T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDRO DEPOLAMA DESTEKLİ AGROFOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TASARIMI VE ANALİZİ

Fatma Eda ÖZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Ali DURUSU

Kasım, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDRO DEPOLAMA DESTEKLİ AGROFOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN TASARIMI VE ANALİZİ

Fatma Eda ÖZER tarafından hazırlanan tez çalışması 14.11.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali DURUSU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali DURUSU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Şen YILDIZ, Üye
Kırklareli Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Ali DURUSU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Hidro Depolama Destekli Agrofotovoltaik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fatma Eda ÖZER

İmza

Canım Babam' a

Sevgi ve Özlemle

...

TEŞEKKÜR

Tanıştığımızdan itibaren yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmaktan keyif aldığım, bilgi ve deneyimlerini paylaşmaktan çekinmeyen, her zaman rehberlik eden değerli Doç. Dr. Ali DURUSU' ya,

İnançları ve desteklerini her anımda hissettiğim, beni cesaretlendiren ve eğitim hayatım boyunca her zaman desteklerini esirgemeyen babama ve anneme,

Mesleki yolculuğumun başında bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen ve her zaman yol gösteren hocam Yüksek Mühendis Yetkin Saner' e

Sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Fatma Eda ÖZER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Araştırması 1
1.2 Fotovoltaik Sistemlerin Ortaya Çıkışı 3
1.2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı 4
1.2.2 Fotovoltaik Sistem Performansını Etkileyen Faktörler 4
1.2.3 Fotovoltaik Sistemlerin Sınıflandırılması 6
1.3 Araştırmanın Temel Amacı ve Kapsamı 10
2 AGROFOTOVOLTAİK SİSTEMLER 12
2.1 Agrofotovoltaik Sistemlerin Gelişimi 12
2.2 Agrofotovoltaik Sistemlerin Ortaya Çıkışı 13
2.3 Agrofotovoltaik Sistemlerin Tanımı 13
2.4 DIN SPEC 91434 Agrofotovoltaik Standardı 14
2.5 Agrofotovoltaik Sistemlerde Panel Türleri 15
2.5.1 Tek Yüzlü (Monofacial) Fotovoltaik Paneller 16
2.5.2 Çift Yüzlü (Bifacial) Fotovoltaik Paneller 17
2.6 Agrofotovoltaik Sistemlerin Faydaları 18
3 POMPA DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SİSTEMLER 19
3.1 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Sistemlerinin Gelişimi 19
3.2 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Tanımı 21
3.3 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Genel Yapısı 22

3.4 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması 23
3.4.1 Kurulum Şekillerine Göre Sistemler 24
3.4.2 Yapılarına Göre Sistemler 26
4 SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ **30**
4.1 Enerji Talebinin Şebekeden Karşılanması ve Yük Profilinin İncelenmesi 31
4.1.1 Çiftlikte Kullanılan Elektriksel Ekipmanlar 31
4.1.2 Mevsimsel Yük Profilinin İncelenmesi 34
4.2 Dikey Agrofotovoltaik Sistem Tasarımı ve Yük Profilinin İncelenmesi ... 44
4.2.1 Agrofotovoltaik Sistem Tasarımı 44
4.2.2 Agrofotovoltaik Sistem Analizi 47
4.3 Hidro Depolama Yük Profilinin İncelenmesi 55
4.4 Sistemsel Analiz 60
4.4.1 Mevcut Sistemin Enerji Dengesi Etkisinin İncelenmesi 61
4.4.2 Agrofotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 62
4.4.3 Hidro Depolama Destekli Agrofotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 72
5 SONUÇ **85**
KAYNAKÇA **88**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **93**

SİMGE LİSTESİ

Voc	Açık Devre Gerilimi
AC	Alternatif Akım
°C	Celcius Derece
Q	Debi
DC	Doğru Akım
GW	Gigawatt
kWh/gün	Günlük Kilowatt Saat
Vmax MPP	Inverter Maksimum MPP Çalışma Gerilimi
Vmin MPP	Inverter Minimum MPP Çalışma Gerilimi
Isc	Kısa Devre Akımı
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt Peak
kWh/kWp/gün	Kilowatt Peak başına Günlük Kilowatt Saat
kWh/kWp/yıl	Kilowatt Peak başına Yıllık Kilowatt Saat
kWh	Kilowatt Saat
Pmax AC	Maksimum Alternatif Güç
I_{mpp}	Maksimum Güç Noktası Akımı
V$m$pp	Maksimum Güç Noktası Gerilimi
$Pmax$	Maksimum Panel Gücü
MW	Megawatt
MWh	Megawatt Saat
m^2	Metrekare
kWh/m²/gün	Metrekare başına Günlük Kilowatt Saat
kWh/m^2	Metrekare başına Kilowatt Saat
W/m^2	Metrekare başına Watt
m^3/h	Metreküp / Saat
H	Net Basma Yüksekliği
Pnom AC	Nominal Alternatif Güç
PR	Performans Oranı
P	Pompanın Elektrik Gücü
η	Pompa Verimi
ρ	Sıvının Yoğunluğu
η	Verimlilik
g	Yerçekimi İvmesi
Wp	Watt Peak

KISALTMA LİSTESİ

APV	Agrofotovoltaik
BM	Birleşmiş Milletler
DIN SPEC	Alman Standardizasyon Dökümanı
DiffHor	Yatay Difüz Işınım
EArray	Dizinin Çıkışında Etkin Enerji
E_Grid	Şebekeye Enjekte Edilen Enerji
GlobEff	IAM ve Gölgeleme için Düzeltilmiş Etkin Global Işınım
GlobHor	Global Yatay Işınım
GlobInc	Kolektöre Yansıyan Global Işınım
HES	Hidroelektrik Santrali
Lc	Kolektör Kaybı
Ls	Sistem Kaybı
MPP	Maksimum Güç Noktası
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takibi
PR	Performans Oranı
PRBifi	Bi-Facial Performans Oranı
PSH	Pompa Depolamalı Hidroelektrik Sistem
PV	Fotovoltaik
STC	Standart Test Koşulları
T_Amb	Çevre Sıcaklığı
Yf	Üretilen Faydalı Enerji

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 1958 yılı Vanguard-1 Uydusu **3**
Şekil 1.2 Sistem performansını etkileyen faktörler **4**
Şekil 1.3 PV şebeke bağlantı türleri **7**
Şekil 1.4 PV şebeke bağlantı şeması **7**
Şekil 1.5 Fotovoltaik sistemlerin şebekeden bağımsız bağlantı şeması **9**
Şekil 2.1 Tarım arazilerinde farklı agrofotovoltaik sistem kurulumları **14**
Şekil 2.2 Agrofotovoltaik sistemlerde panel montaj türleri **16**
Şekil 2.3 Almanya Heggelbach Agrofotovoltaik Sistemi **17**
Şekil 2.4 Aasen Solar Park Agrofotovoltaik Sistemi **18**
Şekil 3.1 Raccoon Mountaik Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali **20**
Şekil 3.2 Bath Country Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali **20**
Şekil 3.3 Çin Hebei eyaletinde yer alan Fengning Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali **21**
Şekil 3.4 Pompa depolamalı hidroelektrik santral **21**
Şekil 3.5 Pompa depolamalı hidroelektrik santralin genel yapısı **22**
Şekil 3.6 Pompa depolamalı hidroelektrik santrallerin sınıflandırılması **23**
Şekil 3.7 Bath Country Pumped Storage Station **24**
Şekil 3.8 Cruachan Power Station **25**
Şekil 3.9 Fengning Pumped Storage Power Station **26**
Şekil 3.10 Goldisthal Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali **27**
Şekil 3.11 Okinawa Yanbaru Deniz Su Pompajlı Hidroelektrik Santrali **28**
Şekil 3.12 Dinorwig Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali **28**
Şekil 4.1 İlkbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi **36**
Şekil 4.2 Yaz sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi **38**
Şekil 4.3 Sonbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi **40**
Şekil 4.4 Kış sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi **42**
Şekil 4.5 Dört mevsimlik toplam enerji tüketimi analizi **43**
Şekil 4.6 Ufuk gölgelenmesi **46**
Şekil 4.7 Santralin normalize üretim değerleri **49**
Şekil 4.8 Kayıplar diyagramı **50**
Şekil 4.9 Sistemin günlük giriş/çıkış diyagramı **52**
Şekil 4.10 Sistemin çıkış gücü diyagramı **53**
Şekil 4.11 Mevsimsel günlük enerji tüketim kazançları **59**
Şekil 4.12 Mevsimsel yıllık enerji tüketim kazançları **60**
Şekil 4.13 Mevcut sistemin yıllık enerji tüketim analizi **61**
Şekil 4.14 İlkbahar sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri **62**
Şekil 4.15 İlkbahar sezonu enerji üretim-tüketim dengesi analizi **63**
Şekil 4.16 Yaz sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri **65**
Şekil 4.17 Yaz sezonu enerji üretim-tüketim dengesi analizi **65**
Şekil 4.18 Sonbahar sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri **66**
Şekil 4.19 Sonbahar sezonu enerji üretim-tüketim dengesi analizi **68**

Şekil 4.20 Kış sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri **68**
Şekil 4.21 Kış sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri **69**
Şekil 4.22 Agrofotovoltaik sistemi yıllık enerji üretim-tüketim dengesi analizi .. **71**
Şekil 4.23 Hidro depolama destekli sistemin ilkbahar sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi **76**
Şekil 4.24 Hidro depolama destekli sistemin yaz sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi **77**
Şekil 4.25 Hidro depolama destekli sistemin sonbahar sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi **79**
Şekil 4.26 Hidro depolama destekli sistemin kış sezonu enerji üretim tüketimdengesi analizi **81**
Şekil 4.27 Hidro depolama destekli sistemin yıllık enerji üretim tüketim dengesi analizi **82**
Şekil 4.28 Sistemlerin karşılaştırması **84**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.4 DIN SPEC 91434' te belirtilen PV sistem kategorileri ve arazi kullanım türleri **15**
Tablo 4.1 Çiftlik evinde kullanılan ekipmanların enerji tüketimleri..... **31**
Tablo 4.2 Besi çiftliğinde kullanılan elektrikli ekipmanların enerji tüketimleri... **32**
Tablo 4.3 Çiftlikte kullanılan diğer ilgili elektrikli ekipmanların enerji tüketimleri **33**
Tablo 4.4 İlkbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri **35**
Tablo 4.5 Yaz sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri **37**
Tablo 4.6 Sonbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri..... **39**
Tablo 4.7 Kış sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri **41**
Tablo 4.8 Tasarımda kullanılan PV panel ve inverter özellikleri **45**
Tablo 4.9 Bilanço ve genel sonuçlar..... **48**
Tablo 4.10 Hidro depolama sistemi mevsimsel günlük enerji tüketimleri **57**

ÖZET

Hidro Depolama Destekli Agrofotovoltaik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi

Fatma Eda ÖZER

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ali DURUSU

Günümüzde artan nüfus yoğunluğu ve buna bağlı olarak yükselen enerji talebi, gelecekte mevcut enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği konusundaki belirsizlikleri derinleştirmektedir. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmının hâlen fosil yakıtlar aracılığıyla karşılanması, yalnızca kaynakların tükenmesine yol açmakla kalmamakta; aynı zamanda yüksek karbon emisyonu nedeniyle küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi ciddi çevresel sorunlara da neden olmaktadır. Fosil kökenli enerji sistemlerinin ekosistem üzerindeki bu olumsuz etkileri, enerji üretiminde yenilenebilir ve çevre dostu alternatiflerin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu doğrultuda, enerji verimliliğini artırmaya ve çevresel etkileri azaltmaya yönelik sürdürülebilir enerji teknolojilerine yönelim gün geçtikçe ivme kazanmaktadır.

İklim değişiklikleri, su kaynaklarının azalması ve artan enerji talebi; enerji sektörü ile tarımsal faaliyetlerin entegre biçimde ele alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. Özellikle su ve enerjiye erişimin sınırlı olduğu kırsal veya kurak bölgelerde, bu durum tarımsal üretimi ve gıda güvenliğini doğrudan tehdit etmektedir. Bu çerçevede geliştirilen agrofotovoltaik sistemler, tarım arazilerinde

güneş panelleri aracılığıyla elektrik üretimini mümkün kılarken, aynı alanda tarımsal üretimin devamlılığını da sağlayarak arazi kullanım etkinliğini artırmaktadır. Güneş panellerinin belirli yüksekliklerde konumlandırılması sayesinde hem optimum ışınım koşulları elde edilmekte hem de alt yüzeyde bitkisel üretim faaliyetleri sürdürülebilmektedir.

Bununla birlikte, fotovoltaik sistemlerin doğası gereği süreksiz enerji üretimi, enerji arzında dalgalanmalara neden olabilmektedir. Bu sorunun giderilmesi amacıyla fotovoltaik sistemlerin pompaj depolamalı hidroelektrik enerji sistemleri ile entegre edilmesi, enerji sürekliliğinin sağlanması açısından önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Söz konusu entegrasyon, tarım–su–enerji ilişkisini bütüncül bir çerçevede ele alarak sistem verimliliğini ve sürdürülebilir kaynak yönetimini optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, güneş enerjisi tabanlı agrofotovoltaik sistemlerin, enerji sürekliliğini ve kaynak verimliliğini artırmak amacıyla pompaj depolamalı hidroelektrik enerji sistemleri ile entegrasyonuna yönelik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Tarım alanlarında konumlandırılan fotovoltaik paneller aracılığıyla üretilen elektrik enerjisinin, enerji üretim fazlası durumlarında su pompalama mekanizması yardımıyla üst rezervuara suyun aktarılmasına dayanan hidroelektrik depolama altyapısı, sistemin dinamik kararlılığını desteklemek üzere modellenmiştir. Bu kapsamda, agrofotovoltaik ve hidro depolama sistemi bileşenlerinin enerji dönüşüm verimliliği, depolama kapasitesi, yük dengeleme performansı ve sürdürülebilir işletme koşulları açısından etkileşimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, entegre sistemin enerji arzında sürekliliği sağlarken tarımsal üretimin devamlılığına katkı sunduğunu ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir enerji yönetim modeli oluşturduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hidro Depolama Sistemi, Agrofotovoltaik Sistem, Tarım - Enerji – Su Döngüsü, Enerji Sürekliliği, Hibrit Enerji Sistemleri

ABSTRACT

Hydropump Storage and Agrophotovoltaic Systems Design and Analysis

Fatma Eda ÖZER

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali DURUSU

The increasing population density and the corresponding rise in energy demand have deepened the uncertainties regarding the sustainability of existing energy resources in the future. The fact that a significant portion of the global energy demand is still met by fossil fuels not only accelerates resource depletion but also leads to severe environmental problems such as global warming, climate change, and air pollution due to high carbon emissions. The negative ecological impacts of fossil-based energy systems have made the transition to renewable and environmentally friendly alternatives inevitable. Consequently, the adoption of sustainable energy technologies aimed at enhancing energy efficiency and reducing environmental impacts has gained significant momentum in recent years.

Climate change, the depletion of water resources, and increasing energy demand have revealed the necessity of integrating the energy and agricultural sectors. In rural or arid regions where access to water and energy is limited, these challenges directly threaten agricultural productivity and food security. In this context, agrophotovoltaic systems have emerged as an innovative approach that enables simultaneous electricity generation through solar panels and agricultural production on the same land, thereby improving land-use efficiency. By positioning the solar

panels at specific elevations, optimal solar irradiation can be achieved while maintaining agricultural cultivation underneath.

However, due to the intermittent nature of photovoltaic (PV) systems, fluctuations in energy supply are inevitable. To mitigate this issue, integrating PV systems with pumped hydro energy storage has been proposed as an effective solution to ensure energy continuity. Such integration aims to optimize system efficiency and sustainable resource management by addressing the interconnection among the energy–water–agriculture nexus.

In this study, an analysis was conducted on the integration of solar-based agrophotovoltaic systems with pumped hydro energy storage systems to enhance energy continuity and resource efficiency. The hydroelectric storage infrastructure, based on transferring water to an upper reservoir via a pumping mechanism during periods of excess electricity generation from PV panels installed in agricultural areas, was modeled to support the dynamic stability of the system. Within this framework, the interactions between agrophotovoltaic and hydro storage components were evaluated in terms of energy conversion efficiency, storage capacity, load-balancing performance, and sustainable operating conditions. The findings indicate that the integrated system not only ensures continuity in energy supply but also contributes to the maintenance of agricultural productivity while aligning with environmental sustainability objectives.

This study examines the integrated operation of agrivoltaic systems and hydropower storage technology designed to support agricultural production using solar energy. The electricity generated by solar panels on farmland is stored via a pumped storage hydropower system to enhance sustainability and energy continuity.

Keywords: Pumped Hydro Storage, Agrivoltaic System, Agriculture – Energy – Water Cycle, Energy Continuity, Hybrid Energy Systems, System Integration

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Araştırması

Dünya genelinde hızlı nüfus artışlarının meydana gelmesi ve köylerden kentlere göç edilmesi ile enerji talebinin artması enerji politikalarında değişiklikler yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıt kullanımı sonucu atmosfere salınan sera gazı ile küresel ısınma ve iklim değişikliğine sebep olarak çevresel kaygıları da meydana getirmiştir. Bununla birlikte, deniz seviyesinin yükselmesi, buzulların erimesi, artan sıcaklıklar, kuraklık gibi nedenler insanlar üzerinde tehdit oluşturmaya başlamıştır. Bu küresel etkilerin önüne geçinilmesi amaçlanarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim başlamıştır.

2017 yılında Birleşmiş Millet (BM) tarafından hazırlanan Dünya Nüfusu Araştırma Raporu' na göre dünya nüfusu giderek artmakta olup o dönem yaklaşık olarak 7,6 milyardır. İlerleyen dönemlerde 2030 yılında 8,6 milyar, 2050 yılında ise 9,8 milyar ve 2100 yılında ise 11,2 milyar olacağı ön görülmektedir. Bu artan nüfus ve teknolojik gelişmeler ile birlikte konut, ulaşım, sanayi, altyapı hizmetleri, hayvancılık ve tarım sektörlerinde enerji talebi artacaktır. Bu noktada artan enerji talebi için sürdürülebilir ve dengeli bir sistem oluşturulması ihtiyacı doğmuştur [1].

Bu bağlamda, yenilenebilir enerji sistemlerinin sürekliliğini ve şebeke dengesini sağlamak amacıyla hidro depolama sistemleri önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Hidro depolama sistemleri, üretilen elektrik enerjisini iki farklı yükseklikteki su rezervuarları arasında pompalama yoluyla potansiyel enerji olarak depolamaktadır.

Elektrik talebinin arttığı zamanlarda suyun türbinlerden geçirilmesiyle enerji geri kazanılır. Bu sistemler yüksek enerji dönüşüm verimliliğine, uzun ömre ve büyük ölçekli depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle enerji arz güvenliğinde kritik bir rol oynar. Hidro depolama tesisleri, özellikle rüzgâr ve güneş gibi kesintili enerji kaynaklarından elde edilen üretim fazlasını depolayarak şebeke kararlılığını artırır. Ayrıca, çevresel açıdan kapalı döngülü sistemler sayesinde su ekosistemine verilen etki minimize edilmekte ve coğrafi avantajlara sahip bölgelerde bu teknoloji ekonomik olarak uygulanabilir hale gelmektedir [2].

Diğer yandan, agrofotovoltaik sistemler, tarımsal üretim ve güneş enerjisi üretimini aynı arazide birleştirerek sürdürülebilir enerji ve gıda üretimi için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sistemlerde fotovoltaik paneller, bitki örtüsüne zarar vermeyecek şekilde belirli bir yükseklikte kurulmakta ve hem gölgeleme hem de enerji üretimi dengesi sağlanmaktadır. Panel eğimi, sıra aralıkları ve gölgeleme oranı bitkilerin fotosentetik aktivitesi göz önünde bulundurularak optimize edilmektedir. Bu tür sistemlerde toplam arazi verimliliği, aynı arazi içerisinde yapılan enerji ve tarım üretiminin tek başına yapılan üretimlere kıyasla daha verimli olduğunu göstermektedir. Agrofotovoltaik uygulamalar sayesinde toprak nemi korunmakta, su buharlaşması azalmakta, bitki stresleri düşmekte ve aşırı sıcaklıklara karşı mikro-iklim dengesi sağlanmaktadır. Ayrıca, panellerden toplanan yağmur suyu sulamada kullanılabilmekte ve güneş enerjisiyle çalışan sulama sistemleri kurulabilmektedir. Bu sistemler, özellikle yarı kurak bölgelerde hem enerji üretimini hem de tarımsal verimi koruyarak iklim değişikliğine karşı dirençli üretim modelleri oluşturulmasına katkı sağlamaktadır [3].

Sonuç olarak, artan nüfus ve enerji talebine karşı hidrodepolama ve agrofotovoltaik gibi yenilikçi yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanılması, sürdürülebilir enerji arzı ve çevresel denge açısından stratejik önem taşımaktadır. Bu tür hibrit sistemler, hem enerji sistemlerinde süreklilik sağlar hem de tarımsal üretimi destekleyerek geleceğe yönelik entegre bir enerji – tarım - ekosistem dengesinin kurulmasına yardımcı olur.

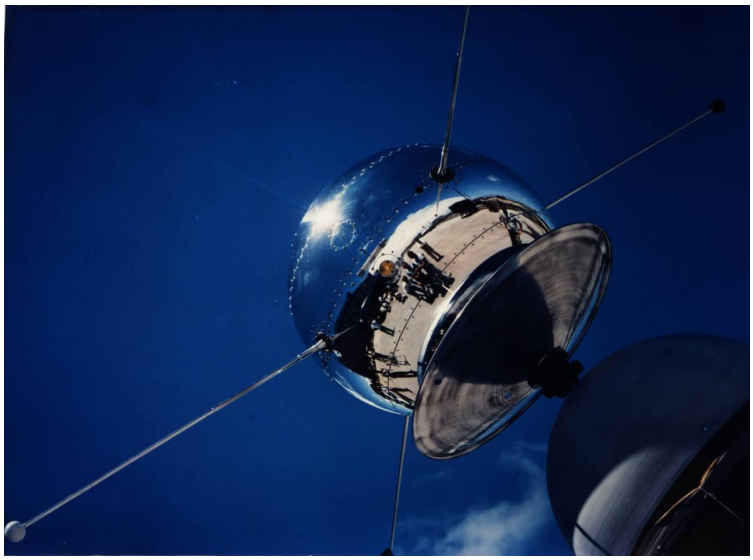
1.2 Fotovoltaik Sistemlerin Ortaya Çıkışı

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artması ile güneş enerjisine dayalı elektrik üretimi hızla artmaktadır. Güneş enerjisinde karbon salınımının olmaması ile sera gazı etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Güneş enerjisi direkt olarak güneş tarafından üretilir ve dolayısıyla en temiz ve en güvenilir yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir.

1839 yılında fotovoltaik etki ilk kez Fransız fizikçi A.E. Becquerel tarafından ortaya atılmıştır. Ardından 1883 yılında Charles Fritts, verimliliği yaklaşık %1 olan selenyumu ince bir altın tabakayla kaplayarak PV cihazı meydana getirdi. 1946 yılında Russel Ohl, transistörün geliştirilmesine katkı sağlayacak yarı iletken pilin patentini aldı.

1954 yılında, çeşitli deneyler yapılarak silikonun ışığa karşı duyarlı olduğu ortaya çıkmıştır ve katkılandırılmış silikon kullanılarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren ilk cihaz icat edildi. Yapılan deneyler sonucu cihazın verimliliği yaklaşık olarak %6' ydı. Sonrasında 1958 yılında fırlatılan ilk uzay aracı güneş pilleriyle donaltılmıştı ve bu araç dünyanın ilk güneş enerjili uydusu ünvanını almıştır. Yaşanan gelişmeler ile güneş pillerine olan güven artarak teşvikler başlamıştır. Temelleri o zamandan atılan PV modüller günümüzde elektrik üretiminde önemli bir yer kaplamaktadır [4].



Şekil 1.1 1958 yılı Vanguard-1 Uydusu

1.2.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı

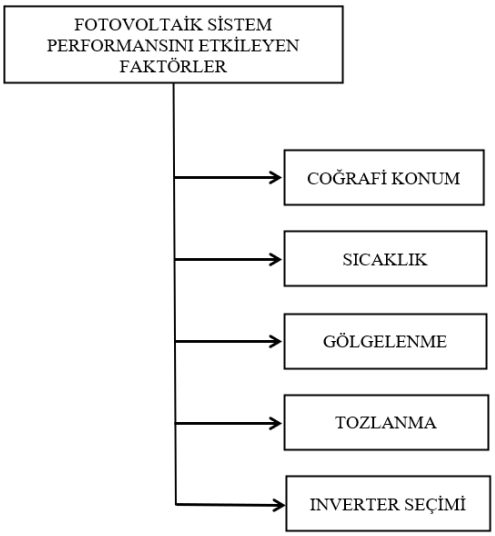
Fotovoltaik sistemler diğer bir ismiyle PV sistemler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu dönüşüm güneş hücreleri ile yarı iletken malzemeler kullanılarak sağlanır.

PV sistemler fotovoltaik paneller, inverterler, akü/batarya, montaj sistemleri ve kablo, sigorta gibi elektrik ekipmanlarından oluşmaktadır. Panellerin konumlandırılması ile güneş ışığı PV panel üzerine düşer ve panellerin içerisinde bulunan yarı iletken malzeme fotonları emerek serbest elektronlar meydana getirir. Bu elektronlar DC akımı oluştururlar ve invertörler yardımı ile DC akım AC akıma dönüştürülür. Böylelikle elektrik üretimi meydana gelir ve üretilen elektrik ise kullanım için şebekeye verilir [5].

Fotovoltaik sistemlerin saha içerisindeki konumlandırılmasında verimlilik esas alınmış olup sistem performansını belirlemede bir dizi etken yer almaktadır. Güneş ışınımının geliş açısı, azimut ve eğim açısı, sıcaklık, gölgelenme, toz, kirlilik ve kullanılan ekipman kalitesi önem arz etmektedir. Bu faktörlerin optimum düzeyde belirlenmesi, fotovoltaik panellerin verimliliğini ve genel sistem performansını artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. [6].

1.2.2 Fotovoltaik Sistem Performansını Etkileyen Faktörler

Fotovoltaik sistem performansını etkileyen faktörler arasında coğrafi konum, sıcaklık, gölgelenme, tozlanma ve inverter seçimleri yer almaktadır [7].



Şekil 1.2 Sistem performansını etkileyen faktörler

1.2.2.1 Coğrafi Konum

PV sistemlerde paneller üzerine düşen güneş ışığı miktarı performansı etkileyen önemli bir faktördür. Güneş ışınlarının panel üzerine hangi açıyla geldiği ve güneş ışığının şiddeti doğrudan elektrik üretimini etkiler. Işınım ne kadar çok olursa elektrik üretiminde de o kadar artış gözlemlenebilmektedir [7].

Gelen güneş ışığının PV paneller üzerine ne kadarının düştüğünün bilinmesi önem arz etmektedir. Sistemin kurulu olduğu coğrafi bölgelerde güneş ışınımı ölçümleri yapılması her zaman mümkün olmadığı için bu verilerin tahmin edilmesi gereklidir. Verilerin tahmin edilmesi için birçok farklı teknik uygulanabilmektedir ve bu teknikler yatay düzlemde güneş ışınımlarını hesaplamak amacıyla tasarlanmıştır. Paneller üzerine düşen ışınım miktarı panel yönü ve eğim açısı ile belirlenmektedir. Güneş ışınımının yüksek olması için PV paneller ekvatora göre yerleştirilerek kuzey yarımkürede güneye, güney yarımkürede ise kuzeye bakacak şekilde konumlandırılır. Panellerin mümkün olduğunca uygun eğim açıları ile konumlandırılması sistemin daha verimli olmasını sağlamaktadır [8].

1.2.2.2 Sıcaklık

PV panel sıcaklıkları güneş hücrelerini etkileyerek panel ömrünün belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Panel sıcaklığının belirli bir seviyenin üzerine çıkması panel veriminde düşüş meydana getirmektedir ve güneş hücrelerinden bozunma artışına sebep olmaktadır [9].

1.2.2.3 Gölgelenme

PV panellerin üzerine çeşitli nedenlerden kaynaklı gölge düşmesi panellerin verimini etkilemektedir. Kısmi gölgelenme etkisi olarak bilinen ve panelde sadece belirli hücrelerin gölgelenmesi diğer tüm panellerin ürettiği elektrik enerjisinin azalmasına sebep olmaktadır. Gölge düşen hücre diğer ilgili hücrelere oranla daha az enerji üretir ve direnç gösterebilir. Üretilen elektrik akımı gölgelenen hücre üzerinden geçmesi hücrede ani sıcaklık değişimlerine sebep olarak hücreyi ısıtır. Bu sebeple de aşırı ısınma PV panel ömrünün kısalmasına neden olabilir.

Gökyüzünün kapalı olduğu anlarda gölgelemenin fazla olmasından kaynaklı ışık geçişi az olur ve daha az miktarda enerji üretimi gerçekleşebilir [10].

Yapılan bazı tasarımlarda PV panellerinin kendi kendini gölgelemesi söz konusu olabilmektedir. Bu durum, panel dizilimi, eğim açısı, sıra aralıkları ve montaj geometrisinin yetersiz şekilde optimize edilmesinden kaynaklanır. Özellikle düşük güneş açılarına sahip dönemlerde sıra içi ve sıra arası gölgelenme, sistemin enerji verimini önemli ölçüde düşürmektedir.

Bu tür olumsuzlukların önüne geçebilmek için tasarım sürecinin ayrıntılı mühendislik analizleriyle desteklenmesi, gölgelenme simülasyonlarının yapılması ve panel yerleşim parametrelerinin kontrol edilerek optimize edilmesi gerekmektedir. Böylece hem yıllık enerji üretimi maksimize edilir hem de sistem performans kayıpları en aza indirilir [11].

1.2.2.4 Tozlanma

Fotovoltaik paneller üzerinde kir, toz, kum gibi çeşitli maddelerin birikmesi panel performansı üzerinde etkili olup verimliliği etkilemektedir. Panellerin üzerinde tozlanma olması modüllere ulaşan güneş ışınını miktarının azaltmasına ve orantılı olarak güçte de önemli kayıplara sebep olmaktadır. Tozlanma üzerine yapılan çalışmalarda özellikle yağışların az olduğu coğrafi konumlarda kayıp %15 oranlarını bulmaktadır [11].

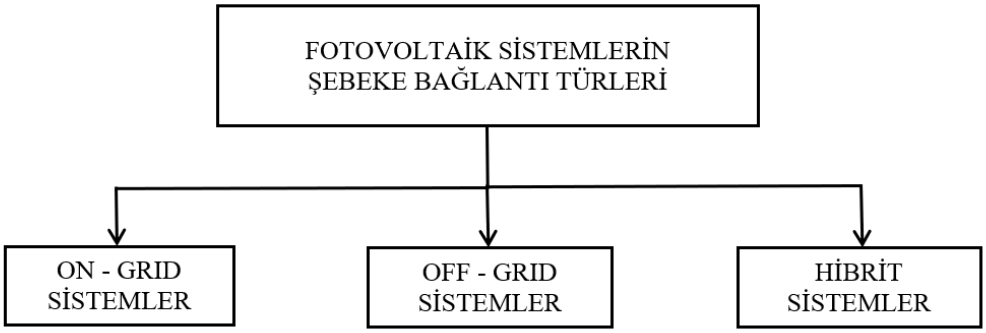
1.2.2.5 Inverter Seçimi

Inverterler, PV paneller tarafından üretilen DC akımın şebekeye verilmesi veya AC yüklerde kullanılması için AC akıma dönüştürülmesini sağlayan cihazlardır [12].

Inverter seçimleri yapılırken, enerji kaybı düşük olanın tercih edilmesi gerekmektedir. İlk yatırım aşamasında kayıpları daha az inverter kullanımı maliyeti arttırsa da sistem işletme aşamasına geçtiğinde bu durum göz ardı edilebilmektedir.

1.2.3 Fotovoltaik Sistemlerin Sınıflandırılması

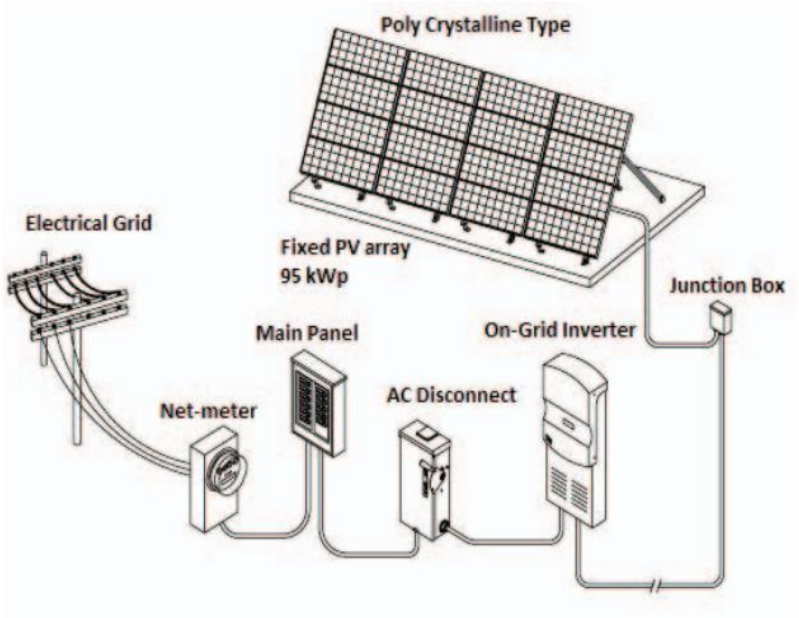
Fotovoltaik sistemler bağlantı türüne göre iki ana kategoriye ayrılmaktadır ve bu sınıflandırma elektrik şebekesi ile olan bağlantı durumuna göre yapılmaktadır.



Şekil 1.3 PV şebeke bağlantı türleri

1.2.3.1 On – Grid (Şebeke Bağlantılı) Sistemler

PV sistemlerin dağıtım şebekesine bağlanabilen ve ihtiyaç durumunda şebekeye elektrik enerjisi sağlayan sistemlerdir. Bu tip sistemlerde üretilen enerjinin fazlası şebekeye verilebilir ya da ihtiyaç durumunda şebekeden tahsis edilebilmektedir. Hem ihtiyaç durumunda kullanıcının elektrik ihtiyacını karşılaması hem de talebin düşük olduğu durumlarda ya da PV panellerde fazla enerji üretimi olması durumunda enerjinin şebekeye satılmasını sağlayarak kullanıcının gelir elde etmesine de olanak sağlamaktadır [13].



Şekil 1.4 PV şebeke bağlantı şeması

Kentsel elektrik şebekelerine entegre edilmesi sayesinde, en yakın dağıtım ağına bağlantı sağlanarak iletim mesafesi kısaltılmakta ve iletim kayıpları önemli ölçüde azaltılmaktadır. [14].

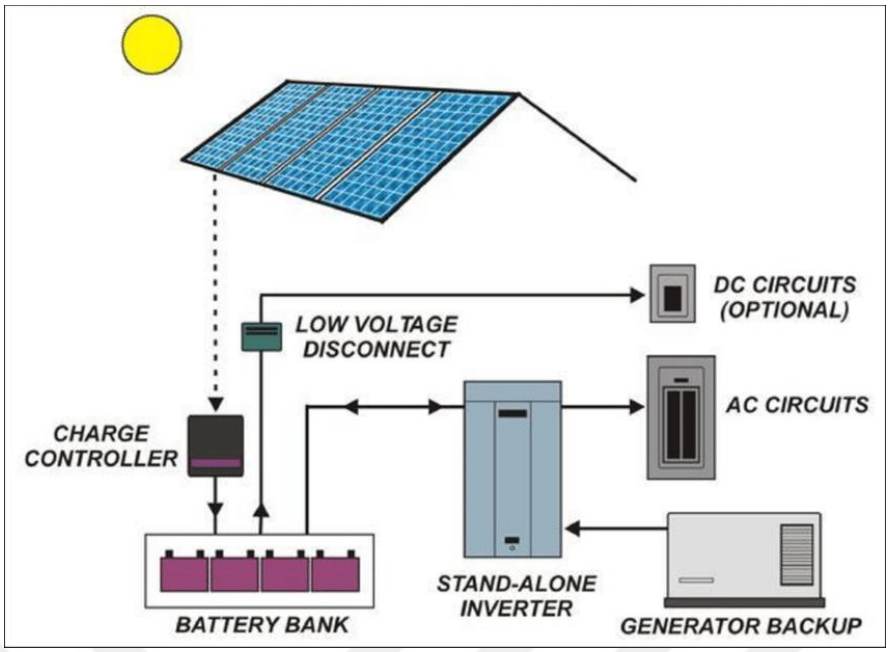
Bu tip sistemlerde inverterler şebeke ile senkron çalışmaktadır ve herhangi bir elektrik kesintisinde güvenlik amaçlı PV sistemin şebeke ile bağlantısı kesilmektedir [15].

1.2.3.2 Off – Grid (Şebekeden Bağımsız) Sistemler

PV sistemlerin şebekeyle bağlantısı olmadan, tamamen şebekeden bağımsız çalıştığı sistemlerdir. Bu sistemlerde üretilen enerji akü/bataryada depolanabilmektedir.

Daha çok kırsal alanlarda elektrik altyapısının olmadığı dağ, köy, yayla, tarla vb. alanlarda enerji ihtiyacını karşılama amacıyla kullanılmaktadır [16].

Şebekeden bağımsız sistemler, güneş enerjisi üretiminin yapıldığı yer ile enerjinin tüketildiği yerin aynı yer olduğu sistemlerdir. Dolayısıyla bu sistemler şebeke ile entegre çalışmazlar [17]. Şebekeden bağımsız bu sistemlerde güneş ışınımının yüksek olduğu anlarda üretilen fazla enerjiyi depolamak ve ihtiyaç dahilinde yüke tekrardan enerji sağlamak amacıyla bir akü ya da bir batarya gerekmektedir. Dolayısıyla akü/batarya sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Batarya ya da akülere bağlı oldukları için de yüksek kurulum maliyeti ve işletme bakım maliyeti gerekmektedir. İlave olarak bu sistemlerin şebekeden bağımsız olması güç kalitesi problemlerini ortadan kaldırmaya olanak sağlamaktadır [13].



Şekil 1.5 Fotovoltaik sistemlerin şebekeden bağımsız bağlantı şeması [17]

1.2.3.3 Hibrit Sistemler

Birden fazla enerji kaynağının olduğu, hem şebekeye hemde akü/bataryaya bağlı olan sistemlerdir. Bu sistemlerde genellikle güneş, rüzgar, hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji teknolojileri ile entegre çalışabilmektedir.

Fotovoltaik paneller ile üretilen enerji talep dahilinde tüketime sunularak kullanılır. İhtiyaç fazlası ise akü/bataryaya giderek enerji depolanması sağlanır. Şebekede herhangi bir enerji kesintisinde ise akü/batarya devreye girerek kesintisiz güç sağlar. Akü ya da bataryalar dolu olduğunda üretilen fazla enerji ya tüketici kullanımına sunulur ya da şebekeye aktarılır. Akü ya da bataryaların boş olduğu anlarda ihtiyaç anında enerji şebekeden temin edilebilir [18].

1.3 Araştırmanın Temel Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, hidrodepolama destekli agrofotovoltaik sistemler, aynı arazi üzerinde hem güneş enerjisi üretimini hem de tarımsal üretimi entegre ederek sürdürülebilir ve verimli bir üretim modeli oluşturmak hedeflenmiştir. Sistemde, fotovoltaik güneş panelleri ile tarım alanlarını birleştirirken, hidro depolama altyapısı sayesinde sulama sularını depolayarak tarımsal su yönetimi optimize edilmiştir. Bu yaklaşım özellikle su kıtlığının yaşandığı bölgelerde bitkisel üretimin sürekliliğini ve verimliliğini artırırken, enerji üretimi için de kesintisiz ve kontrollü bir kaynak sağlaması hedeflenmiştir.

Panel yerleşimi, arazi eğimi, gölgeleme etkileri ve panel yüksekliği gibi fiziksel parametreler, bitkilerin büyüme koşullarını olumsuz etkilemeyecek şekilde tasarlanmıştır. Hidro depolama sistemi ile de, suyun etkin bir şekilde depolanmasını ve ihtiyaç duyulan alanlara dağıtılmasını sağlayarak tarımsal sulamada verimliliği yükseltmek hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra sistem, enerji üretimi ve su kullanımının entegrasyonu sayesinde karbon emisyonlarını azaltır, iklim değişikliğine adaptasyonu destekler ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini artırır. Enerji üretimi, sulama ve su depolama operasyonlarının entegre yönetimi, sistemin ekonomik ve çevresel performansını maksimize eder, böylece aynı alanda hem yüksek verimli tarım hem de yenilenebilir enerji üretimi mümkün hale gelir.

Bu çalışmada, bir besi çiftliği senaryosu üzerinden hidro depolama destekli agrofotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliği kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Sistem, tarımsal üretimi olumsuz etkilemeyecek şekilde çiftlik altyapısına entegre edilerek hem enerji üretim hem de tarımsal üretim süreçlerinin birlikte yürütülmesine olanak sağlayacak biçimde tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle sistemin enerji üretim kapasitesi ile çiftliğin toplam enerji tüketim profili çıkarılmıştır. Ardından sistemde fotovoltaik panellerin yerleşimi, kapasitesi ve operasyonel performansı dikkate alınarak üretim-tüketim dengesinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Hidro depolama sisteminin agrofotovoltaik sistem ile entegrasyonu, çiftliğin enerji tüketiminin şebekeden karşılanma oranını azaltması ve sistemin kendi üretimi ile tüketimini dengeleme kapasitesi değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin detaylı analizine imkân tanımış ve sistemin hem tarımsal verimlilik hem de enerji sürdürülebilirliği açısından etkinliğini değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Sonuç olarak, hidro depolama destekli agrofotovoltaik sistemin çiftlik ölçeğinde uygulanabilirliği, enerji üretim ve tüketim dengesinin sağlanması, şebeke bağımlılığının azaltılması ve tarımsal üretim üzerinde olumsuz etkilerin minimize edilmesi açısından başarıyla gösterilmiştir.

2
AGROFOTOVOLTAİK SİSTEMLER

2.1 Agrofotovoltaik Sistemlerin Gelişimi

Agrofotovoltaik sistemler ilk olarak 1981 yılında Almanya'da temelleri atılmış olup günümüze kadar ulaşmaktadır. Alman fizikçi Adolf Goetzberger ve Alman tarım mühendisi Armin Zastrow tarafından tarım arazilerinin aynı zamanda enerji üretiminde de etkin rol oynayabileceği hipotezi üzerine ortaya çıkmıştır.

Bu sistemler tarımsal üretim ile enerji üretiminin entegre çalışması prensibine dayanmaktadır. Tarım odaklı, enerji odaklı ve tarım-enerji odaklı (entegre) olmak üzere üç farklı yaklaşımı içerisinde barındırmaktadır. Sistem kurulumu tamamlandığında ve devreye alındığında hedef enerji üretimi yapılması ise enerji odaklı olarak sınıflandırılır. Fakat öncelik tarım yapılarak tarımsal üretimin arttırılması ise tarım odaklı kabul edilir. Hem tarımsal üretim hemde enerji üretimi yapılarak çift yönlü üretim amaçlanıp her iki üretim de üst düzeye çıkartılmak isteniyorsa tarım-enerji odaklı olarak sınıflandırılır [19].

2000'li yıllardan itibaren agrofotovoltaik sistemler üzerine çalışmalar ve araştırmalar artmış olup çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Almanya'da 2015 yılında başlayıp 2020 yılına kadar incelemeleri devam edilen Heggelbach APV Resola projesi Avrupa'daki ilk agrofotovoltaik uygulamalarından biridir. Bu projede, PV panelleri altında patates, buğday, kereviz ve yonca gibi bitkiler yetiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu sistemlerin aynı arazi içerisinde hem enerji üretimi hem de tarımsal üretim entegre çalışarak verimli bir sistem olduğu kanaatine varılmıştır [20].

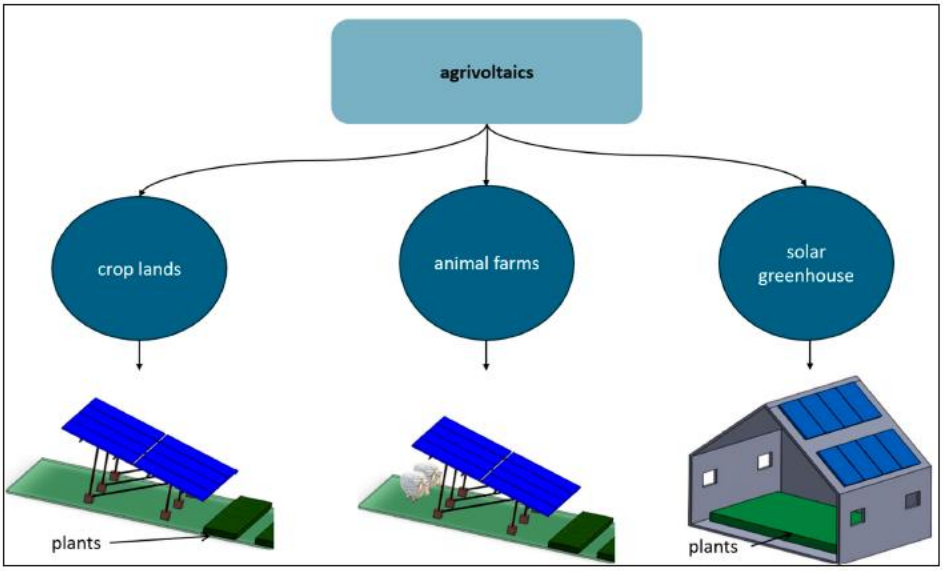
2.2 Agrofotovoltaik Sistemlerin Ortaya Çıkışı

Çeşitli ülkelerde meydana gelen iç savaşlar ve Covid-19 salgınının meydana gelmesi üzerine ortaya çıkan gıda, küresel emtia, enflasyon, enerji ve finans piyasalarındaki etkileri özellikle enerji ve gıda fiyatlarında artışlara sebep olmuştur. Ayrıca iklim değişikliklerinin meydana gelmesi ve küresel ısınma sürecinin giderek artması toprak mahsullerinin verimliliğinde azalma meydana getirmiştir ve bu azalmanın etkisiyle gıda eksikliği ve enerji dengesizliği dünya çapında problem haline gelmiştir. Sonuç olarak tesis hayvancılığı, tesis bahçeciliği ve çiftlik tarzı doğal yaşam alanları oluşturularak enerji üretimi yapılması tarım, enerji üretimi ve tarımsal üretim faaliyetleri içeren yeni bir sistem meydana getirilmiştir [21].

2.3 Agrofotovoltaik Sistemlerin Tanımı

Agrofotovoltaik sistemler, aynı tarım arazisi içerisinde fotovoltaik paneller kullanılarak enerji üretimi ve tarımsal üretimin koordineli çalıştığı sistemlerdir. Fotovoltaik panellerin tarım arazileri üzerinde tarımsal faaliyeti etkilemeyecek şekilde yerden belirli yüksekliğe konumlandırılması ve açılı yada dikey monte edilerek enerji üretimi yapılması prensibine dayanmaktadır. Böylelikle fotovoltaik panellerin tarım arazilerinde kullanımı ile ortaya çıkan olumsuz etkiler ortadan kaldırılarak gıda güvenliği hedefine katkıda bulunmaktadır.

Bu sistemlerde asıl amaç, tarımda ürün kayıplarına sebep olmadan enerji verimliliğini sağlamaktır [22].



Şekil 2.1 Tarım arazilerinde farklı agrofotovoltaik sistem kurulumları [22]

2.4 DIN SPEC 91434 Agrofotovoltaik Standardı

Almanya Fraunhofer ISE, Hohenheim Üniversitesi, Alman Standartlar Enstitüsü (DIN) ve araştırma ve endüstri alanındaki çalışanlardan oluşan bir konsorsiyum ile beraber DIN SPEC 91434 standardını geliştirmek amacıyla çalışmalar yapmak üzere toplanılmıştır. Avrupa'daki ilk agrofotovoltaik uygulamalarından olan Heggelbach APV Resola projesi teknik araştırma sonuçları temel alınarak ilerlenmiştir [23].

Bu standard agrofotovoltaik sistemlerin günümüze kadar gelişimini ve mevcut duruma bakışı, sistemin sağlamış olduğu faydaları ve fırsatları içermektedir. Şirketlerin, çiftçilerin ve belediyelerin sisteme nasıl yaklaşılacağı ile ilgili bilgiler sunmaktadır.

Sistemlerde birincil tarımsal kullanıma yönelik gereklilikleri saptayarak, agrofotovoltaik sistemlerin geleneksel PV sistemlerinden ayrıştırmayı hedeflemektedir.

Temel ilke, aynı arazi içerisinde birincil kullanıma yönelik tarımsal üretim ve ikincil kullanıma yönelik PV sistem ile enerji üretimi yapılarak arazinin verimli kullanılmasıdır.

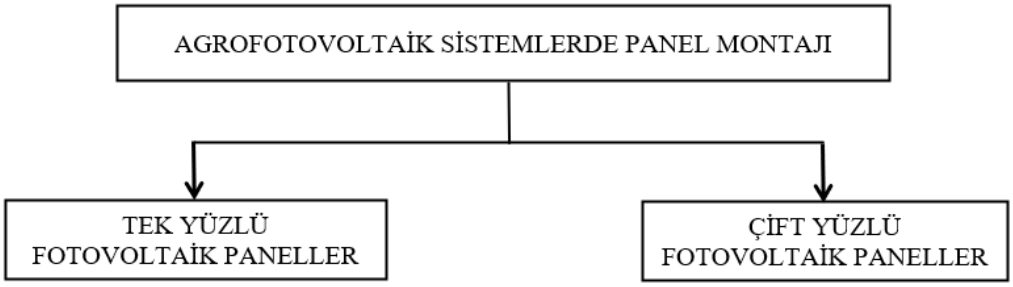
Tablo 2.4 DIN SPEC 91434' te belirtilen PV sistem kategorileri ve arazi kullanım türleri

	ARAZİ KULLANIM TÜRLERİ	ÖRNEKLER
KATEGORİ I	1A : Kalıcı ve Çok Yıllık Bitkiler	Meyveler, Meyve Çalıları, Bağcılık, Şerbetçiotu
	1B : Tek Yıllık ve Uzun Vadeli Ekinler	Tarla Bitkileri, Sebzeler, Dönüşümlü Mera
	1C : Biçilen Kalıcı Çayırlar	Yoğun ve Yaygın Ticari Çayır Alanları
	1D : Otlatılan Kalıcı Çayırlar	Sabit Mera Alanları, Döngüsel Otlatma
KATEGORİ II	2A : Kalıcı ve Çok Yıllık Bitkiler	Meyveler, Meyve Çalıları, Bağcılık, Şerbetçiotu
	2B : Tek Yıllık ve Uzun Vadeli Ekinler	Tarla Bitkileri, Sebzeler, Dönüşümlü Mera
	2C : Biçilen Kalıcı Çayırlar	Yoğun ve Yaygın Ticari Çayır Alanları
	2D : Otlatılan Kalıcı Çayırlar	Sabit Mera Alanları, Döngüsel Otlatma

2.5 Agrofotovoltaik Sistemlerde Panel Türleri

Artan yenilenebilir enerji talebiyle birlikte, güneş enerjisi kurulu gücünde de istikrarlı bir yükseliş gözlemlenmiştir. 2025 yılı itibarıyla Türkiye'nin fotovoltaik (PV) kurulu gücü yaklaşık 22 GW'a ulaşarak, yenilenebilir enerji portföyündeki payını artırmış ve 2022 yılına göre yaklaşık %82'lik kapasite artışı göstermiştir. [24].

Güneş enerjisi kullanımının artması ile artan enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla fotovoltaik panellerin montaj biçimleri önem kazanmıştır. Fotovoltaik paneller montaj biçimlerine göre çift yüzlü ve tek yüzlü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [25].



Şekil 2.2 Agrofotovoltaik sistemlerde panel montaj türleri

2.5.1 Tek Yüzlü (Monofacial) Fotovoltaik Paneller

Tek yüzlü konumlandırılan fotovoltaik paneller, günel ışınlarını sadece ön yüzeyden alırlar. Tek yönlü olması sebebiyle panel yüzeyi genellikle güneşe bakan tarafta olur ve gölgeleme olması sebebiyle de verimleri diğer montaj türlerine göre daha düşüktür. Bu sistemler geleneksel PV sistem teknolojisine uyumludur ve kurulum maliyeti daha düşüktür [26].

Almanya Heggelbach Agrofotovoltaik Sistemi

2016 yılında Almanya' nın Konstanz Gölü yakınlarında inşa edilmiş olup 270 Wp'lik 720 fotovoltaik panel modülü kullanılarak yaklaşık 194,4 kWp kurulu güce sahiptir. Çiftlik arazisinde ilk olarak patates, kereviz, yonca ve buğday kullanılarak deneyler yapılmıştır. Fotovoltaik panellerin tek yüzlü konumlandırılması ve yüksek ayaklı olması ile geleneksel sistemlere göre %25 daha az panel olmasına karşın panellerin aralıklı konumlandırılması güneş ışınlarını yeterli seviyede almasını sağlamıştır [27].

Heggelbach çiftliği projesi ile agofotovoltaik sistemler kurularak tarım arazisinde verimliliğin arttırılması ve aynı zamanda tarım sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarının payı arttırılmıştır. Arazi içerisinde panellerin aralıklı olarak dizayn edilmesi aynı zamanda tarım ekipmanlarının geçişi için ve hayvanların arazi içerisinde otlatılması için de olanak sağlamaktadır [28].



Şekil 2.3 Almanya Heggelbach Agrofotovoltaik sistemi

2.5.2 Çift Yüzlü (Bifacial) Fotovoltaik Paneller

Çift yüzlü dikine konumlandırılan fotovoltaik paneller hem doğu hem de batı yönünde olmak üzere çift yönlü güneş ışınlarını almaktadır. Ayrıca zeminden yansıyan ışınlar da kullanılabilmektedir.

Panel açısının ayarlanması ve gölge durumu gibi sebeplerden kaynaklı kurulum aşaması diğer panel türlerine oranla daha hassastır ve maliyeti daha yüksektir. İlave olarak çift yüzlü dikine konumlandırılan panellerde diğer panel türlerine göre verimliliğin fazla olması geri ödeme süresinin de daha erken olmasına olanak sağlamaktadır [29].

Almanya Aasen Solar Park Agrofotovoltaik Sistemi

2020 yılında Almanya'nın güney eyaletinde yer alan Donaueschingen – Aesen bölgesindeki tarım arazisine çift yüzlü dikine agrofotovoltaik sistem yaklaşık 14 hektarlık alanı kapsayan 4,1 MW'lık bir güneş enerjisi santrali kurulmuştur [30].



Şekil 2.4 Aasen Solar Park Agrofotovoltaik sistemi

Bu santral, 380W gücünde yaklaşık olarak 11.000 adet çift yüzlü panel kullanılarak inşa edilmiş olup yaklaşık 1.400 haneye enerji sağlamaktadır. Fotovoltaik panellerin arazi içerisindeki konumları minimum düzeyde tutulmuş olup paneller arasındaki mesafe 10 metre olacak şekilde yerleştirilerek tarım ekipmanlarının geçişi için de kolaylık sağlanmıştır.

PV panellerin dikey yönlü monte edilmesi rüzgarlı bölgelerdeki bitkileri rüzgarın olumsuz etkilerinden koruyarak verimli tarım yapılmasına olanak sağlamıştır.

2.6 Agrofotovoltaik Sistemlerin Faydaları

İklim değişiklikleri kısıtlı olan gıda, enerji ve su kaynaklarını tehdit etmektedir. Sıfır karbon emisyonlu enerji sistemlerine geçiş ile sera gazının da etkisinin olmaması sebebiyle temiz enerji üretimi hedeflenmiştir [31].

Tarım arazilerinde fotovoltaik sistemlerin entegrasyonu ile oluşturulan agrofotovoltaik yapılar, merkezi olmayan enerji üretimini destekleyerek kırsal elektrifikasyona katkı sağlamakta ve bitki verimliliğini artırmaktadır. Bu çift amaçlı kullanım modeli, hem enerji üreticileri hem de tarımsal işletmeler açısından ekonomik sürdürülebilirliği güçlendirmektedir [32].

Tarımsal verimliliğin artmasında sistemin kurulduğu arazinin iklim ve çevre koşulları yetiştirilen bitki türlerine göre farklılık göstermektedir.

3
POMPA DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SİSTEMLER

3.1 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Sistemlerinin Gelişimi

Pompa depolamalı hidroelektrik santrallerin ilk temelleri 1890 yılında İsviçre' de atılmış olup ardından 1930 yılında Amerika Birleşik Devletleri The Blenheim-Gilboa Pumped Storage Project olup suyun üst rezervuardan alt rezervuara akışı ile elektrik üretilmesi prensibine dayanan bir projedir. O yıllarda yapılan projeler çoğunlukla deneysel aşamadaydı ve yaygınlaşması 1950 ve sonrası dönemlerini bulmuştur ve günümüze kadar ulaşmıştır [33].

1968 yılında faaliyete geçen ve yaklaşık olarak 1 MW güç üreten ilk pompa destekli hidroelektrik tesis İsviçre Schaffhausen'dedir [34].

1969 yılında inşasına başlanan ve 1973 yılında ilk elektrik üretimine başlayan New York, Blenheim-Gilboa'da Blenheim–Gilboa Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali kurulmuştur ve yaklaşık 1,1 GW'lık güç üretimine sahiptir [34].

Ardından ABD'de yer alan en büyük yeraltı hidroelektrik santrallerinden biri olan Tennessee Valley Authority tarafından işletilen Raccoon Mountain Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali 1970 yılında yapılmaya başlanmış olup 1978 yılında faaliyete girmiştir ve yaklaşık olarak 1,6 GW'lık güç üretebilmektedir. Ayrıca en büyük kaya dolgu barajı olarak literatürde yer almaktadır [34].



Şekil 3.1 Raccoon Mountaik Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali

1985 yılında ABD'nin Virginia eyaletinde yer alan ve döneminin en büyük güç üretimini sağlayan Bath County Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali devreye alınmıştır. 3,003 MW güç üretimi ile büyük enerji depolama projeleri arasında yer almaktadır [34].



Şekil 3.2 Bath Country Pompa Destekli Hidroelektrik Santrali

2013 yılında inşası başlayan Çin'in Hebei eyaletinde yer alan Fengning Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali 2024 yılında devreye alınmıştır. Yaklaşık olarak 3,6 GW'lık enerji üretimi yapılmakta olup şu an dünyanın en büyük hidroelektrik santrali unvanına sahip olmaktadır [35].

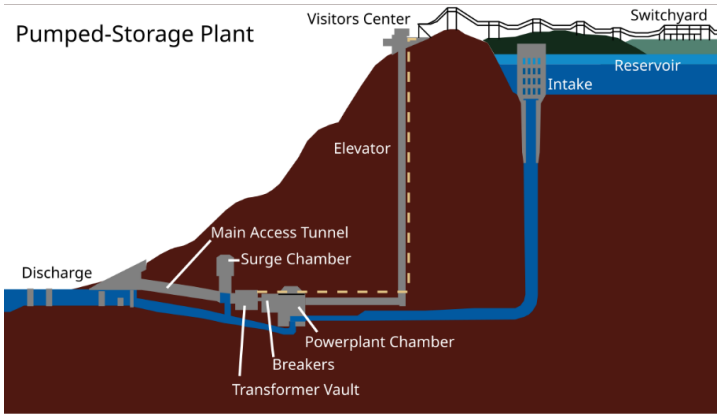


Şekil 3.3 Çin Hebei eyaletinde yer alan Fengning Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali

3.2 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Tanımı

Hidroelektrrik santraller elektrik şebekelerinde enerji depolama ihtiyacının karşılanmasında büyük rol oynamaktadır. İstenilen ihtiyaca göre kapasite, işlev ve kurulum bakımından farklı yapılarda sistem kurulmaktadır.

Pompa depolamalı hidroelektrik enerjisi (PSH), bir tür hidroelektrik enerji depolamasıdır. Suyun birinden diğerine doğru hareket etmesiyle (deşarj) ve bir türbinden geçmesiyle güç üretebilen, farklı yüksekliklerde iki su rezervuarının birlikte yapılandırılmasıdır. Sistem ayrıca suyu üst rezervuara geri pompalarken (yeniden şarj) güce ihtiyaç duyar. PSH, gücü depolayıp gerektiğinde serbest bırakabildiği için dev bir bataryaya benzer şekilde de çalışabilmektedir [36].

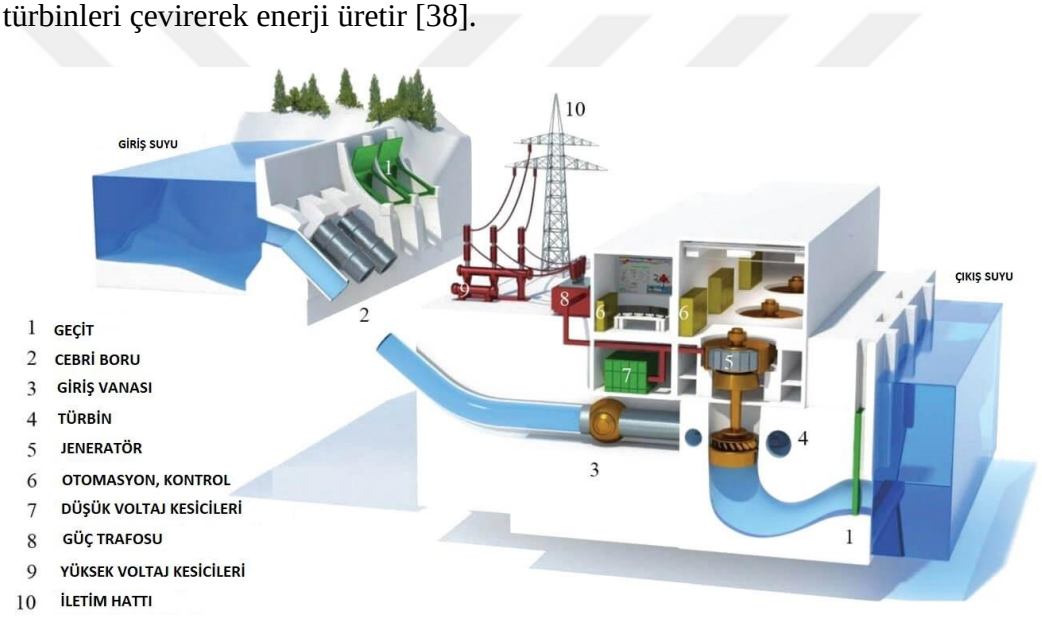


Şekil 3.4 Pompa depolamalı hidroelektrik santral [37]

3.3 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Genel Yapısı

Pompa depolamalı hidroelektrik santrallerde alt ve üst rezervuar, türbin, jeneratör, motor, pompalar, penstock, akış kontrol valfleri, sistem kontrolörleri ve diğer yardımcı ekipmanlardan meydana gelmektedir.

Alt ve üst rezervuarlar enerjinin depolanması yada enerjinin üretilmesi aşamasında kullanılan su kütleleridir. Üst rezervuar yüksek kotta yer alır ve elektrik üretiminin fazla olduğu zamanlarda sistemde bulunan pompalar aracılığı ile alt rezervuarda bulunan su kütlesi üst rezervuara taşınır. Böylelikle elektrik enerjisi potansiyel enerjiye dönüştürülür. Alt rezervuarlar ise alcak kotta yer alır ve elektrik ihtiyacı arttığında üst rezervuarda bulun su kütlesi yerçekimi etkisiyle aşağı yönde akar ve türbinleri çevirerek enerji üretir [38].



Şekil 3.5 Pompa depolamalı hidroelektrik santralin genel yapısı [39]

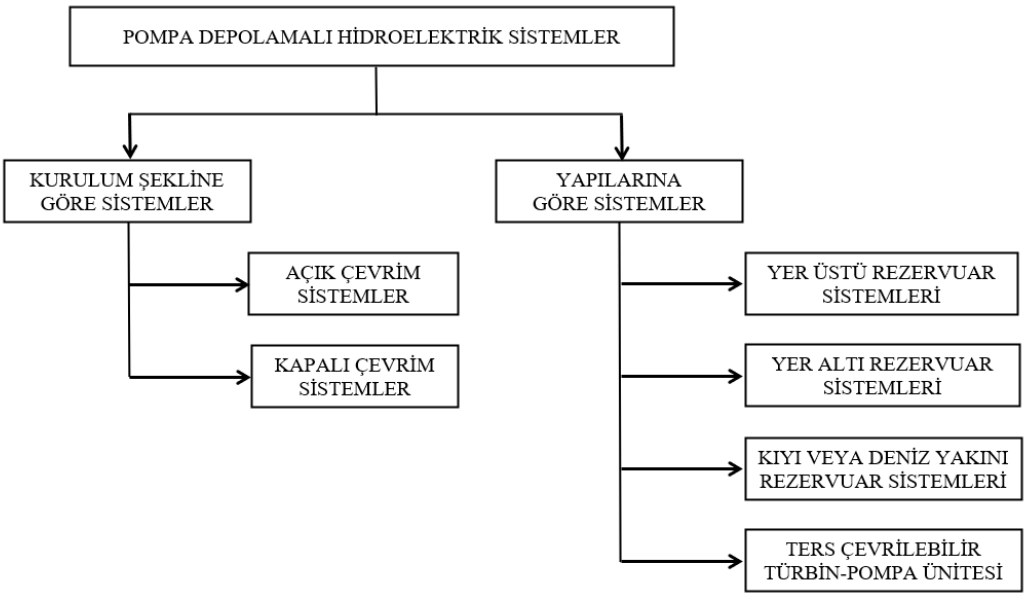
Üst rezervuarda depolanan su yüksek basınç etkisi ile türbine gelir ve türbin kanatlarına çarpan su türbinleri döndürür. Dönme hareketi sonucu jeneratör çalışır ve mekanik enerji üretilmiş olur [40].

Jeneratör suyun oluşturduğu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Pompa ve motorlar ise sistemde suyun alt rezervuardan üst rezervuara aktarılmasında görev almaktadırlar.

Akış kontrol valfleri suyun üst rezervuar ile alt rezervuar arasında geçişini sağlarken ani akış değişimlerinin önüne geçerek suyun kontrollü ve dengeli geçişine olanak sağlamaktadır [40].

3.4 Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Sınıflandırılması

Pompaj depolamalı santraller kurulum şekilllerine (açık çevrim ve kapalı çevrim sistemler) ve yapılarına (yer üstü rezervuar, yer altı rezervuar, kıyı veya deniz yakını rezervuar ve ters çevrilebilir türbin-pompa) göre sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.6 Pompa depolamalı hidroelektrik santrallerin sınıflandırılması

Kurulum şekillerine göre pompaj depolamalı hidroelektrik santraller açık çevrim sistemler ve kapalı çevrim sistemler olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenmektedir. Yapılarına göre pompaj depolamalı hidroelektrik santraller ise yer üstü rezervuar sistemleri, yer altı rezervuar sistemleri, kıyı veya deniz yakını rezervuar sistemleri ve ters çevrilebilir türbin pompa ünitesi olmak üzere dört ayrı başlık altında incelenmektedir.

3.4.1 Kurulum Şekillerine Göre Sistemler

3.4.1.1 Açık Çevrim Sistemler (Open Loop Systems)

Açık çevrim PSH sistemler, alt ve üst rezervuarların doğal su kaynaklarına bağlı bulunduğu, dış ortam suyu ile direkt bağlantıda olduğu sistemlerdir. Bu sistemler doğal su kaynakları ile bağlantılı olduğu için çevre koşullarından daha fazla etkilenerek su seviyesi buna göre değişebilmektedir. Dünya'da ABD'de bulunan PSH projeleri açık çevrim sistem olarak çalışmaktadırlar [41].

ABD - Bath Country Pumped Storage Station



Şekil 3.7 Bath Country Pumped Storage Station [42]

ABD' nin Virginia eyaletinde 1977 yılında inşası başlamış olup 1985 yılında devreye alınmış olan bu tesis dünyadaki en gelişmiş ve en büyük açık çevrim pompa sistemine sahiptir. Toplamda 6 adet Francis tipi turbine sahip olup 3,003 MW'lık üretim kapasitesine sahiptir [34].

İskoçya - Cruachan Power Station

1959 ve 1965 yılları arasında inşası yapılan ve İskoçya'nın Loch Awe gölü yakınlarında ve Ben Cruachan Dağı'nın içerisinde konumlandırılmış olan bu santral İskoçya'nın ilk yer altına kurulmuş santralidir. Ayrıca ilk yüksek ters çevrilebilir hidroelektrik santral olarak da geçmektedir.



Şekil 3.8 Cruachan Power Station [42]

Tesisin kurulu gücü yaklaşık 400 MW'tır ve 2×100 MW + 2×120 MW türbin ünitesine sahiptir.

3.4.1.2 Kapalı Çevrim Sistemler (Closed Loop Systems)

Kapalı çevrim PSH sistemler, alt ve üst rezervuarlar doğal su kaynaklarına bağlı olmayan, tamamen birbirinden bağımsız ve izole sistemlerdir. Rezervuarların doldurulması ve buharlaşma kayıplarını ya da sızıntıları önlemek adına sonrasında yüzey suyu ya da yer altı suyu kullanılabilmektedir. Sistem dış kaynaklardan izole olduğu için su tamamen sistem içerisinde kalır ve devridaim yapar [41].

Çin – Fengning Pumped Storage Power Station

Çin'in Hebei eyaletinde yer alan bu santral 2024 yılında devreye alınmış olup dünyanın en büyük pompa depolamalı hidroelektrik santrali ünvanına sahiptir. Tesis kurulumunda şebeke dengesizliklerinin önüne geçmek ve sistemin istikrarlı çalışması amaçlanmıştır. Yaklaşık olarak 3 miyon dolar yatırım bedeli ile 3,6 GW enerji üretimi yapılmaktadır [42].



Şekil 3.9 Fengning Pumped Storage Power Station [42]

ABD' de ilk hidroelektrik santraller doğal su kaynaklarının bulunduğu açık çevrim sistemler olarak kurulmuş olmasına rağmen ilerleyen süreçte yeni yapılan projelerin çoğu kapalı çevrim olarak ilerlenmiştir. Yapılan son çalışmalara göre açık çevrim sistemlere çevresel etkilerin yüksek olması ve kapalı çevrim sistemlerde daha fazla yer esnekliği sağlanabilmesi bu konuda etkili olmuştur [41].

Kapalı çevrim sistemler kurulum aşamasında bitki örtüsü temizlenmesi, rezervuarların kurulumu ve kazı işlemleri sebebiyle inşaat etkilerinin fazla olmasına karşın doğal su kaynaklarından izole olması sebebiyle yerleşim esnekliğine sahiptir. İlave olarak su canlılarının yaşam döngülerini tehdit etmeyerek düşük ekolojik zararlara yol açarlar [42].

3.4.2 Yapılarına Göre Sistemler

3.4.2.1 Yer Üstü Rezervuar Sistemleri

Yer üstü rezervuar sistemleri, rezervuarların yer üstünde yer aldığı suyun bir yapay rezervuar ya da göl gibi yüksekte bulunan bir alanda toplandığı sistemlerdir. Su yüksek rezervuardan alcak rezervuara indiği için potansiyel enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Yapısal olarak yer üstünde olduğu için taşkın riskinin olmaması gerekmektedir ve türbin, jeneratör ve santral binası yer üstünde konumlandırılan sistemlerdir [44].

Dünya üzerinde ABD'de bulunan Bath County Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali, Çin'de bulunan Fengning Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali, yine ABD'de bulunan Raccoon Mountain Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali ve İrlanda'da bulunan Turlough Hill Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali yer üstü rezervuar sistemlerine örnek olarak verilebilir.

3.4.2.2 Yer Altı Rezervuar Sistemleri

Yer altı rezervuar sistemleri ekonomik, jeolojik ve emniyet nedenleri ile suyun yer altında bulunduğu sistemlerdir. Tünel, mağara, eski maden ocakları gibi doğal veya yapay boşluklarda bulunur. Çalışma prensibi ise yer altında depolanan su ihtiyaç halinde enerji üretimi için pompalar aracılığı ile üst rezervuara iletilir ya da üst rezervuardan alt rezervuara iletilir. Rezervuarın yer altında olması sebebiyle çeşitli çevresel etkilerin azaltılmak istendiği alanlarda tercih edilir [44].

Almanya'nın Goldisthal kentinde bulunan Goldisthal Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali tüm yapıları yer altında bulunmaktadır.



Şekil 3.10 Goldisthal Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali

3.4.2.3 Kıyı veya Deniz Yakını Rezervuar Sistemleri

Kıyı veya deniz yakını rezervuar HES sistemleri, rezervuarları doğal kaynaklar ya da denize yakın yapay rezervuar kullanılarak oluşturulan sistemlerdir. Alt rezervuarlar genellikle deniz seviyesinde olup üst rezervuarlar yüksekte bir dağ yamacına ya da yer üstüne inşa edilir.

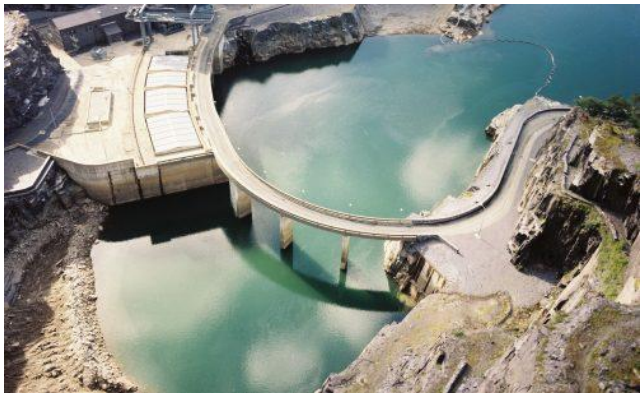


Şekil 3.11 Okinawa Yanbaru Deniz Su Pompajlı Hidroelektrik Santrali [45]

İlk yüksek düşülü Japonya'da Okinawa Adasının kuzeyinde bulunan Okinawa Yanbaru Deniz Su Pompajlı HES santralidir [33]. İlk deniz suyu kullanan pompalı hidroelektrik santral olmakla beraber yaklaşık 30 MW kurulu güce sahiptir [45].

3.4.2.4 Ters Çevrilebilir Türbin-Pompa Ünitesi

Ters çevrilebilir türbin-pompa ünitesi ilk olarak 1930 yılında Almanya'nın Baldeney kentinde ortaya atılmış olup hem su pompalama hem de elektrik üretimi işlevini yerine getiren çift yönlü sistemlerdir. Çift yönlü bir sistem olması ve tek bir ekipman ile çalışması santralde %30 oranında bir maliyet tasarrufu sağlamıştır. Bu sistemler özellikle 1960-1970 yılları arasında büyük rağbet görmüş olup günümüzde hala kullanılmaktadır [46].



Şekil 3.12 Dinorwig Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali [42]

ABD’de bulunan Bath County Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali, Almanya’da bulunan Goldisthal Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali, Japonya’da bulunan Okinawa Yanbaru Deniz Su Pompajlı Hidroelektrik Santrali, yine ABD’de bulunan Raccoon Mountain Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santrali ve Galler’Dinorwig Power Station – Galler / Birleşik Krallık çift yönlü çalışan ters çevrilebilir türbin-pompa üniteli sistemlere örnek olarak verilebilir [42].

4
SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ

Bu çalışma, bir çiftlik tesisinde gerçekleştirilen enerji tüketimi analizine ilişkin bulguları, mevcut enerji kullanım durumunu ve tüketim karşılama potansiyellerini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında, tesisin elektrik enerjisi tüketim profili incelenmiş olup başlıca enerji tüketen ekipmanlar belirlenmiştir.

Çalışmada, entegre bir çiftlik tesisi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan tesis kapsamında; bir çiftlik evi, hayvansal yem üretimi amacıyla kullanılan tarımsal alanlar ve 300 baş kapasiteli bir besi çiftliği yer almaktadır. Tesisin elektriksel yük analizi ve enerji tüketim profili oluşturulurken, besi çiftliğinde kullanılan elektrikli ekipmanların türleri ve detaylı teknik özellikleri, Nuri ORHAN ve Seda ŞAHİN tarafından yürütülen çalışmada belirtilen referans çiftlik verileri temel alınarak modellenmiştir [47].

Besi çiftliğinde ve çiftlik evinde yer alan tüm elektrikli ekipmanların günlük ortalama kullanım süreleri, çalışma periyotları ve zaman dilimlerine göre yük dağılımları, mevsimsel farklılıklar göz önünde bulundurularak senaryolaştırılmıştır. Bu kapsamda, ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış dönemleri için ayrı ayrı enerji tüketim senaryoları oluşturulmuş; her sezon için farklı iklim koşulları, hayvansal faaliyet yoğunluğu, aydınlatma gereksinimleri ve yem üretim kapasitesi gibi faktörler belirlenmiştir. Mevsimsel senaryoların oluşturulmasında; tarımsal üretim döngüleri, hayvanların beslenme ve barınma ihtiyaçlarındaki değişimler ile ısıtma, havalandırma ve sulama sistemlerinin işletme süreleri gibi parametreler değerlendirilmiştir. Böylece tesisin yıl boyunca değişen enerji talep profili dinamik bir yapıda modellenmiş ve elektrik tüketim modelinin mevsimsel varyasyonları teknik olarak analiz edilebilir hale getirilmiştir.

4.1 Enerji Talebinin Şebekeden Karşılanması ve Yük Profilinin İncelenmesi

4.1.1 Çiftlikte Kullanılan Elektriksel Ekipmanlar

Antalya ili Manavgat ilçesi sınırlarında tasarlanan tesiste çiftlik evi ve besi çiftliğinde kullanılan elektriksel ekipmanların tüketimleri ve detayları aşağıdaki tablolarda belirtilmiştir. Bu veriler sonucunda çiftlik evinin toplam enerji tüketimi verilerine ulaşılmıştır.

Tablo 4.1 Çiftlik evinde kullanılan ekipmanlar ve enerji tüketimleri

Çiftlik Evindeki Elektrikli Ekipmanların Günlük Enerji Tüketimi					
Ekipman	**Adet**	**Gücü (kW)**	**Toplam Kurulu Güç (kW)**	**Günlük Çalışma Süresi (Saat)**	**Toplam Enerji Tüketimi (kWh)**
Buzdolabı	1	0,03	0,03	24	0,72
Dondurucu	1	0,03	0,03	24	0,72
Fırın	1	2	2	1	2
Çamaşır Makinası	1	0,6	0,6	1	0,6
Bulaşık Makinası	1	1	1	1	1
Televizyon	1	0,085	0,085	4	0,34
Ütü	1	3	3	0,5	1,5
Elektrikli Süpürge	1	0,8	0,8	0,5	0,4
Kettle	1	2,2	2,2	0,2	0,44
Ek Tüketim	1	0,1	0,1	24	2,4

Çiftlik evinde kullanılan elektriksel ekipmanların güçleri ve günlük çalışma süreleri belirtilmiş olup bu değerler mevsimlik enerji tüketim analizi yapıldığı esnada kullanılacaktır.

Ek tüketim kısmı şarj cihazları, modem vb. ekipmanlar için dahil edilmiş olup güç değeri tahmini olarak yazılmıştır.

Tablo 4.2 Besi çiftliğinde kullanılan elektrikli ekipmanların enerji tüketimleri

Besi Çiftliğindeki Elektrikli Ekipmanların Günlük Enerji Tüketimi					
Ekipman	**Adet**	**Gücü (kW)**	**Toplam Kurulu Güç (kW)**	**Günlük Çalışma Süresi (Saat)**	**Toplam Enerji Tüketimi (kWh)**
Soğuk Hava Deposu	1	11,5	11,5	24	276
Hidrofor	2	5,5	11	16	176
Kaşağı	12	0,25	3	4	12
Gübre Karıştırıcı	2	7,5	15	1	15
Seperator	1	7,5	7,5	1	7,5
Gübre Pompası	2	7,5	15	1	15
Sıyırıcı	4	4	16	4	64

Besi çiftliğinde kullanılan endüstriyel ekipmanların kurulu güçlerine bakıldığında soğuk hava deposu, hidrofor ve sıyırıcı en fazla enerji tüketen ekipmanlar olup günlük enerji tüketiminin %83'ünü oluşturmaktadır.

Çiftlik evinde ve besi çiftliğinde kullanılan aydınlatma armatürlerinin gün ışığı süresine göre değişimi, hava şartları, çiftlik faaliyetindeki yoğunluklar ve armatürlerin sıcaklığa bağlı performans farkları nedeniyle elektrik tüketimleri mevsimlere göre farklı ele alınmıştır. İlgili ekipmanların çalışma süreleri ve enerji tüketim değerleri tabloda belirtilmiştir.

Çiftlikte kullanılan dalgıç pompalar ise su kaynaklarından sürekli ve güvenli bir şekilde su temin etmek amacıyla kullanılır. Özellikle sulama ve hayvancılık için kullanılan su, mevsimlere göre farklılık gösterdiği için sezonluk enerji tüketimleri kategorisinde yer almıştır. İlgili ekipmanın çalışma süresi ve enerji tüketimi değerleri tabloda belirtilmiştir.

İlave olarak, tüm aydınlatma armatürlerinin aynı anda devrede olmadığı düşünülmüştür ve ekonomik tasarım gerekliliği ile eş zamanlılık katsayıları %40 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.3 Çiftlikte kullanılan diğer ilgili elektrikli ekipmanların enerji tüketimleri

Çiftlikteki Diğer Ekipmanların Mevsimlik Kullanım Süreleri											
Mevsimler				**İlkbahar Sezonu**		**Yaz Sezonu**		**Sonbahar Sezonu**		**Kış Sezonu**	
Ekipman	**Adet**	**Gücü (kW)**	**Toplam Kurulu Güç (kW)**	**Çalışma Süresi (Saat)**	**Toplam Enerji Tüketimi (kWh)**	**Çalışma Süresi (Saat)**	**Toplam Enerji Tüketimi (kWh)**	**Çalışma Süresi (Saat)**	**Toplam Enerji Tüketimi (kWh)**	**Çalışma Süresi (Saat)**	**Toplam Enerji Tüketimi (kWh)**
Aydınlatma (Ev)	15	0,06	0,9	7	2,52	6	2,16	8	2,88	7	2,52
Aydınlatma (Tesis)	20	0,125	2,5	2	2	2	2	2	2	2	2
Dalgıç Pompa	2	75	150	3	450	3	450	0,1	15	0,1	15

Besi çiftliğinde bulunan ekipmanların çalışma periyotları mevsimsel koşullar ve çiftlik faaliyetlerinin gerekliliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tarımsal üretim süreçlerindeki dönemsel farklılıklar ile günlük operasyonel planlama, gün doğumu ve batımı saatleri, ekipmanların gün içerisindeki devreye alınma ve çalışma sürelerini direkt olarak etkilemektedir. Bu bağlamda, çiftlik yerleşkesinde yer alan çiftlik evi ve besi ünitesindeki elektrikli ekipmanların yılın farklı mevsimlerinde hangi zaman aralıklarında işletmede olduğu analiz edilmiş olup detaylandırılmıştır.

4.1.2 Mevsimsel Yük Profilinin İncelenmesi

Analizler, bir yıllık veri seti üzerinden, dört mevsimsel döneme ayrılarak gerçekleştirilmiştir.

İlkbahar Sezonu: Mart, Nisan, Mayıs

Yaz Sezonu: Haziran, Temmuz, Ağustos

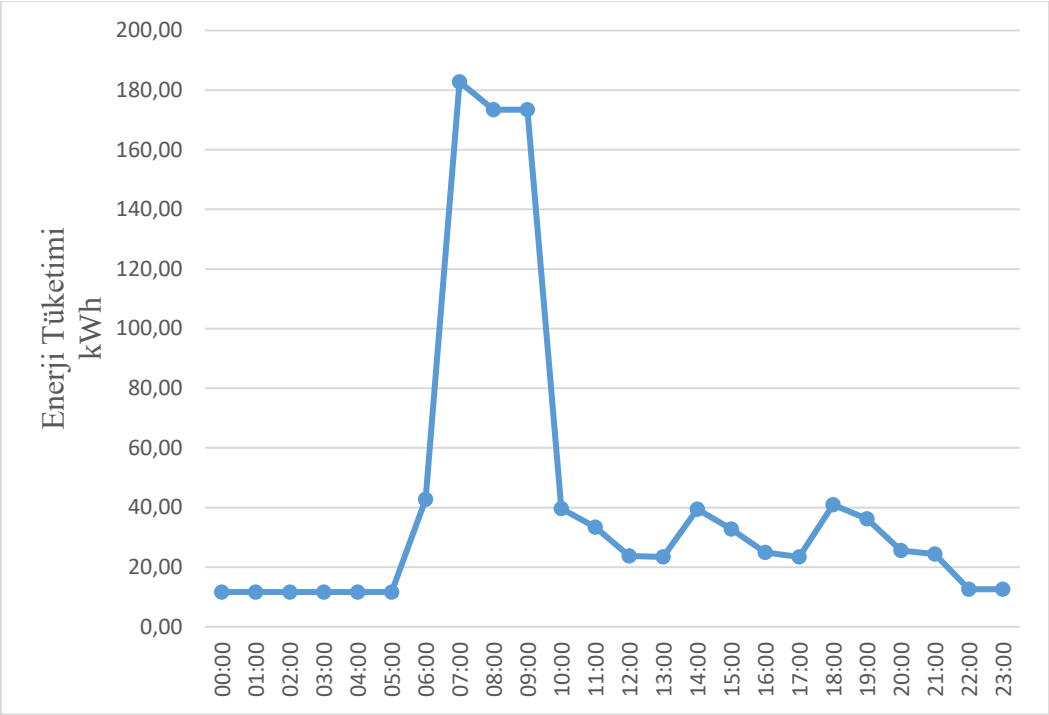
Sonbahar Sezonu: Eylül, Ekim, Kasım

Kış Sezonu: Aralık, Ocak, Şubat

Tablo 4.4 İlkbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri

İLKBAHAR SEZONU	Çiftlik Evi											Besi Çiftliği									Toplam (kWh)
	Buzdolabı	Dondurucu	Fırın	Çamaşır Makinası	Bulaşık Makinası	Televizyon	Ütü	Elektrikli Süpürge	Kettle	Ek Tüketim	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Soğuk Hava Deposu	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperator	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	1	1								1			1								11,66
01:00	1	1								1			1								11,66
02:00	1	1								1			1								11,66
03:00	1	1								1			1								11,66
04:00	1	1								1			1								11,66
05:00	1	1								1			1								11,66
06:00	1	1								1	1		1	1	0,25				1	1	42,81
07:00	1	1								1		1	1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			182,79
08:00	1	1								1		1	1	1	0,25						173,41
09:00	1	1								1		1	1	1	0,25						173,41
10:00	1	1							0,1	1			1	1	0,25				1		39,63
11:00	1	1		1						1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			33,39
12:00	1	1						0,5		1			1	1	0,25						23,81
13:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
14:00	1	1								1			1	1	0,25				1		39,41
15:00	1	1								1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			32,79
16:00	1	1					0,5			1			1	1	0,25						24,91
17:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
18:00	1	1	1							1	1		1	1	0,25				1		40,91
19:00	1	1								1	1		1	1	0,25	0,25	0,25	0,25		1	36,19
20:00	1	1			1	1			0,1	1	1		1	1	0,25						25,62
21:00	1	1				1				1	1		1	1	0,25						24,40
22:00	1	1				1				1	1		1								12,65
23:00	1	1				1				1	1		1								12,65

Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposu gibi elektrikli ekipmanların 24 saat çalıştığı varsayılmıştır.



Şekil 4.1 İlkbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi

İlkbahar sezonu enerji tüketim grafiği incelendiğinde, enerji tüketimi gece boyunca oldukça düşüktür ve yaklaşık 0-30 kWh mertebelerinde ilerlemektedir.

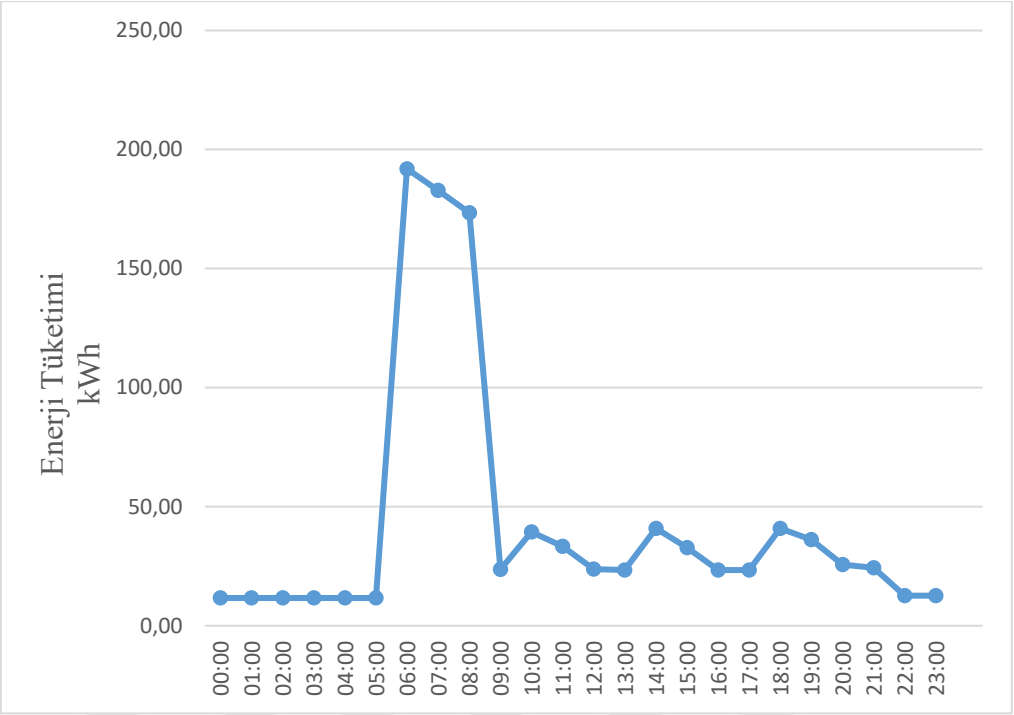
İlkbahar sezonunda hava sıcaklıkları genel olarak ılımandır ve buharlaşma çok yüksek değildir. Fakat gündüzleri güneşli ve rüzgarlı ve bu saat dilimlerinde su kayıpları da artar. Dolayısıyla sabah 07:00 – 09:00 arası tarımsal arazinin sulanması için dalgıç pompalar devreye girmektedir. Bu nedenle enerji tüketimi zirveye ulaşarak 170-190 kWh mertebelerinde olmaktadır. İlerleyen saatlerde küçük dalgalanmalar ile enerji tüketimi düşük seviyelerde seyretmektedir ve 22:00 itibari ile en düşük seviyeleri görmektedir.

İlkbahar sezonu bir günlük enerji tüketimi profili incelendiğinde yaklaşık olarak 1.035,52 kWh' lik enerji tüketimi olmuş olup ortalama 43,15 kWh/gün enerji tüketilmiştir.

Tablo 4.5 Yaz sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri

YAZ SEZONU	Çiftlik Evi											Besi Çiftliği									Toplam (kWh)
	Buzdolabı	Dondurucu	Fırın	Çamaşır Makinası	Bulaşık Makinası	Televizyon	Ütü	Elektrikli Süpürge	Kettle	Ek Tüketim	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Soğuk Hava Deposu	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperator	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	1	1								1			1								11,66
01:00	1	1								1			1								11,66
02:00	1	1								1			1								11,66
03:00	1	1								1			1								11,66
04:00	1	1								1			1								11,66
05:00	1	1								1			1								11,66
06:00	1	1								1		1	1	1	0,25				1	1	191,91
07:00	1	1								1		1	1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			182,79
08:00	1	1								1		1	1	1	0,25						173,41
09:00	1	1							0,1	1			1	1	0,25						23,63
10:00	1	1								1			1	1	0,25				1		39,41
11:00	1	1		1						1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			33,39
12:00	1	1						0,5		1			1	1	0,25						23,81
13:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
14:00	1	1					0,5			1			1	1	0,25				1		40,91
15:00	1	1								1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			32,79
16:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
17:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
18:00	1	1	1							1	1		1	1	0,25				1		40,91
19:00	1	1								1	1		1	1	0,25	0,25	0,25	0,25		1	36,19
20:00	1	1			1	1			0,1	1	1		1	1	0,25						25,62
21:00	1	1				1				1	1		1	1	0,25						24,40
22:00	1	1				1				1	1		1								12,65
23:00	1	1				1				1	1		1								12,65

Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposu gibi elektrikli ekipmanların 24 saat çalıştığı varsayılmıştır.



Şekil 4.2 Yaz sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi

Yaz sezonu enerji tüketim sonuçları incelendiğinde, ilkbahar sezonunda olduğu gibi gece enerji tüketimi oldukça düşüktür.

Sabah saatlerinde 05:00 civarı enerji tüketiminde ani artışlar meydana gelmektedir. Yaz ayları sıcak ve buharlaşma oranı oldukça yüksektir. Bu nedenle tarımsal sulama faaliyetleri hava sıcaklıklarının henüz artmadığı ve buharlaşmanın az olduğu sabahın erken saatlerinde 06:00 – 08:00 saat dilimleri arasında yapılmak üzere dalgıç pompalar devreye alınmıştır.

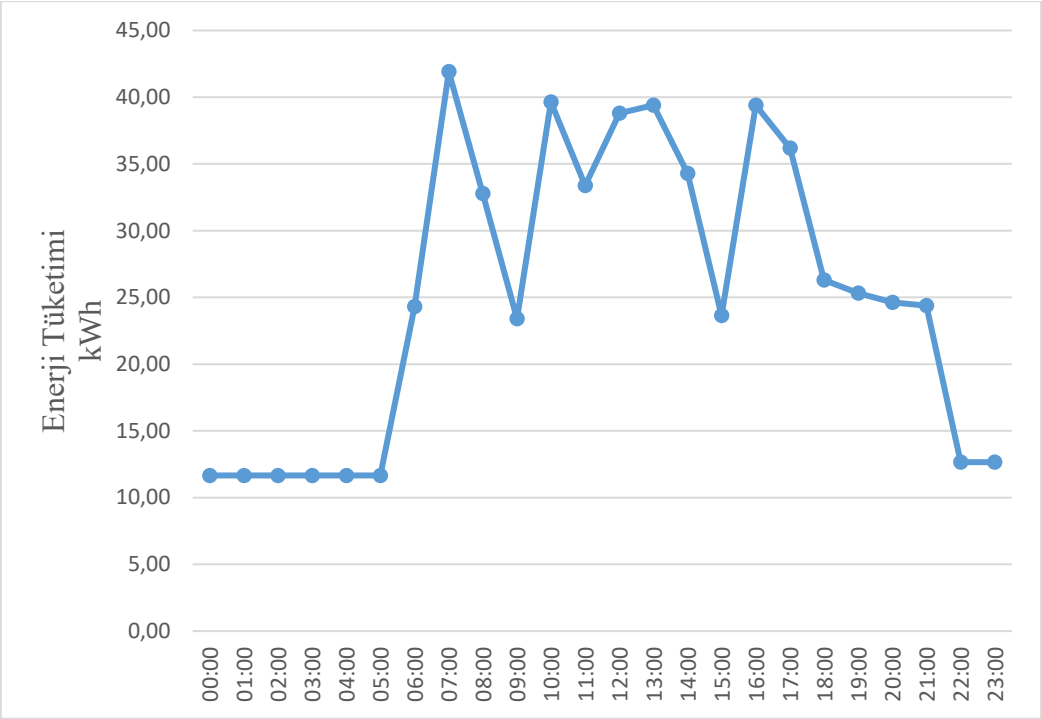
Günün ilerleyen zaman dilimlerinde küçük çaplı sulamalar, evsel kullanım ve tarımsal yardımcı sistemlerin devreye girmesi sebebiyle düşük fakat dalgalı bir tüketim profili izlenmiştir.

Yaz sezonu bir günlük enerji tüketimi profili incelendiğinde yaklaşık olarak 1.034,62 kWh' lik enerji tüketimi yapılmış olup 43,11 kWh/gün enerji tüketilmiştir.

Tablo 4.6 Sonbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri

SONBAHAR SEZONU	Çiftlik Evi											Besi Çiftliği									Toplam (kWh)
	Buzdolabı	Dondurucu	Fırın	Çamaşır Makinası	Bulaşık Makinası	Televizyon	Ütü	Elektrikli Süpürge	Kettle	Ek Tüketim	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Soğuk Hava Deposu	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperator	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	1	1								1			1								11,66
01:00	1	1								1			1								11,66
02:00	1	1								1			1								11,66
03:00	1	1								1			1								11,66
04:00	1	1								1			1								11,66
05:00	1	1								1			1								11,66
06:00	1	1								1	1		1	1	0,25						24,31
07:00	1	1								1			1	1	0,25				1	1	41,91
08:00	1	1								1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			32,79
09:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
10:00	1	1							0,1	1			1	1	0,25				1		39,63
11:00	1	1		1						1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			33,39
12:00	1	1						0,5		1		0,1	1	1	0,25						38,81
13:00	1	1								1			1	1	0,25				1		39,41
14:00	1	1					0,5			1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			34,29
15:00	1	1							0,1	1			1	1	0,25						23,63
16:00	1	1								1			1	1	0,25				1		39,41
17:00	1	1								1	1		1	1	0,25	0,25	0,25	0,25		1	36,19
18:00	1	1	1							1	1		1	1	0,25						26,31
19:00	1	1			1					1	1		1	1	0,25						25,31
20:00	1	1				1			0,1	1	1		1	1	0,25						24,62
21:00	1	1				1				1	1		1	1	0,25						24,40
22:00	1	1				1				1	1		1								12,65
23:00	1	1				1				1	1		1								12,65

Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposu gibi elektrikli ekipmanların 24 saat çalıştığı varsayılmıştır.



Şekil 4.3 Sonbahar sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi

Sonbahar sezonu enerji tüketimi sonuçları incelendiğinde, ilkbahar ve yaz sezonlarına göre daha az enerji tüketimleri ile karşılaşılmıştır.

Günün sabah saatlerinde enerji tüketimleri düşük olup 06:00 – 07:00 saatleri arasında çiftlik ekipmanlarının devreye girmesi ile ani bir artış göstermiştir. Tüketim sonuçlarına bakıldığında dalgalı fakat genel olarak dengeli bir yol izlemiştir.

Akşam saatlerinde ise enerji tüketimleri oldukça düşmüştür.

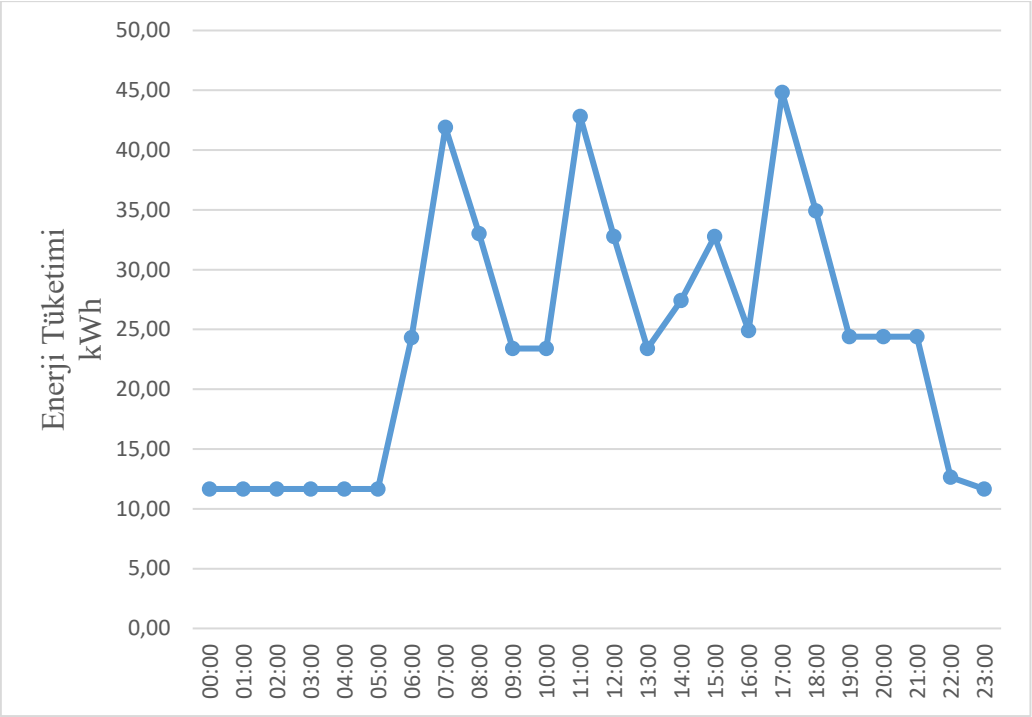
Sonbahar sezonu bir günlük enerji tüketimi profili incelendiğinde toplam 603,04 kWh' lik enerji tüketimi yapılmış olup 25,13 kWh/gün enerji tüketilmiştir.

Sonbahar sezonu enerji profili incelendiğinde, hem su ihtiyacında azalma meydana gelmiştir hem de pompa çalışma süresi de kısalmıştır. Dolayısıyla bu durum toprak neminin korunması ve hava sıcaklıklarının düşmesiyle uyumludur. İlave olarak, ilkbahar ve yaz sezonlarına göre daha dengeli bir enerji tüketimi vardır. Havanın serinlemesiyle sulama sürelerinin kısalması, evsel ve tarımsal kullanımın daha dengeli dağıldığı anlamına da gelmektedir.

Tablo 4.7 Kış sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri

KIŞ SEZONU	Çiftlik Evi											Besi Çiftliği									Toplam (kWh)
	Buzdolabı	Dondurucu	Fırın	Çamaşır Makinası	Bulaşık Makinası	Televizyon	Ütü	Elektrikli Süpürge	Kettle	Ek Tüketim	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Soğuk Hava Deposu	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperator	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	1	1								1			1								11,66
01:00	1	1								1			1								11,66
02:00	1	1								1			1								11,66
03:00	1	1								1			1								11,66
04:00	1	1								1			1								11,66
05:00	1	1								1			1								11,66
06:00	1	1								1	1		1	1	0,25						24,31
07:00	1	1								1			1	1	0,25				1	1	41,91
08:00	1	1							0,1	1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			33,01
09:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
10:00	1	1		1						1			1	1	0,25						23,41
11:00	1	1						0,5		1		0,1	1	1	0,25				0,25		42,81
12:00	1	1								1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			32,79
13:00	1	1								1			1	1	0,25						23,41
14:00	1	1								1			1	1	0,25				0,25		27,41
15:00	1	1								1			1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			32,79
16:00	1	1					0,5			1			1	1	0,25						24,91
17:00	1	1	1							1	1		1	1	0,25				1	1	44,81
18:00	1	1			1				0,1	1	1		1	1	0,25	0,25	0,25	0,25			34,91
19:00	1	1				1				1	1		1	1	0,25						24,40
20:00	1	1				1				1	1		1	1	0,25						24,40
21:00	1	1				1				1	1		1	1	0,25						24,40
22:00	1	1				1				1	1		1								12,65
23:00	1	1								1			1								11,66

Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposu gibi elektrikli ekipmanların 24 saat çalıştığı varsayılmıştır.



Şekil 4.4 Kış sezonu elektrikli ekipmanların saatlik enerji tüketimleri analizi

Kış sezonu enerji tüketim sonuçları incelendiğinde, sonbahar sezonunda olduğu gibi yaz ve ilkbahar sezonlarına oranla daha az enerji tüketimi olmuştur.

Sabah saatlerinde enerji tüketimi düşük olup gün doğumu ile çiftlik faatliyetleri başlamasıyla tüketim de artışlar meydana gelmiştir. Gün içerisinde enerji tüketiminde dalgalanmalar meydana gelmesine rağmen dengeli ve düzenli bir tüketim profili oluşmuştur.

Akşam saatlerinde ise diğer sezonlarda olduğu gibi enerji tüketiminde azalmalar meydana gelmiştir ve 10 kWh seviyelerini görmüştür.

Kış sezonu bir günlük enerji tüketim profili incelendiğinde toplam 577,32 kWh' lik enerji tüketimi ve 24,06 kWh/gün enerji tüketilmiştir.

Yapılan analizler sonucu dört mevsimlik enerji tüketimlerine bakıldığında ilkbahar ve yaz sezonlarında günlük enerji tüketimleri yaklaşık 1.000 kWh mertebelerini aşarken sonbahar ve kış sezonlarında ise yaklaşık 600 kWh mertebelerine ulaşmıştır.



Şekil 4.5 Dört mevsimlik toplam enerji tüketimi analizi

Bir yıllık enerji tüketim sonuçları incelendiğinde çiftlikte yaklaşık olarak 297,3 MWh enerji tüketimi olmuştur. Tüketilen enerjinin büyük bir kısmı, tesiste sabahın erken saatlerinde tarımsal sulama amacıyla kullanılan 2 adet 75 kW gücündeki dalgıç pompalardan; gece saatlerinde ise 11,5 kW gücündeki soğuk hava deposundan kaynaklanmaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, çiftlik evi ve besi çiftliğinde bulunan tüm elektrikli ekipmanların enerji tüketimi, tamamen ulusal elektrik şebekesinden temin edilmektedir. Tesiste yerel bir enerji üretim sistemi bulunmamakta, dolayısıyla tüm elektrikli ekipmanlar doğrudan şebeke bağlantısı üzerinden beslenmektedir.

İlave olarak, pompa sistemlerinin yüksek güçte olması ve uzun süre çalışması nedeniyle demand değerlerini artırması ve bunun da şebeke güç kullanım maliyetine doğrudan yansıdığını gösterir.

Bu durum, tesisin enerji arzı açısından tamamen dış şebekeye bağımlı olduğunu göstermekte olup, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve arz güvenliğinin artırılması amacıyla yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu potansiyel bir iyileştirme alanı olarak ikinci bir aşama olarak değerlendirilecektir.

4.2 Dikey Agrofotovoltaik Sistem Tasarımı ve Yük Profilinin İncelenmesi

Hazırlanan çalışma kapsamında Antalya ili, Manavgat ilçesi, Titreyengöl mevkii sistem kurulumu için seçilmiştir. Kurulum alanının coğrafi koordinatları 36,75° Kuzey enlemi ve 31,79° Doğu boylamı olup, bölge yüksek güneşlenme potansiyeline sahip Akdeniz iklim kuşağı içerisinde yer almaktadır.

Sistem, toplam 60 m x 42 m boyutlarında yaklaşık 2520 m² bir arazi üzerine konumlandırılmıştır. Bölgeye ait mevsimsel güneşlenme süreleri dikkate alınarak dört mevsim için yük profili analiz edilmiştir.

İlkbahar ve yaz sezonlarında ortalama 7 saat/gün,

Sonbahar ve kış sezonlarında ise ortalama 6 saat/gün

efektif güneşlenme süresi esas alınmıştır. Bu veriler doğrultusunda, sistemin kurulu gücü 123 kWp olarak belirlenmiştir.

4.2.1 Agrofotovoltaik Sistem Tasarımı

4.2.1.1 Panel ve Inverter Yapılandırması

Tasarımda çift yüzlü bi-facial olarak bilinen fotovoltaik paneller kullanılmıştır. Bu paneller, hem doğrudan gelen güneş ışınımını hem de zeminden yansıyan difüz ışınımı değerlendirerek enerji üretimini artırma prensibine dayanmaktadır. Böylece, sistemin toplam enerji verimi ve yıllık üretim kapasitesi tek yüzlü sistemlere kıyasla daha yüksek tutulmuştur.

Bi-facial panellerin modellemesinde masa şeffaflık oranı %0,5, arka yüzey yansıması için yapı gölgeleme faktörü %0,1 ve PV dizi uyumsuzluk kayıpları %2 olarak alınmıştır. Bi-faciality oranı ise, çift yüzlü panellerin arka yüzeyinin ön yüzeye göre ne kadar güç üretebildiği gösteren değerdir ve %80 olarak alınmıştır. Zemine yansıyan ışınım için zemin albedosu ise 0,25 olarak alınmıştır.

Sistem tasarımında, 216 adet 570 Wp gücünde monokristal bi-facial PV panel ve 1 adet 125 kW nominal çıkış gücüne sahip inverter kullanılmıştır. Toplam PV kurulu gücü:

$$216 \cdot 570\ \text{Wp} = 123{,}12\ \text{kWp} \tag{4.1}$$

olarak elde edilmiştir.

PV modülleri, 27x2 panel dizilimi esas alınarak 4 ayrı masa üzerinde dikey doğrultuda hizalanmıştır. Bu düzenleme hem mekanik stabiliteyi hem de bakım ve temizlik erişimini kolaylaştırmak üzere optimize edilmiştir.

4.2.1.2 Arazi Düzeni ve Tarımsal Entegrasyon

Kurulum alanında, mevcut tarımsal faaliyetlerin sürekliliğini sağlamak amacıyla agrofotovoltaik yaklaşımı benimsenmiştir. PV masaları arasında yaklaşık 15 metre açıklık bırakılarak tarım makinelerinin manevra ve geçiş alanı korunmuştur. Paneller, yerden 2 metre yükseklikte konumlandırılarak bitki gelişimi için yeterli güneş ışığı geçirgenliği ve hava sirkülasyonu sağlanmıştır. Böylece sistem, hem enerji üretimi hem de tarımsal üretim verimliliği açısından optimum bir tasarım oluşturmuştur.

Sistemde kullanılan PV panel ve invertere ait elektriksel ve mekanik teknik özellikler, Tablo 4.8' de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.8 Tasarımda kullanılan PV panel ve inverter özellikleri

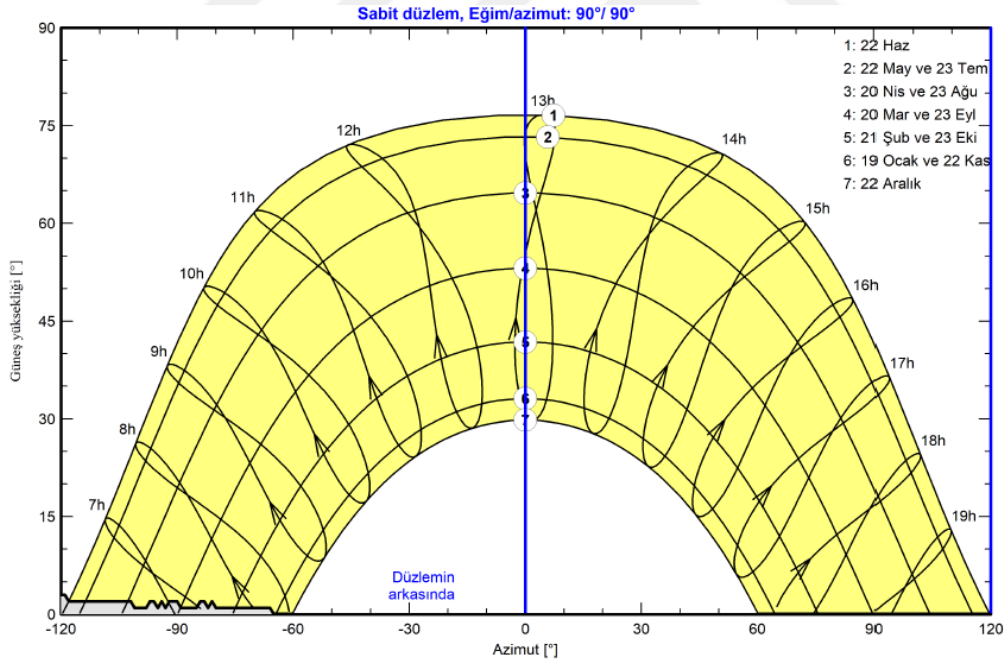
PV PANEL		**INVERTER**	
Trina Solar TSM-NEG19RC-570		**Huawei SUN2000-125KTL-M0**	
Pmax	570 Wp	Vmin MPP	200 V
V_{mpp}	39,2 V	Vmax MPP	1000 V
I_{mpp}	14,79 A	Vmax Array	1100 V
V_oc	47,2 V	Verimlilik (η)	98,80%
I_sc	15,65 A	Şebeke Voltajı	400 V
Verimlilik (η)	21,50%	Şebeke Frekansı	50 Hz
Hücre Tipi	Si-mono	Pnom AC	125 kWac
Boyutlar	2384 × 1134 × 30 mm	Pmax AC	138 kWac

4.2.1.3 Sistem Kayıpları

Fotovoltaik (PV) sistem tasarımında, panel ve inverter güçlerinin belirlenmesinden sonraki temel adım, sistemde meydana gelebilecek enerji kayıplarının hesaplanmasıdır. Bu kayıplar, sistemin toplam enerji üretim verimini doğrudan etkilediğinden, tasarım ve performans analizinde kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda DC devre gerilim düşümü %1,5, AC devre gerilim düşümü ise %0,5 olarak kabul edilmiştir. Modül uyumsuzluk kayıpları %2, yıllık kirlenme kayıpları ise %1 olarak tanımlanmıştır.

4.2.1.4 Ufuk Gölgelenmesi

Fotovoltaik santral sahasında uzak mesafeli engellerden kaynaklanan gölgelenme kayıplarının belirlenmesinde, alanın ufuk çizgisi verileri Pvsyst programı veri tabanından elde edilmiştir. Bu veriler, sistemin güneş ışınımı modellemesinde ufuk gölgelenmesi bileşeninin dikkate alınabilmesi amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 4.6 Ufuk gölgelenmesi

4.2.2 Agrofotovoltaik Sistem Analizi

Sistem tasarımı tamamlandıktan sonra simülasyon çalıştırılarak sistemin üretim, kayıp ve performans çıktıları alınmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre bir yıllık üretilen elektrik enerjisi miktarı 1700,5 MWh' tir. En yüksek ışınım değerlerine ise Haziran ayında 229,6 MWh ile ardından da Temmuz ayında 223,0 MWh ile ulaşılmıştır. En düşük ışınıma ise 59,1 MWh ile aralık ayında ulaşılmıştır.

Yıllık difüzyon oranına bakıldığında ise %40 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu oran havanın açık fakat zaman zaman bulutlu olduğunu göstermektedir. Yaz sezonunda hava sıcaklığının artması sebebiyle atmosferde toz ve nem miktarı yükselir ve difüz oranı diğer sezonlara oranla daha yüksektir. Kış sezonunda ise güneşin düşük açıyla gelmesi ve bulut örtüsünün artması toplam ışınım miktarını azaltır. Dolayısı ile difüz oranı diğer sezonlara oranla daha düşüktür.

Yıllık ortalama sıcaklık değeri 19,33° olup en düşük sıcaklık Ocak ayında 9,73° en yüksek sıcaklık ise 29,69° ile Ağustos ayında yaşanmıştır.

PV modüllerin ürettiği yıllık toplam DC enerjisi 197,94 MWh' tir ve bu değer inverter girişine ulaşan enerji miktarıdır. Inverterden çıkan ve şebekeye ulaşan AC enerji miktarı ise 194,89 MWh' tir. Invertere ulaşan ve şebekeye aktarılan enerji miktarı arasındaki farka bakıldığında 3,05 MWh' tir ve yaklaşık olarak %1,5 kayıp vardır. Bu değerin düşük olması inverter veriminin yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.9 Bilanço ve genel sonuçlar

	GlobHor kWh/m²	**DiffHor kWh/m²**	**T_Amb °C**	**GlobInc kWh/m²**	**GlobEff kWh/m²**	**EArray MWh**	**E_Grid MWh**	**PR oran**	**PRBifi oran**
Ocak	68,4	28,86	9,73	46,2	41,4	8,86	8,73	1,506	0,906
Şubat	82,0	42,09	10,98	49,3	45,0	10,13	9,99	1,616	0,920
Mart	129,3	59,27	13,80	76,4	71,1	15,37	15,14	1,580	0,916
Nisan	161,9	80,81	16,82	94,4	88,7	18,85	18,57	1,569	0,913
Mayıs	208,6	80,79	21,47	117,1	112,1	23,59	23,22	1,581	0,904
Haziran	229,6	73,47	25,88	130,9	124,8	25,55	25,14	1,532	0,889
Temmuz	223,0	75,63	29,54	122,5	116,3	24,75	24,35	1,585	0,878
Ağustos	198,5	75,15	29,69	115,4	110,1	22,11	21,75	1,504	0,878
Eylül	158,3	56,27	25,62	97,1	90,9	18,64	18,34	1,507	0,880
Ekim	108,4	47,69	21,14	71,9	65,9	13,30	13,10	1,453	0,882
Kasım	73,4	34,67	15,37	47,8	43,8	9,23	9,10	1,519	0,903
Aralık	59,1	32,98	11,35	40,5	36,4	7,55	7,45	1,466	0,902
Yıl	**1700,5**	**687,67**	**19,33**	**1009,5**	**946,5**	**197,94**	**194,89**	**1,539**	**0,894**

Kullanılan bi-facial panellerin verimi ise ortalama 0,894'tür. Bu değerde sistemin oldukça verimli çalıştığını ve bi-facial panel kullanımının doğru olduğunu göstermektedir.

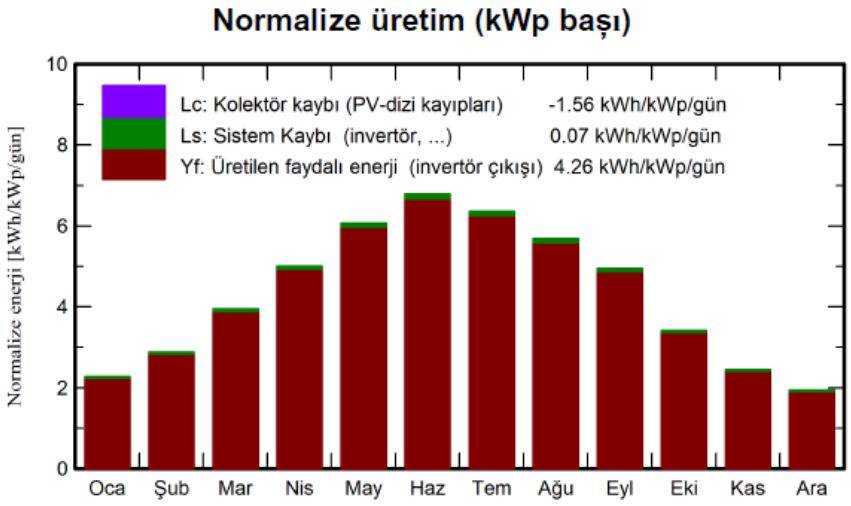
Kurulu güç başına üretilen enerji miktarları, sistem kayıpları ve PV diz kayıplarının ilgili grafikleri Şekil 4.7' de verilmiştir.

Lc kollektör kayıpları, PV dizisinin yani modül yüzeyinin kayıplarını ifade etmektedir. Sıcaklık, ışınım, gölgelenme, yansıma, kirlenme, MPP uyumsuzluk kayıpları ve omik vb. kayıpları göstermektedir. Analiz sonucuna göre bu değer -1,56 kWh/kWp olarak bulunmuştur. Toplam kayıpların çoğunluğunu kollektör kayıpları oluşturmaktadır.

Ls sistem kayıpları, inverter ve sistem kayıplarını göstermektedir. Inverter verimsizliği, transformatör kayıpları, kablo kayıpları vb. Analiz sonucunda ise bu değer 0,07 kWh/kWp bulunmuştur. Sistem kayıplarının düşük olması inverter veriminin yüksek olduğunu göstermektedir.

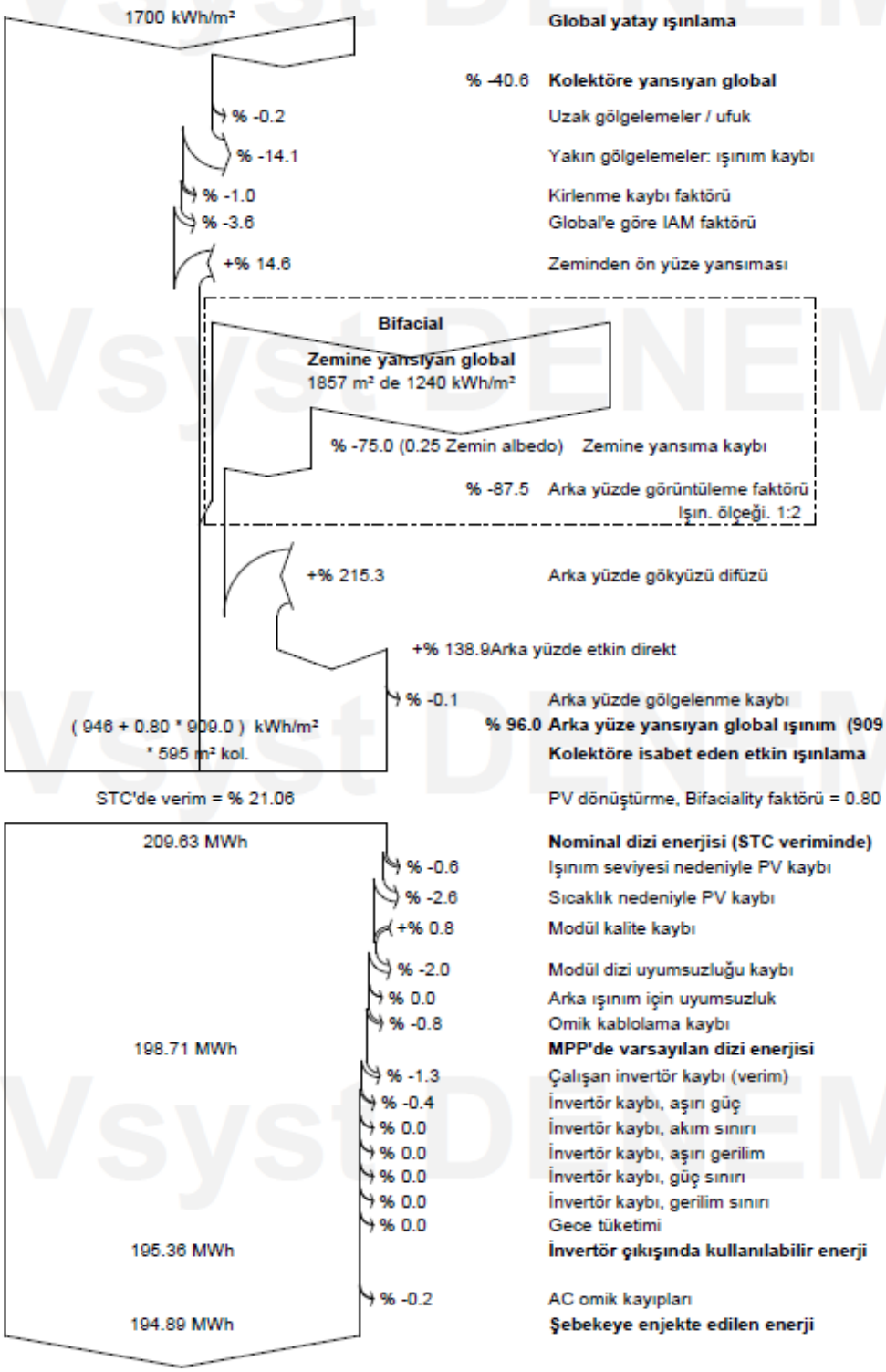
Yf üretilen faydalı enerji ise inverter çıkışından alınan şebekeye iletilen net enerjiyi ifade etmektedir ve 4,26 kWh/kWp olarak bulunmuştur.

Bir yıllık özgül enerji özgül üretime bakıldığında yaklaşık olarak 1555 kWh/kWp/yıl' dır ve bu değer bölgenin güneşlenme süresinin yüksek olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.7 Santralin normalize üretim değerleri

Sistem kayıplarının detaylı olarak görüldüğü kayıplar diyagramı Şekil 4.8'de verilmiştir. Diyagram sistem ışınımdan şebekeye aktarılan enerjiye kadar tüm enerji dönüşümlerini göstermektedir.



Şekil 4.8 Kayıplar diyagramı

Sistemin kurulu olduğu konumda yıl boyunca yatay yüzeye düşen toplam güneş ışınımıdır miktarı 1700 kWh/m^2'dir ve bu değer güneşlenme potansiyelinin ham değeridir. Bu ham enerji değeri, atmosfer, geometrik konum, horizon/gölgeler ve yönelim nedeniyle kolektöre ulaşan efektif ışınıma indirgenir.

Paneller 90° azimut ve 90° eğim ile yerleştirilmiştir. Ufuk çizgisi ya da etrafta bulunan ağaç, bina vb. engellerin etkisi -%0,2, diziler arası gölgeleme ve paneller arasındaki mesafenin etkisi -%14,1, toz, polen ya da yağmur kalıntıları gibi kirlenme etkisi -%1, yansıma ve ışığın cam yüzeyden geçerken kaybettiği enerjinin etkisi -%3,6' dır. Sistem çift yüzlü bi-facial olduğu için zeminden gelen yansımanın yüzeye katkısı %14,6'dır. Sonuç olarak yaklaşık %40,6 oranında bir kayıpla kollektör yüzeyine yansıyan ışınımı miktarı 909 kWh/m^2'dir.

Arka yüzeye gelen global ışınım miktarı 909 kWh/m^2'dir. Ön yüz katkısı 1115 kWh/m^2 ve arka yüz katkısı sonucunda toplam efektif ışınım 1670 kWh/m^2'dir. Bu değer bi-facial olmayan sistemlere göre %10-%12 daha fazla enerji topladığını göstermektedir.

PV dönüşüm ve modül verimliliği incelendiğinde STC verimi %21,06'dır. Yani panellerin 1000 W/m^2 ışınımda yaklaşık 210 W/m^2 elektrik üretebileceği anlamına gelmektedir. Bi-faciality faktörü ise %80 alınmıştır. Nominal dizi enerji modül üreticilerinin STC koşullarına göre hesaplanmış maksimum üretimidir ve 209,63 MWh enerjidir.

Modül düzeyindeki kayıplar incelendiğinde, ortalama ışınım seviye kaybı -%0,6, modül sıcaklık kaybı -%2,6, üretici toleransıyla ya da ölçüm düzeltmesiyle pozitif etkili kalite kaybı %0,8, paneller arasındaki güç farkı -%2, arka yüz geometrisi iyi optimize edilmiştir ve %0' dır. DC kabloların direnç kayıpları ise -%0,8' dir. Sonuç olarak modül düzeyindeki kayıplarda %2,5' lik total kayıpla 198,71 MWh enerji üretilmiştir.

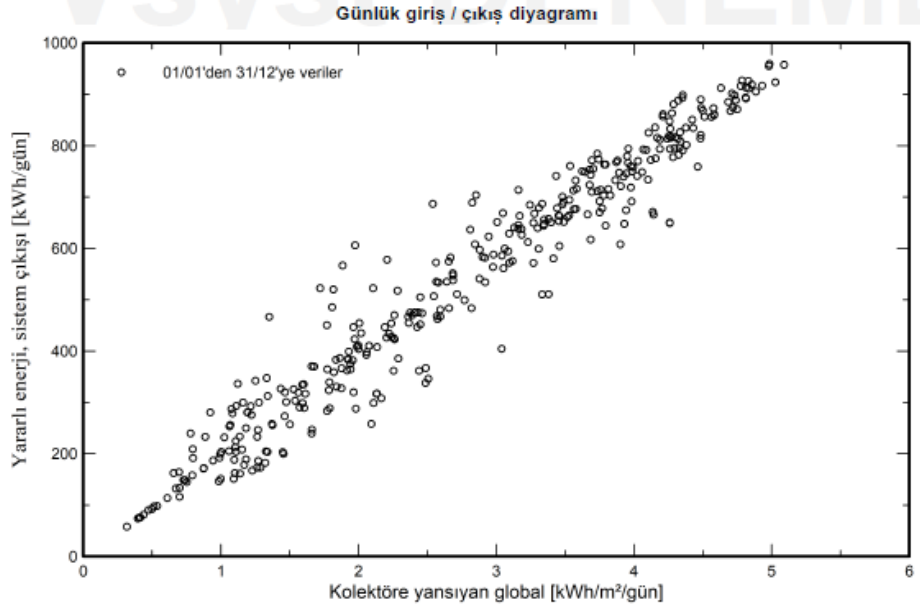
Inverter kayıpları incelendiğinde ise, verim kaybı -%1,3' tür ve bu kayıp dönüştürme esnasındaki tipik kayıplardır. Aşırı güç sınırlaması -%0,4' tür. Bu kayıplar incelendiğinde yaklaşık %2,5 civarında bir kayıp vardır ve 195,36 MWh' lik enerji üretilmiştir.

Şebekeye aktarılan enerji miktarına bakıldığında AC kablolarda, tranformatörde ya da kablolarda meydana gelen AC direnç kaybı -%0,2' tür ve 194,89 MWh enerji şebekeye aktarılabilmektedir.

Sonuç olarak bakıldığında, sahanın düşen toplam güneş enerjisinden başlayıp kolektör yüzeyine ulaşan efektif ışınımı, bi-facial panellerin arka yüz katkılarını (albedo, görüntüleme faktörü, arka gölgeleme vb.), STC verimiyle nominal dizi enerjisini, ardından dizi seviyesindeki (sıcaklık, uyumsuzluk, DC kablo vb.) ve inverter/AC seviyesindeki kayıpları adım adım uygulanarak nihai olarak 194,89 MWh şebekeye verilen yıllık enerjiye ulaşılmıştır.

Şekil 4.9' da verilen günlük giriş/çıkış diyagramında yılın her günü için sistemin ışınım ve elektrik üretimi arasındaki ilişkiyi vermektedir.

Diyagram incelendiğinde noktalar doğrusal bir çizgi boyunca dizilmiştir yani ışınım miktarı arttıkça elektrik üretimi de doğrusal bir şekilde artmaktadır. Grafik, sistemin verimli çalıştığını göstermektedir.

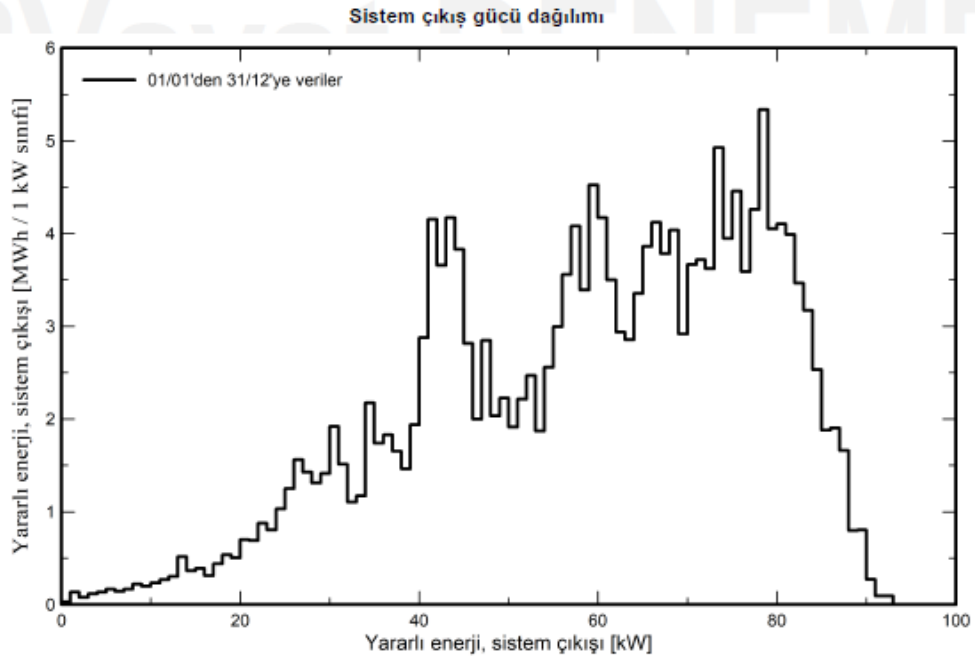


Şekil 4.9 Sistemin günlük giriş/çıkış diyagramı

Mevsimsel analiz yapıldığında, yaz sezonunda veri noktalarının grafiğin üst bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu yoğunlaşma, bu sezonda güneş ışınımının günlük ortalama değerlerinin yüksek olduğunu (yaklaşık 4–5 kWh/m²/gün) ve buna paralel olarak sistemin günlük enerji üretiminin de maksimum seviyelere (yaklaşık 800–1000 kWh/gün) ulaştığını göstermektedir. Bu durum, uzun gün süreleri, yüksek güneşlenme açıları ve düşük atmosferik zayıflama koşullarının PV sistem performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Buna karşılık, kış sezonunda veri noktalarının grafiğin alt kısmında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum ise bu sezonda küresel yatay ışınımın azalması (yaklaşık 1–2 kWh/m²/gün), gün uzunluğunun kısalması, güneşin düşme açısının küçülmesi ve artan bulutluluk oranı gibi etkenler sonucunda PV panellere ulaşan etkin ışınım miktarının azaldığını göstermektedir. Bu da sistemin günlük enerji üretiminde düşüşe (yaklaşık 100–300 kWh/gün aralığına) neden olmaktadır.

Noktaların çok dağınık olmaması PV panel ve inverter sisteminin verimliliğinin yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Bazı noktaların eğrinin altında kalması ise geçici gölgelenme, modüllerin sıcaklık artışı ya da bakım öncesi kirlenme etkisinden kaynaklanabilir.



Şekil 4.10 Sistemin çıkış gücü diyagramı

Şekil 4.10’ da verilen diyagram sistemin güç profilini oluşturmaktadır. Grafik yıl boyunca sistemin hangi güç aralıklarında ne kadar süre çalıştığını göstermektedir.

Sistemin güç çıkışı 0-100 kWp aralığında değişmektedir. Bu sistemin kurulu güç değerini ifade etmektedir. Grafiğin tepe noktalarına bakıldığında ise 60-90 kW civarındadır ve bu değer sistemin en çok bu güç aralığında çalıştığını göstermektedir. 90 kW itibariyle ani düşüşler başlamıştır.

4.3 Hidro Depolama Yük Profilinin İncelenmesi

Antalya iline bağlı Manavgat ilçesi sınırları içerisinde planlanan bir pompaj depolamalı hidroelektrik santrali sisteminin üst rezervuarında gerçekleştirilen hidrometrik ölçümler ve hidrolik modellemeler sonucunda, ortalama debi değeri 2000 m^3/s olarak belirlenmiştir. Rezervuarın hidrolojik karakteristiği, mevsimsel yağış ve eriyen kar sularından kaynaklanan değişkenler de göz önüne alınarak, akım rejimine ait kritik minimum debi ve maksimum debi değerleri belirlenmiştir.

Minimum debi, santralin çalışması için gerekli olan veya rezervuarda gözlemlenen en düşük akımı temsil etmektedir. Yaz sonu ve kış ortası gibi kurak dönemler veya minimum çevresel akış gerekliliği dikkate alınarak belirlenmiş olup minimum debi değeri 1000 m^3/s' dir.

Maksimum debi ise ilkbahar taşkınları veya yoğun yağış dönemlerinde gözlemlenebilecek en yüksek akım miktarını temsil etmektedir. Santral tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Maksimum debi değeri 3500 m^3/s alınmıştır.

Sistem yapısı incelendiğinde, hidro-depolama ünitesi üst rezervuarında biriken suyun tarımsal sulama amacıyla kullanılabilmesi için her biri 75 kW nominal güce sahip iki adet dalgıç pompanın paralel çalışma prensibiyle devreye alınması planlanmıştır. Bu pompalar, üç üretim sezonu boyunca (ilkbahar, yaz ve sonbahar) belirlenen sulama periyotlarına uygun olarak işletilecektir.

İlkbahar döneminde bölgesel ortalama sıcaklık değerleri ılıman düzeyde olup, potansiyel buharlaşma oranı düşük olmaktadır. Toprak nem dengesinin korunması ve kök bölgesinde su fazlalığına bağlı oksijen yetersizliğini önlenmesi amacıyla, sulama uygulaması günde iki kez yapılacaktır. Operasyonel zamanlama, güneş ışınımının optimum olduğu saat 10:00 civarında olacak şekilde ve ikinci sulama ise 17:00' da olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede hem bitki tarafından suyun etkin kullanımı artırılacak hem de sabah erken saatlerde düşük sıcaklık nedeniyle oluşabilecek yoğuşma ve mantar riski minimize edilmiştir.

Yaz döneminde bölgedeki hava sıcaklıkları yüksek seviyededir. Bu dönemde bitkilerin su tüketimi artmakta ve toprak nem kaybı hızlanmaktadır. Bu nedenle sistem, günde iki periyotlu sulama stratejisiyle çalıştırılacaktır. Birinci sulama sabah saat 09:00' da, ikinci sulama ise akşam saat 16:00' da olması planlanmıştır. Seçilen zaman aralıkları, günün en sıcak saatlerinden kaçınarak buharlaşma kayıplarını azaltmaktadır ve bitki su stresi ile ısı şokunu önlemektedir.

Bu zaman aralıkları, günün en sıcak saatlerinden (11:00–15:00) kaçınarak buharlaşma kayıplarını azaltmakta ve bitki su stresi ile ısı şokunu önlemektedir.

Sonbahar döneminde bölgesel sıcaklık değerleri kademeli olarak azalmaya başlamakta ve buna bağlı olarak buharlaşma oranlarında düşüş meydana gelmektedir. Bu koşullar altında, bitki kök bölgesinde optimum nem dengesinin korunması ve aşırı sulamaya bağlı toprak havalanma kapasitesinin azalmasının önlenmesi amacıyla sulama sıklığı düşürülerek günde 1 kez, sabah saat 11:00'de sulama yapılması planlanmıştır. Sulamanın bu saat diliminde gerçekleştirilmesiyle, sabah erken saatlerdeki düşük sıcaklık ve nem yoğunluğu nedeniyle oluşabilecek yüzey ıslanma süresi uzaması engellenmekte, aynı zamanda toprak sıcaklığının optimum seviyeye ulaşmasıyla kök bölgesine su sızdırılması artırılmaktadır. Ayrıca, bu periyot bitki kök sisteminin oksijen alışverişini destekleyerek fizyolojik faaliyetlerin sürdürülebilirliğine de katkı sağlamaktadır. Bu nedenle sonbahar dönemi sulama stratejisi, minimum su girişi – maksimum kök sağlığı prensibine göre optimize edilmiştir.

Tablo 4.10 Hidro depolama sistemi mevsimsel günlük enerji tüketimleri

	İlkbahar Sezonu	**Yaz Sezonu**	**Sonbahar Sezonu**	**Kış Sezonu**
00:00				
01:00				
02:00				
03:00				
04:00				
05:00		0,15		
06:00	0,15			
07:00			0,15	0,15
08:00				
09:00		1		
10:00	1			
11:00			0,5	
12:00				
13:00				
14:00				
15:00				
16:00		1		
17:00	1		0,15	0,15
18:00	0,15	0,15		
19:00				
20:00				
21:00				
22:00				
23:00				
	345,00 kWh	345,00 kWh	120,00 kWh	45,00 kWh

İlave olarak, ilkbahar, yaz ve sonbahar sezonlarında tesis bünyesinde hayvancılık işletmesinin bulunması sebebiyle, hidro-depolamadan temin edilen su tarımsal faaliyetler haricinde çiftlik hayvanlarının içme suyu ihtiyacının karşılanması ve ahır ile çevre alanların temizlik faaliyetlerinin yürütülmesi amacıyla işletilecektir. Belirtilen sezonlarda günde iki kez olmak üzere sabah ve akşam vakitlerinde işletilecektir.

Kış döneminde gün ışığı süresinin kısalması ve ortalama sıcaklıkların düşmesiyle birlikte bitkilerin fotosentetik aktivitesi ve metabolik enerji üretimi büyük oranda yavaşlamaktadır hatta durabilmektedir. Bu koşullar, bitkilerin büyüme döngüsü hızını azaltmakta ve çoğu türün dormansi dönemine girmesine neden olmaktadır. Dolayısı ile bu dönemde bitkilerin su tüketimi minimum seviyededir. Topraktaki doğal yağışlar çoğunlukla bitkinin su ihtiyacını karşılamakta, bu nedenle aktif sulama yapılması hidrolik ve fizyolojik açıdan gereksiz hale gelmektedir.

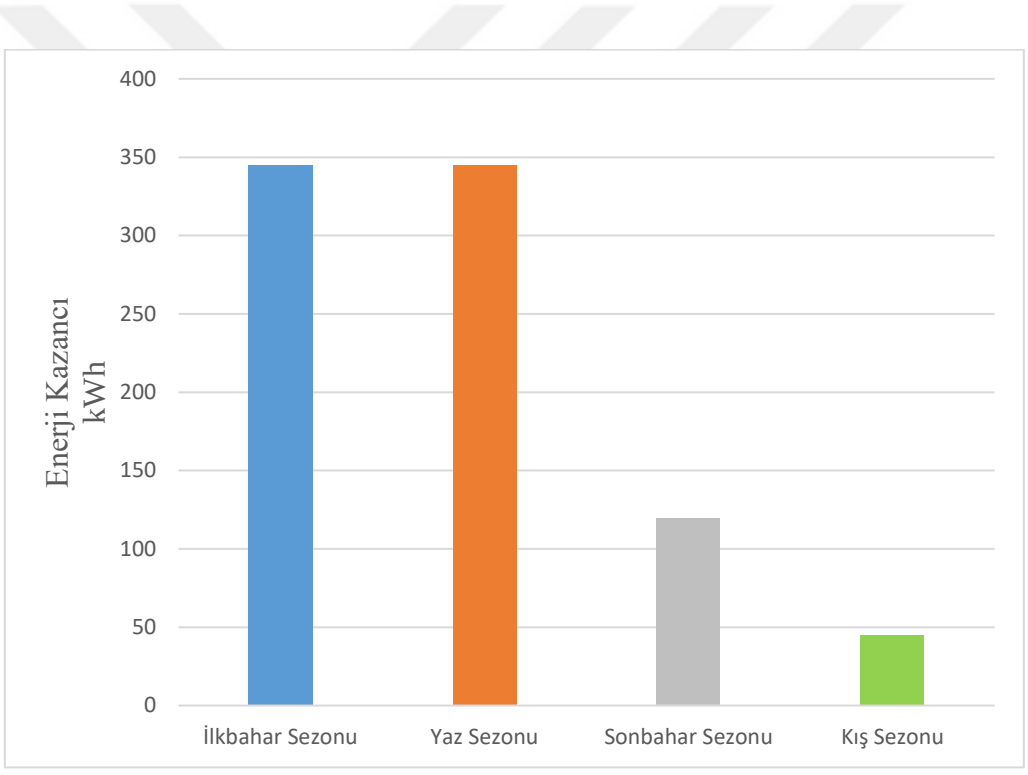
Ek olarak, düşük sıcaklıklarda yapılan sulama, kök bölgesinde donma riski oluşturmaktadır ve bu durum kök dokularında buz kristali oluşumu ve hücre zarında mekanik hasar gibi olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Bu nedenlerle, kış sezonunda sulama sistemi devre dışı bırakılmaktadır.

Kış döneminde, hidro-depolama sisteminden temin edilen suyun kış döneminde tarımsal sulama dışı kullanım amaçlarına yönlendirilerek sistem, içme suyu ihtiyacının karşılanması ve çevre alanların temizlik faaliyetlerinin yürütülmesi amacıyla işletilecektir. Hazırlanan sistem mevcut dalgıç pompa hattı üzerinden sağlanacak olup, su temini işlemleri günde iki kez olmak üzere sabah 07:00’ da gün başlangıcında hayvan sulama ve sabah temizlik periyodunda, akşam ise 17:00’ da besleme öncesi içme suyu ve çevre alan temizliğinde kullanılacaktır.

Belirlenen zaman aralıkları, hem hayvanların günlük su tüketimine hem de tesis içi operasyonel çalışma planına uygun olacak şekilde optimize edilmiştir. Sistem bu çalışma modunda işletilerek pompalar düşük debili ve kısa süreli çevrimler halinde devreye girecektir. Böylece enerji verimliliği sağlanacak ve ekipmanların donma ve aşırı yüklenme riski minimize edilecektir.

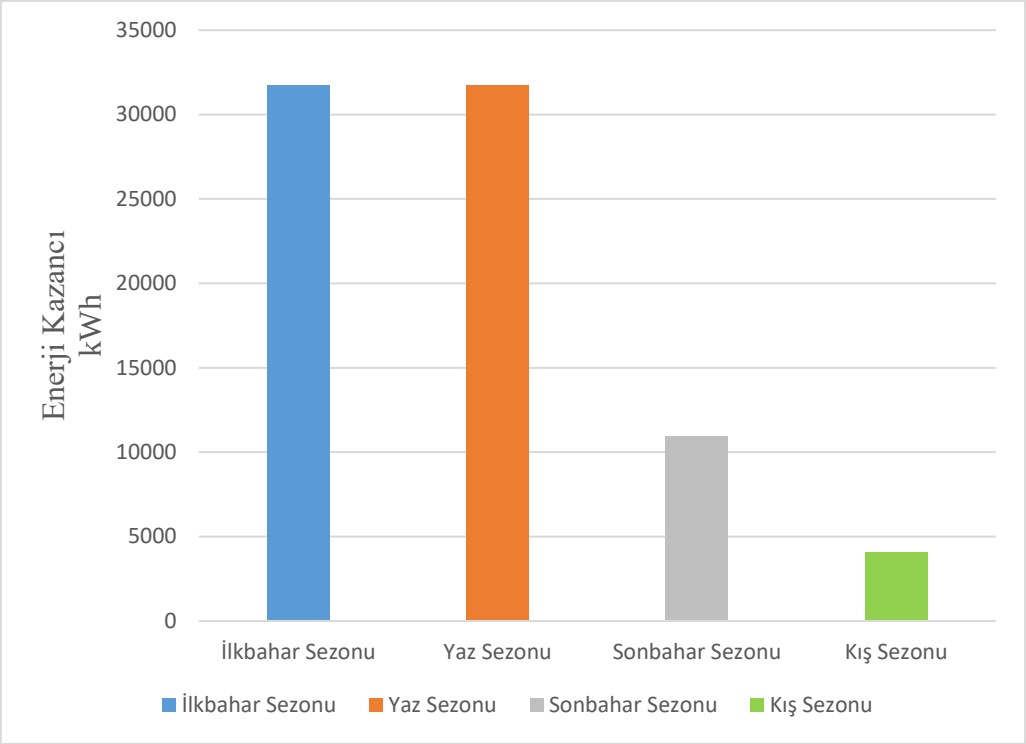
Kullanılan her iki pompa, belirlenen mevsimlik dönemler boyunca dönüşümlü ve paralel modda devreye girerek sistemdeki gerekli debi değerlerini karşılayacak şekilde işletilmiştir.

Pompaj depolamalı hidroelektrik sisteminde üst rezervuarda bulunan suyun, tarımsal sulama amacıyla yeniden kullanımında görev alan pompaların enerji tüketim değerleri, mevsimsel (ilkbahar, yaz ve sonbahar) işletme koşulları dikkate alınarak analiz edilmiştir. Her bir pompanın sezona özgü çalışma süresi, debi gereksinimi ve sistem basınç kayıpları göz önüne alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, pompa gruplarının sezonluk toplam enerji tüketim kazançları aşağıda detaylandırılmıştır.



Şekil 4.11 Mevsimsel günlük enerji tüketim kazançları

Yapılan detaylı analizler sonucunda yıllık enerji tüketim kazançları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.12 Mevsimsel yıllık enerji tüketim kazançları

4.4 Sistemsel Analiz

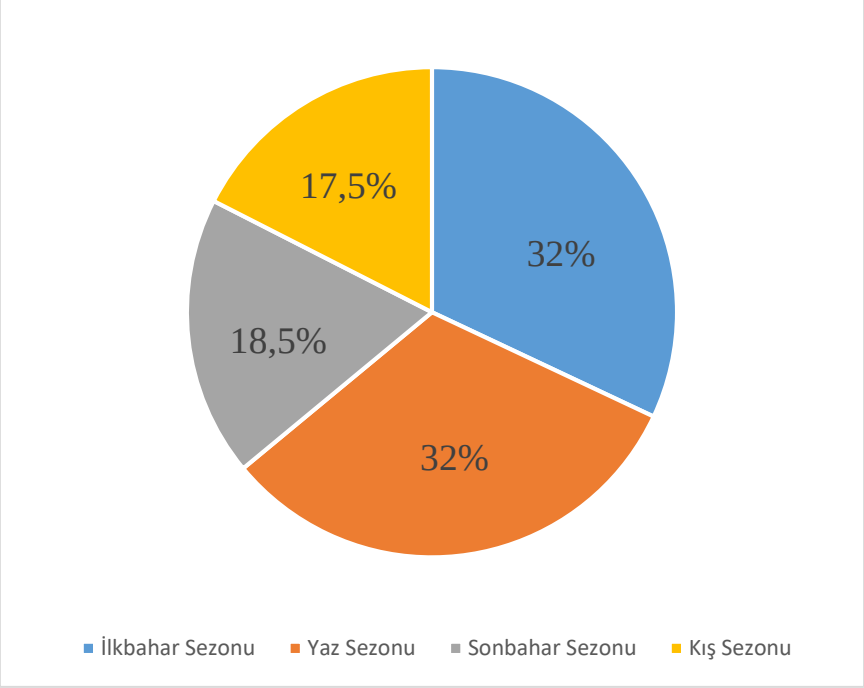
Bu çalışma kapsamında, tesisin enerji performansının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla üç farklı sistem senaryosu analiz edilmiştir. İlk senaryoda yalnızda tesisin ihtiyacı olan elektriksel tüketimleri dikkate alınmıştır. İkinci senaryoda ise yalnızca agrofotovoltaik sistemin kurulumu dikkate alınırken, üçüncü senaryoda hidro depolama sisteminin entegrasyonu ile desteklenen agrofotovoltaik sistemi ele alınmıştır. Her üç durumda da sistemin enerji üretim potansiyeli, tüketim profili, şebekeye olan enerji bağımlılığı, agrofotovoltaik sistemde üretilen enerji ve enerji dengeleme kapasitesi teknik olarak incelenmiştir.

Analiz sürecinde, hidro depolama sisteminin entegre edilmesinin enerji sürekliliği, yük yönetimi ve şebeke etkileşimi üzerindeki etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

4.4.1 Mevcut Sistemin Enerji Dengesi Etkisinin İncelenmesi

Tesisin elektrik enerjisi tüketim profili, detaylı veri analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve elde edilen bulgular mevsimsel değişkenlikler dikkate alınarak kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, tesisin saatlik bazda günlük olarak enerji talep profilleri belirlenmiş; tüketim eğilimleri, mevsimsel sıcaklık değişimleri, tarımsal faaliyet yoğunluğu ve ekipman kullanım süreleri dikkate alınarak analiz yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tesisin elektrik enerjisi ihtiyacının tamamının ulusal elektrik şebekesinden karşılandığı tespit edilmiştir.

Mevsimsel tüketim dağılımına ilişkin veriler, aşağıdaki analizde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu analiz, farklı dönemlerdeki enerji talep değişimlerini ve tesisin şebeke bağımlılığını sayısal olarak ortaya koymaktadır.



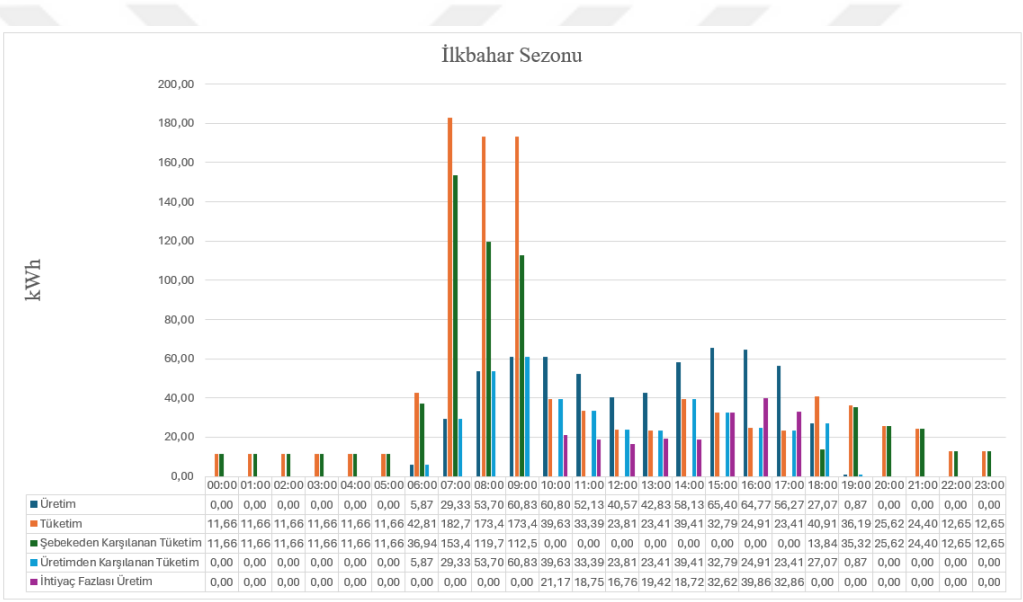
Şekil 4.13 Mevcut sistemin yıllık enerji tüketim analizi

4.4.2 Agrofotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Fotovoltaik sistemin varlığıyla birlikte hem şebeke hem de PV kaynaklı enerji kullanımı mevsimsel olarak analiz edilmiştir.

4.4.2.1 İlkbahar Sezonu Analizi

İlkbahar sezonuna ait veriler incelendiğinde, agrofotovoltaik sistemin enerji üretimi 06:00 itibari ile başlamış olup 19:00 itibariyle sonlanmıştır. Bu dönemde güneşlenme süresinin ve ışıma miktarının artmasıyla PV sistemin üretimi belirgin bir şekilde yükselmiştir.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,87	29,33	53,70	60,83	60,80	52,13	40,57	42,83	58,13	65,40	64,77	56,27	27,07	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	42,81	182,7	173,4	173,4	39,63	33,39	23,81	23,41	39,41	32,79	24,91	23,41	40,91	36,19	25,62	24,40	12,65	12,65
Şebekeden Karşılanan Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	36,94	153,4	119,7	112,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,84	35,32	25,62	24,40	12,65	12,65
Üretimden Karşılanan Tüketim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,87	29,33	53,70	60,83	39,63	33,39	23,81	23,41	39,41	32,79	24,91	23,41	27,07	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,17	18,75	16,76	19,42	18,72	32,62	39,86	32,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Şekil 4.14 İlkbahar sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri

00:00 – 05:00 saatleri arasında güneş ışınımı bulunmadığı için sistemde enerji üretimi gerçekleşmemektedir. Tesisin enerji ihtiyacı tamamen şebekeden karşılanmakta olup öz tüketim oranı sıfırdır.

06:00 – 08:00 saatleri arasında güneş ışınımının artmasıyla PV üretimi devreye girmektedir ve ani artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca bu saat aralıklarında tesisin enerji talebi çok yüksek olduğu için üretim tüketimi karşılamakta zorlanmaktadır ve enerji gereksinimi kısmen şebekeden karşılanmaktadır.

09:00 – 17:00 saat aralıklarında PV sistemin en yüksek üretim kapasitesine ulaştığı ve sistem verimliliğinin maksimum olduğu periyottur. Üretim değerleri 40-70 kWh bandında seyretmektedir. Bu aralıkta sistem üretimi, tesisin anlık tüketimini büyük oranda karşılamıştır ve bazı saatlerde ihtiyaç fazlası üretim oluşmuştur. Ayrıca bu zaman aralığında öz tüketim oranı en yüksek ve şebeke bağımlılığı en düşük seviyededir.

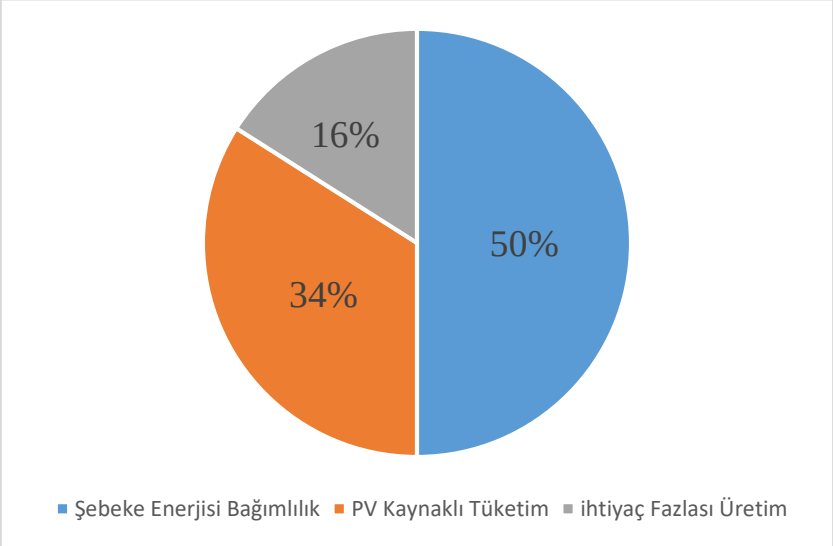
17:00 – 19:00 saat aralığında güneş ışınımının azalmasıyla PV üretim kademeli olarak düşmektedir ve sistem kademeli olarak şebekeye bağımlı hale gelmiştir.

20:00 – 23:00 saat aralığında PV üretimi tamamen sıfırdır ve dolayısıyla tesisin enerji ihtiyacı yeniden şebekeden sağlanmaktadır.

İlave olarak, ilkbahar sezonunda modül sıcaklıklarının optimum aralıkta olması nedeniyle PV panellerin verimi oldukça yüksektir. Yaz dönemindeki aşırı ısınma kaynaklı verim kayıpları bu dönemde gözlenmemektedir. Bu da üretim eğrisini daha stabil hale getirmektedir.

Sonuç olarak, ilkbahar sezonunda güneşlenme süresinin uzaması, ışınım şiddetinin artması ve modül sıcaklıklarının optimum seviyede olması sonucu PV sistem üretim verimi yüksektir. Gün ortasında üretim ve tüketim dengesi büyük ölçüde sağlanmış olup sistem ihtiyaç fazlası enerji üretmiştir.

İlkbahar sezonuna ait enerji üretim ve tüketim dağılımı detayı aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.



Şekil 4.15 İlkbahar sezonu enerji üretim-tüketim dengesi analizi

Grafikte en yüksek oranı oluşturan dilim, tesisin enerji ihtiyacının yarısının şebekeden çekildiğini göstermektedir ve sistem kısmi olarak şebekeye bağımlıdır.

%34'lük oran ise PV sistemin öz tüketim oranını temsil etmektedir ve üretilen enerjinin doğrudan tesisin tüketimini karşılamak için kullanıldığı bölümü ifade etmektedir.

%16'lık oran sistemin anlık tüketim ihtiyacının üzerinde üretim yaptığı saatleri temsil eder. Yani PV üretimi, tüketim talebini aştığında fazla enerji oluşmakta ve bu enerji şebekeye geri beslenmekte ya da depolanabilir potansiyel enerji olarak değerlendirilebilir. Bu sistemin potansiyel enerji depolama ve şebekeye satış fırsatlarına sahip olunarak pozitif yönde kazanç sağlamaktadır.

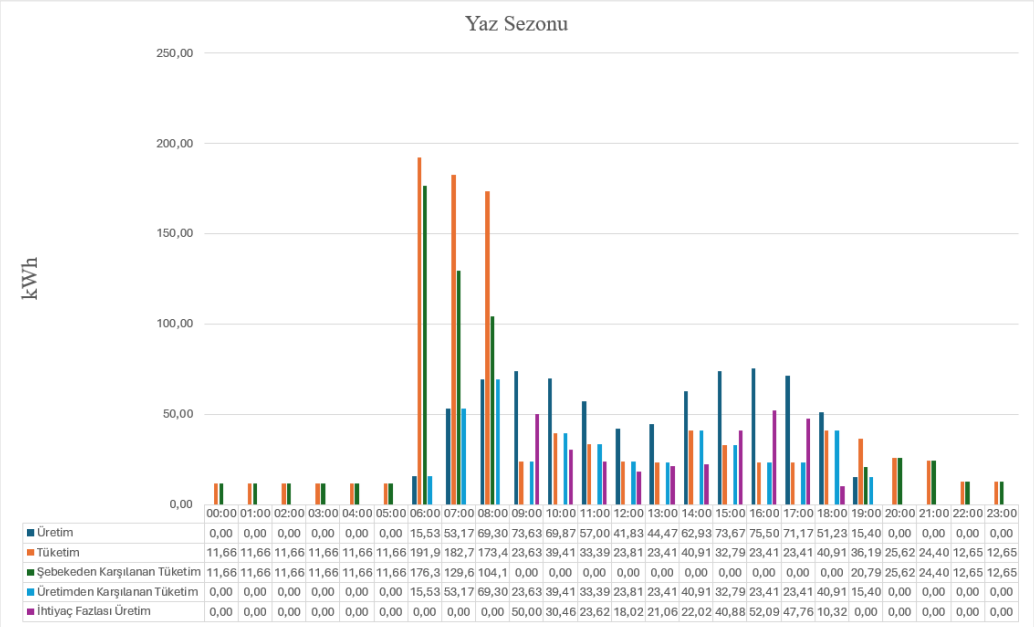
4.4.2.2 Yaz Sezonu Analizi

Yaz sezonuna ait veriler incelendiğinde, agrofotovoltaik sistemin enerji üretimi saat 06:00'da başlamış ve akşam 19:00 itibarıyla sonlanmıştır. Gün ortasında, özellikle 09:00–17:00 saatleri arasında, sistemin maksimum ışınım koşullarında en yüksek üretim değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

06:00–08:00 saatleri arasında, tesisin enerji talebi yüksek seviyededir. Bu zaman aralığında PV üretimi henüz yeterli düzeye ulaşmadığından, enerji ihtiyacı büyük oranda şebeke üzerinden karşılanmıştır. Bu durum, sabah erken saatlerdeki yüksek yük profiline (örneğin pompa ve yardımcı sistemlerin devreye girmesi) bağlıdır.

09:00–17:00 saatleri arasında, PV sistemin ürettiği enerji, tesis tüketimini büyük ölçüde karşılamakta ve hatta belirli zaman dilimlerinde ihtiyaç fazlası üretim meydana gelmektedir. Bu fazla üretim, şebekeye geri besleme ya da enerji depolama sistemleri aracılığıyla değerlendirilebilir.

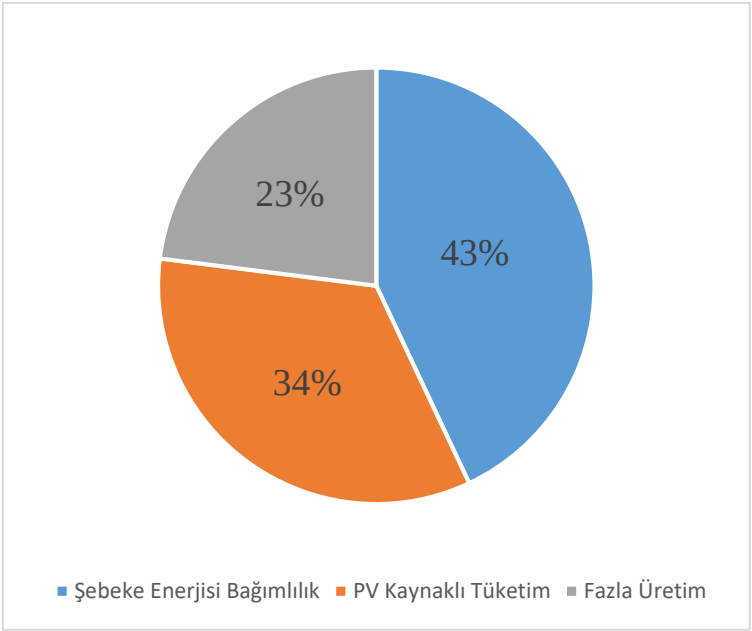
Güneş ışınımının azalmasıyla birlikte 18:00 sonrasında, PV üretimi durmakta, dolayısıyla tesisin enerji gereksinimi yeniden şebeke tarafından karşılanmaktadır.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,53	53,17	69,30	73,63	69,87	57,00	41,83	44,47	62,93	73,67	75,50	71,17	51,23	15,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	191,9	182,7	173,4	23,63	39,41	33,39	23,81	23,41	40,91	32,79	23,41	23,41	40,91	36,19	25,62	24,40	12,65	12,65
Şebekeden Karşılanan Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	176,3	129,6	104,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,79	25,62	24,40	12,65	12,65
Üretimden Karşılanan Tüketim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,53	53,17	69,30	23,63	39,41	33,39	23,81	23,41	40,91	32,79	23,41	23,41	40,91	15,40	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	30,46	23,62	18,02	21,06	22,02	40,88	52,09	47,76	10,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Şekil 4.16 Yaz sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri

Sonuç olarak, PV sistemin yaz dönemindeki performansı gün ortasında yüksek verimlilik göstermektedir. Ancak sabah erken ve akşam saatlerinde ışınım yetersizliği nedeniyle sistemin üretimi düşmekte ve şebeke bağımlılığı devam etmektedir. Bu nedenle, ihtiyaç fazlası üretimin yoğun olduğu saatlerde enerji depolama sistemlerinin devreye alınması, sistemin öz tüketim oranını artıracak ve şebekeden çekilen enerji miktarını azaltacaktır.



Şekil 4.17 Yaz sezonu enerji üretim-tüketim dengesi analizi

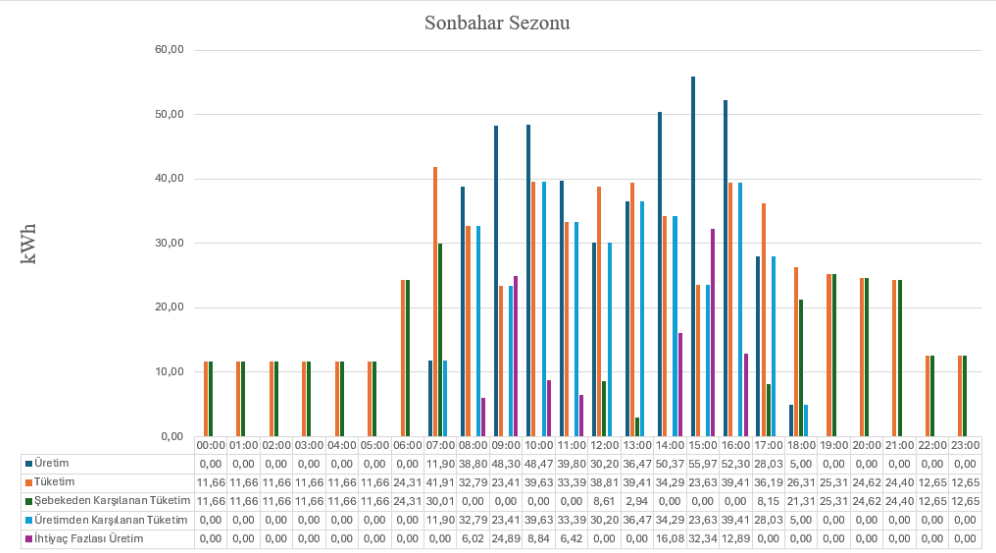
Yaz sezonuna ait enerji ve tüketim dağılım detayı grafiğinde en yüksek dilimi şebekeye bağımlılık oluşturmaktadır ve bu oranda ilkbahar sezonuna oranla düşme meydana gelmiştir. Tesis %43'lük bir oranla enerji ihtiyacını şebekeden temin etmektedir ve şebekeye bağımlılık devam etmektedir.

%34'lük oran ise PV sistem tarafından üretilen enerjinin tesisin elektriksel ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanıldığı kısımdır.

%23'lük oran ise sistemin ihtiyacından fazla enerji ürettiğini göstermektedir ve bu oran ilkbahar sezonuna göre artış göstermiştir.

4.4.2.3 Sonbahar Sezonu Analizi

Sonbahar sezonuna ait veriler incelendiğinde, agrofotovoltaik sistemin enerji üretimi saat 07:00'da başlamış olup 18:00 itibariyle sonlanmıştır. Güneş ışınımının azalması ve gün uzunluğunun kısalması sebebiyle üretim süresi ilkbahar ve yaz sezonlarına kıyasla daha dar bir zaman aralığına sıkışmıştır.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,90	38,80	48,30	48,47	39,80	30,20	36,47	50,37	55,97	52,30	28,03	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	24,31	41,91	32,79	23,41	39,63	33,39	38,81	39,41	34,29	23,63	39,41	36,19	26,31	25,31	24,62	24,40	12,65	12,65
Şebekeden Karşılanan Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	24,31	30,01	0,00	0,00	0,00	0,00	8,61	2,94	0,00	0,00	0,00	8,15	21,31	25,31	24,62	24,40	12,65	12,65
Üretimden Karşılanan Tüketim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,90	32,79	23,41	39,63	33,39	30,20	36,47	34,29	23,63	39,41	28,03	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,02	24,89	8,84	6,42	0,00	0,00	16,08	32,34	12,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Şekil 4.18 Sonbahar sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri

00:00 – 07:00 saatleri arasında güneş ışınımı sıfıra yakın olduğundan PV sistemde enerji üretimi yoktur ve tesisteki tüm elektriksel ihtiyaçlar şebekeden karşılanmaktadır.

07:00 – 09:00 saatleri arasında güneşin yükselmeye başlamasıyla PV modüllerinde enerji üretimi başlamaktadır. Ancak ışınımın optimum seviyeye ulaşmaması sebebiyle üretim henüz düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu periyotta tüketimin bir kısmı PV üretiminden, kalan kısmı ise şebekeden kısmi olarak sağlanmaktadır.

Saat 09:00 – 15:00 saatleri ise sistemin maksimum performans sağladığı aralıktır. Güneş ışınımı optimum seviyededir. Üretim, tesisin tüketimini büyük ölçüde karşılamaktadır ve bazı saat dilimlerinde ise tüketimi aşarak ihtiyaç fazlası üretim meydana gelmiştir.

16:00 – 23:00 saatleri arasında ise güneş ışınımı azalmıştır ve panel verimi düşmüştür. 18:00 itibariyle üretim sıfırlanmaktadır. Dolayısıyla tesisin enerji ihtiyacı tekrardan tamamen şebekeden karşılanmaya başlamıştır. PV üretiminde düşüşler meydana gelmektedir ve kısa sürede üretim durmaktadır. Tesis tüketimi tekrardan şebekeden karşılanmaktadır.

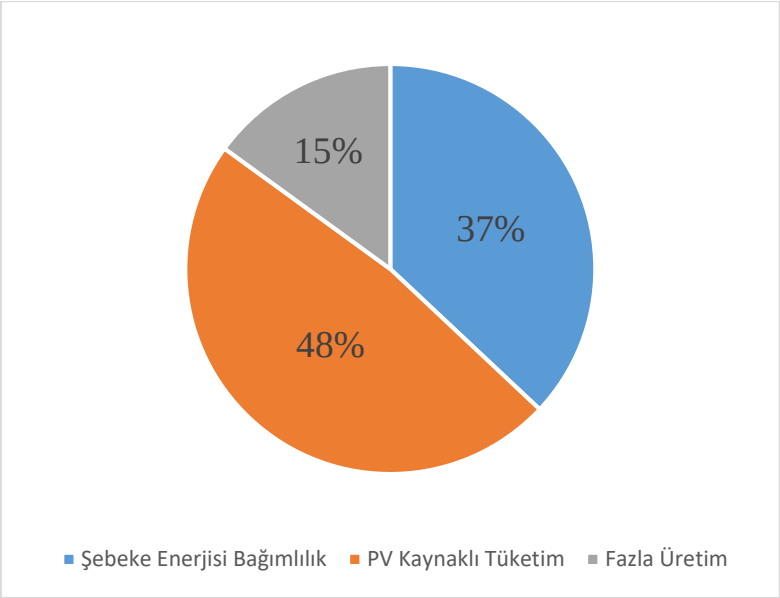
Sonuç olarak, gün içerisinde sabah erken saatlerde (00:00 - 07:00) ve akşam saatlerinde (16:00 ve sonrası) güneş ışınımı yetersizliği sebebiyle PV sistem enerji üretememektedir ve tesis yükü tamamen şebeke tarafından karşılanmaktadır. Bu durum, şebekeye olan bağımlılığın devam ettiğinin göstergesidir.

Gün içerisinde üretilen fazla enerji ise, şebekeye geri beslenebilir veya enerji depolama sistemleri aracılığıyla sonraki saatlerde kullanılmak üzere saklanabilir. Bu periyot, öz tüketim oranını ve öz yeterlilik oranını artırmak açısından kritik bir öneme sahiptir.

Sonbahar sezonuna ait enerji üretim ve tüketim grafiğine bakıldığında tesisin toplam enerji ihtiyacının neredeyse yaklaşık yarısı (%48) doğrudan PV sistemden karşılandığını göstermektedir. Bu durum, PV üretiminin tüketimle uyumlu olduğunu ve yüksek oranda öz tüketim sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla sistem yarı yarıya şebeken bağımsız çalışabilmektedir.

Sistemde üretilen fazla enerji olması sistem tasarımının doğru olduğunu kanıtlar niteliktedir.

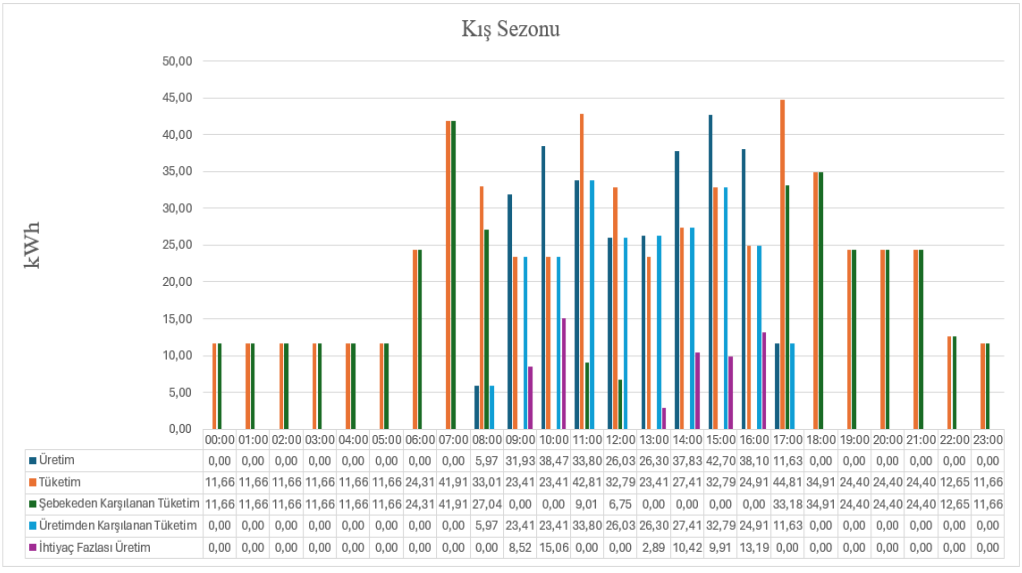
Sonuç olarak, sonbahar sezonunda sistem yarı bağımsız çalışmaktadır.



Şekil 4.19 Sonbahar sezonu enerji üretim-tüketim dengesi analizi

4.4.2.4 Kış Sezonu Analizi

Kış sezonuna ait veriler incelendiğinde, agrofotovoltaik sistemin enerji üretiminin saat 08:00'da başladığı ve 17:00 itibariyle sonlandığı görülmektedir. Bu durum, kış mevsiminde güneşlenme süresinin kısa olması, ışınım şiddetinin düşük olması ve güneşin eğik açıyla gelmesi gibi etkenlerle doğrudan ilişkilidir. Günün büyük bölümünde üretim sınırlı bir zaman aralığında gerçekleşmekte olup, PV sistemin etkin çalışma süresi yaklaşık 9 saat ile sınırlıdır.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,97	31,93	38,47	33,80	26,03	26,30	37,83	42,70	38,10	11,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	24,31	41,91	33,01	23,41	23,41	42,81	32,79	23,41	27,41	32,79	24,91	44,81	34,91	24,40	24,40	24,40	12,65	11,66
Şebekeden Karşılanan Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	24,31	41,91	27,04	0,00	0,00	9,01	6,75	0,00	0,00	0,00	0,00	33,18	34,91	24,40	24,40	24,40	12,65	11,66
Üretimden Karşılanan Tüketim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,97	23,41	23,41	33,80	26,03	26,30	27,41	32,79	24,91	11,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,52	15,06	0,00	0,00	2,89	10,42	9,91	13,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Şekil 4.20 Kış sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri

00:00 – 07:00 saatleri dilimleri arasında güneş ışınımı bulunmadığından PV sistemde enerji üretimi tamamen sıfırdır. Bu saat aralıklarında tesisin enerji ihtiyacı şebekeden karşılanmaktadır ve sistemin öz tüketim oranı sıfırdır.

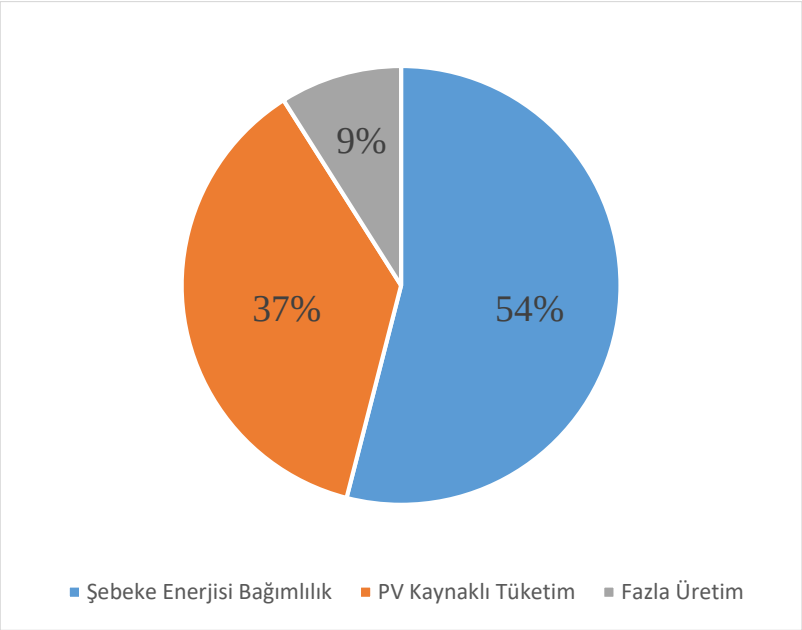
08:00 – 09:00 saatleri arasında güneş ışınımının başlamasıyla birlikte PV üretimi ani artış göstermektedir. Ancak bu saat aralıklarında tesis yükü de yüksek olduğu için PV üretimi tam anlamıyla tüketimi karşılayamamıştır. Dolayısıyla kısmi şebeke bağımlılığı devam etmektedir.

10:00 – 16:00 saatleri arasında ise PV sistem maksimum üretim dönemine ulaşmıştır. Üretim 30–40 kWh mertebelerine ulaşmaktadır ve bu değer günlük toplam üretimin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu zaman dilimlerinde üretim, tesisin büyük oranda tüketimi karşılamakta ve bazı saat dilimlerinde ise ihtiyaç fazlası üretim meydana gelmiştir.

16:00–17:00 saatleri arasında güneş ışınımının azalması sebebiyle PV üretimi azalmaktadır ve bu noktadan sonra tesis tüketimi tamamen şebekeden karşılanmaktadır.

18:00–23:00 saatleri arasında PV sistemi üretim yapmadığı için enerji temini tamamen şebekeye bağımlıdır.

Sonuç olarak, kış sezonunda güneş ışınım açısının düşük olması, hava sıcaklığının düşük olması ve gün süresinin kısa olması gibi nedenlerden dolayı PV sistem verimliliği düşmüştür.



Şekil 4.21 Kış sezonu agrofotovoltaik sistem tasarımı simülasyon verileri

Bu dönemde, agrofotovoltaik sistem, gün ortasında sınırlı süreli yüksek verimlilikte çalışmaktadır. Ancak sabah ve akşam saatlerinde üretim yetersizliği nedeniyle şebeke enerjisine bağımlılık devam etmektedir.

Kış sezonu enerji üretim ve tüketim grafiğine bakıldığında, bu dönem en fazla şebeke enerjisine bağımlı olunan dönemdir. PV üretim oranının azalması ise sistemin mevsimsel olarak üretiminin azaldığının bir göstergesidir.

PV sistemden elde edilen fazla enerji oranının %9 olması ise tesisin yüksek tüketim düşük üretim dengesinde çalıştığını ortaya çıkarmaktadır.

4.4.2.5 Yıllık Enerji Denge Değerlendirmesi

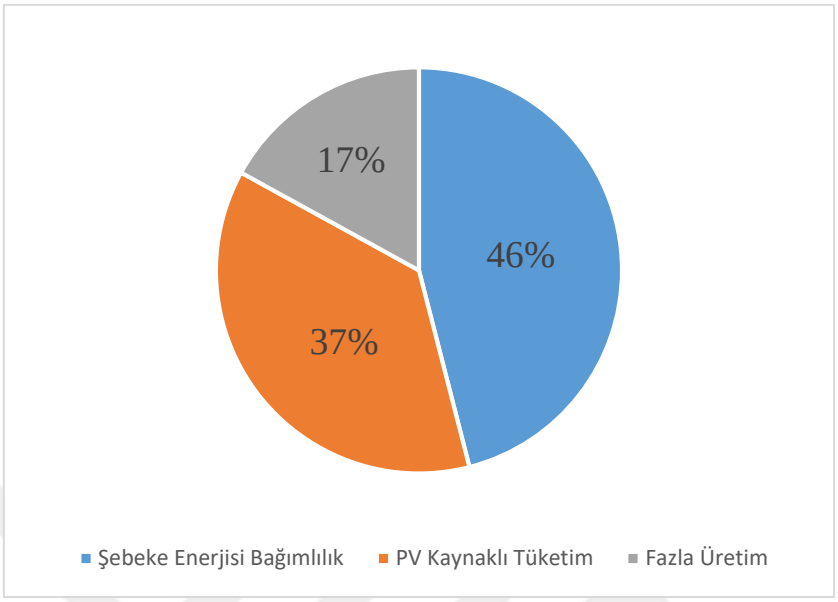
Yıllık bazda agrofotovoltaik sistemin devreye alınması ile tesisin enerji üretim ve tüketim detay analizi incelenmiştir.

Sistemin yıllık enerji tüketiminin %46'sı şebekeden karşılanıyor olması sistemin tam bağımsız olmayıp hibrit yapıda çalıştığını göstermektedir. Bu oran ise sonbahar ve kış sezonlarında PV üretiminin yetersiz kaldığını göstermektedir.

Şebekeye olan bağımlılığın %50'nin altında olması sistemin kısmi enerji bağımsızlığı sağladığını göstermektedir.

Yıllık toplam tüketimin %37'si doğrudan PV sistemden karşılanmıştır. Bu oran ise sistemde üretilen enerjinin büyük çoğunluğunun yerinde kullanıldığını

göstermektedir. Teknik olarak incelendiğinde bu değer, sistemin öz tüketim oranının %37 bandında seyretmesi optimum bir performans aralığı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.22 Agrofotovoltaik sistemi yıllık enerji üretim-tüketim dengesi analizi

PV sisteminden üretilen enerjinin ihtiyaç fazlası kısmı ise %17 oranındadır. Bu oranın yüksek olması sistemin ilkbahar ve yaz sezonlarında verimli çalıştığını göstermektedir. Fazla üretimin yüksek olması, sistemin enerji depolama ya da şebeke satışı gibi mekanizmalarla desteklenmesi durumunda ekonomik verimlilik de sağlanabilir.

Genel olarak, yıllık bazda PV sistemden yaklaşık %54 oranında bir enerji üretimi sağlanmaktadır. Bu oran sistemin orta düzeyde enerji özerkliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Şebeke bağımlılığın %46 olması ise sistemin dış kaynak ihtiyacını sürdürdüğünü göstermektedir.

4.4.3 Hidro Depolama Destekli Agrofotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Hidro depolama destekli agrofotovoltaik sistem analizinde, belirlenen zaman aralıklarında tesis içerisinde gerçekleştirilen tarımsal sulama, besi çiftliğindeki hayvanların su ihtiyacının karşılanması ve ahır çevre alanlarının temizliği için daha önce kullanılan 2 adet 75 kW gücünde dalgıç pompa sistemden kısmi olarak çıkarılmıştır. Böylece söz konusu su ihtiyacı, hidro depolama destekli sistem altyapısına entegre edilerek üst rezervuardan yerçekimi etkisiyle sağlanmıştır. Böylece su transferi için elektrik enerjisiyle çalışan pompalar devre dışı bırakılmış, enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılmıştır.

Sistem, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengesizliğin oluştuğu zaman dilimlerinde (örneğin, üretimin düşük veya tüketimin yüksek olduğu saatlerde) devreye alınarak su teminini pompaj depolamalı sistem rezervuarı üzerinden gerçekleştirmiştir. Aynı şekilde, üretimin fazla ve tüketimin düşük olduğu dönemlerde ise hidro depolama sistemi devreye girerek enerji fazlasını potansiyel enerji olarak depolamıştır.

Üst rezervuarda sulama faaliyetleri sonucu meydana gelen su seviyesi azalmalarının dengelenmesi amacıyla sistemde kullanılan 75 kW gücünde ve 10 bar basınç değerine sahip dalgıç pompanın hidrolik performansı analiz edilmiştir. Pompanın birim zamanda aktardığı su miktarı (debi) aşağıdaki genel pompa gücü–debi ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Q = (P \cdot \eta) / \rho \cdot g \cdot H \qquad (4.2)$$

Sistem tasarımında pompa gücü 75 kW olup %75 verimde çalışmaktadır. Suyun yoğunluğu 1000 kg/m^3 ve yerçekimi ivmesi ise 9.81 m/s²' dir. Alt rezervuardan üst rezervuara basma yüksekliği ise 100 m olarak alınmıştır. Bu verilere göre pompanın debisi:

$$Q = ((75000 \cdot 0{,}75) / 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 100) \cdot 3600 = 206{,}4\ m^3/h \qquad (4.3)$$

olarak bulunmuştur. Buna göre, 75 kW gücünde ve 10 bar basınçta çalışan dalgıç pompa saatte yaklaşık 206.4 m³ suyu alt rezervuardan üst rezervuara transfer edebilmektedir.

Tarımsal sulama faaliyetlerinin sürdürülebilmesi için tesisin günlük su ihtiyacı ortalama 350 m^3 olarak belirlenmiştir. Üst rezervuarın hacmi incelendiğinde ortalama 2000 m^3 su depolama kapasitesine sahip olduğu ve su seviyesinin 1000 m^3'ün altına düşmemesi gerektiği tespit edilmiştir.

İlkbahar ve yaz mevsimlerinde yağış oranlarının düşük olması sebebiyle, doğal yağış katkısının yetersiz ve süreksiz olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle, iki adet 75 kW gücündeki dalgıç pompanın üç günde bir 2,5 saat süreyle çalıştırılması planlanmıştır. Bu çalışma periyodu ile üst rezervuardaki ortalama su seviyesi korunacak ve minimum su seviyesinin altına düşülmesi önlenecektir.

Buna karşılık, sonbahar ve kış mevsimlerinde bölgedeki yağış oranlarının artması nedeniyle rezervuarın doğal beslenme oranı yükselmekte, bu da pompa kullanım sıklığının azaltılmasına olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, iki adet 75 kW gücündeki dalgıç pompanın sonbahar döneminde dört günde bir 2,5 saat, kış döneminde ise altı günde bir 2,5 saat çalıştırılması öngörülmüştür. Bu strateji, mevsimsel yağış verilerinin ve tarımsal su ihtiyacının dengelenmesi esasına dayanmaktadır.

Belirlenen işletme periyotları sayesinde, üst rezervuarda ortalama su seviyesi korunacak, minimum debi sınırının altına düşülmesi önlenecek, aynı zamanda gereksiz enerji tüketimi minimize edilerek sistem verimliliği artırılacaktır. Böylece mevsimsel değişkenlikler dikkate alınarak pompa çalışma stratejisi dinamik biçimde optimize edilmiştir.

Sonuç olarak, sistemde mevsimsel su ihtiyacı ve yağış karakteristikleri dikkate alınarak pompaların çalışma sıklığı ve süreleri dinamik biçimde optimize edilmiştir. Bu yaklaşım hem enerji tüketiminin azaltılmasını hem de su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde yönetilmesini amaçlamaktadır.

İlave olarak bu senaryo ile, elektrik tüketimini artıran yüksek güçlü motor yükleri (pompa grubu) sistemden izole edilerek hidro depolama entegrasyonunun enerji dağılımı üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

4.4.3.1 İlkbahar Sezonu Analizi

İlkbahar sezonunda, hidro depolama destekli agrofotovoltaik sisteminin operasyonel tasarımında yapılan optimizasyon kapsamında, tesisin günlük su ihtiyacını karşılamak üzere kullanılan 2 adet 75 kW gücündeki pompaj motorları 2,3 saat kısmi olarak devre dışı bırakılmıştır. Bu dönem boyunca sulama ve hayvan çiftliği için gerekli olan su ihtiyacı, santral üst rezervuarında biriktirilen suyun potansiyel enerjisinden yararlanılarak, akış prensibiyle sağlanmıştır. Bu sayede sulama işlemleri için elektrik enerjisi kullanımı azaltılmış olup şebekeden enerji tüketimi de azaltılmıştır.

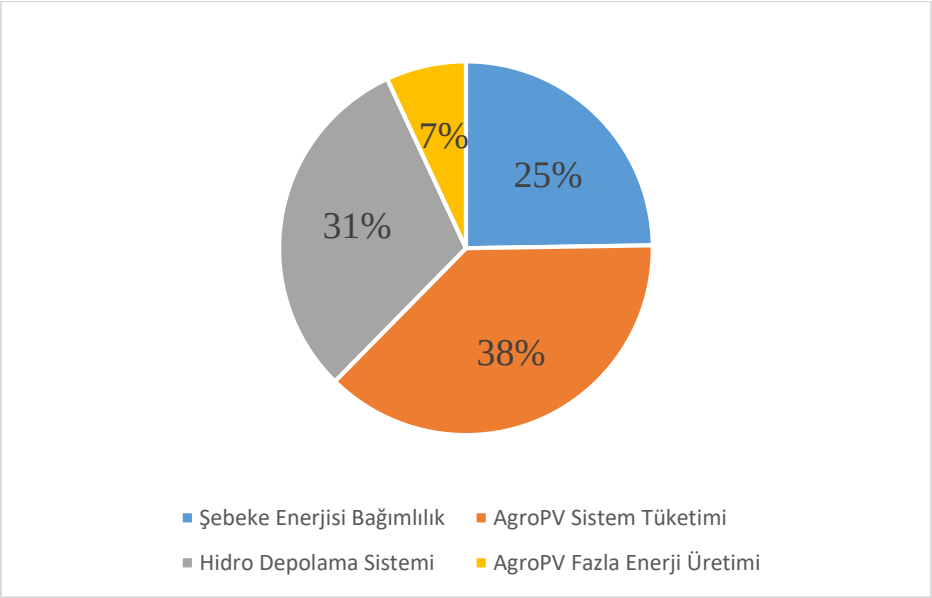
Üst rezervuarda su seviyesinin belirlenen minimum işletme sınırının altına düşmesi durumunda, iki adet 75 kW gücünde dalgıç pompanın devreye alınması planlanmıştır. Bu pompalar, üç günde bir olacak şekilde periyodik olarak çalıştırılarak alt rezervuarda depolanan suyun üst rezervuara transfer edilmesini sağlayacaktır. Sistem, bu şekilde hem üst rezervuarın hedeflenen ortalama su hacmini korumayı hem de tarımsal sulama faaliyetleri için gerekli su miktarının sürekliliğini güvence altına almayı amaçlamaktadır. Pompa devreye alma periyodu, rezervuar seviyesinin dinamik değişimlerine ve sistemin günlük su tüketim profilinden elde edilen verilere dayalı olarak optimize edilmiştir.

lkbahar sezonunda yağış miktarının düşük ve düzensiz olması nedeniyle, doğal yağış girdileri güvenilir bir besleme kaynağı olarak değerlendirilmemiş olup su transferi yalnızca mekanik pompalama yoluyla sağlanmakta ve sistemin su temin dengesi tamamen yapay besleme mekanizmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, rezervuar seviyesinin kontrol altında tutulmasını, su kesintilerinin önlenmesini ve sistemin hidrolik kararlılığının korunmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, bu çalışma stratejisi, pompaların gereksiz yere devreye girmesini engelleyerek enerji tüketiminin optimize edilmesine ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

İlkbahar sezonu boyunca enerji üretim ve tüketim profilleri incelendiğinde, agrofotovoltaik sisteminden elde edilen fotovoltaik üretim değerlerinde ve sisteme entegre edilen enerji fazlası oranlarında belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişkenlik, pompaj motorlarının sürekli çalışmaması ve yalnızca üst rezervuardaki su seviyesi belirli bir eşik değerin altına düştüğünde devreye girmesi ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle üst rezervuardaki su seviyesinin azalması durumunda otomatik olarak devreye giren dalgıç pompaların enerji tüketimleri, agrofotovoltaik sisteminden elde edilen üretim fazlası kullanılarak karşılanmıştır. Bu durum, sistemin enerji yönetimi açısından fotovoltaik üretim fazlasının efektif bir şekilde pompaj uygulamalarına yönlendirildiğini ve enerji verimliliğinin optimize edildiğini göstermektedir. Ayrıca, motorların kesikli çalışması sayesinde şebeke tüketim profili üzerinde dalgalanmalar oluşmuş, fakat sistemin enerji fazlası ile desteklenmesi toplam enerji kullanım etkinliğini artırmıştır.

Sistemin bu çalışma stratejisi ile pompaj motorlarının kısmi olarak devre dışı bırakılması, şebekeden enerji çekim ihtiyacında yaklaşık %25 oranında azalma ile sonuçlanmıştır. Bu azalma, enerji tüketim profilinin optimizasyonuna doğrudan katkı sağlamaktadır. Özellikle mevsimsel su yönetimi stratejilerinin uygulanması, pompalama operasyonlarının fotovoltaik üretim fazlası ile senkronize edilmesini mümkün kılmış ve sistemin enerji bağımsızlığını artırmıştır. Bu durum, hem şebeke bağlantılı enerji taleplerinin düşürülmesini hem de enerji verimliliğinin artırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, pompaj motorlarının kesikli ve talebe dayalı çalışması, enerji depolama ve üretim fazlası kullanımını optimize ederek, sistemdeki enerji kayıplarının minimize edilmesine ve operasyonel maliyetlerinin de düşürülmesine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 4.23 Hidro depolama destekli sistemin ilkbahar sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi

4.4.3.2 Yaz Sezonu Analizi

Yaz döneminde, tesisin günlük su ihtiyacını karşılamak üzere bulunan 2 adet 75 kW dalgıç pompalar kısmi olarak devreden çıkartılacaktır. Yaz sezonunda ilkbahar sezonunda olduğu gibi bölgedeki düşük yağış miktarları nedeniyle doğal yağış girdilerinin üst rezervuarın su seviyesine anlamlı bir katkı sağlamayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle, üst rezervuarın işletme seviyesinin korunabilmesi amacıyla, alt rezervuarda depolanan suyun periyodik olarak üst rezervuara transfer edilmesi planlanmıştır.

Planlanan senaryo kapsamında, her üç günde bir olmak üzere, her biri 75 kW gücünde iki adet dalgıç pompa eş zamanlı olarak devreye alınacaktır. Bu pompalar, alt rezervuardan üst rezervuara su transferini sağlayarak üst rezervuarın hacimsel dengesinin sürdürülmesine katkıda bulunacaktır. Bu yaklaşım ile yaz döneminde doğal besleme kaynaklarından bağımsız olarak üst rezervuarın işletme sürekliliği sağlanacak, su temin güvenliği artırılacak ve olası su seviyesi dalgalanmalarının önüne geçilecektir.

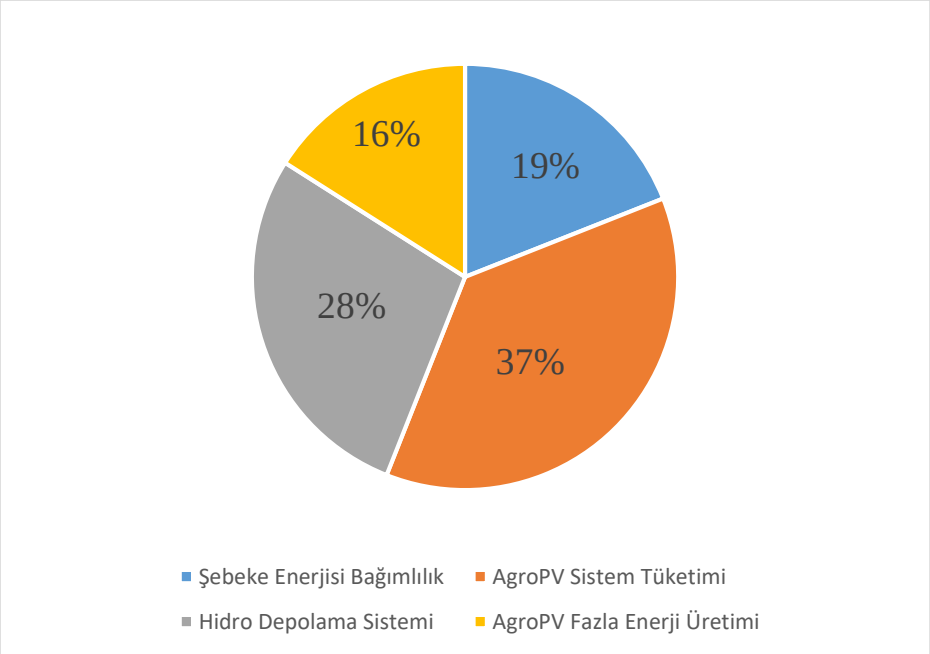
Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, agrofotovoltaik sisteminin hidroelektrik depolama ünitesi ile entegre olarak çalıştırılması durumunda, sistemin şebekeye olan enerji bağımlılığının %19 seviyesine düştüğü ve bu sayede %24 oranında bir azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, entegre sistemin enerji

sürdürülebilirliği açısından olumlu bir gelişme olmakla birlikte, sistemin henüz tamamen şebekeden bağımsız olarak çalışamadığını göstermektedir.

Hidroelektrik depolama sisteminin devreye alınmasıyla, enerji arz-talep dengesinde önemli bir iyileşme sağlanmış; özellikle gündüz saatlerinde agrofotovoltaik panelleri tarafından üretilen fazla elektrik enerjisi, pompaların kısmi devreye girme periyotları sırasında oluşan ek enerji tüketimini karşılayarak sistemin net enerji dengesini olumlu yönde etkilemiştir. Bu durum, pompaj işlemleri için gerekli olan enerji ihtiyacının önemli bir kısmının yenilenebilir kaynaklardan sağlanabildiğini ve dolayısıyla sistemin genel verimliliğinin arttığını ortaya koymaktadır.

Ayrıca, hidro depolama ünitesi ile agrofotovoltaik sisteminin senkronize çalışması sayesinde enerji üretim-tüketim dengesizliği minimize edilmiş, şebekeden çekilen güç miktarında dalgalanmalar azalmış ve enerji arz güvenliği iyileştirilmiştir. Ancak, özellikle düşük güneşlenme periyotlarında veya yüksek talep zamanlarında şebekeden enerji çekilmesi hâlâ gerekli olmaktadır.

Sonuç olarak, hidro depolama entegrasyonu, sistemin yenilenebilir enerji kullanım oranını artırmış, şebeke bağımlılığını azaltmış ve genel enerji yönetimi açısından operasyonel esneklik sağlamıştır.



Şekil 4.24 Hidro depolama destekli sistemin yaz sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi

4.4.3.3 Sonbahar Sezonu Analizi

Sonbahar sezonu analiz sonuçları ile, tesiste sulama amaçlı kullanılan 75 kW gücündeki iki adet dalgıç pompa motorlarının kısmi olarak devre dışı bırakılma incelenmiştir.

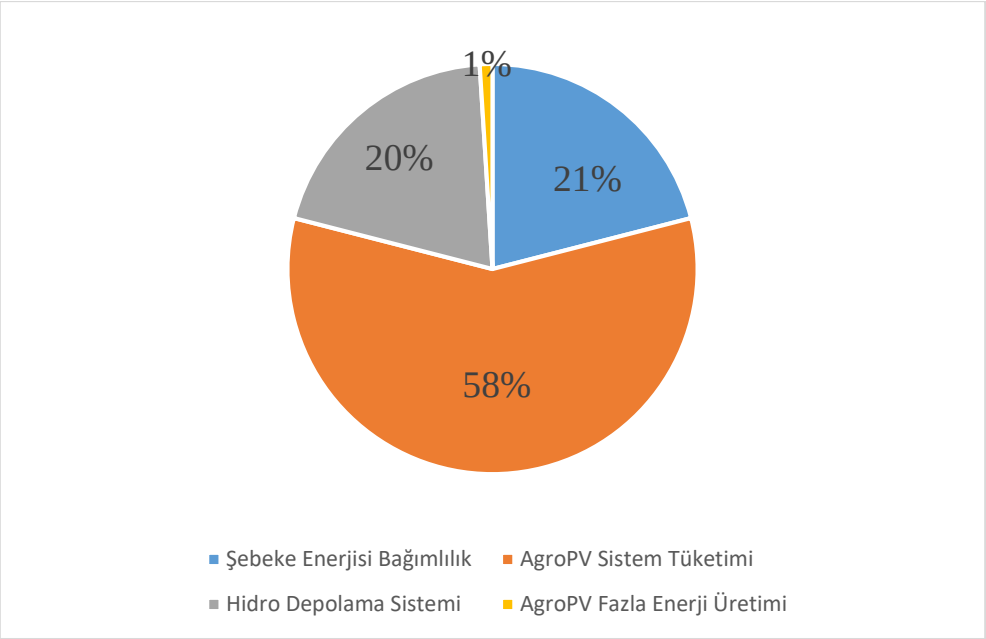
Sonbahar mevsimi döneminde, yaz ve ilkbahar sezonlarına kıyasla bölgesel yağış miktarlarında kademeli bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışa bağlı olarak, doğal yağış girdilerinin üst rezervuarın su seviyesine kısmi katkı sağladığı belirlenmiştir. Ancak, yağışların düzensiz ve bölgesel dağılım göstermesi nedeniyle sistemin sürekliliğini sağlamak amacıyla pompalı su transferinin kontrollü bir şekilde devam ettirilmesi planlanmıştır.

Bu kapsamda, her dört günde bir, ihtiyaç durumuna göre her biri 75 kW gücünde iki adet dalgıç pompanın devreye alınması öngörülmüştür. Bu pompalar, alt rezervuarda depolanan suyun üst rezervuara transferini gerçekleştirerek, üst rezervuarın işletme seviyesinin optimum aralıkta tutulmasına hizmet edecektir.

Pompa devreye alma sıklığı, yağış verileri, rezervuar seviye ölçümleri, buharlaşma oranları ve tarımsal sulama talebi dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu işletme stratejisiyle, sonbahar döneminde doğal yağış katkısı ve mekanik su transferi dengelenerek hem su kaynaklarının verimli kullanımı hem de enerji tüketiminin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Bunun sonucunda, rezervuarlar arası su transferinde süreklilik korunurken, aynı zamanda hidrolojik denge ve enerji verimliliği de iyileştirilecektir.

Analiz sonuçları detaylı olarak incelendiğinde, sistemin şebekeden çektiği toplam enerji miktarı %21 olup %16 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuç, agrofotovoltaik ile hidro depolama sisteminin verimli çalıştığının bir göstergesidir.

Sistemde dalgıç pompaların etkisinin azalması ile agrofotovoltaik sisteminin üretim kapasitesinden gelen kazancı da arttırmıştır ve hidro depolama sisteminin devreye daha verimli girmesi avantajını sağlamıştır.



Şekil 4.25 Hidro depolama destekli sistemin sonbahar sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi

Hidro depolama sisteminin devreye girmesi ile %20 oranında enerji yönetimini dengeleyen bir katkı sağlamıştır. Bu oran, sistemin üretim fazlası dönemlerde depolanan enerjiyi, düşük üretim anlarında etkin biçimde kullandığını göstermektedir.

Bununla birlikte, sonbahar sezonunda agrofotovoltaik sisteminden elde edilen fazla elektrik üretimi yaklaşık %1 oranındadır ve bu oranda azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte, sistemde oluşan sınırlı miktardaki fazla enerji, hidroelektrik depolama döngüsünde etkin biçimde değerlendirilmiştir. Özellikle, dalgıç pompaların ihtiyaç durumunda devreye alınarak alt rezervuardan üst rezervuara su transferi gerçekleştirdiği periyotlarda, agrofotovoltaik sisteminden elde edilen fazla üretim doğrudan pompaj enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılmıştır. Böylece, şebekeden enerji çekilmeden su transferi sağlanmış ve sistemin enerji öz tüketim oranı artırılmıştır.

Sonuç olarak, sonbahar sezonunda agrofotovoltaik sisteminden elde edilen sınırlı fazla üretim, hidroelektrik depolama döngüsüyle uyumlu biçimde kullanılarak sistemin enerji verimliliği, sürdürülebilirliği ve operasyonel esnekliği açısından önemli bir katkı sağlamıştır.

4.4.3.4 Kış Sezonu Analizi

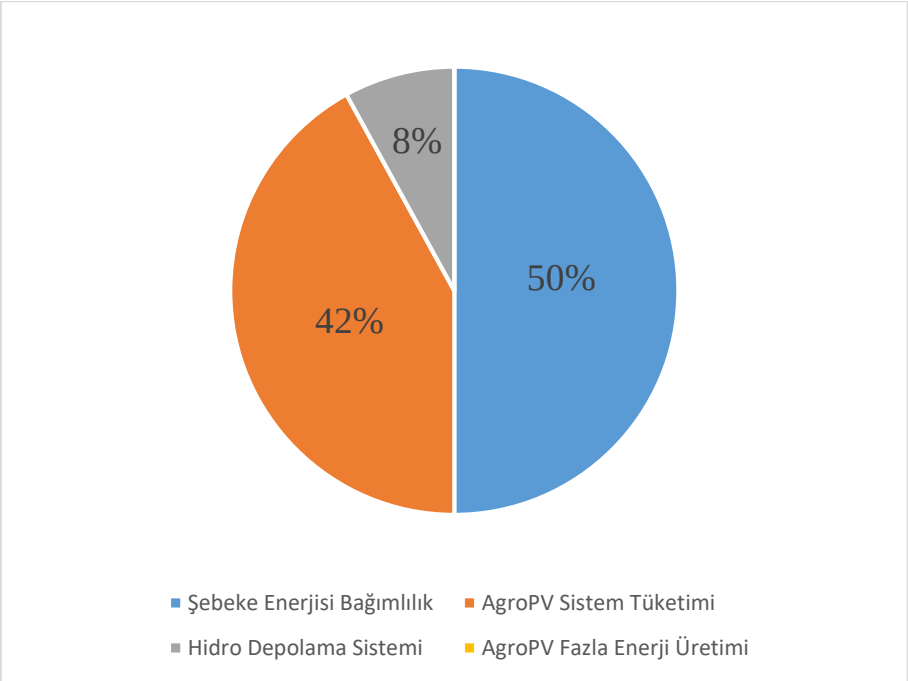
Kış sezonu analizinde diğer sezonlarda olduğu gibi, 75 kW gücündeki iki adet dalgıç pompanın belirli bir süre kısmi olarak devre dışı bırakılması durumu incelenmiştir. Mevsimsel şartlar nedeniyle, kış sezonunda tarımsal arazide sulama yapılması planlanmamıştır. Ancak, tesiste bulunan çiftlik hayvanlarının su ihtiyacının karşılanması ve ahır çevre alanlarının temizliği amacıyla üst rezervuarda depolanan su kullanılmıştır. Bu kullanım, sistemin hidro depolama kapasitesinin etkin şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamış ve kritik su ihtiyacının şebeke elektriğine ihtiyaç duymadan karşılanmasını mümkün kılmıştır.

Kış sezonunda, bölgedeki yağış miktarlarının diğer sezonlara oranla belirgin şekilde artış göstermesi nedeniyle, doğal yağış girdilerinin üst rezervuarın su seviyesinin korunmasında önemli bir katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, sistemin sürekli işletme dengesini koruyabilmek amacıyla, dalgıç pompaların devreye alınma periyotları yeniden optimize edilmiştir.

Analizler sonucunda, her altı günde bir olmak üzere, ihtiyaç duyulan durumlarda dalgıç pompaların devreye alınması planlanmıştır. Her biri 75 kW nominal güce sahip iki adet dalgıç pompa, alt rezervuarda depolanan suyun üst rezervuara transferini gerçekleştirerek, rezervuar seviyesinin kontrol altında tutulmasını sağlamaktadır.

Bu dönemde, agrofotovoltaik sisteminden elde edilen elektrik üretimi, güneşlenme süresinin azalması ve radyasyon yoğunluğundaki düşüş nedeniyle önceki sezonlara göre daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu nedenle, pompaların çalışması esnasında ortaya çıkan elektriksel enerji talebinin yalnızca bir kısmı agrofotovoltaik sisteminin fazla üretimiyle karşılanabilmiştir. Geriye kalan enerji açığı ise şebeke üzerinden temin edilmiştir.

Enerji dengesine ilişkin değerlendirmelerde, agrofotovoltaik sisteminden sağlanan yenilenebilir enerji katkısının pompaj işlemleri üzerindeki yükü kısmen azalttığı, ancak mevcut üretim düzeyinin tam enerji özerkliği için yeterli olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.26 Hidro depolama destekli sistemin kış sezonu enerji üretim tüketim dengesi analizi

Şekil 4.26' da sunulan analiz sonuçları incelendiğinde, hidro depolama destekli sisteminin agrofotovoltaik sistemi ile entegre olarak çalıştırılması sonucunda, sistemin şebekeye olan enerji bağımlılığında %4 oranında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Söz konusu entegrasyon sayesinde, gündüz saatlerinde agrofotovoltaik sisteminden üretilen fazla elektrik enerjisi, dalgıç pompaların devreye girdiği periyotlarda doğrudan pompaj işlemlerinin enerji gereksinimini karşılamak amacıyla kullanılmıştır. Bu durum, sistemde oluşan fazla üretimin şebekeye geri beslenmeden sistem içi tüketim olarak değerlendirilmesine olanak sağlamış ve böylece enerji öz tüketim oranını artırmıştır.

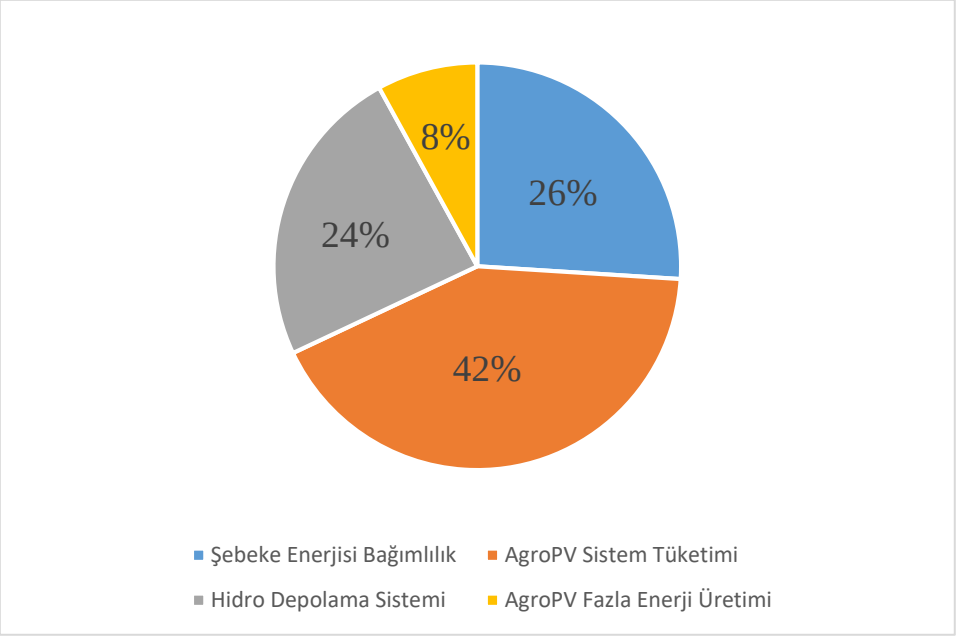
Sonuç olarak, kış sezonunda yağış rejiminin olumlu etkisiyle pompa devreye alma sıklığı azalmış, ancak agrofotovoltaik sisteminin sınırlı üretim kapasitesi nedeniyle pompaj depolama döngüsünün kısmen şebeke desteğine bağımlı şekilde işletilmesi gerekmiştir. Bu durum, sistemin mevsimsel enerji performans analizinde dikkate alınması gereken önemli bir bulgudur.

4.4.3.5 Hidro Depolama Destekli Sistemin Yıllık Enerji Analizi

Hidro depolama destekli agrofotovoltaik sistemin analiz sonuçlarına bakıldığında yıllık bazda enerji kullanım oranları aşağıdaki grafikte verilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, sistemde en büyük payı %42 oranında agrofotovoltaik sistem oluşturmaktadır. Bu oran, üretilen enerjinin yıllık bazda büyük kısmının tesisin kendi ihtiyacını karşılamak için kullandığını gösterir. Dolayısıyla, sistemin hidro depolama ile desteklenmesi tesisin şebekeden enerji çekme ihtiyacının azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, enerjiyi doğrudan kullanma oranının artması sistem kayıplarının azalmasına ve sistem verimliliğinin yükselmesine katkı sağlamıştır.

Sistemin toplam enerji ihtiyacının %26'sı şebekeden karşılanmaktadır ve bu oran sistemin halen tamamen enerji özerkliğine ulaşamadığını, özellikle güneşlenmenin azaldığı dönemlerde (kış veya bulutlu günler) agrofotovoltaik üretiminin yetersiz kaldığını göstermektedir. Ancak bu oran, geleneksel sistemlere kıyasla önemli ölçüde azaltılmış bir dış enerji bağımlılığına işaret etmektedir. Bu düşüş, hidroelektrik depolama desteği ve fazla üretimin sistem içi kullanımının etkinliğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.27 Hidro depolama destekli sistemin yıllık enerji üretim tüketim dengesi analizi

Analiz sonuçlarına bakıldığında, sistemin enerji ihtiyacının yaklaşık %24 oranında hidro depolamadan karşılaması sistem için büyük kazançtır.

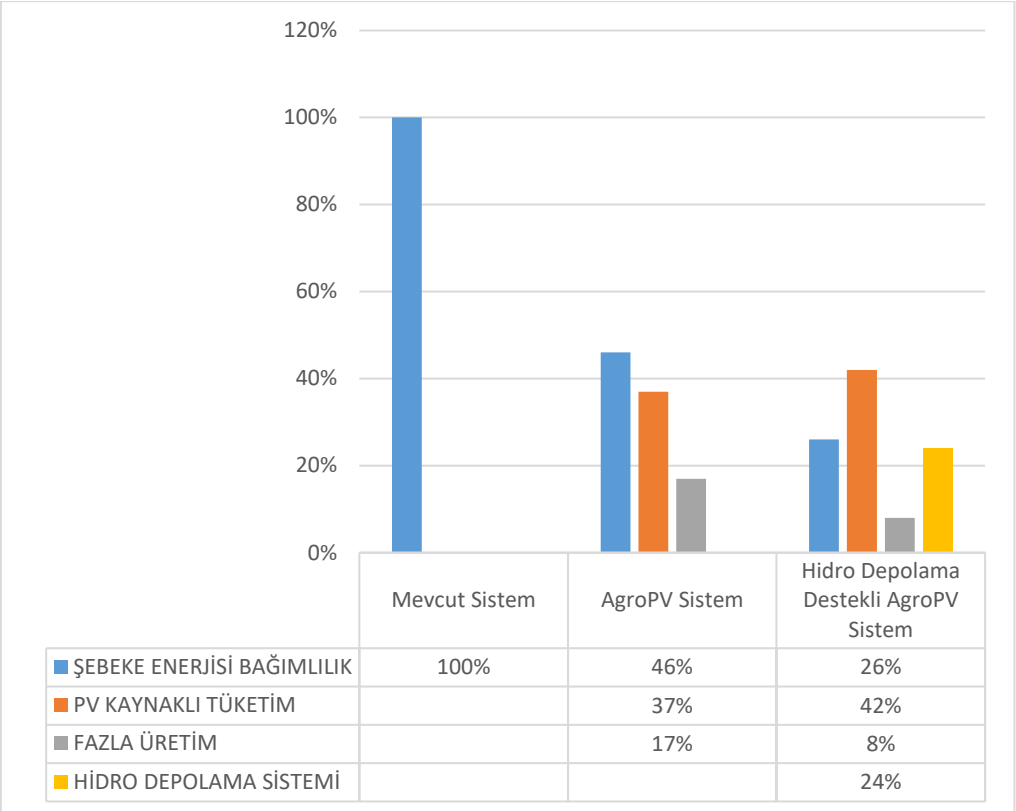
Tüketimin yoğun üretimin az olduğu ve üretimin yoğun tüketimin az olduğu saat dilimlerinde devreye girerek sistemdeki çakışma pozitif yönde avantaja çevrilmiştir. Sistemde dengeleyici bir etki meydana getirmiştir.

Agrofotovoltaik sistemden elde edilen fazla enerji %8 oranındadır ve sistemde dalgıç pompaların devreye girmesi sonucu tüketimlerini karşılayarak kazanç sağlanmıştır.

Hidro depolama sistemi sayesinde enerji akışında daha dengeli bir yapı elde edilmiş; sistemin şebekeye bağımlılığı azalmış, öz tüketim oranı yükselmiş ve genel enerji verimliliği artmıştır.

Mevcut sistem, yıllık bazda yüksek yenilenebilir enerji kullanım oranına (%74) ulaşmıştır

Şekil 4.28’ den görülebileceği üzere üç sistem karşılaştırıldığında, sistemin şebekeye olan bağımlılığı hidro depolama ile %100’den %26’ ya kadar düşüş meydana gelmiştir. Hidro depolama sisteminin agrofotovoltaik sistemine entegre edilmesiyle birlikte tesisin enerji tüketiminde şebeke enerjisine olan bağımlılık oranının belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum, PV sistem tarafından gündüz saatlerinde üretilen fazla enerjinin hidro depolama ünitesinde potansiyel enerji olarak depolanması ve ihtiyaç anında sulama için elektrik enerjisine dönüştürülmesi sayesinde sağlanmıştır.



Şekil 4.28 Sistemlerin karşılaştırması

PV üretimi her iki yenilenebilir sistemde de yüksek orandadır PV fazlası enerji üretiminde ise %9 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Bu oran, üretilen fazla enerjinin sistem döngüsünde kullanıldığını göstermektedir.

Böylece, sistem enerji talebi ile üretimi arasındaki dengesizlikleri azaltılmış, şebekeden enerji çekme ihtiyacını minimize ederek sistemin öz yeterlilik oranını artırmıştır.

Sonuç olarak, hidro depolama entegrasyonu sisteme ölçülebilir fayda sağlamış olup bu veriler ışığında, mevcut sistemin doğru yönde optimize edildiğini göstermektedir.

5
SONUÇ

Bu çalışmada, hidro depolama sistemi ile entegre şekilde çalışan agrofotovoltaik sistemlerin tasarımı ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, tarımsal üretim alanlarında yenilenebilir enerji kullanımını artırarak enerji arz güvenliğini sağlamak ve şebekeye olan bağımlılığı azaltmaktır. Bu kapsamda, güneş enerjisine dayalı agrofotovoltaik sistemine hidro depolama ünitesi entegre edilerek, üretim ve tüketim arasındaki dengesizliklerin giderilmesi hedeflenmiştir.

Tesisin günlük elektrik enerji gereksinimleri saatlik periyotlara ayrılarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerin ışığında mevsimsel tüketim analizi değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tesisin toplam elektrik enerjisi talebinin tamamı ulusal elektrik şebekesi üzerinden karşılandığı tespit edilmiştir. Bu durum, mevcut durumda tesisin enerji arz güvenliğinin tamamen şebeke bağlantısına bağımlı olduğunu ve herhangi bir yenilenebilir enerji üretim veya depolama sistemiyle entegre çalışmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, sistemin enerji sürdürülebilirliği ve maliyeti açısından geliştirmeye açık olduğu belirlenmiştir.

Bu sistemde tarım – enerji - su döngüsü üzerine çalışılmış olup kaynak verimliliği hedeflenmiştir. Tarım arazisi içerisinde fotovoltaik paneller entegre edilerek elektrik üretiminin yapılmasına ve tarımsal faaliyetlere devam edilerek birbirlerini etkilemeden koordineli çalışan bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem, aynı zamanda bitkiler için de su tasarrufu ve sıcaklık gibi etkiler de kontrol edilmiştir.

Tamamen şebekeye bağımlı sistem temel alınarak, tesis bünyesine agrofotovoltaik sistemin entegrasyonu yapılmıştır ve sonrasında enerji üretim ve tüketim dengesi tekrardan analiz edilmiştir. Bu entegrasyon kapsamında, belirlenen tarım arazisi üzerine fotovoltaik paneller bi-facial dikine yerleştirilerek hem doğrudan hem de yansıyan güneş ışınımından maksimum düzeyde fayda sağlanması hedeflenmiştir.

Kurulan fotovoltaik paneller aracılığıyla elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir ve mevsimsel olarak üretim verileri saatlik bazda izlenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, agrofotovoltaik sistemin devreye alınmasıyla birlikte tesisin elektrik enerjisi talebinin belirli kısmı doğrudan güneş enerjisinden karşılanmıştır. Böylece şebekeden karşılanan yıllık %100 enerji miktarında azalma gözlenerek %46 mertebelerine inmiştir. Sistemin agrofotovoltaik sistemden karşıladığı öz tüketim oranı ise artarak %37 olmuştur. İlave olarak, %17 oranında ise fazla üretim meydana gelmiştir.

Sonuçlar mevsimsel bazda incelendiğinde, ilkbahar ve yaz aylarında yüksek ışınıma bağlı olarak PV üretiminin arttığı ve buna paralel olarak şebekeye bağımlılığın önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, düşük ışınım değerlerinin yaşandığı sonbahar ve kış dönemlerinde ise PV üretimi sınırlı kalmış ve bu dönemlerde şebekeye bağımlılıkta artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak agrofotovoltaik sistemi, yılın büyük bir bölümünde enerji üretiminde etkin rol oynamakla birlikte, tek başına tesisin sürekli olarak enerji ihtiyacını tam olarak karşılayamamıştır.

Agrofotovoltaik sisteminin tek başına tesisin sürekli enerji ihtiyacını tam olarak karşılayamaması nedeniyle, hidroelektrik enerji depolama sistemi entegre edilmiştir. Bu entegrasyonun temel amacı, şebekeye olan bağımlılığını azaltmak ve sistemin genel enerji verimliliğini artırmaktır.

Hidro depolama sistemi ile, tesiste tüketimin yoğun üretimin az olduğu ve üretimin yoğun tüketimin az olduğu noktalardaki enerji çakışması avantajlı hale getirilmiştir. Asıl tüketimi arttıran dalgıç pompalar sistemden kısmi olarak devre dışı bırakılarak sistemin şebekeden çektiği enerji miktarı azaltılmış olup şebekeye olan bağımlılık azaltılmıştır. Suyun potansiyel enerjisi ile tesis içerisinde tarımsal arazi sulanması, besi çiftliğindeki hayvanların su ihtiyacını gidermek ve ahır ve çevre mahallerin su ihtiyacı üst rezervuardan karşılanmıştır. PV üretiminden elde edilen fazla elektrik enerjisi ise üst rezervuarda su miktarında azalma meydana geldiğinde tesiste bulunan dalgıç pompalar çalıştırılarak su takviyesinde kullanılmıştır. Bu sayede sistem hem üretim hem de tüketim açısından dinamik bir enerji yönetimi sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, hidroelektrik depolama destekli agrofotovoltaik sisteminin devreye alınmasıyla birlikte tesisin şebekeden çektiği enerji miktarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir ve bu oran %46 seviyesinden %26 seviyesine düşmüştür. Hidro depolama sistemi, özellikle sabah ve akşam saatlerinde PV üretiminin düşük olduğu zaman dilimlerinde enerji talebinin karşılanmasında etkin rol oynamış ve tesisin öz tüketim oranını önemli ölçüde artırmıştır. Böylece hidro depolama sisteminin agrofotovoltaik sisteme entegre edilmesi ile %24 oranında bir enerji kazancı sağlamıştır ve şebekeye olan bağımlılık minimize edilmiştir.

Sonuç olarak, hidroelektrik depolama destekli agrofotovoltaik sisteminin entegrasyonu, tesisin enerji yönetim performansını iyileştirmiş, yenilenebilir enerji kullanım oranını artırmış ve sistemin enerji sürdürülebilirliği, verimlilik ve bağımsızlık kriterleri açısından önemli kazanımlar sağlamıştır.

Sistemde kullanılan her iki kaynağın da %100 olarak yenilenebilir enerji olması ile fosil yakıt kullanımı görülmez ve dolayısıyla sera gazı üretimi olmaz ve küresel ısınmaya karşı da bir dik duruş olarak görülebilmektedir. Ekonomik olarak incelendiğinde ise, hidro depolama ve agrofotovoltaik sistemlerin entegre çalışması iki farklı yenilenebilir enerji kaynağı içerdiğinden ilk yatırım maliyetleri yüksek olup sistemin geri dönüşüm süresi diğer geleneksel sistemlere göre de daha geç olacaktır.

KAYNAKÇA

[1] C. Karakaş Ulusoy, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımındaki Gelişmeler; Güneş Enerji Sistemleri ve Finansman Modelleri, ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi (ASSAM-UHAD)- ASSAM International Refereed Journal, Cilt: 6, Sayı: 13, 2019.

[2] P. C. Nikolaos, M. Fafalakis, and D. Katsaprakakis, "A Review of Pumped Hydro Storage Systems," Energies, vol. 16, no. 4516, pp. 1–39, 2023, doi: 10.3390/en16114516.

[3] İ. Kırbaş, "The Agrivoltaic Potential of Türkiye," Bitlis Eren University Journal of Science, vol. 14, no. 1, pp. 149–162, 2025, doi: 10.17798/bitlisfen.1558261.

[4] O.K.T.N. Silva, C.G. Kumaragamage, M.V.S. Perera, U.S.P.R. Arachchige, "Solar Energy Technologies: A Complete Review of the Solar System Technologies," Journal of Research in Technology and Engineering, vol.. 5, no. 1, pp. 84–111, 2024.

[5] A. Al-Ezzi, "The market of solar panels in the United Kingdom," Applied Solar Energy, vol. 53, no. 1, pp. 78–84, Jan. 2017, doi: 10.3103/s0003701x17010029.

[6] A. Durusu, A. Erduman, and F. Yıldız, "Comparative study of photovoltaic array optimum tilt angle and orientation with multi-objective consideration," Journal of Engineering Sciences and Design, vol. 8, no. 4, pp. 1031–1041, 2020, doi: 10.21923/jesd.745835.

[7] I. Gökce, "Fotovoltaik (PV) hücreler yardımıyla güneş enerjisinden elektrik üretimi ve performansını etkileyen faktörlerin incelenmesi," M.S. thesis, Dept of Physics, Çukurova Univ., Adana, Turkey, 2020

[8] S. G. Yıldırım, "Lisanssız güneş enerjisi santrallerinde şebeke satış kısıtlamalarının kurulu güç boyutlandırması ve tüketim profilleri üzerinden finansal analizi" M.S. thesis, Dept of Electrical Engineering, Yıldız Technical Univ., Istanbul, Turkey, Nov. 2023.

[9] I. Gökce and M. Karakılçık, "Fotovoltaik (PV) hücreler yardımıyla güneş enerjisinden elektrik üretimi ve performansı etkileten faktörlerin incelenmesi", Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol.39, no.1, pp. 50-59, 2020.

[10] E. F. Akyürek, K. Geliş, and M. Yoladı, “Farklı gölgeleme durumlarının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi,” Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (GÜFBED), vol. 11, no. 1, pp. 161–168, 2020, doi: 10.17714/gumusfenbil.766232.

[11] D. Gürbüz, “Kir ve tozlanmanın fotovoltaik sistem verimi üzerindeki etkisi,” M. S. thesis, Dept of Energy Systems Eng., Fırat Üniversitesi, Elazığ, Turkey, March 2018.

[12] I Atik, and A. Sekin, “Hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Balıkesir örneği,” Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi (DUJE), vol. 13, no. 3, pp. 517–529, 2022, doi: 10.24012/dumf.1148223.

[13] V. Karthikeyan, S. Rajasekar, V. Das, P. Karuppanan, and A. K. Singh, “Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system,” in Smart Energy Grid Design for Island Countries, F. R. Islam, K. A. Mamun, and N. K. Roy, Eds. Cham: Springer, 2017, pp. 125–157, doi: 10.1007/978-3-319-50197-0_5.

[14] N. Arıcı, and A. Iskender, “Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri,” Politeknik Dergisi (Journal of Polytechnic), vol. 23, no. 1, pp. 215–222, 2020, doi: 10.2339/politeknik.644820.

[15] N. M. Kumar, M. S. P Subathra, and J. E. Moses, “On-grid solar photovoltaic system: Components, design considerations, and case study,” in Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, Feb. 2018, pp. 616–619, doi: 10.1109/ICEES.2018.8442403.

[16] B. Akgayev, S. Akbayrak, M. Yılmaz, M. S. Büker, and V. Ünsür, “Türkiye'de Fotovoltaik sistemlerin fizibilitesinin değerlendirilmesi: on-grid, off-grid ve şebeke ölçekli FV kurulumlarının teknik ve ekonomik analizi,” Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering, vol. 6, no. 1, pp. 69–92, 2024, doi: 10.47112/neufmbd.2024.33.

[17] N. H. Al Dulaimi, Design of an Off-Grid Solar PV System for a Rural Shelter, B.Sc. thesis, Dept. of Energy Engineering, German Jordanian Univ., Amman, Jordan, 2017.

[18] E. Gençoğlu, “Güneş Pili ile Çalışan Bir Su Pompalama Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi,” M.Sc. thesis, Dept. of Electrical and Electronics Eng., Fırat Univ., Elazığ, Türkiye, 2015.

[19] A. A. Zahrawi and A. M. Aly, “A review of agrivoltaic systems: Addressing challenges and enhancing sustainability,” Sustainability, vol. 16, no. 18, p. 8271, 2024, doi: 10.3390/su16188271.

[20] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Agri-Photovoltaics: Opportunities, Challenges and Guidelines, Fraunhofer ISE, 2020. [Online]. Available: https://solargrazing.org/wp-content/uploads/2021/03/APV-Guideline.pdf. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[21] A. Chalgynbayeva, Z. Gabnai, P. Lengyel, A. Pestisha, and A. Bai, “Worldwide research trends in agrivoltaic systems—A bibliometric review,” Energies, vol. 16, no. 2, p. 611, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020611.

[22] S. Pelczar, “An overview of open field agrivoltaic systems: A comprehensive description of combination of agricultural and energy production,” Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 80, p. 104369, 2025, doi: 10.1016/j.seta.2025.104369.

[23] M. Trommsdorff, S. Gruber, T. Keinath, M. Hopf, C. Hermann, F. Schönberger, C. Gudat, A. Torres Boggio, M. Gajewski, P. Högy, S. Zikeli, A. Ehmann, A. Weselek, U. Bodmer, C. Rösch, D. Ketzer, N. Weinberger, and S. Schindele, Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition — A Guideline for Germany, 3rd ed., Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Feb. 2024.

[24] P. Jowett, “Turkey’s solar capacity surpasses 21 GW,” PV Magazine International, 18 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: https://www.pv-magazine.com/2025/04/18/turkiyes-solar-capacity-surpasses-21-gw

[25] A. Bayyiğit, O. K. Çinici, and A. Acır, “Tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik panellerin performans analizi,” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji (GU J Sci, Part C: Design and Technology), vol. 10, no. 2, pp. 407–420, 2023, doi: 10.29109/gujsc.1298017.

[26] R. Younas, H. Imran, M. H. Riaz, and N. Z. Butt, “Agrivoltaic farm design: Vertical bifacial vs. tilted monofacial photovoltaic panels,” arXiv preprint, arXiv:1910.01076, 2019.

[27] S. F. Kaya, “Tarımsal Uygulamalarda Agro-Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırmalı Analizi,” M.Sc. thesis, Dept. of Electrical Engineering, Yıldız Technical Univ., İstanbul, Türkiye, Feb. 2024.

[28] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. “Harvesting the Sun for Power and Produce –Agrophotovoltaics Increases the Land Use Efficiency by over 60 percent.” Fraunhofer ISE Press Release (November 23, 2017). https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/pressreleases/2017/harvesting-the-sun-for-power-and-produceagrophotovoltaics-increases-the-land-use-efficiency-by-over-60- percent.html

[29] A. Bayyiğit, O. K. Çinici, and A. Acır, “Tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik panellerin performans analizi,” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji (GU J Sci, Part C: Design and Technology), vol. 11, no. 2, pp. 407–420, 2023, doi: 10.29109/gujsc.1298017.

[30] J. Leto, M. Karoglan, S. Radman, D. Matulić, Ž. Andabaka, G. Fruk, M. Rastija, I. Varga, D. Kranjac, J. Rošin, M. Radunić, T. Ninčević Runjić, M. Čagalj, M. Kontek, and M. Turković, Study on the Potential of Solar Energy Use in the Agricultural and Freshwater Aquaculture Sectors in Croatia, Faculty of Agriculture in Zagreb (FAZ), Faculty of Agrobiotechnical Sciences in Osijek (FASO), and Institute for Adriatic Crops and Karst Reclamation in Split (IACKRS), funded by the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), Zagreb, Croatia, Aug. 2023.

[31] J. T. Stid, S. Shukla, A. D. Kendall, A. Anctil, D. W. Hyndman, J. Rapp, and R. P. Anex, "Impacts of agrisolar co-location on the food–energy–water nexus and economic security," Nature Sustainability, vol. 8, 2025, doi: 10.1038/s41893-025-01546-4.

[32] R. Vezzoni, "Farming the sun: The political economy of agrivoltaics in the European Union," Sustainability Science, 2025, doi: 10.1007/s11625-024-01601-7.

[33] Ü. Ünver, H. Bilgin, and A. Güven, "Pompaj depolamalı hidroelektrik sistemler," Mühendis ve Makina, vol. 56, no. 663, pp. 57–64, 2015.

[34] M. S. Whittingham, "History, evolution, and future status of energy storage," Proceedings of the IEEE, vol. 100, pp. 1518–1534, May 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2190170.

[35] Y. W. Xu and J. Yang, "Developments and characteristics of pumped storage power station in China," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 163, p. 012089, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012089.

[36] C. Yıldız and M. Şekkeli, "Türkiye'de bir rüzgar enerjisi santrali ile pompaj depolamalı hidroelektrik santralin birlikte işletilmesi," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 1, no. 2, pp. 59–66, 2014.

[37] R. B. Alley, S. Blumsack ve D. Bice, "Conventional Hydroelectric Dams," EARTH 104: Climate, Energy, and Our Future, The Pennsylvania State University, Philadelphia, Feb. 25 2025. [Online]. Available: https://courses.ems.psu.edu/earth104/node/1067?utm

[38] S. Holmbacka, D. Silva, R. Chválek, J. Konečný, and A. O. Kareem, "Hidro pompa ve batarya teknolojilerinden yararlanan enerji depolama," konferans bildirisi, Şubat 2012.

[39] "Hidroelektrik Santrali ve Çalışma Prensibi," *Mühendis* web sitesi, 7 yıl önce. [Online]. Available: https://muhendis.web.tr/hidroelektrik-santrali-calisma-prensibi/

[40] Ö. Çiçek, "Pompaj depolamalı hidroelektrik santral tasarımı," M.Sc. thesis, Dept. of Energy Systems Eng., Gazi Univ., Ankara, Türkiye, Ekim 2021.

[41] S. Karambelkar, A. Cantor, T.-K. Bui, B. Turley, M. Fischer, and S. Ames, "Pumped Storage Hydropower in the United States: Emerging Importance, Environmental and Social Impacts, and Critical Considerations," WIREs Water, vol. 12, e70017, 2025. doi: 10.1002/wat2.70017

[42] Eurelectric Türkiye Hidro Çalışma Grubu, Enerji Depolama Teknolojileri ve Pompaj Depolamalı HES Projeleri, 2. Baskı, TESAB Yayınları-3, Türkiye Elektrik Sanayi Birliği Ticari İşletmesi, Ankara, Türkiye, Kasım 2024, ISBN 978-625-94054-2-1.

[43] M. Bozdemir, "Hazneli Pompalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye Açısından Değerlendirilmesi ve Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik, Türkiye, 2013.

[44] V. Öz, “Bir Hidroelektrik Santralinde Francis Türbin Tasarımı,” Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Giresun, Türkiye, 2019.

[45] P. Karaçay, “Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller ve Türkiye’deki Durum,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı, İstanbul, Türkiye, 2010.

[46] H. Göktaş, “Türkiye için pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin önemi ve durum analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye, Temmuz 2018.

[47] N. Orhan and S. Şahin, “Bir Besi Çiftliğinde Güneş Enerji Sisteminin Uygulanması ve Ekonomik Analizi,” Türk Tarım Ve Doğa Bilimleri Dergisi, vol. 9, no. 1, pp. 33–40, Jan. 2022, doi: 10.30910/turkjans.1013347.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. E. Özer and A. Durusu, “Hidro Depolama Destekli Agrofotovoltaik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi,” 7. Bilsel International Efes Scientific Researches and Innovation Congress, İzmir, Türkiye, 2025