAR


3DE3. (2024, 06 15). *6mm² Solar Kablo - PV1-F Özellikleri*. 3DE3 Yenilenebilir Enerji: https://www.3de3enerji.com.tr/6mm-solar-kablo-pv1-f/ adresinden alındı

ABB. (2024, 06 20). *ABB 3P749903000A.* ABB: https://new.abb.com/products/tr/6AGC073471/3p749903000a adresinden alındı

Altas, I. H. (1998). Güneş Pilleri:Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Sayı 47. İ. H. Altaş içinde, *Güneş Pilleri:Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri* (s. 66-71). İstanbul: Bileşim Yayıncılık A.Ş.

BEST Trafo. (2024, 06 20). *BEST Trafo*. Ürünler: https://www.besttransformer.com/urunler adresinden alındı

Doğu, İ. (2024, 10 08). *Hidrojen Enerjisi Nedir?* Sustaniable Future: https://sustainablefuture.com.tr/hidrojen-enerjisi-nedir/ adresinden alındı

EIF. (2024, 06 25). *Piranometre Nedir? Piranometre Ne İşe Yarar?* EIF: https://www.eif2050.com/tr/blog/piranometre-nedir-piranometre-ne-i-se-yarar adresinden alındı

EMBER. (2024, 08 11). *Hibrit santraller ile güneş kapasitesi rüzgarı geride bıraktı*. ember-climate: https://ember-climate.org/tr/insights/in-brief/hibrit-santraller-ile-gunes-kapasitesi-ruzgari-geride-birakti/ adresinden alındı

Energy Is Future. (2024, 02 07). *Dalga Enerjisi Nedir? Dalga Enerjisi Nasıl Kullanılır?* EIF: https://www.eif2050.com/path192/blog/dalga-enerjisi-nedir-dalga-enerjisi-nasil-kullanilir adresinden alındı

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2024, 06 15). *Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliğinde Değişiklik.* Resmi Gazete: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/03/20200308-7.htm adresinden alındı

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2020). Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. *Resmi Gazete*.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024, 06 15). *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/70.aspx adresinden alındı

Engin, M. (2010). Bornova İçin Güneş-Rüzgar Hibrid Enerji Üretim Sistemi Tasarımı. *CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 11-20.

Fimer SPA. (2024, 06 30). *ABB compact skid PVS980-CS – up to 5000 kVA.* Fimer SPA: https://www.fimer.com/sites/default/files/PVS980-CS_compact_skid_9AKK107680A1800_REV_A_EN.pdf adresinden alındı

Hau, E. (2005). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Springer.*

HES. (2024, 06 15). *0.6/1 kV LSFOH izoleli, tek damarlı, solar kablolar*. HES Kablo: https://www.hes.com.tr/assets/doc/urunler-pdf/331.pdf adresinden alındı

HES Kablo. (2024, 06 15). *Orta Gerilim Kabloları*. HES Kablo: https://www.hes.com.tr/tr/urunler/enerji-kablolari/orta-gerilim-kablolari adresinden alındı

I.H.Altas, A. (2007). A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. A. P.-S. Environment içinde, *I.H.Altas, A.M.Sharaf* (s. 21-23). Capri, Italy: the International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP'0.

IEA. (2024, 08 10). *Electricity*. International Energy Agency: https://www.iea.org/energy-system/electricity adresinden alındı

Independent. (2024, 07 05). *Solar panel world record smashed with 'miracle material'*. Independent: https://www.independent.co.uk/tech/solar-panels-uk-perovskite-b2446808.html adresinden alındı

Jafarzadeh, N. (2017). *Analysis Of Hybrid Wind-Solar Power Plant For ITU Ayazaga Campus.* İstanbul: Istanbul Technical University Energy Institute.

Jinko. (2024, 06 15). *unport C6 III MWT Mono Half-Cut Solar Cell Module Panel Array Eff. 20.9% 370w 375w 380w 385w 390w Solar Module Panel*. Jinko Solar: https://www.jinkosco.com/sunport-solar-panels/90.html adresinden alındı

Kalyon PV. (2024, 06 25). *Çift Yüzeyli Yarım Hücre.* Kalyon PV: https://kalyonpv.com/wp-content/uploads/2024/02/M10-144-GG-03.pdf adresinden alındı

Kalyon, P. (2024, 06 20). *TopCon M10-144 Cam-Cam*. Kalyon PV: https://kalyonpv.com/urunlerimiz/topcon-m10-144-cam-cam/ adresinden alındı

Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri" Yüksek Lisans Tezi.* Sakarya: Sakarya Üniversitesi.

Karayaka, H. (2024, 07 27). *Güneş Enerjisinin Tarihsel Gelişimi*. Piagrid: https://www.piagrid.com/rehber/gunes-enerjisinin-zamanla-gelisimi adresinden alındı

Nordex. (2024, 06 25). *Nordex*. The N131/3600 Solution For Moderate Wind. Economical For a Wide Range Of Sites: https://www.nordex-online.com/en/product/n131-3600/ adresinden alındı

Ölçüm Cihazları. (2024, 06 25). *Anemometre Nedir? Çalışma ve Uygulamaları*. Ölçüm Cihazları: https://olcumcihazlari.com/anemometre-nedir-calisma-ve-uygulamalari/ adresinden alındı

PVSYST. (2024, 06). *PVSYST*. PVSYST: https://www.pvsyst.com/ adresinden alındı

Resolt Enerji. (2024, 06 15). *Rüzgar Türbini Nedir? Rüzgar Türbini Çeşitleri Nelerdir?* Resolt Enerji: http://www.resoltenerji.com/ruzgar-turbini-nedir-ruzgar-turbini-cesitleri-nelerdir/ adresinden alındı

Sanko Enerji. (2024, 06 30). *2022 Faaliyet Raporu*. Sanko Enerji: https://sankoenerji.com.tr/Uploads/Document/30SANKO_2022_FR.pdf adresinden alındı

Sanko Enerji. (2024, 06 25). *Sanibey Barajı ve Hidroelektrik Santrali.* Sanko Enerji: https://sankoenerji.com.tr/faaliyet-alanlari/elektrik-uretimi adresinden alındı

SchneiderElectric. (2024, 06 15). *Orta Gerilim Hücreleri*. Schneider Electric: https://www.se.com/tr/tr/product-category/87897-orta-gerilim-h%C3%BCcreleri/ adresinden alındı

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024, 06 15). *Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: https://enerji.gov.tr/ adresinden alındı

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024, 07 05). *Güneş*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı: https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes adresinden alındı

T.C. Karaman Valiliği. (2024, 06 25). *İlin Coğrafi Bilgileri*. T.C. Karaman Valiliği: http://www.karaman.gov.tr/ilin-cografi-bilgileri adresinden alındı

TEİAŞ. (2022). *Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri*. Türkiye Elektrik İletim A.Ş.: https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri adresinden alındı

TÜREB. (2022 ). *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu.* Ankara: TÜREB.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2024, 08 10). *Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2022 Yılı İstatistikleri*. TEİAŞ: https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri adresinden alındı

VESTAS. (2024, 06 15). *VESTAS Media*. VESTAS: https://www.vestas.com/en/media/images adresinden alındı

Weidmüller. (2024, 06 20). *PV DC Combiner Box'lar*. Weidmüller: https://www.weidmuller.com.tr/tr/sirket/pazarlar_ve_enduestriler/fotovoltaik/pv_dc_combiner_box%E2%80%99lar.jsp adresinden alındı

Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği. (2024, 08 11). *Yenilenebilir Enerji Nedir?* Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Derneği: https://yenader.org/tr_tr/blog/service/yenilenebilir-enerji-nedir/ adresinden alındı

# ÖZGEÇMİŞ

Ali OKUR, İlköğrenimini Espiye Atatürk İlk Öğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2013 yılında Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2013-2014 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018 yılında bu bölümden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2017-2019 yılları arasında güneş santralleri kurulumları yapan bir firma ile meslek hayatına adım atan Okur 2019 yılında giriş yaptığı 4 farklı tipte (hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal) elektrik üretimi yapan özel sektör elektrik üretim şirketinde, 2019-2023 yılları arasında bir hidroelektrik santralde Elektrik İşletme ve Bakım Mühendisi olarak, 2023-2024 yılları arasında Bakım ve Mühendislik Direktörlüğü bünyesinde tüm santrallerden sorumlu Elektrik Bakım Mühendisi olarak görev yapmış ardından 2024 yılı Temmuz ayı itibariyle bir hidroelektrik santrale İşletme Müdürü olarak terfi ettiği görevine devam etmektedir. Enerji sektöründe kariyer gelişimini sürdürmeyi hedeflemektedir. Evli ve bir kız babasıdır.