



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SPEKTRAL AYRIŞTIRICI KULLANARAK FOTOVOLTAİK
TERMAL SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

SÜHEYL BİLAL SUNGUR

DANIŞMAN

DOÇ. DR. ABİD USTAOĞLU

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SPEKTRAL AYRIŞTIRICI KULLANARAK FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEM
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süheyl Bilal SUNGUR

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Doç. Dr. Abid USTAOĞLU
Üye : Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur KARAAĞAÇ

BARTIN-2024

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Abid USTAOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “SPEKTRAL AYRIŞTIRICI KULLANARAK FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24.06.2024

Süheyl Bilal SUNGUR

ÖN SÖZ

Eğitim, bireylerin potansiyellerini keşfetmelerine ve geliştirmelerine olanak sağlayan hayati bir süreçtir. Herkesin erişebildiği, adil ve kapsayıcı bir eğitim sistemi, toplumların ilerlemesi ve gelişmesi için temel bir gerekliliktir. Eğitim, sadece bilgi aktarımı değil, aynı zamanda karakter gelişimi ve sosyal becerilerin kazanılması için de önemlidir.

Lisansüstü eğitimim boyunca araştırmanın belirlenmesi, yürütülmesi ve değerlendirilmesi aşamalarında bana yol gösteren ve destek olan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Abid USTAOĞLU'na,

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimi sürecinde bilgi ve birikimlerinden faydalandığım Bartın Üniversitesinin değerli akademisyenleri Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK, Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU'ya;

Tez süresince destek olan kıymetli Prof. Dr. Altan ÇETİN ve Yüksek Makine Mühendisi Muttalip ALTINOK'a;

Deneysel çalışmama katkı sunan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur KARAAĞAÇ'a;

Tez çalışmamı destekleyen, Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne;

Eğitim hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli babama, anneme ve kardeşlerime; sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Süheyl Bilal SUNGUR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SPEKTRAL AYRIŞTIRICI KULLANARAK FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Süheyl Bilal SUNGUR

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abid USTAOĞLU

Bartın-2024, sayfa: 87

Fotovoltaik sistemler (PV) elektrik enerjisi üretmek için kullanılan sistemlerdir. Fotovoltaik hücreleri düşük elektrik dönüşüm verimliliğine sahiptir. Yüksek ortam sıcaklıklarının neden olduğu aşırı ısınma elektrik dönüşüm verimliliğini düşürür. Fotovoltaik panele, güneşten gelen spektrum dalga boyu aralığı 200 nm – 2500 nm aralığındadır. Fotovoltaik silisyum hücrelerin üretim yaptığı aralık ise yaklaşık 380 nm ile 1100 nm arasındadır. Dalga boyu aralığının dışında kalan kısım fotovoltaik hücrelerde ısıya dönüştürülür. Isıya dönüştürülen kısım elektrik dönüşüm verimliliğini azaltır. Elektrik dönüşüm verimliliğini artırmak için fotovoltaik termal sistemler (PV/T) çözüm olarak geliştirilmiştir. Panel ısını azaltmak için ısı transfer akışkanı kullanılmaktadır. Hücrelerin arka yüzüne bitişik olarak dolaşan bu akışkanlar ısıyı soğurur ve üretilen ısıнын yararlı enerji olarak kullanılmasını sağlar. Ancak bu sistemlerde PV, yoğun güneş spektrumuna maruz kalır. Fazlaca ısınan PV hücrelerinin ömürleri kısalmır. Bu problemlere çözüm olarak spektral ayrıştırıcılar kullanılmaktadır. Fotovoltaik silisyum hücrelere güneş radyasyonu gelmeden önce, fotovoltaik hücrelerin çalışma aralığında gelen ışını filtreler. Böylece yüksek ısıнын sebep olduğu elektrik dönüşüm ve termal verimlilik kayıpları ortadan kaldırılır. Bu çalışmada, iki farklı deneysel karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. İlk olarak PV ve PV/T sistemlerin deneysel

karşılaştırılmasına yer verilmiştir. PV/T sistemde PV sisteme göre %58 daha fazla elektriksel verim, ek olarak %33 termal verim elde edilmiştir. Toplam ortalama verimde ise PV/T sistem %46,95 ile daha iyi performans göstermiştir. Spektral ayrıştırıcıların fiziksel özelliklerine bakılarak 5 akışkan seçilmiştir. Akışkanlar, spektrofotometre cihazında optik özellikleri test edilmiştir. Bu beş akışkan arasından maliyet, özgül ısı, termal iletkenlik, optik özellikleri ön planda tutularak spektral iş akışkanı olarak su ve mono etilen glikol belirlenmiştir. Saf suyun en düşük maliyet ve en yüksek özgül ısı (4180 J/kg. K), en yüksek termal iletkenlik (0,6 W/m. K) değerlerine sahip olması belirleyici olmuştur. Mono etilen glikolün kolay ulaşılabilir oluşu hem fiziksel hem de optik özellikleri bakımından saf suyun ardından en iyi alternatif olduğu düşünülmüştür. İkinci deneysel karşılaştırmada PV sistemi ile PV/T sistemlerdeki spektral ayrıştırıcı performansları karşılaştırılmıştır. Spektral ayrıştırıcılar, elektriksel verimde mono etilen glikol ve saf su birbirine yakın (%11,58-%11,59) performans göstermiştir. Termal verim karşılaştırılmasında yaklaşık ortalama %70 verim ile mono etilen glikol avantajlı olmuştur. Toplam ortalama verimde mono etilen glikol %81,59, saf su %71,58 PV sistem %9,14 performans göstermiştir. Sistemin elektriksel veriminin artırılması, termal enerjiden faydalanılması, temizlikten kaynaklı bakım maliyetlerinin azaltılması, yüksek sıcaklıktan kaynaklı PV sistemin zarar görmesinin engellemesi gibi avantajlar düşünüldüğünde tasarımı ve analizi gerçekleştirilen PV/T sistem ile, güneş enerjisinden daha etkili bir şekilde faydalanılması sağlanacak ve enerji maliyeti azaltılacaktır ve yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması sağlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistem, güneş radyasyonu, spektral ayrıştırıcı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

ENHANCE OF PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEM PERFORMANCE USING A SPECTRAL SPLITTING

Süheyl Bilal SUNGUR

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abid USTAOĞLU

Bartın-2024, pp: 87

Photovoltaic systems (PV) are systems used to produce electrical energy. Photovoltaic cells have low electrical conversion efficiency. Overheating caused by high ambient temperatures reduces electrical conversion efficiency. The spectrum wavelength range coming from the sun to the photovoltaic panel is between 200 nm and 2500 nm. The range in which photovoltaic silicon cells produce is between approximately 380 nm and 1100 nm. The part outside the wavelength range is converted into heat in photovoltaic cells. The part converted to heat reduces the electrical conversion efficiency. Photovoltaic thermal systems (PV/T) have been developed as a solution to increase electricity conversion efficiency. Heat transfer fluid is used to reduce panel temperature. These fluids, circulating adjacent to the back side of the cells, absorb heat and enable the heat produced to be used as useful energy. However, in these systems, PV is exposed to the intense solar spectrum. The lifespan of overheated PV cells is shortened. Spectral discriminators are used as a solution to these problems. Before solar radiation reaches the photovoltaic silicon cells, it filters the incoming beam within the working range of the photovoltaic cells. Thus, electrical conversion and thermal efficiency losses caused by high temperatures are eliminated. In this study, two different experimental comparisons were carried out. First, an experimental comparison of PV and PV/T systems

is given. In the PV/T system, 58% more electrical efficiency and an additional 33% thermal efficiency were achieved compared to the PV system. In total average efficiency, the PV/T system performed better with 46.95%. Five fluids were selected based on the physical properties of the spectral discriminators. The optical properties of the fluids were tested on the spectrophotometer device. Among these five fluids, water and mono ethylene glycol were determined as the spectral working fluids, considering their cost, specific heat, thermal conductivity and optical properties. It was determined that pure water had the lowest cost, highest specific heat (4180 J/kg. K) and highest thermal conductivity (0.6 W/m. K) values. Mono ethylene glycol is easily accessible and is thought to be the best alternative after pure water in terms of both its physical and optical properties. In the second experimental comparison, the spectral discriminator performances in the PV system and PV/T systems were compared. Spectral decomposers showed that mono ethylene glycol and pure water performed close to each other (11.58%-11.59%) in electrical efficiency. In comparing thermal efficiency, mono ethylene glycol was advantageous with an average efficiency of approximately 70%. In total average efficiency, mono ethylene glycol showed 81.59% performance, pure water 71.58% performance and PV system showed 9.14% performance. Increasing the electrical efficiency of the system, utilizing thermal energy, reducing maintenance costs due to cleaning, considering the advantages such as preventing damage to the PV system due to high temperatures, the PV/T system designed and analyzed will enable more effective use of solar energy, reduce energy costs and expand the use of renewable energy.

Keywords: Photovoltaic system, solar radiation, spectral splitting

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş ve Güneş Enerjisi	1
1.2 Güneş Enerjisi Dünyadaki ve Türkiye’deki Durumu	1
1.3 Güneş Teknolojileri	6
1.4 Güneş Fotovoltaik Teknolojisi.....	8
1.4.1 Çalışma Prensibi	8
1.4.2 Güneş Hücresi Çeşitleri	10
1.4.3 Güneş Fotovoltaik / Termal Hibrit Teknolojisi.....	13
1.5 Optik Filtreler	15
1.6 Çalışmanın Amacı.....	19
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	22
2.1 Fotovoltaik Giriş	22
2.2 Sıcaklığın Etkisi.....	23
2.3 Spektral Ayrıştırıcılar	25
3. PV/T SİSTEMİN SAYISAL VE ANALİTİK ÇÖZÜMLEMESİ.....	31
3.1 Güneş Açısı	31
3.1.2 Deklinasyon, δ	33
3.1.3 Saat Açısı, h	35
3.1.4 Güneş yükseklik açısı, α	36
3.1.5 Güneş Azimut Açısı, z	37
3.1.6 Gün Doğumu ve Gün Batımı Saatleri ve Gün Uzunluğu	37

3.1.7 Geliş açısı, θ	38
3.2 Güneş Radyasyonu	40
3.2.1 Güneş Sabiti.....	40
3.2.2 Dünya Dışı Spektralin Radyasyon Dağılımı	41
3.3 Elektrik Modeli	43
3.4 Kayıplar ve Verimlilik Sınırları	47
3.4.1. Güneş ışıının etkisi.....	47
3.4.2 Çevre sıcaklığının etkisi.....	48
3.4.3 Toz/gölgeleme etkisi	51
3.4.4 Nem Etkisi.....	51
3.4.5 Rüzgârın Etkisi.....	51
4. FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEM DENEYSEL ANALİZLER.....	52
4.1 PV/T Sistemin Tasarımı ve Üretimi.....	52
4.2 Deney Sistemi Cihaz Bilgisi.....	56
4.3 Spektral İş Akışkanlarının Belirlenmesi.....	58
5. PV- PV/T KARŞILAŞTIRMA VE AKIŞKANLARIN ETKİSİ	60
5.1 Araştırmanın Hedefleri	60
5.2 Analiz Sonuçları.....	61
5.2.1 Birinci Fotovoltaik Termal Sistem Deneysel Analiz Sonuçları.....	61
5.2.2 İkinci Fotovoltaik Termal Sistem Deneysel Analiz Sonuçları	67
5.2.3 Spektral İş Akışkanları Optik Test Sonuçları	72
5.3 Katkılar	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi içerisinde, güneş enerjisi kapasitesinin yıllara göre artış grafiği.....	3
1.2: Türkiye güneş enerjisi kapasitesi	5
1.3: Güneş enerjisi teknolojileri sınıflandırması	7
1.4: (a) Yarı iletken bir malzemede, EG bant aralığındaki fotonun soğrulmasının gösterimi (b) Eğer $E_{ph} > EG$ ise, termalizasyon meydana geliş gösterimi.....	9
1.5: Güneş hücresi modeli	10
1.6: Spektrum dalga boyu ve güneş hücresi çalışma aralığı gösterimi	16
1.7: Optik filtre ve PV/T sistemin şematik görünümü	17
1.8: Optik filtre çeşitleri	18
3.1: Dünyanın güneş etrafındaki yıllık hareketi	31
3.2: Dünyanın uzay pozisyonunun yıllık değişimi.....	32
3.3: Enlem, saat açısı ve güneş sapmasının tanımı	34
3.4: Güneş sapmasının yıllık değişimi	34
3.5: Güneşin eğimi	35
3.6: Güneşin gün doğumundan gün batımına günlük yörüngesi.....	36
3.7: Güneş açısı diyagramı	38
3.8: Güneş ile Dünya geometrisi	41
3.9: Dünya-güneş mesafesindeki dünya dışı ortalama spektral ışı nım	42
3.10: Güneş hücresi elektriksel eşdeğer devre	44
3.11: $I(V)$ güneş hücresi karakteristiği (mavi) ve yük direnci $R(kırmızı)$ için çalışması noktası (Q) grafiksel çözümü	45
3.12: PV güneş hücresi karakteristiği ve maksimum güç noktası örneği.....	45
3.13: Güneş ışı nımını etkisi altında PV karakteristiği.....	48
3.14: Sıcaklığın PV üzerine etkisinin karakteristiği	48
3.15: Güneş hücresi ısı dengesi	50
4.1: Birinci fotovoltai k termal sistem şeması	52
4.2: Birinci fotovoltai k termal sistemin deneysel kurulumu	53
4.3: Birinci fotovoltai k termal sistem deneysel kurulumu	53

4.4: İkinci fotovoltaiik termal sistem şeması.....	54
4.5: İkinci fotovoltaiik termal sistem deneysel kurulumu	55
4.6: İkinci fotovoltaiik termal sistem deneysel kurulumu	55
4.7: Piranometre cihazı.....	57
5.1: Zamana bağı güneş radyasyonu	61
5.2: Akım (a), voltaj (b) değerleri	62
5.3: Kısa devre akımı (a), açık devre voltajı (b).....	62
5.4: I - V güç, global radyasyon	63
5.5: ISC - VOC güç, global radyasyon	64
5.6: PV ve PV/T sistemlerin elektriksel verimleri	65
5.7: Spektral ayrıştırıcı giriş, çıkış sıcaklığı (a) ve PV/T termal verim (b).....	66
5.8: PV ve PV/T sistemlerin toplam verimi	66
5.9: Zamana bağı güneş radyasyonu	67
5.10: Akım (a) ve voltaj (b) değerleri.....	68
5.11: Kısa devre akımı (a) ve açık devre voltajı (b)	68
5.12: I- V güç, global radyasyon	69
5.13: ISC - VOC güç, global radyasyon.....	70
5.14: PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerin elektriksel verimleri	70
5.15: Spektral ayrıştırıcılar giriş, çıkış sıcaklıkları (a) ve PV/T termal verim (b)	71
5.16: PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerin toplam verimleri	72

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Türkiye'nin saatlik değeri	6
3.1: PV modülün STC ve NOCT koşulları	49
3.2: PV teknolojilerinin sıcaklık katsayısı, referans verimlilik, A; 1kWp sistem için m ² gerekli olan yüzey alanı	49
3.3: PV paneli ısı kaybı yüzdeleri	50
4.1: PV özellik tablosu	56
4.2: Peristaltik pompa özellik tablosu	57
4.3: Spektral ayrıştırıcı sıvılar ve fiziksel özellikleri	59
5.1: Spektrofotometre geçirgenlik değeri test sonuçları	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: güneş yükseklik açısı
δ	: deklinasyon
E	: fotovoltaiik etki
PV	: Fotovoltaiik Panel
IR	: Kızılötesi Işın
h	: planck sabiti
h	: saat açısı
K	: Kelvin Sıcaklık Birimi
VIS	: Görünür Işın
UV	: Ultraviyole Işın
PV/T	: Fotovoltaiik Termal Sistem
z	: güneş azimut açısı

KISALTMALAR

GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
IRENA	: International Renewable Energy Agency
NASA	: National Aeronautics and Space Administration

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, artan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynakları arasında ön plana çıkmaktadır. Bu bölümde, güneş hakkında genel bilgilere yer verilmektedir. Ayrıca gelişme seyrine Dünya ve Türkiye perspektifinden bakılmaktadır. Devamında güneş ve fotovoltaik teknolojilere yer verilmektedir. Optik filtrelerden bahsedilmektedir. Çalışmanın amacına yer verilerek bölüm 1 sonlandırılmaktadır.

1.1. Güneş ve Güneş Enerjisi

Güneş, güneş sistemimizin merkezi yıldızıdır. Esas olarak hidrojen ve helyumdan oluşur. Güneş'in kütlesi o kadar büyüktür ki, güneş sisteminin toplam kütlesinin %99,68'ine sahiptir. Dünya'dan ortalama uzaklık 149.600.000 km olmasına rağmen dünyaya düşen güneş enerjisi miktarı insanlığın toplam enerji tüketiminden 10.000 kat daha fazladır.

Güneş enerjisi, küresel ısınmaya etki etmeyen en temiz enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi, petrol, kömür gibi fosil yakıtlı enerji kaynaklarına alternatif olarak sunulur. Üretimiyle ilişkili minimum çevresel ve ekolojik tehlikelerle birlikte ucuz ve bol enerjiye sahip olması ve kullanımında insanlığın yaşam kalitesini artırma hususunda önemli faktörlerden biridir.

Güneş enerjisi teknolojileri ısıtma, soğutma, doğal aydınlatma, elektrik ve bir ev uygulaması için yakıt sağlayabilir. Güneş teknolojisi, güneş ışığını fotovoltaik teknoloji vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürebilir. Tüm ülkeler güneş enerjisine eşit ölçüde sahip olmamasına rağmen, güneş enerjisinden doğrudan büyük bir pay, her ülke için mümkündür (Hasnain vd., 1998, 1995).

1.2 Güneş Enerjisi Dünyadaki ve Türkiye'deki Durumu

Enerji üretimi, özellikle küresel nüfus katlanarak artarken, büyük bir zorluk olarak görülmektedir. Topluluklar genişlemekte ve daha önce yerleşim olmayan alanlara ve gelişen teknolojilere göç etmekte, dolayısıyla genel olarak enerji talebini ve özel olarak elektrik

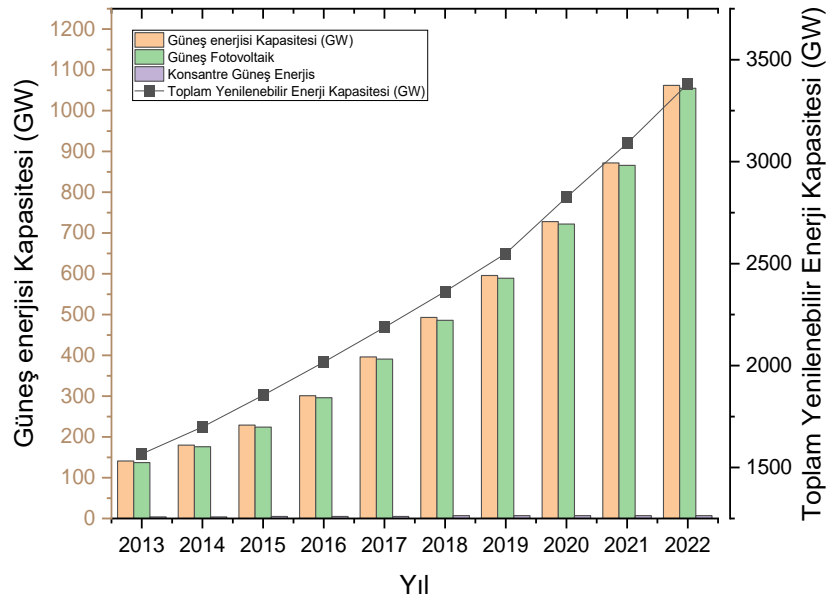
enerjisi yükünü artırmaktadır (de Amorim vd., 2018). Bu nedenle, sürdürülebilir ve sağlıklı bir toplum için güvenli, çevre dostu ve verimli bir enerji kaynağına artık her zamankinden daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır (Elsaid, Kamil, vd., 2020; Elsaid, Sayed, Abdelkareem, Baroutaji, vd., 2020; Furlan ve Mortarino, 2018; Kannan ve Vakeesan, 2016). Fosil yakıtlar ve konvansiyonel enerji üretim süreçleri, 2018'de birincil enerji arzının %80'inden fazlasını temsil eden kömür, ham petrol ve doğal gaz ile enerji arzına hâkim olmuştur. Bu tür fosil kaynakların yaygın kullanımının, ne yazık ki çevre üzerinde zararlı, yıkıcı bir etkisi vardır. Sınırlı kaynakları ve çevresel etkileri göz önünde bulundurularak geleneksel enerji piyasasının çevre dostu ve verimli ikamelerini bulmak için araştırmalar yapılmıştır. Mevcut enerji dönüştürme sistemlerinin verimliliğini artırmak için önemli çabalar sarf edilmiştir (Brough vd., 2020; Elsaid, Sayed, Abdelkareem, Mahmoud, vd., 2020; Olabi vd., 2020). Bu enerji dönüşüm sistemleri (Abdelkareem, Sayed, Mohamed, vd., 2020; Abdelkareem, Sayed, ve Nakagawa, 2020) ve/veya yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar enerjisi, termal enerji, güneş enerjisi, jeotermal, hidro, biyokütle enerjisidir. Bu çabaların neticesinde yenilenebilir enerji sistemlerini, gelişmiş ülkeleri daha fazla mevcut enerji sistemlerini, yenilenebilir enerjiye dönüştürmeye ve küresel bir karbon emisyonu azaltımı çağrısında bulunmaya teşvik edecek bir düzeye getirdi. Büyük jeopolitik kararlar ve özellikle Paris Anlaşması, dünya çapında karbon emisyonlarının azaltılması çağrısında bulundu (UNFCCC, 2016). Ancak IRENA'nın 2017 İklim Güvenli Enerji Çözümleri raporuna göre, bu tür büyük hedeflere etkin bir şekilde ulaşmak ve iklim üzerindeki olumsuz etkileri yeterince sınırlamak için, enerji kullanımının tamamen karbondan arındırılması 50 yıldan daha kısa sürede sağlanmalıdır.

2060 yılına kadar dünya ekonomisi üç katına çıkacak olsa da yenilenebilir enerji kaynakları mevcut büyüme hızının en az yedi katı büyümeden bu başarının zor olabilir (Renewable Energy Agency, 2017).

IRENA'nın 2023 yenilenebilir enerji istatistik raporuna göre, toplam yenilenebilir enerji kapasitesi 2013-2022 yılları arasında %46,34 artışla 3,382 GW olduğunu bildirmektedir. Yenilenebilir enerji kapasitesinin %48,37 Asya, %20,81'ini Avrupa, %30,82 diğer bölgeler içermektedir. Yenilenebilir enerji üretim miktarı ise, 2013-2021 yılları arasında %64,13 artışla 7858 GW' a ulaştı. Enerji üretim miktarının %43,5'ini Asya, %18,68 Avrupa bölgesi

oluşturmaktadır (Renewable Energy Agency, 2023). Yenilenebilir enerji kapasiteleri ve üretim değeri baz alındığında ciddi bir artış görülmektedir. Fakat IRENA 2017 İklim Güvenli Enerji Çözüm Raporuna göre 50 yıldan daha kısa sürede enerji kullanımının tamamen karbon emisyonundan arındırılması çıkarımı şu an için uzak görünmektedir. Bu yüzden bu hedefe ulaşmak için yenilebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi temiz ve bol miktarda bulunduğu için ön plana çıkabilir.

IRENA'nın 2023 yenilenebilir enerji istatistik raporuna göre (Şekil 1.1), dünyada toplam güneş enerjisi kapasitesi, son 10 yıl içinde %750,71'lik bir artışla 1062 GW' a ulaşmıştır. Bu kapasitenin %56'sını Asya, %21,22'sini Avrupa bölgesi oluşturur. Toplam güneş enerjisi üretimi ise 2013-2021 yılları arasında %749,81 artışla 1033 GW' a ulaştı. Üretim miktarının %53,17 Asya, %18,05' ini Avrupa bölgesi oluşturmaktadır. Rapora göre 2022 yılı itibari ile dünyadaki toplam yenilenebilir enerji kapasitesinin tek başına %31,39'unu güneş enerjisi kapasitesi oluşturmaktadır (Renewable Energy Agency, 2023). Bu veriden yola çıkarak dünyanın güneş enerjisi ile çalışan sistemlerine inanılmaz derecede ilgi duyduğu görülmektedir.



Şekil 1.1: Toplam yenilenebilir enerji kapasitesi içerisinde, güneş enerjisi kapasitesinin yıllara göre artış grafiği

Türkiye 2021 Kasım'ında Paris Anlaşması'nı onaylamıştı, geçen sene de 2053 yılına kadar net sıfır emisyona ulaşmayı hedeflediğini bildirmektedir (TMMOB, 2023).

Paris anlaşması gerekliliklerine paralel olarak, Türkiye 11. Kalkınma Planı 2019-2023 kapsamında enerji arzının sürekli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve katlanılabilir maliyetlerle sağlanması amaçlanmaktadır (Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019.). Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi artırılması, daha verimli ve kendi enerjisini üreten binaların yaygınlaştırılması, kamu binalarında enerji verimliliği projesi uygulaması hedeflenmektedir. Yenilenebilir kaynakların elektrik üretimindeki payı 2018'deki %32,5 sınırından %38,8 sınırına taşınması planlandı.

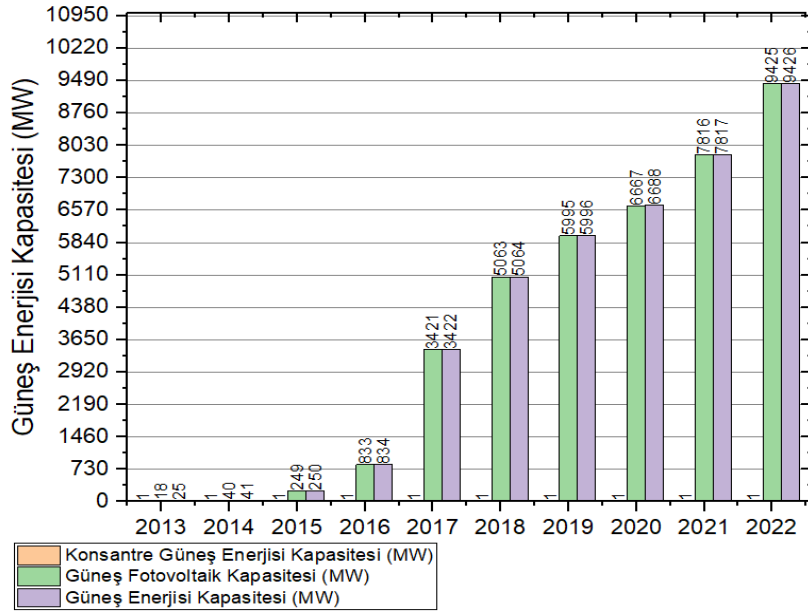
Türkiye'nin hedeflerine ulaşmasında, coğrafi konumu ve iklimi göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi sistemlerini ön plana çıkarmaktadır. Türkiye coğrafi olarak Kuzey Yarımküre'de yer almaktadır ve 36- 42° kuzey enlemleri ile 26 - 45° doğu boylamları arasında bulunmaktadır (Çanka, 2015).

Ülkemizin stratejik coğrafi konumu, güneş enerjisi potansiyelini büyük ölçüde etkileyerek, Türkiye'yi diğer pek çok ülkeye göre gözle görülür bir avantajlı konuma getirmektedir. Yatay olarak konumlandırılmış fotovoltaik modüllere düşen küresel ışıyım yıllık - 2000 kWh/m²'ye kadar ulaşmaktadır. Güneş elektrik potansiyeli ise en fazla 1500 kWh/m² değerindedir (PVGIS, t.y.).

Türkiye için güneş enerjisi sistemlerinin ön plana çıkması gerektiği fikrini Türkiye'nin güneşlenme süresi de desteklemektedir. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, yıllık ortalama güneşlenme süresi 2741 saat olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, yıllık ortalama toplam ışıyım değeri ise metrekare başına 1527.46 kWh olarak belirlenmiştir (GEPA, 2006.).

Türkiye, sıfır emisyona ulaşmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin arttırmak için, güneş termal, güneş fotovoltaik ve konsantre güneş enerjisi sistemlerini kullanmaktadır.

Türkiye, güneş termal sistemlerindeki, su ısıtma kolektörlerinin yaygın kullanımında dünyada ön plana çıkmaktadır. Çin dünya kapasitesinin yaklaşık %73'ünü oluşturarak güneş termal sistemleri için en büyük pazar olmaya devam ederken onu sırasıyla Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Brezilya takip etmektedir. Dünya güneş su ısıtma kolektörleri kapasitesi en iyi 20 sıralamasında Türkiye 2. Sırada konumlanmaktadır (REN21, 2022). Konsantre ve fotovoltaik güneş enerjisi kapasitesinde 2022 sonu itibariyle 9426 MW değerine ulaştı. Burada dikkat çeken detay enerji kapasitesinin tamamına yakın bir kısmı güneş fotovoltaik kapasitesi oluşturur. Bu bilgiye dayanarak Türkiye’de güneş enerjisi yatırımlarının güneş fotovoltaik sistemleri üzerine yoğunlaşmış olduğu söylenebilir. Türkiye’ de Şekil 1.2’de görüldüğü üzere 2013-2022 yılları arasında güneş fotovoltaik kapasitesi yaklaşık 525 kat artarak 9425 MW değerine ulaştı. Yüzdece en büyük artış %310,7 ile 2016-2017 yılları arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 1.2: Türkiye güneş enerjisi kapasitesi

Kendi ekseninde Türkiye’nin güneş kuşağında bulunması, imzaladığı antlaşmalar ve kalkınma planlarının neticesi olarak güneş enerjisi sistemleri elektrik kapasitesi ve üretiminde kayda değer bir yükseliş görülmektedir. Dünya ekseninde Türkiye, güneş kuşağında bulunmasına rağmen, güneş enerjisi üretimi ve kullanımı beklenenden daha düşük düzeylerde seyretmektedir. Güneşlenme süresi ortalama 2741 saat olan Türkiye, yıllık güneşlenme süresi sırasıyla 2696 (AEMET, 2016.), 2726 (Servizio Meteorologico, 2023),

2760 (Meteo-France, 2023.), saat olan Avrupa Ülkeleri İspanya, İtalya, Fransa ile 2021 yılı yıllık elektrik üretimi açısından karşılaştırıldığında İspanya'nın %37, İtalya'nın %44, Fransa'nın %11 gerisindedir.

Tablo 1.1: Türkiye'nin saatlik değeri

	2022 Yılı Kapasite (MW)	2021 Yılı Üretim (MW)	Bölge
Türkiye	9425	13943	Avrupa
İspanya	18214	21922	Avrupa
İtalya	25083	25051	Avrupa
Fransa	17410	15732	Avrupa

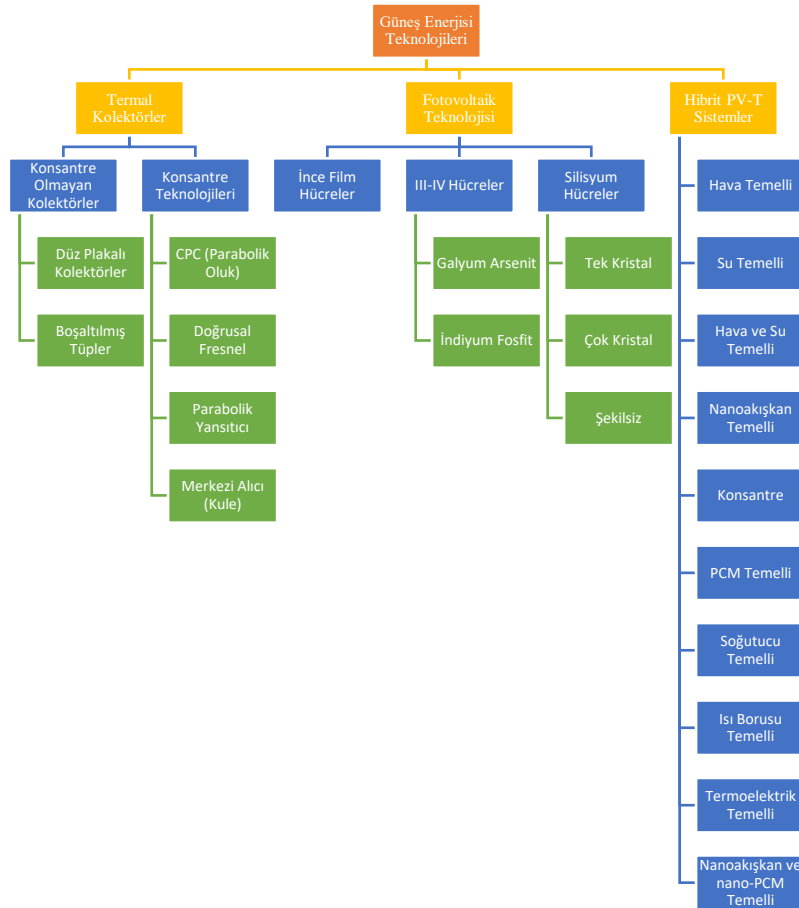
1.3 Güneş Teknolojileri

Güneş teknolojileri, termal kolektörler, fotovoltaik teknolojisi, hibrit PV/T sistemler olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, kullanım alanı gereksinimleri çerçevesinde şekillendirilmektedir. Güneş enerjisini faydalı enerji formlarına dönüştürmek için gelişim süreci içerisinde modernizasyon çalışmaları yapılmaktadır.

Termal ve Fotovoltaik Sistemler

Güneş enerjisini faydalı enerji formlarına dönüştürmenin iki farklı yolu vardır. Bir tanesi güneş enerjisinin termal enerjiye dönüşümüdür. Bu eski bir yöntemdir, daha basittir. Gelen güneş enerjisi akısı, basit bir biçimde arka yüzeye kaynaklanmış borularla kaplanmış/boyanmış bakır, alüminyum veya polimer plaka olabilen bir termal emici aracılığıyla ısıya dönüştürülmesidir (Alghoul vd., 2005; Cristofari vd., 2002). Isı daha sonra bir akışkana aktarılır. Bu akışkan genellikle sudur ve sıcak su temini için bu sistem tercih edilmektedir. Endüstriyel uygulamalar da vardır, ancak yaygın değildir. Bu uygulamalarda termal enerji, bir jeneratör vasıtasıyla elektrik üretmek için mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Bu proses, konsantre sistemler (Behar vd., 2013; Moya, 2012) veya düz plakalı kolektörlerden (Pietruschka vd., 2012) oluşabilir. Güneş enerjisi dönüşümünün ikinci bir yöntemi de mekanik veya termal bir döngü olmadan, güneş enerjisinin doğrudan elektriğe dönüştürülmesi olan fotovoltaik dönüşüm yöntemidir. PV cihazları, gelen güneş radyasyonunun foton enerjilerine karşılık gelen bant aralığı enerji değerlerine sahip yarı

iletken malzemelerden oluşur (Tunçel, 2019). Silisyum, fotovoltaik hücrelerde ticari olarak en yaygın kullanılan yarı iletken malzemedir ve pazarın %90'ından fazlasına wafer tabanlı Si güneş hücreleri hakimdir (Andreani vd., 2019). Silisyuma alternatif olarak daha yüksek dönüşüm verimliliğine sahip farklı malzemeler üzerine çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin GaAs (Kosten vd., 2013), perovskite (Assadi vd., 2018; Tonui vd., 2018), organik (Etxebarria vd., 2015; Menke vd., 2018), hassas boya (Mohiuddin vd., 2018; Sugathan vd., 2015), kuantum noktalı güneş hücreleri bunların bazılarıdır. Termal ve fotovoltaik dönüşümü birleştiren hibrit sistemler de vardır. Bunlar termal/fotovoltaik (PV/T) sistemler olarak adlandırılır (Aste vd., 2014; Chauhan vd., 2018). Fotovoltaik hücrelerde elektriğe dönüşmeyen fazlalık ısı, fotovoltaik hücreden soğutucu bir çalışma sıvısı tarafından uzaklaştırılmaktadır ve sonuç olarak elektriğin yanı sıra termal enerjide üretilmektedir.



Şekil 1.3: Güneş enerjisi teknolojileri sınıflandırması

1.4 Güneş Fotovoltaik Teknolojisi

Fotovoltaik (PV), güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren teknolojileri içermektedir. Foto terimi, ışık ve voltaik terimi, elektrik anlamına gelmektedir. "Güneş pili" olarak da bilinen fotovoltaik (PV) hücre, üzerine ışık düştüğünde elektrik üreten yarı iletken bir cihazdır (Tyagi vd., 2012).

Bir güneş hücresinin çalışma prensibi, fotovoltaik etkiye dayanmaktadır. Fotovoltaik etki ise; elektromanyetik radyasyona yanıt olarak iki farklı malzemenin birleşim noktasında potansiyel bir farkın oluşmasıdır. Fotovoltaik etki, malzemeye bağlı bir eşik frekansının üzerinde bir frekansa sahip ışığı emen bir malzemeden elektronların yayıldığı fotoelektrik etki ile yakından ilişkilidir (Swaaij, 2016.). Böyle bir fotonun enerjisi

$$E = h\nu \quad (1)$$

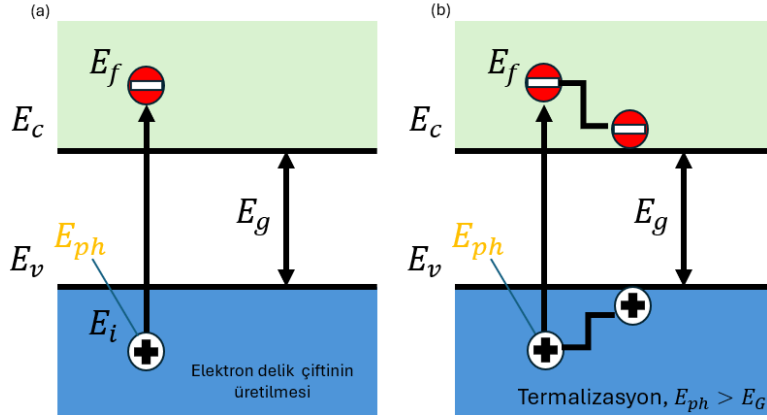
Eşitlik (1) ile verilir; burada h , planck sabitidir ve ν ışığın frekansıdır.

1.4.1 Çalışma Prensibi

Şekil 1.4 (a)'da gösterildiği gibi, bir malzemede bir fotonun emilimi, enerjisinin başlangıç enerji seviyesi E_i 'den daha yüksek bir enerji seviyesi E_f 'ye çıkarmak için kullanıldığı anlamına gelmektedir. Elektron enerji seviyeleri E_i ve E_f , foton enerjisi $h\nu = E_f - E_i$ 'yi sağlayacak şekilde mevcutsa, fotonlar sadece o zaman emilebilmektedir. İdeal bir yarıiletken içinde, elektronlar E_v olarak adlandırılan değerlik bandı kenarı altındaki enerji seviyelerini ve E_c olarak adlandırılan iletim bandı kenarı üstündeki enerji seviyelerini doldurabilirler. Bu iki bandın arasında, elektronlar tarafından doldurulabilecek izin verilen enerji durumları bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu enerji farkına "bant boşluğu" denir ve bu bant boşluğu Eşitlik (2)'de gösterildiği gibi;

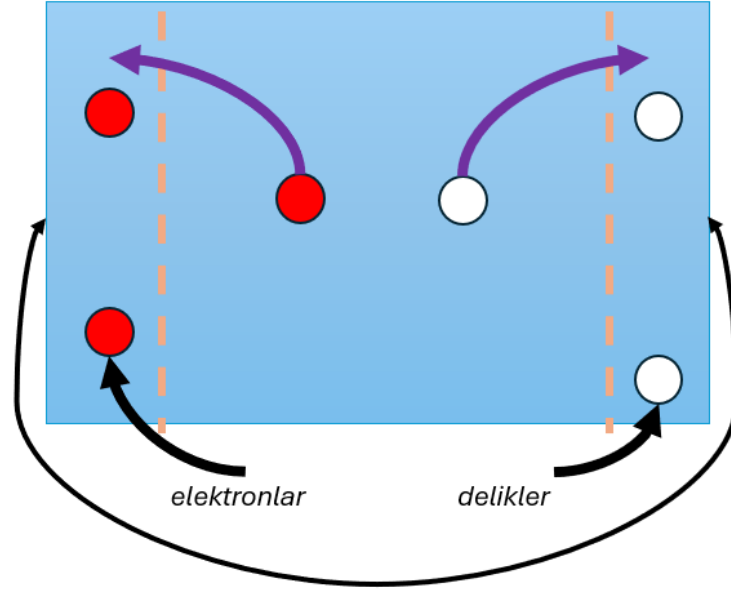
$$E_G = E_C - E_V \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 1.4: (a) Yarı iletken bir malzemede, E_G bant aralığındaki fotonun soğrulmasının gösterimi (b) Eğer $E_{ph} > E_G$ ise, termalizasyon meydana geliş gösterimi (Swaaij, 2016.)

Bir foton, E_G 'den daha küçük bir enerjiye sahipse, ideal bir yarıiletken içine ulaştığında emilmez, ancak etkileşime girmeden malzemeyi geçmektedir. Bir elektron E_i 'den E_f 'ye uyarıldığında, E_i 'de bir boşluk oluşmaktadır. Bu boşluk, pozitif elementer bir yük taşıyan bir parçacık gibi davranmaktadır ve bir delik olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla bir fotonun emilimi, Şekil 1.5'te gösterildiği gibi bir elektron-delik çiftinin oluşturulmasına yol açmaktadır. Fotonun radyoaktif enerjisi, elektron-delik çiftinin kimyasal enerjisine dönüşmektedir. Radyoaktif enerjiden kimyasal enerjiye en yüksek dönüşüm verimi termodinamik tarafından sınırlandırılmaktadır. Bu termodinamik sınır, yoğunlaştırılmamış güneş ışığı için %67 ile tamamen yoğunlaştırılmış güneş ışığı için %86 arasında yer almaktadır (Swaaij, 2016.). Şekil 1.5'te gösterildiği gibi, genellikle, elektron-delik çifti yeniden birleşir, yani elektron başlangıç enerji seviyesi E_i 'ye geri dönmektedir. Enerji daha sonra ya foton olarak (radyoaktif rekombinasyon) serbest bırakılmakta ya da diğer elektronlara, deliklere veya kristal titreşimlerine aktarılmaktadır. Elektron-delik çiftinde depolanan enerjiyi dış devrede çalışma yapmak için kullanmak isteniyorsa, emici malzemenin her iki tarafında da yarı geçirgen zarlar bulunmalıdır, böylece elektronlar sadece bir zar üzerinden dışarı akabilir ve delikler sadece diğer zar üzerinden dışarı akabilmektedir (Swaaij, 2016.). Çoğu güneş hücresinde, bu zarlar n- ve p- tipi malzemeler tarafından oluşturulmaktadır.



Şekil 1.5: Güneş hücresi modeli (Swaaij, 2016.)

1.4.2 Güneş Hücresi Çeşitleri

Farklı güneş hücresi türlerinin katmanlarını oluşturmak için birçok farklı yarıiletken malzeme kullanılmaktadır ve her bir malzemenin kendi avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Güneş hücresi uygulaması için uygun bir malzemenin sahip olması gereken ilk özellik, güneş spektrumuyla uyumlu bir bant aralığına sahip olması gerekmektedir. Bant aralığı 1,1 (eV) ile 1,7 (eV) arasında olmalıdır. Malzeme ayrıca yük taşıyıcılarının yüksek hareket kabiliyetine ve ömürlerine sahip olmalıdır. Diğer gereksinimler şunlar olabilir; kolayca temin edilebilmesi, toksik olmaması, kolayca tekrar üretilabilir tekniğine sahip olması, büyük alan üretimi için uygun olması, iyi bir fotovoltaiik dönüşüm verimine sahip olması, uzun vadeli kararlılık yer almaktadır.

Kullanılan malzemeye bağlı olarak, güneş hücreleri üç ana gruba ayrılabilir; silisyum güneş hücreleri, bu grup, silisyum tabanlı malzemeleri içerir; III-V grubu güneş hücreleri, bu grupta, III-V bileşiklerine dayalı malzemeler kullanılmaktadır; ince film güneş hücreleri, bu grup, ince film tabanlı malzemeleri içermektedir. Her bir grup farklı malzeme türlerini içermektedir ve farklı koşullarda kullanılmaktadırlar, bu nedenle her birinin avantajları ve sınırlamaları vardır (Tyagi vd., 2012).

Silisyum Güneş Hücresi

Tek kristalli silikon; güneş hücreleri, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürme yeteneğine sahiptir. Güneş hücreleri için birçok malzeme bulunmasına rağmen, güneş hücrelerinde en yaygın kullanılan yarıiletken malzeme tek kristalli silikondur. Silikon, yüksek verim performans potansiyeline sahip bol ve güvenli bir hammadde olduğu için en umut vadeden malzemedir. Özellikle ince film güneş hücreleri için mümkün bir malzeme olarak çok dikkat çeken bir formu olan a-Si, üstün optik emilim katsayısı nedeniyle ve ince filmler için (hücre kalınlığı <1 mikrometre) uygun olması nedeniyle öne çıkmaktadır. a-Si, aynı zamanda düşük hammadde gereksinimleri ve düşük üretim enerjisi gereksinimleri nedeniyle tercih edilmektedir. Günümüzde en iyi tek kristalli Si güneş hücreleri %24,7 verimliliğe ulaşmaktadır (Zhao, 2004). Ticari silikon güneş hücresi modülleri, %18 gibi yüksek dönüşüm verimliliğine sahiptir. Günümüzde tek kristalli şerit silikonun geliştirilmesi ve üretimi üzerine birçok araştırma çalışması devam etmektedir, çünkü bu malzeme yüksek kalitede ve düşük maliyetli olduğu için araştırmacıları tek kristalli Si güneş hücreleri üzerinde çalışmaya teşvik etmektedir.

Çok Kristal Silikon Hücresi

Tek kristalli silikon PV hücrelerine göre daha az verimlidir. Polikristal silikondaki taneler, elektron akışını engellemektedir ve bu nedenle hücrenin güç çıkışını azaltmaktadır. Ticari bir modül olarak kullanılan polikristal silikonun enerji dönüşüm verimliliği genellikle %10 ile %14 arasında değişmektedir (Hermann, 1998). Tek kristalli silikon hücreler ile enerji dönüşüm verimliliği arasındaki bu fark, polikristal silikon PV hücreleri üretim yönteminden kaynaklanmaktadır. Tek kristalli silikona kıyasla, polikristal silikon malzeme daha dayanıklıdır. Ayrıca, biraz daha düşük silisyum devre levhası maliyetine sahiptir.

III-V Grup Güneş Hücreleri

Galyum Arsenit (GaAs); Galyum (Ga) ve arsenit (As) olmak üzere yarı iletken iki elementten oluşan bir bileşiktir. GaAs, silisyum hücrelere benzer kristal bir yapıya sahiptir.

GaAs'ın önemli bir avantajı yüksek seviyede spektrum soğurma özelliği vardır. Aynı miktarda güneş ışığını soğurmak için, kristal silikon hücresinde, silikon devre levhası yaklaşık 200-300 µm kalınlıkta olması gerekirken, GaAs 'da birkaç mikrometre kalınlıkta bir katman yeterli olmaktadır. Tek bağlantılı bir güneş hücresinde yaklaşık ideal değeri direkt 1.43 (eV) dalga boyu aralığına sahiptir. GaAs'ın soğurma katsayısı oldukça yüksektir ve malzemenin sadece birkaç mikronda fotonların yeteri kadar soğurmasını sağlamaktadır. İlk AlGaAs/n-GaAs temelli güneş hücreleri %11 ile oldukça yüksek verimlilik değeri rapor edildi (Tyagi vd., 2012). Isıya karşı yüksek direnci, hücre sıcaklıkları yüksek olan konsantre sistemler için iyi bir tercih olmaktadır. GaAs, güneş radyasyonu hasarına karşı yüksek direnç ve yüksek hücre verimliliği gerekli olan uzay uygulamalarında kullanımı yaygındır. GaAs hücrelerin en büyük dezavantajı, GaAs oluşturulması sağlayan tek kristal alt bileşeni yüksek maliyetli olmaktadır. Bu nedenle çoğunlukla yalnızca küçük bir GaAs hücresi az alana ihtiyaç duyulan yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır (Zhao, 2004).

İndiyum Fosfit

İndiyum fosfit, güneş enerjisi dönüşümü için optimum değere yakın olan 1,34 (eV) bant aralığına sahiptir. İlk yüksek verimlilikli indiyum fosfit temelli cihazlar 1970'lerde üretildi (Hermann, 1998). İndiyum fosfit kristalli güneş hücresi için %22 verimlilik rapor edilmektedir (Tyagi vd., 2012). Fotovoltaik cihazlarda III-V bileşiklerinin kullanılmasının dezavantajı üretim maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Kristal kusurlar, istenmeyen safsızlıkları içermektedir ve cihaz verimliliklerini ciddi şekilde düşürmektedir ve alternatif düşük maliyetli depolama yöntemleri kullanılamamaktadır. Bu malzemeler ayrıca kolayca çatlayabilmekte ve mekanik olarak silisyum hücrelerinden önemli ölçüde daha zayıftır. Malzemelerin yüksek yoğunluğu, ağırlık açısından bir dezavantajdır, ancak yüksek emilim katsayılarından yararlanmak için çok ince hücreler üretilebilirse bu sorun minimize edilebilir. Bu dezavantajlar, tek bağlantılı, karasal güneş hücreleri için umut vadetmeyen malzemeler olarak düşünölmelerine yol açmaktadır. III-V tabanlı cihazların geliştirilmesi genellikle uzay uygulamaları potansiyeli nedeniyle yapılmaktadır. Yüksek dönüşüm verimliliği potansiyeli ve radyasyon direnci, yüksek malzeme maliyetine karşı telafi edici faktörlerdir (Miles vd., 2005).

İnce Film Hücreler

İnce film fotovoltaik hücrelerinde, fotovoltaik malzemelerin ince bir yarıiletken tabakası, cam, metal veya plastik folyo gibi düşük maliyetli bir destek tabakası üzerine yerleştirilmektedir. Çünkü ince film malzemeler kristal yapıli malzemelerden daha iyi ışık soğurmasına sahiptir. PV malzemesine yerleştirilen katman birkaç mikrometreden daha incedir. Malzemenin çok ince olması maliyeti düşürmeye yaramaktadır. Ayrıca, PV malzemesinin üzerine cam veya metal alt katmanın doğrudan püskürtülerek yerleştirme tekniğı daha düşük maliyetli olmaktadır. Böylece üretim süreci daha hızlı olur, daha az enerji kullanılır ve kristalin silikonun cazip yaklaşımı seri üretimi kolaylaştırmaktadır. Dönüşüm maliyet verimliliğı azaltılabilir. Daha uygun ince film malzemeleri için yapılan bir araştırma, düşük maliyetli ince film güneş pillerinin üretimi için bakır indiyum sülfür, kadmiyum tellür (CdTe), ayrıca bakır indiyum diselenid (CuInSe₂) ve bununla ilgili alaşımı ortaya çıkarmaktadır ve bunlar, düşük maliyetli ince film güneş pillerinin üretimi için kullanılmaktadır. Yeni nesil güneş pilleri için en umut verici adaylar olarak görülmüştür (Shah vd., 1995).

1.4.3 Güneş Fotovoltaik / Termal Hibrit Teknolojisi

PV teknolojisi, güvenilir ve basit sistemlerde güneş enerjisini doğrudan değerli elektriğe dönüştürebildiğinden büyük ilgi görmektedir. Küresel PV kapasitesi 2019'da 627 GW'a ulaştı (REN21, 2020), hızla büyümeye devam ediyor ve 2050'de 8000 GW'a ulaşacağı tahmin edilmektedir (Renewable Energy Agency, 2023). Ticari PV paneller soğrulan güneş enerjisinin yalnızca %10-25'ini elektriğe dönüştürebilmektedir, soğrulan güneş enerjisinin geri kalanı (>%70) atık ısı olarak dağıtılmaktadır (Teo vd., 2012). Fotovoltaik-termal (PVT) sistemler bu ısıyı toplayarak aynı alan için faydalı termal enerji ve elektrik üretebilmektedir (Herrando vd., 2014). En yaygın PV/T sistem tipi düz plaka tasarımıdır. Bir termal soğurucu genellikle daha iyi ısı transferi ve daha yüksek termal verim için PV hücrelerine sıkı bir şekilde bağlanacak şekilde tasarlanmaktadır (K. Wang vd., 2019). Fotovoltaik hücreleri, elektrik üretmek için gelen güneş ışığının bir kısmını kullanmaktadır ve geri kalanı hücrelerde ve alt tabakada büyük ölçüde atık ısıya dönüşmektedir, PV'in sıcaklığını artırmakta ve bu nedenle modül verimliliğı azalmaktadır. Fotovoltaik/termal (PV/T)

teknolojisi, bu ısıнын bir kısmını geri kazanmakta ve pratik uygulamalar için kullanılmaktadır. PV modülünün aynı anda soğutulması, elektrik verimliliğini tatmin edici bir seviyede tutmakta ve bu nedenle PV/T sistem, genel verimliliği daha yüksek bir şekilde güneş enerjisini kullanmanın daha iyi bir yolunu sunmaktadır. PV/T entegrasyonunda alternatif yaklaşımlar bulunmaktadır. Birçok seçenek arasında hava, su veya buharlaştırıcı kolektörler, tek kristalli/ polikristali/ amorf silikon (c-Si/pc-Si/a-Si) veya ince film güneş hücreleri, düz levha veya konsantratör türleri, cam kaplı veya camsız paneller, doğal veya zorla sıvı akışı, bağımsız veya yapı entegre özellikler vb. bulunabilmektedir. PV/T teknolojisi üzerinde son birkaç yılda büyük ölçüde araştırma ve geliştirme çalışması yapılmaya devam etmekte ve faaliyet düzeyi artmaktadır. PV/T sisteminin cazip özellikleri şunlardır (Hasan ve Sumathy, 2010): Aynı sistem elektrik ve ısı üretmek için kullanılabilir. Verimli ve birbirinden bağımsız iki sistem kullanmaktan her zaman daha yüksek bir birleşik verimlilik sunmaktadır. Geniş bir uygulama alanına sahiptir. Isı çıkışı, mevsime bağlı olarak ısıtma ve soğutma (kurutma soğutma) uygulamaları için kullanılabilir ve genellikle ev uygulamaları için uygundur. Ucuz ve uygulanabilir. PV sisteme büyük değişiklik yapmadan kolayca entegre edilebilir ve sistemi hibrit hale getirmek geri ödeme süresini azaltabilmektedir. Şu anda kullanılan farklı türde PV/T sistemler bulunmaktadır, bunlar arasında PVT/hava, PVT/su sistemleri (Chow, 2018) bulunmaktadır.

PV/T cihazları, çeşitli uygulamalar için farklı tasarımlara sahip olabilmektedir. Bu uygulamalar arasında evsel sıcak su sistemleri, binalar için hava ısıtma sistemleri ve aktif soğutmalı PV konsantratörler bulunmaktadır. Güneş termal ve güneş PV teknolojilerinin dünya genelinde hızla büyüdüğü ve büyük bir pazar oluşturduğu göz önüne alındığında, PV/T için benzer bir büyüme beklenmektedir. Bu teknoloji, teknik olarak uygulanabilir olduğu kanıtlandığı için diğer evsel uygulamalarla da entegre edilebilir. PV/T, geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Yani sadece cam kaplı PV/T kolektörler gibi evsel sıcak su ısıtması için uygun olmakla kalmaz, aynı zamanda ticari binalar için oda ısıtma, yazın termal konfor/soğutma ve hava sirkülasyonunu desteklemek gibi farklı amaçlar için kullanılabilir. PV/T sisteminin türü, kullanılan PV modülünün türüne, tasarımına, ısı giderme sıvısının türüne (su/gliserol veya hava) ve alınan radyasyonun yoğunluğuna bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu nedenle, PV/T ürünleri şu şekilde sınıflandırılabilir; sıvı PV/T kolektör sistemleri, hava PV/T kolektör sistemleri.

Sıvı PV/T kolektör sistemleri

Su, düşük maliyeti ve soğutma özellikleri nedeniyle güneş hücrelerini soğutmak için PV/T sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir akışkan türü olarak kabul edilebilir. Bir PV/T kolektörü, tipik bir su güneş düz levha kolektöründe bulunan parçalardan oluşmaktadır, ancak tek fark, düz kolektörün üstüne yerleştirilen PV panelleridir. Bu PV paneli, ısıyı çekmek ve böylece çıkış voltajını ve akımlarını artırmak için kolektörün üzerine bir yapışkan malzeme ile yerleştirilir ve bu malzeme, etilen vinil asetat ve tedlar emilim katmanını içermektedir (Chow, 2003). Kolektörün PV panelinin altına yerleştirilmesi, ısının PV panelinden uzaklaştırılmasını amaçlamaktadır ve bu sayede çıkış voltajlarını ve akımlarını artırmaktadır. Evsel sıcak su ısıtması için uygun olmakla kalmaz, aynı zamanda ticari binalar için oda ısıtma, yazın termal konfor/soğutma ve hava sirkülasyonunu desteklemek gibi farklı amaçlar için kullanılabilir.

Hava PV/T kolektör sistemleri

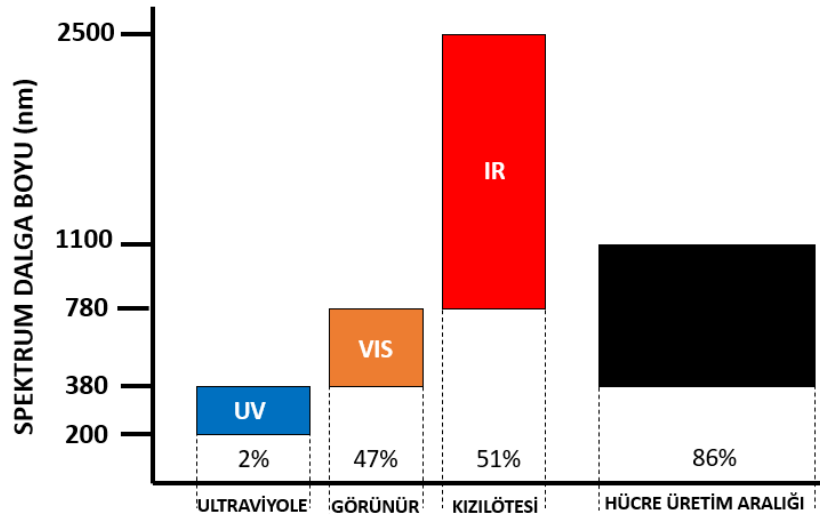
Güneş PV/T (Fotovoltaik/Termal) hava kolektörleri, fotovoltaik panelleri termal kolektörlerle birleştiren, aynı anda elektrik üretmek ve termal kazanç elde etmek için hibrit güneş enerjisi sistemleridir. Bu sistemler güneş ışığını fotovoltaik hücrelerde elektrik enerjisine dönüştürürken bu süreçte oluşan ısıyı çeşitli termal uygulamalar için soğurmaktadırlar. Solar PV/T hava kolektörünün temel bileşenleri, fotovoltaik hücreler, akışkanın geçtiği kanal, termal soğurucu yüzey ve yalıtım katmanından oluşmaktadır. Güneş radyasyonuna maruz kalan PV hücreler, hava kanalları vasıtasıyla atık ısıyı soğurmaktadır. Kurulu PV sistemlerine küçük değişikliklerle entegre edilebilir olması kullanım avantajları arasında yer almaktadır. Bu sistemler, enerji üretimini ve kullanımını maksimuma çıkarmak için konut, ticari ve endüstriyel alanlar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

1.5 Optik Filtreler

Güneş enerjisi sistemlerinden daha fazla faydalanmak için iyileştirmeler yapılmaktadır. Güneş enerji sistemlerinin iyileştirilmesi sürecinde birçok konu üzerinde çalışılmaktadır.

Bunların arasında öne çıkan başlık fotovoltaik sistemlerin verimliliklerinin iyileştirilmesi yani güneşten gelen radyasyonun daha verimli nasıl kullanılacağı sorusuna çözüm aramak üzerinedir.

Fotovoltaik sistem performansını etkileyen kayıplar ve verimlilik sınırları vardır. Yarıiletken bant aralığından daha az enerji taşıyan fotonların emilmemesi ve dalga boyu aralığından daha büyük enerjiye sahip fazla enerjili fotonlar, güneş hücrelerinde gerçekleşen enerji dönüşüm sürecindeki iki ana kaybı oluşturmaktadır. Her iki kayıp da güneş spektrumundaki fotonların enerji dağılımı ile yarıiletken malzemenin dalga boyu aralığı arasındaki spektral uyumsuzlukla ilişkilidir. Fotovoltaik panele, güneşten gelen spektrum dalga boyu aralığı 200 nm – 2500 nm aralığındadır. Güneşten gelen spektrum 200 nm–380 nm arası ultraviyole (UV), 380 nm–780 nm arası görünür (VIS), 780 nm–2500 nm arası kızılötesi (IR) olarak tanımlanmaktadır. Toplam güneş enerjisinin yaklaşık %2'sini (UV), %47'si (VIS) ve %51'i (IR) oluşturmaktadır. Fotovoltaik silisyum hücrelerin üretim yaptığı aralık ise yaklaşık 380 nm ile 1100 nm arasında olmaktadır. Bu aralık toplam güneş radyasyonunun yaklaşık %86%'sını içermektedir.

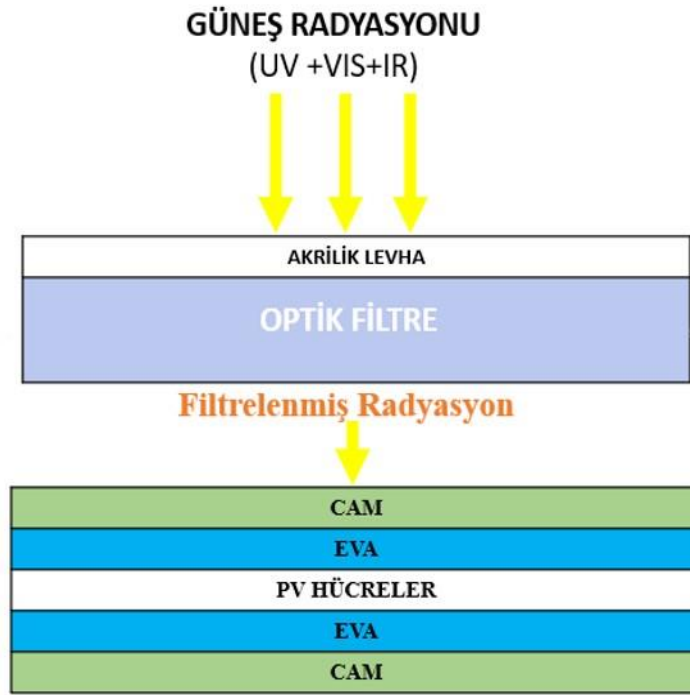


Şekil 1.6: Spektrum dalga boyu ve güneş hücresi çalışma aralığı gösterimi

Bu kayıp ve verimlilik sınırlarını ortadan kaldırmak için fotovoltaik termal sistemler geliştirilmektedir. Fotovoltaik termal sistem hem elektrik enerjisi üretimini hem de termal enerjinin toplanmasını sağlamaktadır. Panelden ısıyı çıkarmak için ısı transfer akışkanı

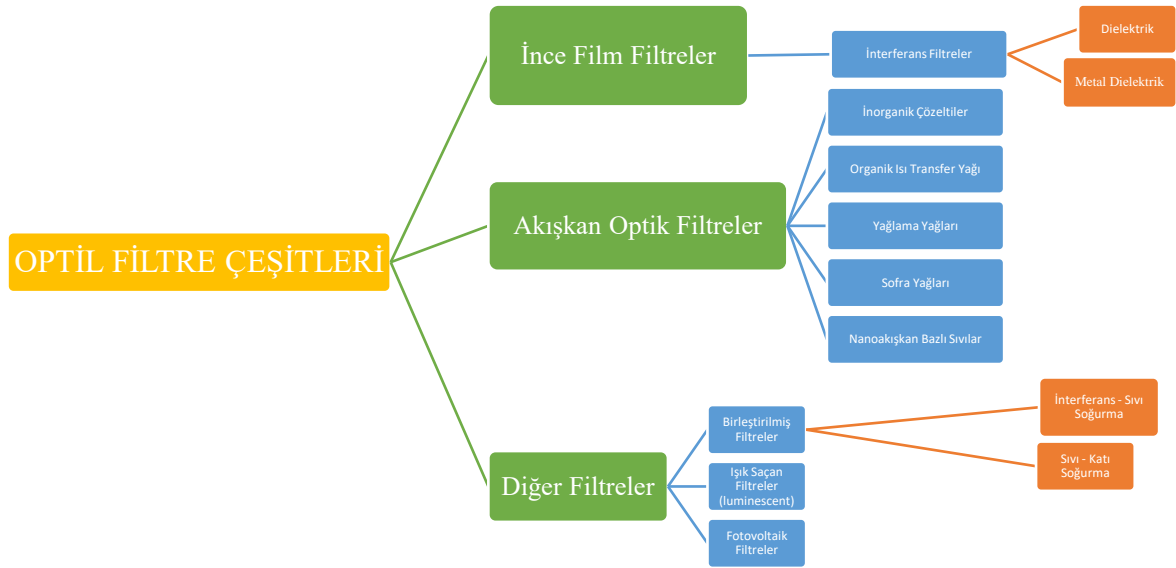
kullanılmaktadır. Bu akışkanlar, hava, su bazen her ikisi, çeşitli nanoakışkanlar olabilir. Hücrelerin arka yüzüne bitişik olarak dolaşan bu akışkanlar ısıyı soğurur ve üretilen ısının yararlı enerji olarak kullanılmasını sağlar.

Ancak bu sistemlerde PV, yoğun güneş spektrumuna maruz kalır. Fazlaca ısınan PV hücrelerinin ömrü ve faydalı ömrü azalır. Fotovoltaik sistemler yanarak kalıcı hasarlar görür. Ayrıca güneş spektrumu PV üzerine eşit olarak dağılmadığı için sıcak bölgeler oluşur.



Şekil 1.7: Optik filtre ve PV/T sistemin şematik görünümü

Bu problemlere çözüm olarak optik filtreler kullanılmaktadır. Şekil 1.7’de gösterildiği gibi, fotovoltaik silisyum hücrelere güneş radyasyonu gelmeden önce, fotovoltaik hücrelerin çalışma aralığında gelen ışını filtreler. Kızılötesi aralığındaki dalga boyu soğurulurken, görünür aralıktaki güneş radyasyonu PV hücrelerine iletilir. Böylece yüksek ısının sebep olduğu elektrik dönüşüm verimliliği ve termal verimlilik kayıpları ortadan kaldırılır. Şekil 1.8’de çeşitli optik filtre çeşitleri gösterilmiştir. Optik filtre çeşitleri uygulama alanlarına göre farklılık gösterir.



Şekil 1.8: Optik filtre çeşitleri

Akışkan Optik Filtreler

Akışkan optik filtreleri öne çıkaran birçok avantajı vardır. Optik filtre sıvıları genellikle ucuzdur ve birden fazla amaç için kullanılabilir. Ayrıca sistemin avantajları; PV hücrelerinin çalışma aralığının dışında kalan, PV için gereksiz ve zararlı olan spektral güneş ışınımını absorbe etmektedir; termal enerji optik filtre akışkanlar aracılığıyla taşınabilmektedir ve depolanabilmektedir; PV modüllerinin soğutucusu olarak kullanılabilir, böylece PV/T sistemlerindeki dağılmış ısıyı çıkarmak için kullanılabilir.

Akışkan optik filtreler, sıvı performansı değiştirebilme yeteneği nedeniyle filtre karakteristiklerini daha kolay değiştirmeye olanak tanımaktadır. Akışkan optik filtrelerin önemli bir özelliği, optik sıvı aynı zamanda ısı transfer akışkanı olarak kullanılabilir. PVT sistemleri için birçok sıvı türü belirtilmiş veya incelenmiştir. Bunlar arasında, propilen glikol($C_3H_8O_2$), mono etilen glikol ($CH_2OH)_2$), polietilen glikol ($C_2nH_{4n+2}O_{n+1}$), izopropil alkol (C_3H_8O), etilen glikol ($C_2H_6O_2$), propanol(C_3H_8O), nanoakışkanlar (küçük cam mikroküreler) , kobalt, bakır ve nikel tuz ($CoCl_2$, $Co(NO_3)_2$, $CoSO_4$, $Co(C_2H_2O_2)_2$, $Cu(NO_3)_2$, $CuSO_4$ ve $NiSO_4$) gibi inorganik çözeltiler (Osborn vd., 1986), organik ısı transfer yağı (Brayco 888 HF), gres yağları (Valvoline ATF,

Valvopea, Valvocorn, Braycopea, kırmızı gösterge yağı ve motor yağı), yenilebilir yağlar (Mısır yağı ve Fıstık yağı) ve silikon fren sıvısı bulunmaktadır (Chendo ve Salawu, 1989; DeJarnette vd., 2014).

PV/T sistemlerinde sıvı filtreleme teknolojisinin uygulanmasının başlıca zorluğu, uygun absorpsiyon spektrumuna sahip bozulmayan sıvıların eksikliğidir (Imenes ve Mills, 2004). Örneğin, geleneksel organik boyalar, yüksek sıcaklık ve UV ışığına maruz kaldığında genellikle hızla bozulur. Muhtemel çözümler arasında bozulmayan inorganik boyalar veya nanoparçacık tabanlı nano sıvılar bulunmaktadır (Looser vd., 2014; Taylor vd., 2012).

Akışkan optik filtreler arasında, nanoparçacık tabanlı akışkanlarda yer alır. Nanoakışkanlarda nanomalzemelerin üretimi ve kullanımındaki son gelişmeler, geleneksel sıvılarla karşılaştırıldığında sıvıların termal ve optik performansını iyileştirmek için geniş kapsamlı yetenekler sağlamıştır. Bu nedenle fotovoltaiik/termal sistemlerin soğutma işlemlerinde birçok nanoakışkan test edilmiş ve bu sistemlerin termal ve elektriksel performanslarında önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Optik filtre olarak kullanılabilen akışkana bir örnek, su ve therminol VP-1 tabanlı sıvılarında askıya alınmış, Au/SiO₂, Ag/SiO₂ ve Al/SiO₂ parçacıklar ve saf Ag parçacıklarıdır (Taylor vd., 2013, 2012). Kullanılan parçacıklar pahalıdır. Fakat, nanoparçacık sıvılarının önemli bir kısmı silikadır. Bu nedenle nanoakışkanlar için gerekli olan pahalı parçacıkların yalnızca küçük miktarlarda olması yeterlidir. Optik filtreler için ikinci bir örnek, Duratherm S tabanlı, indiyum titan oksit (ITO) nano kristali ve Au nano çubuğu ile silikanın bir kombinasyonudur (Brekke vd., 2015; DeJarnette vd., 2014).

1.6 Çalışmanın Amacı

Dünya nüfusunun artması ve endüstriyel gelişmeler sonucunda ülkelerin enerji ihtiyacı artmaktadır. Ülkeler enerji taleplerini karşılamak için fosil yakıtlar büyük miktarda yakılmakta ve bu durum ekosisteme ciddi şekilde zarar veren kirletici gazların salınımına neden olmaktadır. Küresel ısınma, insan ve diğer türlerin hayatta kalmasını tehdit eden ciddi bir sorundur. Enerji krizi birçok ülkede ekonomik büyümenin önünde bir engeldir. Bu sorunları çözenin en etkili yollarından biri fosil yakıt yerine daha fazla yenilenebilir enerji

kullanmaktır. Çevre dostu enerji kaynaklarını keşfetmek gelecek için önemlidir. Mevcut enerji yapısında acilen değişikliklere ihtiyaç vardır ve fırsat yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılmasında yatmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik, jeotermal enerji vb. Çevre dostu oldukları için önemlidirler. Güneş enerjisinin uygulanması ve geliştirilmesi en umut verici seçimdir. Güneş enerjisi en zengin yenilenebilir enerji kaynağıdır, yaklaşık 1.8×10^{14} kW ısı ve ışık gibi formlarda hiçbir masraf olmadan dünya tarafından emilir.

Fotovoltaik sistemler elektrik enerjisi üretmek için kullanılan sistemlerdir. Fotovoltaik hücreleri düşük elektrik dönüşüm verimliliğine sahiptir. Gelen güneş yoğunluğunun artması ve yüksek ortam sıcaklıklarının neden olduğu aşırı ısınma elektrik dönüşüm verimliliğini daha fazla düşürür. Fotovoltaik hücrelerde ortalama 2°C artış, verimi %1 azaltır.

Fotovoltaik panele, güneşten gelen spektrum dalga boyu aralığı 200 nm – 2500 nm aralığındadır. Güneşten gelen spektrum 200 nm – 380 nm arası ultraviyole (UV), 380 nm – 780 nm arası görünür (VIS), 780 nm – 2500 nm arası kızılötesi (IR) olarak tanımlanır. Toplam güneş enerjisinin yaklaşık %2'sini (UV), %47'si (VIS) ve %51'i (IR) oluşturur. Fotovoltaik monokristal silisyum panellerinin üretim yaptığı aralık ise yaklaşık 380 nm ile 1100 nm arasındadır. Bu aralık toplam güneş radyasyonunun yaklaşık %86'sını içerir. Dalga boyu aralığının dışında kalan kısım değerlik elektronunun artması için gerekli olan enerjiyi sağlayamadığı için fotovoltaik hücrelerde ısıya dönüştürülür. Isıya dönüştürülen kısım elektrik dönüşüm verimliliğini azaltır. Isı, voltaj etkisi, yansıma, PV katmanlarında gerçekleşen soğurma, gölgeleme kayıpları, rekombinasyon, doluluk faktörü ve elektrik dönüşüm verimliliğinin azalmasına sebep olur.

Elektrik dönüşüm verimliliğini artırmak için fotovoltaik termal sistemler çözüm olarak geliştirilmiştir. Fotovoltaik termal sistem hem elektrik enerjisi üretimini hem de termal enerjinin toplanmasını sağlar. Panel ısını azaltmak için ısı transfer akışkanı kullanılmaktadır. Bu akışkanlar, hava, su, gerekli koşullarında her ikisi, çeşitli nanoakışkanlar olabilir. Hücrelerin arka yüzüne bitişik olarak dolaşan bu akışkanlar ısıyı soğurur ve üretilen ısıyı yararlı enerji olarak kullanılmasını sağlar. Ancak bu sistemlerde PV, yoğun güneş spektrumuna maruz kalır. Fazlaca ısınan PV hücrelerinin ömürleri kısalmır

ve faydalı kullanım süreleri azalır. Fotovoltaik sistemler yanarak kalıcı hasarlar görür. Ayrıca güneş spektrumu PV üzerine üniform olarak dağılmadığı için sıcak bölgeler oluşur. Bu problemlere çözüm olarak optik filtreler yani spektral ayrıştırıcılar kullanılmaktadır. Fotovoltaik silisyum hücrelere güneş radyasyonu gelmeden önce, fotovoltaik hücrelerin çalışma aralığında gelen ışını filtreler. Spektral ayrıştırıcı sıvısı fotovoltaik panel üzerinde optik filtre olarak sirküle edilir. Kızılötesi aralığındaki dalga boyu soğurulurken, görünür aralıktaki güneş radyasyonu PV hücrelerine iletilir. Böylece yüksek ısının sebep olduğu elektrik dönüşüm verimliliği ve termal verimlilik kayıpları ortadan kaldırılır.

Bu araştırmanın temel amacı fotovoltaik sistemlerin verimliliğini arttırmak ve yaşam döngülerini iyileştirmektir. Bu çalışmada, fotovoltaik sistemlerde meydana gelen aşırı ısınmanın sebep olduğu elektrik dönüşüm verimliliğindeki azalma sorunu ele alınmıştır. Bu sorunun çözümü için 2 farklı deneysel model geliştirilmiştir. İlk deneysel model, PV ile PV/T sistem arasındaki karşılaştırılmalara yer verilirken termal verim elde ediliyor olması vurgulanmıştır. İkinci deneysel model, PV sistemler ile, PV/T sistemler karşılaştırılmasına yer verilirken, farklı iki spektral ayrıştırıcının performansı gözlenmiştir. Fotovoltaik sistemin verimini arttırmak, fotovoltaik sistemin ısınmadan kaynaklı verim düşüşlerini engellemek, termal enerjiden faydalanmak, PV sistem yüksek sıcaklığa ulaşmadan soğutmayı sağlamak, toz ve çevre kirliliğinin PV sistemi en az şekilde etkilemesini sağlamaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, araştırmanın ana amacıyla doğrudan ilişkili olan teorik ve deneysel çalışmalara detaylı bir gözden geçirme sunulmaktadır. İncelenecek önemli konular arasında sıcaklık ve termal etkiler, sıcaklık kontrolü, spektral filtreleme ve kontrol prosesleri, modelleme çalışmaları yer almaktadır.

2.1 Fotovoltaik Giriş

İlk ışığa duyarlı elektrikli cihaz deneylerinde, üretilen akım, gelen radyasyonla orantılıdır ve bu orantılılık radyasyon dalga boyuna bağlıdır. Ancak bu cihazlar (verimliliği düşük olduğu için) güneş pili kullanılmak yerine sensör olarak kullanılmıştır. Buna rağmen, 1954 ilk, Calvin Fuller, Bell Labs bir kimyager, silisyum katkılı bir malzeme geliştirdi. Bu yenilik, Fuller'in meslektaşı fizikçi Gerald Pearson tarafından imzalanan ve lityum üzerine katkılı bir silisyum çubuğu batırarak oluşturulmasına yardımcı olan bir çalışma olan ilk p-n bağlantısının (diyot) oluşturulmasına yol açtı. Bor ve arsenik katkı maddeleri için fotovoltaik özellikler ve %6'lık şaşırtıcı bir verim elde edildi. 1955 deki, bir güneş hücresi Amerika, Georgia'daki bir iletişim ağının güç kaynağı olarak yerleştirildi. Washington' da 25 Nisan' da gerçekleşen Amerika Ulusal Akademi Araştırmalarının senelik görüşmelerinde sunulan güneş hücresinin yaklaşık bir yıl sonraki ilk uygulamasıdır. Diğer uygulamalar olağanüstü bir şekilde hızla meydana çıkmıştı (Marques Lameirinhas vd., 2022). 17 Mart 1958' de, NASA güneş enerjisi sistemine sahip Vanguard-1 olarak adlandırılan uydusunu fırlattı. Vanguard-1, 6 silisyum güneş hücresi vasıtasıyla meydana gelen bir güneş sistemi, bir de yedek cıva hücre kaynağı kullanarak, iki telsiz ile ekipmanlarla donatıldı. NASA, dünya dışı ürünlerinde bir güneş enerjisi sistemine sahip olmanın avantajları ve gelecekteki gerekliliği konusunda başlangıçta ikna olmamıştı. Fakat fotovoltaik teknolojisi, birkaç görevde güç üretiminin bu yeni yolundan dolayı başarı sağlama fırsatı elde etti. Sadece iki ay sonra, Rusya uzay programı kapsamında, fotovoltaik bir güç kaynağına sahip olan Sputnik-3 uydusunu fırlattı. Daha sonra fotovoltaik güç kaynağı uzay projelerinde önemli bir sistem oldu. Uzay keşif mücadelesi fotovoltaik teknolojinin gelişmesi için en iyi yollardan biridir. 1970'te, iletişim uydusu kuruluşunun (Comsat) bir çalışanı olan Joseph Lindmeyer, %50' ye kadar silisyum güneş hücresinin verimliliğini artıran bir yöntem geliştirildi. Lindmeyer

şirketten ayrıldı ve Peter Varadi ile kamu uygulamaları için güneş hücresi geliştirmeyi amaçlayan Solarex Şirketini 1973' de kurdu. Bu yöntemin patenti Lindmeyer veya Solarex'e değil Comsat' a ait olmasına rağmen 1980 de Solarex fotovoltaik endüstri pazarının yaklaşık olarak %50'sine sahip olmuştu. Bu bir küçük pazardı fakat petrol krizinden dolayı Solarex Şirketi'nin kuruluşundan birkaç ay sonra 1973' de pazar büyüdü. Bu krizin etkisiyle, bilim camiasının fotovoltaik teknolojisine olan ilgisi arttı. Yeni teknolojiler ortaya çıktı, farklı ve yeni malzemeler kullanılarak, üretim maliyetlerinin azaltılması amaçlandı. 1973' e kadar, mono- Si (monokristal silisyum) kullanılmaktaydı fakat süreç daha ucuz ve daha az bakım gerektiren poli – Si (polikristal silisyum) ve a – Si (amorfsilisyum) pazara sürüldü (Marques Lameirinhas vd., 2022). Onun üzerine, fotovoltaik teknolojisi diğer teknolojilerle beraber geliştirildi. Yeni güneş hücreleri ortaya çıktı. (Alves dos Santos vd., 2021). Ayrıca, elektron, foton ve parçacık mekaniği gibi diğer ilgi çekici alanlardaki diğer olayların keşfi fotovoltaik hücre teknolojisinin ilerlemesini sağladı (Raimundo vd., 2021). Farklı hücrelerin verimliliğinin ilerlemesi Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) vasıtasıyla sunulmuştur. Fotovoltaik bir sistem sadece fotovoltaik hücreler olarak değil ayrıca invertör, batarya ve bu bileşenleri birleştirmek için kablolar gibi diğer elemanlar ile görülebilmektedir (Durão vd., 2020). Bu cihazların her birindeki gelişme sistem veriminin ilerlemesine yol açmaktadır ve bu nedenle fotovoltaik teknolojisindeki gelişmeler artmaktadır.

2.2 Sıcaklığın Etkisi

Aşırı güneş ışığı ve yüksek ortam sıcaklıklarının neden olduğu aşırı ısınma, fotovoltaik alanındaki ciddi sorunlardan biridir. PV modüllerinin performansı aşırı ısınmadan olumsuz etkilenir. Sıcaklığın artmasının sebebi değerlik elektronunun artması için gerekli olan enerjideki düşüşten kaynaklanır. Elektronlar gelen ışınlar tarafından serbest bırakıldığında, kısmen yeniden birleşirler ve bu nedenle fotovoltaik hücrelerdeki akım akışını arttırırlar, bu da PV hücrelerinin çıkış voltajında bir azalmaya ve dolayısıyla PV panelinin çıkış gücünde bir azalmaya neden olur (Moharram vd., 2013). PV hücre sıcaklığının hücre performansını, yani voltajı, çıkış gücünü, doldurma faktörünü ve dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde etkilediği iyi bilinmektedir. Sayısal olarak dönüşüm verimliliği sıcaklıktaki her bir derecelik artışta yaklaşık %0,4 – 0,5 oranında azalır (Brinkworth vd., 1997; Krauter vd., 1999).

Fiziksel açıdan bakıldığında, sıcaklık arttığında PV hücre çıkış gücünde ve dönüşüm verimliliğinde meydana gelen bozulmalar şunlara atfedilmektedir (E. Radziemska, 2003): Termal kafes titreşimlerinin artması, elektron-foton saçılımına yol açan yük taşıyıcılarının hareketliliğinin azalması, p-n bağlantı yerleşik voltajının ve foton çiftlerini elektron deliklerinden ayırmaya yönelik bağlantı yeteneğinin azalmasıdır. Bu etkileri azaltmak için, hücre tarafından üretilen ısının uzaklaştırılmasıyla modül sıcaklığının düşürülmesi faydalıdır (E. Radziemska, 2003).

Yazının devamındaki çalışmalar, sıcaklığın PV performansı üzerindeki etkilerini göstermek amacıyla araştırmacılar tarafından teorik ve deneysel olarak yürütülen çalışmalar anlatılmaktadır.

E. Radziemska, (2003); Ewa Radziemska, (2003), kristal silikon güneş pili ve güneş modülünün elektriksel parametreleri üzerinde sıcaklık ve dalga boyunun etkisini araştırdı. Sıcaklığın ışık soğurma mekanizması üzerindeki etkisini ve sabit sıcaklıkta çalışan silikon güneş pilinin radyasyon performansını deneysel ve teorik olarak araştırdı. Ayrıca, sabit ışıнімda çalışan bir PV silikon güneş modülünün sıcaklık performansını deneysel olarak araştırdı. Aşırı ısındığında PV hücresini soğutmak için soğutucu olarak bakır bir plaka kullandı. Sıcaklık arttıkça güneş pilinin çıkış gücü ve verimliliğinin önemli ölçüde azaldığını buldu. PV modüllerin iyi tasarlanıp soğutulması gerektiği sonucuna vardı.

Shaltout vd., (2000) monokristalin silikon güneş pilinin farklı hücre sıcaklıklarında spektral tepkisini ölçtü. Ayrıca farklı aydınlatma seviyelerinde (1154, 1329, 1740, 2812 ve 4010 W/m²) maksimum güç, doldurma faktörü ve hücre verimliliği diğer hücre parametrelerini de ölçtüler. Hücrelerin sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kısa devre akımını, açık devre voltajını ve hücre maksimum gücünü hesapladılar. Sıcaklığın hücre performansı üzerinde doğrudan etkisi olduğunu ve spektral tepkisinin sıcaklığa bağlı olduğunu bildirdiler. Ayrıca, tek güneş Si güneş piline yüksek sıcaklıklarda yüksek aydınlatma uygulandığında, bir tür soğutma kullanılmadığı sürece yüksek aydınlatmanın hücrede hiçbir faydası olmadığı sonucuna vardılar. Ayrıca yüksek

sıcaklık ve aydınlatma değerlerinde hücrenin en düşük verim değerine sahip olduğunu bulmuşlardır.

Skoplaki ve Palyvos, (2009), tek güneş ticari sınıf silikon bazlı güneş pillerinin/modüllerinin çalışma sıcaklığını ve bunun elektriksel performansları üzerindeki etkisini incelemek için yürütülen çeşitli araştırmacıların çabalarının bir inceleme karşılaştırmasını sunmuşlardır. PV hücrelerinin verimliliğinin ve eşdeğer olarak güneş enerjisinin sıcaklığa bağımlılığını ifade etmektedirler. Ayrıca, PV verimliliği korelasyon katsayılarını bulmak için kullanılabilecek, araştırmacılar tarafından ölçülen ve hesaplanan sıcaklık katsayılarını da sağlamaktadırlar. Skoplaki ve Palyvos, incelemelerinde çalışma sıcaklığının fotovoltaik dönüşüm sürecinde merkezi bir rol oynadığı sonucuna vardı. Bir PV modülünün hem elektriksel verimliliği hem de güç çıkışı, çalışma sıcaklığına doğrusal olarak bağlıdır ve sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

Gaitho vd., (2009), güneş pilinin çalışma sıcaklığının bir faktörü olduğu için silikon filmin ısı iletkenliğini belirlemek amacıyla güneş pili malzemeleri boyunca ısı akışının etkisini araştırmıştır. Çinko oksit ince film ile kaplanmış tek kristalli silikon güneş pili kullandılar ve bu kaplama optik bir gelişme sağladı. Isı kaynağının güneş pilinin iç ve dış yüzeylerine ısınmasını sağlayacak şekilde yerleştirildiği yerde ısı iletkenliği ölçmek ve aynı anda sıcaklık değişimlerini algılamak için geçici hat ısı kaynağı (TLHS) yöntemini kullandılar. Genel eğilimin sıcaklık arttıkça ısı iletkenliğin azalması yönünde olduğunu bildirmişlerdir. Isı iletkenliğindeki azalmayı hücrenin çalışma sıcaklığının artmasına bağladılar. Tek kristal silikon hücre performansına ilişkin vardıkları sonuç, düşük sıcaklıkların daha verimli foton-dönüşümü sağladığı yönündedir.

2.3 Spektral Ayırıştırıcılar

PV modül sıcaklığının artmasının temel nedeni, PV hücrelerinin güneş ışınımının tamamını elektriğe dönüştürememesi ve ışınımın bir kısmının ısıya dönüşmesidir. Güneş radyasyonu üç tür spektrumdan oluşur (Qahtan vd., 2014): %8'i Ultraviyole UV (0,2–0,38 μm), %36'sı Görünür VIS (0,38–0,78 μm) ve %46'sı Kızılötesi IR (0,78–2,5 μm). Silikon PV hücreleri

yalnızca VIS'yi ve IR'nin bir kısmını elektriğe dönüştürebilmektedir ve spektrumun geri kalanı atık ısıya dönüştürülmektedir. Yukarıda açıklandığı gibi hücre sıcaklığını düşüren çeşitli soğutma teknikleri kullanılmış olmasına rağmen, bu yöntemler periyodik ısıtma ve soğutma işlemleri nedeniyle hücreleri döngüsel termal stres altına sokmakta ve ayrıca soğutmadaki düzensizlik nedeniyle bazı hücrelerde sıcak noktalara neden olmaktadır. PV modülündeki bu termal gerilimler ve sıcak noktalar, güç çıkışının azalmasına ve modülün çalışma ömrünün kısılmasına neden olur.

Bu problemlere çözüm olarak optik filtreler yani spektral ayrıştırıcılar kullanılmaktadır. Fotovoltaik silisyum hücrelere güneş radyasyonu gelmeden önce, fotovoltaik hücrelerin çalışma aralığında gelen ışını filtreler. Spektral ayrıştırıcı sıvısı fotovoltaik panel üzerinde optik filtre olarak sirküle edilir. Kızılötesi aralığındaki dalga boyu soğurulurken, görünür aralıktaki güneş radyasyonu PV hücrelerine iletilir. Böylece yüksek ısının sebep olduğu elektrik dönüşüm verimliliği ve termal verimlilik kayıpları ortadan kaldırılır. Son zamanlarda, güneş spektrumunun istenmeyen kısımları nedeniyle aşırı ısının neden olduğu fotovoltaik modülün aşırı ısınmasını en aza indirmek için araştırmalar yapıldı. Bu tür sıcaklık artışına sebebiyet veren istenmeyen ultraviyole ve kızılötesi ışınların filtrelenmesi, aynı zamanda istenen bölümlerin (görünür ve kızılötesinin bir kısmını) fotovoltaik hücresinin yarı iletken malzemesine ulaşmasına izin veren optik filtreler tarafından bloke edilmesiyle başarılmıştır. Bu amaçla belirli sıvılar ve boyalar önerilmiştir (Jiwanapurkar vd., 2015).

Osborn vd., (1986) ve Chendo vd., (1987) tarafından absorbsiyon filtreleri olarak kullanılabilecek sıvılar incelendi. 30'dan fazla optik sıvı filtre örneğinin spektral tepkisi, 300 nm ile 1500 nm arasındaki güneş spektrumunda tek tek veya birleşik olarak test edildi ve kobalt, kuprik ve nikelin inorganik tuzlarının istenen aralıkta uygun spektral özelliklere sahip optik aralıkta olduğu bulundu. Kobalt sülfat, Si hücrelerine neredeyse ideal bir optik tepki uyumu gösterdi. Brayco 888 HF de test edildi ve 600 nm ve 1100 nm'de keskin soğurma karakterine sahip olduğu, PV/T sistemindeki bir Si hücrelerine ışık iletimi için uygun olduğu bulundu.

Kaluza vd., (1999), sıvıların özelliklerini teorik olarak inceledi ve sonuçları ölçülen verilerle karşılaştırdı. Su veya organik sıvılar gibi saf sıvıların, güneş PV/T sistemlerine emici filtreler olarak uygulanabileceğini sonucuna vardı.

Sabry vd., (2002), silisyum hücresi ile çalışmak için ideal sıvı absorpsiyon filtresi özelliklerini belirlemek amacıyla sistem simülasyonları gerçekleştirdi. Optimum filtrenin, AM 1.5 spektrumunda gelen enerjinin %59'una eşdeğer olan 450-920 nm iletim aralığına sahip olduğu bulundu. İdeal filtre, güneş konsantrasyonu altında filtrelenmeyene kıyasla hücre verimliliğinde %30'luk bir artışla sonuçlandı ve sıvı absorpsiyon filtresinden %40'a varan potansiyel termal kazanç elde edildi. Termal bileşenin sıcaklığı yazarlar tarafından tartışılmamıştır ve tam bir analiz için termal kayıpların ve yardımcı maddelerin hesaba katılması gerekli olacaktır.

Hamdy & El-Hefnawi, (1990), sıvı absorpsiyon filtreleri olarak üç ısı transfer sıvısını birleştirdi. Kullanılan sıvılar Kobalt sülfat, Brayco 888 ve Valvoline idi. Bu sıvıların optik özellikleri silisyum güneş pilinin spektral duyarlılığı ile eşleştirildi. Filtre türlerinin tümü, bulgulara göre PV hücresinin sıcaklığını düşürdü. Kobalt sülfat, Valvoline ve Brayco ile güneş altında güneş pillerinin verimleri sırasıyla 10,8%, 10,2% ve 10,2% idi. Filtre olmadan hücre verimliliği 9,2% olmaktaydı.

Y. Wang vd., (2008), bir güneş modülünü polar etanol ve gliserin, polar olmayan benzen, silikon yağı, inorganik damıtılmış su ve musluk suyu dahil olmak üzere altı farklı sıvıya batırdı. Sıvıların her bir örtü tabakası için 3, 6 ve 9 mm'lik üç kalınlık seçildi. Güneş paneli için, toplam verimde belirli değişiklikler gözlemlenirken voltaj çıkışı değişmedi. Tüm sıvı türleri ile daha kalın örtücü filmler kullanıldığında daha düşük verim değerleri gözlemlendi. Bu, yalnızca sıvı filtre katmanının optik etkisiyle alakalıydı.

Lanzafame vd., (2010), PV modülü bir su banyosuna batırıldığında, PV güç çıkışında %10-15 artış rapor edilmiştir. Bu çalışmada, spektrum filtrasyonu için kolay temin edilebilen ve daha ucuz sıvıların belirlenmesi amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

Maiti vd., (2010), optik filtreler olarak inorganik tuzların çok çeşitli organik ve sulu tuz çözeltilerinin stabilitesini belirledi. Bir floresan parlatici madde ile etilen glikol, propilen glikol ve gliserin karışımının iletim açısından en iyi seçeneklerden biri olduğu gösterilmiştir.

Han vd., (2011), güneş paneli, deiyonize (DI) su, izopropil alkol (IPA), etil asetat ve dimetil silikon yağına daldırıldı. Spektrofotometre testi, tüm sıvıların güneş pilinin spektral profiliyle eşleştiğini ortaya çıkardı. İletim eğrilerine dayanarak, güneş pillerinin foto akım yoğunluğunun DI su, IPA, etil asetat ve dimetil silikon yağı için maksimum olduğu hesaplandı. Güneş pillerinin bu sıvıların 10 mm'lik bir ışın yoluna çift taraflı daldırılması, gelişmiş bir elektrik verimliliğine yol açtı. DI su, IPA, etil asetat ve dimetil silikon yağı için, elektrik verimliliğindeki değişim yüzdesi sırasıyla %8,5, %15,2, %8,7 ve %10,2 idi.

Jiwanapurkar vd., (2015) AM 1.5 için emici sıvı olarak CuSO₄ çözeltisi içeren, konsantre tipte spektral olarak seçici bir doğrudan emme toplayıcının prototipini test etti. Toplayıcının performansı çeşitli parametrelerin değiştirilmesiyle karakterize edildi. Kolektör performansının, çalışma akışkanının akış hızına göre önemli ölçüde değişmediği bulunmuştur. Herhangi bir geometrik parametreyi değiştirmeden optik konsantrasyonun değiştirilmesinin de toplayıcının performansını etkilemediği görülmüştür. Daha yüksek konsantrasyon aynı zamanda verimlilikte ölçülebilir bir iyileşme ile sonuçlanmadı.

Han vd., (2018) , CPV/T sistemlerinde kullanılan çok sayıda sıvı filtresinin optik iletimini ve filtre performansını araştırdı. Bakır tuzları, glikoller ve valvolin yağı, inorganik sulu tuzların, tek başına PV ile karşılaştırıldığında silisyum hücrelerinin ve GaAs hücrelerinin verimini sırasıyla %20 ve %34'ten fazla arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Ramkiran vd., (2020), frekans veya dalga boyu ile fotonik enerji arasındaki ilişkiyi belirlemek için morumsu kırmızı renk ile beş farklı rengi kullandı. Filtreli ve filtreli PV performansı karşılaştırıldı. Sonuç, morumsu kırmızı renginin güneş ışınımının görünür spektrumunda maksimum verimi verdiğidir.

Rosa-Clot vd., (2010) suya batırılmış PV modülünün performansını inceledi. İki PV modülü 4 cm ve 40 cm su derinliğindeki bir havuza batırılırken, üçüncü PV modülü karşılaştırma

amacıyla havuzun dışına doğrudan güneş ışınımı altına yerleştirildi. Test, İtalya'nın Pisa kentinde dış mekân koşullarında gerçekleştirildi. Sonuçlar, 4 cm su derinliğinde ortalama elektrik verimliliğinin yaklaşık %11 arttığını, 40 cm su derinliğinde ise ortalama elektrik verimliliğinin %23 azaldığını gösterdi.

Rosa-Clot vd., (2011) PV modülün üzerine yerleştirilen ve 2,5 cm derinliğinde akan su içeren bir polikarbonat kutu önerdiler. Sistemin termal ve elektriksel performansı İtalya'nın Pisa kentinde dış hava koşullarında test edilmiştir. Sonuçlar, yıllık ortalama termal, elektrik ve toplam verimliliğin sırasıyla yaklaşık %4,39, %12,87 ve %17,3 olduğunu gösterdi.

Rosa-Clot vd., (2016) polikarbonat kutulu PV'in performansını deneysel olarak test etti ve kutusuz geleneksel PV'in performansı ile karşılaştırdı. Polikarbonat kutu PV'in üzerine yerleştirildi ve yaklaşık 2 cm derinliğe kadar suyla dolduruldu. İki sistem İtalya'nın Enna ve Pisa şehirlerinde dış mekân koşullarında test edildi. Sonuçlar, geleneksel PV'in ortalama elektrik verimliliğinin %13,19 olduğunu, su kutulu PV'in verimliliğinin ise %6,77 olduğunu gösterdi. Elektrik verimliliğindeki bu azalma, su tarafından radyasyonun emilmesinden ve optik kayıplardan kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak kutunun su ile ilave ağırlığının PV modülü üzerinde herhangi bir olumsuz mekanik etkisinin bulunmadığını da belirtmişlerdir.

Al-Shohani vd., (2016), deneysel bir yaklaşım kullanarak, PV hücrelerinin önünde bulunan su tabakası kalınlığını PV/T sisteminin performansı üzerindeki etkisini değerlendirdi. Yazarlar, su tabakası ile PV arasındaki mesafeye ek olarak su tabakası kalınlığının performans üzerindeki etkisini incelemiş ve 1 cm-5 cm su kalınlığı için hücrelerin sıcaklığının %14-%30,2 oranında azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca 1cm-3cm mesafelerde %6,2-%12,2 oranında azalma sağlanmıştır. Yazarlar, su kalınlığı arttıkça PV sıcaklığının düştüğünü ve daha yüksek termal ve genel verim elde edildiğini bildirdi. Ancak elektrik verimliliğinde de azalma oldu.

Joshi vd., (2016), spektral filtre olarak kullanılabilecek sıvıların belirlenmesi için akışkanların birtakım özelliklerini inceledi. Spektrum filtresi için kullanılan sıvı, güneş pilinin daha iyi elektriksel performansı için güneş ışınımının istenen spektrumunu iletebilmeli ve aynı zamanda sıvı, güneş spektrumunun istenmeyen kısmını emmelidir.

Deneyler sonrasında Hindistan cevizi yağı, gliserin ve musluk suyu gibi akışkanların hem güneş ışınimleri için spektral ısı absorpsiyonu hem de özgül ısılar açısından orta değerler gösterdiği gözlemlenmiştir. Akışkanlardan hindistancevizi yağı ve transformatör yağı güneş pilinin daha iyi elektriksel performansını vermekte ve orta düzeyde ısı emme potansiyeli olduğu sonucuna vardılar.

Looser vd., (2014), doğrudan soğurmalı ısı ayırmalı CPV-T sistemi için en uygun ticari ısı transfer akışkanına yönelik bir araştırma çalışması yürüttüler. Yüksek sıcaklığa ve UV ışığına maruz bırakılarak akışkanın optik geçirgenliği üzerindeki etkileri analiz edildi. 18 farklı ticari ısı transfer akışkanının optik geçirgenliği ölçüldü. Soğurma filtreleri olarak hizmet verecek en umut verici sıvılar arasında Duratherm 600, Duratherm G, endüstriyel Propilen Glikol (PG), pembe boyalı PG ve Royco 782 yer alır.

T. Otanicar vd., (2010); T. P. Otanicar vd., (2009), optik filtre olarak ısı transfer akışkanını kullanan tek geçişli CPV-T sisteminin parametrik analizine odaklanmıştır. Yazarlar sıcaklık ve güneş konsantrasyonunun sistemin termal ve elektriksel verimliliği üzerindeki etkisini analiz etti. Daha da önemlisi, bu çalışmada yazarlar, daha iyi spektral soğurma özelliğine sahip ısı transfer akışkanlarının kullanılma potansiyelini vurguladılar. Bu grup ayrıca su, etilen glikol, propilen glikol ve difenil oksit gibi diğer saf akışkanların spektral emiciliğini araştırdı ve optik özelliklerini uyarlamak için akışkanlarda nanopartiküllerin kullanımını vurguladı.

T. P. Otanicar vd., (2013), ince film filtreler de araştırılmış ve filtrelerin ideal olmayan yönleri dikkate alınarak PV-T sistemlere uygulanan optik akışkan filtrelerle karşılaştırılmıştır.

3. PV/T SİSTEMİN SAYISAL VE ANALİTİK ÇÖZÜMLEMESİ

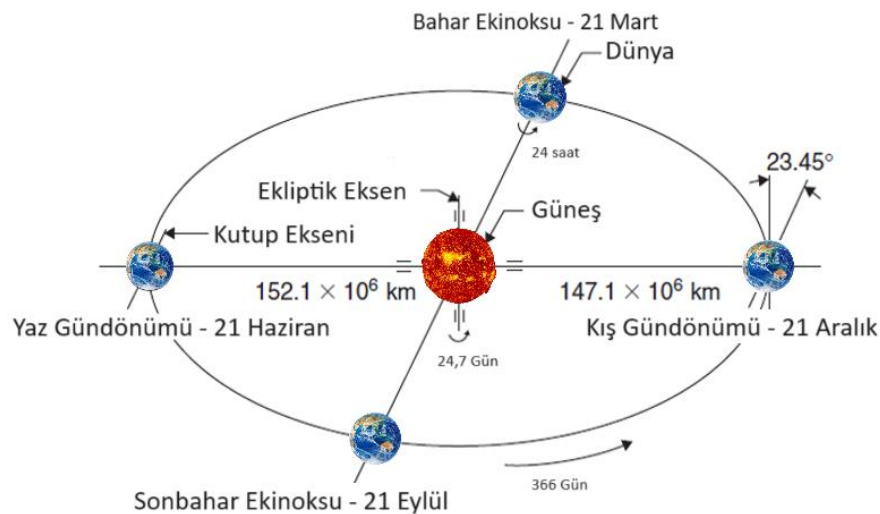
Bu bölümde sistemin, güneş açısı, güneş radyasyonu ve elektrik modeli sayısal çözümlemesine yer verilmektedir. Ek olarak, fotovoltaiik sistemdeki, kayıp ve verimlilik sınırları analitik çözümlemesinden bahsedilmektedir.

3.1 Güneş Açısı

Dünya kendi eksenini etrafında dönüşünü 24 saatte tamamlar ve Güneş etrafındaki dönüşünü yaklaşık 365,25 günde tamamlar. Bu devrim dairesel değildir ve Şekil 3.1'de gösterildiği gibi odak noktalarından birinde Güneş bulunan bir elipsi takip etmektedir. Dünyanın yörüngesinin dış merkezliliği, çok küçüktür ve 0,01673'e eşittir. Bu nedenle dünyanın güneş etrafındaki yörüngesi neredeyse daireseldir. Güneş-dünya mesafesi, R, günberi noktasında (en kısa mesafe, 3 Ocak'ta) ve aphelion'da (en uzun mesafe, 4 Temmuz'da) tarafından verilmiştir:

$$R = a(1 + -e) \quad (3)$$

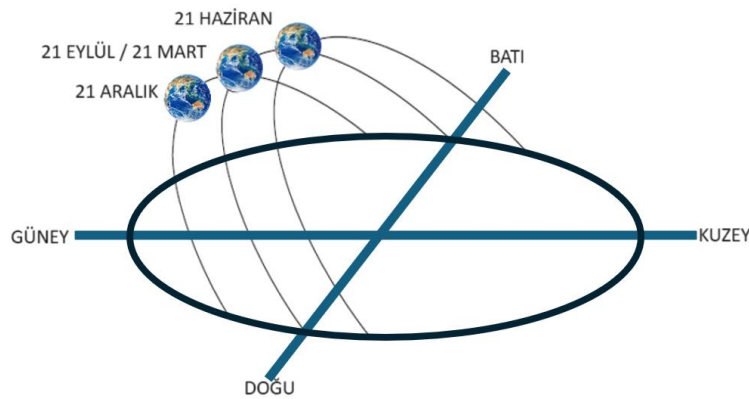
Eşitlik (3) ile ifade edilir. Burada a, güneş ile dünya arasındaki mesafe yani, 149.5985×10^6 km' dir.



Şekil 3.1: Dünyanın güneş etrafındaki yıllık hareketi (Duffie vd., t.y.)

Eşitlik (3)'deki artı işareti, Dünya günöte konumundayken, eksi işareti günberi konumunda olduğunda güneş-dünya mesafesi içindir. Eşitlik (3)'ün çözümü, en uzun mesafe için $152,1 \times 10^6$ km, en kısa mesafe için ise $147,1 \times 10^6$ km'ye eşittir. İki mesafe arasındaki fark sadece %3,3'tür. Ortalama güneş-dünya mesafesi, a, günberi ve günöte mesafelerinin toplamının yarısı olarak tanımlanır.

Güneşin görünen en belirgin hareketi, her gün gökyüzünde bir yay çizerek hareket etmesi ve öğle saatlerinde en yüksek noktasına ulaşmasıdır. Kış ilkbahara ve ardından yaz dönüştükçe, gün doğumu ve gün batımı noktaları ufuk boyunca yavaş yavaş kuzeye doğru hareket eder. Kuzey Yarımküre 'de güneş her gün daha erken doğup daha geç battıkça ve güneşin yolu gökyüzünde yükseldikçe günler uzar. 21 Haziran'da Güneş dünyaya göre en kuzeydedir. Buna yaz gündönümü denir ve bugün boyunca gündüz maksimumdadır. Altı ay sonra, yani 21 Aralık kış gündönümünde, bunun tersi olur ve güneş en güney konumundadır (Şekil 3.2). 6 aylık aralığın ortasında, 21 Mart ve 21 Eylül tarihlerinde gündüz uzunluğu gece uzunluğuna eşittir. Bunlara sırasıyla ilkbahar ve sonbahar ekinoksları denir. Güney Yarımküre 'de yaz ve kış gündönümleri tam tersidir; yani yaz gündönümü 21 Aralık'ta, kış gündönümü ise 21 Haziran'dadır. Tüm bu tarihlerin yaklaşık olduğunu ve yıldan yıla küçük farklılıklar (birkaç günlük fark) olduğunu belirtmek gerekir. Basitlik sağlamak amacıyla aşağıdaki analizde güneşin hareketine ilişkin Ptolemaios görüşü kullanılmıştır; yani, tüm hareketler göreceli olduğundan, dünyanın sabit olduğunu düşünmek ve güneşin sanal hareketini, kökeni ilgilenilen yerde olmak üzere dünyaya sabitlenmiş bir koordinat sisteminde tanımlamak uygundur (Kalogirou, 2023).



Şekil 3.2: Dünyanın uzay pozisyonunun yıllık değişimi (Khavrus ve Shelevytsky, 2010)

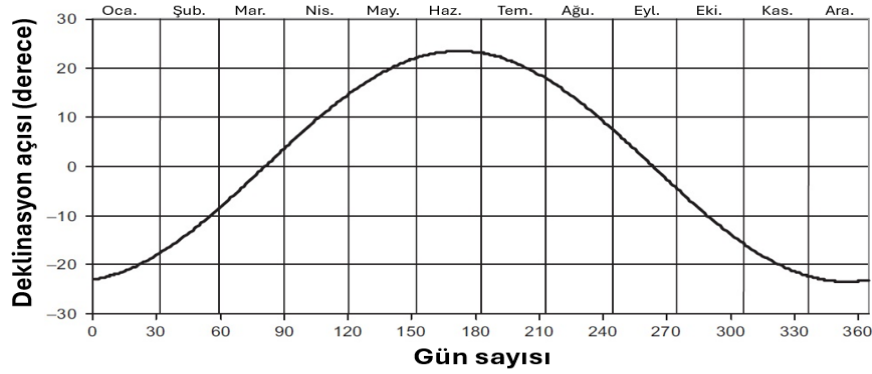
Çoğu güneş enerjisi uygulaması için, günün ve yılın belirli bir zamanında güneşin gökyüzünde nerede olacağına dair makul derecede doğru tahminlere ihtiyaç vardır. Güneş gök küresi üzerinde 2 serbestlik derecesiyle hareket etmeye mecburdur; bu nedenle, yeryüzündeki bir gözlemciye göre konumu, iki astronomik açı, güneş yüksekliği (a) ve güneş azimutu (z) aracılığıyla tam olarak tanımlanabilir. Aşağıda ilgili formülasyonla birlikte her açının açıklaması yer almaktadır. Bu açıların hesaplanmasına yönelik yaklaşık bir yöntem, güneş yolu diyagramlarıdır. Güneşin yükseklik ve azimut açılarının denklemlerini vermeden önce güneş sapması ve saat açısının tanımlanması gerekmektedir. Bunlar diğer tüm güneş açısı formülasyonlarında gereklidir.

3.1.2 Deklinasyon, δ

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, dünyanın dönme eksenini (kutup eksenini), ekliptik düzleme normal olan ekliptik eksenden her zaman 23,45'lik bir açıyla eğimlidir. Ekliptik düzlemi, dünyanın güneş etrafındaki yörüngesinin düzlemidir. Dünya güneşin etrafında dönerken sanki kutup eksenini güneşe göre hareket ediyormuş gibi olur. Güneş sapması, güneş ışınlarının ekvatorun kuzeyindeki (veya güneyindeki) açısal mesafesidir; kuzey sapması pozitif olarak tanımlanır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, güneş-dünya merkez çizgisi ile bu çizginin ekvator düzlemindeki izdüşümü arasındaki açıdır. Ekvatorun kuzeyindeki sapmalar (Kuzey Yarımküre 'de yaz) pozitif, güneydekiler ise negatiftir. Şekil 3.4 ekinokslar ve gündönümleri sırasındaki sapmayı göstermektedir. Görüldüğü gibi, sapma ilkbahar ekinoksunda 0'dan yaz gündönümünde +23,45'e, sonbahar ekinoksunda 0'a ve kış gündönümünde 23,45'e kadar değişmektedir. Güneş sapmasının yıl içindeki değişimi Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Yılın herhangi bir günü (N) için derece cinsinden sapma, aşağıdaki Eşitlik (4) ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (4)$$

olur; her ikisi de 12 saate eşittir. Şekil 3.5'te yılın her gününe karşılık gelen deklinasyon açısına yer verilerek güneş eğimi gösterilir.



Şekil 3.5: Güneşin eğimi(Duffie vd., t.y.)

3.1.3 Saat Açısı, h

Dünya yüzeyindeki bir noktanın saat açısı h, dünyanın döndüğü noktanın meridyenini doğrudan güneşin altına getireceği açı olarak tanımlanır. Şekil 3.3, P noktasının saat açısını, dünyanın ekvator düzleminde OP izdüşümü ile güneş-dünya merkezinin merkez çizgisine izdüşümü arasında ölçülen açı olarak göstermektedir. Yerel güneş öğle saatlerinde saat açısı sıfırdır; her 360/24 veya 15 boylam 1 saate eşdeğerdir, öğleden sonra saatleri pozitif olarak belirlenir.

Sembolik olarak ifade edilirse saat açısı derece cinsinden şu şekildedir Eşitlik (5):

$$h = \pm 0,25(\text{yerel güneş öğle saatinden dakika sayısı}) \quad (5)$$

artı işareti öğleden sonra saatlerine, eksi işareti ise sabah saatlerine uygulanır. Saat açısı AST'den de elde edilebilir; yani düzeltilmiş yerel güneş saati Eşitlik (6):

$$h = (AST - 12) 15 \quad (6)$$

Yerel güneş öğle saatlerinde, $AST = 12$ ve $h = 0$. Bu nedenle, Eşitlik (7)'den LST saatlerimizin yerel güneş öğle saatlerinde gösterdiği zaman:

$$LST = 12 - ET \pm 4(SL - LL) \quad (7)$$

elde edilebilir.

3.1.4 Güneş yükseklik açısı, α

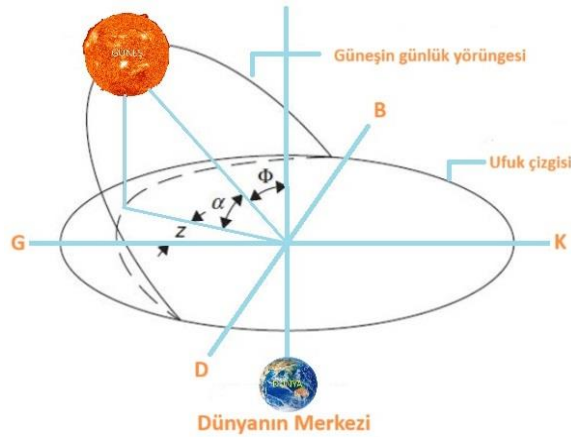
Güneş yükseklik açısı, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, güneş ışınları ile yatay düzlem arasındaki açıdır. Güneş ışınları ile düşey arasındaki açı olan güneş zenit açısı ϑ ile ilgilidir. Öyleyse Eşitlik (8)'den,

$$\vartheta + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (8)$$

Güneşin yükseklik açısının matematiksel ifadesi Eşitlik (9)'den şu şekildedir:

$$\sin(\alpha) = \cos(\vartheta) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (9)$$

burada L = yerel enlem, dünyanın merkezinden ilgilenilen bölgeye kadar olan bir çizgi ile ekvator düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanır. Ekvatorun kuzeyindeki değerler pozitif, güneyindeki değerler ise negatiftir.



Şekil 3.6: Güneşin gün doğumundan gün batımına günlük yörüngesi (Duffie vd., t.y.)

3.1.5 Güneş Azimut Açısı, z

Güneş azimut açısı z, yatay düzlemde Kuzey Yarımküre için tam güneyden (gerçek güney) veya Güney Yarımküre için tam kuzeyden ölçülen güneş ışınlarının açısıdır; batıya doğru pozitif olarak belirlenmiştir. Güneş azimut açısının matematiksel Eşitlik (10)'dan ifadesi şu şekildedir:

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (10)$$

Bu denklem $\cos(h) > \tan(\delta)/\tan(L)$ olması koşuluyla doğrudur . Şekil 3.6'da gösterildiği gibi güneşin D-B çizgisinin arkasında olduğu ve sabah saatleri için azimut açısının $\pm\pi + IzI$, öğleden sonra saatleri için ise $\pi - z$ olduğu anlamına gelir. Güneş öğle saatlerinde, tanım gereği, güneş tam olarak kuzey-güney hattını içeren meridyenin üzerindedir ve dolayısıyla güneşin azimutu 0° 'dır. Buna göre öğlen yüksekliği Eşitlik (11)'dan α_n :

$$\alpha_n = 90^\circ - L + \delta \quad (11)$$

3.1.6 Gün Doğumu ve Gün Batımı Saatleri ve Gün Uzunluğu

Güneşin yükseklik açısı 0° olduğunda güneşin doğduğu ve battığı söylenir. Yani gün batımındaki saat açısı h_{ss} , Eşitlik (9) h için $\alpha = 0^\circ$ olduğunda, Eşitlik (12) elde edilir:

$$\sin(\alpha) = \sin(0) = 0 = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h_{ss}) \quad (12)$$

veya;

$$\cos(h_{ss}) = -\frac{\sin(L) \sin(\delta)}{\cos(L) \cos(\delta)} \quad (13)$$

Eşitlik (13), Eşitlik (14)'e indirgenirse;

$$\cos(h_{ss}) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (14)$$

Burada h_{ss} gün batımında pozitif alınır. Yerel güneş öğle vaktinde saat açısı 0° olduğundan ve boylamın her 15° 'i 1 saate eşit olduğundan, yerel güneş öğle vaktinden saat cinsinden gün doğumu ve gün batımı zamanı Eşitlik (15)'den şu şekilde olur:

$$H_{ss} = -H_{sr} = \frac{1}{15 \cos^{-1} [-\tan(L) \tan(\delta)]} \quad (15)$$

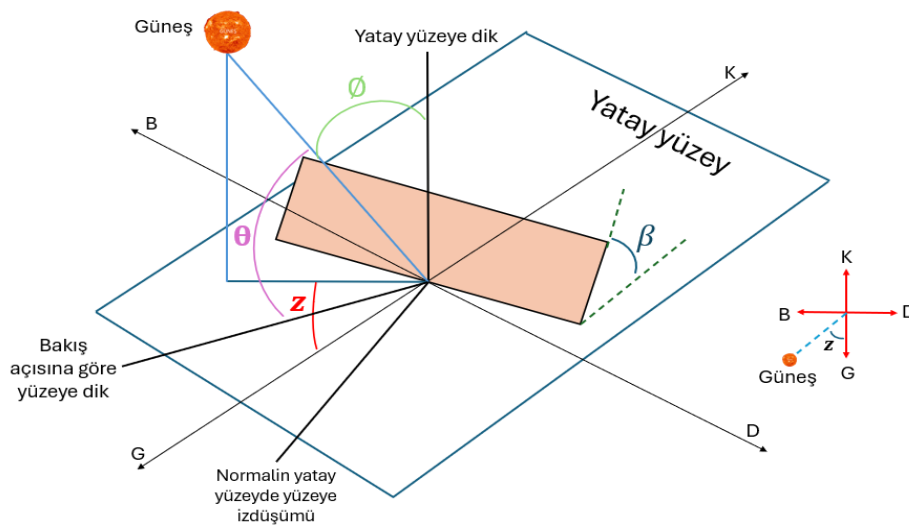
Güneş öğle vakti gün doğumu ve gün batımı saatlerinin ortasında olduğundan gün uzunluğu gün batımı saatinin iki katıdır. Buna göre günün saat cinsinden uzunluğu:

$$\text{Gün uzunluğu} = \frac{2}{15 \cos^{-1} [-\tan(L) \tan(\delta)]} \quad (16)$$

Eşitlik (16)'da verildiği gibi olur.

3.1.7 Geliş açısı, θ

Güneşin geliş açısı θ , güneş ışınları ile bir yüzeyin normali arasındaki açıdır. Yatay bir düzlem için geliş açısı θ ve zenit açısı ϕ aynıdır. Şekil 3.7'de gösterilen açılar, geliş açısı için aşağıdaki genel ifadeyle Şekil 3.7'de gösterilen temel açılarla ilişkilidir (Duffie vd., t.y.):



Şekil 3.7: Güneş açısı diyagramı (Duffie vd., t.y.)

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) &= \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \cos(\beta) \cos(Z_s) \\
&+ \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) \\
&+ \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(Z_s) \\
&+ \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(Z_s)
\end{aligned} \tag{17}$$

Eşitlik (17)'de;

β = yataydan yüzey eğim açısı,

Z_s = yüzey azimut açısı,

tam güneyden batıya doğru yüzey normali ile arasındaki açı pozitif olarak tanımlanır. Bazı durumlarda Eşitlik (17) çok daha basit formlara indirgenir:

Yatay yüzeyler için, $\beta = 0^\circ$ ve $\theta = \vartheta$, ve Eşitlik (17), Eşitlik (9)'a indirgenir.

Dikey yüzeyler için, $\beta = 90^\circ$ ve Eşitlik (17), Eşitlik (18)'deki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) &= -\cos(L) \sin(\delta) \cos(Z_s) + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(Z_s) \\
&+ \cos(\delta) \sin(h) \sin(Z_s)
\end{aligned} \tag{18}$$

Kuzey Yarımküre 'de güneye bakan eğimli bir yüzey için, $Z_s = 0^\circ$ ve Eşitlik (17) aşağıdaki Eşitlik (19)'a indirgenir:

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) &= \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \\
&+ \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \\
&= \cos(\theta) = \sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(h)
\end{aligned} \tag{19}$$

Güney Yarımküre 'de kuzeye bakan eğimli bir yüzey için, $Z_s = 180^\circ$ ve Eşitlik (17) indirgendiğinde:

$$\cos(\theta) = \sin(L + \beta) \sin(\delta) + \cos(L + \beta) \cos(\delta) \cos(h) \tag{20}$$

Eşitlik (20) olur. Eşitlik (17), herhangi bir yönelimdeki bir yüzey üzerindeki geliş açısı için genel bir ilişkidir. Eşitlik (18) – (20)'da gösterildiği gibi, belirli durumlar için çok daha basit formlara indirgenebilir.

3.2 Güneş Radyasyonu

Güneş, yaklaşık olarak 1391000 km çapında ve dünyadan yaklaşık ortalama $149,6 \times 10^6$ km uzaklıkta, yoğun derecede sıcak gaz halindeki maddeden oluşan bir küredir. Güneş kendi eksenini etrafında yaklaşık 4 haftada bir döner. Ekvatorun her dönüşü yaklaşık 27 gün sürer ve kutup bölgelerinin her dönüşü yaklaşık 30 gün sürer. Güneşin etkin kara cisim sıcaklığı 5777 K'dir (Duffie vd., t.y.).

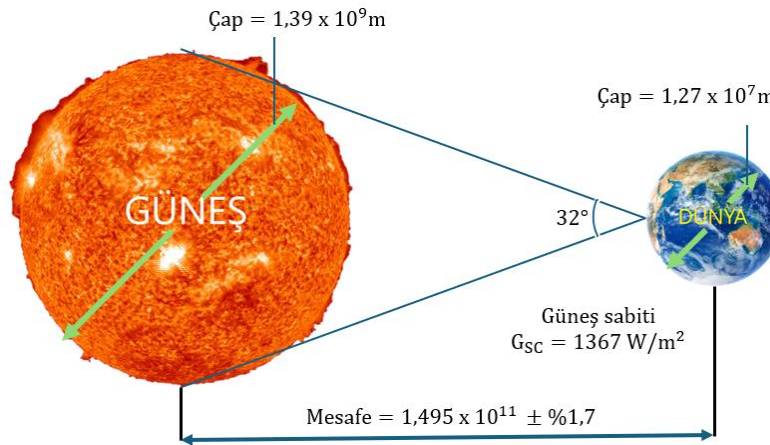
Enerjinin %90'ının, güneş kütlelerinin %40'ını içeren 0 ila 0,23R (burada R, güneşin yarıçapıdır) bölgesinde üretildiği tahmin edilmektedir. Fotosferin dışında, tam güneş tutulması sırasında veya araçlar tarafından gözlemlenebilen, az çok şeffaf bir güneş atmosferi vardır. Fotosferin üzerinde, tersine dönen katman adı verilen, birkaç yüz kilometre derinlikte, daha soğuk gazlardan oluşan bir katman bulunur. Bunun dışında, yaklaşık 10.000 km derinliğe sahip, kromosfer adı verilen bir katman bulunmaktadır. Bu, sıcaklıkları fotosferden biraz daha yüksek ancak yoğunluğu daha düşük olan gazlı bir katmandır. Daha da uzakta, çok düşük yoğunluklu ve çok yüksek (106 K) sıcaklığa sahip bir bölge olan korona yer alıyor. Güneşin bu basitleştirilmiş anlatımı, onun fiziksel yapısı, sıcaklık ve yoğunluk değişimleri, güneşin aslında sabit bir sıcaklıkta bir kara cisim radyatörü olarak işlev görmediğini anlamak için bir temel oluşturacaktır. Aksine, yayılan güneş radyasyonu, çeşitli dalga boylarındaki radyasyonu yayan ve soğuran çeşitli katmanların bileşik sonucudur. Ortaya çıkan dünya dışı güneş radyasyonu ve bunun spektral dağılımı, çeşitli deneylerde çeşitli yöntemlerle ölçülmüştür; sonuçlara aşağıdaki bölümde belirtilmiştir.

3.2.1 Güneş Sabiti

Şekil 3.8 güneş-dünya ilişkilerinin geometrisini şematik olarak göstermektedir. Dünyanın yörüngesinin dışmerkezliği, güneş ile dünya arasındaki mesafe %1,7 oranında değişir. Güneş 32°'lik bir açıya sahiptir. Güneş tarafından yayılan radyasyon ve onun dünyayla olan konumundan dolayı, dünya atmosferinin dışında neredeyse sabit bir güneş radyasyonu yoğunluğuna neden olur. Güneş sabiti (G_{SC}), atmosfer dışında ortalama dünya güneş

mesafesinde radyasyonun yayılma yönüne dik birim yüzey alanı üzerinde birim zaman başına alınan güneşten gelen enerjidir.

Güneş sabitinin belirlenmesi için çeşitli ölçümler (Duncan vd., 1982; Hickey vd., 1982; Thekaekara vd., 1971; Willson vd., 1981) yapılmıştır. Dünya radyasyon merkezi %1 belirsizlikle 1367 W/m^2 olarak kabul etmiştir (The World Radiation Data Centre, 2024).



Şekil 3.8: Güneş ile Dünya geometrisi (Duffie vd., t.y.)

3.2.2 Dünya Dışı Spektralin Radyasyon Dağılımı

Güneş spektrumundaki toplam enerjiye (yani güneş sabitine) ek olarak, dünya dışı radyasyonun, yani atmosferin yokluğunda alınacak radyasyonun spektral dağılımını bilmek faydalıdır. Standart bir spektral ışıınım eğrisi yüksek irtifa ve uzay ölçümlerine dayanarak derlenmiştir ve Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Hava kütlesi; doğrudan ışıınının, içinden geçtiği atmosfer kütlesinin, Güneş zirvede olsaydı geçeceği kütleye oranıdır. Bu yüzden deniz seviyesinde, güneş zirvedeyken $m = 1$ ve 60° 'lik bir θ_z zirve açısı için $m = 2$ olur. Deniz seviyesinde 0° 'den- 70° 'ye kadar olan zenit açıları için, yakın bir yaklaşıma olarak:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (21)$$

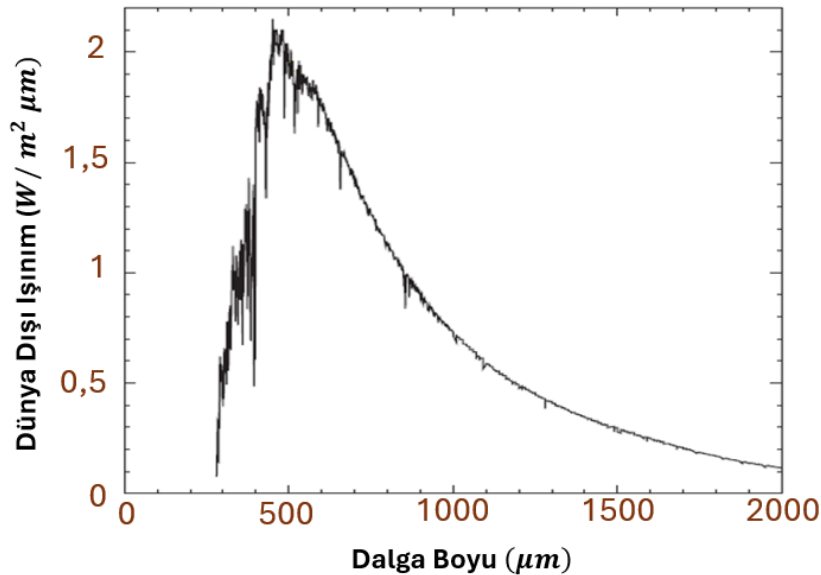
Eşitlik (21) verilir. Daha yüksek zenit açıları için Dünyanın eğriliği önemli hale gelir ve dikkate alınmalıdır.

Radyasyon (W/m^2), bir yüzeyin üzerine birim zamanda düşen birim alan başına enerji akışını tanımlar. Radyan enerjisinin, birim alan başına yüzeye gelme oranıdır. G sembolü, doğrudan, dağınık veya spektral radyasyon için uygun alt simgelerle birlikte güneş ışıını için kullanılır.

Doğrudan radyasyon, güneşten gelen ışıının atmosfer tarafından saçılmadan alınmasıdır. Işın radyasyonu genellikle doğrudan güneş radyasyonu olarak anılır.

Dağınık radyasyon, güneşten gelen güneş ışıını, atmosfer tarafından saçılarak yönü değiştirilmiştir.

Toplam güneş radyasyonu, bir yüzeydeki doğrudan ve dağınık güneş ışıının toplamıdır. Güneş radyasyonunun en yaygın ölçümleri, genellikle yüzeydeki küresel radyasyon olarak adlandırılan, yatay bir yüzeydeki toplam radyasyondur.



Şekil 3.9: Dünya-güneş mesafesindeki dünya dışı ortalama spektral ışıınım (Mojiri vd., 2015)

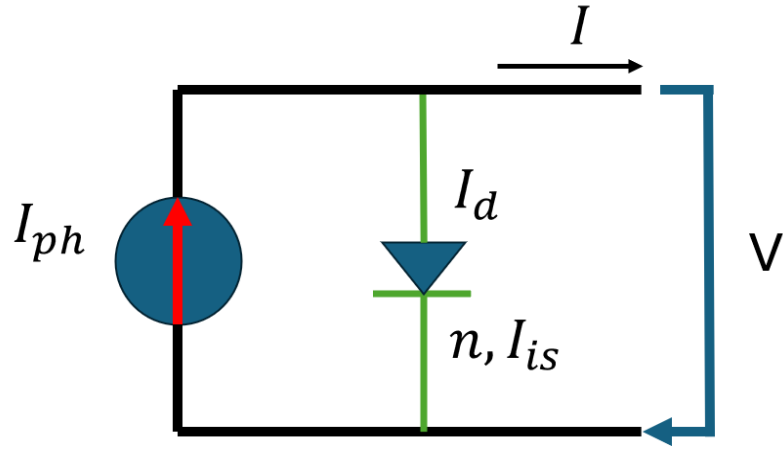
Isı akısı (W/m^2), belirli bir süre boyunca ışıının entegrasyonu ile bulunan, bir yüzey üzerindeki birim alan başına düşen enerjidir.

Güneşlenme, özellikle güneş enerjisi ışıınınına uygulanan bir terimdir. H sembolü bir günlük veya bir saatlik güneşlenme süresi için kullanılarak toplam radyasyonu ifade eder. I sembolü bir saatlik (veya belirtilmişse başka bir süre) güneşlenme için kullanılır. H ve I sembolleri ışıın, dağınık veya toplamı temsil edebilir ve herhangi bir yönelimdeki yüzeylerde bulunabilir. G , H ve I 'in alt simgeleri şu şekildedir: o Dünya atmosferinin üzerindeki, dünya dışı radyasyon olarak adlandırılan radyasyonu ifade eder; b ve d ışıın ve dağınık radyasyonu ifade eder; T ve n , eğik bir düzlemdeki ve yayılma yönüne normal bir düzlemdeki radyasyonu ifade eder. Ne T ne de n görünmüyorsa radyasyon yatay bir düzlemdeydir.

3.3 Elektrik Modeli

Modeller oluşturmak cihazların belirli koşullar ve belirli varsayımlar altında nasıl çalıştığının anlaşılması için önemlidir. Bu durumda, güneş pillerinin iki çıkış değişkeni (voltaj ve akım), bir giriş değişkeni (ışıınım) ve birkaç dahili parametresi vardır. Bu parametreler, modelin neyi temsil ettiğine ve modellenecek olayların ne olduğuna bağlı olarak değişecektir (Castro ve Silva, 2021; Fernandes vd., 2017; Nashih vd., 2016; Torres vd., 2018).

Şekil 3.10'da gösterildiği gibi bağımsız bir akım kaynağı ve bir diyotun paralel olarak toplanmasıyla ilk elektrik modeli elde edilir. Yük de bu elektrik elemanlarına paralel olacaktır. Akım kaynağı bağımsız olarak tanımlanır çünkü modellenecek belirli bir durumda değeri sabit olacaktır. Ancak değeri gelen radyasyona bağlıdır. Diyot p-n eklemine kendisini modelliyor. O halde, Şekil 3.10'daki model, yalnızca üç parametreyle I_{ph} , n ve I_{is} karakterize edilen en basit güneş pili modelini temsil etmektedir. Bu parametreler, aşağıda sunulacağı gibi, sıcaklık veya ışıınım gibi dış koşullara bağlı olarak değişebilir. Bu modele verilen ad, üç parametrelili bir model olan 1M3P'dir veya aynı zamanda bir diyot ve üç parametrelili 1D3P modeli olarak da bilinir.



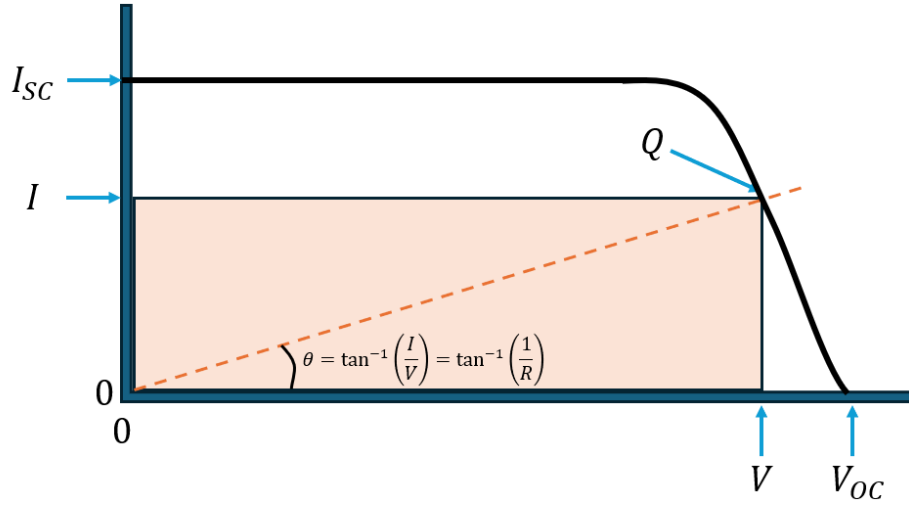
Şekil 3.10: Güneş hücresi elektriksel eşdeğer devre (Marques Lameirinhas vd., 2022)

Eşitlik (22), güneş pilinin çıkış akımı ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak açıklamaktadır. Kirchhoff'un Gerilim Yasasını (KVL) ve Kirchhoff'un Akım Yasasını (KCL) kullanarak ifade edilir.

$$I = I_{ph} - I_{is} \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) \quad (22)$$

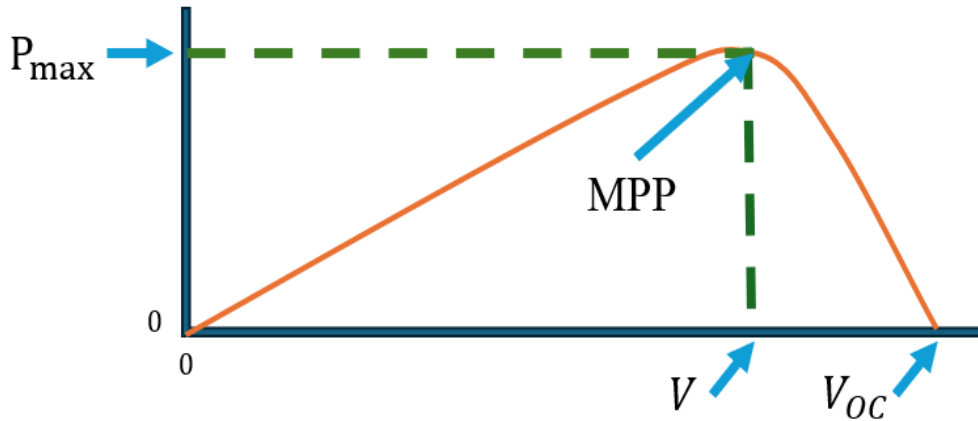
Şekil 3.11 'de, Eşitlik (22)'den elde edilen bir $I(V)$ eğrisini göstermektedir. Güneş pili bir DC güç ürettiğinden, yük devresi basit bir direnç R olarak temsil edilebilir. Belirli bir $I(V)$ eğrisi için, güneş pili çalışma noktası Q , bu karakteristik eğri ile $I(V)$ eğrisi arasındaki kesişim noktasıdır (yük çizgisi).

Şekil 3.11'de, kısa devre akımı I_{SC} ve açık devre voltajı V_{OC} 'nin temsil edildiği karakteristik eğri (mavi renkte) ve ayrıca belirli bir voltaj V ve akım I tarafından tanımlanan (DC) çalışma noktası Q gözlenir. Yük direnci için Ohm yasasını takip etmek zorundadır (Castro ve Silva, 2021; Fernandes vd., 2017; Nashih vd., 2016; Torres vd., 2018).



Şekil 3.11: $I(V)$ güneş hücresi karakteristiği (mavi) ve yük direnci R (kırmızı) için çalışması noktası (Q) grafiksel çözümü (Marques Lameirinhas vd., 2022)

Şekil 3.12'de bir güneş pili için bir $P(V)$ eğrisi örneklenmiştir. Çıkış DC gücü, akım ve voltajın ($P = I \times V$) çarpılmasıyla hesaplanır ve genellikle gerekli/üretilen çıkış voltajının fonksiyonu olarak bir eğri olarak gösterilir. Şekilde aynı zamanda güneş pilinin maksimum güç ürettiği nokta olan maksimum güç noktası (MPP) da işaretlenmiştir. Ancak önceki paragrafta açıklandığı gibi üretilen güç, belirli bir yük direnci için belirlenen çıkış akımına ve voltajına bağlı olacaktır (Castro ve Silva, 2021; Fernandes vd., 2017; Nashih vd., 2016; Torres vd., 2018).



Şekil 3.12: PV güneş hücresi karakteristiği ve maksimum güç noktası örneği (Marques Lameirinhas vd., 2022)

Eşitlik (22) karakteristik noktaları elde edecek şekilde şekillendirilebilir. Eşitlik (23) yani daha önce analiz edildiği gibi, kısa devre akımı yaklaşık olarak ışınlımla üretilen akım olacak

şekilde modellenmiştir. Benzer şekilde, Eşitlik (24), $I = 0$, yani açık çözüm uygulanarak Eşitlik (22)'den türetilir.

$$I_{SC} \approx I_{ph} \quad (23)$$

$$V_{OC} = n k T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{is}} + 1 \right) \quad (24)$$

Ayrıca maksimum güç noktası çıktılarını belirleme olasılığı da vardır, bunun için Şekil 3.12'deki grafik türevinin sıfır olduğu noktanın hesaplanması gerekir. Tek bir nokta olduğundan ve bunun da güç fonksiyonunun maksimumu olduğu bilindiğinden, Eşitlik (22)'den, Eşitlik (25) elde edilir. Eşitlik (26) doğrudan Eşitlik (25)'den kaynaklanır ve maksimum güç noktası voltajını belirlememize olanak tanır. Bu değer Eşitlik (22) modeline uygulanmasıyla, Eşitlik (27)'de açıklandığı gibi mevcut değer elde edilir (Castro ve Silva, 2021; Fernandes vd., 2017; Nashih vd., 2016; Torres vd., 2018). Her iki değer çarpılarak çıkış DC gücü hesaplanır ve maksimum güç noktası tam olarak belirlenir.

$$\left(\frac{dP}{dV} \right) | V = V_{max} = 0 \rightarrow I_{ph} + \left(\frac{V_{max}}{n k T} + 1 \right) I_{is} e^{\frac{V_{max}}{n k T}} + I_{is} = 0 \quad (25)$$

$$V_{max} = n k T \ln \left(\frac{\frac{I_{ph}}{I_{is}} + 1}{\frac{V_{max}}{n k T} + 1} \right) \quad (26)$$

$$I_{max} = I_{ph} - \left(I_{is} \left(e^{\frac{V_{max}}{n k T}} - 1 \right) \right) \quad (27)$$

Diğer parametreler yine de güneş pillerini analiz etmek ve karşılaştırmak için önemlidir. Hücrenin verimliliği η ve Doldurma Faktörü FF, genellikle fotovoltaik hücre performansını karakterize ederken sunulan önemli parametrelerdir (Marques Lameirinhas vd., 2022).

Hücrenin verimliliği, üretilen çıkış gücü ile (giriş) gücü arasındaki oran olarak tanımlanır. Daha sonra belirli bir yük direnci için hücrenin verimliliğini belirlemek için daha önce açıklandığı gibi maksimum güç noktasının hesaplanması gerekir. Elektriksel bir büyüklük

olmayan giriş gücü ışıyım kullanılarak elde edilir. Birim alan başına alınan ışıyım akısı (gücü) olan ışıyım G_{inc} , güneş pilinin aktif alanıyla çarpılarak üzerine gelen güç miktarını verir (Castro ve Silva, 2021; Fernandes vd., 2017; Nashih vd., 2016; Torres vd., 2018). Eşitlik (28) bu ilişkileri sunmaktadır.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{G_{inc}A_{active}} \quad (28)$$

Ek olarak Eşitlik (29)'da Doldurma Faktörünün matematiksel açıklaması sunulmaktadır. FF, üretilen maksimum güç ile açık devre gerilimi ile kısa devre akımı arasındaki çarpım arasındaki orandır (Castro ve Silva, 2021; Fernandes vd., 2017; Nashih vd., 2016; Torres vd., 2018). Mükemmel dönüşüm verimliliğine sahip hücreyi daha iyi anlamamızı sağlar. Mükemmel bir p-n bağlantısı, mükemmel bir dikdörtgen olan ve $FF = \%100$ 'e yol açan bir $I(V)$ karakteristiğine sahiptir.

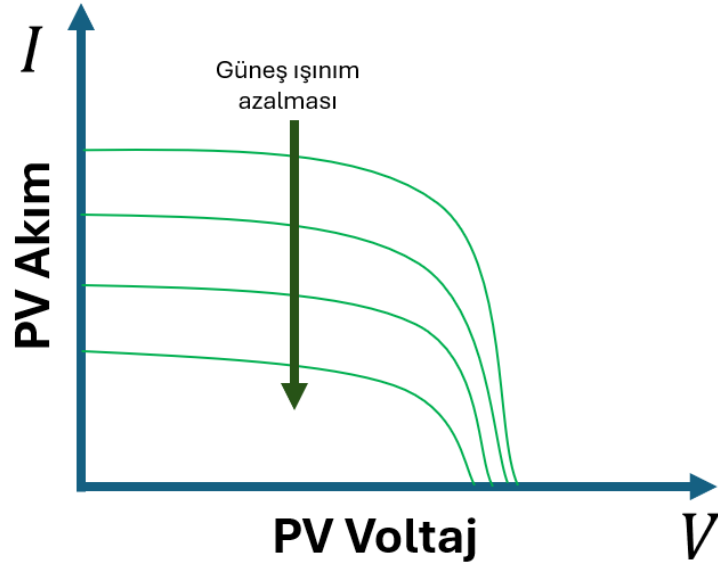
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{max}I_{max}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (29)$$

3.4 Kayıplar ve Verimlilik Sınırları

Güneş paneli üzerinde etkili olan çeşitli çevresel parametreler bulunmaktadır. Örneğin güneş ışığı, ortam ve modül yüzey sıcaklığı, rüzgâr hızı, nem, gölgeleme, toz, kurulum yüksekliği vb. çeşitli değişkenlerdir.

3.4.1. Güneş ışıyımının etkisi

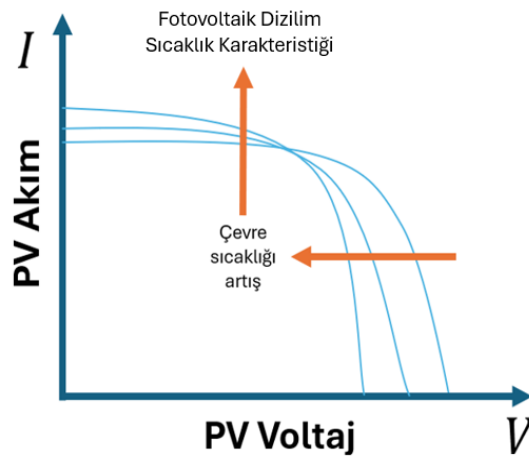
Kısa devre akımı (I_{sc}), yarı iletken malzeme tarafından emilen fotonların miktarından etkilenir ve dolayısıyla ışık yoğunluğuyla ilişkilidir (Dwivedi vd., 2020). Bu nedenle dönüşüm verimliliği, güç çıkışının genellikle ışıyım ile ilişkilendirileceği şekilde oldukça sabittir, ancak hücre sıcaklığı yükselirse verimlilik azalır (Şekil 3.13). Açık devre voltajı (V_{OC}), ışık yoğunluğuna göre çok az değişir (Luo vd., 2017).



Şekil 3.13: Güneş ışınlamı etkisi altında PV karakteristiği (Dwivedi vd., 2020)

3.4.2 Çevre sıcaklığının etkisi

Açık devre voltajı (V_{OC}), panel sıcaklığının $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkmasıyla çok fazla azalır ancak kısa devre akımı I_{sc} , yalnızca marjinal olarak artar (Şekil 3.14). PV performansı üzerindeki sıcaklığın etkisi sıcaklık katsayısı olarak tanımlanır. Net sonuç, sıcaklık artışıyla birlikte güç çıkışında bir azalmadır. Sıcaklık katsayısının yüzdesi, $25^{\circ}\text{ Celsius}$ 'luk normal koşullara karşı çıktıkça veya düştükçe çıktındaki değişimi gösterir. Örnek olarak, belirli bir panelin sıcaklık katsayısı $\%0,5$ ise, her $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik artış için maksimum güç $\%0,5$ oranında azalacaktır.



Şekil 3.14: Sıcaklığın PV üzerine etkisinin karakteristiği (Dwivedi vd., 2020)

Tablo 3.1: PV teknolojilerinin sıcaklık katsayısı, referans verimlilik, A; 1kWp sistem için (m^2) gerekli olan yüzey alanı (Conceição vd., 2018; Luo vd., 2017)

PV Teknoloji	Malzeme Kalınlığı	$\eta_{ref}(\%)$	$\beta_{ref}(C^{-1})$	A (m^2)
Mono-cSi	200	16-24	0,0041	~7
Poly-cSi	160	14-18	0,004	~8
a-Si	1	4-10	0,011	~15
CIGS	~2	7-12	0,0048	~10
CdTe	~1 – 3	10-11	0,00035	~10

Nominal çalışma hücresi sıcaklığı (NOCT) ve standart test koşulları (STC) Tablo 3.1'de belirtilmektedir.

Tablo 3.2: PV modülün STC ve NOCT koşulları (Luo vd., 2017)

Parametreler	Standart Test Koşulları	Çevresel Test Koşulları
Güneş radyasyonu	1000	800
Çevre sıcaklığı (C°)	25	20
Hava kütlesi	1,5	-
Rüzgâr hızı	-	1
Panel çalışma sıcaklığı	25	45

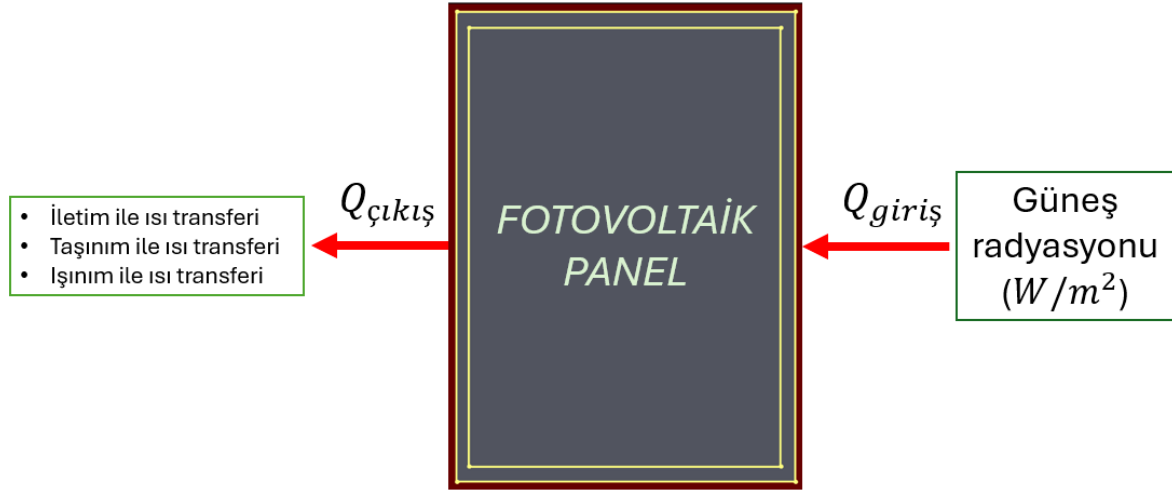
Ancak Ekvator bölgesindeki güneşli günlerde panel sıcaklığı $70^\circ C$ 'lik bir zirveye ulaşır. Bu tür aşırı sıcaklıklar yerel sıcak noktaya ve zayıf akımlara yol açar. Dolayısıyla panel sıcaklığının $45^\circ C$ 'nin üzerinde olması elektriksel performansın ve panel ömrünün bozulmasına neden olur. Farklı güneş pili teknolojilerinin sıcaklık değişimlerine farklı yanıtları vardır ve yanıtaki bu farklılık literatürde geniş çapta araştırılmıştır (Tablo 3.2).

PV'in elektriksel veriminin sıcaklıkla azalması da önemli bir araştırma alanıdır ve literatürde birçok çözüm yer almaktadır. Sistem performansı $25^\circ C$ STC koşullarına dayanarak verimlilik denklemi Eşitlik (30) ile ifade edilebilir:

$$\eta = \eta_r[1 - \beta(T_m - T_r)] \quad (30)$$

β değeri 0,004 K civarındadır.

Bu nedenle hücre sıcaklığının olumsuz etkilerini çözmek ve çalışma sıcaklığını üreticisinin tanımladığı değer dahilinde kontrol etmek için uygun soğutma yöntemleri kullanılarak PV' den ısının uzaklaştırılması önemlidir. PV hücresinden yayılan ısı dengesi şu şekilde tanımlanır (Şekil 3.15). Güneş enerjisi modülünün ısı dengesinden, modülün yüzeyinden hava akışı nedeniyle konvektif ısı kaybının yaklaşık %66 olduğu görülmektedir. Toplam ısı kaybına (Tablo 3.3)'de yer verilmiştir.



Şekil 3.15: Güneş hücresi ısı dengesi

Tablo 3.3: PV paneli ısı kaybı yüzdeleri

Sıra Numarası	PV Panel ısı kaybı	Yüzde Kayıp Oranı
1	Çerçeve boyunca iletim yoluyla	2
2	PV üst yüzey taşınım yoluyla	42
3	PV alt yüzey taşınım yoluyla	24
4	PV üst yüzey ışıınım	21
5	PV alt yüzey ışıınım	11

Yüksek ışıınım ve sıcaklığın birleşik etkisi, panelin aşırı ısınmasına neden olur ve bu durum aşağıdaki sonuçlara yol açabilir:

1. Performansta azalma
2. Dönüşüm verimliliğinde düşüş
3. Deformasyonda artış
4. PV hücrelerinin faydalı ömrü azalır
5. Hücreler yanarak kalıcı hasar görür
6. Güneş ışıınımı PV üzerine üniform olarak dağılmadığı için sıcak bölgeler oluşur.

3.4.3 Toz/gölgeleme etkisi

Fotovoltaik (P·V) modülün sıcaklığının artması sadece iklimsel ortamdan (ortam sıcaklığı) değil aynı zamanda doğrudan ve dolaylı kısmi gölgeleme sorunlarından da kaynaklanmaktadır (Conceição vd., 2018; Luo vd., 2017). Fotovoltaik modül üzerindeki gölgeleme, güneş panelinden uzağa monte edilen bir nesnenin gölgesinin yansımından kaynaklanabilir (örneğin: ağaç veya aydınlatma şamdanı vb.). Toz birikmesi olduğu durumlarda ise PV modülünde sıcak noktalar oluşturulabilir. Kısmi gölgeleme ve sıcak noktalar nedeniyle güç kaybı %70'ten fazla olabilir (Conceição vd., 2018). Ayrıcı PV modülü üzerindeki dağılımına (tekdüze veya kısmi) ve boyutuna ve yoğunluğuna bağlı olan kirlenmede PV performansını etkiler ve verimlilik kaybına sebep olur. Verimlilik kaybı, PV modülünün yüzeyinde biriken toz partikülünün tam kütesine ve boyutuna bağlı olarak değişebilir.

3.4.4 Nem Etkisi

Hava nemi, havadaki su içeriği miktarı anlamına gelir. Bağıl nem genellikle havadaki nem miktarı olan hava nemini belirtmek için kullanılır. Birçok araştırmacıya göre genel olarak nemin etkisini değerlendirmek için iki durum dikkate alınmaktadır. Birincisi, su buharı parçacıklarının güneş ışınlarının ışınlamına etkisi, ikincisi ise kapalı PV modüllerine giriş sırasında nemin etkisidir. Gün içinde sıcaklık değiştikçe bağıl nem de buna bağlı olarak değişir. Nem sıcaklıkla ters ilişki gösterir.

3.4.5 Rüzgârın Etkisi

Güneş PV verimliliğinin doğrudan rüzgâr hızından etkilendiğini söylemek doğru bir kavram olmayabilir. Ancak PV üretiminde önemli bir role sahiptir. Rüzgâr estiğinde temel olarak güneş pilinin sıcaklığı düşer (Kaldellis vd., 2014). Rüzgâr güneş panellerini soğutarak elektronların daha az titreşim üretmesine neden olur, böylece elektronlar üst duruma geçerken daha fazla enerji taşıyabilir. 1 °C ile soğutulan solar PV %0,05 daha etkilidir.

4. FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEM DENEYSEL ANALİZLER

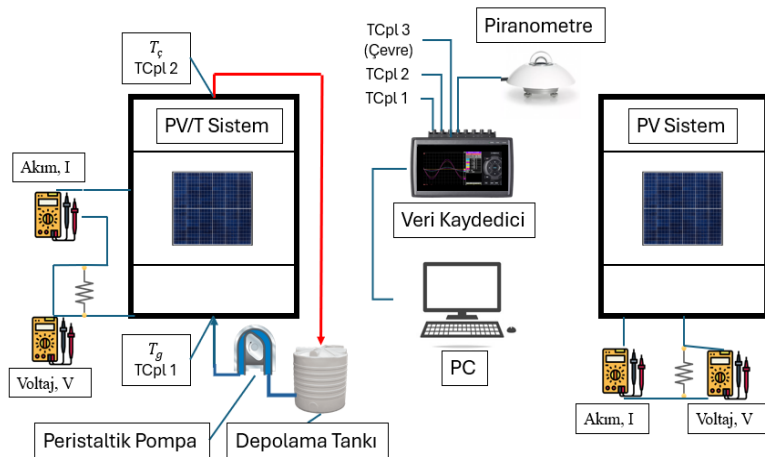
Bu bölüm, fotovoltaik termal sistemin tasarımı ve üretimi, deneyde kullanılan cihaz bilgisi ve spektral ışık akışkanlarının belirlenmesine yer verilmiştir. Spektral ayrıştırıcıların, fotovoltaik (PV) panellerinin performansı üzerindeki etkisini incelemek için deneysel analizler gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalar 2 alt bölümden oluşur. Birinci bölüm fotovoltaik sistem ile fotovoltaik termal sistem arasındaki incelemeleri kapsar. İkinci bölüm, fotovoltaik sistem ile farklı iki spektral ayrıştırıcının bulunduğu fotovoltaik termal sistemin performans karşılaştırılması sunulur.

4.1 PV/T Sistemin Tasarımı ve Üretimi

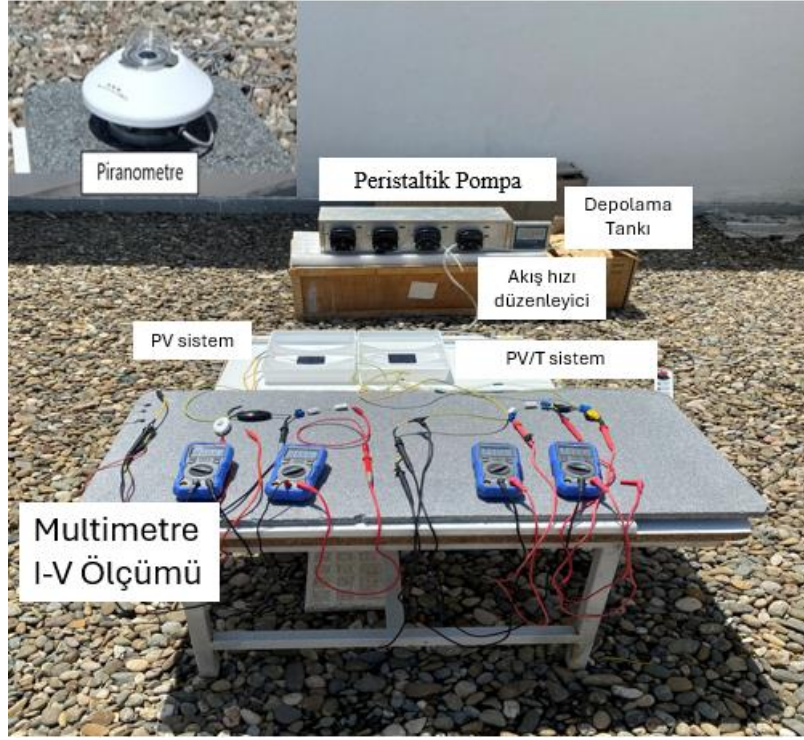
Çalışmada kullanılan iki deney sistemi Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Laboratuvarında kurulmuştur ve deneyler laboratuvar çatısında doğal koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deney çalışması, Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından finanse edilmiştir.

Birinci Fotovoltaik Termal Sistem Deneysel Analiz

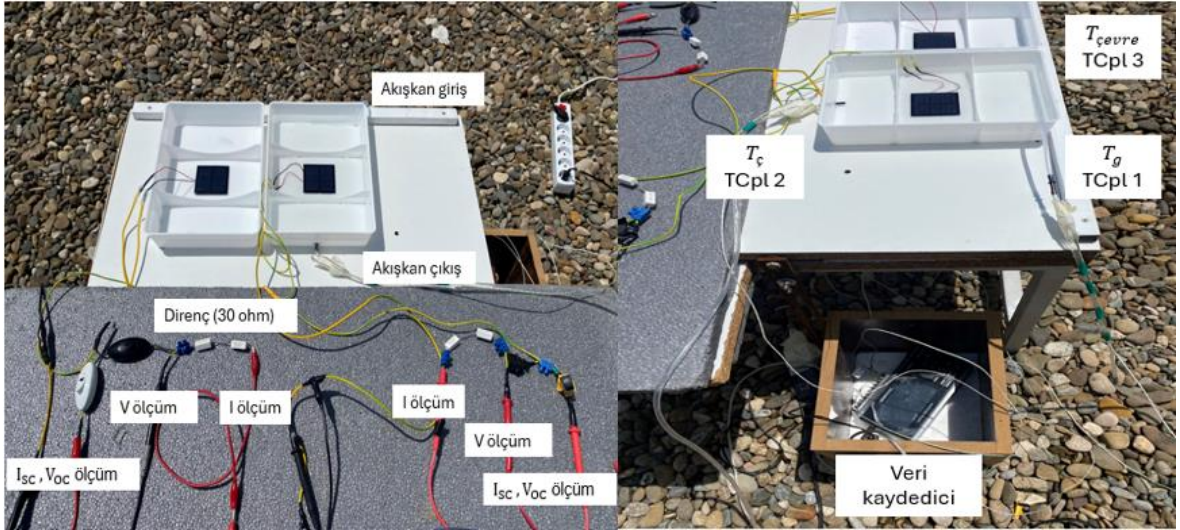
Fotovoltaik termal sistem, PV modülü teknolojilerinin enerji kullanılabilirliğini ve performansını araştırmak için inşa edildi. Şekil 4.1'de sistem şemasında gösterildiği gibi sistem kurulmuştur ve cihazlar hakkında daha detaylı bilgi kısım 4.2 de bulunabilir.



Şekil 4.1: Birinci fotovoltaik termal sistem şeması



Şekil 4.2: Birinci fotovoltaiik termal sistemin deneysel kurulumu



Şekil 4.3: Birinci fotovoltaiik termal sistem deneysel kurulumu

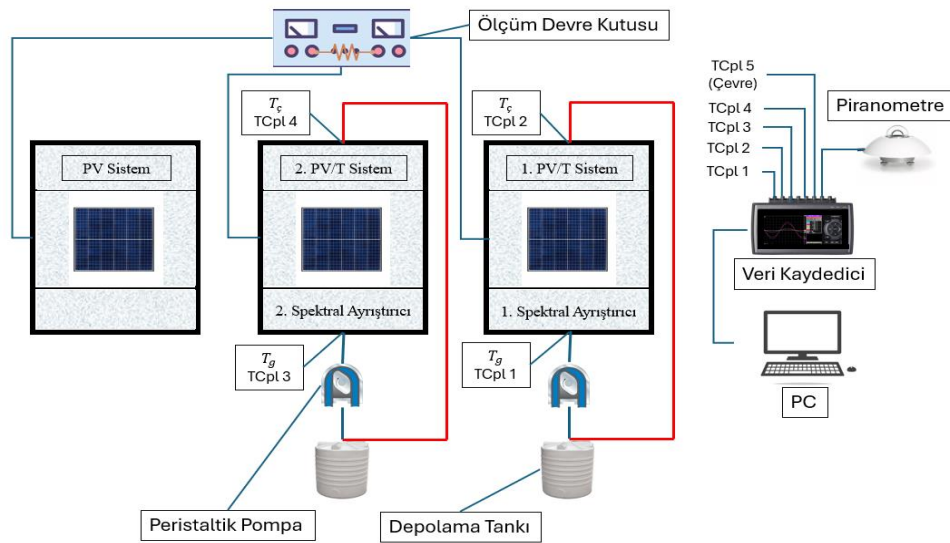
Birinci fotovoltaiik termal sistem aşağıdaki gibi altı ana ekipmandan oluşur; 2 adet fotovoltaiik hücre, peristaltik pompa, piranometre, multimetre, veri kaydedici, depolama tankı. Sistemde fotovoltaiik (PV) polikristalin silikon 0,6 W'lık hücreler kullanılmıştır. Bu hücrelerin birisi düz panel (PV) formunda, diğeri spektral ayrıştırıcı kanallı hücre yani fotovoltaiik termal sistem (PV/T) formundadır. Bundan sonra metin içerisinde düz panel için

(PV), spektral ayrıştırıcı kanallı fotovoltaik termal sistem için (PV/T) kısaltılmış ifadeler kullanılacaktır.

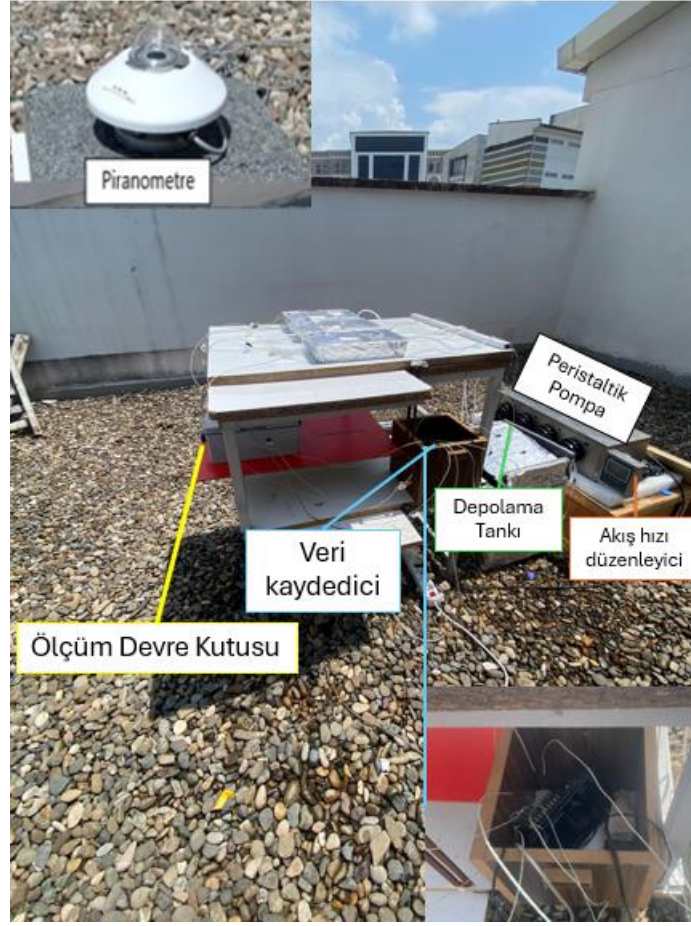
Yöntem olarak deney sisteminde, PV ve PV/T sistemin, akım (I), voltaj (V), kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre voltajı (V_{OC}) 4 özdeş multimetre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarından yararlanarak elektriksel güç ve verimleri, ek olarak PV/T sistemin termal verim değerleri hesaplanmıştır. PV/T sistem deneyi süresince spektral ayrıştırıcı debisi peristaltik pompa vasıtasıyla 100 ml/dk olarak ayarlanmış ve deney süresi boyunca sabit tutulmuştur. Deney 13 Haziran 2024 tarihinde, saat 11:30 ile 14:30 saatleri arasında her 5 dakikada bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. PV/T sistemindeki spektral ayrıştırıcı giriş, çıkış sıcaklıklarını ve sistem çevre sıcaklığı ölçmek için 3 adet termokupl kullanılmıştır. Deney süresince anlık güneş ışınım verisi piranometre ile alınmıştır. Deney sisteminde ölçülen ve alınan veriler veri kaydedici vasıtası ile yer bilgisayarına aktarılarak orada kaydedilmiştir.

İkinci Fotovoltaik Termal Sistem Deneysel Analiz

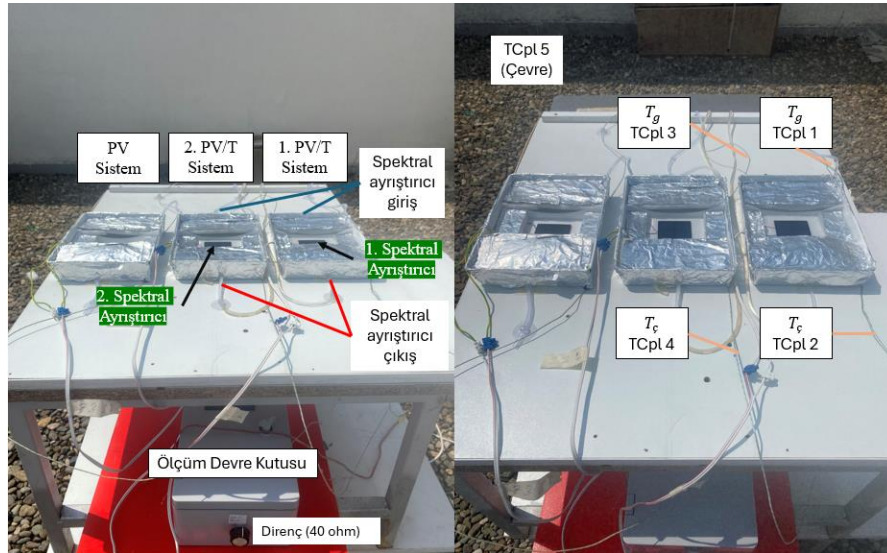
İkinci bölüm, deneysel sistem iyileştirmelerini içerir. Birinci deneysel analize ek olarak iki farklı spektral ayrıştırıcı performans incelemesine yer verilir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi sistem kurulmuştur.



Şekil 4.4: İkinci fotovoltaik termal sistem şeması



Şekil 4.5: İkinci fotovoltaik termal sistem deneysel kurulumu



Şekil 4.6: İkinci fotovoltaik termal sistem deneysel kurulumu

İkinci fotovoltaiik termal sistem, 3 adet fotovoltaiik hücre, peristaltik pompa piranometre, ölçüm devre kutusu, veri kaydedici, depolama tankından oluşur. Sistemde fotovoltaiik (PV) polikristalin silikon 0,6 W'lık hücreler kullanılmıştır. Bu hücrelerin birisi düz panel (PV) formunda, diğer ikisi spektral ayrıştırıcı kanallı hücre yani fotovoltaiik termal sistem (PV/T) formundadır.

Yöntem olarak deney sisteminde, PV'in ve PV/T sistemin, akım (I), voltaj (V), kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre voltajı (V_{OC}) ölçüm devre kutusu aracılığıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçlarından yararlanarak elektriksel güç ve verimleri, ek olarak her iki PV/T sistemin termal verim değerleri hesaplanmıştır. Sistemin termal verimi iyileştirmek ve sistemin hata performansını düşürmek için güneş radyasyonun temas yüzey alanı PV hücre yüzey alanına yakınsanarak dışarda kalan kısımlar yansıtıcı yüzeyler ile kapatılır. PV/T sistem deneyi süresince spektral ayrıştırıcı debisi peristaltik pompa vasıtasıyla 100 ml/dk olarak ayarlanmış ve deney süresi boyunca sabit tutulmuştur. Deney 10 Temmuz 2024 tarihinde, saat 11:30 ile 14:30 saatleri arasında her 40 saniyede bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Her iki PV/T sistemindeki spektral ayrıştırıcı giriş, çıkış sıcaklıklarını ve sistem çevre sıcaklığı ölçmek için 5 adet termokupl kullanılmıştır. Sistem termal performans iyileştirme kapsamında termokupllar hücreye en yakına konumlandırıldı. Deney süresince anlık güneş ışıınım verisi piranometre ile alınmıştır. Deney sisteminde ölçülen ve alınan veriler veri kaydedici vasıtası ile yer bilgisayarına aktarılarak orada kaydedilmiştir.

4.2 Deney Sistemi Cihaz Bilgisi

Fotovoltaiik Hücre

Deney düzeneğinde özdeş polikristalin fotovoltaiik hücreler kullanılmıştır.

Tablo 4.1: PV özellik tablosu

Güç (P_m)	0,6 W
Açık Devre Voltajı (I_{mp})	4,2 – 5,5 V
Kısa Devre Akımı (V_{OC})	0,10 – 0,14 A
Operasyon Sıcaklığı	$-40^{\circ} \leftrightarrow 85^{\circ}$

Peristaltik Pompa

Pompa, birden fazla spektral ayrıştırıcının, geniş debi aralığında sirküle edilmesine imkân tanır. Tablo 4.2’de özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 4.2: Peristaltik pompa özellik tablosu

Akış Hızı	0,053-3600 mL/dak
Hız Aralığı	0,1-600 rpm
Dağıtım Hacmi Aralığı	0,1-9999,99 ml
Dağıtım Süresi	0,5-9999,99 s

Multimetre

PV’nin ve PV/T sistemin, akım (I), voltaj (V), kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre voltajı (V_{OC}) 4 özdeş multimetre kullanılarak ölçülmüştür. Alınan verilen elektriksel güç ve verimlerin ayrıca termal verimin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Piranometre

Eğimli yüzeye gelen güneş radyasyonunun hesaplanması için gerekli olan güneş global radyasyon verisinin ölçülmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.7: Piranometre cihazı

Veri Kaydedici

Piranometre, termokupl cihazlarından gelen anlık güneş ışıyım, sıcaklık verilerinin kaydedilmesinde kullanılmıştır.

Ölçüm Devre Kutusu

1-3 adet arasında fotovoltaiik hücrenin, akım, gerilim değerlerinin otomatik olarak ölçülmesini sağlayan elektronik devre kutusudur. 0 – 100 ohm direnç değeri aralığında ölçüm yapılmasını sağlar.

Termokupl

Deney düzeneğinde, PV/T sistemde sirküle edilen spektral ayrıştırıcının giriş, çıkış sıcaklıklarının ve çevre sıcaklığının C° cinsinden ölçülmesinde kullanılmıştır. Sıcaklık verisi ayrıca termal verimin hesaplanmasını sağlar.

Depolama Tankı

Spektral ayrıştırıcı akışkanın sirküle edilmesinde hazne olarak faydalanılmıştır.

4.3 Spektral İş Akışkanlarının Belirlenmesi

Güneşten gelen radyasyon, optik filtre olarak kullanılabilen spektral ayrıştırıcı sıvılar vasıtasıyla, fotovoltaiik panelin çalışma aralığı dışında kalan ultraviyole ve kızılötesi aralık filtrelenebilir. Fotovoltaiik için yararlı olan görünür ışın ve kızılötesinin bir kısmı PV hücrelerine iletilebilir. Böylece bu yeni yapılandırma ile PV’de ısıya dönüştürülen kısım minimize edilir. Termal verimliliği artan PV’in ömrü uzayabilir. PV üzerinde sıcak bölgeler önlenir.

Spektral iş akışkanlarının belirlemede 2 aşama uygulandı. Fiziksel özelliklerine bakıldı ve optik özellikleri test edildi.

Fiziksel özelliklerde, bazı kriterler önemlidir. Bu kriterler, form, renk, donma noktası, kaynama noktası, parlama noktası, yoğunluktur, termal iletkenlik, özgül ısı, yaklaşık maliyet. Bu kriterlere dayanarak sıvılar belirlendi. Tablo-4.3’ de spektral ayrıştırıcı çeşitlerine ve fiziksel özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 4.3: Spektral ayrıştırıcı sıvılar ve fiziksel özellikleri

Adı	Form	Renk	Donma Noktası (°C)	Kaynama noktası (°C)	Parlama Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Termal İletkenlik (W/mK)	Özgül Isı (J/kgK)	Yaklaşık Maliyet (1 kg) (TL)
Mono Propilen Glikol	Sıvı	Renksiz	-20 °C	184 °C	104	1,03	0,25	2430	725
Saf Su	Sıvı	Renksiz	0	100	-	1	0,6	4180	15
Di Etilen Glikol	Sıvı	Renksiz	-6,5	244,9	138	1,118	0,35	2370	472
Mono Etilen Glikol	Sıvı	Renksiz	-	197,4	111	1,11	0,25	2450	450
Polietilen Glikol	Sıvı	Renksiz	-	-	138,6	1,116	0,20	2400	585

Optimum filtreleme için uygun sıvılar spektrofotometre cihazı kullanılarak test edildi. Spektrofotometre, bir maddenin ışığı absorbe etme veya geçirgenlik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir laboratuvar test cihazıdır. Belirlenen spektral ayrıştırıcı akışkanlar, test cihazının içindeki numune kabına sırasıyla eklendi. Referans olarak boş bir kuvars dikdörtgen prizma kullanıldı. Spektral ayrıştırıcı akışkanlara, UV, VIS veya IR ışık spektrumlarında elektromanyetik radyasyona maruz bırakıldı. Test koşulu, 200 nm – 2500 nm arasında uygulandı. Bu değer aralığında akışkanların geçirgenlik optik özellikleri test edildi.

5. PV- PV/T KARŞILAŞTIRMA VE AKIŞKANLARIN ETKİSİ

Bu bölümde araştırma tezi sonuçlandırılmaktadır. Bu çalışmanın amaç ve hedeflerinde kaydedilen ilerleme ve gerçekleştirilen kilometre taşları tartışılmaktadır. Fotovoltaik (PV) araştırma topluluklarına yapılan katkılar vurgulanmaktadır.

5.1 Araştırmanın Hedefleri

Bu araştırmanın temel amacı fotovoltaik sistemlerin verimliliğini arttırmak ve yaşam döngülerini iyileştirmektir. Bu çalışmada, fotovoltaik sistemlerde meydana gelen aşırı ısınmanın sebep olduğu elektrik dönüşüm verimliliğindeki azalma sorunu ele alınmıştır. Bu sorunun çözümü için 2 farklı deneysel model geliştirilmiştir. İlk deneysel model, PV ile PV/T sistem arasındaki karşılaştırılmalara yer verilirken termal verim elde ediliyor olması vurgulanmıştır. İkinci deneysel model, PV sistemler ile, PV/T sistemler karşılaştırılmasına yer verilirken, farklı iki spektral ayrıştırıcının performansı gözlenmiştir.

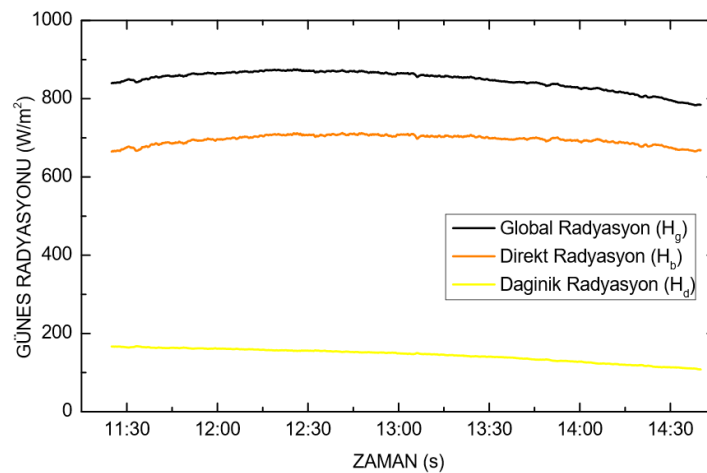
1. Işığı elektriğe dönüştürmenin fotovoltaik etkisini anlamak ve gözlemlemek
2. Işıktan elektriğe dönüşüm verimliliğinin özellikle termal yönlerle ilgili sınırlamalarını anlamak ve araştırmacıların bu sınırlamaları aşmak için yürüttüğü çabaları ele almak.
3. Dalga boyu temelli geliştirilen modeli doğrulamak için gerekli deney düzeneğinin tasarlanması ve oluşturulması
4. Fotovoltaik sistemin verimini arttırmak
5. Fotovoltaik sistemin ısınmadan kaynaklı verim düşüşlerini engellemek
6. Termal enerjiden faydalanmak
7. PV sistem yüksek sıcaklığa ulaşmadan soğutmayı sağlamak
8. Toz ve çevre kirliliğinin PV sistemi en az şekilde etkilemesini sağlamak

5.2 Analiz Sonuçları

İki farklı deneysel karşılaştırma ve spektral ayrıştırıcı iş akışkanlarının belirlendiğinden Bölüm 4'te bahsedilmişti. Bu bölümde birinci ve ikinci fotovoltaiik termal sistem deneysel analiz sonuçlarından bahsedilmektedir. Ek olarak, spektral iş akışkanların optik test sonuçları sunulmaktadır.

5.2.1 Birinci Fotovoltaiik Termal Sistem Deneysel Analiz Sonuçları

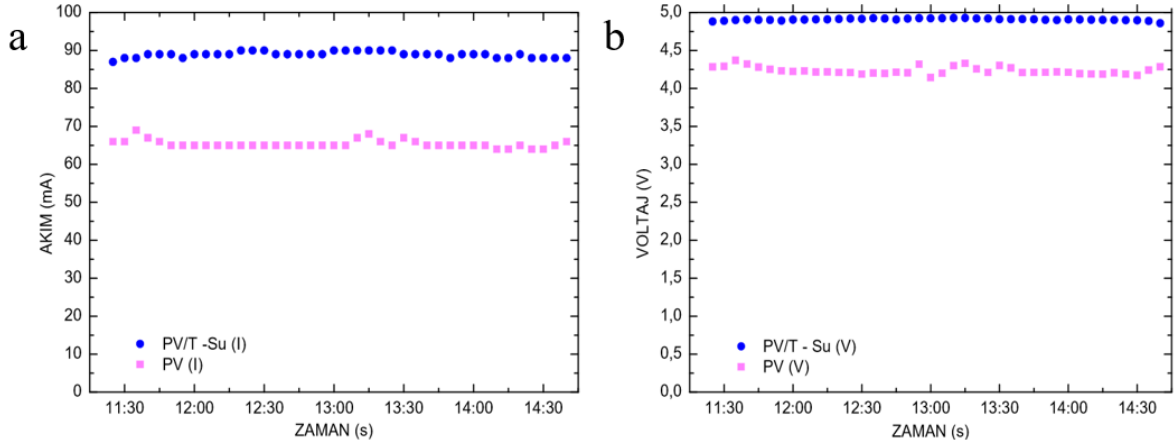
Zamana bağlı güneş radyasyonu değerleri deney süresi boyunca fotovoltaiik hücreler üzerine gelen güneş radyasyonunu hakkında bize bilgi verebilir. Bu bilgi sistemin tüm elektriksel ve termal hesapların oluşturulmasında, spektral performansları ile doğrudan ilişkili ve etkili olabilir. Şekil 5.1'e bakıldığında, 13 Haziran 2024 tarihinde gerçekleştirilen deneyin global, direkt ve dağınık gelen radyasyon değerleri grafiğı görülür. Deney süresi aralığında global radyasyon değerleri ortalama 780 W/m^2 ile 870 W/m^2 arasında seyretti. Metrekareye düşen global güneş radyasyonu saat; 12:20'de $873 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ile en yüksek değer kaydedilmiştir. Gökyüzü deney süresi boyunca açık ve güneşliydi. Bu yüzden, global, direkt, dağınık radyasyon eğrilerine beraber bakıldığında, eğrilerde dalgalanmalar düşük ve nispeten düzgündü.



Şekil 5.1: Zamana bağlı güneş radyasyonu

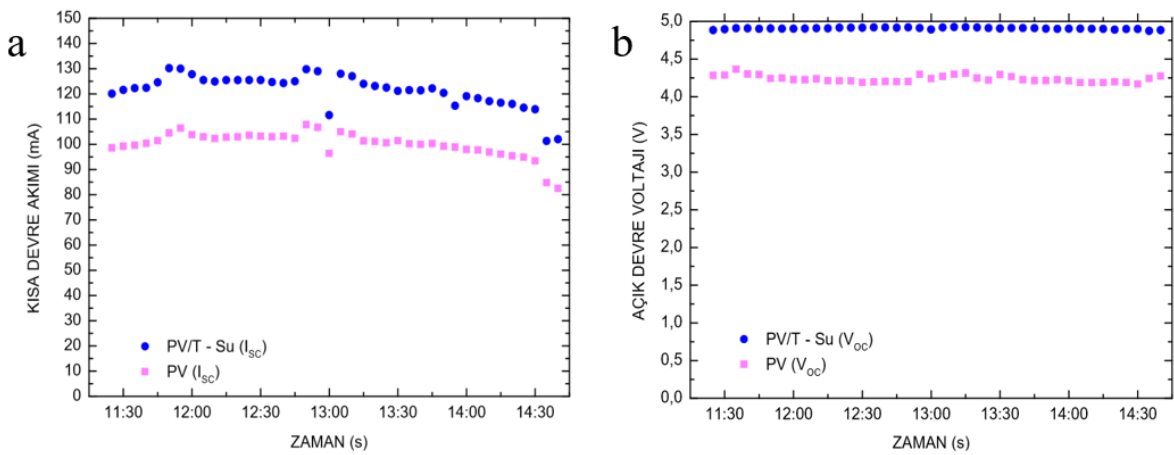
Şekil 5.2'de PV ve PV/T sistemlerin I ve V karşılaştırılması gösterilmiştir. PV durumunda mevcut değer ortalama $65,375 \text{ mA}$, PV/T durumunda akım, ortalama $88,925 \text{ mA}$, seviyelerindedir. PV ile karşılaştırıldığında PV/T akımında ortalama %36 değerinde bir artış

meydana gelmiştir. PV ve PV/T sistemlerinin ortalama voltajları sırasıyla yaklaşık 4,2 V ve 4,9 V elde edilmiştir. PV ve PV/T sistemindeki gerilimlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. PV/T durumunda ortalama voltaj, PV sistemine göre yaklaşık %15,8 daha yüksek olmuştur. Sıcaklığın, PV sisteminin performansını önemli ölçüde etkilediği çıkarımı yapılabilir. Spektral ayrıştırıcı olarak kullanılan PV/T Su sistemi I-V değerlerinde en yüksek değerlere sahiptir.



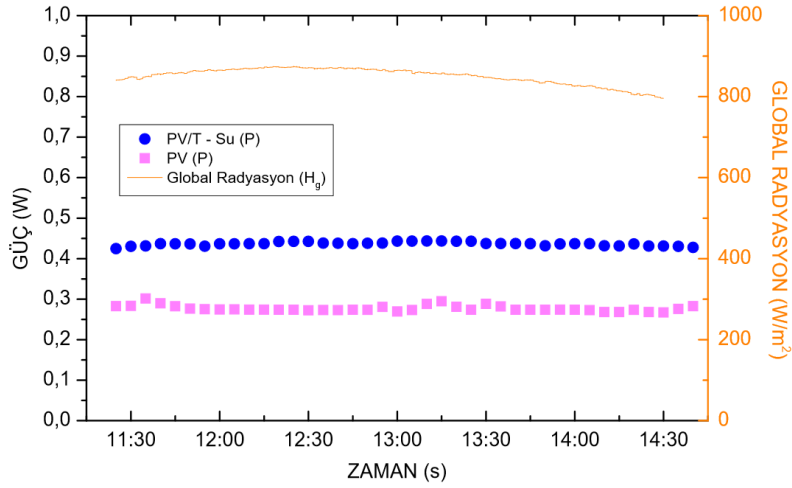
Şekil 5.2: Akım (a), voltaj (b) değerleri

Kısa devre akımı (I_{SC}) ve açık devre voltajı (V_{OC}) değerlerine Şekil 5.3 (a)'ya bakıldığında, PV/T sistemin I_{SC} ortalama 122 mA, PV sistemde bu değer 100 mA olmuştur. Şekil 5.2 (b)'de V_{OC} ortalama değerleri PV/T ve PV sistemi için sırasıyla, 4,9 V, 4,3 V olmuştur. PV/T sistem, her iki durumda da %21,5, %15 artış ile ön plana çıktığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.3: Kısa devre akımı (a), açık devre voltajı (b)

Akım ve voltajın yük altında ölçülmesi, yani güneş panelinin gerçek çalışma koşulları altında nasıl performans gösterdiğini anlamak için önemli olabilir. Güneş panelleri, çevresel koşullar etkisinde belirli bir yük altında çalışırken enerji üretirler. Bu nedenle, yük altında yapılan ölçümler, panelin günlük kullandığı performansını daha doğru bir şekilde yansıttığı düşünülür. Bu yüzden I-V güç grafiğine Şekil 5.4, hem de I_{SC} - V_{OC} güç grafiğine Şekil 5.5 yer verilmiştir.

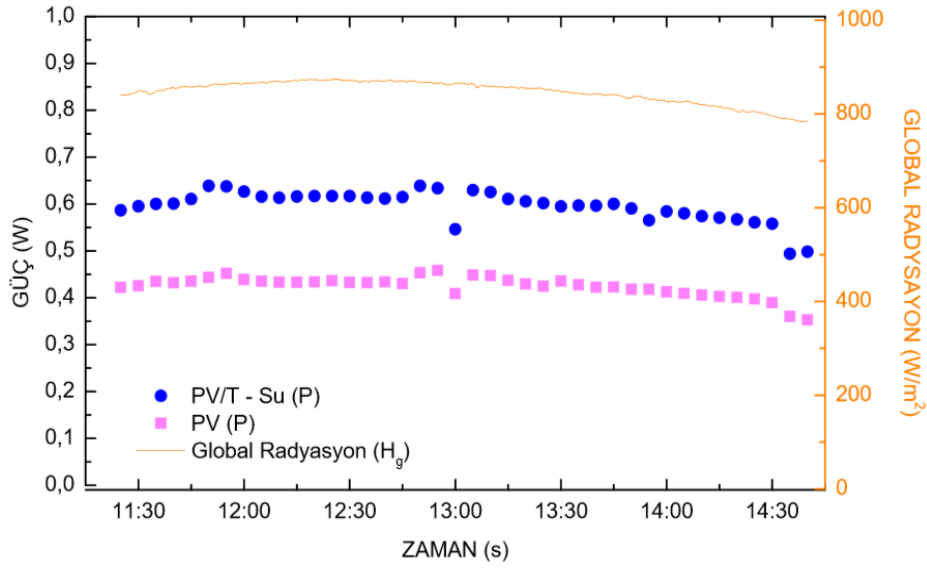


Şekil 5.4: I-V güç, global radyasyon

Şekil 5.4' de, PV ve PV/T sistemlerinde güç üretimi sırasıyla ortalama 0,28 W ve 0,44 W olmuştur. PV/T sisteminin güç üretimi, PV sistemine göre yaklaşık %58 daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Global radyasyon değerleri, ortalama 780 W/m² ile 870 W/m² arasında seyrettiğine değinilmişti. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'ten global radyasyonun zaman içerisindeki değişimi büyük dalgalanmalar göstermediği çıkarımı yapılabilir. Nispeten stabil bir eğri gözlemlendi. Radyasyonun bu şekilde stabil olması, güç üretimi analizlerinin daha doğru yapılmasını sağlayabilir çünkü ani değişimlerden etkilenme oranı düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

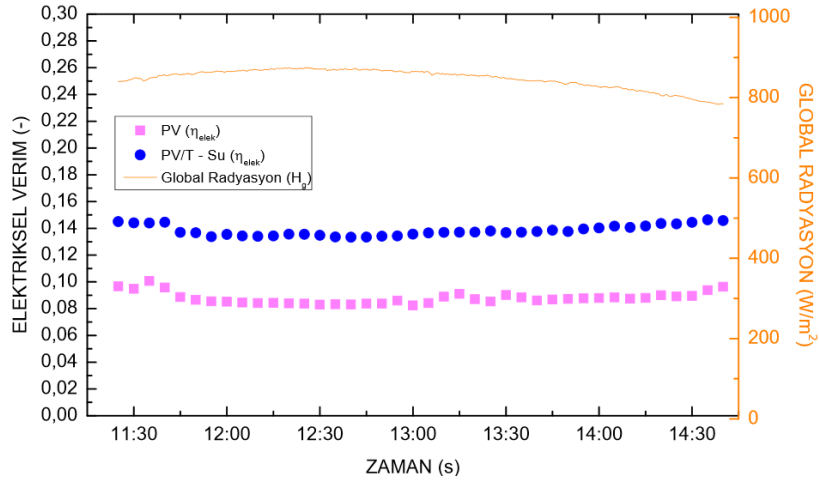
Şekil 5.5'te PV/T sisteminin güç üretimi, genel olarak 0,40 W ile 0,45 W arasında seyretti. Ortalama güç üretimi 0,43 W olarak elde edilmişti. Zamanla güç üretiminde küçük dalgalanmalar gözükülebilir, ancak genel trend düzgündü. PV sisteminin güç üretimi, ortalama 0,28 W olmuştur. Güç üretimi, PV/T sistemine göre daha düşük ve zamanla stabil bir seyir izlediği çıkarımı yapılabilir.



Şekil 5.5: I_{SC} - V_{OC} güç, global radyasyon

PV sisteminin, PV/T sistemine göre daha düşük güç üretimi, güneş radyasyonunun filtrelenmeden hücreye ulaşması ve panel sıcaklığının artmasına sebep olmasıyla açıklanabilir. PV/T sisteminin güç üretimi, PV sistemine göre belirgin şekilde daha yüksektir. Bu, PV/T sisteminin fotovoltaiik hücrelerin sıcaklığını düşük tuttuğunu göstermiştir. İki sistem arasındaki güç üretimi farkı, yaklaşık olarak 0,16 W olmuştur. PV/T sisteminin güç üretimi, PV sistemine göre daha tutarlı olduğu söylenebilir. Bu tutarlılık, spektral ayrıştırıcının sürekli etkisiyle açıklanabilir. PV/T sisteminin güç üretimi %58 oranında daha yüksek olarak elde edilmiştir. Hem PV hem de PV/T sistemlerinin güç üretimi, zamanla nispeten stabil kalıyor, büyük dalgalanmalar gözlenmedi. Radyasyon değerlerinin stabil kalması, güç üretimindeki dalgalanmaların minimize edilmesine yardımcı olabilir. 11:30-14:30 zaman aralığında, güç üretiminde belirgin bir düşüş veya artış gözlenmemiştir, bu da çevresel koşulların sabit olduğu anlamına gelebilir.

PV ve PV/T sistemin elektriksel verimleri Şekil 5.6'da yer verilmiştir. Deney süresi boyunca PV sistemin elektriksel verimi ortalama %8,78 iken, PV/T sistemde bu %13,84 olmuştur. PV/T sistem PV sisteme göre %57,55 daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi, PV/T sistemi, PV sistemine kıyasla daha yüksek akım (I) ve voltaj (V) değerlerine sahip olması olabilir.

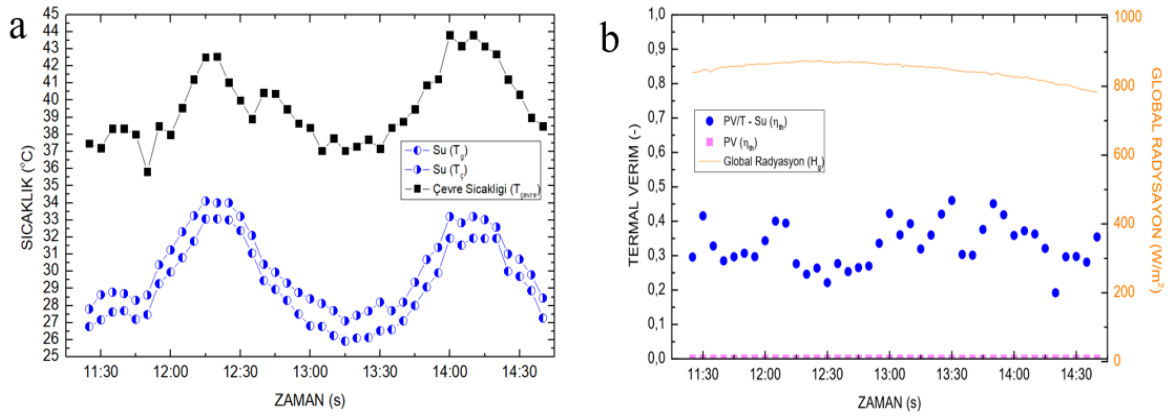


Şekil 5.6: PV ve PV/T sistemlerin elektriksel verimleri

Bu, daha yüksek bir elektriksel güç (P) üretimi anlamına gelebilir. Şekil 5.6'da elektriksel verim değerleri, PV/T sistemin daha yüksek gücünden dolayı daha yüksek olduğu çıkarımı yapılmıştır. Şekil 5.3'teki PV/T ile PV sistem arasındaki yüzde artış değeri, Şekil 5.5'te olduğu gibi yaklaşık %58 değerinde olmuştur. Sonuç olarak, PV/T-Su sistemi, daha yüksek akım ve voltaj değerleri (Şekil 5.2) ürettiği için daha yüksek güç (Şekil 5.4) ürettiği, bu durumda da daha yüksek elektriksel verim (Şekil 5.6) ile sonuçlandığı çıkarımı yapılabilir.

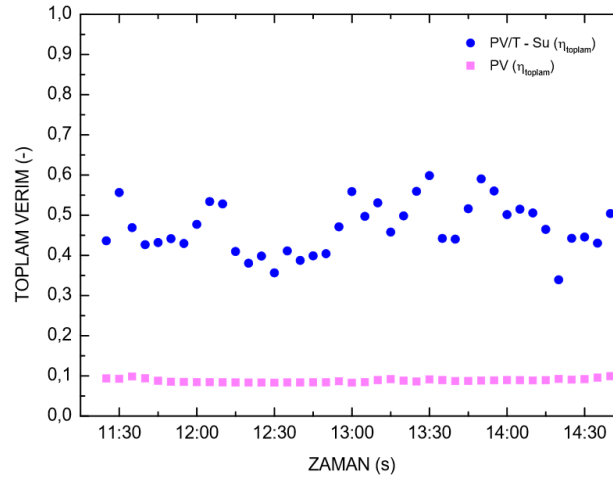
PV sistemlerinden farklı olarak PV/T sistemlerinde elektriksel verimine ek olarak termal verimde elde edildiğinden bahsedilmiştir. PV/T sistemdeki spektral ayrıştırıcı olarak kullanılan su hem elektriksel verimin iyileştirilmesinde hem de termal verimin elde edilmesine vasıta olabilir.

Deneysel modelde sistemin giriş, çıkış ve sıcaklık farklarının karşılaştırılması önemli olabilir; çünkü bize sistemin elde ettiği enerjinin farkını verebilir. Şekil 5.7 (a)'da çevre sıcaklığının spektral ayrıştırıcının giriş ve çıkış sıcaklık değerleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel modelin, ortalama çevre sıcaklığı 39,7 °C olmuştur. PV/T sistemin giriş, çıkış ortalama sıcaklığı 29,7 °C olarak kaydedilmiştir. Giriş ve çıkıştaki ortalama sıcaklık farkı ise 1,2 °C olmuştur. Spektral ayrıştırıcıdaki giriş ve çıkışındaki sıcaklık farkı ile termal verim değerleri arasında (Şekil 5.7 (b)) uygunluk olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.7: Spektral ayrıştırıcı giriş, çıkış sıcaklığı (a) ve PV/T termal verim (b)

Sıcaklık farkının $1,67\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile maksimum değerini aldığı saat 13:30'da (Şekil 5.7 (a)) , PV/T sistemin termal verimi (Şekil 5.7 (b)) %46 olarak kaydedilmişti. PV/T sistemin ortalama termal verimliliği deney süresi boyunca %33 olduğu sonucuna varılmıştır.



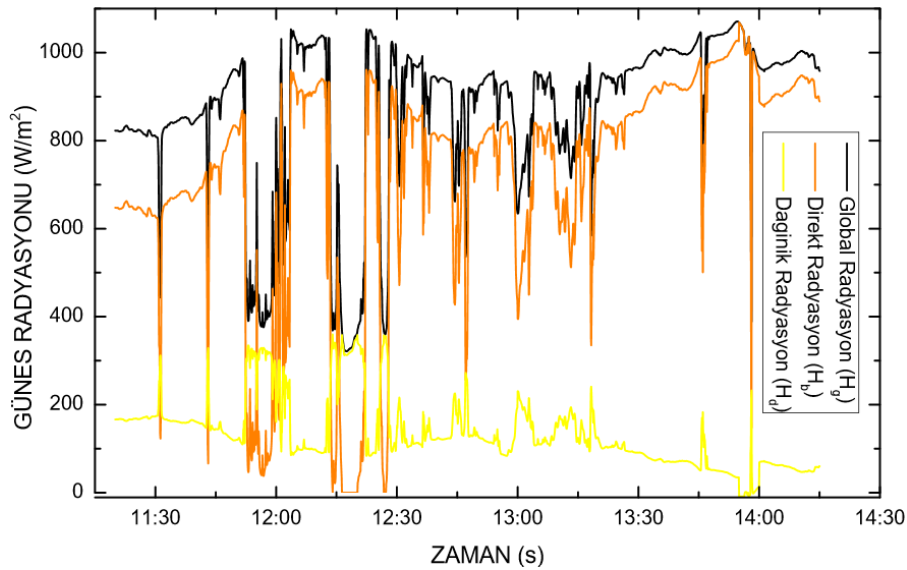
Şekil 5.8: PV ve PV/T sistemlerin toplam verimi

PV ve PV/T sistemlerin elektriksel ve termal verimleri (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7) toplanarak toplam verim (Şekil 5.8) elde edilebilir. PV/T sistem performansı toplam verimde de açık ara ön plana çıkmıştır. PV sistemin ortalama toplam verimi %8,8 iken, PV/T sistemde bu değer %46,95 olduğu görülmüştü. Bu nedenle, daha yüksek güneş radyasyonu için spektral ayrıştırıcının avantajı ortaya çıkabilir.

5.2.2 İkinci Fotovoltaik Termal Sistem Deneysel Analiz Sonuçları

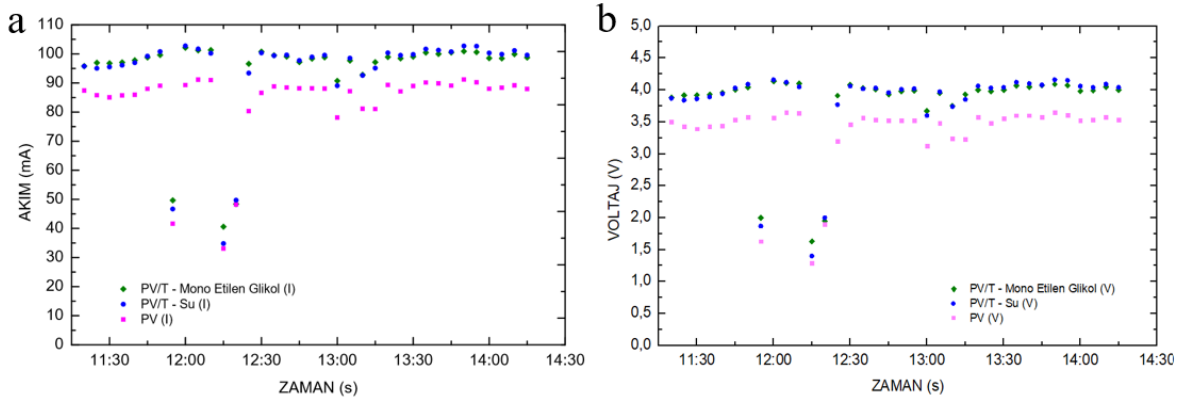
Bu bölümde, fotovoltaik sistem ile farklı iki spektral ayrıştırıcının bulunduğu fotovoltaik termal sistemin performans karşılaştırılması deneysel analiz sonuçları sunulmuştur. İki farklı spektral ayrıştırıcı olarak mono etilen glikol ve su kullanılmıştır. Her iki spektral ayrıştırıcı içinde PV/T model geliştirilmiştir. Mono etilen glikol için geliştirilen model yazının devamında PV/T- 1 olarak, saf su için geliştirilen model PV/T- 2 olarak yer verilecektir.

Zamana bağlı güneş radyasyonu değerleri Şekil 5.9’da gösterilmiştir. 10 Temmuz 2024 tarihli deneyde gökyüzü ara ara parçalı bulutlu seyretmişti. Bu yüzden güneş radyasyonu grafiğinde kısmi ani düşüşler görülebilir. Deney süresi aralığında, global radyasyon ortalama 871,21 (W/m²) olarak kaydedilmiştir. Genel bakış durumunda, parçalı bulutlu halin devamlı olmaması, metrekareye düşen global radyasyon ortalamasının uygun aralıkta oluşu, fotovoltaik termal sistem deneysel analiz sonuçlarındaki olumsuz etkiyi minimize edebilir.



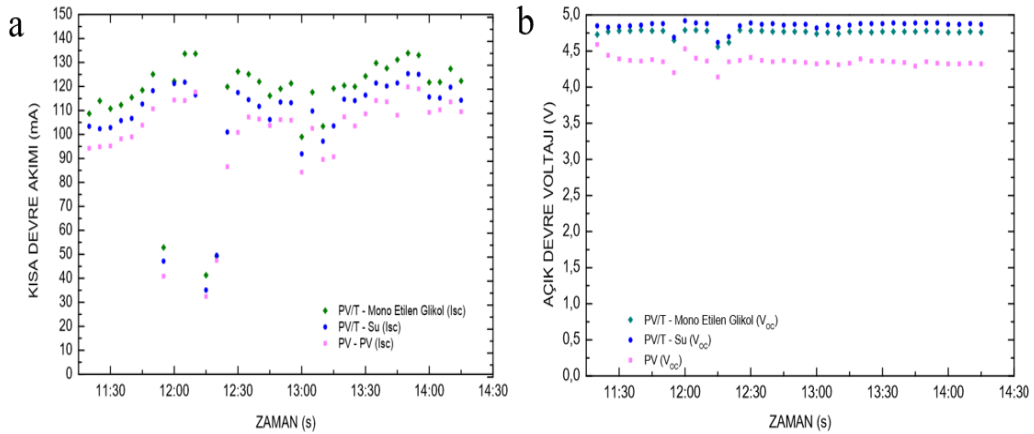
Şekil 5.9: Zamana bağlı güneş radyasyonu

Şekil 5.10’de PV ve iki farklı PV/T sistem modellerinin akım ve voltaj değerleri gösterilmiştir. PV durumunda mevcut değer ortalama 83,51 mA olurken, PV/T- 1 ve PV/T- 2 için akım sırasıyla, ortalama 94,14 mA, 94,15 mA seviyelerinde olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.10 (a)). PV ile PV/T- 1 ve PV/T- 2 sistemi karşılaştırıldığında akımın değerlerinde ortalama %12,7 değerinde bir artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.10: Akım (a) ve voltaj (b) değerleri

Şekil 5.10 (b)'ye bakıldığında, PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerinin ortalama voltajları sırasıyla 3,37 V, 3,81 V, 3,80 V idi. PV/T- 1 ve PV/T- 2 sistemindeki gerilimler birbirine oldukça yakın olduğu sonucuna varılmıştır. PV/T -1, PV/T- 2 ile PV sistem karşılaştırıldığında ortalama voltaj, PV sistemine göre yaklaşık %12,8 daha yüksek olmuştur. Sıcaklık, PV sisteminin performansını önemli ölçüde etkileyebilir. PV/T- 1,2 sistemleri I-V değerlerinde en yüksek değerlere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



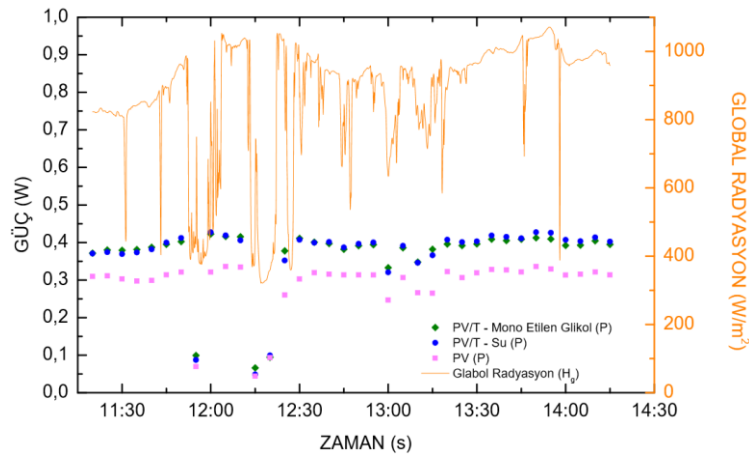
Şekil 5.11: Kısa devre akımı (a) ve açık devre voltajı (b)

Kısa devre akımı (I_{SC}) değerlerine Şekil 5.11 (a)'ya bakıldığında, PV/T- 1 sistemin I_{SC} ortalama 114,99 mA, PV/T- 2'de 106,83 mA, PV sistemde ise 100 mA olmuştur. PV/T- 1 modeli, PV/T -2'ye göre %7,6, PV'ye göre ise %14 artış göstermiştir. Açık devre voltajı (V_{OC}) (Şekil 5.10 (b)) ortalama değerlerinde, PV/T- 1, PV/T- 2 ve PV sistemi için sırasıyla,

4,76 V, 4,85 V ve 4,3 V olmuştur. PV/T- 2 sistemi, PV/T -1 ve PV V_{OC} değerleri karşılaştırıldığında sırası ile %2, %43,73 artış ile ön plana çıktığını sonucuna varılmıştır.

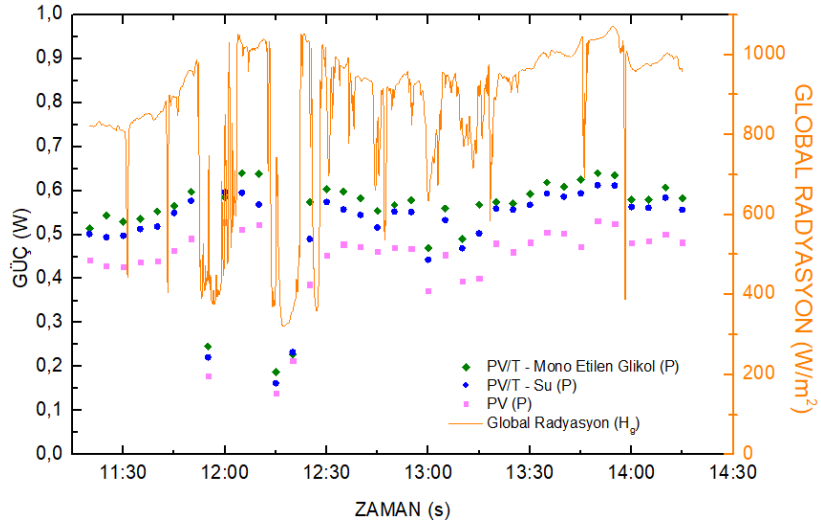
Şekil 5.12’ de I-V güç, global radyasyona yer verilir. Zamanla güç üretiminde küçük dalgalanmalar var, ancak genel çizgi düzgündü. PV, PV/T- 1, PV/T - 2 sistemlerinde güç üretimi sırasıyla ortalama 0,2898 W, 0,3675 W, 0,3688 W olmuştur. PV/T- 1, 2 sistemi güç performansında önde görülmüştü. Güç üretimi, PV sistemine göre yaklaşık %27 daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

PV sisteminin, PV/T- 1,2 sistemine göre daha düşük güç üretimi, güneş radyasyonunun filtrelenmeden hücreye ulaşması ve panel sıcaklığının artmasına sebep olmasıyla açıklanabilir (Şekil 5.12). Filtrelemede mono etilen glikol ile su yakın performans gösterdiği söylenebilir. PV/T- 1,2 sisteminin güç üretimi, PV sistemine göre belirgin şekilde daha yüksek olmuştur. Bu, PV/T- 1,2 sisteminin fotovoltaik hücrelerin sıcaklığını düşük tuttuğunu çıkarımı yapılabilir.



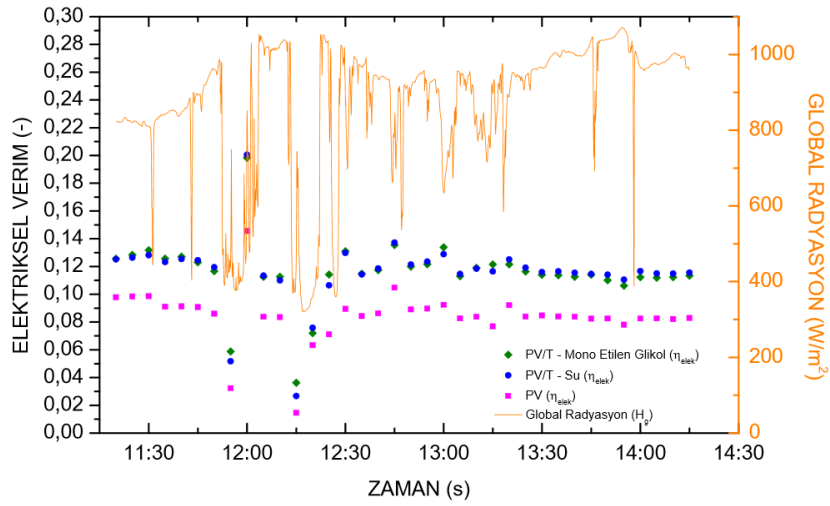
Şekil 5.12: I- V güç, global radyasyon

Kısa devre akımı ve açık devre voltajından elde edilen güç değerleri Şekil 5.13’te verilir. Değerlerin PV, PV/T- 1, PV/T - 2 için ortalamaları sırasıyla, 0,44 W, 0,52 W, 0,55 W olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.13: I_{SC} - V_{OC} güç, global radyasyon

PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerin elektriksel verimlerine Şekil 5.14'te yer verilmiştir. Deney süresi boyunca PV sistemin elektriksel verimi ortalama %9,14 olmuştu, PV/T- 1 sistemde bu %11,58, PV/T- 2 sistemde %11,59 sonuçları elde edilmişti. PV/T 1,2 sistemleri PV sisteme göre %27 daha verimli olmuştu. Bunun sebebi, PV/T- 1,2 sistemleri, PV sistemine kıyasla daha yüksek akım (I) ve voltaj (V) değerlerine sahip olması olabilir. Bu, daha yüksek bir elektriksel güç (P) üretimi anlamına gelebilir.

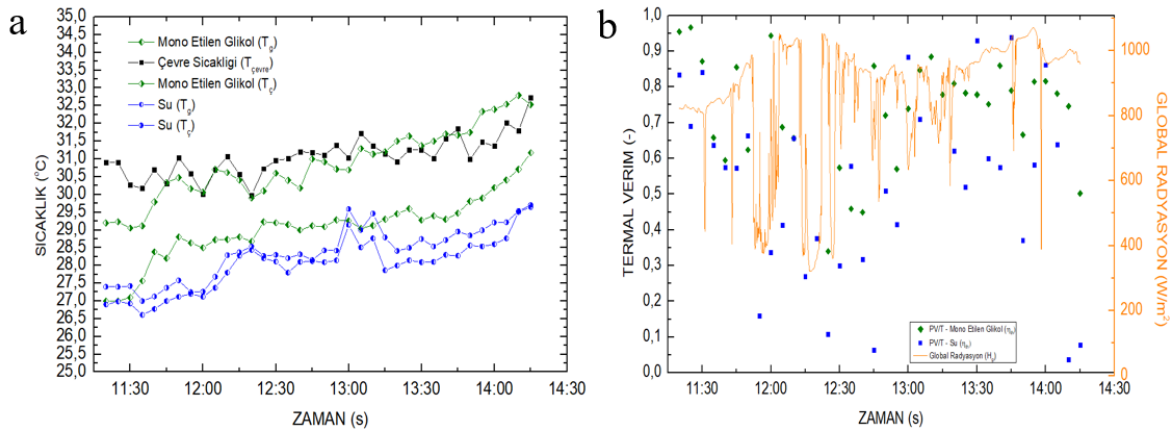


Şekil 5.14: PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerin elektriksel verimleri

Şekil 5.14'te elektriksel verim değerleri, PV/T- 1,2 sistemlerin daha yüksek gücünden dolayı daha yüksek olduğu söylenebilir. Şekil 5.12'deki PV/T- 1,2 sistemleri ile PV sistem arasındaki güç yüzde artış değeri, Şekil 5.14'teki değer ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, PV/T- 1,2 sistemleri, daha yüksek akım ve voltaj değerleri (Şekil 5.10) ürettiği için daha yüksek güç (Şekil 5.12) üretir çıkarımı yapılabilir. Bu da daha yüksek elektriksel verim (Şekil 5.14) ile sonuçlanabilir.

PV/T sistemlerinde elektriksel verimine ek olarak termal verimde elde edildiğinden bahsedilmişti. PV/T sistemdeki spektral ayrıştırıcı olarak kullanılan su hem elektriksel verimin iyileştirilmesinde hem de termal verimin elde edilmesine vasıta olabilir.

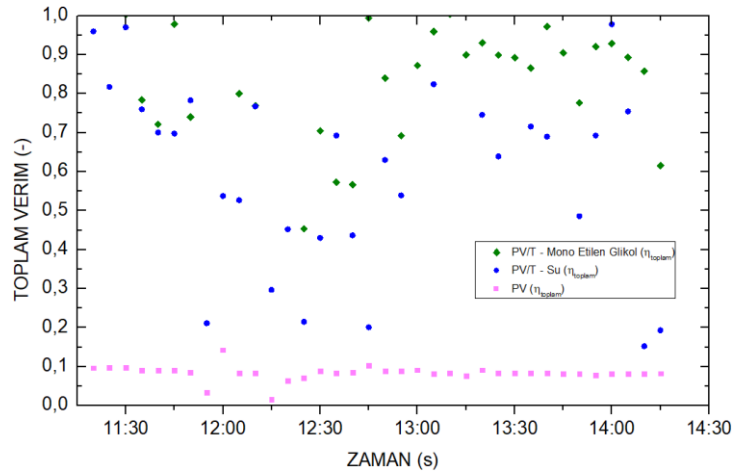


Şekil 5.15: Spektral ayrıştırıcılar giriş, çıkış sıcaklıkları (a) ve PV/T termal verim (b)

Deneysel modelde sistemin giriş, çıkış ve sıcaklık farklarının karşılaştırılması önemlidir; çünkü bize sistemin elde ettiği enerjinin farkını verebilir. Şekil 5.15 (a)'da çevre sıcaklığının spektral ayrıştırıcının giriş ve çıkış sıcaklık değerleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel modelin, ortalama çevre sıcaklığı 31 °C ölçülmüştü. PV/T- 1 sistemin giriş, çıkış ortalama sıcaklığı 29,95 °C olarak hesaplanmıştır. PV/T 1- 2 sisteminde bu değer 28,17 °C olmuştur. Spektral ayrıştırıcıdaki giriş ve çıkış ortalama sıcaklıkları ile termal verim (Şekil 5.15 (b)) doğrudan ilişkili olabilir. Ayrıca sıcaklık farkının arttığı noktalarda termal verimde yükselme gözlemlenebilir. Spektral ayrıştırıcıların termal verim performansında, vizkozite değerleri ile debi ilişkisi, hava durumu, rüzgâr gibi çevresel koşullar ve özellikler etkili olabilir. Şekil 5.15 (b)' de gösterildiği üzere değerlerde bu koşul ve durumlara bağlı olarak değişimler görülmüştür. Fakat bu değişimlerin sistem akışkanlarının termal verime etkisini

genel anlamda etkilemediği görülmektedir. Mono etilen glikol ve su spektral ayrıştırıcıların sistem termal performansları ortalama yaklaşık, %70 ile %60 olduğu sonucuna varılmıştır.

Mono etilen glikol ile su spektral ayrıştırıcının elektriksel verim performansında neredeyse fark olmadığı gözlenmişti bu durumun termal verimde mono etilen glikolün önde olduğu söylenebilir.



Şekil 5.16: PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerin toplam verimleri

Şekil 5.16'dan yola çıkarak PV, PV/T- 1, PV/T- 2 sistemlerin toplam ortalama yaklaşık verimleri sırası ile, %9,14, %81,59, %71,58 olmuştur. Toplam verimde, PV/T- 1 sistemi ile PV ve PV/T - 2 sistemleri karşılaştırılmış, PV sisteme göre yaklaşık %800, PV/T - 2' ye göre ise yaklaşık %14 artış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Spektral ayrıştırıcı performanslarına genel olarak bakıldığında spektral ayrıştırıcı olarak mono etilen glikolün daha performanslı olabileceği söylenebilir.

5.2.3 Spektral İş Akışkanları Optik Test Sonuçları

Optimum filtreleme için uygun sıvılar spektrofotometre cihazı kullanılarak test edilmiştir. Mono propilen glikol, saf su, dietilen glikol, mono etilen glikol, polietilen glikol gibi farklı sıvıların 200 nm ile 2500 nm arasındaki optik geçirgenliklerini göstermektedir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1: Spektrofotometre geçirgenlik değerleri test sonuçları

Dalga Boyu (nm)	Mono propilen glikol	Saf su	Dietilen glikol	Mono etilen glikol	Polietilen glikol	Formlar
200-380	76,20	87,50	29,89	63,87	60,72	UV
380-780	91,18	90,63	90,71	91,03	91,34	VIS
380-1100	88,44	85,55	88,38	87,63	89,95	
1100-2500	12,03	5,05	11,84	10,61	18,5	
780-2500	26,10	19,33	26,04	24,63	31,99	NIR

200 nm – 380 nm arası saf su en fazla optik iletkenliğe sahip olabilir. 380 nm’den sonra en iyi geçirgenliği polietilen glikol ve bunu kızılötesi radyasyon bölgesine kadar (780) mono propilen glikol izlediği sonucuna varılmıştır. Tüm spektral ayrıştırıcı akışkanların 1100 nm – 2500 nm arasında geçirgenliği keskin bir şekilde azalmıştır. Bu durum spektral ayrıştırıcıda olması istenen özellik olabilir. Çünkü, fotovoltaiik hücreler bu aralıkta dalga boyunu elektriğe dönüştüremez. Elektriğe dönüştürülemeyen kısım hücrelerin ısınması sebep olabilir. Isınan hücrelerin verimliliği azalabilir. Bölüm ikide bu hususa daha detaylı değinilmiştir. Optik performansta 1100-2500 (nm) aralığında 94,95% azalma ile saf su ön plana çıktığı sonucuna varılmıştır.

5.3 Katkıları

Bu araştırmada yürütölen çalışmanın aşağıdaki çıktılar sebebi ile PV araştırma topluluğu üzerinde bir etki yaratması beklenmektedir:

1. PV alışma dalga boyu aralığı referans alınarak, optimum spektral ayrıştırıcı, spektrofotometre ile test edildi ve atmosfer koşullarında test sonuçları doğrulandı.
3. PV ve PV/T sistemlerinin sıcaklığını, çıkış gücünü, IV karakterizasyon eğrisini ölçmek için kullanılabilecek deneysel model tasarlandı ve inşa edildi.
4. Fotovoltaiik uygulamalar için spektral ayrıştırıcı konsepti doğrulandı.
5. Güneş enerjisi sistemlerinden daha etkili bir şekilde faydalanılması sağlanacaktır.
6. Enerji maliyetleri azaltılacaktır.
7. Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması sağlanacaktır.

8. Bu tez çalışmasından konferans bildirisi yayınlanmıştır.

9. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP), kuruluşu tarafından desteklemeye uygun görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Mohamed, H. O., Obaid, M., Rezk, H., Chae, K. J. 2020. Nonprecious anodic catalysts for low-molecular-hydrocarbon fuel cells: Theoretical consideration and current progress. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77, 100805.
- Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Nakagawa, N. 2020. Significance of diffusion layers on the performance of liquid and vapor feed passive direct methanol fuel cells. *Energy*, 209, 118492.
- AEMET (La Agencia Estatal de Meteorología), (2016). <https://www.aemet.es/es/>
- Agreement, P. (2015). Paris agreement. In report of the conference of the parties to the United Nations framework convention on climate change (21. oturum, 2015: Paris). 4, 2015
- Alghoul, M. A., Sulaiman, M. Y., Azmi, B. Z., Wahab, M. abd. (2005). Review of materials for solar thermal collectors. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 52(4), 199-206.
- Andreani, L. C., Bozzola, A., Kowalczewski, P., Liscidini, M., ve Redorici, L. (2018). Silicon solar cells: toward the efficiency limits. *Advances in Physics: X*, 4(1).
- Assadi, M. K., Bakhoda, S., Saidur, R., ve Hanaei, H. (2018). Recent progress in perovskite solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2812-2822.
- Aste, N., Del Pero, C., ve Leonforte, F. (2014). Water flat plate PV–thermal collectors: A review. *Solar Energy*, 102, 98-115.

- Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 12-39.
- Brinkworth, B. J., Cross, B. M., Marshall, R. H., ve Yang, H. (1997). Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar energy*, 61(3), 169-178.
- Brough, D., Mezquita, A., Ferrer, S., Segarra, C., Chauhan, A., Almahmoud, S., ... Jouhara, H. (2020). An experimental study and computational validation of waste heat recovery from a lab scale ceramic kiln using a vertical multi-pass heat pipe heat exchanger. *Energy*, 208, 118325.
- Canka Kılıç, F. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40
- Castro, R., ve Silva, M. (2021). Experimental and Theoretical Validation of One Diode and Three Parameters–Based PV Models. *Energies*, 14(8), 2140.
- Chauhan, A., Tyagi, V. V., Anand, S. (2018). Futuristic approach for thermal management in solar PV/thermal systems with possible applications. *Energy Conversion and Management*, 163, 314-354.
- Chendo, M. A. C., ve Salawu, R. I. (1989). Design considerations of a total energy power system for a rural health centre in Nigeria. *Solar & wind technology*, 6(6), 747-754.
- Chow, T. T. (2003). Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 75(2), 143-152.
- Conceicao, R., Silva, H. G., Mirao, J., Gostein, M., Fialho, L., Narvarte, L., ve Collares-Pereira, M. (2018). Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal. *Solar Energy*, 160, 94-102.

- Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P., Louche, A. (2002). Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector. *Solar Energy*, 72(2), 99-112.
- Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, T. (2019). On Birinci Kalkınma Planı 2019-2023.
- De Amorim, W. S., Valduga, I. B., Ribeiro, J. M. P., Guazzelli Williamson, V., Krauser, G. E., Magtoto, M. K., de Andrade Guerra, J. B. S. O. 2018. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: An analysis of the interactions between food, water, and energy securit. *Environmental Impact Assessment Review*, 72, 1-11.
- DeJarnette, D., Brekke, N., Tunkara, E., Hari, P., Roberts, K., ve Otanicar, T. (2015). Design and feasibility of high temperature nanoparticle fluid filter in hybrid thermal/photovoltaic concentrating solar power. *High and Low Concentrator Systems for Solar Energy Applications X*, 9559, 81-89.
- DeJarnette, D., Otanicar, T., Brekke, N., Hari, P., Roberts, K., Saunders, A. E., ve Morad, R. (2014). Plasmonic nanoparticle based spectral fluid filters for concentrating PV/T collectors. *High and low concentrator systems for solar energy applications IX*, 9175, 35-47.
- Dos Santos, S. A. A., Torres, J. P. N., Fernandes, C. A., ve Lameirinhas, R. A. M. (2021). The impact of aging of solar cells on the performance of photovoltaic panels. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100082.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., ve Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.
- Duncan, C. H., Willson, R. C., Kendall, J. M., Harrison, R. G., ve Hickey, J. R. (1982). Latest rocket measurements of the solar constant. *Solar Energy*, 28(5), 385-387.

- Durão, B., Torres, J. P. N., Fernandes, C. A. F., Lameirinhas, R. A. M. (2020). Socio-economic study to improve the electrical sustainability of the north tower of Instituto Superior Tecnico. *Sustainability*, 12(5), 1-18.
- Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., ve Kirpichnikova, I. (2020). Advanced cooling techniques of PV modules: A state of art. *Case studies in thermal engineering*, 21, 100674.
- Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 748, 141528.
- Elsaid, K., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Baroutaji, A., Olabi, A. G. 2020. Environmental impact of desalination processes: Mitigation and control strategies. *Science of The Total Environment*, 740, 140125.
- Elsaid, K., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., Ramadan, M., Olabi, A. G. 2020. Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104099.
- Ettxebarria, I., Ajuria, J., ve Pacios, R. (2015). Solution-processable polymeric solar cells: A review on materials, strategies and cell architectures to overcome 10%. *Organic Electronics*, 19, 34-60.
- Fernandes, C. A., Torres, J. P. N., Branco, P. C., Fernandes, J., ve Gomes, J. (2017). Cell string layout in solar photovoltaic collectors. *Energy Conversion and Management*, 149, 997-1009.
- Furlan, C., Mortarino, C. (2018). Forecasting the impact of renewable energies in competition with non-renewable sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1879-1886.

- Gaitho, F. M., Ndiritu, F. G., Muriithi, P. M., Ngumbu, R. G., ve Ngareh, J. K. (2009). Effect of thermal conductivity on the efficiency of single crystal silicon solar cell coated with an anti-reflective thin film. *Solar Energy*, 83(8), 1290-1293.
- GEPA. (2006). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Global Status Report. <https://www.ren21.net/gsr-2020/>
- Hamdy, M. A., ve El-Hefnawi, S. H. (1990). Effect of spectrally selective liquid absorption-filters on silicon solar-cells. *Applied energy*, 35(3), 177-188.
- Han, X., Chen, X., Wang, Q., Alelyani, S. M., ve Qu, J. (2019). Investigation of CoSO₄-based Ag nanofluids as spectral beam splitters for hybrid PV/T applications. *Solar Energy*, 177, 387-394.
- Hasan, M. A., ve Sumathy, K. (2010). Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(7), 1845-1859.
- Hasnain, S. M., Alawaji, S. H., Elani, U. A. 1998. Solar energy education - a viable pathway for sustainable development. *Renewable Energy*, 14(1-4), 387-392.
- Hasnain, S. M., Elani, U. A., Al-Awaji, S. H., Aba-Oud, H. A., Smiai, M. S. (1995). Prospects and proposals for solar energy education programmes. *Applied Energy*, 52(2-3), 307-314.
- Hermann, A. M. (1998). Polycrystalline thin-film solar cells – A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 55(1-2), 75-81.
- Herrando, M., Markides, C. N., ve Hellgardt, K. (2014). A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. *Applied Energy*, 122, 288-309.

- Hickey, J. R., Alton, B. M., Griffin, F. J., Jacobowitz, H., Pellegrino, P., Maschhoff, R. H., ... ve Haar, T. V. (1982). Extraterrestrial solar irradiance variability two and one-half years of measurements from Nimbus 7. *Solar Energy*, 29(2), 125-127.
- Imenes, A. G., ve Mills, D. R. (2004). Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review. *Solar energy materials and solar cells*, 84(1-4), 19-69.
- Jiwanapurkar, P. R., Joshi, S. S., Professor, A. (2015). International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication A Review on Fluid Based Beam Splitters for Solar Photovoltaic/Thermal System. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(2), 040-042
- Joshi, S. S., Dhoble, A. S., ve Jiwanapurkar, P. R. (2016). Investigations of different liquid based spectrum beam splitters for combined solar photovoltaic thermal systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(2), 021003.
- Kaldellis, J. K., Kapsali, M., ve Kavadias, K. A. (2014). Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. *Renewable energy*, 66, 612-624.
- Kaluza, J., Funken, K. H., Groer, U., Neumann, A., ve Riffelmann, K. J. (1999). Properties of an optical fluid filter: theoretical evaluations and measurement results. *Le Journal de Physique IV*, 9(3), 655-660.
- Kannan, N., Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- Kosten, E. D., Atwater, J. H., Parsons, J., Polman, A., ve Atwater, H. A. (2013). Highly efficient GaAs solar cells by limiting light emission angle. *Light: Science ve Applications*, 2(1).

- Krauter, S., Araújo, R. G., Schroer, S., Hanitsch, R., Salhi, M. J., Triebel, C., ve Lemoine, R. (1999). Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation. *Solar Energy*, 67(4-6), 239-248.
- Lanzafame, R., Nachtmann, S., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Scandura, P. F., Taddei, S., ve Tina, G. M. (2009). Field experience with performances evaluation of a single-crystalline photovoltaic panel in an underwater environment. *IEEE transactions on industrial electronics*, 57(7), 2492-2498.
- Looser, R., Vivar, M., ve Everett, V. (2014). Spectral characterisation and long-term performance analysis of various commercial Heat Transfer Fluids (HTF) as Direct-Absorption Filters for CPV-T beam-splitting applications. *Applied energy*, 113, 1496-1511.
- Looser, R., Vivar, M., ve Everett, V. (2014). Spectral characterisation and long-term performance analysis of various commercial Heat Transfer Fluids (HTF) as Direct-Absorption Filters for CPV-T beam-splitting applications. *Applied energy*, 113, 1496-1511.
- Luo, W., Khoo, Y. S., Hacke, P., Naumann, V., Lausch, D., Harvey, S. P., ... ve Ramakrishna, S. (2017). Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review. *Energy & environmental science*, 10(1), 43-68.
- Maiti, S., Vyas, K., ve Ghosh, P. K. (2010). Performance of a silicon photovoltaic module under enhanced illumination and selective filtration of incoming radiation with simultaneous cooling. *Solar Energy*, 84(8), 1439-1444.
- Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., ve de Melo Cunha, J. P. (2022). A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. *Energies*, 15(5), 1823.
- Menke, S. M., Ran, N. A., Bazan, G. C., ve Friend, R. H. (2018). Understanding energy loss in organic solar cells: toward a new efficiency regime. *Joule*, 2(1), 25-35.

- Meteo-France, Fiche Climatologique Statistiques 1991–2020 et records.
https://donneespubliques.meteofrance.fr/FichesClim/FICHECLIM_30209002.pdf
- Miles, R. W., Hynes, K. M., ve Forbes, I. (2005). Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 51(1-3), 1-42.
- Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., ve El-Sherif, H. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 869-877.
- Mohiuddin, O., Obaidullah, M., ve Sabah, C. (2018). Improvement in dye sensitized solar cells from past to present. *Optical and Quantum Electronics*, 50(10), 377.
- Mojiri, A., Stanley, C., Taylor, R. A., Kalantar-Zadeh, K., ve Rosengarten, G. (2015). A spectrally splitting photovoltaic-thermal hybrid receiver utilising direct absorption and wave interference light filtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 139, 71-80.
- Moya, E. Z. (2012). Parabolic-trough concentrating solar power (CSP) systems. *Concentrating Solar Power Technology*, 197-239.
- Nashih, S. K., Fernandes, C. A., Torres, J. P. N., Gomes, J., ve Costa Branco, P. J. (2016). Validation of a simulation model for analysis of shading effects on photovoltaic panels. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(4), 044503.
- Olabi, A. G., Elsaid, K., Rabaia, M. K. H., Askalany, A. A., Abdelkareem, M. A. 2020. Waste heat-driven desalination systems: Perspective. *Energy*, 209, 118373.
- Osborn, D. E., Chendo, M. A. C., Hamdy, M. A., Luttmann, F., Jacobson, M. R., Macleod, H. A., ve Swenson, R. (1986). Spectral selectivity applied to hybrid concentration systems. *Solar Energy Materials*, 14(3-5), 299-325.

- Otanicar, T. P., Phelan, P. E., ve Golden, J. S. (2009). Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems. *Solar Energy*, 83(7), 969-977.
- Otanicar, T. P., Taylor, R. A., ve Telang, C. (2013). Photovoltaic/thermal system performance utilizing thin film and nanoparticle dispersion based optical filters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(3).
- Otanicar, T., Chowdhury, I., Phelan, P. E., ve Prasher, R. (2010). Parametric analysis of a coupled photovoltaic/thermal concentrating solar collector for electricity generation. *Journal of Applied Physics*, 108(11).
- Pietruschka, D., Fedrizzi, R., Orioli, F., Söll, R., Stauss, R. (2012). Demonstration of Three Large Scale Solar Process Heat Applications with Different Solar Thermal Collector Technologies. *Energy Procedia*, 30, 755-764.
- PVGIS, (t.y). Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi. Avrupa Komisyonu, AB Bilim Merkezi, Etkileşimli Araçlar, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR
- Qahtan, A., Rao, S. P., ve Keumala, N. (2014). The effectiveness of the sustainable flowing water film in improving the solar-optical properties of glazing in the tropics. *Energy and Buildings*, 77, 247-255.
- Radziemska, E. (2003). The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable energy*, 28(1), 1-12.
- Radziemska, E. (2003). Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(5), 407-424.
- Raimundo, R., Lameirinhas, R. A. M., Fernandes, C. A., ve Torres, J. P. N. (2021). Comparative Analysis of Organic and Inorganic Solar Cells. *2021 Telecoms Conference (ConfTELE)*, IEEE 2021, 11-12 Şubat 202, Leiria, Portugal

- Ramkiran, B., Sundarabalan, C. K., ve Sudhakar, K. (2020). Performance evaluation of solar PV module with filters in an outdoor environment. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100700.
- REN21(Renewable Energy Policy Network For The 21st Century), (2022). Solar Thermal Heating, Renewables 2023 Global Status Report. https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy_supply/02_market_developments/09_solarthermal/
- REN21(Renewable Energy Policy Network For The 21st Century), (2020). Renewables 2020
- Renewable Energy Agency, I. (2017). Turning To Renewables: Climate-Safe Energy Solutions. *International Renewable Energy Agency* (2017)
- Renewable Energy Agency, I. (2023). Renewable Energy Statistics. International Renewable Energy Agency (2023) <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>
- Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M., ve Scandura, P. F. (2010). Submerged photovoltaic solar panel: SP2. *Renewable Energy*, 35(8), 1862-1865.
- Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., ve Tina, G. M. (2011). TESPI: thermal electric solar panel integration. *Solar Energy*, 85(10), 2433-2442.
- Sabry, M., Gottschalg, R., Betts, T. R., Shaltout, M. A. M., Hassan, A. F., El-Nicklawy, M. M., ve Infield, D. G. (2002). Optical filtering of solar radiation to increase performance of concentrator systems. *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, s. 1588-1591, 19-24 Mayıs 2002, New Orleans, LA, USA
- Servizio Meteorologico, (2023). <https://www.meteoam.it/it/home>
- Shah, A. V., Platz, R., ve Keppner, H. (1995). Thin-film silicon solar cells: a review and selected trends. *Solar energy materials and solar cells*, 38(1-4), 501-520.

- Shaltout, M. M., El-Nicklawy, M. M., Hassan, A. F., Rahoma, U. A., ve Sabry, M. (2000). The temperature dependence of the spectral and efficiency behavior of Si solar cell under low concentrated solar radiation. *Renewable Energy*, 21(3-4), 445-458.
- Skoplaki, E., ve Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R., ve Zeman, M. (2016). Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. Bloomsbury Publishing.
- Sugathan, V., John, E., ve Sudhakar, K. (2015). Recent improvements in dye sensitized solar cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 54-64.
- Taylor, R. A., Otanicar, T. P., Herukerrupu, Y., Bremond, F., Rosengarten, G., Hawkes, E. R., ... ve Coulombe, S. (2013). Feasibility of nanofluid-based optical filters. *Applied optics*, 52(7), 1413-1422.
- Taylor, R. A., Otanicar, T., ve Rosengarten, G. (2012). Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems. *Light: Science & Applications*, 1(10), e34-e34.
- Teo, H. G., Lee, P. S., ve Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied energy*, 90(1), 309-315.
- The World Radiation Data Centre, World Meteorological Organization, (2024). <https://community.wmo.int/en/world-radiation-data-centre>
- Thekaekara, M. P., ve Drummond, A. J. (1971). Standard values for the solar constant and its spectral components. *Nature Physical Science*, 229(1), 6-9.

- Tonui, P., Oseni, S. O., Sharma, G., Yan, Q., ve Mola, G. T. (2018). Perovskites photovoltaic solar cells: An overview of current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1025-1044.
- Torres, J. P. N., Nashih, S. K., Fernandes, C. A., ve Leite, J. C. (2018). The effect of shading on photovoltaic solar panels. *Energy Systems*, 9, 195-208.
- Tunçel, B. (2019). Investigating the performances of photovoltaic modules/systems for Central Anatolia using a thermal modeling approach. Yüksek Lisans Tezi, Doğa ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Fizik, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Türkyılmaz, O., Aytaç, O., Bayrak, Y., (2023). Türkiye Enerji Görünümü Sunumu. *Tmmob Makina Mühendisleri Odası Enerji Çalışma Grubu*. (05.11.2023)
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383-1398.
- Wang, K., Herrando, M., Pantaleo, A. M., ve Markides, C. N. (2019). Technoeconomic assessments of hybrid photovoltaic-thermal vs. conventional solar-energy systems: Case studies in heat and power provision to sports centres. *Applied Energy*, 254, 113657.
- Wang, Y., Fang, Z., Zhu, L., Huang, Q., Zhang, Y., ve Zhang, Z. (2009). The performance of silicon solar cells operated in liquids. *Applied energy*, 86(7-8), 1037-1042.
- Willson, R. C., Gulkis, S., Janssen, M., Hudson, H. S., ve Chapman, G. (1981). Observations of solar irradiance variability. *Science*, 211(4483), 700-702.
- Zhao, J. (2004). Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82(1-2), 53-64.

