T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIMSAL UYGULAMALARDA AGRO-FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Süleyman Furkan KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIMSAL UYGULAMALARDA AGRO-FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Süleyman Furkan KAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 26.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA, Üye
Ege Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Tarımsal Uygulamalarda Agro-fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırmalı 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.

Süleyman Furkan KAYA

İmza

Canım aileme

ve

sevgili eşime

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin tamamlanma sürecinde değerli katkıları, rehberliği ve ilgisiyle her zaman yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım **Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU**'ya,

Tez süreci boyunca verdikleri destek, gösterdikleri ilgi ve hassasiyetleri için **Abdurrahman ADAK** ve **Oğuzhan YAZICI**'ya,

Hayatım boyunca sevgileri ve fedakârlıklarıyla bana güç veren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyip daima yanımda olan ve beni bugünlere getiren biricik **anneme**, **babama** ve **kardeşime**,

Tanıştığımız ilk günden bu yana olduğu gibi bu tez sürecinde de gösterdiği anlayış, sabır ve sevgisiyle her zaman yanımda olan, desteğini her daim hissettiğim, hayatımın rengi en yakın arkadaşım sevgili eşim **Ezgi KAYA**'ya ve **ailesine** de

Tüm içtenliğimle sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım…

Süleyman Furkan KAYA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **vii**

KISALTMA LİSTESİ **viii**

ŞEKİL LİSTESİ **ix**

TABLO LİSTESİ **xii**

ÖZET **xiii**

ABSTRACT **xv**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Literatür Araştırması 1

1.1.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı ve Gelişimi 2

1.1.2 Güneş Enerjisinin Potansiyeli 2

1.1.3 Fotovoltaik Sistemlerin Dünyadaki Gelişimi 3

1.1.4 Tarımın Kökeni 6

1.1.5 Tarım Sektörünün Enerji İhtiyacı 7

1.1.6 Agro-Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı 7

1.1.7 APV Sistemlerin Evrimi, Araştırmalar ve Dünyadaki Gelişimi 9

1.1.8 Agro-fotovoltaik Sistemlerin Önemi, Gerekliliği ve Avantajları 10

1.1.9 Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Potansiyeli ve APV Sistemlerin Önemi 12

1.2 Araştırmanın Amacı ve Kapsam 15

2 AGRO-FOTOVOLTAİK SİSTEMLER **17**

2.1 DIN SPEC 91434 18

2.2 APV Sistemlerin Sınıflandırılması 22
2.2.1 Açık APV Sistemler 23
2.2.2 Kapalı APV Sistemler 31
3 BESİ ÇİFTLİĞİ SENARYOSU 35
3.1 Çiftlikte Kullanılan Elektrikli Ekipmanlar 35
3.2 Çiftliğin Enerji Tüketimi 37
4 SİSTEM TASARIMI VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ ANALİZİ 44
4.1 Sistem Tasarımları 44
4.1.1 Geleneksel PV Sistem Tasarımı 45
4.1.2 Yükseltilmiş APV Sistem Tasarımı 45
4.1.3 Dikey APV Sistem Tasarımı 46
4.2 Simülasyon Sonuçları ve Analizler 47
4.2.1 İlkbahar Sezonu Simülasyon Sonuçları 47
4.2.2 Yaz Sezonu Simülasyon Sonuçları 50
4.2.3 Sonbahar Sezonu Simülasyon Sonuçları 54
4.2.4 Kış Sezonu Simülasyon Sonuçları 57
4.2.5 Yıllık Bazda Simülasyon Sonuçları 61
5 SONUÇ 66
KAYNAKÇA 68
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 76

SİMGE LİSTESİ

V_{oc}	Açık Devre Gerilimi
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
GW	Gigawatt
GWp	Gigawatt Peak
GWh	Gigawatt Saat
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt Peak
P_{max}	Maksimum Güç
I_{max}	Maksimum Güç Akımı
V_{max}	Maksimum Güç Gerilimi
MW	Megawatt
MWh	Megawatt Saat
A_L	Tarımsal Olarak Kullanılabilir Alan
A_N	Tarımsal Olarak Kullanılamayan Alan
W	Watt
Wp	Watt Peak

KISALTMA LİSTESİ

APV	Agro-fotovoltaik
CGIAR	Uluslararası Tarımsal Araştırmalar Danışma Grubu (Consultative Group on International Agricultural Research)
EIA	ABD Enerji Bilgi İdaresi (U.S. Energy Information Administration)
GEPA	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
PV	Fotovoltaik (Photovoltaic)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Global yatay ışınım atlası **3**
Şekil 1.2 Dünya genelinde PV sistemlerin yıllık kurulum durumu ve gelişimi **4**
Şekil 1.3 2023'te kurulan net yenilenebilir enerji üretim kapasitesi **5**
Şekil 1.4 Watt başına ödenen fotovoltaik panel fiyatlarının yıllara göre değişimi **6**
Şekil 1.5 Yükseltilmiş agro-fotovoltaik sistem örneği **8**
Şekil 1.6 Dikey agro-fotovoltaik sistem örneği **8**
Şekil 1.7 Türkiye global güneş radyasyonu potansiyeli (KWh/m ²-yıl) **12**
Şekil 1.8 Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m²-gün) **13**
Şekil 1.9 Türkiye güneşlenme süreleri (saat) **13**
Şekil 1.10 Türkiye'de yıllara göre toplam YES kurulu gücü (MW) **14**
Şekil 1.11 Türkiye'de yıllara göre toplam fotovoltaik sistemlerin kurulu gücü (MW) **14**
Şekil 2.1 Kategori I için temsil **19**
Şekil 2.2 Çeşitli agro-fotovoltaik sistemlerin tepeden görünümü **19**
Şekil 2.3 Kategori II, varyant 1 için temsil **20**
Şekil 2.4 Kategori II, varyant 2 için temsil **20**
Şekil 2.5 APV sistemlerin sınıflandırılması **22**
Şekil 2.6 Komşuköy APV çiftliği projesi **25**
Şekil 2.7 Heggelbach APV Resola Projesi'nin genel görünümü **26**
Şekil 2.8 Heggelbach APV Resola Projesi'nin zeminden görüntüsü **26**
Şekil 2.9 Dresden-Pillnitz APV Projesi'nin genel görünümü **29**
Şekil 2.10 Dresden-Pillnitz APV Projesi'nde çalışan bir tarım makinası **29**
Şekil 2.11 Aasen Solar Park Projesi'nin genel görünümü **30**
Şekil 2.12 Aasen Solar Park Projesi'nin kuşbakışı görünümü **30**
Şekil 2.13 Dinamik APV entegre sera prototip çalışması **32**
Şekil 2.14 Susmedhouse projesinin kuşbakışı görünümü **33**
Şekil 2.15 Susmedhouse projesi PV panel kurulumu **34**
Şekil 3.1 Sezon bazlı günlük enerji tüketiminin saatlik ortlaması **42**
Şekil 3.2 Bir yıllık periyotta ortalama saatlik elektrik tüketimi **43**

Şekil 4.1 Geleneksel PV sistemde kullanılan panelin açısı ve yönü **45**
Şekil 4.2 Yükseltilmiş APV sistemde kullanılan panelin açısı ve yönü..... **46**
Şekil 4.3 Dikey APV sistemde kullanılan panelin açısı ve yönü **46**
Şekil 4.4 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (İlkbahar) **47**
Şekil 4.5 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (İlkbahar)..... **48**
Şekil 4.6 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (İlkbahar) **48**
Şekil 4.7 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (İlkbahar)..... **49**
Şekil 4.8 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (İlkbahar) **49**
Şekil 4.9 Sistemlerin toplam enerji üretimi (İlkbahar)..... **50**
Şekil 4.10 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (İlkbahar)..... **50**
Şekil 4.11 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yaz) **51**
Şekil 4.12 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yaz)..... **51**
Şekil 4.13 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yaz) **52**
Şekil 4.14 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Yaz) **52**
Şekil 4.15 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Yaz) **53**
Şekil 4.16 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Yaz)..... **53**
Şekil 4.17 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Yaz)..... **54**
Şekil 4.18 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Sonbahar)..... **54**
Şekil 4.19 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Sonbahar) **55**
Şekil 4.20 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Sonbahar)..... **55**
Şekil 4.21 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Sonbahar)..... **56**
Şekil 4.22 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Sonbahar)..... **56**
Şekil 4.23 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Sonbahar) **57**
Şekil 4.24 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Sonbahar)..... **57**
Şekil 4.25 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Kış) **58**
Şekil 4.26 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Kış)..... **58**
Şekil 4.27 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Kış) **59**
Şekil 4.28 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Sonbahar)..... **59**
Şekil 4.29 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Kış) **60**
Şekil 4.30 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Kış)..... **60**
Şekil 4.31 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Kış) **61**
Şekil 4.32 Geleneksel PV sistem tasarımı simulasyon çıktıları (Yıllık) **61**
Şekil 4.33 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yıllık)..... **62**
Şekil 4.34 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yıllık) **62**
Şekil 4.35 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Yıllık)..... **63**

Şekil 4.36 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Yıllık) **63**
Şekil 4.37 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Yıllık) **64**
Şekil 4.38 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Yıllık) **64**
Şekil 4.39 Sistemlerin enerji üretimi sonucu satılabilen enerji miktarı **65**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Çiftlik evindeki elektrikli ekipmanların günlük enerji tüketimi **.....36**
Tablo 3.2 Besi çiftliğindeki elektrikli ekipmanların günlük enerji tüketimi**.....36**
Tablo 3.3 Çiftlikteki diğer ekipmanların mevsimlik kullanım süreleri**.....37**
Tablo 3.4 İlkbahar sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi**.....38**
Tablo 3.5 Yaz sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi**.....39**
Tablo 3.6 Sonbahar sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi **.....40**
Tablo 3.7 Kış sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi**.....41**
Tablo 4.1 Sistem tasarımında kullanılan fotovoltaik panelin özellikleri **.....44**

ÖZET

Tarımsal Uygulamalarda Agro-Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırmalı Analizi

Süleyman Furkan KAYA

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Tesisleri Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU

Son yıllarda hızla artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini giderek artırmıştır. Özellikle güneş enerjisi, sürdürülebilir, temiz ve kolay erişilebilir yapısıyla enerji üretiminde öne çıkan bir seçenek haline gelmiştir. Ancak enerji üretimi için ayrılan alanların artışı, tarım arazileri üzerindeki baskıyı da beraberinde getirmiştir.

Tarımın tarihine bakıldığında, ilk çağlarda enerji üretiminde önemli bir rol oynamış, insan ve hayvan gücü üzerinden üretim sağlayarak toplumların gelişiminde merkezi bir konumda yer almıştır. Ancak sanayi devrimiyle birlikte modernleşen üretim teknikleri, sulama sistemleri ve makinelerin yaygınlaşmasıyla tarım, günümüzde büyük miktarda enerji tüketen bir sektör haline gelmiştir. Bu durum, enerji üretimi ile tarımsal faaliyetleri bir araya getiren yenilikçi çözümlere olan ihtiyacı doğurmuştur.

Agro-fotovoltaik sistemler, tarım arazilerinde fotovoltaik panellerin kullanılmasıyla elektrik enerjisi üretimi ve tarımı bir arada, birbirini engellemeden

sürdürülebildiği yenilikçi sistemlerdir. Bu sistemler, güneş panellerinin tarım arazileri üzerine tarımı engellemeyecek şekilde yerleştirilmesiyle enerji üretimi sağlarken, kurulan sisteme göre bitkiler için su tasarrufu ve sıcaklık kontrolü gibi ek faydalar da sunabilmektedir. Aynı zamanda çiftçiler için ek gelir kaynağı oluşturarak ekonomik sürdürülebilirliği desteklemektedir.

Bu çalışmada, agro-fotovoltaik sistemlerinin tarımsal üretim, enerji üretimi ve çevresel açıdan faydaları incelenmiştir. Araştırma, bu sistemlerin arazi kullanım verimliliğini artırdığını, enerji üretimi ve tarımın aynı arazi üzerinde birbirini engellemeyecek şekilde yapılabildiğini göstermektedir. Agro-fotovoltaik sistemlerinin geniş ölçekte uygulanması, gıda ve enerji güvenliği için yenilikçi bir çözüm sunarak sürdürülebilir kalkınmaya önemli katkılar sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Agro-fotovoltaik Sistemler, Güneş Enerjisi, Yenilenebilir Enerji, Tarımda Enerji İhtiyacı, Tarım ve Enerji Entegrasyonu

ABSTRACT

Comparative Analysis of Agro-Photovoltaic Systems in Agricultural Applications

Süleyman Furkan KAYA

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ali DURUSU

The rapidly increasing demand for energy in recent years has significantly raised the importance of renewable energy sources. Solar energy, in particular, has emerged as a prominent option in energy production due to its sustainable, clean, and easily accessible nature. However, the expansion of areas allocated for energy production has also increased pressure on agricultural lands.

Looking at the history of agriculture, it played an important role in energy production in ancient times and was central to the development of societies by enabling production through human and animal power. However, with the Industrial Revolution and the modernization of production techniques, irrigation systems, and the widespread use of machinery, agriculture has become a sector that consumes large amounts of energy today. This has created a need for innovative solutions that integrate energy production with agricultural activities.

Agro-photovoltaic systems are innovative solutions that use photovoltaic panels on agricultural lands to simultaneously produce electricity and sustain agriculture without hindering either one. These systems generate energy by placing solar panels on agricultural lands in a way that does not obstruct farming activities, and

depending on the installed system, they can also provide additional benefits such as water conservation and temperature control for plants. Additionally, they support economic sustainability by providing an extra source of income for farmers.

This study examines the benefits of agro-photovoltaic systems in terms of agricultural production, energy generation, and environmental aspects. The research shows that these systems increase land use efficiency and that energy generation and agriculture can be carried out on the same land without interfering with each other. Large-scale implementation of agro-photovoltaic systems can provide an innovative solution for food and energy security, making significant contributions to sustainable development.

Keywords: Agro-photovoltaic Systems, Solar Energy, Renewable Energy, Energy Needs in Agriculture, Agriculture and Energy Integration

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Araştırması

Günümüzde artan enerji ihtiyacı hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde önemli bir sorun haline gelmiştir. Küresel enerji talebinin hızla artması, fosil yakıtların sınırlı ve tükenebilir olmasıyla birleşince, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmıştır. Bu bağlamda, fotovoltaik (PV) sistemler, güneş enerjisinden elektrik üretmenin etkili ve çevre dostu bir yolu olarak dikkat çekmektedir. PV paneller; evler, ticari binalar, elektrik şebekesine erişemeyen uzak bölgeler ve uzay araçları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1]. Ancak dünya genelinde artan enerji tüketiminin yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklardan enerji üretimini arttırarak çözebilmek mümkün değildir. Aynı zamanda enerjinin verimli kullanılması ve yeni enerji üretim stratejilerinin geliştirilmesiyle çözülebilir.

ABD Enerji Bilgi İdaresi (U.S. Energy Information Administration – EIA), 2018 ile 2050 yılları arasında küresel enerji tüketiminin %50 oranında artmasını öngörmektedir [2]. Bu artışa paralel olarak, enerji talebinin karşılanabilmesi için farklı enerji üretim tekniklerinin entegrasyonu kritik bir öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, fosil yakıtların sınırlı ve tükenebilir olması, bu kaynakların gelecekte kullanılamayacak duruma gelmesine yol açacaktır. Örneğin, mevcut hızla tüketilen petrol rezervlerinin 40 yıl içinde, gazın ise 60 yıl içerisinde tükenmesi beklenmektedir [3]. Bu nedenle, sürdürülebilir enerji üretimi sağlanana kadar fosil yakıtlara dayalı sistemlerden bağımsız bir geçiş planı geliştirilmesi büyük bir gereklilik haline gelmiştir.

Enerji üretiminde yaşanan bu zorlukların yanında, gıda güvenliği de küresel ölçekte devam eden bir sorun olup [4], gıda sektörünün de küresel enerji tüketiminin %30'unu oluşturduğu dikkat çekmektedir [5]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın

(International Energy Agency – IEA) bir raporuna göre dünya genelinde 900 milyondan fazla insanın elektrik erişiminde sorun yaşadığı ve bu sorunun önlenmemesi durumunda 2030 yılı itibariyle 600 milyon insanın hâlâ elektrik erişiminde sorun yaşayacağı tahmin edilmektedir [6]. Bu noktada, enerji üretimini arttırmak ve enerjiye erişimi sağlamak için yenilikçi çözümler ve sistemler gereklidir.

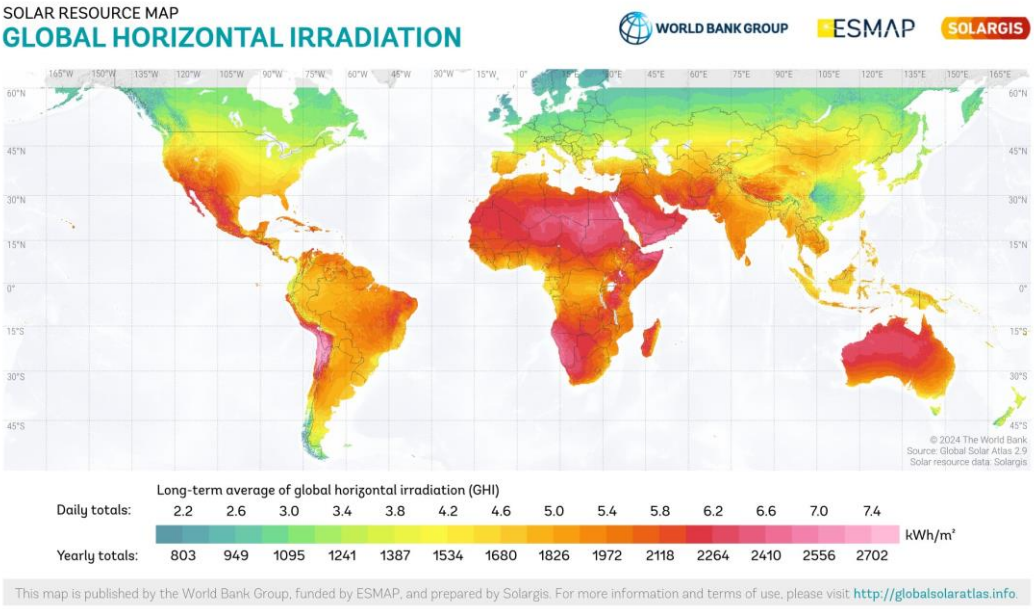
1.1.1 Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı ve Gelişimi

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürmek için tasarlanmış yenilikçi enerji teknolojileridir. Bu sistemler güneş radyasyonunu yarı iletken malzemeler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüştürme için güneş hücreleri kullanılır ve güneş hücreleri ile oluşturulan güneş modüllerinin seri/paralel bağlanmasıyla daha geniş bir enerji ihtiyacı karşılanabilir [7, 3].

PV sistemler, günlük enerji ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisinden faydalanan en ideal yenilenebilir enerji teknolojilerinden biridir. Bu sistemlerin avantajı, yenilenebilir enerji kaynağı olan güneşi kullanarak sıfır sera gazı emisyonuyla çevreye zarar vermeden elektrik üretmesidir [8]. Fotovoltaik paneller, güneş ışığındaki foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürken, panel çıkışından aldığımız doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren bir invertör kullanarak kullanıcıların enerji gereksinimlerini karşılar. Tam anlamıyla bir PV sistem, PV paneller, invertörler, kablolar ve diğer tamamlayıcı elektrik ekipmanları gibi çeşitli bileşenlerin bir arada montajlanarak düzenlenmesiyle oluşur [9].

1.1.2 Güneş Enerjisinin Potansiyeli

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında bolluğu, sürdürülebilirliği ve küresel enerji talebini karşılama potansiyeli ile öne çıkmaktadır [10]. Teorik olarak güneş enerjisi, dünya üzerindeki tüm enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin yalnızca %0,1'inin %10 verimlilikle dönüştürülmesi bile mevcut küresel enerji tüketiminin yaklaşık dört katını karşılayabilir [11]. Güneş ışınımından dünyaya çarpan enerji miktarının $1{,}8 \times 10^{11}$ MW olduğu hesaplanmıştır ve bu elektrik üretimi için kullanılabilir [12].



Şekil 1.1 Global yatay ışınım atlası [13]

Güneş enerjisinin tükenmeyen yapısı, onu diğer enerji kaynaklarından ayıran önemli bir özelliktir. Fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevresel zararları göz önüne alındığında, toplumlar giderek daha fazla güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve diğer yenilenebilir temiz elektrik enerjisi üretim tekniklerine yönelmektedir [14]. Güneş enerjisinin elektrik üretimindeki artan rolü, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacını karşılamak için önemli bir çözüm olarak benimsenmektedir [15].

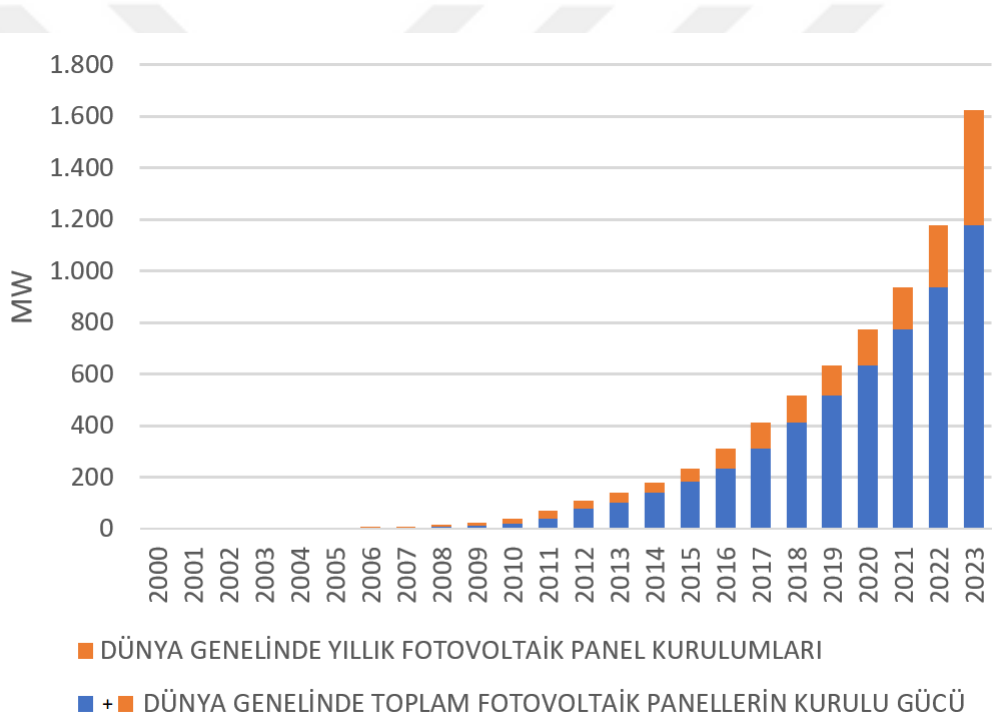
Fotovoltaik (PV) paneller, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde en etkili teknolojilerden biri olarak ön plana çıkmaktadır. PV panellerin elektrik üretimi sırasında sera gazı salımı olmaması, enerji üretim maliyetlerinin düşmesi ve kullanım alanlarının genişlemesi, bu teknolojiyi geleceğin enerji kaynağı olarak ön plana çıkarmaktadır. Uzmanlara göre, PV panellerden elde edilen enerji 2040 yılına kadar en önemli yenilenebilir enerji kaynağı haline gelecektir [16].

1.1.3 Fotovoltaik Sistemlerin Dünyadaki Gelişimi

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmenin temeli, ilk olarak 1839 yılında Alexander Edmond Becquerel tarafından atıldı. Becquerel, iletken bir çözelti içerisinde ışığa maruz kalan bir elektrot aracılığıyla fotovoltaik etkiyi gözlemledi. 1839 yılına dayanan bu keşif PV panellerin çalışmasının ardındaki bilimin gerçek

anlamda anlaşılmadığı bir keşif olsa da bugün ki PV panellerin temelini oluşturmuştur [17].

Dünya çapında fotovoltaik sistemlerin kurulu kapasitesi, 2002 yılına kadar 1 GW'ı dahi geçmezken, 2014 yılı başında 134 GW'a ulaşmıştır [18]. 2016 yılı sonu itibarıyla bu güç %224 artarak 300 GW'a yükselmiş ve büyüme hız kesmeden devam etmiştir. Sadece 2020 yılında kurulan fotovoltaik sistemlerin kapasitesi ise 132 GW'a ulaşmış olup, bu değer 2014 yılı başına kadar dünya genelinde kurulan tüm fotovoltaik sistemlerin toplam kapasitesine eşittir. 2023 yılına gelindiğinde de yalnızca bu yıl içerisinde 447 GW'lık fotovoltaik sistem kurulumu gerçekleştirilmiş ve dünyadaki toplam kurulu fotovoltaik kapasitesi %38'lik bir artışla 1.624 GW'a ulaşmıştır [19].

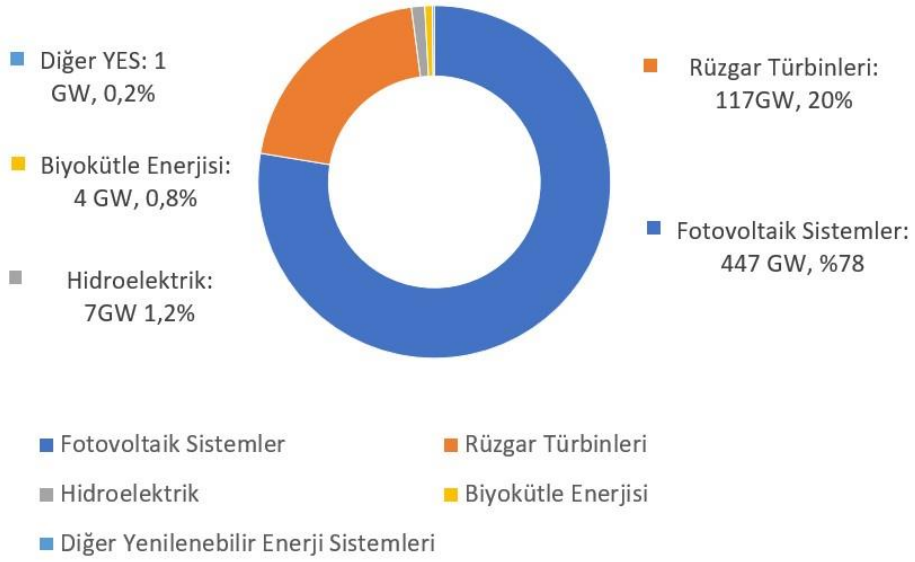


Şekil 1.2 Dünya genelinde PV sistemlerin yıllık kurulum durumu ve gelişimi [19]

IEA'nın 2020 tarihli raporuna göre, fotovoltaik güç santralleri günümüz itibariyle tüm elektrik üretim teknolojileri arasında en hızlı büyüyen kaynaklardan biri konumundadır. Dünyada bir yılda kurulan fotovoltaik sistemlerin toplam kurulu gücü, rüzgâr çiftlikleriyle birlikte küresel enerji üretiminin %80'ini oluştururken, diğer tüm teknolojiler ise yalnızca %20'lik bir paya sahip olmaktadır [20].

2023 yılına baktığımızda ise yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üreten tesisler dünya genelinde şebekeye toplam 576 GW'lık bir kurulu güç eklemiştir. Bu

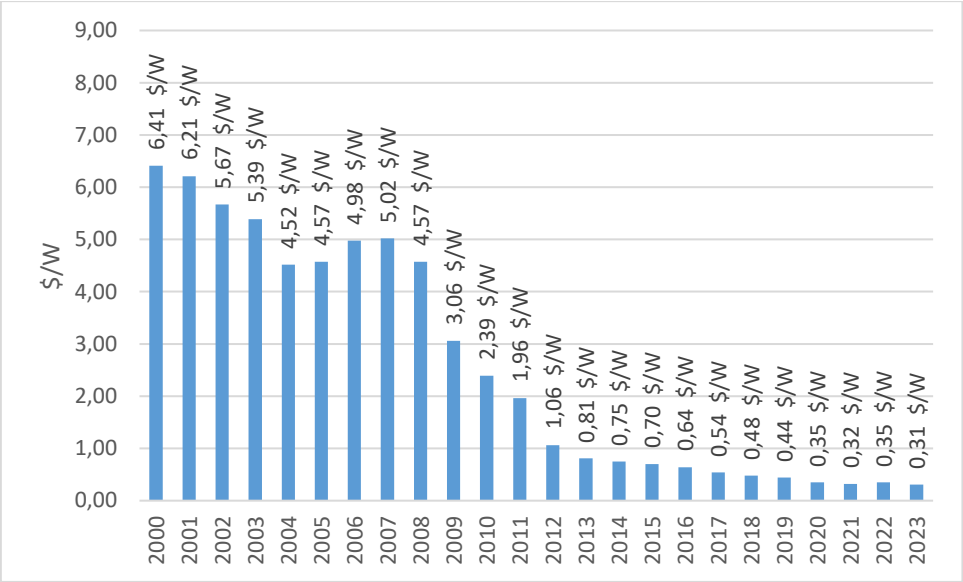
kapasitenin %78'i fotovoltaik panellerden (447 GW), %20'si ise rüzgâr türbinlerinden (117 GW) sağlanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin bu büyüme oranı, 2021 yılındaki %56'lık paya kıyasla 22 puan, 2022 yılındaki %66'lık paya kıyasla ise 12 puan artarak bu seviyelere ulaşmıştır [19].



Şekil 1.3 2023'te kurulan net yenilenebilir enerji üretim kapasitesi [19]

2023'teki bu denli büyüme, küresel enerji sektöründe eşi benzeri görülmemiş bir gelişme olarak kaydedilmiştir. Ancak bu büyümenin büyük bir kısmı, Çin'in liderliğinde gerçekleşmiştir. Çin, 2023 yılında 253 GW'lık yeni fotovoltaik panel kurulumuyla inanılmaz bir büyüme gerçekleştirirken, dünyanın geri kalanı ise toplamda 194 GW'lık fotovoltaik sistem kurulumu gerçekleştirebilmiştir [19].

Fotovoltaik paneller, azalan maliyetlerle birlikte hızla gelişen bir teknolojidir [21]. Fotovoltaik panellerin, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük çevresel ve ekonomik riskler taşıması, güneş modülleri ve ilgili teknolojilerin maliyetlerindeki düşüşle birleşerek, fotovoltaik sistemlerin hem tarımsal hem de endüstriyel uygulamalarda benimsenmesini hızlandırmaktadır [22].



Şekil 1.4 Watt başına ödenen fotovoltaik panel fiyatlarının yıllara göre değişimi [23]

Yenilenebilir enerji çözümlerinin bu şekilde yaygınlaşması, sürdürülebilir kalkınmayı desteklerken aynı zamanda enerji güvenliği ve ekonomik büyüme açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Tüm bunlar, günümüz itibariyle güneş enerjisinin, tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında, birçok ülke ve bölgede tercih edilen bir seçenek olarak ön plana çıktığının ve küresel enerji üretiminde giderek daha fazla yer alacağının bir göstergesidir [24].

1.1.4 Tarımın Kökeni

Tarımın insanlık tarihindeki kökeni, yaklaşık 12.000 yıl öncesine dayanmaktadır [25]. Arkeolojik bulgular, bu geçişin birkaç temel bitki türünün yetiştirilmesi ve hayvanların evcilleştirilmesi konusunda uzmanlaşılmasıyla mümkün olduğunu göstermektedir. İnsanların tarıma yönelmesi, yalnızca yaşam biçimlerini kökten değiştirmekle kalmamış, aynı zamanda ilk medeniyetlerin ortaya çıkışını sağlamıştır [26].

Toplayıcılık ve avcılıktan tarıma geçiş, insan topluluklarına enerji ve malzeme ihtiyaçlarını karşılamada büyük bir avantaj sağlamış ve toplulukların büyümesine olanak tanımıştır. Bu durum, tarımı yalnızca bir gıda üretim yöntemi olmanın ötesine taşımış, sanayi öncesi toplumlar için ana enerji ve malzeme kaynağı haline gelmesiyle insanlık tarihindeki ilk enerji üretim sektörü olarak kabul görmesine de neden olmuştur [27].

1.1.5 Tarım Sektörünün Enerji İhtiyacı

Tarım sektörü, bir enerji üretim sektörü olarak kabul edilmiş olsa da sanayi devrimiyle birlikte modernleşen üretim teknikleri, sulama sistemleri ve makinelerin yaygınlaşmasıyla bir enerji üreticisi olmaktan çıkıp, fosil yakıtlara dayalı büyük miktarda enerji tüketen bir sektör haline gelmiştir [27]. Uluslararası Tarımsal Araştırmalar Danışma Grubu'na (CGIAR – Consultative Group on International Agricultural Research) göre, bugün tarım ve gıda zinciri dünya genelinde üretilen enerjinin yaklaşık %30'unu tüketmekte ve bu süreç yıllık sera gazı emisyonlarının %19-29'unu oluşturmaktadır. Bu yüksek emisyon oranlarının başlıca nedeni, fosil yakıtların tarımda baskın rol oynamasından kaynaklanmaktadır.

Tarım sektörünün enerji bağımlılığı ve tüketimi her yıl artmakta ve özellikle sulama gibi faaliyetlerde çok yüksek miktarda enerji tüketilmektedir [22]. Bu yoğun enerji talebi de hem çevresel hem de ekonomik sorunları beraberinde getirmiştir. Bu nedenle, tarımın günümüzde büyük bir enerji tüketicisi haline geldiği ve bu enerjinin verimsiz kullanımının çeşitli olumsuz etkiler doğurduğu açıktır [28].

Bu durum, yenilenebilir enerji çözümleri arayışını tarım sektörü için bir gereklilik haline getirmiştir. Yeşil enerji ve yenilenebilir enerji uygulamalarının tarımda daha verimli ve çevre dostu bir enerji dönüşümü sağlama potansiyeli, bu konudaki araştırmaların artmasına da öncülük etmektedir [29].

1.1.6 Agro-Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı

Agro-fotovoltaik (APV) sistemler, tarım arazilerinde fotovoltaik panellerin kullanılmasıyla elektrik enerjisi üretimi ve tarımsal ürün yetiştiriciliğinin bir arada, birbirini engellemeden sürdürülebildiği yenilikçi sistemlerdir. Bu sistemlerin genel amacı, tarım ve elektrik enerjisi üretimi için aynı alanın verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır [30, 31].

Bu sistemler, güneş panellerinin tarım arazileri üzerinde, tarımsal faaliyetleri engellemeyecek bir yükseklikte yerleştirilmesi veya açılı-dikey olarak yere montelenip aralarında tarım yapılabilecek şekilde sıralanmasıyla hem enerji üretimini hem de tarımsal ürünlerin yetişmesini aynı anda mümkün kılar. Bu sistemlerin, tarımda verimliliği düşürmeden enerji üretimini sürdürülebilir kılması beklenir.



Şekil 1.5 Yükseltilmiş agro-fotovoltaik sistem örneği [32]



Şekil 1.6 Dikey agro-fotovoltaik sistem örneği [33]

Enerji üretimi ve tarımsal faaliyetler arasında uyumlu bir denge sağlayan APV sistemler, güneş enerjisi ile elektrik üretimi ve tarımsal faaliyetler için arazi kullanımını optimize ederek, her iki üretim biçiminin birbiriyle uyum içinde ve birbirlerini engellemeden gerçekleşmesini sağlar. PV modülleri ile tarımsal ürünler, güneş ışığını paylaşarak hem enerji hem de gıda üretimi gerçekleştirir [34, 35]. Bu nedenle APV sistemler, elektrik enerjisi üretimi için ve tarım için kullanılan araziler arasındaki rekabeti azaltmakta ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkıda bulunmaktadır [34].

Dünyanın farklı bölgelerinde "tarımsal fotovoltaik", "güneş paylaşımı", "PV tarımı" anlamlarına gelecek şekilde de ifade edilebilen bu sistemler, yalnızca enerji ve gıda üretimi değil, su kullanımında da her iki sistem için karşılıklı faydalar sunar [36]. Bu nedenle agro-fotovoltaik sistemler, gelecekte hem tarım hem de enerji sektöründe daha fazla benimsenmesi beklenen, yenilikçi bir yaklaşım olarak görülmektedir.

1.1.7 APV Sistemlerin Evrimi, Araştırmalar ve Dünyadaki Gelişimi

Agro-fotovoltaik (APV) sistemlerin kökeni, 1982 yılında Goetzberger ve Zastrow tarafından önerilen bir konsept olarak başlamıştır. Bu yenilikçi fikir uzun bir süre boyunca bilimsel ve ticari alanlarda sınırlı bir ilgi görmüştür. 21. yüzyılın başına kadar nadiren tartışılan bu kavram, 2000'li yıllarda daha fazla dikkat çekmeye başlamıştır [30].

2000'li yılların başlarından itibaren agro-fotovoltaik sistemler, araştırmalar ve uygulamalarla hızla gelişmiştir. Almanya'da yürütülen Heggelbach APV Resola projesi, bu gelişmelerin önemli noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. 2015-2020 yılları arasında uygulanan proje, PV dizileri altında sebze ve tahıl yetiştirilmesi üzerine araştırmalar yapmıştır. Elde edilen sonuçlar, APV sistemlerinin hem enerji üretimi hem de tarımsal verimlilik açısından etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur [37].

Son yıllarda, APV sistemlerinin küresel çapta uygulanabilirliği giderek artmıştır. 2014 yılından bu yana dünya genelinde 2200'den fazla APV sistem kurulmuştur ve 2020 yılı itibarıyla bu sistemlerin toplam kapasitesinin yaklaşık 2.8 GWp'e ulaştığı tahmin edilmektedir [38]. Ancak, bu sistemler 2021 yılı itibariyle sadece birkaç lider ülke tarafından uygulanmakta ve birçok bölgede tanınmamaktadır. Örneğin, bazı ülkelerde bu sistemler geniş ölçekli kullanım için test edilmemiş durumda olup, bu da teknolojinin yaygınlaşmasının önünde bir engel oluşturmaktadır [39].

Son yıllarda APV sistemlerinin uygulanmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Kırsal alanlarda arazi kullanımının daha verimli hale gelmesiyle, fotovoltaik paneller tarım için kullanılan arazilerle entegre bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Patates, sebze, üzüm ve zeytin gibi çeşitli tarım ürünlerinin bu sistemlerle yetiştirilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, APV

sistemler kaz, koyun ve inek gibi hayvanların yetiştirildiği alanlarla da uyum içinde kullanılabilmektedir. Bu çift kullanımlı arazi yönetimi hem gıda hem de enerji üretiminde sürdürülebilirliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır [39].

APV sistemlere yönelik ilgi, hem ticari uygulamalarda hem de araştırma alanında hızla artmaktadır. Bu artış, yalnızca yeni tesislerin inşasıyla değil, aynı zamanda akademik çalışmalara olan ilginin büyümesiyle de kendini göstermektedir. Son yıllarda, APV sistemler üzerine yapılan bilimsel yayınların sayısında kayda değer bir artış yaşanmış ve bu durum, konunun akademik ve endüstriyel önemini vurgulamıştır [40].

1.1.8 Agro-fotovoltaik Sistemlerin Önemi, Gerekliliği ve Avantajları

Son yıllarda, tarımsal üretim ile enerji üretimini entegre eden agro-fotovoltaik (APV) sistemler; çevresel, sürdürülebilir ve ekonomik faydalarıyla ön plana çıkmaktadır. Bu sistemler, tarım alanlarında güneş enerjisinden yararlanarak enerji üretirken, aynı zamanda tarımsal verimliliği artırma ve kaynak kullanımında etkinlik sağlama potansiyeli sunmaktadır. Özellikle APV sistemler, su pompalama uygulamalarında kritik bir rol üstlenmektedir. Fotovoltaik pompalama sistemlerinin çiftçilere sunulması, tarım alanlarının genişlemesine ve bu yolla tarımsal üretimin artışına önemli katkılar sağlayarak gıda güvenliğini sağlamada önemli bir rol üstlenebilir [8]. Yapılan çalışmalar, bu sistemlerin nehirlerden, kanallardan ve göletlerden sulama suyu çekmek için etkili bir seçenek olduğunu göstermiştir [22].

Elektrik enerjisi, bir ülkenin ekonomik kalkınması için temel bir unsurdur. Modern medeniyetlerdeki tarımsal gelişmeler ve sanayi büyümesi, büyük ölçüde mevcut enerji kaynaklarına bağımlıdır. Ancak, günümüzde halen gelişmekte olan ülkelerin kırsal bölgelerinde birçok insanın elektriğe erişimi sınırlıdır ve sık sık elektrik kesintileriyle karşılaşılmaktadır [3]. Bu noktada agro-fotovoltaik (APV) sistemler, şebekeye erişimi kısıtlı olan köyler ve izole adalar için fosil yakıtlara kıyasla temiz bir enerji alternatifi sunmakta ve elektrik kesintisi sorunlarına çözüm olmaktadır [21]. APV sistemler, çiftliklerin kendi elektriklerini üretmelerine olanak tanırken, aynı zamanda devletin çiftçilere enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla yaptığı ek harcamaların yükünü hafifletir. Bu sayede, devletin üzerindeki mali yük azalır ve ekonomik fayda sağlanır [41].

Agro-fotovoltaik sistemler, toprak suyunun tutulması ve mikro iklim koşullarını iyileştirerek tarımsal verimliliği artırmada önemli bir rol oynar. Bu sistemler tasarımlarına göre, aşırı hava koşullarına karşı koruma sağlayarak, kuraklık gibi zorlu koşullarda su kullanımını optimize eder ve ürün verimliliğini artırır [42]. Gölgeye dayanıklı bitkilerle birlikte kullanıldığında, bu sistemler toprak nemini artırır, buharlaşmayı azaltır ve biyokütle verimliliğini yükseltir. Örneğin, güneş panellerinin altındaki alanda %90 daha fazla biyokütle ve %328 daha fazla su verimliliği sağlanmış, daha yüksek toprak nemi ve su kullanım verimliliği belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir [43]. Bu strateji, özellikle marul, lahana ve ıspanak gibi yapraklı yeşillikler ile patates, havuç, turp ve pancar gibi kök bitkilerinin yetiştirilmesinde oldukça etkiliyken, yonca, patates, gül, arpa, buğday, kuru fasulye, mercimek ve haşhaş gibi gölgeye dayanıklı bitkilerin yetişmesine de olanak tanır [35]. Mahsullerin güneş radyasyonundan korunması ve toprak erozyonunun azalması da agro-fotovoltaik sistemlerin önemli faydaları arasında yer almaktadır [31].

Bu sistemler, tarımsal üretimin yanında enerji üretimi sağlayarak çiftçilerin gelir akışını çeşitlendirmekte ve geçim kaynaklarına katkı sunmaktadır. Yüksek katma değerli üretim ile gıda üretimindeki verim artışı sayesinde çiftçilerin gelirlerini artırarak ekonomik faydalarını güçlendirir [42]. Güneş panellerinin tarıma dahil edilmesi ayrıca su buharlaşmasını azaltmakta, özellikle kurak mevsimlerde ve şiddetli kuraklıklarda su tasarrufu sağlayarak büyük öneme sahip olmaktadır. Gölgelemenin seviyesine bağlı olarak %14-29 arasında su tasarrufu sağladığı gözlemlenmiştir [44]. Bu sağlanan su tasarrufunun yanı sıra, tarım arazisinin sulanmasında kullanılan suyun, aynı anda PV yüzeylerinin temizliği için de kullanılabilir olması önemli bir avantaj sağlamaktadır [40].

APV sistemleri araştırmak amacıyla kurulan APV-RESOLA (Almanya) projesinde, eşit büyüklükte üç arazi seçilmiştir. Bu arazilerden birine sadece patates ekimi yapılmış, diğerine yalnızca PV panel kurulumu gerçekleştirilmiş ve son araziye hem patates ekimi hem de APV sistem kurulumu yapılmıştır. Patatesler yetiştirildikten sonra hasat edilip tartılmış ve parsellerdeki elektrik üretim değeri ölçülmüştür. Sadece PV panel kurulumu yapılan parsel %100 elektrik üretimi olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar son derece dikkat çekici olmuştur. APV sistemin kullanıldığı tarım arazisinde, patates verimi %103'e ulaşırken, elektrik

üretim verimliliği %83 olmuştur. Bu sonuçlar altında, APV sisteminin kullanıldığı tarım arazisinin toplam verimi %186 olarak ölçülmüştür [37].

Sonuç olarak, agro-fotovoltaik sistemler, enerji bağımsızlığını artırarak fosil yakıt bağımlılığını azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin tarım sektörüne entegrasyonu, gıda güvenliğini sağlamada önemli bir adım teşkil ederken [22], güneş enerjisiyle üretilen elektriğin değerinin gölgeye dayanıklı ürün üretimiyle birleştirilmesi, geleneksel tarıma kıyasla çiftliklerde %30'un üzerinde ekonomik değer artışı sağlamaktadır [45]. Ayrıca APV sistemler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak, çiftçiler ve kırsal topluluklar için enerji güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir [46].

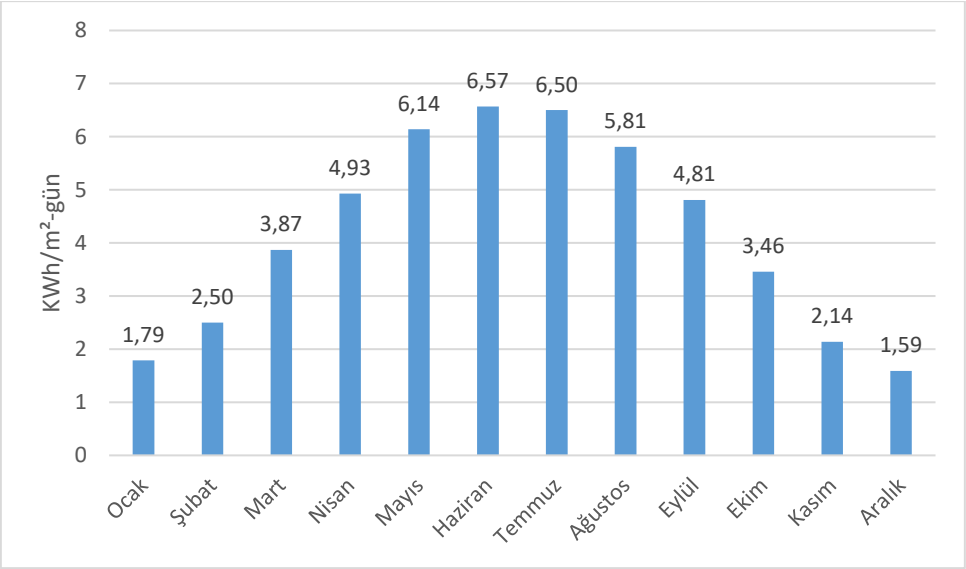
1.1.9 Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Potansiyeli ve APV Sistemlerin Önemi

Türkiye gibi coğrafi olarak avantajlı bir konumda olup tarım arazileri sınırlı olan ülkelerde agro-fotovoltaik sistemler, tarım alanlarını daha verimli kullanmak ve elektrik üretiminin verimliliğini artırmak için etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca Türkiye'nin, güneş enerjisi potansiyeli açısından oldukça iyi bir coğrafyada bulunduğu da söylenebilir [31].

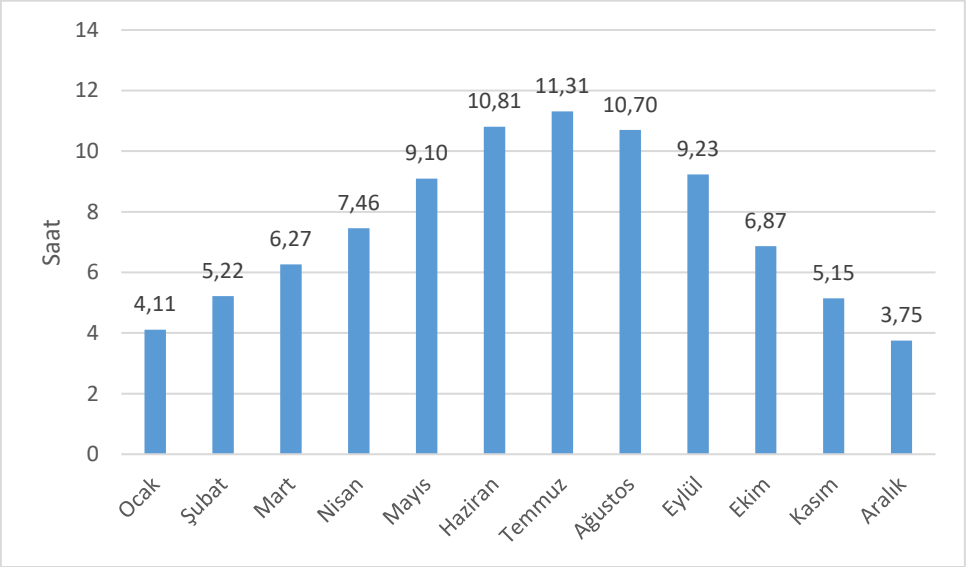
Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)'na göre, Türkiye genelinde günlük ortalama güneşlenme süresi 7,5 saat ve yıllık güneşlenme enerjisi 4.185 kWh/m²'dir [47].



Şekil 1.7 Türkiye global güneş radyasyonu potansiyeli (KWh/m ²-yıl) [47]

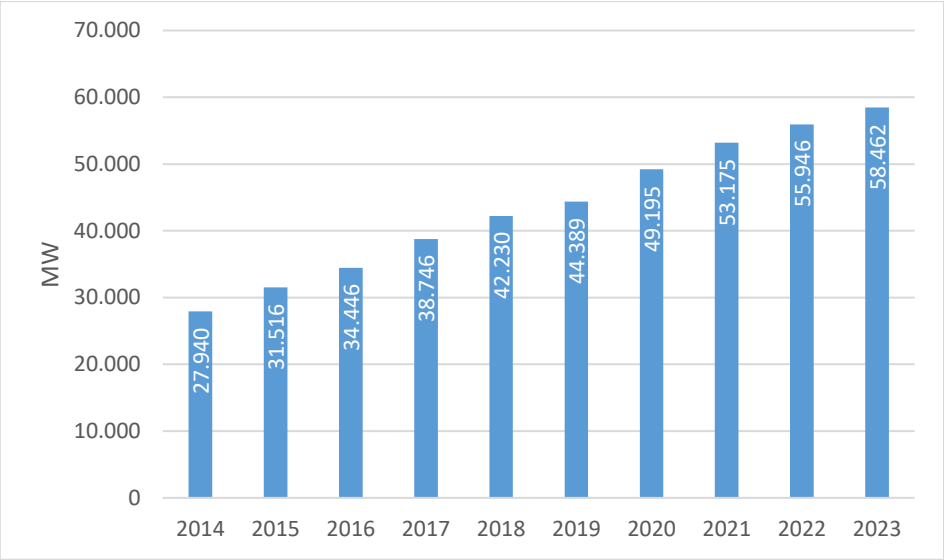


Şekil 1.8 Türkiye global radyasyon değerleri (KWh/m²-gün) [47]

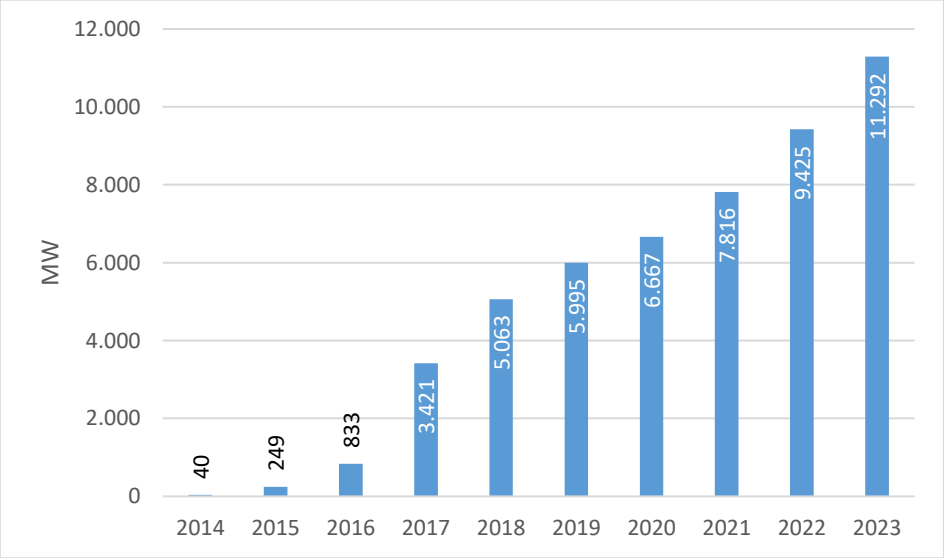


Şekil 1.9 Türkiye güneşlenme süreleri (saat) [47]

2023 yılı sonu itibarıyla Türkiye'deki toplam kurulu güç kapasitesi 2.859 MW artarak 106.668 MW'a ulaşmıştır. Bu artışın 1.867 MW'lık kısmı, yeni güneş enerjisi santrallerinin devreye alınmasıyla sağlanmış ve toplam fotovoltaik sistemlerin kurulu kapasitesi 11 GW'ı aşmıştır. Son 10 yılda, Türkiye'deki PV modülü üretimi 3 fabrikadan 70'e çıkmış ve mevcut PV modülü üreticilerinin yıllık toplam üretim kapasitesi 25-30 GW arasında gerçekleşebilecek şekilde yükselmiştir. PV panel sektörü, Türkiye genelinde yaklaşık 40.000 ile 45.000 arasında tam zamanlı istihdam sağlamakta, bunun yanı sıra doğrudan 150.000 kişiye ve dolaylı olarak 200.000 kişiye istihdam imkânı sunmaktadır [19].



Şekil 1.10 Türkiye'de yıllara göre toplam YES kurulu gücü (MW) [48]



Şekil 1.11 Türkiye'de yıllara göre toplam fotovoltaik sistemlerin kurulu gücü (MW) [48]

Türkiye'nin enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturan tarım sektörü, nüfus artışı ile birlikte büyümekte ve bu da sektörü sürdürülebilir enerji çözümleri için stratejik bir alan haline getirmektedir. Özellikle agro-fotovoltaik sistemler, Türkiye'de farklı nedenlerle büyük bir potansiyele sahip olarak dikkat çekmektedir. Türkiye'nin güneş ışığı açısından bol olan bir coğrafi avantaja sahip olması, AV sistemleri için önemli bir fırsat yaratmaktadır. Ülke, yıllık olarak önemli miktarda güneş ışığı almaktadır, bu da güneş enerjisinden elektrik üretimi için Türkiye'yi ideal bir konumda tutmaktadır [35]. Ayrıca, PV panel dizilerinin yer aldığı

arazilerde sebzelerin yetiştirilmesi mümkündür ve Türkiye'de üretilen tarımsal ürünlerin ise yaklaşık %25'ini sebzeler oluşturmaktadır [31].

Artan enerji talebi, Türkiye'nin enerji tüketiminde büyümeyi beraberinde getirmektedir. Bu talebi karşılamak için APV sistemler hem elektrik üretim kapasitesini artırabilir hem de tarım sektörüne katkı sağlayabilir. Ayrıca, Türkiye'nin büyük tarım arazileri, APV sistemlerinin kurulması için geniş alanlar sunmakta ve bu durum hem gıda üretimini hem de enerji üretimini artırma potansiyeli taşımaktadır [31].

Sonuç olarak, Türkiye'de tarımsal fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliği, ülkenin coğrafi avantajları, artan enerji talebi ve geniş tarım arazileri ile uyumlu bir şekilde büyüyebilir. Bu sistemler, sadece elektrik üretimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda tarım sektörüne de katkı sağlayarak sürdürülebilir bir gelecek için önemli fırsatlar sunmaktadır.

1.2 Araştırmanın Amacı ve Kapsam

Günümüzde tarımsal üretim ve enerji üretimi, küresel sürdürülebilirlik açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Artan enerji talebi, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi ve iklim değişikliği gibi faktörler, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmiştir. Ancak, tarım arazilerinin enerji üretimi için kullanılması, gıda güvenliği açısından çeşitli riskler barındırmaktadır. Bu nedenle, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini koruyarak aynı zamanda enerji ihtiyacını karşılayacak çözümler geliştirilmesi giderek daha önemli hale gelmiştir.

Bu tezde, agro-fotovoltaik (APV) sistemlerin tarımsal üretim üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilerek, enerji üretimi ve tarım faaliyetlerinin bir arada yürütülebilirliği ele alınmıştır. Tarım arazisine sahip bir besi çiftliği senaryosu üzerinden, bu tür sistemlerin uygulanabilirliği analiz edilmiş ve çiftliğin enerji ihtiyacını karşılamadaki etkinliği incelenmiştir. Ayrıca, APV sistemler ile geleneksel fotovoltaik sistemler karşılaştırılarak, her iki modelin avantajları ve kısıtları ortaya konulmuştur.

Çalışma kapsamında, tarımsal üretimi olumsuz etkilemeden yenilenebilir enerji üretiminin nasıl entegre edilebileceği, farklı APV sistem tasarımları ve bunların verimlilik üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Böylece, hem enerji üretiminin

sağlanması hem de tarımsal üretimin sürdürülebilirliğinin korunması için optimal çözümler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2
AGRO-FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

APV sistemlerinin verimliliğini artırmak için tasarım aşamasında birçok parametre dikkate alınmalıdır. PV dizisinin yönü, güneş ışınımı, eğim açısı, mevsimsel değişiklikler ve toprağın albedo değeri gibi faktörler önemli rol oynar. Uygun ürün seçimi, APV sistem tasarımında merkezi bir öneme sahiptir. Gölgeye dayanıklı bitkiler, düşük ışık koşullarında bile verimli fotosentez yaparak PV yoğunluğunu ve panel dizisinin tasarımını etkiler, aynı zamanda tarımsal sistemin ihtiyaçlarını şekillendirir. Bu durum, sistemin yatırım getirisini doğrudan etkileyebilir. APV sistemler, mahsullerin ihtiyaçlarına göre belirli bir gölgeleme düzeyine uyarlanmasını ya da PV panel yoğunluğunun, gölgeye duyarlı mahsullere göre optimize edilmesini gerektirir. PV paneller, mahsulleri kısmi olarak gölgelese de, tasarıma bağlı olarak dolu, don, kar, rüzgar ve güneş yanığı gibi aşırı hava koşullarına karşı koruma sağlayabilir. Ayrıca, konvektif soğutma, buharlaşma ve terleme oranlarının azalması ve yağmur suyu toplama gibi avantajlar, sistemin ısı stresini azaltabilir [49].

APV sistemlerinin tasarımı sırasında en iyi konumun seçilmesi ve uygun alanların belirlenmesi esastır, çünkü bu adım sistemin genel performansını etkiler. Bu amaçla birçok araştırmacı, tasarım tabanlı enerji modelleri oluşturmak için çeşitli yazılım programları kullanmaktadır [50].

Tarımsal fotovoltaik sistemler, çiftçilik türlerine göre farklılık gösterebilir. Tarla mahsulü çiftçiliği, buğday ve pirinç gibi yıllık olarak yetiştirilen mahsulleri kapsar ve genellikle daha düşük ekonomik değere sahiptir. Meyve bahçesi çiftçiliği ise, elma ve üzüm gibi yüksek ekonomik değere sahip çok yıllık ürünleri içerir. Bu ürünler, dolu/gölgelik ağları ve plastik örtüler gibi koruyucu önlemler gerektirebilir [51]. Çiftlikte yetiştirilen ürün türleri ve mevcut arazinin büyüklüğü, APV sistem tasarımını büyük ölçüde etkileyen önemli faktörlerdir. Aynı zamanda, bazı APV

sistemlerde, fotovoltaik panellerin altında veya arasında yetiştirilen otların çiftlik hayvanları tarafından otlatılması mümkündür. Panel dizileri, hayvanların altlarından geçebilmesi veya daha fazla bitki örtüsü büyümesi için belirli ölçüde yükseltilebilir [52].

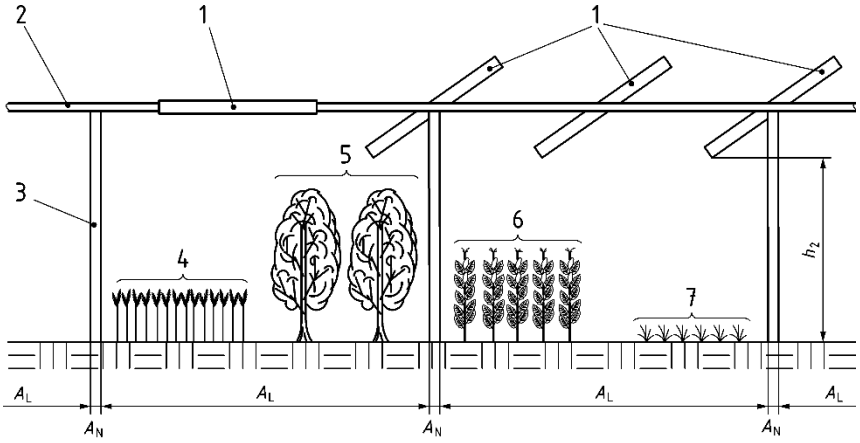
Günümüzde APV sistemler için kesin bir tanım olmasa da [53], DIN SPEC 91434 Alman standardı, APV sistemleri belirli bir düzeyde tanımlamaktadır. Bu bölümde, Alman standardı ve dünya genelindeki literatürde APV sistemlerin tanımlamaları ayrı ayrı incelenmiştir.

2.1 DIN SPEC 91434

DIN SPEC 91434 standardı [54], agro-fotovoltaik (APV) sistemleri, bir tarım arazisinin birincil kullanım olarak tarımsal üretim ve ikincil kullanım olarak bir PV sistem aracılığıyla elektrik üretimi için aynı arazi alanının bir arada kullanılması olarak tanımlar. Arazinin çift yönlü kullanımı, ekolojik ve ekonomik verimliliği artırmakla birlikte, pratikte tarımsal üretim ile agro-fotovoltaik sistemler arasında olumlu bir sinerji yaratabilir.

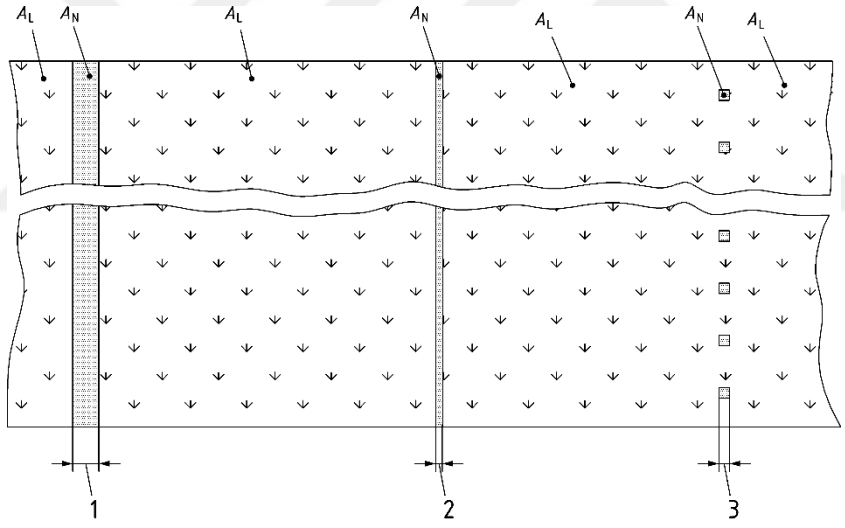
APV sistemler, iki temel kategoride tanımlanmıştır. Yükseklikte kurulan sistemler (Kategori I) ve zemin seviyesinde kurulan sistemler (Kategori II). Her iki kategori, tarımsal faaliyetlere uygun şekilde dört ana kullanım alanında sınıflandırılabilir. Kalıcı ve çok yıllık ürünler, yıllık ve çok yıllık ürünler, biçme amaçlı kalıcı otlak alanlar ve mera olarak kullanılan kalıcı otlak alanlar.

Özellikle kategori I sistemler, en az 2,10 metre net yüksekliğe sahip kurulumlarla karakterize edilir. Bu sistemlerde, güneş modülleri farklı açılarda ve konumlarda monte edilerek tarımsal olarak kullanılabilir alanı (A_L) kısmen veya tamamen kaplayabilir. Tarımsal olarak kullanılamaz alan (A_N), tarımsal yetiştirme önerisine uygun olarak, kurulumun kapladığı alan ve tarlanın çiftçilik sırasında geleneksel tarım için artık uygun olmayan alanlarıyla sınırlıdır.



A_L Tarımsal olarak kullanılabilir alan
A_N Tarımsal olarak kullanılamaz alan
h_2 Net yükseklik 2,10 m'nin üzerinde
1 Güneş modülü örnekleri
2 Destek elemanı
3 Montaj yapısı
4-7 Tarımsal ürün örnekleri

Şekil 2.1 Kategori I için temsil [54]

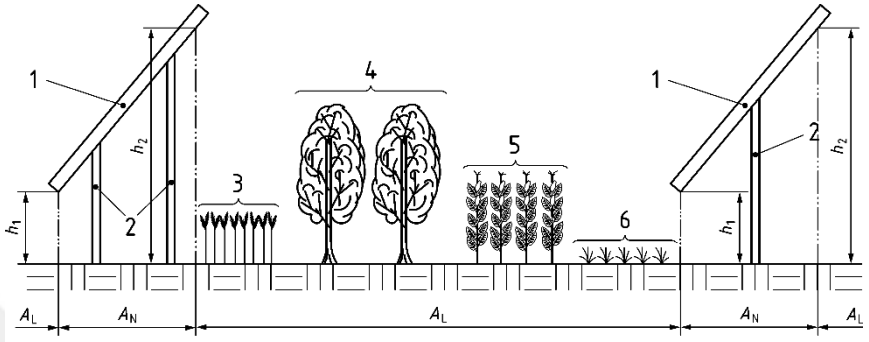


A_L Tarımsal olarak kullanılabilir alan
A_N Tarımsal olarak kullanılamaz alan
1 ve 2 Farklı genişliklere ve yalnızca tek bir işleme yönüne sahip, zemin seviyesinde APV sistemler (kategori II) veya yükseltilmiş APV sistemler (kategori I)
3 Her yönde işlenebilirliğe sahip, yükseltilmiş APV sistemler (kategori I)

Şekil 2.2 Çeşitli agro-fotovoltaik sistemlerin tepeden görünümü [54]

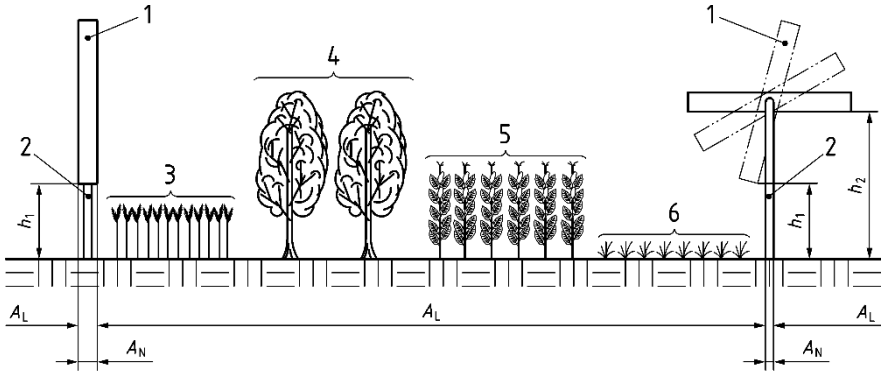
Kategori II tarımsal APV sistemler, sistem sıraları arasındaki alanın tarım için kullanıldığı, zemine montajlı sistemlerdir. Bu kapsamda, güneş modüllerinin bir veya iki kazık üzerine belirli bir açıyla sabit olarak yerleştirildiği tarımsal fotovoltaik sistemler (Kategori II, varyant 1) ile güneş modüllerinin bir kazık üzerine dikey veya ayarlanabilir (izlemeli) olarak yerleştirildiği sistemler (Kategori

II, varyant 2) arasında bir ayrım yapılır. Genel olarak, 2,10 metre altındaki net yüksekliğe sahip modüllerin altındaki alan, tarım için uygun olmayan arazi (A_N) olarak değerlendirilir. Ancak bu net yüksekliğin altında kalan alanın da tarımda kullanıldığı ve bu alan için %66'lık bir verim sağlanabildiği belirtilirse, A_N buna göre yeniden düzenlenebilir. Teknik koşulların yerine getirilmesi durumunda, destek yapılarına kadar çiftçilik yapılabilmesi mümkün olabilir.



A_L	Tarımsal olarak kullanılabilir alan
A_N	Tarımsal olarak kullanılamaz alan
h_1	Net yükseklik 2,10 m' nin altında
h_2	Net yükseklik 2,10 m' nin üzerinde
1	Güneş modülü örnekleri
2	Montaj yapısı
3-6	Tarımsal ürünlerin örnekleri

Şekil 2.3 Kategori II, varyant 1 için temsil [54]



A_L	Tarımsal olarak kullanılabilir alan
A_N	Tarımsal olarak kullanılamaz alan
h_1	Net yükseklik 2,10 m' nin altında
h_2	Net yükseklik 2,10 m' nin üzerinde
1	Güneş modülü örnekleri
2	Montaj yapısı
3-6	Tarımsal ürünlerin örnekleri

Şekil 2.4 Kategori II, varyant 2 için temsil [54]

Tarımsal fotovoltaik sistemlerin uygulanmasında üst yapı ve alt yapıların etkileri, tarımsal olarak kullanılabilir alanlarda belirli kayıplara yol açabilir. Bu kapsamda, kategori I için toplam proje alanının %10'u, kategori II için ise %15'i aşmayacak

şekilde bir kayıp sınırı belirlenmiştir. Ayrıca, tarımsal faaliyetlerin devamlılığı için toprak işleme alanlarının tamamen ekilebilmesi ve gerektiğinde araç geçişine olanak tanıyacak şekilde düzenlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu düzenlemeler, tarımsal fotovoltaik sistemlerin hem tarımsal üretime zarar vermemesi hem de mevcut arazi kullanımını mümkün olduğunca sürdürülmesi açısından gereklidir.

Tarımsal APV sistemlerin inşasından sonra, sistemin kurulu olduğu toplam proje alanındaki ürünlerden elde edilen verimin, referans verimin en az %66'sı oranında korunması gerekmektedir. Bu oran, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından kritik bir eşik olarak kabul edilmektedir. Verimdeki azalma; APV sistemin üst yapıları ve alt yapıları nedeniyle tarımsal olarak kullanılabilir arazinin kaybı, gölgeleme etkisi, su mevcudiyetindeki azalmalar ve benzeri faktörlerden kaynaklanabilir. Bu tür etkiler, sistemlerin tasarım ve planlama aşamalarında göz önünde bulundurulmalıdır.

Referans verimdeki üçte bir oranındaki maksimum verim azalması, sistem kurulumundan kaynaklanan doğrudan arazi kaybı ile tarımsal fotovoltaik sistemlerin neden olduğu gölgeleme, dengesiz su dağılımı ve mikro iklim değişiklikleri gibi çevresel etkilerden hesaplanmaktadır. Bu tahmin, kalifiye personel tarafından yapılmalı ve analiz edilmelidir. Sistemlerin boyutları ve yükseklikleri de tarım arazilerinde uygulanan çiftçilik türüne uygun şekilde belirlenmelidir.

Tarım için kullanılan alanların üzerinde en az 2,10 m net yükseklik sağlanması da bir diğer önemli gerekliliktir. Bu yükseklik, tarım arazisinin önceki kullanımının etkilenmemesi adına büyük önem taşır. Net yükseklik, tarım arazisinin tabanı ile sistemin en alt yapı elemanının alt kenarı arasındaki serbest dikey uzunluk olarak tanımlanır. Hareketli yapı elemanları söz konusu olduğunda, net yükseklik en alt kenarın zemine en yakın olduğu durumda ölçülmelidir. Bu standart, tarımsal ekipmanların sorunsuz şekilde kullanılabilmesi ve alanın işlevselliğinin korunması açısından kritik öneme sahiptir.

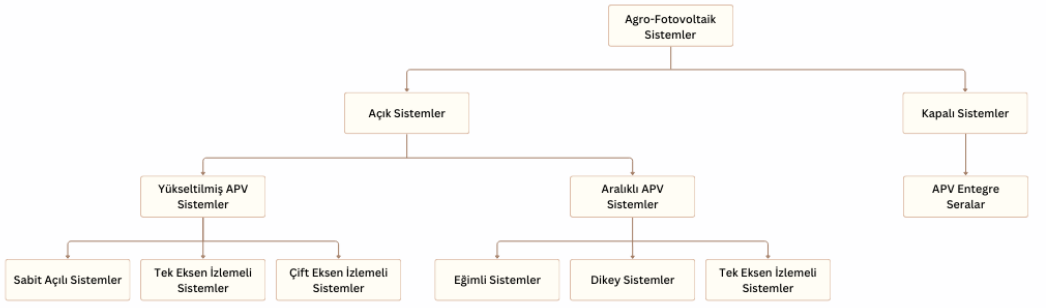
Tarımsal fotovoltaik sistemlerin planlanması sırasında, artık tarım için kullanılamayan alanların sınırlandırılması da gereklidir. Bu kapsamda kategori I için, sistem kurulumundan sonra kullanılmaz hale gelen alanın toplam proje alanının %10'undan az olması beklenmektedir. Bu sınırlama, tarımsal arazilerin

verimli kullanımını desteklemeyi hedefler. Ayrıca, sistemin tasarımında işçilerin ve makinelerin güvenli bir şekilde çalışabilmesini sağlayacak açıklık profili dikkate alınmalıdır. Özellikle tarım makinelerinin dönüş yapabileceği alanlar planlama aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır.

Kategori II sistemlerinde ise boyut ve yükseklik yine tarım arazisindeki çiftçilik türüne göre ayarlanmalıdır. Bu sistemlerin de tarımsal faaliyetleri aksatmayacak şekilde uyarlanması gereklidir. Ayrıca, kategori II kapsamında artık tarımsal olarak kullanılamayacak alanın toplam proje alanının %15'inden az olması beklenmektedir. Bu gereklilikler, hem tarımsal üretimi desteklemek hem de yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmek için dengeli bir yaklaşımı temsil etmektedir.

2.2 APV Sistemlerin Sınıflandırılması

APV sistemler genellikle sistem türüne (kapalı veya açık), yapı türüne (aralıklı veya yükseltilmiş APV, APV entegre seralar) ve modül eğimine (sabit, tek eksenli izleme veya çift eksenli izleme) göre sınıflandırılır [55, 56]. Bu sistemler, yere monte edilen ve amacı sadece enerji üretimi olan geleneksel PV sistemlerin ötesinde tasarım ayarlamaları gerektirebilir [57].



Şekil 2.5 APV sistemlerin sınıflandırılması

Açık APV sistemler genel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Yükseltilmiş APV sistemler ve aralıklı APV sistemler [52]. Kapalı APV sistemler, yani APV entegre seralar, ürünlerin mikro iklimini açık sistemlere kıyasla daha fazla etkiler. Bu sistemler, genellikle folyo veya cam kaplamalarla koruma altına alınır ve belirli iklim kontrol mekanizmalarına sahiptir. Buna karşın, açık APV sistemleri bu tür koruma veya kontrol mekanizmalarına gerek duymaz ve daha değişken mikro iklim koşulları sergiler [49].

2.2.1 Açık APV Sistemler

2.2.1.1 Yükseltilmiş APV Sistemler

Yükseltilmiş APV sistemler, güneş panellerinin belirli bir yükseklikte yerleştirildiği ve altında tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirilebildiği bir yapıdır [57]. Bu sistemlerde, güneş modülleri genellikle 1,8 metreden daha yüksek olacak şekilde tasarlanır, bu sayede bitki örtüsünü engellemeden üzerine yerleştirilmiş olur. Genellikle 2 ila 6 metre yüksekliğinde olan bu modüller [56], güneş ışığını keserek gölgeleme yapmasına rağmen, bitkileri kötü hava koşullarından koruyarak bariyer görevi de görebilir [52, 49]. Aynı zamanda bu sistemler daha hantal, pahalı ve inşa edilmesi zor olma dezavantajlarına sahiptir [53].

Yükseltilmiş APV sistemlerde, tarımsal faaliyetlerin yapılabilmesi için belirli bitki türlerine uygun bir yapı tasarımı gereklidir. Özellikle meyve ağaçları, üzümler ve narin sebzeler gibi yüksek değerli mahsuller bu tür sistemlerde daha yaygın olarak bulunabilir [52]. Ayrıca bu sistemler, yükseklikleri ile tarımsal makinelerin bu yapının alt kısmında rahatlıkla çalışabilmesini sağlarken aynı zamanda panellerin aralıklı olmasıyla bitkilerin belirli bir yeterlikte ışık almasını mümkün kılar. Panellerin yerleşimi, tarlada yetiştirilen ürünlere göre uyarlanmalıdır çünkü fotovoltaik panellerin arasındaki mesafe, tarlanın gölgeli ve aydınlık alan oranını etkileyerek mahsuller üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [58].

Yükseltilmiş APV sistemlerinin verimliliği, panellerin izleme özelliklerine de bağlıdır. Örneğin, tek eksenli izleme sistemleri, panellerin güneşi takip etmesine imkân verir ve bu sayede ışık miktarını optimize eder. Bu izleme sistemi, aynı zamanda aşırı hava koşullarında (örneğin, yüksek sıcaklıklar veya yoğun yağışlar) bitkileri fiziksel olarak koruma işlevi de görür. Ancak, bu sistemlerin uygulanabilmesi için her bir bitki türüne ve tarlanın coğrafi konumuna özel izleme algoritmaları geliştirilmesi gerekmektedir. Bu da daha yüksek bir yatırım maliyeti oluşturur [58].

Diğer taraftan çift eksenli izleme sistemleri, kazıklar üzerine monte edilen yatay ana eksenin yanında güneş panellerini tutan ikinci bir eksen ilave edilerek kurulur. İki eksen de, elektrik motorları tarafından çalıştırılarak güneşi iki eksenli olarak takip etmesine olanak tanır [59]. Modül sıraları arasındaki mesafe 8 ila 12 m arasında değişmesinden dolayı PV modüllerinin optimum enerji üretimi sağlanır

ancak PV panellerin araziye oranına göre düşük kaplama oranında kalmasına neden olur [58].

İsveç'in Lanna bölgesinde gerçekleştirilen bir simülasyon çalışmasında dikey sabit, tek eksenli ve çift eksenli agro-fotovoltaik güneş takip sistemleri değerlendirilmiştir. Araştırma, çift eksenli takip sisteminin ışık dağılımında en iyi performansı gösterdiğini ve ışık kaybını en aza indirdiğini ortaya koymuştur [60]. Bununla birlikte, izleme mekanizmasına sahip PV sistemlerinin genellikle tasarımı ve inşası daha maliyetli olmakla birlikte, enerji ve tarım ihtiyaçlarını bir araya getiren izleme algoritmalarını geliştirmek de oldukça zorlu bir süreçtir [49].

Yükseltilmiş APV sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, fotovoltaik panellerin yüksekliğidir. Bu yükseklik sayesinde, invertörler ve diğer elektrik bileşenleri güvenlik önlemlerine ihtiyaç duymadan daha kolay bir şekilde yerleştirilebilir. Ayrıca, yağmur suyu hasadı ve sulama yönetimi gibi çevresel faydalar da entegre edilebilir. Ancak, yere monteli sabit sistemlere göre daha yüksekte olduğundan daha yüksek rüzgâr yükleri gibi zorluklar da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, bu sistemlerin yapısal gereksinimlerinin daha güçlü olması gerekebilir [57].

- Komşuköy APV Çiftliği Projesi

İstanbul/Beykoz'un kuzey-doğusunda bulunan Komşuköy APV Çiftliği Projesi [61] 2022 yılında Enerjisa Üretim ortaklığıyla kurulmuş bir yükseltilmiş APV sistemdir. 387 m²'lik alana kurulan sistem, -23° derecelik güney yönelimine ve 21° derecelik panel açısına sahiptir. Bi-facial paneller, 3 metre yüksekliğe aralarında 1,2 metrelik boşluk olacak şekilde yerleştirilmiştir. Tesisin toplam kurulu gücü 21,4 kWp ve yıllık beklenen enerji üretimi 30,57 MWh'dir.



Şekil 2.6 Komşuköy APV çiftliği projesi [61]

Çiftlikte APV sistemlerin altında ekilen biberiye, salatalık, yaban mersini ve dolmalık biberin veriminde artış gözlemlenmiştir. Buna karşılık, kapya biber, patlıcan ve sivri biberde verim düşüşü yaşanmıştır. Biberiye veriminde 2,5 kat, salatalık veriminde ise %90 artışla en yüksek verimlilik artışları kaydedilmiştir. Buna karşılık, kapya biberde %30 ve patlıcanda %25 ile en yüksek verim düşüşleri görülmüştür. Genel olarak, ekinlerdeki verim düşüşleri ve artışlarının yanı sıra elektrik üretimi de dikkate alındığında, arazi verimi %33 artarak 1,33 seviyesine ulaşmıştır.

- Heggelbach APV Resola Projesi

Heggelbach APV Resola Projesi [62], 2016 yılında Almanya'nın Konstanz gölü yakınlarında bulunan Hofgemeinschaft Heggelbach çiftliğinde inşa edilmiştir. 30 yılı aşkın süredir 165 hektarlık alanda faaliyet gösteren çiftlikte, 3400 m²'lik APV sistem uygulama alanına kışlık buğday, patates, kereviz ve yonca otu ekilerek deneyler yapılmıştır. Toplam 194,4 kWp güce sahip, 270 Wp'lik 720 PV modülü, yerden 5 metre yüksekliğinde ve 9,5 metre aralıklarla güney-batı yönüne bakan bi-facial panellerle kurulmuştur. Bu sistem, yere monteli geleneksel PV sistemlere göre %25 daha düşük panel yoğunluğuna sahip olsa da, panel sıralarının aralıklı yapısı, bitkilerin yeterli güneş ışığı almasını sağlamıştır. Yerden 5 metre yükseklikte bulunması ise biçerdöver gibi büyük tarım makinelerinin paneller altında rahatça çalışmasına olanak tanımıştır.



Şekil 2.7 Heggelbach APV Resola Projesi'nin genel görünümü [62]



Şekil 2.8 Heggelbach APV Resola Projesi'nin zeminden görüntüsü [62]

PV modüllerinin altında yetiştirilen ürünlerin verimi, modül kullanılmayan boş tarım arazisine kıyasla %80'in üzerinde kalmıştır ve bu durum fotovoltaik panellerle birlikte değerlendirildiğinde, arazi verimi %160'a yükselmiştir. Bu sonuçlar, sistemin ticari olarak uygulanabilir bir model olarak planlanmasına olanak sağlamıştır.

2.2.1.2. Aralıklı APV Sistemler

Aralıklı APV sistemleri, sabit PV modül sıralarının arasında tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü sistemleri ifade eder [57]. Bu sistemler, temel olarak üç ana kategoride incelenebilir. Bunlar eğimli, dikey ve tek eksen izlemeli APV sistemlerdir.

Zemine monte edilmiş sabit eğimli APV sistemler, zemine monte edilen geleneksel PV sistemlere benzer montaj yapısı nedeniyle [56] Avrupa'da kurulan en eski tarımsal fotovoltaik sistemler arasında yer almaktadır [58]. Bu sistemlerde, PV modül sıraları arasındaki mesafeler artırılarak, tarla mahsullerinin yetiştirilmesi veya hayvan otlağı olarak kullanılmasına olanak sağlanır. Güney veya kuzeye bakan bu sistemler sabit bir eğime sahip olup, güneş ışığını en verimli şekilde almak için ideal açıyla konumlandırılırlar. Bu tür sistemler, daha geniş alanlara sahip işletmeler için uygun olabilir. Ancak, ağır tarım makinelerinin kullanımı açısından sınırlamaları bulunmaktadır. Bununla birlikte, aşırı iklim olaylarına karşı hayvanlara geçici barınak sağlama gibi avantajlar sunmaktadır [58]. Öte yandan, eğimli sistemlerde arazi kullanım verimliliği, yükseltilmiş APV tasarımlarına kıyasla daha düşüktür [57]. Ayrıca, dikey APV sistemlere kıyasla çok daha fazla alan kapladığından, tarım için kullanılabilir arazi oranı daha düşüktür [50]. Aynı zamanda, yükseltilmiş APV sistemler daha çok bahçecilik için kullanılırken, aralıklı APV sistemleri mera ve tarla tarımına daha uygundur [55].

Tek eksen izlemeli aralıklı APV sistemler ise güneşin hareketine paralel olarak kendisini ayarlayabilen sistemlerdir. Bu sistemlerde, kuzey-güney doğrultusunda yerleştirilen PV panellerinin eğim açısı gün boyunca sürekli olarak değişir. Sabahları doğuya yönelen paneller, öğle vakti yatay hale gelir ve akşam ise batıya yönelir [63]. Bu hareketli yapısına rağmen, diğer sistemlerde olduğu gibi panel sıraları arasında tarım yapmaya izin verir. Ancak, tarım yapılacak alan, panellerin dönme hareketi sırasında süpüreceği alan dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

Dikey APV sistemlerde, diğer sistemlerden farklı olarak, güneş panelleri doğu ve batı yönüne bakacak şekilde dikey konumda yerleştirilir [63]. Bu sistemlerin atılımını sağlayan en önemli etkenlerden biri, bi-facial PV modüllerinin yakın zamandaki gelişimidir [58]. Bi-facial panellerin arka yüzeylerinin, ön yüzeylerine oranla %80-90'a kadar verim sağlayabilmesi, dikey APV sistemler için büyük bir avantaj oluşturmaktadır. Paneller doğu ve batı yönüne baktığından, panellerin ön

yüzüne ve arka yüzüne gelen güneş ışınları sayesinde elektriğin çoğu sabah ve akşam saatlerinde üretilir [64]. Ancak, sabah ve akşam saatlerinde tam gölge oluşurken, öğle saatlerinde ışık dağılımının düzensiz olması, bazı tarımsal uygulamalarda ürünlerin heterojen şekilde büyümesine neden olabilir [57]. İsveç'te dikey APV sistem uygulanan bir tarım arazisinde patates ve yulaf verimi üzerine yapılan bir araştırmada, sıra mesafesinin 20 metreden 5 metreye düşürülmesinin ardından ürün veriminde %50'lik bir azalma gözlemlenmiştir [65]. Bununla birlikte, dikey modüllerin daha az alan kaplamasının sunduğu avantaj sayesinde, arazinin %90'ına yakın bir kısmı tarım için korunabilir ve modül sıraları arasında çeşitli tarım faaliyetleri yürütülebilir [50]. Ayrıca, dikey APV sistemlerde kirlenme oranının ihmal edilebilecek derecede küçük olması, bakım maliyetlerini azaltarak sistemin cazibesini artırmaktadır [66]. Öte yandan, tarım arazisinin ve kullanılan iş makinelerinin büyüklüğü gibi faktörler göz önüne alındığında, yükseltilmiş APV sistemlerinin kurulumu zor ve maliyetli olabilirken, tarla çiftçiliği gibi uygulamalara uygun olarak, dikey APV sistemler daha pratik ve ekonomik bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [57].

Genel olarak tüm sistemler, tarım arazilerine güneş enerjisinden elektrik üretimini optimize etmeyi amaçlar. Her biri farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmakla birlikte, verimliliği ve uygulanabilirliği; çevresel koşullar, tarımsal üretim türleri ve ekonomik faktörler gibi etmenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, avantajlar ve zorluklar dikkatlice değerlendirilerek tarım alanlarının büyüklüğü, tarımsal faaliyetlerin türü ve yerel iklim koşulları göz önünde bulundurularak en uygun tasarım seçilmelidir.

- Dresden-Pillnitz APV Projesi

Dresden-Pillnitz APV Projesi [67], Berlin Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin) tarafından, dikey APV sistem olarak 2022 yılında araştırma ve öğretim amacıyla kurulmuştur. Temelsiz bir şekilde çakma kazıklar üzerine inşa edilen sistem, doğu-batı yönlerine bakan iki katlı bi-facial panellerden oluşmaktadır. Sabah saatlerinde doğuya bakan yüzey, öğleden sonra ise batıya bakan arka yüzey elektrik üretimi sağlamaktadır. 430 Wp gücündeki panellerle kurulan sistem, 11 ve 13 metre aralıklarla yerleştirilmiş toplam 8 sıradan oluşmakla birlikte 134,4 kWp kurulu güce sahiptir.



Şekil 2.9 Dresden-Pillnitz APV Projesi'nin genel görünümü [67]



Şekil 2.10 Dresden-Pillnitz APV Projesi'nde çalışan bir tarım makinası [67]

Tesiste, tarımsal araçlar ve makinelerle birlikte tarımsal alanların işlendiği sulama pompaları gibi elektrikli cihazlar, üretilen elektriğin kullanımının odak noktasını oluşturmaktadır. Aynı zamanda Dresden APV Projesi, bu tür sistemlerin potansiyelini değerlendirmeyi ve sürdürülebilir arazi kullanımı, toprağın korunması, iklim değişikliğine uyum sağlanması ve biyolojik çeşitliliğin artırılması gibi pek çok konuyu araştırmayı hedeflemektedir.

- Aasen Solar Park

Almanya'nın Donaueschingen şehrinin Aasen bölgesinde, Next2Sun şirketi iş birliğiyle kurulan Aasen Solar Park [68], dikey APV sistemi kullanmaktadır. Dikey APV sistemlerin öncüsü olan şirket, 14 hektarlık tarım arazisi üzerinde 4,1 MWp'lik kurulu gücü ile yılda yaklaşık 4,850 MWh enerji üretmektedir. 1.400 hanenin enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahip sistemde, dikey APV sistem kullanıldığı için kurulumun kapladığı arazi alanı asgari düzeydedir. Panel yüzeyleri doğu-batı yönünde olacak şekilde ve 10 metrelik aralıklarla döşenmiş, böylece tarım makineleri ile çiftçiliğe olanak sağlanmıştır. Paneller arasındaki alan ise yem üretimi, yani saman ve silaj için kullanılmaktadır.



Şekil 2.11 Aasen Solar Park Projesi'nin genel görünümü [68]



Şekil 2.12 Aasen Solar Park Projesi'nin kuşbakışı görünümü

Bu dikey kurulum yönteminin, panellerin rüzgâr kırıcı olarak hizmet edebilmesi ve rüzgâr erozyonunu azaltabilmesi nedeniyle rüzgârlı bölgelerdeki bitkiler için özellikle uygun olacağı öngörülmektedir.

2.2.2 Kapalı APV Sistemler

2.1.1.1 APV Entegre Seralar

APV entegre seralar, fotovoltaik (PV) panellerin sera çatısına entegre edilmesiyle oluşturulan sistemlerdir. Bu yapı, aynı arazide hem enerji hem de seralar yardımıyla gıda üretimini mümkün kılar ve sürdürülebilir tarım açısından büyük bir potansiyel taşır [69]. Açık APV sistemlerden önemli ölçüde farklı olan bu sistemler [56], CO_2 seviyesi, sıcaklık ve nem gibi tamamen kapalı bir mikro iklime sahiptir [51].

APV sistem entegrasyonu, sera tasarımında özel teknik gereksinimler doğurur. Bu gereksinimler genel olarak fotovoltaik sistem tasarımı ve sera tasarım parametreleri olarak iki ana kategoriye ayrılır. Seraların iç tasarımında PV panellerin yerleşimi, gölgeleme etkileri ve ışık dağılımı gibi unsurlar belirleyici faktörlerdir. PV panellerin sera çatısına yerleştirilme oranı, yani örtü oranı, mahsul verimini etkileyen kritik bir parametredir. Araştırmalar, Akdeniz ikliminde opak PV panellerin sera çatısının %20-30'unu aşmaması gerektiğini göstermektedir [70].

Seralara uygulanabilecek PV sistemler sabit ve dinamik sistemler olarak ikiye ayrılır. Dinamik sistemlerde paneller tek eksenli döner mekanizmaya sahiptir ve bitkilerin ışık gereksinimlerine ya da enerji üretimine göre ayarlanabilir. Bu durum özellikle ışınım seviyelerinin düşük olduğu durumlarda ve olumsuz hava koşullarında büyük avantaj sağlar. Sabit sistemler ise daha düşük maliyetli ve basit bir yapıya sahip olduğundan uygulamada daha yaygın tercih edilmektedir. Seraların şekli, oluk yüksekliği ve yönelimi gibi tasarım unsurları, PV paneller altındaki ışık dağılımını ve enerji üretimini doğrudan etkiler [70].



Şekil 2.13 Dinamik APV entegre sera prototip çalışması [71]

Seralar, üretim sürecini mevsimsel ve coğrafi olarak genişleterek artan küresel gıda talebini karşılamada önemli bir role sahiptir. Ancak, üretim verimini artırma çabaları, seraların enerji talebinin artmasıyla fosil yakıt ve elektrik tüketiminin yükselmesine neden olmaktadır [72]. İklim kontrolü, özellikle Akdeniz ülkelerinde gece düşük sıcaklıklar ve gündüz yüksek sıcaklıklar nedeniyle önemli bir gereklilik haline gelmiştir [73]. APV entegre seralarda PV paneller yaz aylarında aşırı sıcaklık artışlarını dengeleyerek mahsul büyümesini ve kalitesini artırabilir [74].

Günümüzde sabit gölgeleme sistemleri üzerine daha fazla araştırma yapılmış olsa da, sabit gölgeleme sistemlerinin yılın bazı dönemlerinde yetersiz kalabileceği bilinmektedir. Bu nedenle, dinamik APV entegre sera sistemleri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Dinamik PV sistemler, ışınım seviyesinin en yüksek olduğu saatlerde gölge oluşturarak mahsulü korurken, ışınım seviyesinin düşük olduğu saatlerde ışığın daha fazla nüfuz etmesine izin verecek şekilde ayarlanabilir. Panellerin hareketli olması, kapalı gökyüzü koşullarında içeriye daha fazla güneş ışını girmesine olanak tanıyabilir [71].

Sonuç olarak, APV entegre seralar, tarımsal üretim ile enerji üretimini aynı yapıda birleştiren sürdürülebilir çözümler sunmakla beraber enerji üretimi, gıda güvenliği ve tarımsal verim açısından da büyük bir potansiyel taşımaktadır. PV panellerin sera çatısına entegre edilmesi, enerji ihtiyacını azaltmanın yanı sıra mahsul büyümesini de olumlu etkileyebilmektedir. Ancak, PV entegrasyonunun verimli

olabilmesi için örtü oranı, ışık geçirgenliği ve sera tasarımı gibi kritik faktörlerin dikkatlice hesaplanması gerekmektedir. Sabit sistemler, düşük maliyetleri ve basit tasarımları nedeniyle yaygın olarak tercih edilse de, farklı iklim koşullarında maksimum verim sağlamak adına sera tasarımının detaylı bir şekilde planlanması büyük önem taşımaktadır.

- Susmedhouse Projesi

Susmedhouse Ankara Projesi [70, 75], 2020 yılında Ankara Üniversitesi Teknokent yerleşkesinde başlatılmıştır. Türkiye'den Antalya Tarım'ın son kullanıcı olarak yer aldığı projede Almanya, İtalya, İspanya, Portekiz ve Mısır olmak üzere toplam altı ülkeden yedi farklı ortak yer almaktadır. 2000 m²'lik bir alana yayılan bu proje, sabit APV entegre seralar üzerine de önemli bir araştırma niteliğindedir.



Şekil 2.14 Susmedhouse projesinin kuşbakışı görünümü

Proje kapsamında, seranın belirli bir bölgesinde PV paneller kullanılarak elektrik üretiminin fizibilitesi incelenmektedir. PV panellerinin gölgeleme etkisi detaylı bir ışık simülasyonu ile analiz edilmektedir ve bitkiler için en uygun büyüme koşullarını sağlamak amacıyla PV sisteminin optimum yönelimi ve tasarımı belirlenmektedir. Enerji talebi ve bitkilerin gelişimi göz önünde bulundurularak, panellerin kaplama oranı optimize edilmektedir.

Bu doğrultuda, 280 Wp gücündeki paneller kullanılarak farklı modül yerleşimlerinin karşılaştırılabilmesi için üç farklı sistem kurulmuştur. Bu sistemler sırasıyla %30, %37 ve %44 kaplama oranlarına sahip olup, sırasıyla 26,8 kWp, 33,6 kWp ve 39,4 kWp kurulu güçlere sahiptir.

Kaplama oranı %30 ve %44 olan sistemler 15 derecelik güney yönelime sahipken, %37 kaplama oranına sahip sistem doğu-batı yönelimli olarak tasarlanmıştır. Üçüncü sistemde panellerin yarısı doğuya, yarısı batıya bakacak şekilde konumlandırılmıştır. Tüm modüllerin eğim açısı, seranın çatı açısıyla aynı olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 2.15 Susmedhouse projesi PV panel kurulumu [75]

Bu çalışmalar, hem enerji verimliliğini artırmayı hem de tarımsal üretimde sürdürülebilirliği desteklemeyi amaçlamaktadır. Susmedhouse Ankara Projesi, tarım ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu optimize eden yenilikçi çözümler sunarak, gelecekte benzer projelere rehberlik edebilecek önemli bir örnek teşkil etmektedir. Proje kapsamında elde edilen veriler, gelecekte uygulanabilecek sistem tasarımlarına rehberlik edecek ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlayacaktır.

3
BESİ ÇİFTLİĞİ SENARYOSU

Bu çalışma kapsamında agro-fotovoltaik sistemlerin elektrik üretim potansiyelini ve tarımsal faaliyetlerle entegrasyonunu değerlendirmek için Konya ilinin Hüyük ilçesinde yer alan örnek bir çiftlik senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryoda, hem tarımsal üretim hem de hayvancılık faaliyetleri bir arada bulunmakta ve güneş enerjisi destekli elektrik üretimi üç farklı sistem ile incelenmektedir.

Senaryo kapsamında bir çiftlik modeli tasarlanmış olup, bu çiftlik içerisinde bir çiftlik evi, hayvansal yem üretimi için tarım alanı ve 300 başlık bir besi çiftliği bulunmaktadır. Besi çiftliğinde kullanılan elektrikli ekipmanlar N. Orhan ve S. Şahin'in [76] çalışmasında bahse geçen çiftlikten alınmıştır. Besi çiftliğindeki ve çiftlik evindeki elektrikli ekipmanların günlük kullanım süreleri ve saat dilimleri, mevsimler sezonlar dikkate alınarak her mevsim farklı olacak şekilde bu çalışmada senaryolaştırılmıştır.

Çalışma bir yıllık bir periyodu kapsamakta olup, dört ana sezona ayrılmıştır

- İlkbahar Sezonu: Mart, Nisan, Mayıs
- Yaz Sezonu: Haziran, Temmuz, Ağustos
- Sonbahar Sezonu: Eylül, Ekim, Kasım
- Kış Sezonu: Aralık, Ocak, Şubat

3.1 Çiftlikte Kullanılan Elektrikli Ekipmanlar

Bu bölümde, çiftlik evindeki ve besi çiftliğindeki elektrikli ekipmanların yanı sıra tarımsal sulama için kullanılan dalgıç pompaların enerji tüketimi ve günlük çalışma süreleri verilmektedir. Ekipmanların güç değerleri ve çalışma süreleri dikkate alınarak toplam enerji tüketimleri hesaplanmıştır.

Tablo 3.1 Çiftlik evindeki elektrikli ekipmanların günlük enerji tüketimi

Çiftlik Evi					
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	2,00
Çamaşır Makinesi	1	0,6	0,6	1	0,60
Bulaşık Makinesi	1	1	1	1	1,00
Televizyon	1	0,085	0,085	3	0,26
Ütü	1	3	3	0,5	1,50
Elektrikli süpürge	1	0,8	0,8	0,5	0,40
Su Isıtıcısı	1	2,2	2,2	0,2	0,44
Ek Tüketim*	1	0,1	0,1	24	2,40
* Tahmini ek enerji tüketimi					

Tablo 3.2 Besi çiftliğindeki elektrikli ekipmanların günlük enerji tüketimi

Besi Çiftliği					
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
Seperatör	1	7,5	7,5	1	7,5
Gübre Pompası	2	7,5	15	1	15
Sıyırıcı	4	4	16	4	64

Çiftlik evinde ve besi çiftliğinde kullanılan aydınlatma armatürleri ile tarımsal sulama ve besi hayvanlarının su ihtiyacını karşılamak için kullanılan dalgıç pompalarının günlük çalışma süreleri, mevsimsel olarak değişiklik gösterdiğinden, bu ekipmanlar sezonluk olarak verilmiştir.

Tablo 3.3 Çiftlikteki diğer ekipmanların mevsimlik kullanım süreleri

Çalışma süreleri sezonluk olarak değişen ekipmanlar	Adet	Güç (kW)	Toplam Kurulu Güç (kW)	İlkbahar Sezonu		Yaz Sezonu		Sonbahar Sezonu		Kış Sezonu	
				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	8	2,88
Aydınlatma * (Tesis)	20	0,125	2,5	2	2	2	2	2	2	3	3
Dalgıç Pompa	2	75	150	3	450	3	450	0,1	15	0,1	15
* Aydınlatma armatürlerinin eşzamanlı kullanım oranı %40 olarak kabul edilmiştir											

Bu bölümde, çiftlik evindeki ve besi çiftliğindeki elektrikli ekipmanların yanı sıra, tarımsal sulama için kullanılan dalgıç pompalarının enerji tüketimi ve günlük çalışma süreleri ele alınmıştır. Ekipmanların güç değerleri ve günlük kullanım süreleri dikkate alınarak toplam enerji tüketimleri hesaplanmış ve her bir ekipmanın enerji gereksinimi daha ayrıntılı şekilde ortaya konulmuştur

3.2 Çiftliğin Enerji Tüketimi

Çiftlikte kullanılan elektrikli ekipmanların çalışma saatleri, mevsimsel koşullara ve işletme ihtiyaçlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Gün doğumu ve batımı, tarımsal faaliyetlerin dönemsel farklılıkları ve günlük iş akışına bağlı olarak, ekipmanların gün içerisindeki kullanım zamanlarını doğrudan etkilenmektedir. Bu kapsamda, çiftlik evindeki ve besi çiftliğindeki ekipmanların her mevsimde hangi saat aralıklarında çalıştığı belirlenmiş ve aşağıda sunulmuştur.

Tablo 3.4 İlkbahar sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi

İlkbahar Sezonu	Çiftlik Evi								Tesis								Toplam (kWh)
	Fırın	Çamaşır Makinesi	Bulaşık Makinesi	Televizyon	Ütü	Su Isıtıcısı	Elektrikli Süpürge	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperatör	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
01:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
02:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
03:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
04:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
05:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
06:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
07:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	1	1	40,77
08:00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	182,785
09:00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0,25	-	-	-	-	-	173,41
10:00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0,25	-	-	-	-	-	173,41
11:00	-	1	-	-	-	0,1	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	40,23
12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	32,785
13:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
14:00	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,81
15:00	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	34,285
16:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
17:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,41
18:00	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	1	36,145
19:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,77
20:00	-	-	1	-	-	0,1	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	24,99
21:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,855
22:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,105
23:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,105

* Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposunun 24 saat çalıştığı, ek tüketimin de 24 saat boyunca olduğu varsayılmıştır

Tablo 3.5 Yaz sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi

Yaz Sezonu	Çiftlik Evi								Tesis								Toplam (kWh)
	Fırın	Çamaşır Makinesi	Bulaşık Makinesi	Televizyon	Ütü	Su Isıtıcısı	Elektrikli Süpürge	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperatör	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
01:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
02:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
03:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
04:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
05:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
06:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	1	1	40,77
07:00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	182,785
08:00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0,25	-	-	-	-	-	173,41
09:00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0,25	-	-	-	-	-	173,41
10:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,41
11:00	-	1	-	-	-	0,1	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	33,605
12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
13:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
14:00	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,81
15:00	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	35,785
16:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
17:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
18:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,41
19:00	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	1	36,145
20:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,77
21:00	-	-	1	1	-	0,1	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	25,075
22:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,105
23:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,105

* Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposunun 24 saat çalıştığı, ek tüketimin de 24 saat boyunca olduğu varsayılmıştır

Tablo 3.6 Sonbahar sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi

Sonbahar Sezonu	Çiftlik Evi								Tesis								Toplam (kWh)
	Fırın	Çamaşır Makinesi	Bulaşık Makinesi	Televizyon	Ütü	Su Isıtıcısı	Elektrikli Süpürge	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperatör	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
01:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
02:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
03:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
04:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
05:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
06:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
07:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	1	1	40,77
08:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	32,785
09:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
10:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,41
11:00	-	1	-	-	-	0,1	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	33,605
12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	1	0,25	-	-	-	-	-	38,41
13:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,41
14:00	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	33,185
15:00	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	24,91
16:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	-	39,41
17:00	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	1	36,145
18:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,77
19:00	-	-	1	-	-	0,1	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	24,99
20:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,855
21:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,855
22:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,105
23:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,02

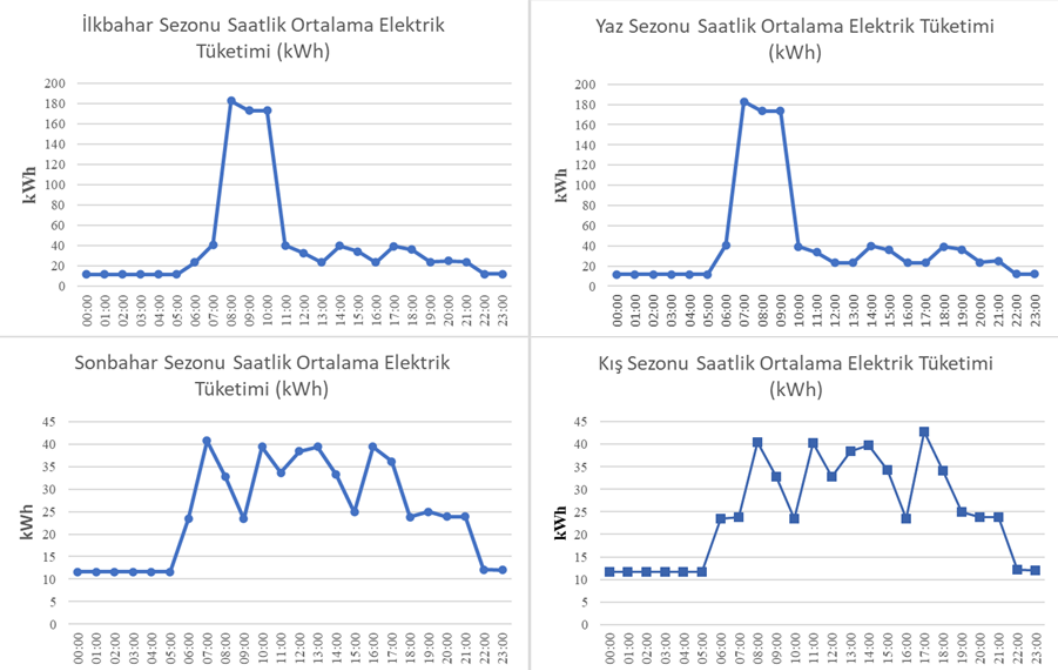
* Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposunun 24 saat çalıştığı, ek tüketimin de 24 saat boyunca olduğu varsayılmıştır

Tablo 3.7 Kış sezonunda çiftlik ekipmanlarının günlük çalışma süresi

Kış Sezonu	Çiftlik Evi								Tesis								Toplam (kWh)
	Fırın	Çamaşır Makinesi	Bulaşık Makinesi	Televizyon	Ütü	Su Isıtıcısı	Elektrikli Süpürge	Aydınlatma	Dalgıç Pompa	Hidrofor	Kaşağı	Gübre Karıştırıcı	Seperatör	Gübre Pompası	Sıyırıcı	Aydınlatma	
00:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
01:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
02:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
03:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
04:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
05:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66
06:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
07:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,77
08:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	1	1	40,41
09:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	32,785
10:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
11:00	-	1	-	-	-	0,1	-	-	-	1	0,25	-	-	-	0,25	-	40,23
12:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	32,785
13:00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	1	0,25	-	-	-	-	-	38,41
14:00	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	1	0,25	-	-	-	0,25	-	39,81
15:00	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-	34,285
16:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,41
17:00	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	1	1	42,77
18:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	0,25	0,25	0,25	0,25	-	1	34,145
19:00	-	-	1	-	-	0,1	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	24,99
20:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,855
21:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	0,25	-	-	-	-	-	23,855
22:00	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,105
23:00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	12,02

* Buzdolabı, dondurucu ve soğuk hava deposunun 24 saat çalıştığı, ek tüketimin de 24 saat boyunca olduğu varsayılmıştır

Bu veriler dikkate alındığına saatlik enerji tüketim verileri kullanılarak aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur. Bu grafikler sezonluk olarak saatlik enerji kullanım trendlerini daha iyi anlamak ve görselleştirmek amacıyla sunulmuştur.

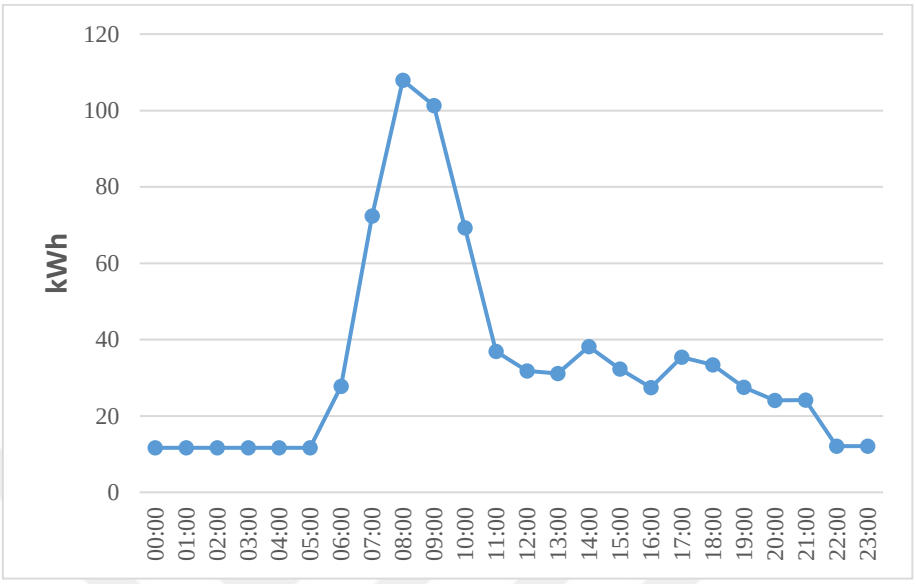


Şekil 3.1 Sezon bazlı günlük enerji tüketiminin saatlik ortalaması

İlkbahar sezonunda saat 08:00'de ve yaz sezonunda saat 07:00'de tarımsal arazinin sulanması için dalgıç pompa devreye girmektedir. 2 adet 75 kW gücünde ve 3 saat süreyle çalışan sulama sistemi, enerji tüketimini diğer saatlere göre en az 4-5 kat artırmaktadır. Sulamanın gün doğumunu takriben yapılması, sabah erken saatlerde üretilecek enerjinin değerini ilkbahar ve yaz sezonlarında önemli ölçüde artırmaktadır.

İlkbahar ve yaz sezonlarına bakıldığında, birbirine oldukça yakın enerji tüketim trendleri gözlemlense de bu sezonlar arasında enerji tüketimlerinin aynı saat dilimlerinde farklılık gösterdiğine dikkat edilmelidir. Benzer bir değişim, sonbahar ve kış sezonları için de geçerlidir. Ancak sonbahar ve kış sezonlarında dalgıç pompaların yalnızca besi hayvanlarına su temin etmek için çalışması, gündüz vaktinde kullanılan enerjide belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Bu durum, daha dengeli bir enerji tüketim grafiği ortaya çıkarmaktadır. Gün içerisinde enerji tüketimi en yüksek 42,77 kWh, en düşük ise 11,66 kWh olarak gözlemlenmiştir. İlkbahar ve yaz sezonlarında ise, gün içerisindeki en yüksek tüketim 182 kWh'lere kadar çıkmaktadır.

Günlük enerji tüketimi ise sonbahar ve kış sezonlarında 600 kWh'e dahi ulaşamazken, sulamanın yapıldığı ilkbahar ve yaz sezonlarında 1.000 kWh'i geçmektedir.



Şekil 3.2 Bir yıllık periyotta ortalama saatlik elektrik tüketimi

Bir yıllık elektrik tüketimi incelendiğinde, tesisimizin toplam enerji tüketimi 297,5 MWh olarak hesaplanmıştır. İlkbahar ve yaz sezonlarında kullanılan 150 kW gücündeki sulama sistemi, yıllık bazda saatlik ortalama enerji tüketimini özellikle günün erken saatlerinde yükseltmiştir. Gece saatlerindeki enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu ise 11,66 kW gücündeki soğuk hava deposu oluşturmaktadır. Tesisin bir yıllık enerji tüketimini dikkate aldığımızda, enerji kullanımının büyük kısmını soğuk hava deposu ve tarımsal sulama sisteminin oluşturduğunu söylemek mümkündür. Bu iki sistem, yıllık toplamda 89,77 MWh'lik enerji tüketimi ile yıllık enerji tüketiminin yaklaşık %30'una karşılık gelmektedir.

4
SİSTEM TASARIMI VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ ANALİZİ

4.1 Sistem Tasarımları

Bu çalışma kapsamında, çiftlik için üç farklı güneş enerjisi destekli elektrik üretim senaryosu değerlendirilmiştir:

- Geleneksel PV Sistem
- Yükseltilmiş sabit agro-fotovoltaik (APV) sistem
- Dikey agro-fotovoltaik (APV) sistem

Bu üç farklı modelin enerji üretimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilerek en uygun sistemin belirlenmesine yönelik bulgular ortaya konulacaktır.

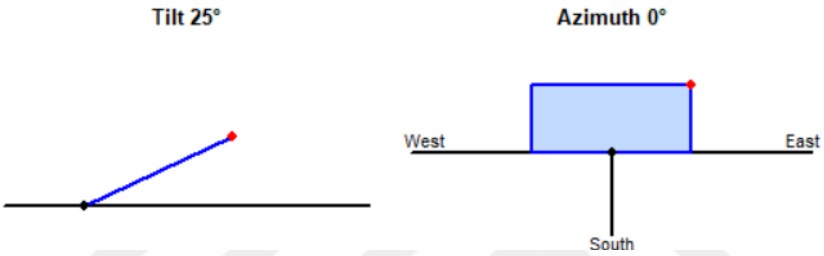
Tablo 4.1 Sistem tasarımında kullanılan fotovoltaik panelin özellikleri

Maksimum Güç (P_{max})	570 Wp
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	51,24 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	14,21 A
Maksimum Güç Gerilimi (V_{max})	42,89 V
Maksimum Güç Akımı (I_{max})	13,29 A
Modül Verimi	%22,1
Bi-facial Faktörü	80 ± %10
Boyutlar	2278 x 1134 x 30 mm
Ağırlık	33 kg
Hücre Tipi	N-Type Topcon 182 x 91 mm (194 adet)

Üç sistemde de aynı özelliklere sahip 570Wp'lik bi-facial paneller kullanılmıştır. Bu çalışmada bi-facial faktörü 0,80 olarak alınmıştır. Sistemlerin simülasyonu için PVsyst programından yararlanılmıştır.

4.1.1 Geleneksel PV Sistem Tasarımı

Çiftliğin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla, 216 adet 570 Wp gücünde bi-facial panel kullanarak geleneksel fotovoltaik sistem tasarımına uygun bir güneş enerjisi santrali kurulmuştur. Kurulu gücü 123 kWp olan sistem, 1.000 m²'lik bir alan içerisinde, 31 m x 33 m boyutlarında yer almaktadır. Paneller, 25° eğim açısına ve yerden 60 cm yüksekliğe sahip olacak şekilde tasarlanmış ve güneş ışınımından en yüksek verimi sağlamak amacıyla tam güneye yönlendirilmiştir.



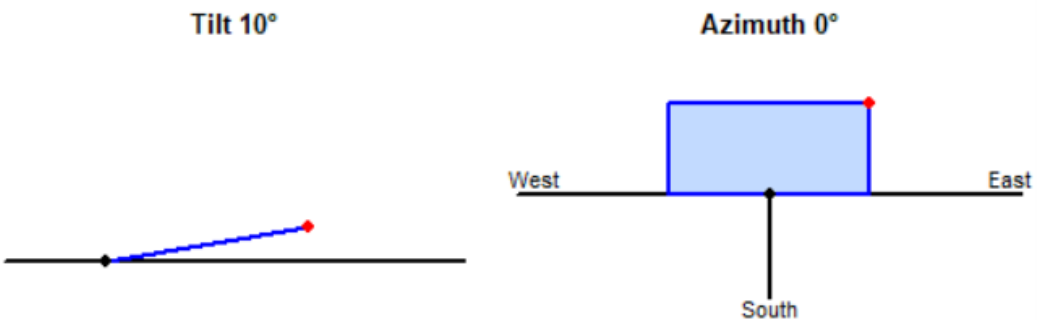
Şekil 4.1 Geleneksel PV sistemde kullanılan panelin açısı ve yönü

Sistem, 4 ayrı masa üzerinde, 27 x 2 düzeninde dikey hizada dizilmiş modüllerden oluşmaktadır. Masalar arasındaki mesafe 8,2 metre (masa başından masa başına) olarak belirlenmiş olup, bu düzen panellerin fazla gölgelemeden kaçınması amacıyla yapılmıştır.

Fotovoltaik panellerin yerleşimi nedeniyle, 1.000 m²'lik alan tarımsal faaliyetler için kullanılamamaktadır.

4.1.2 Yükseltilmiş APV Sistem Tasarımı

Yükseltilmiş APV sistem tasarımında, geleneksel fotovoltaik sistem tasarımıyla aynı olacak şekilde, kurulu gücü 123 kWp olan 216 adet 570 Wp'lik bi-facial paneller kullanılmıştır. Paneller, 5 metre yükseklik ve 10° eğim açısı ile yerleştirilmiş olup, güneş ışınımından en yüksek verimi almak amacıyla tam güneye doğru konumlandırılmıştır.



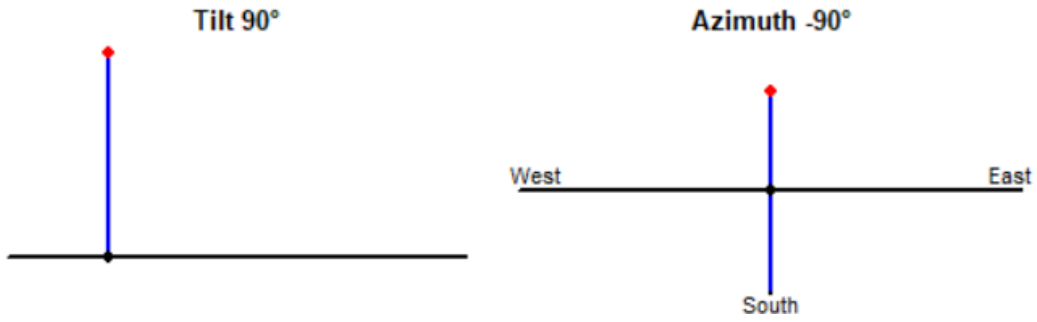
Şekil 4.2 Yükseltilmiş APV sistemde kullanılan panelin açısı ve yönü

Sistem, 4 ayrı masa üzerinde 27 x 2 düzeninde dikey hizada dizilen modüllerden oluşmaktadır ve masalar arasındaki mesafe 9 metre (masa başından masa başına) olarak belirlenmiştir. Bu düzenleme, alt taraftaki tarımsal arazinin güneş ışığından en verimli şekilde faydalanabilmesini sağlamakta olup, aynı zamanda panellerin birbirini gölgelemesini engellemeye de yardımcı olmaktadır.

Yükseltilmiş yapısı sayesinde, sistemin kurulduğu 1.100 m²'lik alanın büyük bir kısmı tarımsal faaliyetler için kullanılabilir durumda kalmaktadır. Bu sayede çiftlikte hem enerji üretimi hem de tarımsal üretim sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

4.1.3 Dikey APV Sistem Tasarımı

Diğer iki sistemde de olduğu gibi bu sistemde de 123 kWp gücünde 216 adet 570 Wp'lik bi-facial paneller kullanılmıştır. Sistem, 63m x 43m boyutlarında ki 2.900 m²'lik bir alana kurulmuştur. Paneller, 90° eğim açısına sahip olarak yerleştirilmiş ve güneş ışınımından en yüksek verimi almak amacıyla tam doğu yönüne bakacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu yerleşim ile paneller, öğleden önce ön taraftan güneş ışınımı alırken, öğleden sonra ise arka taraftan ışınım almaktadır.



Şekil 4.3 Dikey APV sistemde kullanılan panelin açısı ve yönü

Sistem, 4 ayrı masa üzerinde, 27 x 2 düzeninde yatay hizada dizilen modüllerden oluşmaktadır. Paneller arasındaki mesafe 15 metre olarak belirlenmiş olup, bu düzenleme sayesinde hem panellerin verimli bir şekilde güneş ışığından faydalanması sağlanmakta hem de tarım makinelerinin rahat bir şekilde kullanılabilmesi ve tesisin işlevselliği artırılmaktadır

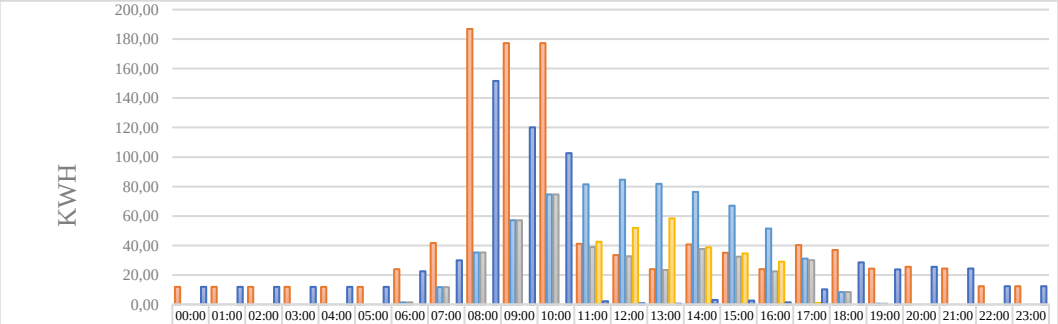
Panellerin dikey yerleşimi, 2.900 m²'lik alanın büyük bir kısmının, %90'ından fazlasının tarımsal faaliyetler için kullanılabilir durumda kalmasını sağlamaktadır. Bu düzenleme, çiftlikteki enerji üretimi ile tarımın birbirine engel olmadan eş zamanlı olarak yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

4.2 Simülasyon Sonuçları ve Analizler

PVsyst programı yardımıyla oluşturulan simülasyonda, yılın 365 günü boyunca her bir saatin (8760 saat) elektrik üretimi ve tüketimi ayrı ayrı incelenmiştir. Üç sistem de yıl boyunca ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış olmak üzere dört sezona ayrılarak değerlendirilmiş ve yıllık bazda ayrı bir analiz sunulmuştur.

4.2.1 İlkbahar Sezonu Simülasyon Sonuçları

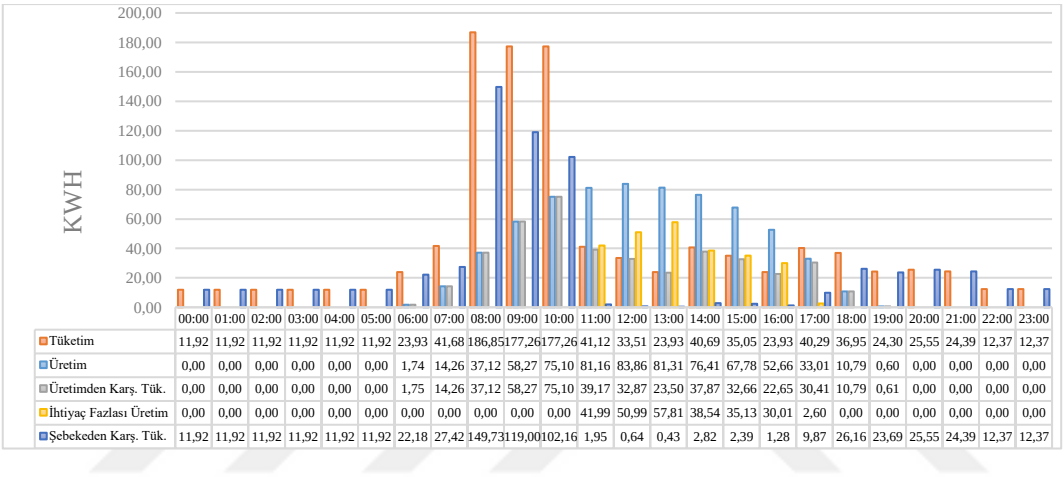
İlkbahar sezonunda, sabah saat 8 ile 11 arasında tarımsal sulamanın devreye girmesiyle enerji tüketiminde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Sulama sisteminin aktif hale gelmesiyle, sabah saatlerinde saatlik ortalama tüketim 180 kWh'e kadar yükselmektedir. Günün diğer saatlerinde ise tüketim, genel olarak 24 kWh ile 40 kWh arasında değişiklik göstermektedir.



	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
Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	23,93	41,68	186,85	177,26	177,26	41,12	33,51	23,93	40,69	35,05	23,93	40,29	36,95	24,30	25,55	24,39	12,37	12,37
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42	11,74	35,25	57,13	74,63	81,49	84,61	81,80	76,34	67,02	51,48	31,10	8,41	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42	11,74	35,25	57,13	74,63	38,94	32,69	23,40	37,61	32,42	22,48	30,03	8,41	0,52	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	0,00	42,55	51,92	58,41	38,73	34,60	29,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	22,51	29,94	151,60	120,13	102,63	2,19	0,82	0,53	3,09	2,63	1,45	10,25	28,54	23,78	25,55	24,39	12,37	12,37

Şekil 4.4 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (İlkbahar)

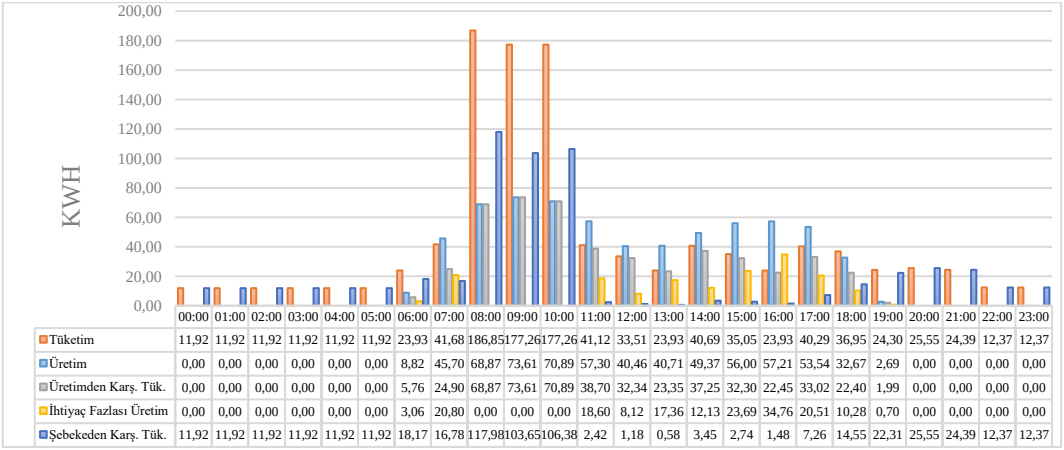
Geleneksel PV sisteme baktığımızda, sabah ve akşam saatlerinde enerji üretiminin düşük, ancak güneşin en yüksek olduğu öğle saatlerinde üretimin en yüksek seviyeye ulaştığı gözlemlenmektedir. Sabah saat 8 ile 11 arasında, yüksek enerji tüketimi gerektiren sulama ve diğer elektrikli ekipmanların kullanımının %30'luk kısmı, sistem tarafından karşılanabilmiştir. Saat 10'a kadar enerji ihtiyacı fazla olduğundan, sistemde üretilen enerji öz tüketime harcanmıştır. Ancak saat 11'dan sonra enerji tüketiminin düşmesiyle, sistem önümüzdeki 6 saat boyunca ortalama 42 kWh'lik ihtiyaç fazlası enerji üretmiştir. Bu dönemde, şebekeden neredeyse hiç enerji çekilmemiştir.



	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
Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	23,93	41,68	186,85	177,26	177,26	41,12	33,51	23,93	40,69	35,05	23,93	40,29	36,95	24,30	25,55	24,39	12,37	12,37
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,74	14,26	37,12	58,27	75,10	81,16	83,86	81,31	76,41	67,78	52,66	33,01	10,79	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,75	14,26	37,12	58,27	75,10	39,17	32,87	23,50	37,87	32,66	22,65	30,41	10,79	0,61	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	0,00	41,99	50,99	57,81	38,54	35,13	30,01	2,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	22,18	27,42	149,73	119,00	102,16	1,95	0,64	0,43	2,82	2,39	1,28	9,87	26,16	23,69	25,55	24,39	12,37	12,37

Şekil 4.5 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (İlkbahar)

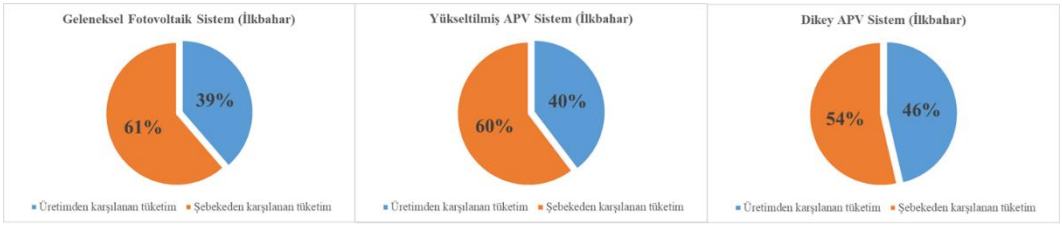
Yükseltilmiş APV sistem, sabah 11'e kadar üretilen enerjinin tamamını öz tüketimde kullanmıştır. Saat 8 ile 11 arasındaki tüketimin %31'lik kısmı sistem tarafından karşılanabilmiştir.



	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
Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	23,93	41,68	186,85	177,26	177,26	41,12	33,51	23,93	40,69	35,05	23,93	40,29	36,95	24,30	25,55	24,39	12,37	12,37
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,82	45,70	68,87	73,61	70,89	57,30	40,46	40,71	49,37	56,00	57,21	53,54	32,67	2,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,76	24,90	68,87	73,61	70,89	38,70	32,34	23,35	37,25	32,30	22,45	33,02	22,40	1,99	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,06	20,80	0,00	0,00	0,00	18,60	8,12	17,36	12,13	23,69	34,76	20,51	10,28	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	18,17	16,78	117,98	103,65	106,38	2,42	1,18	0,58	3,45	2,74	1,48	7,26	14,55	22,31	25,55	24,39	12,37	12,37

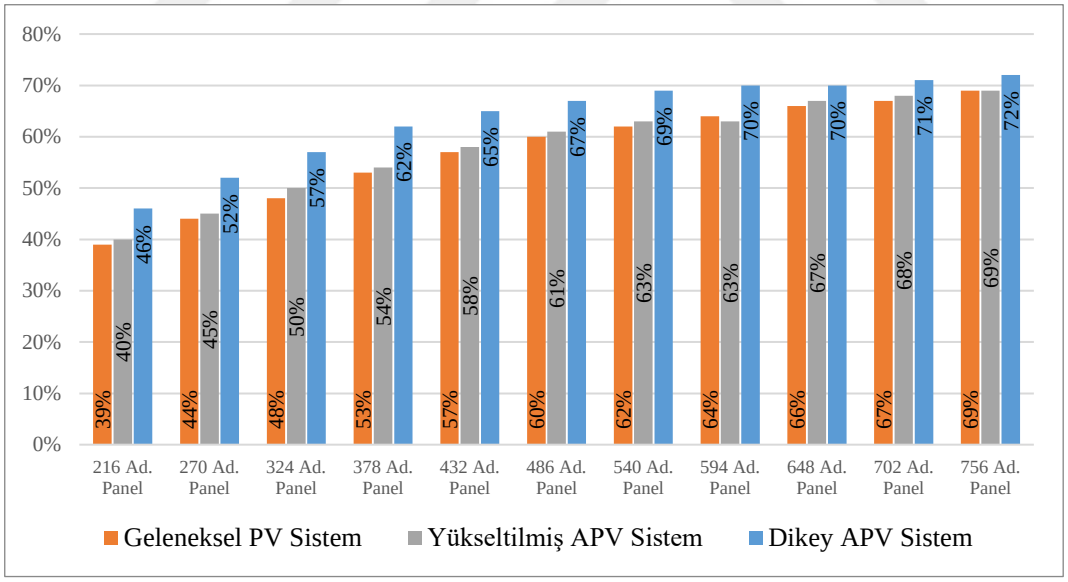
Şekil 4.6 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (İlkbahar)

Diğer sistemlerden farklı olarak, dikey APV sistem öğleden önce daha fazla enerji üretimi gerçekleştirdiğinden, saat 8 ile 11 arasındaki tüketimin %39'unu karşılayabilmiştir. Doğu ve batı yönelimli bu sistem, diğer sistemlerin aksine sabah ve akşam saatlerinde daha yüksek enerji üretimi sağladığından, karşılanan öz tüketim oranını artırmıştır.



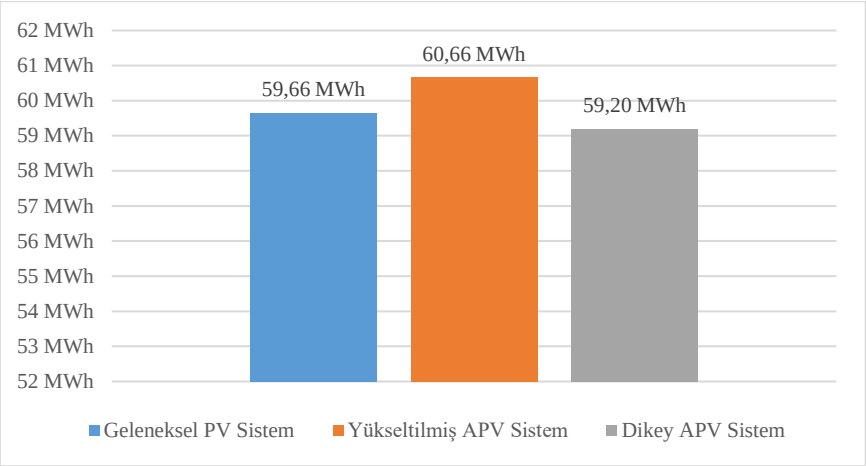
Şekil 4.7 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (İlkbahar)

İlkbahar sezonu genel olarak değerlendirildiğinde, geleneksel PV sistemin öz tüketiminin %39'unu, yükseltilmiş APV sistemin %40'ını ve dikey APV sistemin ise %46'sını karşıladığı görülmektedir. Dikey sistemin sabah saatlerinde daha fazla enerji üretmesi ve bu saatlerdeki yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle, dikey APV sisteminin öz tüketimde daha yüksek oranda enerji karşılamasına olanak tanımıştır.



Şekil 4.8 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (İlkbahar)

Dikey APV sistemde, ilkbahar sezonu boyunca tüketimin %60'ını karşılamak için 378 PV panel yeterli olurken, yükseltilmiş APV ve geleneksel PV sistemlerde aynı oranı yakalayabilmek için modül sayısının 486 adede çıkarılması gerekmektedir.



Şekil 4.9 Sistemlerin toplam enerji üretimi (İlkbahar)

Sezon boyunca üç sistem de birbirine oldukça yakın bir enerji üretim grafiği sergilemiştir. Yaklaşık 60 MWh enerji üreten sistemler arasında, en yüksek üretimi gerçekleştiren yükseltilmiş APV sistem olmuştur.

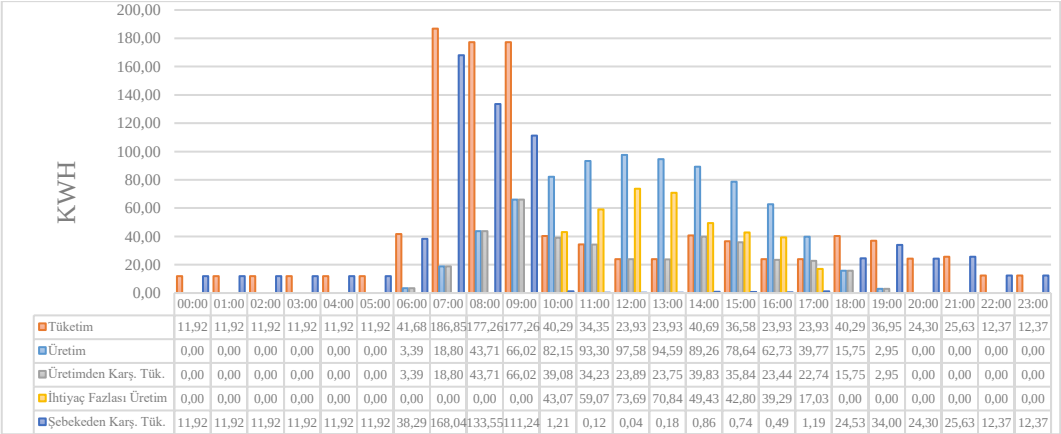


Şekil 4.10 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (İlkbahar)

Sistemler, ürettikleri enerjinin %61 ile %74'lük kısmını tüketimde değerlendirmiştir. Geleneksel PV sistem, %61 ile en düşük orana sahip olurken, dikey APV sistem %74'lük oranla ürettiği enerjinin büyük bir bölümünü tüketimde kullanabilmiştir.

4.2.2 Yaz Sezonu Simülasyon Sonuçları

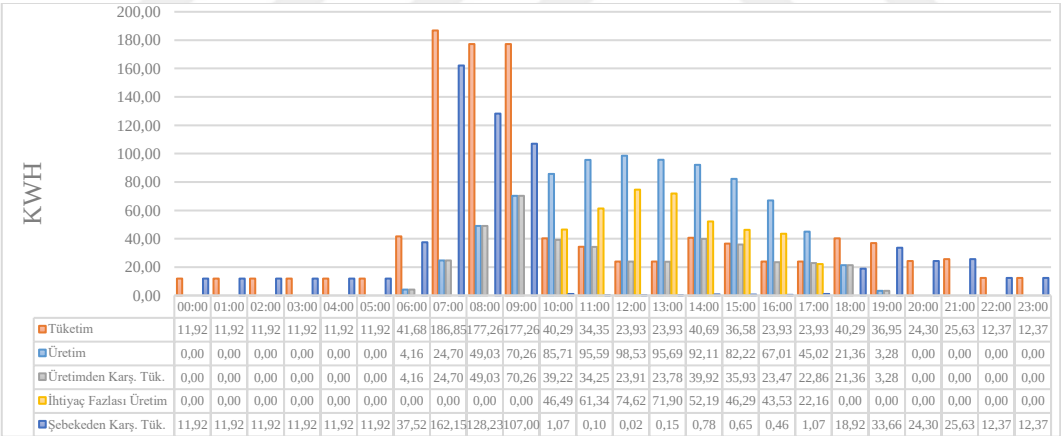
Yaz sezonunda da ilkbahar sezonuna benzer şekilde tarımsal sulamanın aktif olmasıyla gündüz saatleri elektrik tüketimi 180 kWh seviyelerine çıkmaktadır.



	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
Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	41,68	186,85	177,26	177,26	40,29	34,35	23,93	23,93	40,69	36,58	23,93	23,93	40,29	36,95	24,30	25,63	12,37	12,37
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,39	18,80	43,71	66,02	82,15	93,30	97,58	94,59	89,26	78,64	62,73	39,77	15,75	2,95	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,39	18,80	43,71	66,02	39,08	34,23	23,89	23,75	39,83	35,84	23,44	22,74	15,75	2,95	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	43,07	59,07	73,69	70,84	49,43	42,80	39,29	17,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	38,29	168,04	133,55	111,24	1,21	0,12	0,04	0,18	0,86	0,74	0,49	1,19	24,53	34,00	24,30	25,63	12,37	12,37

Şekil 4.11 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yaz)

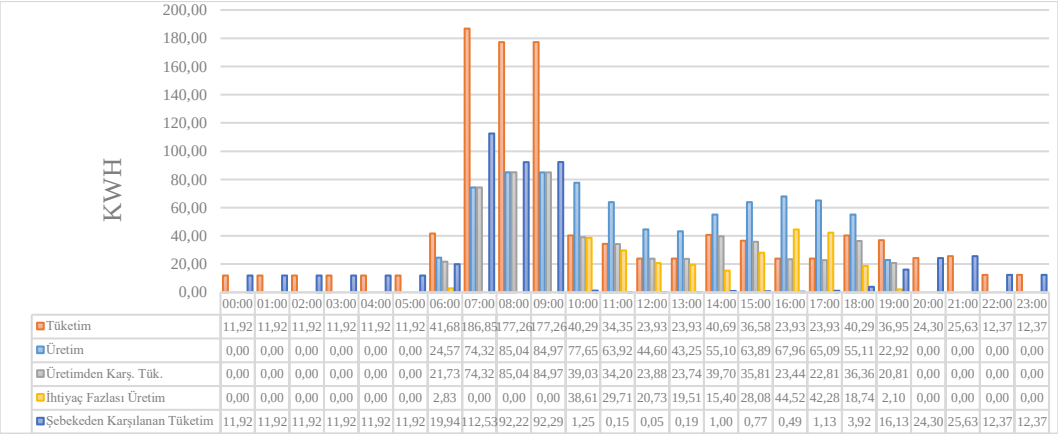
Sulamanın ilkbahar sezonuna göre bir saat önce başlatılmasıyla birlikte, geleneksel PV sistem saat 7 ile 10 arasındaki enerji tüketiminin %23'ünü karşılayabilmiştir. Saat 10'dan sonra güneşin yükselmesiyle birlikte enerji üretimi artarken, tüketimdeki belirgin azalma nedeniyle sonraki 8 saat boyunca saatte ortalama 50 kWh'lik ihtiyaç fazlası enerji üretilmiştir. Bu süreçte, saat 10 ile 18 arasındaki zaman diliminde şebekeden neredeyse hiç elektrik çekilmemiştir.



	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
Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	41,68	186,85	177,26	177,26	40,29	34,35	23,93	23,93	40,69	36,58	23,93	23,93	40,29	36,95	24,30	25,63	12,37	12,37
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16	24,70	49,03	70,26	85,71	95,59	98,53	95,69	92,11	82,22	67,01	45,02	21,36	3,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16	24,70	49,03	70,26	39,22	34,25	23,91	23,78	39,92	35,93	23,47	22,86	21,36	3,28	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	46,49	61,34	74,62	71,90	52,19	46,29	43,53	22,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	37,52	162,15	128,23	107,00	1,07	0,10	0,02	0,15	0,78	0,65	0,46	1,07	18,92	33,66	24,30	25,63	12,37	12,37

Şekil 4.12 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yaz)

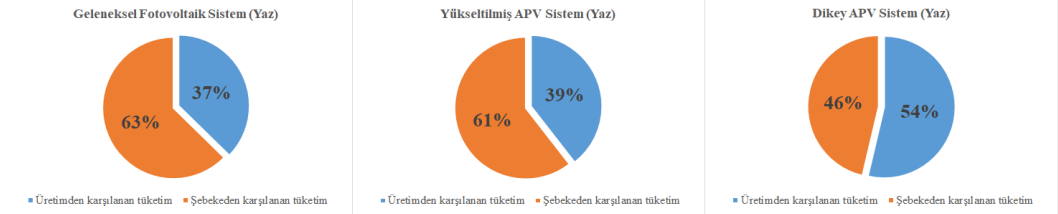
Yükseltilmiş APV sistem, geleneksel PV sisteme benzer sonuçlar vermekle birlikte, sabah 7 ile 10 arasındaki tüketimin %26'sını karşılayarak geleneksel sisteme kıyasla biraz daha yüksek bir oran yakalamıştır. Saat 10 ile 18 arasındaki süreçte ise neredeyse tüm tüketimi karşılamış ve bu saatler arasında şebekeden hemen hemen hiç elektrik çekilmemiştir.



	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
Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	41,68	186,85	177,26	177,26	40,29	34,35	23,93	23,93	40,69	36,58	23,93	23,93	40,29	36,95	24,30	25,63	12,37	12,37
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,57	74,32	85,04	84,97	77,65	63,92	44,60	43,25	55,10	63,89	67,96	65,09	55,11	22,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,73	74,32	85,04	84,97	39,03	34,20	23,88	23,74	39,70	35,81	23,44	22,81	36,36	20,81	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	38,61	29,71	20,73	19,51	15,40	28,08	44,52	42,28	18,74	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karşılanan Tüketim	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	11,92	19,94	112,53	92,22	92,29	1,25	0,15	0,05	0,19	1,00	0,77	0,49	1,13	3,92	16,13	24,30	25,63	12,37	12,37

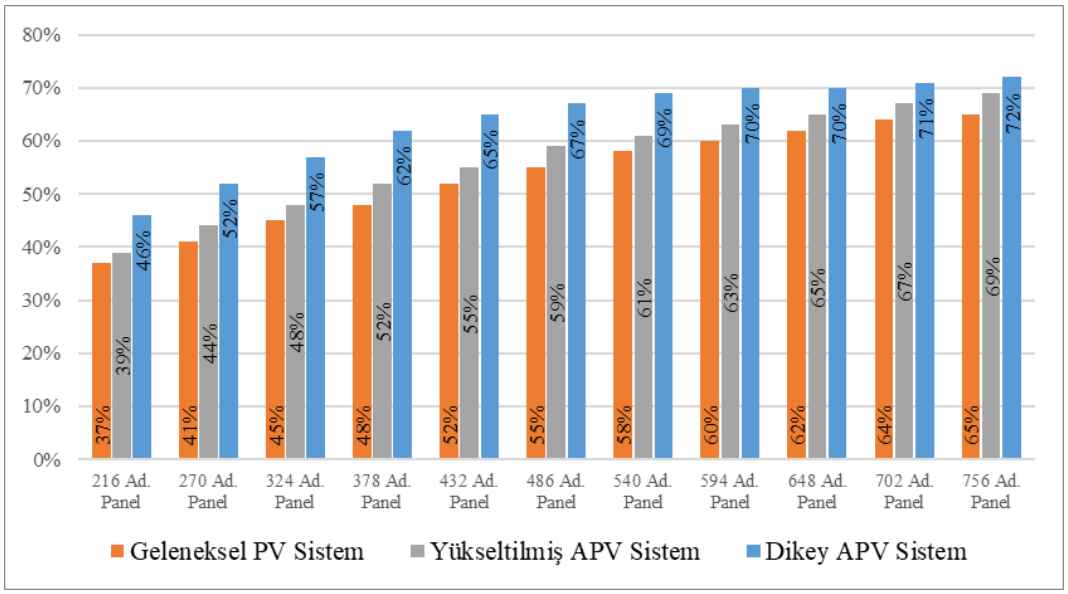
Şekil 4.13 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yaz)

Diğer iki sistem sabah 7 ila 10 arasındaki elektrik tüketiminin %23-26'sını karşılamasına karşılık dikey APV sistem 90 derecelik doğu yönelimli tasarımıyla bu saatlerdeki enerji tüketiminin %34'ünü karşılayabilmiştir.



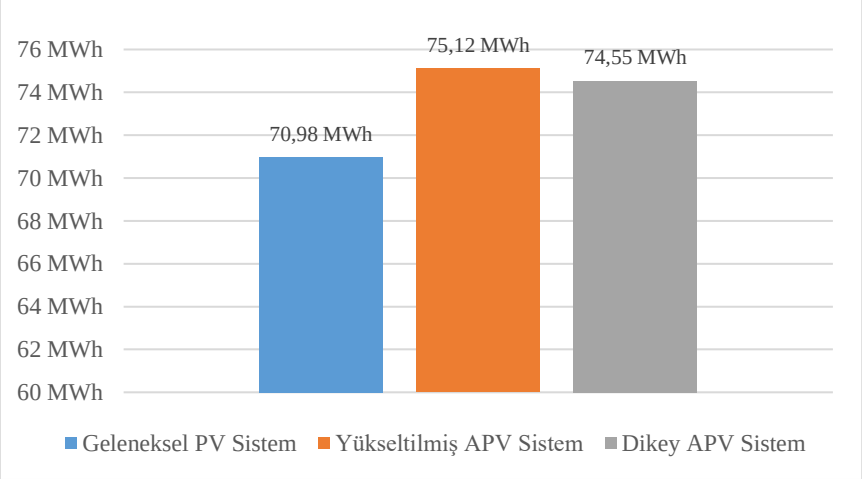
Şekil 4.14 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Yaz)

Yaz sezonunda, geleneksel PV sistem ve yükseltilmiş APV sistem sırasıyla enerji tüketiminin %37'sini ve %39'unu karşılarken, dikey APV sistem 94,87 MWh'lik toplam enerji tüketiminin 50,93 MWh'ini karşılayarak %54'lük bir oran yakalamıştır.



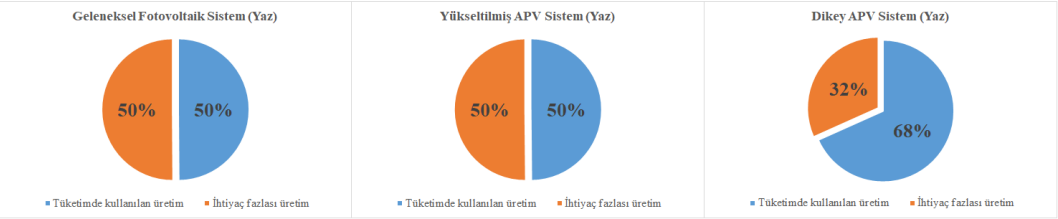
Şekil 4.15 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Yaz)

Yaz sezonunda, tüketilen enerjinin %60'ını üretilen enerjiden karşılayabilmek için geleneksel PV sistemde 594, yükseltilmiş APV sistemde 540 ve dikey APV sistemde ise yalnızca 378 panel yeterli olmaktadır.



Şekil 4.16 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Yaz)

Sezon boyunca en yüksek enerji üretimi 75,12 MWh ile yükseltilmiş APV sistem tarafından gerçekleştirilirken, en düşük üretim ise 70,98 MWh ile geleneksel PV sistemde gözlemlenmiştir. Dikey APV sistem ise 74,55 MWh'lik üretim gerçekleştirebilmiştir.

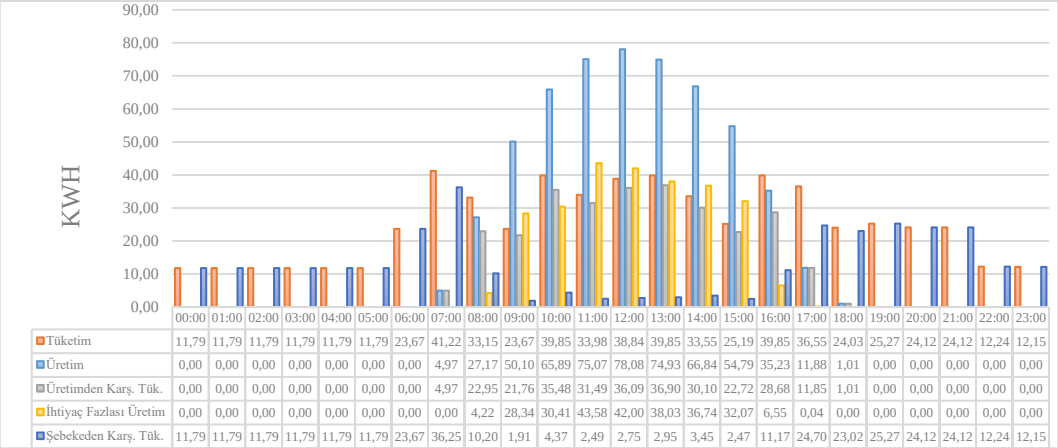


Şekil 4.17 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Yaz)

Geleneksel PV sistem ve yükseltilmiş APV sistem ürettikleri enerjinin yarısını tüketimde kullanırken, dikey APV sistem ürettiği 74,55 MWh'lik enerjinin %68'lik bir kısmını tüketimde kullanmıştır.

4.2.3 Sonbahar Sezonu Simülasyon Sonuçları

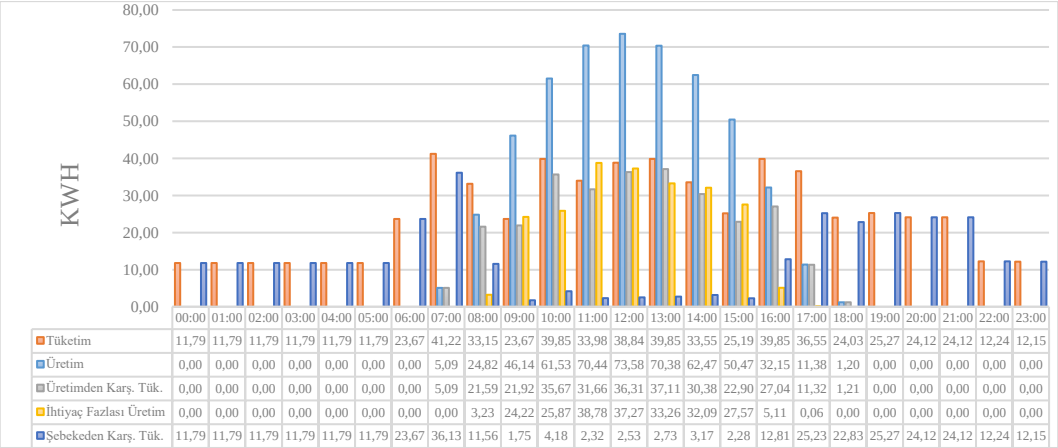
Sonbahar sezonunda tarımsal sulamanın yapılmamasıyla birlikte sabah saatlerindeki yüksek elektrik tüketimi 41 kWh seviyelerine düşerken, gün içerisindeki enerji tüketimi saatlik olarak 24 ila 41 kWh arasında değişiklik göstermektedir.



	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
Tüketim	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	23,67	41,22	33,15	23,67	39,85	33,98	38,84	39,85	33,55	25,19	39,85	36,55	24,03	25,27	24,12	24,12	12,24	12,15
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97	27,17	50,10	65,89	75,07	78,08	74,93	66,84	54,79	35,23	11,88	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97	22,95	21,76	35,48	31,49	36,09	36,90	30,10	22,72	28,68	11,85	1,01	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	4,22	28,34	30,41	43,58	42,00	38,03	36,74	32,07	6,55	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	23,67	36,25	10,20	1,91	4,37	2,49	2,75	2,95	3,45	2,47	11,17	24,70	23,02	25,27	24,12	24,12	12,24	12,15

Şekil 4.18 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Sonbahar)

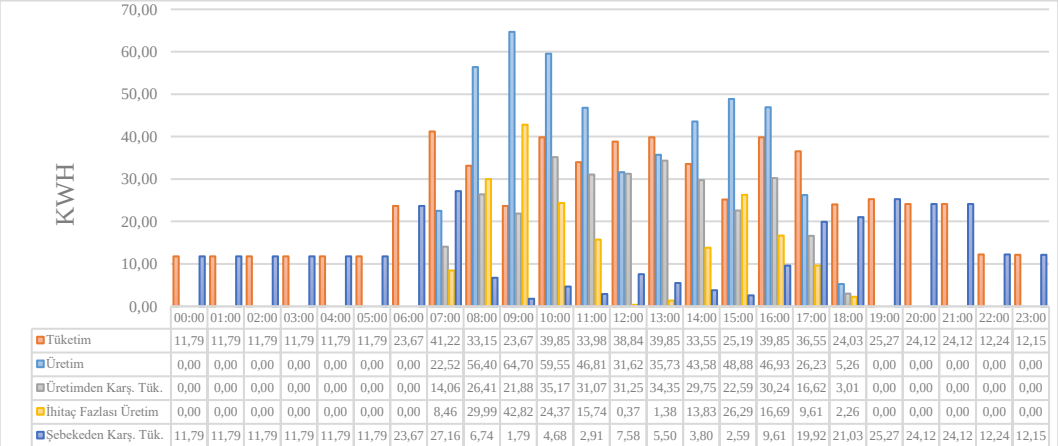
Sabah saatlerinde enerji tüketiminin azalmasıyla birlikte, geleneksel PV sistem saat 8 itibarıyla tüketimin büyük çoğunluğunu karşılamaya başlamış ve akşam saat 17'ye kadar şebekeden çekilen enerji miktarını minimum seviyeye düşürmüştür. Öğlen saatlerine doğru enerji üretiminin artmasıyla birlikte artan ihtiyaç fazlası üretim dikkat çekmektedir.



	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
Tüketim	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	23,67	41,22	33,15	23,67	39,85	33,98	38,84	39,85	33,55	25,19	39,85	36,55	24,03	25,27	24,12	24,12	12,24	12,15
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,09	24,82	46,14	61,53	70,44	73,58	70,38	62,47	50,47	32,15	11,38	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,09	21,59	21,92	35,67	31,66	36,31	37,11	30,38	22,90	27,04	11,32	1,21	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	3,23	24,22	25,87	38,78	37,27	33,26	32,09	27,57	5,11	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	23,67	36,13	11,56	1,75	4,18	2,32	2,53	2,73	3,17	2,28	12,81	25,23	22,83	25,27	24,12	24,12	12,24	12,15

Şekil 4.19 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Sonbahar)

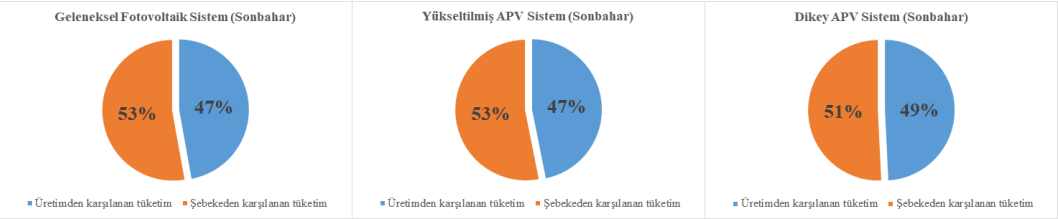
Yükseltilmiş APV sistem, geleneksel PV sistemle benzer bir enerji üretim grafiği sergilemiştir. Sabah saatlerindeki enerji tüketimindeki düşüşle birlikte sistem, daha fazla tüketimi karşılayarak gün boyunca şebekeden çekilen enerji miktarını minimum seviyede tutmuştur.



	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
Tüketim	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	23,67	41,22	33,15	23,67	39,85	33,98	38,84	39,85	33,55	25,19	39,85	36,55	24,03	25,27	24,12	24,12	12,24	12,15
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,52	56,40	64,70	59,55	46,81	31,62	35,73	43,58	48,88	46,93	26,23	5,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,06	26,41	21,88	35,17	31,07	31,25	34,35	29,75	22,59	30,24	16,62	3,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
İhitaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,46	29,99	42,82	24,37	15,74	0,37	1,38	13,83	26,29	16,69	9,61	2,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	23,67	27,16	6,74	1,79	4,68	2,91	7,58	5,50	3,80	2,59	9,61	19,92	21,03	25,27	24,12	24,12	12,24	12,15

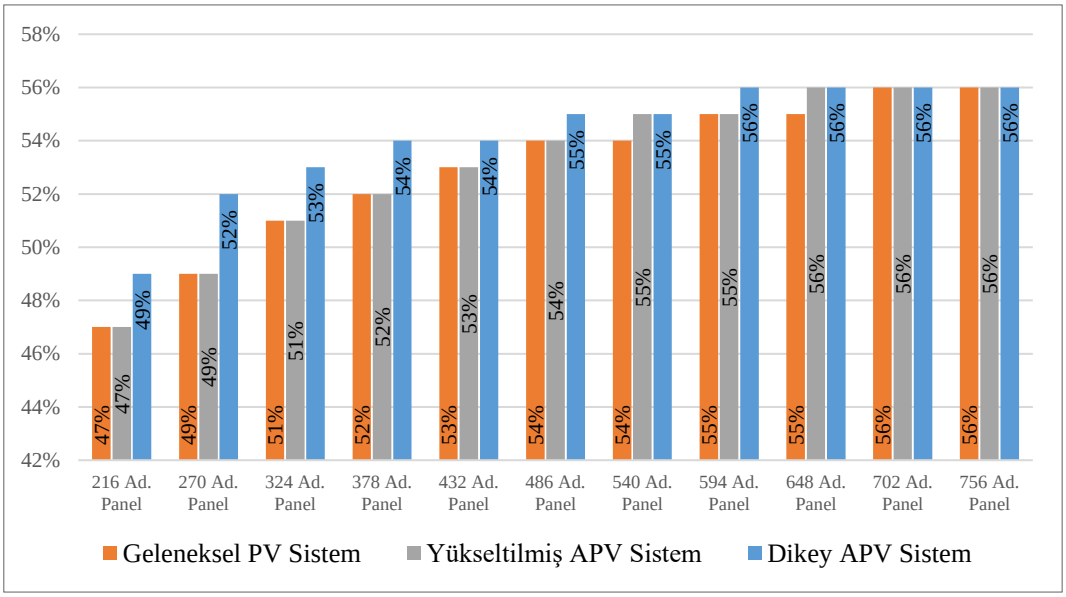
Şekil 4.20 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Sonbahar)

Dikey APV sistem, ön yüzü doğuya bakacak şekilde tasarlandığı için sabah saatlerinde daha fazla enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Öğle saatlerinde ise enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayarak, güneşin en yüksek olduğu vakitlerde ihtiyaç fazlası enerji üretimi minimum seviyede kalmıştır.



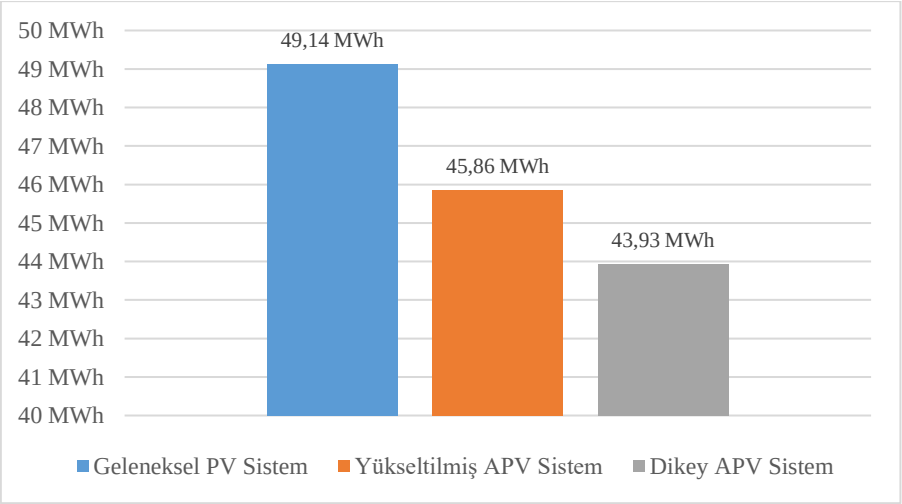
Şekil 4.21 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Sonbahar)

Sonbahar sezonunda, ilkbahar ve kış sezonlarına kıyasla daha benzer bir öz tüketim karşılanma oranı gözlemlenmektedir. Sistemler, sırasıyla 25,56 MWh, 25,40 MWh ve 26,68 MWh'lik enerjiyi ürettikleri enerjiden karşılamıştır.



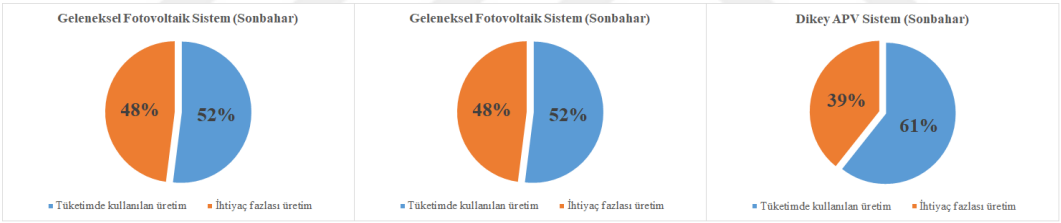
Şekil 4.22 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Sonbahar)

Sonbahar sezonunda, panel sayısında 3,5 katlık bir artış yapılmasına rağmen %60'lık bir karşılanan tüketim oranına ulaşılamamıştır. Bir noktadan sonra, panel sayısındaki artış toplam elektrik üretimini artırmış olsa da, üretilen enerji tüketilemediği için karşılanan tüketim oranı sabit kalmıştır.



Şekil 4.23 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Sonbahar)

Geleneksel PV sistem ve yükseltilmiş APV sistem, karşılanan tüketim oranında dikey APV sistemin 2 puan gerisinde kalsalar da, her iki sistem de toplam enerji üretiminde dikey APV sistemden daha fazla enerji üretmiştir. Geleneksel PV sistem, yükseltilmiş APV sistemden %7,2, dikey APV sistemden ise %11,9 daha fazla enerji üreterek 49,14 MWh'lik enerji üretimi gerçekleştirmiştir.

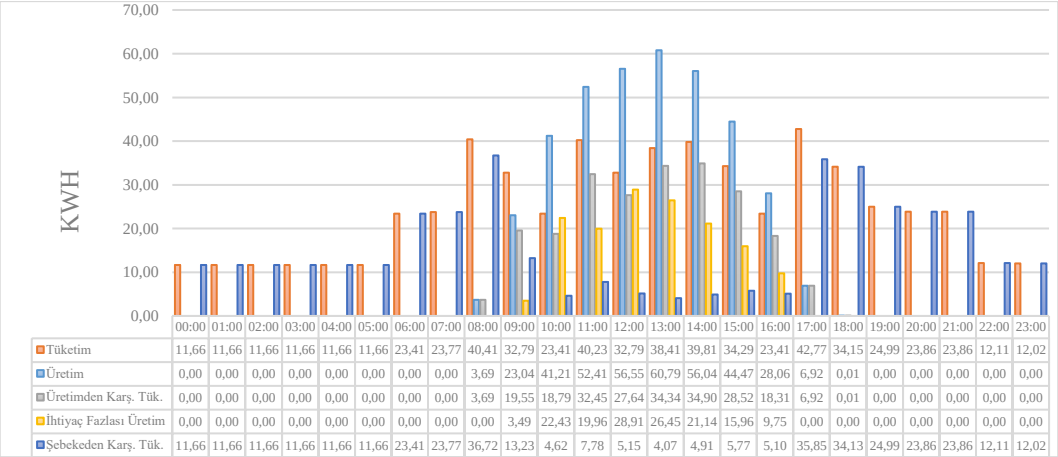


Şekil 4.24 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Sonbahar)

Ürettiği enerjinin %61'lik kısmını öz tüketimde kullanan dikey APV sistem, kullanılan enerjinin üretilen enerjiye oranına göre diğer sistemlerden daha iyi bir seviyeye sahiptir. Ancak, bu oranın diğer sistemlerden daha yüksek olmasına katkıda bulunan bir diğer faktör de, dikey APV sistemin toplam enerji üretiminin diğer sistemlere göre daha düşük olmasıdır.

4.2.4 Kış Sezonu Simülasyon Sonuçları

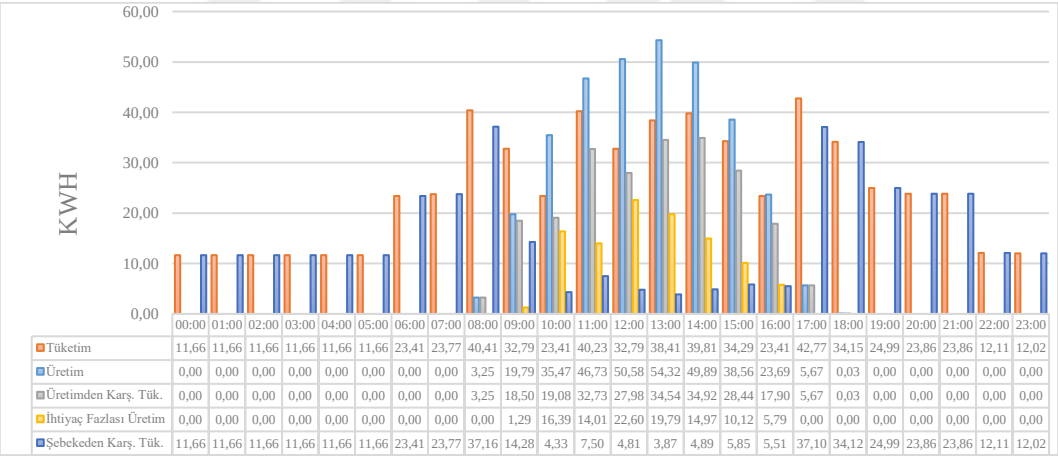
Kış sezonunda, tarımsal sulamanın yapılmaması nedeniyle sonbahar sezonuna benzer bir enerji tüketimi profili gözlemlenmektedir. Günün sabah vakitlerinde enerji tüketimi en fazla 40 kWh seviyelerine çıkmakta, diğer saatlerde ise dalgalı bir enerji tüketim grafiği izlenmektedir.



	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
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	23,41	23,77	40,41	32,79	23,41	40,23	32,79	38,41	39,81	34,29	23,41	42,77	34,15	24,99	23,86	23,86	12,11	12,02
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,69	23,04	41,21	52,41	56,55	60,79	56,04	44,47	28,06	6,92	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,69	19,55	18,79	32,45	27,64	34,34	34,90	28,52	18,31	6,92	0,01	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	3,49	22,43	19,96	28,91	26,45	21,14	15,96	9,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	23,41	23,77	36,72	13,23	4,62	7,78	5,15	4,07	4,91	5,77	5,10	35,85	34,13	24,99	23,86	23,86	12,11	12,02

Şekil 4.25 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Kış)

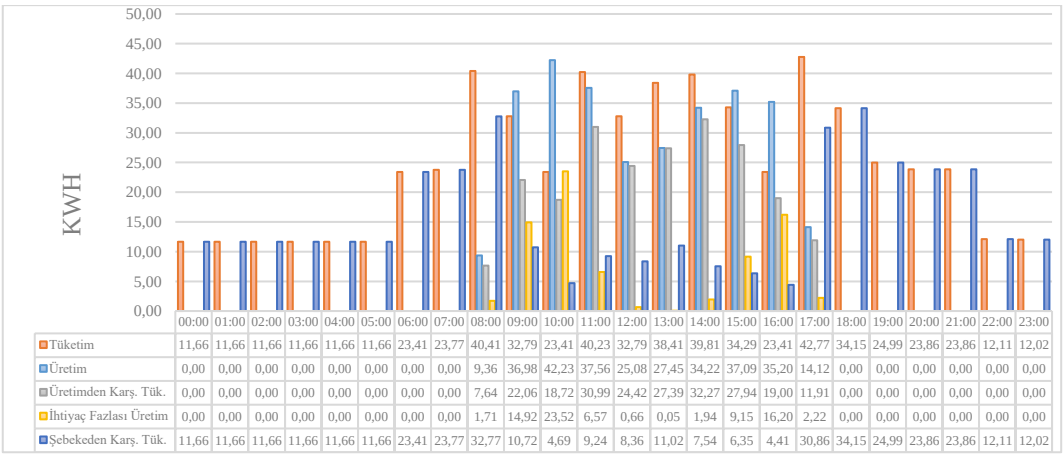
Kış sezonunda, güneş ışınımındaki belirgin düşüş nedeniyle sistem, öğleden önce saat 9'da nispeten daha düşük bir üretim sağlasa da, saat 10 ile öğleden sonra saat 5 arasındaki süreçte tüketilen enerjinin büyük çoğunluğunu karşılayabilmiştir. Ancak, diğer saatlerde ise sistem, enerji üretiminde çok fazla etken rol oynayamamıştır.



	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
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	23,41	23,77	40,41	32,79	23,41	40,23	32,79	38,41	39,81	34,29	23,41	42,77	34,15	24,99	23,86	23,86	12,11	12,02
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	19,79	35,47	46,73	50,58	54,32	49,89	38,56	23,69	5,67	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	18,50	19,08	32,73	27,98	34,54	34,92	28,44	17,90	5,67	0,03	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	1,29	16,39	14,01	22,60	19,79	14,97	10,12	5,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	23,41	23,77	37,16	14,28	4,33	7,50	4,81	3,87	4,89	5,85	5,51	37,10	34,12	24,99	23,86	23,86	12,11	12,02

Şekil 4.26 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Kış)

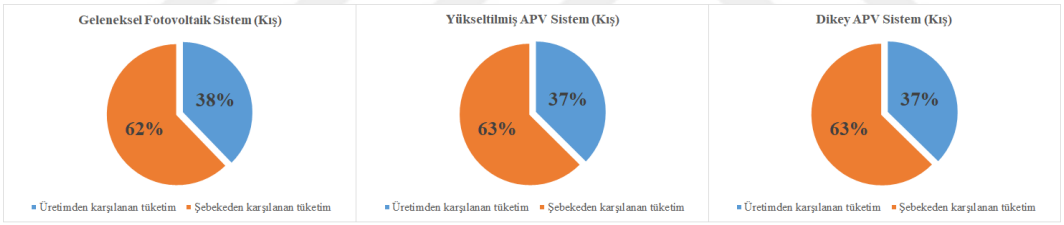
Yükseltilmiş APV sisteminin, geleneksel PV sisteme kıyasla daha düşük enerji üretimi gerçekleştirdiği grafikte açıkça görülebilmektedir. Bu sistem, geleneksel PV sistemle benzer bir karakteristik özellik göstererek, gündüz vakti saat 10 ila 17 arasında tesisin enerji yükünün büyük çoğunluğunu karşılamış, ancak diğer saatlerde çok fazla katkıda bulunamamıştır.



	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
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	23,41	23,77	40,41	32,79	23,41	40,23	32,79	38,41	39,81	34,29	23,41	42,77	34,15	24,99	23,86	23,86	12,11	12,02
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,36	36,98	42,23	37,56	25,08	27,45	34,22	37,09	35,20	14,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,64	22,06	18,72	30,99	24,42	27,39	32,27	27,94	19,00	11,91	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	1,71	14,92	23,52	6,57	0,66	0,05	1,94	9,15	16,20	2,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	23,41	23,77	32,77	10,72	4,69	9,24	8,36	11,02	7,54	6,35	4,41	30,86	34,15	24,99	23,86	23,86	12,11	12,02

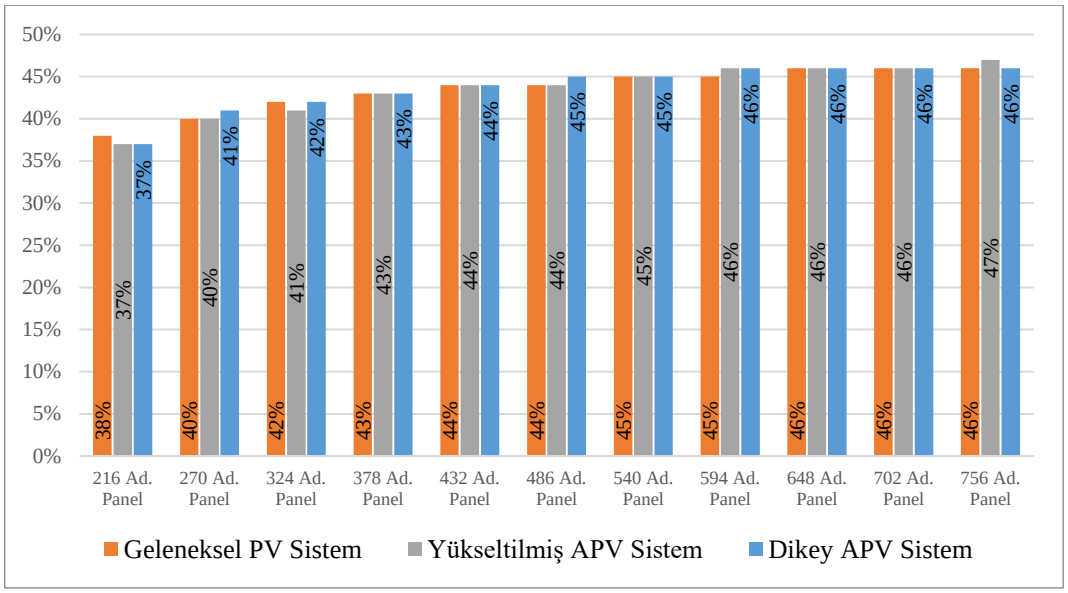
Şekil 4.27 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Kış)

Diğer sistemlere kıyasla, dikey APV sistem gündüz vakti tüketilen enerjinin sadece bir kısmını karşılayabilmiş, sabah ve akşam saatlerinde bile sistemin enerji ihtiyacı tam anlamıyla karşılanamamıştır. Ancak, sabah 9 ile öğleden sonra 5 saatlerinde diğer sistemlerden daha yüksek enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Dikey APV sistemin, geleneksel PV sistem ve yükseltilmiş APV sisteme kıyasla çok daha düşük enerji üretimi gerçekleştirdiği grafikte açıkça görülebilmektedir.



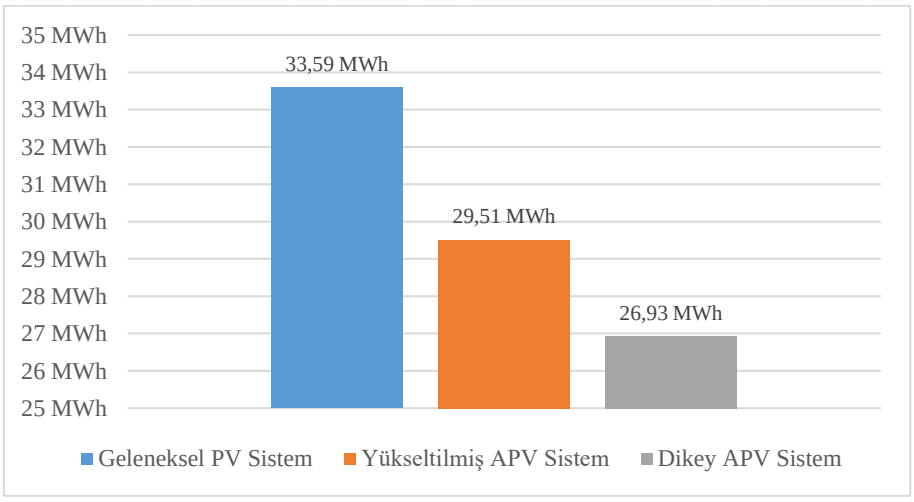
Şekil 4.28 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Sonbahar)

Üç sistemin öz tüketimi karşılama oranları birbirine oldukça yakındır. Sistemler sırasıyla 20,26 MWh, 20,07 MWh ve 20,01 MWh'lik tüketim ihtiyacını karşılamıştır. Genelde dikey APV sistemin öz tüketim karşılama oranı diğer sezonlarda daha yüksek olsa da, kış sezonunda çok az bir farkla da olsa diğer sistemlerin gerisinde kalmıştır.



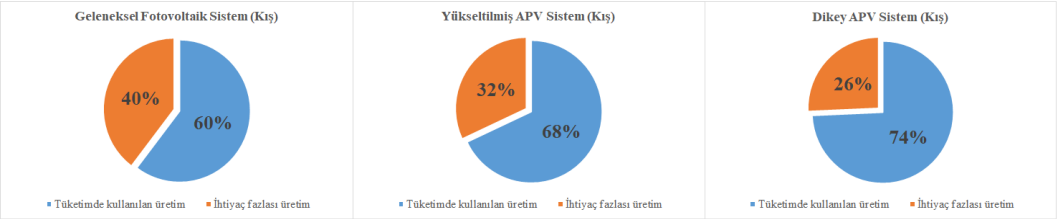
Şekil 4.29 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Kış)

İlkbahar ve yaz sezonuna kıyasla, panel sayısında 3,5 katlık bir artış yapılmasına rağmen %60'lık bir karşılanan tüketim oranına ulaşılamamıştır. Panel sayısındaki ciddi artışlar, karşılanan tüketim oranını en fazla %46-47 seviyelerine getirebilmiştir. Bu değer, sonbahar sezonunda yakalanan %56'lık değerin de gerisindedir.



Şekil 4.30 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Kış)

Sistemlerin öz tüketimleri karşılama oranları hemen hemen çok yakın olsa da toplam enerji üretimleri arasında farklar bulunmaktadır. Geleneksel PV sistem, 33,59 MWh ile en yüksek enerji üretimini gerçekleştirirken, dikey APV sistem 26,93 MWh ile geleneksel PV sistemden %20, yükseltilmiş APV sistemden ise %9 daha az enerji üretimi gerçekleştirmiştir.

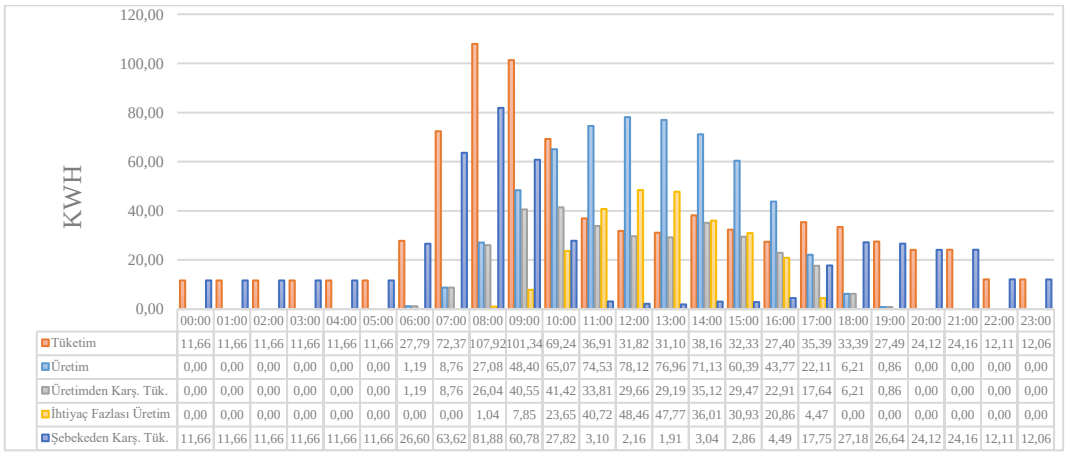


Şekil 4.31 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Kış)

Ürettiği enerjinin %74'üyle %68'ini öz tüketimde kullanan dikey APV sistem ve yükseltilmiş APV sistem, her ne kadar geleneksel PV sisteme göre daha iyi bir seviyeye sahip olsa da, bu iyimser tablo üretilen enerjinin geleneksel PV sisteme göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Üretilen enerji düşük olduğundan ve tüketimde kullanılan enerji hemen hemen üç sistemde de aynı olduğundan, yükseltilmiş APV ve dikey APV sistemlerinin seviyeleri daha yüksek gözükmektedir.

4.2.5 Yıllık Bazda Simülasyon Sonuçları

Yıllık bazda enerji üretimi ve tüketiminin saatlik ortalama verilerine baktığımızda, ilkbahar ve yaz sezonundaki sulama faaliyetinin, sabah 7 ve 11 saatleri arasındaki ortalama enerji tüketim grafiğini 70 ila 110 kWh aralığına çıkardığı, güneşlenmenin olduğu diğer saatlerde ise 27 ila 37 kWh aralığında daha dengeli bir enerji tüketim grafiği olduğu görülmektedir.

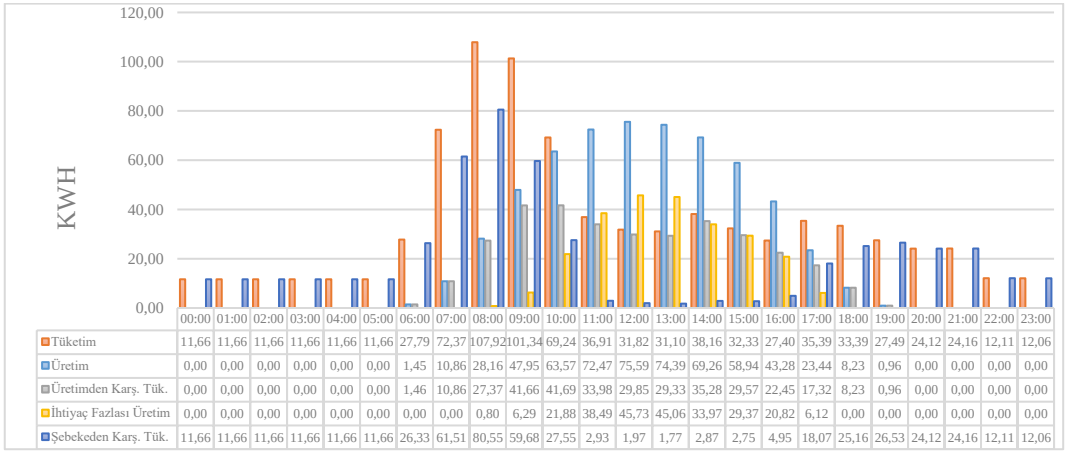


	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	27,79	72,37	107,92	101,34	69,24	36,91	31,82	31,10	38,16	32,33	27,40	35,39	33,39	27,49	24,12	24,16	12,11	12,06
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,19	8,76	27,08	48,40	65,07	74,53	78,12	76,96	71,13	60,39	43,77	22,11	6,21	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,19	8,76	26,04	40,55	41,42	33,81	29,66	29,19	35,12	29,47	22,91	17,64	6,21	0,86	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	1,04	7,85	23,65	40,72	48,46	47,77	36,01	30,93	20,86	4,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	26,60	63,62	81,88	60,78	27,82	3,10	2,16	1,91	3,04	2,86	4,49	17,75	27,18	26,64	24,12	24,16	12,11	12,06

Şekil 4.32 Geleneksel PV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yıllık)

Geleneksel PV sistemin, sabah 7 ile akşam 6 saatleri arasında dengeli bir artış ve azalış gösteren enerji üretim grafiğinin, sabah vakitlerindeki yüksek enerji tüketiminin %33,3'ünü karşılayabildiği gözükmektedir. Gündüz 11 ile 17 arasında

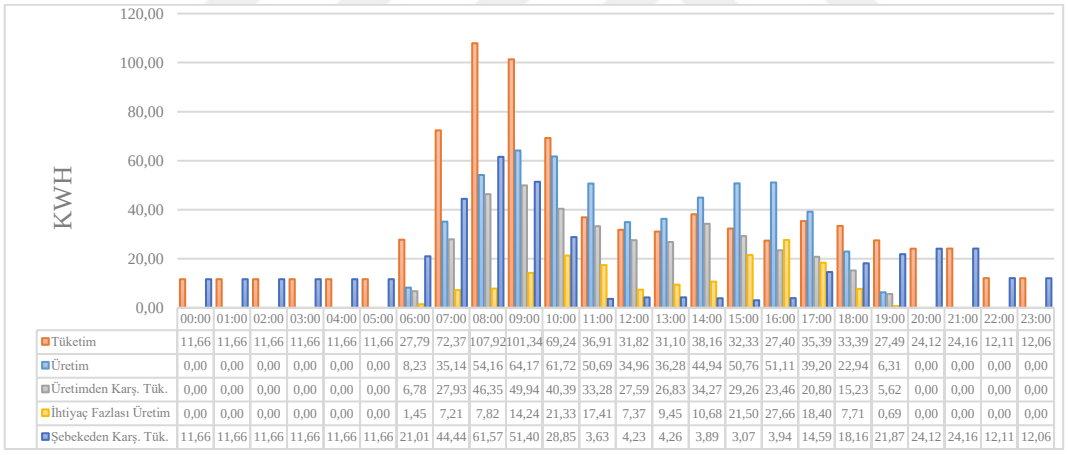
ise tüketimin neredeyse tamamı karşılanmış ve şebekeden çok az elektrik çekildiği gözlemlenmiştir.



	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
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	27,79	72,37	107,92	101,34	69,24	36,91	31,82	31,10	38,16	32,33	27,40	35,39	33,39	27,49	24,12	24,16	12,11	12,06
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45	10,86	28,16	47,95	63,57	72,47	75,59	74,39	69,26	58,94	43,28	23,44	8,23	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,46	10,86	27,37	41,66	41,69	33,98	29,85	29,33	35,28	29,57	22,45	17,32	8,23	0,96	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	0,80	6,29	21,88	38,49	45,73	45,06	33,97	29,37	20,82	6,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	26,33	61,51	80,55	59,68	27,55	2,93	1,97	1,77	2,87	2,75	4,95	18,07	25,16	26,53	24,12	24,16	12,11	12,06

Şekil 4.33 Yükseltilmiş APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yıllık)

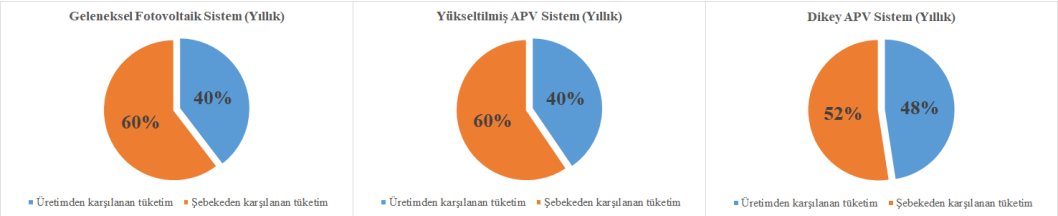
Geleneksel PV sistem ile benzer bir grafik sergileyen yükseltilmiş APV sistem, gündüz saat 11 ile 17 arasında tüketilen enerjinin büyük çoğunluğunu karşılarken, sabah saatlerinde ise 7 ile 11 arasındaki tüketimin %34,7'sini karşılamaktadır.



	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
Tüketim	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	27,79	72,37	107,92	101,34	69,24	36,91	31,82	31,10	38,16	32,33	27,40	35,39	33,39	27,49	24,12	24,16	12,11	12,06
Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,23	35,14	54,16	64,17	61,72	50,69	34,96	36,28	44,94	50,76	51,11	39,20	22,94	6,31	0,00	0,00	0,00	0,00
Üretimden Karş. Tük.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,78	27,93	46,35	49,94	40,39	33,28	27,59	26,83	34,27	29,26	23,46	20,80	15,23	5,62	0,00	0,00	0,00	0,00
İhtiyaç Fazlası Üretim	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45	7,21	7,82	14,24	21,33	17,41	7,37	9,45	10,68	21,50	27,66	18,40	7,71	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Şebekeden Karş. Tük.	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	11,66	21,01	44,44	61,57	51,40	28,85	3,63	4,23	4,26	3,89	3,07	3,94	14,59	18,16	21,87	24,12	24,16	12,11	12,06

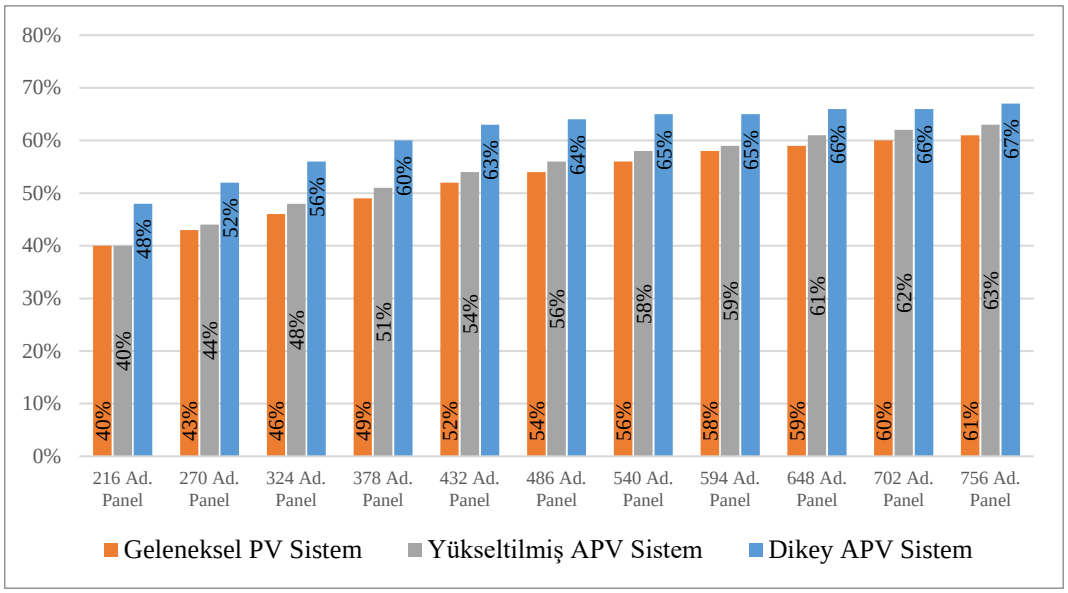
Şekil 4.34 Dikey APV sistem tasarımı simülasyon çıktıları (Yıllık)

Dikey APV sistem, diğer sistemlere kıyasla daha dalgalı bir enerji üretim grafiği sergilemektedir. Sabah 7 ile 11 arasındaki saat dilimindeki enerji ihtiyacının %46,9'unu karşılayabilen sistem, aynı zamanda gündüz vakti 11 ile 17 arasındaki saatlerdeki enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu da karşılamıştır.



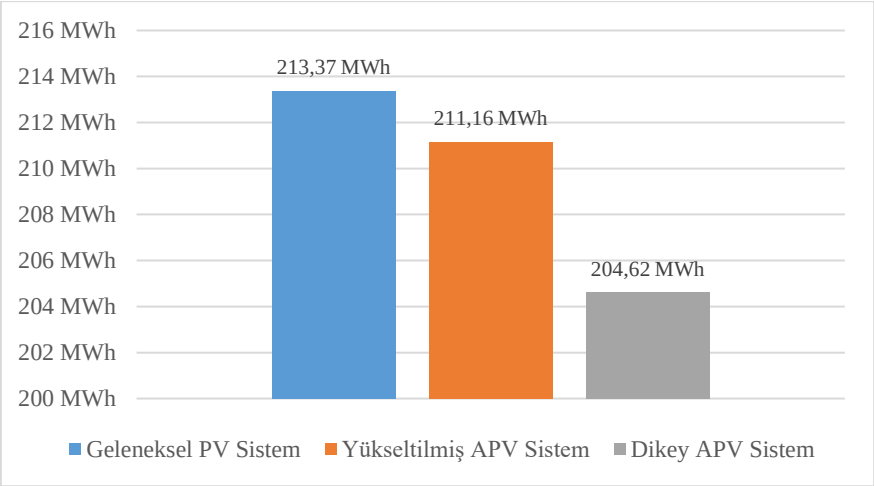
Şekil 4.35 Sistemlerin karşıladığı toplam tüketim (Yıllık)

Yıl boyunca geleneksel PV sistem 117,83 MWh, yükseltilmiş APV sistem 120,46 MWh ve dikey APV sistem ise 141,52 MWh enerji üreterek yıllık tüketim talebinin %40 ila %48'ini karşılayabilmişlerdir.



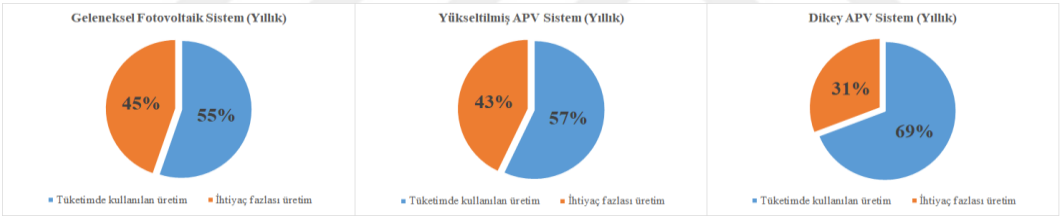
Şekil 4.36 Panel sayısına göre karşılanan tüketim (Yıllık)

Yıllık bazda incelendiğinde, bir yıl içerisindeki enerji tüketiminin %60'ını karşılamak için dikey APV sistemde 378 modül yeterli olurken, bu sayı yükseltilmiş APV sistemde 648'e ve geleneksel PV sistemde 702 adete kadar çıkmaktadır.



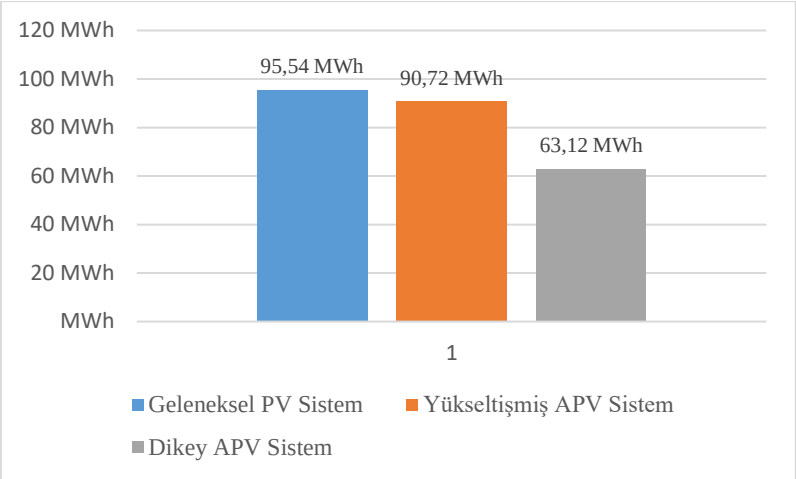
Şekil 4.37 Sistemlerin toplam enerji üretimi (Yıllık)

Her ne kadar dikey APV sistem tasarımı sayesinde diğer sistemlere kıyasla öz tüketimin daha büyük bir kısmını karşılayabilse de, yıllık toplam elektrik üretimi açısından geleneksel PV sistemin gerisinde kalmaktadır. Geleneksel PV sistem, yükseltilmiş APV sisteme göre yalnızca %1 daha fazla enerji üretirken, dikey APV sisteme kıyasla %4,3 daha yüksek enerji üretimi gerçekleştirmektedir.



Şekil 4.38 Sistemlerin tüketimde kullandığı enerji üretimleri (Yıllık)

Sistemler arasındaki enerji üretim farkının %1 ile %5 arasında olduğu göz önüne alındığında, dikey APV sistem ürettiği enerjinin %69'unu tüketimde kullanarak, diğer sistemlerin %55 ve %57'lik oranlarına kıyasla önemli bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 4.39 Sistemlerin enerji üretimi sonucu satılabilen enerji miktarı

Diğer sistemlere kıyasla daha fazla enerji üretebilmesine rağmen, ürettiği enerjinin daha düşük bir kısmını öz tüketimde kullanan geleneksel PV sistem, yıllık 95,54 MWh'lik ihtiyaç fazlası enerji satarak en yüksek satış oranına ulaşmıştır. Onu, 90,72 MWh ile yükseltilmiş APV sistem takip etmiştir. Dikey APV sistem ise toplam enerji üretiminin diğer sistemlere göre nispeten daha düşük olması ve ürettiği enerjinin büyük bir kısmını öz tüketimde kullanabilmesi nedeniyle yıllık 63,12 MWh'lik enerji satışı gerçekleştirebilmiştir.

5
SONUÇ

Bu çalışmada, geleneksel PV sistem, yükseltilmiş APV sistem ve dikey APV sistem olmak üzere üç farklı sistemin enerji üretim performansları, tesisin öz tüketimini karşılama oranları ve üretilen enerjinin ne kadarının kullanılabildiği gibi veriler analiz edilmiştir.

Geleneksel PV sistem, toplam enerji üretimi açısından en yüksek değeri verse de, tesisin enerji tüketim ihtiyacını karşılamada en iyi çözüm olmamıştır. Çiftliğin enerji tüketimini karşılama konusunda diğer sistemlerden geride kalmış ve aynı zamanda tarımsal kullanım açısından araziyi engelleyici bir faktör olmuştur.

Yükseltilmiş APV sistem, geleneksel PV sistem ile benzer bir enerji üretim eğilimi sergilemiş ve görece daha düşük miktarda enerji üretmiştir. Ancak, yükseltilmiş yapısı sayesinde panellerin altındaki arazide tarım yapılmasına olanak sağlamış ve böylece tarım ile enerji üretiminin aynı arazide entegre edilebileceğini ortaya koymuştur.

Dikey APV sistem, toplam enerji üretimi açısından diğer iki sistemin gerisinde kalsa da, doğuya bakan çift yüzeyli (bi-facial) panellerin kullanımı sayesinde tüketilen enerji miktarını en çok karşılayan enerji üretim sistemi olmuştur. Özellikle sabah ve akşam saatlerindeki üretim avantajı sayesinde şebekeden çekilen enerji miktarını önemli ölçüde düşürmüştür.

Sezonluk bazda yapılan değerlendirmelerde, kış aylarında panel sayısındaki artışa rağmen beklenen seviyede enerji üretimi sağlanamamış ve tüketim ihtiyacı tam olarak karşılanamamıştır. İlkbahar ve yaz aylarında ise güneşlenme süresinin artışıyla birlikte sistemlerin tüketimi karşılama oranları yükselmiştir.

Öz tüketimin karşılanma oranları açısından değerlendirildiğinde, dikey APV sistem ihtiyaç duyulan enerjinin %48'ini karşılarken, geleneksel PV sistem ve yükseltilmiş APV sistem %40 oranında bir karşılamaya ulaşabilmiştir.

Genel olarak çalışma sonuçları, enerji ihtiyacının gün doğumu ve gün batımı saatlerinde daha yüksek olduğu ve tarımsal olarak kullanılabilen bir arazide dikey APV sistemin tercih edilmesinin büyük avantajlar sağladığını göstermektedir. Tarımı engellemeyen dikey APV sistem, tasarımı sayesinde sabah ve akşam saatlerindeki yüksek enerji talebini karşılamak konusunda diğer sistemlerden daha iyi performans göstermiştir. Ancak, diğer sistemlere kıyasla yaklaşık üç kat daha büyük bir araziye kurulması gerekmektedir. Buna rağmen, tarımsal alanlarda kullanıldığında panel sıraları arasındaki boşlukların ekim alanı olarak değerlendirilmesi sayesinde arazi kaybı yalnızca %10 seviyelerinde kalmaktadır.

Arazi açısından sınırlı alana sahip tesislerde ise yükseltilmiş APV sistemlerin kullanımı daha uygun bir alternatif olabilir. Dikey APV sistemine kıyasla üçte bir oranında daha küçük bir alana kurulabilen bu sistem, aynı zamanda panel altında tarım yapılmasına olanak tanımaktadır.

Bu bulgular, tarımsal alanlarda fotovoltaik sistemlerin tarımı engellemeden kullanılabileceğini ve hatta enerji tüketim trendine bağlı olarak farklı APV sistemlerin, geleneksel PV sistemlere kıyasla daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

[1] Y. Luo et al., “Carrier transport enhancement mechanism in highly efficient antimony selenide Thin-Film Solar cell,” Advanced Functional Materials, vol. 33, no. 14, Jan. 2023, doi: 10.1002/adfm.202213941.

[2] EIA, “International Energy Outlook 2019 with projections to 2050”, U.S. Energy Information Administration, 2019.

[3] A. Rehman, "Design of a photovoltaic system for a house in pakistan and its open source ultra-low power data logger," Ph.D. dissertation, Memorial University of Newfoundland, 2020.

[4] L. Copeland, “Meeting the challenges for agriculture,” Agriculture, vol. 1, no. 1, pp. 1–3, Jun. 2011, doi: 10.3390/agriculture1010001.

[5] Food and Agriculture Organization (FAO), “FAO website,” FAO, 2024. [Online]. Available: https://www.fao.org/home/en. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[6] World Energy Outlook 2018. 2018. doi: 10.1787/weo-2018-en.

[7] A. S. N. Huda and R. Živanović, “Large-scale integration of distributed generation into distribution networks: Study objectives, review of models and computational tools,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 76, pp. 974–988, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.069.

[8] M. Tawalbeh, A. Al-Othman, F. Kafiah, E. Abdelsalam, F. Almomani, and M. Alkasrawi, “Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook,” The Science of the Total Environment, vol. 759, p. 143528, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143528.

[9] 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.

[10] S. Jaiswal, “Renewable Energy From Solar Panels: A Study of Photovoltaic Physics and Environmental Benefits,” ShodhKosh Journal of Visual and Performing Arts, vol. 4, no. 2, Dec. 2023, doi: 10.29121/shodhkosh.v4.i2.2023.2064.

[11] S. K. Mulaudzi and S. Bull, An assessment of the potential of solar photovoltaic (PV) application in South Africa. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/irec.2016.7478917.

[12] B. Parida, S. Iniyan, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.

[13] World Bank Group, “Global Solar Atlas – World,” Global Solar Atlas, 2024. [Online]. Available: https://globalsolaratlas.info/download/world. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[14] M. Nassereddine, A. Hellany, M. Nagrial, J. Rizk, and D. D. Micu, Utilities investments into residential properties: PV solar system with energy storage, vol. 27. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/upec.2016.8114083.

[15] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K.-H. Kim, “Solar energy: Potential and future prospects,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 894–900, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.094.

[16] M. a. G. De Brito, L. P. Sampaio, L. G Junior, and C. A. Canesin, Research on photovoltaics: Review, trends and perspectives. 2011, pp. 531–537. doi: 10.1109/cobep.2011.6085198.

[17] M. Becquerel. "Memoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires," in Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, vol. 9, pp. 561–567, 1839.

[18] “PVPS Report Snapshot of Global PV 1992-2013 Preliminary Trends Information from the IEA PVPS Programme.” Available: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2013_-_final_3.pdf

[19] S. Europe. "Global Market Outlook for Solar Power: 2024–2028," in Solar Power Europe: Bruxelles, Belgium, 2024.

[20] International Energy Agency (IEA), Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025, IEA, 2020. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[21] A. Al-Karaghouli, D. Renne, and L. L. Kazmerski, “Technical and economic assessment of photovoltaic-driven desalination systems,” Renewable Energy, vol. 35, no. 2, pp. 323–328, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.05.018.

[22] M. M. Rahman, I. Khan, D. L. Field, K. Techato, and K. Alameh, “Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications,” Renewable Energy, vol. 188, pp. 731–749, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.02.065.

[23] H. Ritchie, P. Rosado, and M. Roser, “Data page: Solar photovoltaic module price,” Energy, 2023. [Online]. Available: https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[24] D. Parra et al., “An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 79, pp. 730–749, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.003.

[25] M. A. Zeder, “The origins of agriculture in the Near East,” Current Anthropology, vol. 52, no. S4, pp. S221–S235, Oct. 2011, doi: 10.1086/659307.

[26] E. Aguilera et al., “Embodied energy in agricultural inputs: Incorporating a historical perspective,” Documentos de Trabajo de la Sociedad de Estudios de Historia Agraria, no. 1507, 2015.

[27] J. Martinez-Alier, “The EROI of agriculture and its use by the Via Campesina,” The Journal of Peasant Studies, vol. 38, no. 1, pp. 145–160, Jan. 2011, doi: 10.1080/03066150.2010.538582.

[28] P. Sulewski and A. Wąs, “Agriculture as Energy Prosumer: Review of Problems, challenges, and opportunities,” Energies, vol. 17, no. 24, p. 6447, Dec. 2024, doi: 10.3390/en17246447.

[29] Q. Hernandez-Escobedo *et al.*, “Renewable energies in the agricultural sector: A perspective analysis of the last three years,” *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 345, Dec. 2022, doi: 10.3390/en16010345.

[30] M. A. Z. Abidin, M. N. Mahyuddin, and M. A. A. M. Zainuri, “Agrivoltaic Systems: An innovative approach to combine agricultural production and solar photovoltaic system,” in *Lecture notes in electrical engineering*, 2022, pp. 779–785. doi: 10.1007/978-981-16-8129-5_119.

[31] A. E. Coşgun, “The potential of Agrivoltaic systems in TURKEY,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 105–111, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.017.

[32] TSE Energy, “Agrivoltaics: What are the advantages for agriculture?,” TSE, 2021. [Online]. Available: https://www.tse.energy/en/articles/agrivoltaisme-quels-avantages-pour-lagriculture. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[33] Next2Sun, “Next2Sun and iSun build first vertical agrivoltaics system in the USA,” Next2Sun, 2023. [Online]. Available: https://next2sun.com/en/next2sun-and-isun-build-first-vertical-agrivoltaics-system-in-the-usa/. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[34] A. Ghosh, “Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review,” Solar Energy, vol. 266, p. 112146, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.112146.

[35] A. E. Coşgun, M. S. Endiz, H. Demir, and M. Özcan, “Agrivoltaic systems for sustainable energy and agriculture integration in Turkey,” Heliyon, vol. 10, no. 11, p. e32300, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32300.

[36] M. A. A. Mamun, P. Dargusch, D. Wadley, N. A. Zulkarnain, and A. A. Aziz, “A review of research on agrivoltaic systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 161, p. 112351, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112351.

[37] 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].

[38] S. Schindele et al., “Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications,” Applied Energy, vol. 265, p. 114737, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114737.

[39] V. Adomavicius, “Review of results of agro-photovoltaic system implementation in agriculture,” Engineering for Rural Development, May 2021, doi: 10.22616/erdev.2021.20.tf130.

[40] M. A. A. Mamun, P. Dargusch, D. Wadley, N. A. Zulkarnain, and A. A. Aziz, “A review of research on agrivoltaic systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 161, p. 112351, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112351.

[41] M. Al-Saidi and N. Lahham, “Solar energy farming as a development innovation for vulnerable water basins,” Development in Practice, vol. 29, no. 5, pp. 619–634, Apr. 2019, doi: 10.1080/09614524.2019.1600659.

[42] S. Agir, P. Derin-Gure, and B. Senturk, “Farmers’ perspectives on challenges and opportunities of agrivoltaics in Turkiye: An institutional perspective,” Renewable Energy, vol. 212, pp. 35–49, May 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.137.

[43] E. H. Adeh, J. S. Selker, and C. W. Higgins, “Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency,” PLoS ONE, vol. 13, no. 11, p. e0203256, Nov. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0203256.

[44] H. Marrou, L. Dufour, and J. Wery, “How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system?,” European Journal of Agronomy, vol. 50, pp. 38–51, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.eja.2013.05.004.

[45] H. Dinesh and J. M. Pearce, “The potential of agrivoltaic systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 54, pp. 299–308, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.024.

[46] S. N. Panda et al., “Solar energy’s role in achieving sustainable development goals in agriculture,” International Journal of Environment and Climate Change, vol. 14, no. 5, pp. 10–31, May 2024, doi: 10.9734/ijecc/2024/v14i54167.

[47] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, “Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası,” GEPA, Available: https://gepa.enerji.gov.tr/. [Accessed: Jan. 30, 2025].

[48] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Energy Statistics 2024, IRENA, Abu Dhabi, 2024, ISBN: 978-92-9260-614-5.

[49] S. Asa’a et al., “A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 200, p. 114515, May 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114515.

[50] S. G. Gulhane and A. R. Phadke, Design of agro-photovoltaic system for optimized energy generation and crop yield using Fuzzy framework, in Proc. 2023 2nd Int. Conf. Innov. Technol. (INOCON), Bangalore, India, Mar. 3–5, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/inocon57975.2023.10101340.

[51] J. Cappelle, B. Herteleer, B. Ronsijn, B. Uytterhaegen, and B. Willockx, “A Standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems,” *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 1995–1998, Oct. 2020, doi: 10.4229/eupvsec20202020-6cv.2.47.

[52] J. Macknick et al., “The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons from the InSPIRE Research Study,” Aug. 2022. doi: 10.2172/1882930.

[53] D. Soto-Gómez, “Integration of crops, livestock, and solar panels: A review of Agrivoltaic systems,” Agronomy, vol. 14, no. 8, p. 1824, Aug. 2024, doi: 10.3390/agronomy14081824.

[54] F. Lettenmeier et al., Agri-photovoltaic systems – Requirements for primary agricultural use, DIN SPEC 91434, Deutsches Institut für Normung, May 2021.

[55] S. Gorjian et al., “Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 158, p. 112126, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112126.

[56] K. Biró-Varga, I. Sirnik, and S. Stremke, “Landscape user experiences of interspace and overhead agrivoltaics: A comparative analysis of two novel types of solar landscapes in the Netherlands,” Energy Research & Social Science, vol. 109, p. 103408, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.erss.2023.103408.

[57] M. Trommsdorff, I. S. Dhal, Ö. E. Özdemir, D. Ketzer, N. Weinberger, and C. Rösch, “Agrivoltaics: solar power generation and food production,” in Elsevier eBooks, 2022, pp. 159–210. doi: 10.1016/b978-0-323-89866-9.00012-2.

[58] RES4Africa, Agrivoltaics: Harvesting solar energy in the Mediterranean, RES4Africa, 2023.

[59] S. Amaducci, X. Yin, and M. Colauzzi, “Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production,” Applied Energy, vol. 220, pp. 545–561, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081.

[60] S. Zainali et al., “Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts,” Applied Energy, vol. 339, p. 120981, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120981.

[61] B. Şentürk, D. Kuzyaka, Ö. Yalçın, U. M. Akyıldız, M. Eröz, and T. Özden, “Gıda ve Enerji Üretimini Birleştiren Arazilerde Verimlilik Analizi: Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik Modeli,” Verimlilik Dergisi, Apr. 2024, doi: 10.51551/verimlilik.1430853.

[62] 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

[63] K. A. K. Niazi and M. Victoria, “Comparative analysis of photovoltaic configurations for agrivoltaic systems in Europe,” Progress in Photovoltaics Research and Applications, vol. 31, no. 11, pp. 1101–1113, Jul. 2023, doi: 10.1002/pip.3727.

[64] R. Kopecek and J. Libal, “Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges,” Energies, vol. 14, no. 8, p. 2076, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082076.

[65] P. E. Campana, B. Stridh, S. Amaducci, and M. Colauzzi, “Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems,” Journal of Cleaner Production, vol. 325, p. 129091, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129091.

[66] A. Ullah, H. Imran, Z. Maqsood, and N. Z. Butt, “Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling on PV energy production in Pakistan,” Renewable Energy, vol. 139, pp. 830–843, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.114.

[67] HTW Dresden, Agri-Photovoltaikanlage in Dresden-Pillnitz, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden University of Applied Sciences. [Online]. Available: https://www.htw-dresden.de/luc/forschung/agri-photovoltaik/agri-pv-anlagen. [Accessed: Jan. 31, 2025].

[68] OIE, Study on the Potential of Solar Energy Use in the Agricultural and Freshwater Aquaculture Sectors in Croatia, Osijek Institute of Energy, Aug. 2023.

[69] M. Cossu et al., “Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses,” European Journal of Agronomy, vol. 118, p. 126074, May 2020, doi: 10.1016/j.eja.2020.126074.

[70] A. Steinhüser, Ö. E. Özdemir, and C. Hildebrandt, Efficient, Eco-Friendly, Sustainable Mediterranean Greenhouse Integrated with Artificial Intelligence, Hi-Tech Automation and Control System, PRIMA Section 1 2019 Topic 1.2.2, WP 5 – Deliverable D5.2, Fraunhofer ISE, Oct. 2021.

[71] S. Moretti and A. Marucci, “A Photovoltaic Greenhouse with Variable Shading for the Optimization of Agricultural and Energy Production,” Energies, vol. 12, no. 13, p. 2589, Jul. 2019, doi: 10.3390/en12132589.

[72] G. M. Dias et al., “Life cycle perspectives on the sustainability of Ontario greenhouse tomato production: Benchmarking and improvement opportunities,” Journal of Cleaner Production, vol. 140, pp. 831–839, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.039.

[73] A. J. Callejón-Ferre, F. Manzano-Agugliaro, M. Díaz-Pérez, A. [76Carreño-Ortega, and J. Pérez-Alonso, "Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (Solanum lycopersicum L.) under greenhouse conditions," Spanish Journal of Agricultural Research, vol. 7, no. 1, pp. 41-49, 2009, ISSN: 1695-971-X.

[74] H. A. Ahemd, A. A. Al-Faraj, and A. M. Abdel-Ghany, "Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review," *Scientia Horticulturae*, vol. 201, pp. 36–45, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.scienta.2016.01.030.

[75] Susmed House, "Objectives," Susmed House, [Online]. Available: https://susmedhouse.eu/objectives/. [Accessed: 31-Jan-2025].

[76] 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

S. F. Kaya and A. Durusu, “Tarımsal Uygulamalarda Agro-Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırmalı Analizi,” 2nd International Conference on Modern and Advanced Research (ICMAR2025), Konya, Turkey, p. 75, 2025