

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**SPEKTRAL IŞIN AYIRICILI YOĞUNLAŞTIRILMIŞ
FOTOVOLTAİK/ISIL HİBRİT KOLEKTÖR İLE HİDROJEN
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Cihangir KALE

Doktora Tezi

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yakıtlar ve Yakma Teknolojileri Bilim Dalı

TEMMUZ 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

SPEKTRAL IŞIN AYIRICILI YOĞUNLAŞTIRILMIŞ
FOTOVOLTAİK/ISIL HİBRİT KOLEKTÖR İLE HİDROJEN
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı
Cihangir KALE

Danışman
Prof. Dr. Hikmet ESEN

TEMMUZ 2023
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Spektral Işın Ayırıcılı Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik/Isıl Hibrit Kolektör ile Hidrojen Üretiminin Araştırılması
Yazarı:	Cihangir KALE
İlk Teslim Tarihi:	15.06.2023
Savunma Tarihi:	10.07.2023

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hikmet ESEN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Murat GÖKÇEK Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Filiz ÖZGEN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah KAPICIOĞLU Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Aydın DİKİCİ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Spektral Işın Ayırıcılı Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik/Isıl Hibrit Kolektör ile Hidrojen Üretiminin Araştırılması ” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

10.07.2023

Cihangir KALE



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince beni benden daha çok düşünüp kendine dert edinen, beni sadece öğrenciliğine değil kardeşliğine de layık gören, her türlü çalışmalarında bana tereddütsüz yardım eden, akademik bilgi ve yeterliliği ile yoluma ışık tutan Sayın Prof. Dr. Hikmet ESEN'e hürmetle sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamda ve günlük hayatta her daim yanımda olan hiçbir yardımını esirgemeyen başta Buğrahan İDARE'ye, Fatih ÜNAL'a, Habip ŞAHİN'e, Erman Çelik'e, tüm doktora programındaki arkadaşlarıma ve Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünün değerli akademisyenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Üzerimde büyük emekleri olan, tüm yaşantım ve eğitim hayatım boyunca bana destek olan, beni bugünlere getiren, evlatları olmaktan gurur duyduğum sevgili annem Şenel KALE, babam İbrahim KALE ve tüm aile fertlerine şükranlarımı sunuyorum.

Bu süreçte her zaman yanımda olan, bana olan desteklerini bir an dahi olsa esirgemeyen ve yaşadığım tüm zorlukları aşmamda bana yardımcı olan eşim Pelin KALE'ye, varlıklarından güç aldığım oğullarım Göktuğ KALE ve Kutay KALE'ye şükranlarımı sunarım.

Üzerimde büyük emekleri olan ve bu süreçte yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen eşimin ailesine de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda kullanılmak üzere donanım ve bilgi desteğini esirgemeyen Sayın Rafael Cervantes ve BSQ solar firması ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Tez araştırmalarımın başlamasından itibaren TÜBİTAK-BİDEB'in 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında, 2011-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programından yararlanmış bulunmaktayım. 2211-C Yurt İçi Öncelikli alanlar Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı birimine teşekkür ederim.

Cihangir KALE
ELAZIĞ, 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2. Literatür Taraması	4
1.3. Hedefler ve Literatüre Sağlanan Katkılar	7
1.4. Tezin Organizasyon Yapısı	8
2. HİDROJEN VE ÖZELLİKLERİ.....	9
2.1. Hidrojenin Kullanım Alanları.....	10
2.2. Hidrojen Üretim Kaynakları ve Metotları	11
2.2.1. Fosil Kaynaklardan Hidrojen Üretimi	12
2.2.2. Nükleer Enerji ve Atık Isıdan Hidrojen Üretimi	14
2.2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi	14
2.3. Elektrolizör ve Çeşitleri.....	20
2.3.1. Alkalın Elektrolizör	20
2.3.2. PEM Elektrolizör.....	21
2.3.3. Katı Oksit Elektrolizör	21
3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE TEKNOLOJİLERİ	23
3.1. Güneş Enerjisi Sistemleri	26
3.2. Güneş Hücresi	27
3.3. Güneş Hücresi Çeşitleri	31
3.3.1. I. Nesil Güneş Hücreleri.....	31
3.3.2. II. Nesil Güneş Hücreleri.....	33
3.3.3. III. Nesil Güneş Hücreleri	36
3.3.4. IV. Nesil Güneş Hücreleri	43
4. MATERYAL VE METOT	44
4.1. Optik Model.....	44
4.2. CPV Güneş Hücresi Model	51
4.2.1. Elektriksel Model	52
4.2.2. Isıl Model	56
4.3. Katı Oksit Elektrolizör (KOE) Model	61
4.3.1. Şarj Dengesi	62
4.3.2. Kütle ve Türlerin Korunumu.....	63
4.3.3. Momentumun Korunumu	64
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	66
5.1. Optik Model Sonuçları	66
5.2. CPV Güneş Hücresi Model Sonuçları	75

5.3. Elektrolizör Sonuçları.....	91
6. SONUÇLAR.....	95
ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR.....	98
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Spektral Işın Ayırıcılı Yoğunlaştırılmış Fotovoltaik/Isıl Hibrit Kolektör ile Hidrojen Üretiminin Araştırılması

Cihangir KALE

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2023, Sayfa: xvi + 105

Hidrojen yüksek enerji içeriğine sahip olması ve çevreye zararı olmayan bir element olması nedeniyle geleceğin sentetik yakıtı ve enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile elde edilebilen hidrojen düşük sistem verimlilikleri ve yüksek maliyetlerden dolayı genellikle fosil kaynaklardan elde edilmektedir. Temiz ve sürdürülebilir çevreye geçişin anahtarı, yenilenebilir enerji kaynaklarını yüksek verimliliklerde kullanmaktan geçmektedir.

Bu tez çalışmasında güneş enerjisinden yüksek verimliliklerde hidrojen üretimi için spektral ışın ayırıcılı yoğunlaştırılmış fotovoltaik/ısı (SBS-CPV/T) hibrit kolektör önerilerek yüksek sıcaklıklarda hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır.

765X yoğunlaştırma altında tasarlanan 3 eklemlili GaInP/GaInAs/Ge CPV güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektörün Elazığ ili iklim şartları altında ısı ve elektrik dönüşüm verimlilikleri sırası ile % 2,86 ve % 32,39 olarak bulunmuştur. Katı oksit elektrolizör ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmesi durumunda SBS-CPV/T hibrit kolektörün toplam hidrojen dönüşüm verimliliği % 33,3 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, geleneksel PV-elektrolizör sistemlerine kıyasla yaklaşık üç kat daha yüksek bir hidrojen dönüşüm verimliliği sağlandığını göstermektedir. Bu da Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektörün, hidrojen üretimi için umut vaat eden bir teknoloji olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Çok eklemlili güneş hücresi, Katı oksit elektrolizör, Spektral Işın ayırıcı, Cassegrain.

ABSTRACT

Investigation of Hydrogen Production by Using Concentrated Photovoltaic/Thermal Hybrid Collector with Spectral Beam Splitting

Cihangir KALE

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering

July 2023, Pages: xvi + 105

Hydrogen is considered the future synthetic fuel and energy carrier due to its high energy content and environmentally friendly nature. However, hydrogen production from renewable energy sources often suffers from low efficiencies and high costs, leading to its predominant production from fossil sources. The key to the transition to a clean and sustainable environment is to use renewable energy sources with high efficiency.

In this thesis, a concentrated photovoltaic/thermal (SBS-CPV/T) hybrid collector with spectral beam splitter was proposed to obtain hydrogen from solar energy at high efficiency, and the hydrogen production potential at high temperatures was investigated.

The collector, employing a triple-junction GaInP/GaInAs/Ge CPV solar cell designed for 765X concentration under a Cassegrain-type configuration, was evaluated under the climatic conditions of Elazığ province in terms of thermal and electrical conversion efficiencies, which were found to be 2.86% and 32.39%, respectively. In the case of hydrogen production with a solid oxide electrolyzer, the total hydrogen conversion efficiency of the SBS-CPV/T hybrid collector was calculated as 33.3%. These results indicate that the proposed Cassegrain-type SBS-CPV/T hybrid collector offers approximately three times higher efficiency compared to traditional PV-electrolyzer systems. This demonstrates the promising potential of the Cassegrain-type SBS-CPV/T hybrid collector for hydrogen production.

Keywords: Hydrogen, Multi-junction solar cell, Solid oxide electrolyzer, Spectral beam splitter, Cassegrain.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Kullanılan kaynak tipine ve üretim metotlarına göre hidrojen üretimi. 12
Şekil 2.2.	Hidrojenin elde edildiği kaynak tipine göre dağılımı. 12
Şekil 2.3.	Foto-elektrokimyasal hücre yapısı. 18
Şekil 2.4.	Elektroliz işlemi. 20
Şekil 2.5.	Sıcaklık değişimleri ile elektroliz işlemi için gerekli enerji durumu. 22
Şekil 3.1.	Elektromanyetik spektrum. 23
Şekil 3.2.	Güneş ışıınının dalga boyuna göre şiddeti. 24
Şekil 3.3.	Hava Kütlesi (AM). 25
Şekil 3.4.	ASTM G-173-03'e göre AM0-AM1.5G-AM1.5D referans güneş spektral ışıının değerleri... 26
Şekil 3.5.	Güneş enerjisi sistemleri ve enerji dönüşümleri. 27
Şekil 3.6.	Elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmesi. 28
Şekil 3.7.	Hücrede p ve n tipi katmanların a) birleşimi b) tükenme bölgesi oluşumu..... 28
Şekil 3.8.	Güneş hücresi akım gerilim (I-V) grafiği. 29
Şekil 3.9.	Güneş hücresi eşdeğer elektrik devresi. 30
Şekil 3.10.	Farklı sıcaklıklarda güneş hücresi I-V grafiği..... 30
Şekil 3.11.	Üretim teknolojilerine göre güneş hücreleri ve laboratuvar ortamındaki mevcut verimlilikleri. 31
Şekil 3.12.	Tek kristal güneş hücresi. 32
Şekil 3.13.	Üretilen çok kristal Si; a) külçe, b) wafer, c) güneş hücresi. 33
Şekil 3.14.	GaAs güneş hücresi. 33
Şekil 3.15.	Amorf silisyum hücre paneli..... 35
Şekil 3.16.	CIGS ince film güneş hücresi. 35
Şekil 3.17.	CdTe güneş hücresi..... 36
Şekil 3.18.	Boya duyarlı güneş hücresi şematik gösterimi..... 37
Şekil 3.19.	Organik güneş hücresi. 38
Şekil 3.20.	Kuantum kuyulu güneş hücresi şematik görüntüsü. 39
Şekil 3.21.	Çok eklemlı güneş hücresi a) şematik görüntüsü b) yapısı. 40
Şekil 3.22.	Güneş spektrum kullanımı a) silisyum güneş hücresi b) 3 eklemlı güneş hücresi. 40
Şekil 3.23.	Farklı yarıiletkenlerin enerji boşluk ve örgü uyumu değerleri..... 41
Şekil 3.24.	Örgü uyumlu 3 eklemlı güneş hücresi I-V karakteristiği..... 42
Şekil 3.25.	Çok eklemlı güneş hücresi yapısı a) örgü uyumlu b) dik metamorfik. 42

Şekil 4.1.	Gelen ışığın odaklanması a) kırılarak b) yansıtılarak.....	44
Şekil 4.2.	Farklı malzemelerin dalga boylarına göre yansıtma oranları.....	45
Şekil 4.3.	Farklı geometriler ve koniklik sabitleri.....	46
Şekil 4.4.	Farklı geometrilerde oluşan odak noktası ve küresel bozunma a) parabol lens b)küresel lens.....	46
Şekil 4.5.	Cassegrain tipi SBS-CPV/T güneş kolektörü.	48
Şekil 4.6.	Çalışmada kullanılmak için referans alınan CPV ve SOE.	49
Şekil 4.7.	Zemax Optik Studio non-sequential ara yüz görüntüsü.	49
Şekil 4.8.	Kullanılan VIS-NIR kaplamalı ve kaplamasız N-BK7 lensin geçirgenlik ve aynanın yansıtıcılık değerleri.	50
Şekil 4.9.	Güneş spektral a) ASTM G173-03 doğrudan ışıınım (DNI) referans değerleri b) Zemax kaynak spektrum ağırlıkları.....	51
Şekil 4.10.	CPV güneş hücresi modeli akış diyagramı.	52
Şekil 4.11.	Tek diyotlu 3 eklemlı güneş hücresinin elektriksel eşdeğer devresi.	53
Şekil 4.12.	CPV alıcıyı oluşturan bileşenler.	56
Şekil 4.13.	Elazığ ili 2019 yılına ait aylık ortalama dış ortam rüzgâr hızı.	59
Şekil 4.14.	Modelde belirlenen sınır şartları.	59
Şekil 4.15.	Modelde kullanılan kanatçıklı soğutucu elemanın teknik çizimi.	60
Şekil 4.16.	Katı oksit elektrolizör çalışma prensibi.	61
Şekil 4.17.	KOE katmanları ve izometrik görüntüsü.	65
Şekil 5.1.	Zemax programında tasarlanan birincil ayna görüntüsü a) Y-Z ekseninde b) izometrik.	67
Şekil 5.2.	Zemax programında tanımlanan aynanın dalga boylarına göre yansıtıcılık oranları.	68
Şekil 5.3.	İkincil optik eleman Zemax görüntüsü a) Y-Z ekseninde b) izometrik.	68
Şekil 5.4.	SBS lensin Zemax görüntüsü a) Y-Z ekseninde b) izometrik.....	69
Şekil 5.5.	Zemax programında oluşturulan SBS-CPV/T hibrit kolektörün 3 boyutlu görüntüsü.....	69
Şekil 5.6.	SBS-CPV/T hibrit kolektör için en uygun konumlandırma durumunda bileşen editörü ekran görüntüsü.	72
Şekil 5.7.	SBS-CPV/T hibrit kolektör en uygun konumda 20 ışın altında çalışma görüntüsü.	72
Şekil 5.8.	SBS-CPV/T hibrit kolektör kabul açısı.....	73
Şekil 5.9.	Optik sistemin çalışma görüntüsü ve ışıınım dağılımları a) hatasız b) 0.7 derece sapma açısında.	74
Şekil 5.10.	Detektör üzerindeki ışıınım dağılımları ve güçler a) SBS lens b) kaplamasız N-BK7 lens.....	74
Şekil 5.11.	EQE değerleri a) dijitalize edilen b) firma tarafından paylaşılan.....	76
Şekil 5.12.	1000W/m ² doğrudan ışıınım ve 1000X yoğunlaştırma altında alt hücrelerin fotoakım değerleri.	77

Şekil 5.13.	Tüm alt hücelere ait farklı yoğunlaştırma oranlarında I-V eğrileri a) 1X b) 250X c) 500X d) 1000X.	78
Şekil 5.14.	Toplam hücreye ait farklı yoğunlaştırma değerlerinde I-V ve güç eğrileri a) 1X b) 250X c) 500X d) 1000X.	78
Şekil 5.15.	Güneş hücresinin firma ve model değerlerinin karşılaştırılması a) I_{sc} b) I_{mpp} c) V_{oc} d) V_{mpp}	80
Şekil 5.16.	CPV güneş hücresi model ve firma verimlilik değerleri.	81
Şekil 5.17.	CPV güneş hücresi farklı sıcaklıklarda model verimlilikleri.	81
Şekil 5.18.	7x7 mm ² CPV güneş hücresi tüm alt hücre I-V eğrileri.	82
Şekil 5.19.	7x7 mm ² CPV güneş hücresi toplam I-V grafiği ve güç eğrileri.	82
Şekil 5.20.	SBS-CPV/T hibrit kolektör için Sankey diyagramı ile optik kayıplar ve ışıyım miktarları.	83
Şekil 5.21.	765X yoğunlaştırma ve 25 °C sıcaklık değerinde a) alt hücreler ait I-V eğrileri b) toplam hücre I-V ve güç eğrisi.	84
Şekil 5.22.	765X yoğunlaştırma ve 25 °C sıcaklık değerinde a) alt hücreler ait I-V eğrileri b) toplam hücre I-V ve güç eğrisi.	84
Şekil 5.23.	CPV/T hibrit kolektör için Sankey diyagramı ile optik kayıplar ve ışıyım miktarları.	85
Şekil 5.24.	Kaplamasız N-BK7 lens kullanımında alt hücreler ait I-V eğrileri ve toplam hücre I-V ve güç eğrisi a) hücre üzerine düşen ışıyım değerinde b) toplam sisteme gelen ışıyım değerinde.	86
Şekil 5.25.	VIS-NIR kaplamalı ve kaplamasız lens için Ge alt hücre akım uyumsuzluğu.	87
Şekil 5.26.	SBS-CPV/T hibrit kolektör alıcı kısmı sıcaklık dağılımı a) izometrik b) X-Z eksen.	88
Şekil 5.27.	CPV güneş hücresi a) yüzey sıcaklık dağılımı b) zamana bağlı sıcaklık değerleri.	89
Şekil 5.28.	CPV güneş hücresi a) alt hücre I-V eğrileri b) toplam hücre I-V ve güç eğrisi.	90
Şekil 5.29.	KOE 1 V-1,6 V arası için I-V eğrisi.	91
Şekil 5.30.	1,2 V potansiyel farkta KOE model için sonuçlar a) yoğunluk b) dinamik viskozite c) hız dağılımı.	92
Şekil 5.31.	KOE model 1,2 V gerilimde molar konsantrasyon a) H ₂ b) H ₂ O.	93
Şekil 5.32.	KOE modelin 1,2 gerilim değerinde katot kanal çıkışındaki H ₂ dağılımı.	94
Şekil 5.33.	KOE ve CPV I-V eğrileri.	94

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Hidrojenin özellikleri.....	10
Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan optik elemanlar ve özellikleri.....	50
Tablo 4.2. Modelde kullanılan bileşenlere ait termofiziksel ve boyutsal özellikler.....	58
Tablo 4.3. KOE modelde kullanılan geometrik ve fiziksel parametreler.....	65
Tablo 5.1. Tasarımda kullanılan parametre ve değerleri.....	67
Tablo 5.2. Farklı birincil ayna-alıcı mesafelerinde CPV detektör üzerine düşen ışınım durumları.....	71
Tablo 5.3. Modelde kullanılan bilinmeyen parametreler.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

O_2	: Oksijen
CO	: Karbonmonoksit
CO_2	: Karbondioksit
CH_4	: Metan
SO_3	: Kükürt trioksit
$NaOH$	: Sodyum hidroksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
ZrO_2	: Zirkonyum dioksit
Y_2O_3	: İtiryum oksit
H_2	: Hidrojen gazı
H_2O	: Su
R	: Gaz sabiti
P	: Basınç
T	: Mutlak sıcaklık
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
I_{sc}	: Kısa devre akımı
V_{mpp}	: Maksimum güç noktası gerilimi
I_{mpp}	: Maksimum güç noktası akımı
P_{mpp}	: Maksimum güç
V_{ohm}	: Direnç gerilimi
λ	: Dalga boyu
ρ	: Yoğunluk
u	: Hız
FF	: Doldurma faktörü
n	: İdealite faktörü
η_{opt}	: Optik verimlilik
h	: Planck sabit
e	: Elektron yükü
F	: Faraday sabiti
c	: Işık hızı
ϕ	: Foton akısı

t	: Zaman
A	: Alan
H	: Güç Yoğunluğu
η_{pv}	: Güneş hücresi verimliliği
G	: Güneş ışıınım değeri
R_e	: Asferik yüzey eğrilik yarıçapı
κ	: Koniklik sabiti
SR	: Spektral tepki
q	: Elektron yükü
A_c	: Güneş hücresi alanı
EQE	: Dış kuantum verimliliği
K_b	: Boltzmann sabiti
E_g	: Bant aralığı enerjisi
R_s	: Seri direnç
R_{sh}	: Şönt direnç
I_{ph}	: Fotoakım
q_{iletim}	: İletim ile ısı transferi
k	: Isıl iletkenlik katsayısı
$q_{taşınım}$	: Taşınım ile ısı transferi
h_t	: Taşınım ısı transfer katsayısı
h_{bt}	: Birleşik taşınım ısı transfer katsayısı
$q_{ışınım}$	: Işınım ile ısı transferi
ε_y	: Yüzeyin yayıcılık değeri
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti
WS	: Dış ortam rüzgâr hızı
ϕ_i	: İyonik potansiyel
ϕ_e	: Elektronik potansiyel
σ_c^{eff}	: Katot etkin elektronik iletkenlik
σ_a^{eff}	: Anot etkin elektronik iletkenlik

σ_i^{eff}	: Elektrolit etkin iyonik iletkenlik
A_v	: Hacimsel aktif yüzey alan
$i_{c,ct}$	: Katot yerel akım yoğunluğu
$i_{a,a}$	: Anot yerel akım yoğunluğu
η_c	: Katot aktivasyon kayıpları
η_a	: Anot aktivasyon kayıpları
$C_{H_2O,ref}$	: Su buharı referans konsantrasyonu
$C_{H_2,ref}$	: Hidrojen referans konsantrasyonu
$C_{O_2,ref}$	: Oksijen referans konsantrasyonu
α	: Şarj transfer katsayısı
ω_i	: Türlerin kütleli oranı
x_j	: Türlerin molar oranı
D_{ij}	: İkili difüzyon değeri
D_{ij}^{eff}	: Etkili difüzyon katsayısı
M	: Ortalama molekül ağırlığı
$D_{kn,i}$	: Knudsen difüzyon katsayısı
d_{pore}	: Boşluk çapı
ε	: Porozite değeri
ξ	: İyonik taşınım için volumetrik oran
K	: Geçirgenlik
μ	: Dinamik viskozite
I	: Momentum
N_{H_2}	: Saniyede üretilen hidrojen mol miktarı
I_e	: Elektrolizör akımı

Kısaltmalar

KOE	: Katı oksit elektrolizör
PEM	: Proton elektrolit membran
SBS	: Spektral ışın ayırıcı
PV	: Fotovoltaik
CPV	: Yoğunlaştırıcı fotovoltaik
SOE	: İkincil optik element
DNI	: Doğrudan güneş ışınım
UV	: Ultraviyole
DC	: Doğru akım
FEKH	: Foto-elektrokimyasal hücre
AM	: Hava kütlesi
CIGS	: Bakır indiyum galyum selenyum
CdTe	: Kadmiyum tellür
PECVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DSSC	: Boya duyarlı güneş hücresi
OGH	: Organik güneş hücresi
QD	: Kuantum nokta
CR	: Yoğunlaştırma oranı

1. GİRİŞ

Tüm sektörlerdeki enerji talebinin artışı, dünya nüfusunun büyümesi ve düşük maliyetli fosil kaynaklı yakıtların azalması nedeniyle, 21. yüzyılda dünyanın yüz yüze kaldığı en önemli problemlerden biri haline gelmektedir [1]. Dahası, benzin, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil esaslı yakıtlar, karbon salınımının yüksek olması sebebiyle çevreye ve insan sağlığına büyük zararlar vermektedir [2].

1500'lü yıllarda keşfedilen ve 1700'lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılan hidrojen, evrenin en basit ve çok bulunan elementi olup, renksiz, kokusuz, havadan 14,4 kez daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Hidrojenin üst ısı değeri 140 MJ/kg olup [3], ağırlıkça herhangi bir fosil yakıtı göre en yüksek enerji içeriğine sahip bir yakıttır. Ayrıca, hava ile yakıldığında sadece su ve az miktarda NO_x açığa çıkmasından dolayı çevreye olan zararı çok azdır [4]. Ancak hidrojen yerkürede bol bir element olsa da, hidrojen gaz olarak (H_2) tek başına doğada bulunmamaktadır. Sadece su (H_2O), metan (CH_4), kömür ve biyokütle gibi diğer elementlerle birlikte bileşik formda bulunur [5]. Bu yüzden hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıt ve bir enerji taşıyıcısıdır [6].

Günümüzde, hidrojen halen en ucuz olarak fosil yakıtlardan buhar reforming prosesi ile elde edilmektedir [7]. Ancak bu yöntem fosil kaynaklara olan bağımlılığını arttırmakla birlikte hava kirliliğine de sebep olmaktadır [8]. Hidrojenin en önemli özelliği rüzgâr, güneş, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da kolaylıkla üretilmesidir. Bu kaynakların hem sınırsız hem de sıfır emisyon salınımına sahip olmasından dolayı, hidrojeni üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak sürdürülebilir-temiz bir çevreye daha hızlı geçiş için büyük önem arz etmektedir [9]. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen kullanım yerinde de üretilmektedir. Hidrojenin istenilen yerde üretilbilir oluşu ve taşınmasına gerek kalmayışı, hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimini ve kullanımını cazip hale getirmektedir.

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan isima enerjisidir. Güneş, temiz ve tükenmez bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşten yayılan enerjinin çok az bir miktarı dünyaya ulaşmaktadır. Atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye ortalama 1367 W güç düşmektedir. Dünya yüzeyindeki güneş ışığı, yaklaşık 280 nm ile 4000 nm dalga boyu aralığında bir spektral dağılıma sahiptir. Birçok farklı uygulama alanında, güneş enerjisinden yararlanılmaktadır [10]. Fotovoltaik (PV), foto-termal ve fotokimya gibi güneş ışığının dönüştürülmesine yönelik teknolojiler derinlemesine araştırılmış ve son on yılda bu teknolojiler hızla gelişmiştir. Güneş enerjisinden hidrojen üretiminde en basit ve en çok uygulanan yöntem, PV güneş hücreleri ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ve bu üretilen elektrik enerjisi ile suyun bileşenlerine ayrıştırılarak hidrojenin üretilmesidir. Kristal

silisyum, ince film, boya duyarlı, organik, çok eklemli ve kuantum parçacık olmak üzere farklı PV güneş hücresi çeşitleri bulunmaktadır. Ticari olarak yaygın olarak kullanılan güneş hücresi kristal silisyum güneş hücreleridir. Silisyum bant aralığı enerjisi, 1,1 eV'dur ki bu değer 1127 nm dalga boyuna sahip bir fotonun enerjisine eşdeğerdir [11]. Bu da 1127 nm'den daha uzun dalga boylarına sahip fotonların yarı iletkeni iyonlaştıramadığı ve elektron çiftleri oluşturamadığı anlamına gelir ki bu da 1127 nm'den daha uzun dalga boyundaki foton enerjisinin tamamının PV güneş hücresi üzerinde ısıya dönüşmesine anlamına gelmektedir. Öte yandan, dalga boyları 1127 nm'den önemli ölçüde daha kısa olan fotonlar, elektron çiftleri oluşturma yanısıra hücre bağlantısında ısı enerjisi salan aşırı enerjiye sahiptir. Bu sebeple 700 ile 1100 nm aralığındaki dalga boylarına sahip fotonlar, bant aralığı enerjisine yakın bir enerji seviyesine sahiptir ve bu aralıkta, enerjilerinin esas olarak elektriğe dönüştürülerek daha yüksek dönüşüm verimliliği sağladığı alandır. Kısacası sadece 700-1100 nm arasında yüksek enerji dönüşümü sağlaması sebebi ile bu hücrelerin elektriksel verimlilikleri yaklaşık olarak % 16 ile % 20 arasındadır [10, 12]. Güneş ışığının büyük bir bölümü bu tip hücreler üzerinde ısı enerjisine dönüşmektedir. Ayrıca fotovoltaiik hücrelerinin sıcaklıkları arttıkça verimliliklerinin düştüğü bilinmektedir [13]. Bu hücrelerde oluşan aşırı atık ısının, güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için farklı alanlarda kullanıldığı Fotovoltaiik/Isıl (PV/T) hibrit teknolojiler geliştirilmiştir [14].

Gelişen teknoloji ile periyodik tablonun III ve V grubunda bulunan birden fazla yarı iletkenlerin birbirleri üzerine büyütülerek aktif olarak kullanıldığı çok eklemli veya III-V grubu olarak da adlandırılan PV güneş hücreleri geliştirilmiştir. Genellikle Galyum fosfat (GaP), Galyum arsenik (GaAs) ve Germanyum (Ge) gibi yarıiletkenlerin ve bunların İndiyum (In) ile farklı oranlarda katkılanmaları ile oluşturulan alaşımlarının kullanıldığı bu hücrelerde, güneş ışığı spektrumunun 350-1850 nm arasındaki daha geniş bir kısmı kullanılabildiğinden [15, 16] bu hücrelerin verimlilikleri, geleneksel kristal silisyum hücrelerin verimliliklerinin yaklaşık 2,5 katı olan % 30-46 değerine ulaşmaktadır [17]. III-V grubu hücreler, malzeme ve üretim teknoloji bakımından geleneksel güneş hücrelerine göre daha maliyetlidir. Ancak bu hücreler üzerine düşen güneş ışığının, optik malzemeler (Fresnel lens ve parabolik aynalar, lensler vb.) kullanılarak belirli bir seviyeye kadar yoğunlaştırılması ile elektriksel verimliliklerinde artış meydana gelmektedir [18]. Ayrıca bu optik malzemelerin kullanılması ile büyük alanlarda yüksek maliyetli III-V grubu hücre kullanılması önlenerek daha ekonomik sistemler geliştirilmiştir. Optik malzemeler kullanılarak güneş ışığının yoğunlaştırılarak PV hücrelerden elektrik üreten sistemler, yoğunlaştırıcı PV (CPV) sistemler olarak adlandırılmaktadır [19]. III-V grubu hücreler her ne kadar 350-1850 nm dalga boyu aralığında güneş ışığından faydalanabilse de, güneş ışığının 350 nm altında çok kısa dalga boyu aralığı olan ultraviyole (UV) ve 1850 nm dalga boyu üzeri kızılötesi (IR) kısmını elektrik enerjisine dönüştürememektedir bu da hücre üzerinde ısınmaya sebep olmaktadır [20]. Ayrıca yine bu hücrelerde alt tabakada kullanılan Ge hücrede oluşan aşırı akımda

elektrik enerjisi olarak kullanılamadığından hücrede aşırı ısınmaya sebep olmaktadır [21]. Yoğunlaştırmanın da etkisi ile hücre üzerinde oluşan bu ısı hem hücrenin elektriksel verimliliklerini düşürmekte hem de fazla ısı ile hücrenin zarar görmesine sebep olmaktadır [22]. Teknolojideki gelişmeler ile birlikte CPV sistemlerde kullanılan lenslerin yüzeyi için tasarlanan ince dielektrik katmanlar sayesinde istenilen dalga boyundaki ışınlar geçirilirken, istenmeyen dalga boyu aralığındaki ışınlar yansıtılabilmektedir. Bu spektral ışın ayırıcılı (SBS) lensler sayesinde PV hücre üzerine düşen ve elektrik enerjisine dönüşmeyen dalga boyu aralığındaki ışınlar güneş hücresi üzerine düşürülmeden engellenebilmekte ve hücre üzerinde oluşacak aşırı ısınmayı önleyebilmektedir. Ayrıca bu dalga boyu aralığındaki ışınlar başka alanlarda da ısı enerjisi olarak da kullanılabilmektedir. Bu tip sistemler, spektral ışın ayırıcılı yoğunlaştırılmış fotovoltaiik/ısı (SBS-CPV/T) hibrit sistemler olarak adlandırılmaktadır [23].

Suyun termokimyasal olarak ayrıştırılması, foto-katalitik, foto-elektroliz, biyo-fotoliz ve elektroliz olmak üzere farklı teknolojiler ile güneş enerjisinden hidrojen üretilebilmektedir. Bu teknolojiler arasında en pratik ve en çok kullanılan yöntem suyun elektrik enerjisi ile ayrıştırıldığı elektroliz yöntemidir. Suyun elektrolizi olgunlaşmış bir teknolojidir ve birkaç cm^3/dak ile binlerce m^3/saat arasında değişen hidrojen üretim kapasiteleri için kullanılmaktadır [24]. Elektroliz işlemi için elektrolizörler kullanılmaktadır. Polimer Elektrolit Membran (PEM), Alkalın ve Katı Oksit Elektrolizör (KOE) olmak üzere üç ana elektrolizör teknolojisi bulunmaktadır. PEM ve Alkalın elektrolizörler düşük çalışma sıcaklığı ($70-100\text{ }^\circ\text{C}$) ve gelişmiş teknolojileri ile endüstride sıkça kullanılmaktadır. Bu elektrolizörlerin elektrik enerjisinden hidrojen dönüşüm verimlilikleri % 56-70 arasında değişmektedir [25]. KOE nispeten daha yeni ve araştırma konusu olan yüksek sıcaklıklarda ($700-1000\text{ }^\circ\text{C}$) çalışan elektrolizördür. Elektrolitin iyonik iletkenliği ve elektrot yüzeylerindeki elektrokimyasal reaksiyonların oranı, yüksek sıcaklıkta artmaktadır [26]. Ayrıca, yüksek sıcaklık kinetik reaksiyonu hızlandırarak, elektrot polarizasyonuna bağlı enerji kaybını azaltmaktadır. Bu sebeple KOE, düşük sıcaklıkta çalışan PEM ve alkalın elektrolizörüne göre daha yüksek hidrojen dönüşüm verimliliğine sahiptir [27].

Güneş enerjisinden hem elektrik hem ısı enerjisi üreten SBS-CPVT hibrit sistem, KOE gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan elektrolizör için ısı ve elektrik kaynağı oluşturarak güneş enerjisinden yüksek verimlilikte hidrojen üretilmesine imkân sağlayabilecektir.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Enerjide dışa bağımlılığın azaltılması, enerji arz ve güvenliği, yenilenebilir enerjinin enerji üretimindeki payının artırılması hali hazırda ülkemizin stratejik hedefleri arasında bulunmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları doğası gereği aralıklı-kesintili enerji kaynaklarıdır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin, doğaya zarar vermeden depolanması, taşınabilmesi ve geri dönüştürebilmesi büyük önem taşımaktadır. Hidrojen

günümüzde geleceğin enerji taşıyıcısı olarak görülmektedir. Bu sebeple ülkemizin de hidrojen enerjisi üretimi, dağıtımı ve tüketimi hakkında son teknolojiye, bilgi ve birikime sahip olması gerekmektedir. Geleneksel silisyum kristal yapılı güneş hücreleri ve düşük sıcaklık elektrolizörler ile güneş enerjisinden hidrojen üretimi, birçok çalışmaya konu olmuş ve ticari olarak da yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üreten sistemler arasında yerini almıştır. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte farklı tip güneş hücreleri, elektrolizörler ve optik malzemeler geliştirilmiş ve farklı tasarımlar denenmeye çalışılarak güneş enerjisinden hidrojen üretim potansiyelleri araştırılmaya çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında 3. Nesil III-V grubu güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit güneş kolektörü sisteminin, KOE vasıtası ile hidrojen üretim potansiyelinin detaylı olarak araştırılması amaçlanmaktadır.

1.2. Literatür Taraması

Güneş enerjisinden hidrojen üretim sistemleri son yıllarda önemli araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde birçok kolektör, yöntem, teknoloji ve tasarım parametresinin incelendiği görülmektedir. Bunların başlıcaları PV, PV/T, CPV, CPV/T ve son zamanlarda yaygınlaşan SBS teknolojilerinin de yer aldığı ve bu tezin konusunu da oluşturan SBS-CPV/T hibrit kolektörler ile farklı tip güneş hücreleri kullanılarak elektroliz, termokimyasal ayrıştırma vb. yöntemler ile hidrojen üretiminin araştırılmasıdır. Güneş enerjisinden farklı tip kolektör, PV hücre ve yöntemler ile hidrojen üretimini araştırmak için gerçekleştirilen çalışmaların bazıları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

➤ PV-Elektrolizör

Bilgen [28] PV panel kullanarak elektroliz yöntemi ile hidrojen üretimin performansını incelemek için MATLAB® programı kullanarak matematiksel model geliştirmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin sonuçlarına göre güneş takip PV paneller ile hidrojen üretim verimliliğini % 10,85 bulurken sabit PV panel ile hidrojen üretim sisteminin verimliliğini %10,33 olarak hesaplamıştır.

Gu ve diğ. [29] MATLAB® programındaki simulink platformu kullanılarak, geleneksel kristal yapılı silikon tabanlı PV güneş hücresi, batarya, doğru akım (DC) dönüştürücü ve PEM elektrolizörleri modelleyerek sistemin hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada sistemin tüm gün boyunca sabit bir şekilde hidrojen üretimi gerçekleştirilmesi üzerine oluşturulan enerji yönetim stratejisinde, güneş hücresinden elektrik enerjisi dönüşüm verimliliği % 14,2 hesaplanırken, güneş enerjisinden hidrojen dönüşüm verimliliğinin % 9,1 olduğu sonucuna varmışlardır.

➤ PV/T-Elektrolizör

Wang ve diğ. [30] 3 eklemlı GaInP/GaInAs/Ge güneş hücrelerinin kullanıldığı PV/T hibrit kolektör tasarlayarak bu sistemin PEM elektrolizör kullanıldığında hidrojen üretim potansiyelini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada akışkan olarak su kullanılmış olup 1X, 2X ve 3X yoğunlaştırma oranı ve farklı akış hızlarında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada 1000 W/m² direkt ışınım altında 10 sccm/dak akış hızında ve 2X yoğunlaştırma oranında, güneş hücresi verimliliğinin % 0,53 arttığı ve PEM elektrolizör için gerekli olan enerjinin % 4,2 oranında azaldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmada güneş enerjisinde hidrojen dönüşüm verimliliğinin % 17,29 olduğu sonucuna varmışlardır.

Amori ve diğ. [31] geleneksel silisyum tabanlı güneş hücrelerinin kullanıldığı PV/T hibrit kolektör tasarlamış ve alkalın elektrolizör ile hidrojen üretim potansiyelini deneysel olarak araştırmışlardır. PV paneli soğutmak için kullanılan suyun alkalın elektrolizörde hidrojen ve oksijene ayrışması ile oluşan sistemde 40, 45, 50, 55 ve 60 °C’de farklı sıcaklıklarda elektrolizör ile hidrojen üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada PV panel sıcaklığının % 29,45 azaltıldığını ve gücünün %15.40 arttırıldığı sonucuna ulaşılırken, elektrolizöre gönderilen su sıcaklığının 40 °C’den 60 °C’ye çıkartılması ile 1000 ml hidrojen üretimi için gerekli zamanın % 13,8 olarak azaltıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmada PV/T hibrit kolektör ve alkalın elektrolizör kullanılan sistemin güneş enerjisinden hidrojen dönüşüm verimliliğinin % 20,3 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

➤ CPV-Elektrolizör

Burhan ve diğ. [32] CPV sistemi ile Singapur’un tropikal iklimde elektrolizör ile hidrojen üretiminin deneysel olarak uzun dönem analizini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarına göre CPV sistem ile uzun dönem hidrojen üretim sisteminin verimliliği % 15,5 olarak bulunmuştur.

Peharz ve diğ. [33] Almanya’da dış ortam şartlarında frensel lens ile yoğunlaştırmanın sağlandığı CPV kolektör ile PEM elektrolizör vasıtasıyla hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada güneş hücresi olarak III-V grubu GaInP ve GaInAs iki eklemlı PV güneş hücresi kullanılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada 1,6 V değerinde güneş hücresinin elektriksel dönüşüm verimliliği % 19,5 olarak hesaplanırken, tüm sisteminin hidrojen dönüşüm verimliliği % 18,1 olarak bulunmuştur. Ayrıca çalışmada farklı oranlarda In katkılanan hücreler kullanılması durumunda hidrojen dönüşüm verimliliğın % 20 den daha fazla olabileceğı ifade edilmiştir.

Burhan ve diğ. [34] GaInP/GaInAs/Ge 3 eklemlı güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi CPV hibrit kolektör tasarlamış ve PEM elektrolizör kullanılarak bu sistemin hidrojen üretim

potansiyelini deneysel olarak araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada uzun dönem CPV sistemin hidrojen dönüşüm verimliliğini % 15 olarak hesaplamışlardır.

Khan ve diğ. [35] tarafından yapılan çalışmada güneş simülatörü altında farklı yoğunlaştırma değerlerinde GaInP/GaInAs/Ge tabanlı 3 eklemlili güneş hücresinin kullanıldığı CPV kolektör ile alkalini elektrolizörün arada dönüştürücü olmadan bağlanabilmesi için optimizasyon gerçekleştirilmiş ve bu sistemin hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyonda 2 adet güneş hücresi ve 3 adet alkalini elektrolizör hücresinin en uygun sonucu verdiği görülmüş olup, 41X yoğunlaştırma değerinde bu sistemin güneş enerjisinden hidrojen dönüşüm verimliliğinin % 28 olduğu sonucuna varılmıştır.

➤ CPV/T-Elektrolizör

Burhan ve diğ. [36] yaptıkları çalışmada CPV/T hibrit sistem için FORTRAN yazılımı kullanarak elektroliz ile hidrojen üretiminin performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1000 yoğunlaştırma oranında CPVT hibrit sistemin verimliliği % 71 olarak bulunurken güneş enerjisinden hidrojen üretim verimliliği % 18 olarak hesaplanmıştır.

Burhan ve diğ. [37] III-V grubu 3 eklemlili güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi CPV/T hibrit kolektör tasarlamış ve alkalini elektrolizör kullanılarak bu sistemin hidrojen üretim ve ısı verimliliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada 240X yoğunlaştırma oranında % 30 elektriksel ve % 70 ısı enerjisi ile kolektörün maksimum değerlere ulaşıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca CPV/T hibrit sistemin maksimum % 19 hidrojen dönüşüm verimlilik değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

➤ SBS-CPV/T-Elektrolizör

Lasich ve diğ. [38], GaAs tek eklemlili güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektörün tasarımını gerçekleştirerek sistemi deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre sistemin toplam verimliliği % 31,8, GaAs PV hücrenin elektriksel verimi % 18,4 ve termal alıcı verimi 1100 °C sıcaklıkta % 13,4 olarak bulunmuştur. Önerilen bu sistemde yüksek sıcaklıklara çıkılması ile Lasich [39], 1999 yılında bu sistemin yüksek sıcaklıkta çalışan KOE ile hidrojen üretim potansiyelini araştırmış ve tasarımı gerçekleştirilen sistemin patentini almıştır. Sunulan patentli sistemin deneysel sonuçlarına göre SBS-CPV/T hidrojen üretim sistemin verimliliği % 22 olarak hesaplanmış ve bu verimlilik değerinin mevcut sistem tasarımlarına göre yaklaşık 2 kat olduğu ifade edilmiştir. McConnell [40], bu deneysel sistemin günümüzde üretimi gerçekleştirilen çok eklemlili güneş hücreleri kullanılarak gerçekleştirilmesi durumunda hidrojen üretim verimliliğinin % 40'ın üzerinde olabileceğini ifade etmiştir.

Ma ve diğ. [41] GaInP/GaAs/Ge çok katmanlı güneş hücresinin kullanıldığı frensel lens ile yoğunlaştırmanın sağlandığı SBS-CPV/T hibrit kolektörün, alkalın elektrolizör ile hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada Platin (Pt) eklenmiş Titanyum dioksit (TiO_2) ile hazırlanan nanoakışkan sistemde hem SBS hem de foto-katalitik hidrojen üretimi için kullanılmıştır. Sistemde kullanılan sıvı SBS'nin, PV güneş hücresi sıcaklığını % 32,8 olarak azaltarak elektriksel güç çıkışını % 65,7 olarak arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca SBS-CPV/T hibrit kolektör ile hidrojen üretim verimliliğinin % 14 olarak bulunduğu ifade edilmiştir.

Zhu ve diğ. [42] deneysel olarak SBS-CPV/T hibrit kolektörün, PEM elektrolizör ile hidrojen üretim potansiyelini araştırmışlardır. Sistemde GaInP/GaAs/Ge 3 eklemlili güneş hücresi kullanılırken frensel lens ile yoğunlaştırma gerçekleştirilmiş ve SBS olarak içerisinde sıvı bulunan küresel lens kullanılmıştır. SBS ile elde edilen ısı enerjisinin PEM elektrolizöre ayrıştırılmak için gönderildiği sistemde en uygun çalışma akışkanının dimetil silikon yağı olduğu ifade edilirken SBS-CPV/T hibrit kolektörün hidrojen dönüşüm verimliliğinin ortalama % 22,1 ve maksimum % 22,7 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kaleibari ve diğ. [43] heliostat olarak adlandırılan bir dizi ayna ile yansıtmanın sağlandığı SBS-CPV/T hibrit kolektörde, KOE elektrolizör hidrojen üretim potansiyelini numerik olarak araştırmışlardır. Spektral ışın ayırıcıların bulunduğu kolektörde ısı alıcı noktası, GaInP, GaAs ve Si tabanlı tek eklemlili 3 farklı PV güneş hücresi bulunmaktadır. 899 W/m^2 direkt ışınım altında ve 1000X yoğunlaştırma oranına göre hesaplamaların gerçekleştirildiği çalışmada, SBS-CPV/T kolektörün KOE vasıtası ile hidrojen üretim verimliliğinin % 36,5 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

1.3. Hedefler ve Literatüre Sağlanan Katkılar

Günümüzde hidrojen üretiminin yaklaşık % 95'i diğer kaynaklara göre daha ekonomik olan fosil kaynaklardan gerçekleştirilmektedir. Ancak fosil kaynakların hem sınırlı oluşu hem de çevreye olan zararlı etkileri yadsınamaz bir gerçektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle bu çalışmada kullanılacak olan güneş enerjisi teknolojilerinin hidrojen üretiminde tercih edilmemesinin en büyük sebebi; mevcut teknolojilerin düşük verimliliklerinden dolayı hidrojen üretim maliyetinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. 1999 yılında deneysel olarak tek eklemlili GaAs tipi güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi SBS-CPVT hibrit güneş kolektörü sisteminin KOE vasıtası ile hidrojen üretim potansiyeli araştırılmış olup [39], III-V grubu güneş hücresi kullanıldığında mevcut sistemlerden daha düşük maliyetlerde ve yaklaşık 2 kat daha fazla verimlilikte hidrojen üretimi gerçekleştirilebileceği ifade edilmesine rağmen bununla ilgili herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmada tasarım parametreleri, enerji analizleri ve sistemi etkileyen değişkenler açıkça ortaya konulmamıştır. Bu tez çalışması ile III-V grubu güneş hücresinin kullanıldığı Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit güneş kolektörü sisteminin, KOE vasıtası ile hidrojen üretim potansiyeli araştırılarak literatürdeki bu

karanlık nokta aydınlatılmış olacaktır. Ayrıca sistem bileşenleri olan optik malzemeler, spektral ışın ayırıcı, III-V grubu PV güneş hücresi ve KOE detaylı olarak tasarlanıp ve simülasyon programları kullanılarak Elazığ ili iklim koşullarına göre modellenerek bu sistemin uygulanabilirliği gözler önüne serilecektir.

Bu tezin başarıya ulaşması ile ülkemizde güneş enerjisinden hidrojen üretim sistemleri yaygınlaşacak, enerji üretiminde yenilenebilir enerji payı artacak, dışa bağımlılığın azalması ve enerji arz ve güvenliğine katkı sağlanacaktır. Ayrıca bu çalışma içerisinde bulunan yeni nesil III-V grubu PV hücre, KOE, spektral ışın dağıtıcı optik sistemler, ülkemiz açısından henüz çok yeni teknolojiler olduğundan bu sistemler hakkında bilgi birikimi ve farkındalığın artırılması sağlanacaktır.

1.4. Tezin Organizasyon Yapısı

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de güneş enerjisinden hidrojen üretimi hakkında genel bir değerlendirme yapılmıştır. Bölüm 2’de hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri, Bölüm 3’te güneş enerjisi, güneş enerjisi dönüşüm teknolojileri detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm 4’te tez çalışması kapsamında kullanılacak sayısal analizler sunulurken kullanılacak modeller ve parametreleri açıklanmıştır. Bölüm 5’te gerçekleştirilen sayısal analizler ışığında elde edilen bulgular paylaşılmış ve elde edilen verilerin yorumlanmasına yer verilmiştir. Bölüm 6’da ise bulgular ve tartışma bölümünde verilen sonuçların genel bir değerlendirmesi ile gelecekteki olası araştırma konuları hakkında öneriler sunulmuştur.

2. HİDROJEN VE ÖZELLİKLERİ

Hidrojen ilk olarak 1776 yılında Henry Cavendish tarafından keşfedilmiştir. Hidrojen ismi ise Antoine Lavoisier tarafından verilmiştir. Yıldızlardan yayılan ışıkların analizi sonucunda yıldızların yapısında, güneş sisteminin % 90'ında hidrojen olduğu düşünülmektedir.

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen, doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Sıvı hidrojenin birim kütesinin ısı değeri 141,9 MJ/kg olup, petrolden 3,2 kat daha fazladır. Sıvı hidrojenin birim hacminin ısı değeri ise 10,2 MJ/m³'tür ve petrolün % 28'i kadardır. Gaz hidrojenin birim kütesinin ısı değeri sıvı hidrojenle aynı olup, doğal gazın 2,8 katı kadarken, birim hacminin ısı değeri 0,013 MJ/m³ ile doğal gazın % 32,5'i olmaktadır. Metal hidrürlerin kütleli enerji içeriği 2-0 MJ/kg ile sıvı hidrojene göre çok küçükken, hidrürlerin hacimsel enerji içeriği 12,6-14,3 MJ/m³ ile gaz ve sıvı hidrojenden büyüktür [44]. Dünya nüfusundaki ve uygarlık düzeyindeki artışlarla birlikte toplam enerji gereksiniminin artmasına karşın günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması alternatif enerji kaynaklarına olan gereksinimi zorunlu kılmaktadır. Petrol krizinin ve çevre sorunlarının etkisi altında yakın gelecekte içten yanmalı motorlarda kullanılan benzin, mazot gibi petrol kökenli konvansiyonel yakıtların yerini alacak alternatif yakıtların bulunması gerekmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerinden biri farklı hava hidrokarbon karışım oranları için hava fazlalık katsayısının 0,3-1,7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken hidrojen için bu sınır 0,15-4,35 değerlerine ulaşmaktadır. Hidrojen-hava karışımlarını ateşlemek için gerekli enerji miktarı da diğer yakıtlara oranla çok düşüktür. Bu durum tutuşma garantisi sağlaması açısından Otto ilkesi (içten yanmalı) ile çalışan motorlarda avantaj sağlamakla birlikte erken tutuşma ve geri yanma gibi sorunları da beraberinde getirmektedir.

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının oldukça yüksek olması (1 atm basınçta 847-867 K) ve oktan sayısının yüksek olması, hidrojenin dizel motorlardan çok Otto ilkesi (içten yanmalı) ile çalışan motorlar için daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir. Dizel motorlarda hidrojen tek başına veya mazotla birlikte kullanımının gerçekleştirildiği örneklerde bulunmaktadır. Hidrojenin yanması sonucu elde edilen alev hızı da oldukça yüksektir. Bu değer stokiometrik karışımlar için benzin - hava karışımlarındaki alev hızının yaklaşık dört katı düzeyindedir. Hidrojen diğer mevcut içten yanmalı motor yakıtlarından çok yüksek ısı değerlere sahiptir (alt ısı değeri 119,9 MJ/kg, üst ısı değeri 141,9 MJ/kg). Ancak hacimsel olarak ele alındığında hidrojenin ısı değerinin diğer yakıtlardan çok daha düşük olduğu görülecektir. Bu duruma bazı çözümler sağlanmaması halinde motorun maksimum gücü açısından eşdeğer özellikteki benzin motorlarına göre bazı kısıtlamalar getirecektir. Hidrojenin difüzyon katsayısı da öteki yakıtlardan daha fazladır. Ayrıca gaz halindeki hidrojen; kâğıt, kumaş, kauçuk vb. malzemelerden ve platin, demir, çelik gibi

bazı metallerden difüzyon yolu ile geçebilmektedir. Hidrojenin bu özelliği depolanmasında bazı sorunlar oluşturmaktadır. Tablo 2.1’de hidrojenin kimyasal özellikleri gösterilmiştir [44, 45].

Tablo 2.1. Hidrojenin özellikleri.

Parametreler	Değerler
Sembol	H
Atom Numarası	1
Proton ve Elektron Sayısı	1
Nötron sayısı	0
Elektron Dizilişi	1s ¹
Erime Noktası	-259,14 °C
Kaynama Noktası (1 atm)	-252,87 °C
Yoğunluk, sıvı	0,071 kg/L
Spesifik Isı	3,41 J/gm °C
Yoğunluk, gaz (1 atm)(15 °C, 1 atm)	0,0852 kg/m ³
Isıl kapasite	14,32 Joule/kg K
Spesifik ağırlık, gaz (Hava:1)	0,07
Kritik Sıcaklık	-239,9 °C
Kritik Basınç	12,8 atm

2.1. Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen, geleceğin enerji taşıyıcısı ve depolama çözümü olarak önemli bir rol oynamaktadır. Hidrojenin bir dizi kullanım alanı vardır ve potansiyeli neredeyse sınırsızdır.

Birincil kullanım alanlarından biri olan hidrojen enerji depolama ve taşıma için ideal bir çözümdür. Elektrik enerjisinin dönüştürülerek hidrojen üretimiyle depolanması, enerji talebinin düşük olduğu saatlerde kullanılmak üzere daha sonra geri dönüştürülmesini sağlar. Bu sayede yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalanmaları düzene sokulabilir ve enerji arzı daha istikrarlı hale getirilebilir. Ayrıca hidrojen, uzun mesafeli taşımacılık sektöründe de kullanılabilir. Hidrojen yakıt hücreleri, elektrik enerjisini hidrojenin oksidasyonu ile kimyasal enerjiye dönüştürerek araçlara güç sağlar. Bu sayede sıfır emisyonlu bir ulaşım seçeneği ortaya çıkar.

Hidrojenin bir başka önemli kullanım alanı endüstriyel uygulamalardır. Hidrojen, metalurji sektöründe çelik üretimi ve elektronik cihazların üretiminde kullanılan saf bir atmosfer gazıdır. Ayrıca hidrojen, petrokimya endüstrisinde hidrojenasyon reaksiyonları için bir kaynak olarak kullanılır. Bu reaksiyonlar, yağların ve kimyasal maddelerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan

bir yöntemdir. Hidrojen kullanımı, endüstriyel süreçlerde karbon salınımını azaltma potansiyeli sunar ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin benimsenmesine katkıda bulunur.

Hidrojenin ilginç bir kullanım alanı da enerji üretimi için mikro güç kaynaklarıdır. Bu mikro güç kaynakları, saatler, uzaktan algılama sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi düşük güç tüketen cihazlara enerji sağlamak için kullanılır. Hidrojen yakıt hücreleri bu tür uygulamalar için idealdir çünkü uzun ömürlüdür, sessiz çalışır ve sadece su buharı üretir.

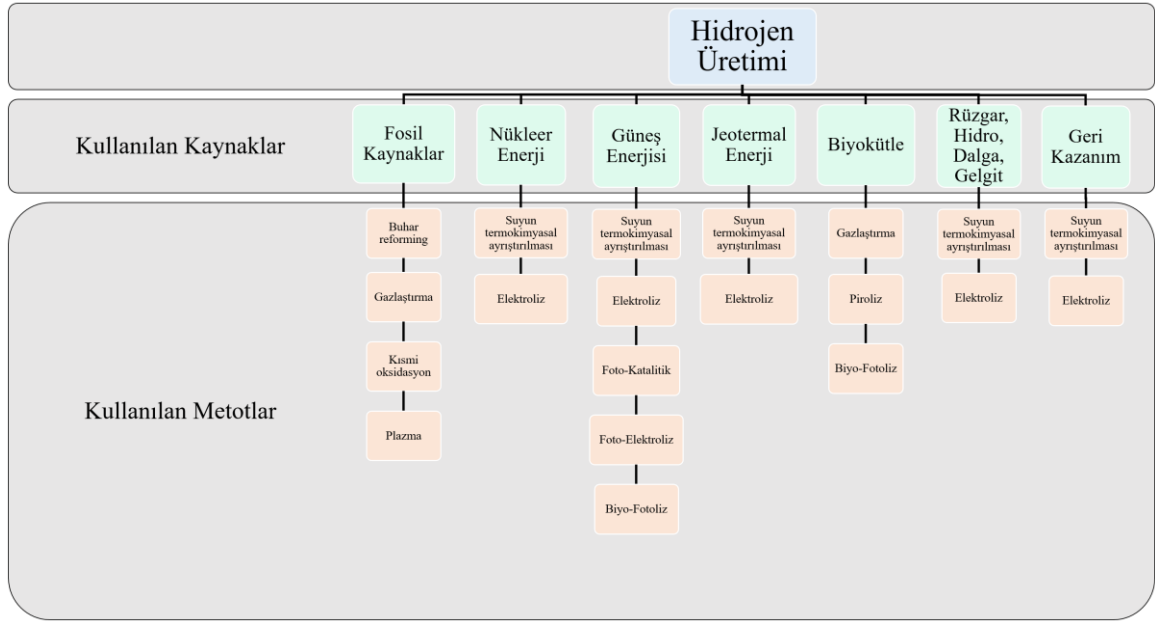
Son olarak, hidrojen enerjisi, evlerde ve ticari binalarda ısıtma ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılabilir. Yakıt hücreli kombi sistemleri, hidrojeni doğal gaz gibi kullanarak evlerde sıcak su ve ısıtma sağlar. Bu sistemler, enerji verimliliğini artırır ve karbon salınımını azaltır. Ayrıca, büyük ölçekli yakıt hücreli enerji santralleri, elektrik enerjisi üretimi için hidrojen kullanır ve bölgesel enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılabilir.

Hidrojen, sürdürülebilir enerji geleceğinin anahtarı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Temiz, yenilenebilir ve bol miktarda bulunabilen bir kaynaktır. Hidrojen teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaşmasıyla, enerji arzı güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyüme arasında önemli bir denge sağlanabilir. Hidrojen ekonomisi, enerji sektöründe devrim niteliğinde değişiklikler getirebilir ve dünyamızı daha temiz ve daha yaşanabilir bir yer haline getirebilir.

2.2. Hidrojen Üretim Kaynakları ve Metotları

Doğada bulunan birçok madde hidrojen içerir. Bunlar arasında doğal olarak su (deniz, nehir, yağmur, kuyu suyu) doğada en çok bulunanıdır. Ayrıca hidrojen fosil hidrokarbonlar, biyokütle, hidrojen sülfür veya diğer bazı maddelerden de elde edilebilir [46].

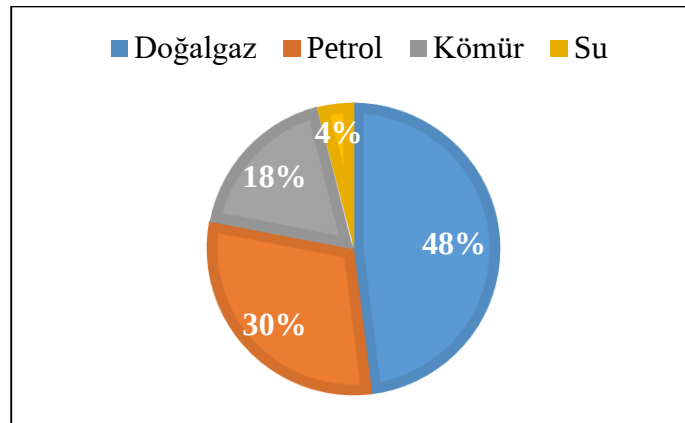
Hidrojen fosil yakıt, yenilenebilir (güneş, rüzgâr, biyokütle, jeotermal, hidro, dalga, geldit vb.) ve nükleer enerji gibi farklı kaynaklar kullanılarak farklı metotlar ile elde edilebilmektedir [47]. Şekil 2.1’de kullanılan kaynak tipine göre hidrojen üretim metotları gösterilmiş ve her bir metot alt bölümlerde detaylı bir şekilde irdelenmiştir.



Şekil 2.1. Kullanılan kaynak tipine ve üretim metotlarına göre hidrojen üretimi.

2.2.1. Fosil Kaynaklardan Hidrojen Üretimi

Hidrojen üretiminde ekonomik boyut, kullanılan kaynak ve metot değerlendirmesinde en büyük paya sahip parametredir. Bu yüzden günümüzde hidrojen üretimin yaklaşık %95 hidrojen üretimi fosil kaynaklardan gerçekleştirilmektedir [48]. Şekil 2.2’de hidrojenin elde edildiği fosil kaynak tipine göre dağılımı gösterilmektedir [49, 50].



Şekil 2.2. Hidrojenin elde edildiği kaynak tipine göre dağılımı.

Fosil kaynaklardan, buhar reforming, gazlaştırma, kısmi oksidasyon ve pirroliz yöntemleri kullanılarak hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir.

2.2.1.1 Buhar Reforming

Buhar reforming, hidrojen üretiminin en önemli ve yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. 970–1100 K sıcaklık aralığında ve 3,5 MPa’a kadar basınç altında yürütülen endotermik, katalitik bir işlemdir. Genellikle nikel katalizör olarak kullanılır [50, 51]. Fosil yakıtlardaki yüksek hidrojen/oksijen oranı, onları reforming süreci için iyi adaylar haline getirmektedir. Çoğunlukla doğal gaz kaynak olarak kullanılır, ancak nafta (petrolün damıtımında benzin ve benzen arasında elde edilen renksiz, uçucu ara ürün) kadar ağır hidrokarbonlarda işlenebilir. Temel reaksiyon Denklem 2.1-2.2’de görüldüğü üzere iki adımda gerçekleşmektedir [50]:



Buhar reforming hidrojen üretiminde kullanılan en ucuz metot olmasına karşın kaynak olarak fosil kaynaklar kullanıldığından CO₂ salınımının çok yüksek olması bu sistemin en büyük dezavantajıdır.

2.2.1.2 Gazlaştırma

Hidrojen çeşitli gazlaştırma işlemleriyle (örneğin sabit yatak, akışkan yatak veya sürüklenen akış) kömürden üretilebilir. Uygulamada, yüksek sıcaklığa maruz kalan akış süreçleri, maksimum karbonun gaza dönüşmesi için tercih edilir, böylece önemli miktarlarda katran ve fenollerin oluşumunu önler. Karbonun, karbon monoksit ve hidrojene dönüştürüldüğü işlem için tipik reaksiyon, Denklem 2.3’te verilmiştir [52].



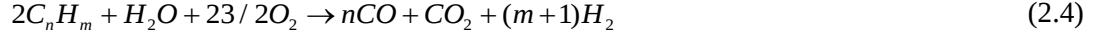
Daha sonra CO, Denklem 2.2’deki buhar reforming sürecindeki gibi su-gaz yükseltme tepkimesi ile CO₂ ve H₂ ye dönüştürülür.

Kömürden hidrojen üretimi ticari olarak olgunlaşmış olmasına rağmen buhar reforming ile hidrojen üretiminden daha karmaşıktır. Elde edilen hidrojenin maliyeti de daha yüksektir. Ancak, dünyanın birçok yerinde kömür bol olduğu için tercih edilmektedir.

2.2.1.3 Kısmi Oksidasyon

Hidrojen üretimi için ikinci önemli ve yaygın kullanılan bir metottur. Kısmi oksidasyonda her türlü gaz ve sıvı hidrokarbon kullanılmaktadır. Ağır yağ veya petrol rafinerisi artık yağı gibi yüksek kaynama noktalı ve yüksek kükürt hammaddelerini işlemek için bu metot tercih edilmektedir. Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu, ekzotermik bir reaksiyondur. Ağır

hidrokarbonların, tercih edilen kaynak ve seçilen prosese göre bir katalizör veya katalizör olmadan orta yüksek basınçta oksijen ve su buharı ile tepkime Denklem 2.4’de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir [50].



Kısmi oksidasyon sürecinin dezavantajı karbondioksit ile birlikte karbonmonoksitde tepkime sonucu ürün olarak açığa çıkmasıdır [53].

2.2.1.4 Plazma

Plazma, son durumunda atomik türler ve elektronları içeren maddenin iyonize halidir. Elektrik yüklü parçacıkların varlığı nedeniyle, yüksek voltajlı elektrik akımı deşarjı için ortam olarak plazma kullanılabilir. Çoğunlukla metan içeren doğal gaz, termal plazmanın etkisi altında ayrışabilir. Termal plazma, iyonize atomların ve elektronların aynı termodinamik sıcaklıkta olduğu özelliğe sahiptir. Metan bir plazma arkı boyunca aktığında, hidrojen ve karbona ayrışır. Karbon, çökelirken, hidrojen gaz fazında kalır. Doğal gazın (metan) hidrojen ve karbona ayrışması Denklem 2.5’de gösterilmiştir [46].



2.2.2. Nükleer Enerji ve Atık Isıdan Hidrojen Üretimi

Nükleer enerji günümüzde bir enerji taşıyıcısı olarak elektrik üretmek için kullanılmaktadır. 2011 yılında, elektriğin yaklaşık % 12’si nükleer enerjiden üretilmiştir [54]. Mevcut enerji kaynaklarını korurken daha temiz enerji elde etmek amacıyla, nükleer enerjinin hidrojen üretimi için ekonomik bir yol yöntem olup olmaması tartışılmaktadır [55]. Nükleer enerji, elektrik enerjisi üretimi uygulamasına ek olarak, sudan hidrojen üretimi için ikincil bir yol olarak da kullanılabilir [54, 56]. Nükleer enerji uygulamalarında açığa çıkan yüksek ısı, suyun termal veya termokimyasal reaksiyonlar ile ayrıştırılmasıyla hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca üretilen elektrik sayesinde elektroliz metodu ile hidrojen üretimi mümkündür. Aynı şekilde endüstride süreç dâhilinde açığa çıkan yüksek atık ısılarından da aynı şekilde hidrojen üretiminin gerçekleştirilmesi mümkündür.

2.2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi

Hidrojen ayrıca güneş, jeotermal, biyokütle ve rüzgâr gibi geleneksel olmayan yenilenebilir kaynaklardan da üretilir. Yenilenebilir enerji kaynaklı hidrojen üretimi, sıfır veya minimum sera gazı salınımları ile çevre dostu olma avantajına sahiptir. Hidrojen doğada tek başına bulunmaz.

Hidrokarbon, biyokütle, su ve hidrojen içeren diğer kimyasal elementler gibi bir dizi kaynaktan elde edilir. Bu nedenle, bu kaynaklardan hidrojen elde etmek için gerekli olan enerji yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sağlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen elde etme yöntemleri alt başlıklarda detaylıca anlatılmıştır.

2.2.3.1 Suyun Termal Olarak Ayrıştırılması

Suyun tek adımlı termal ayrışması su termolizi olarak adlandırılır ve Denklem 2.6'daki gibi gösterilir [46, 57].



Reaksiyon, makul bir ayrışma derecesine sahip olmak için 2500 K'nin üzerinde yüksek sıcaklıkta bir ısı kaynağı gerektirir. Gerekli olan ısı kaynağı güneş enerjisini yoğunlaştıran (parabolik çanak, parabolik oluk vb.) teknolojiler ile sağlanabilir. Bu işlemin bir dezavantajı, patlayıcı bir karışımla sona ermekten kaçınmak için H_2 ve O_2 'yi ayırmak için etkili bir tekniğin gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. ZrO_2 ve diğer yüksek sıcaklık malzemelerine dayanan yarı geçirgen membranlar, bu amaçla 2500 K'e kadar kullanılabilir. Ürün gaz karışımı daha düşük sıcaklığa getirildikten sonra ayırma da gerçekleştirilebilir. Eğer ürün gazı, birkaç milisaniye içinde 1500-2000 K'lik keskin bir sıcaklık düşüşü ile söndürülerek hızla soğutulursa, hidrojen ve oksijenin re-kombinasyonu önlenir. Paladyum membranları daha sonra etkili hidrojen ayırımı için kullanılabilir [46, 57].

2.2.3.2 Suyun Termokimyasal Olarak Ayrıştırılması

Termo-kimyasal döngüler, 1970'lerden ve 1980'lerden beri, bir petrol krizi sırasında alternatif yakıtların üretilmesine yönelik yeni kaynakların araştırılmasına katkıda bulunmaları için geliştirilmiştir. Suyun termokimyasal ayrışması, hibrit çevrimler halinde ısı veya elektrik enerjisi ile başlatılan bir dizi kimyasal reaksiyon vasıtasıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılmasıdır. Bu süreçlerin kapalı döngülerinin toplam ulaşılabilir etkinliği yaklaşık % 50'dir [58]. Su 2500 K'nin üzerindeki aşırı yüksek sıcaklıklarda bileşenlerine ayrıştığından, bu sıcaklıklara dayanabilen uygun yapı malzemeleri ve termal kaynaklar bulunamaması, termokimyasal ayrışma metodu kullanımının en önemli sebebini oluşturmaktadır. Şimdiye kadar, 300'den fazla çeşitli ayrıştırma döngüleri tanımlanmıştır. Tüm süreçler, çalışma sıcaklığını 2500 K'den belirgin bir şekilde düşürdüğü görülmektedir [59, 60].

Hidrojen üretiminin maddi kaynağı olan su hariç, termokimyasal döngüde kullanılan tüm kimyasallar geri dönüştürülebilir.

Termokimyasal su ayırma döngülerinin diğer avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- O₂-H₂ ayırma membranlarına gerek duyulmama,
- 600-1200 K arasında makul sıcaklık gereksinimi aralığı,
- Sıfır veya düşük elektrik enerjisi gereksinimi.

Balta ve diğ. [61], literatürde mevcut olan termokimyasal su ayrışması hakkındaki derleme makalelerini özetlemiştir. Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) tarafından tam olarak geliştirilmiş ve kanıtlanmış olan S-I döngüsü teknik olarak geçerli kabul edilir. S-I çevrim reaksiyonunun başlangıcı Denklem 2.7’de verilmiştir [57].



Ürün gazları (H₂O ve SO₃) 800-900 °C’ye kadar ısıtılır. Sonra SO₃ gazı termal olarak Denklem 2.8’de göre ayrıştırılır [57]:



O₂’den ayrıldıktan sonra, SO₂, düşük sıcaklıklarda kendiliğinden oluşan iyot ve su ile Denklem 2.9’deki gibi ekzotermik reaksiyona girer [57]:



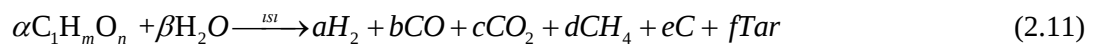
Son olarak, HI termal olarak 425-450 °C civarında sıcaklıklarda Denklem 2.10’deki gibi H₂’ye ayrılır [57]:



Nükleer reaksiyonlarda açığa çıkan atık ısı enerjisi, biyokütle yanma reaksiyonlarında açığa çıkan atık ısı enerjisi ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinden elde edilen ısı enerjisi, S-I döngüsü reaksiyonlarını sürdürebilmek için sürdürülebilir ısı enerjisi kaynakları olarak sıralanabilir.

2.2.3.3 Biyokütle Gazlaştırma ve Biyoyakıt Reforming

Biyokütle örneklerinden bazıları odun talaşı ve şeker kamışıdır. Genel biyokütle dönüşümü Denklem 2.11’de gösterilmiştir [57]:



burada, $\alpha C_1H_mO_n$ biyokütlenin genel kimyasal denklemidir.

Katı biyokütleden hidrojen üretiminde gazlaştırma reaksiyonu Denklem 2.12’de gösterilmiştir [57].



Sabit yatak, hareketli yatak ve akışkan yatak, gazlaştırma işleminde kullanılan yaygın gazlaştırıcı türleridir. Sağlanan ısı miktarına bağlı olarak, işlem ya ototermal ya da termal olarak adlandırılır. Ototermal gazlaştırmada, gerekli ısı, gazlaştırıcıdaki kısmi oksidasyon ile sağlanır. Sıvı biyo-yakıtlardan (yani etanol ve metanol) hidrojen üretimi, termokimyasal işlemlerle gerçekleşir.

2.2.3.4 Piroliz ve Ko-Piroliz

Günümüzde hidrojen üretiminde umut verici bir diğer yöntemde piroliz veya ko-pirolizdir [60]. Biyokütle (organik madde) 500-900° C sıcaklıkta ısıtılır ve 0,1-0,5 MPa’lık bir basınçta gazsızlaştırılır [62].

Süreç, oksijenin yanı sıra havasız ortamda da gerçekleşir ve bu nedenle dioksitlerin oluşumu neredeyse göz ardı edilebilir. Reaksiyon genellikle Denklem 2.13 ile açıklanabilir [62].



İlk reaksiyondan ürün olarak açığa çıkan karbon monoksit Denklem 2.2’de görülen ikinci bir çevrim ile CO’dan hidrojen üretimi gerçekleştirilir [63]. Ayrıca ikinci ürün olan CH₄’de buhar reforming veya kısmi oksidasyon yöntemleriyle H₂’e dönüştürülür. Sonuç olarak emisyonların önemli ölçüde düşürülmesi sağlanır. Bu sürecin avantajları, yakıtın adaptasyon kabiliyetinde ve görece basitliğinde yatmaktadır.

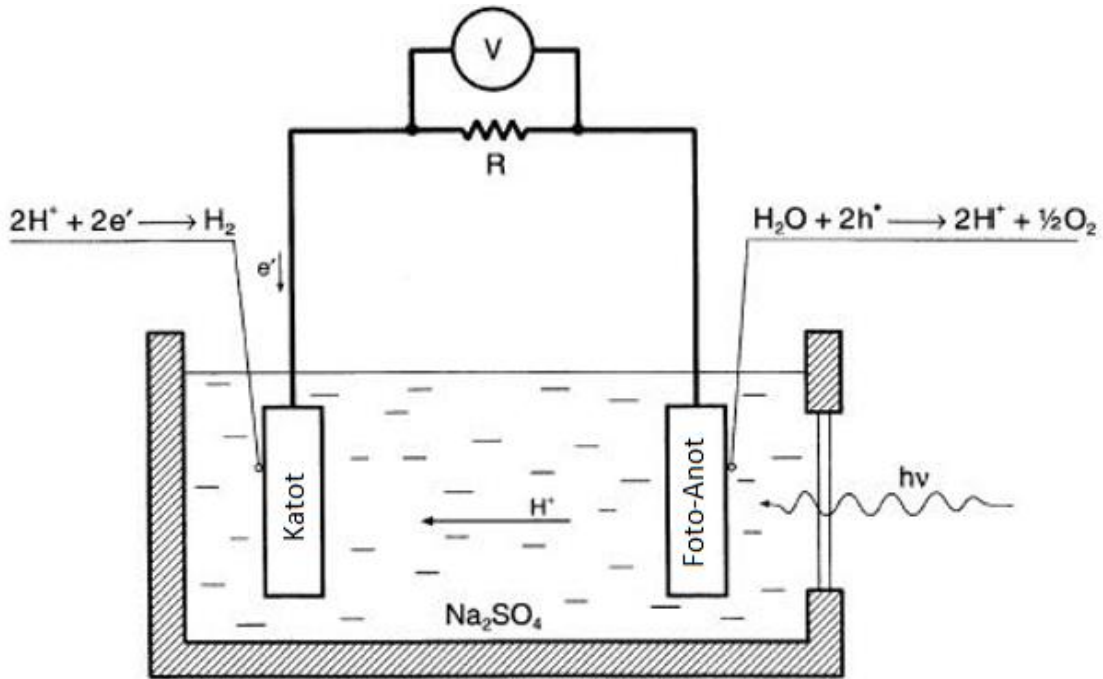
2.2.3.5 Foto-Katalitik Suyun Ayrıştırılması

Güneş radyasyonu özünde bir fotonik enerji kaynağıdır. Fotonik enerji, radyasyonun frekansı ile orantılıdır. Fotonlar, madde ile etkileşimlerinde elektronları yerinden oynatmak için kullanılır. Elektronlar yer değiştirirken, elde edilen elektriksel yük, kimyasal reaksiyonların foto-katalitik olarak yürütülmesi için kimyasal türlerin valans elektronlarını manipüle etmek için kullanılabilir. Kompleks supramoleküler cihazlar, fotonik radyasyonu yakalamak ve aktif merkezlerde katalitik reaksiyonları gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Su molekülünün foto redüksiyonu Denklem 2.14’de ve foto-oksidasyonu Denklem 2.15’deki gibi gerçekleşir [46]:



2.2.3.6 Foto-Elektroliz ve Foto-Elektrokimyasal

Foto elektroliz, güneş ışınlarına maruz kalan bir elektrotta heterojen foto katalizörlerin uygulanmasını içerir. Dahası, elektroliz hücresi için gerekli enerji elektrotlarda sağlanır. Fotonik radyasyonun etkisi nedeniyle gerekli elektrik enerjisi azalır. Foto-elektrokimyasal hücre (FEKH), elektrolit ve karşı elektrotlara daldırılan ışığa duyarlı yarıiletkenler içeren, foto-elektrolizinin yeni bir uygulamasıdır. Şekil 2.3’de bir FEKH yapısı göstermektedir. Yarı iletken, fotovoltaiik bir hücre gibi benzer şekilde çalışır, yani fotonları yarı iletken bant aralığından daha büyük enerji ile kullanır [46].



Şekil 2.3. Foto-elektrokimyasal hücre yapısı.

Foto-elektrokimyasal hücrenin dikkate değer bir avantajı, güneş enerjisi emilimini ve su elektrolizini aslında tek bir üniteye entegre etmesidir. Böylece, cihaz ayrı bir güneş enerjisi jeneratörü (örneğin bir PV hücresi) ve elektrolizör gerektirmez ve sonuç olarak daha kompakttır. Teknoloji geliştirme aşamasındadır ve laboratuvar ortamında % 18’lik bir verimlilik elde etmiştir [64]. Suyun elektroliti aşındırması nedeniyle, FEKH’nin bugüne kadar deneyimlenen ömrü düşüktür. Titanyum dioksitin (TiO₂) en çok umut vaat eden birçok foto sensitif yarı iletken elektrot çeşidi araştırılmış olup diğer çeşitler arasında stronsiyum titanat, karbonat oksitler, NaOH oksitler, tantal oksinitrür, diğer niobatlar ve titanatlar, kadmiyum sülfid yer almaktadır [46].

2.2.3.7 Biyo-Fotoliz ve Foto-Fermantasyon

Biyo-fotoliz ve foto-fermantasyon, sudan fotonik enerji ile biyokimyasal olarak hidrojen üretim süreçleridir. Kotay ve Das'a [65] göre, biyo-fotoliz yoluyla hidrojen üretimi, doğrudan, dolaylı ve foto-fermantasyon olarak 3 grupta sınıflandırılmaktadır. Biyo-fotolizde, ışığa duyarlı bazı mikro organizmalar, özel olarak tasarlanmış bir foto-biyo reaktörde biyolojik dönüştürücüler olarak kullanılır. En uygun mikroorganizmalar mikroalglardır, çünkü bunlar hidrojen evrimi gösterirler ve hidrojen yakalamaya izin verebilen kapalı sistemlerde kültürlenebilirler. Biyo-fotolizinin dikkate değer bir avantajı, standart bir sıcaklıkta ve basınçta sulu bir ortamda sudan hidrojen üretilebilmesidir. Biyo-fotoliz henüz ticari kullanım için geliştirilmiş değildir, ancak laboratuvar ölçeğinde hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Das ve Veziroğlu'na [66] göre, yöntemin enerji verimliliği potansiyel olarak % 10'a ulaşabilir.

Su molekülü, özel koşullar altında yeşil mikro-alg (*Chlamydomonas reinhardtii*) olarak da bilinen Siyano bakterilerin etkisi altında biyo-fotoliz ile bölünebilir. Bu mikro organizmalar, nitrojenaz ve hidrojenaz enzimlerini, sudan hidrojen ve oksijen oluşturabilecekleri şekilde üretir ve tetiklerler. Foto-aktif enzimler yardımıyla sudan hidrojen üreten genel reaksiyonlar Denklem 2.16-2.17'deki şekilde yazılabilir [66]:



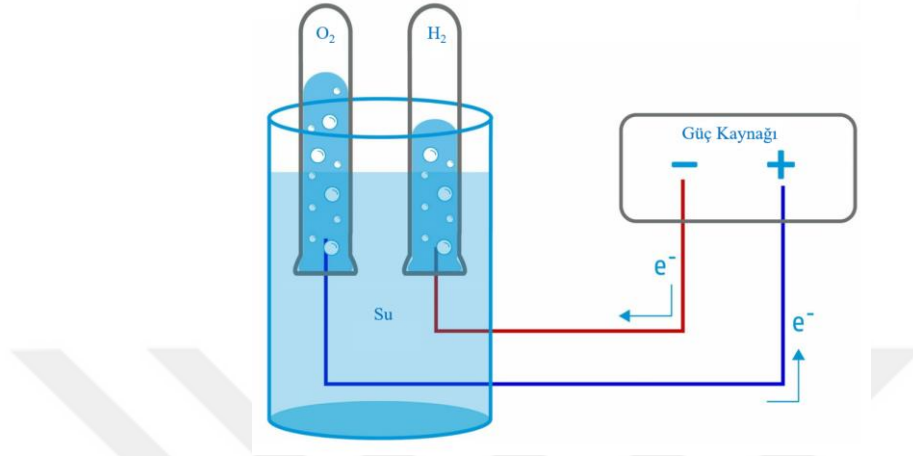
2.2.3.8 Elektroliz

Gelecekte hidrojenin elde edilmesi için umut verici bir yöntem de suyun elektrolizidir. Şu anda dünya çapında hidrojenin yaklaşık % 4'ü bu şekilde üretilmektedir [67, 68]. Suyun elektrolizi 1890'da ticari olarak kullanılmaya başlanan iyi bilinen bir yöntemdir. Elektroliz, bir su çözeltisinde iki elektrottan geçen bir doğru akımın, Denklem 2.18'de görüldüğü gibi hidrojen ve oksijenin kimyasal bağ ile bağlı olduğu suyun bileşenlerine ayrılmasına sebep olduğu bir işlemdir [59].



Elektroliz işlemleri oda sıcaklığında gerçekleşir. Su elektrolizinde yaygın olarak kullanılan bir elektrolit sülfürik asittir ve elektrotlar sülfürik asitle reaksiyona girmeyen platindir. Bu süreç ekolojik olarak temizdir çünkü hiçbir sera gazı oluşmaz ve üretilen oksijen endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Ancak, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, yüksek enerji gerektiren bir metottur. Hidrojen üretmek için gerekli olan elektroliz işlemi, elektrolizöre sağlanacak enerjinin güneş, rüzgâr veya jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sağlanabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile bütünleştirilmiş hidrojen üretim sistemlerinden çevreye zararlı

gazların salınımı olmamaktadır. Su elektrolizinin enerji verimliliği (elde edilen kimyasal enerji / kullanılan elektrik enerjisi) uygulamada % 50 ile % 70'e ulaşır [69]. Şekil 2.4'de elektroliz işlemi şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Elektroliz işlemi.

2.3. Elektrolizör ve Çeşitleri

Günümüzde yaygın olarak kullanılan 3 elektroliz teknolojisi bulunmaktadır. Bunlar alkalın, polimer elektrolit membrane (PEM) ve katı oksit elektrolizörlerdir. En yaygın elektroliz teknolojileri alkali çözeltilerin elektrolizine dayanır. Bir elektrolit (tuz) ilavesi, suyun iletkenliğini artırır ve klor veya sodyum hidroksit üretiminde hidrojen bir yan üründür. Katı oksit elektrolizörleri elektrik açısından daha verimli olmasına rağmen, bu teknoloji korozyon, termal sirkülasyon ve krom göçü ile ilgili problemlere sahiptir. PEM elektrolizörleri, alkali olanlardan daha verimlidir, katı oksitten farklı olarak korozyona dayanıklıdır, ancak fiyatı klasik bir alkalın sisteminkinden daha yüksektir [59].

2.3.1. Alkalın Elektrolizör

Alkalın elektrolizörler elektrotlardan, mikro gözenekli bir ayırıcıdan ve ağırlıkça % 30'luk potasyum hidroksit veya sodyum hidroksitten oluşan bir alkali solüsyonundan oluşur [70]. En çok kullanılan katot malzemesi, katalitik bir platin tabakası ile nikeldir. Anot, mangan, wolfram ve rutenyum oksitlerinin kapladığı nikel veya bakırdan oluşur. Elektrolit reaksiyonda harcanmaz fakat hidrojen rejenerasyonu gibi diğer sistemlerin kaybı nedeniyle sürekli olarak tamamlanmalıdır. Alkali elektrolizörde su, katoda beslenir, burada hidrojen ve hidroksil iyonları (OH^-) ile ayrılır buradan elektrolitik malzemeden oksijenin oluştuğu anoda geçer. Katotta meydana gelen tepkime Denklem 2.19, anotta meydana gelen tepkime Denklem 2.20 ve toplam reaksiyon Denklem 2.21'de gösterilmiştir.



Hidrojen alkali çözeltiyi bırakır ve sudan ayrılır. Tipik akım yoğunluğu 100-300 mA/cm²'dir. Alkalın elektrolizörlerinin verimi, hidrojenin kalorifik değerine göre % 50-60'a ulaşmaktadır [63, 69]. Bu teknoloji, ticari ölçekte iyi geliştirilmiş olup hali hazırda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.2. PEM Elektrolizör

Tipik PEM elektrolizörlerinin temeli, elektrot katalizörleri için siyah platin, iridyum, rutenyum ve rodyum ve bir gaz ayırıcısı olarak işlev gören ince Nafion polimer membranlarının kullanılmasıdır. PEM elektrolizöründeki su, bir hidrojen katyonu ve oksijene bölündüğü anotta beslenir. Hidrojen katyonları polimer membrandan katoda geçer. Katotta hidrojen katyonları, dış devreden akan elektronlarla uyumludur, bu da gaz hidrojenin oluşturulmasına yol açar. Bir PEM elektrolizörünün verimliliği yaklaşık % 55-70'dir. Anotta meydana gelen reaksiyon Denklem 2.22, Katotta meydana gelen reaksiyon Denklem 2.23'de gösterilmiştir. Toplam reaksiyon ise Denklem 2.21 ile aynıdır [70].



Hidrojen elektrolitik üretiminin genel verimliliği, esas olarak elektrik enerjisi üretiminin verimliliğine bağlanabilir (geleneksel kaynaklar için % 30-40). Elektrolizin genel verimliliği kabaca % 25-35 aralığındadır. Bir avantajı geniş uygulama için aynı anda oksijen üretimidir [59].

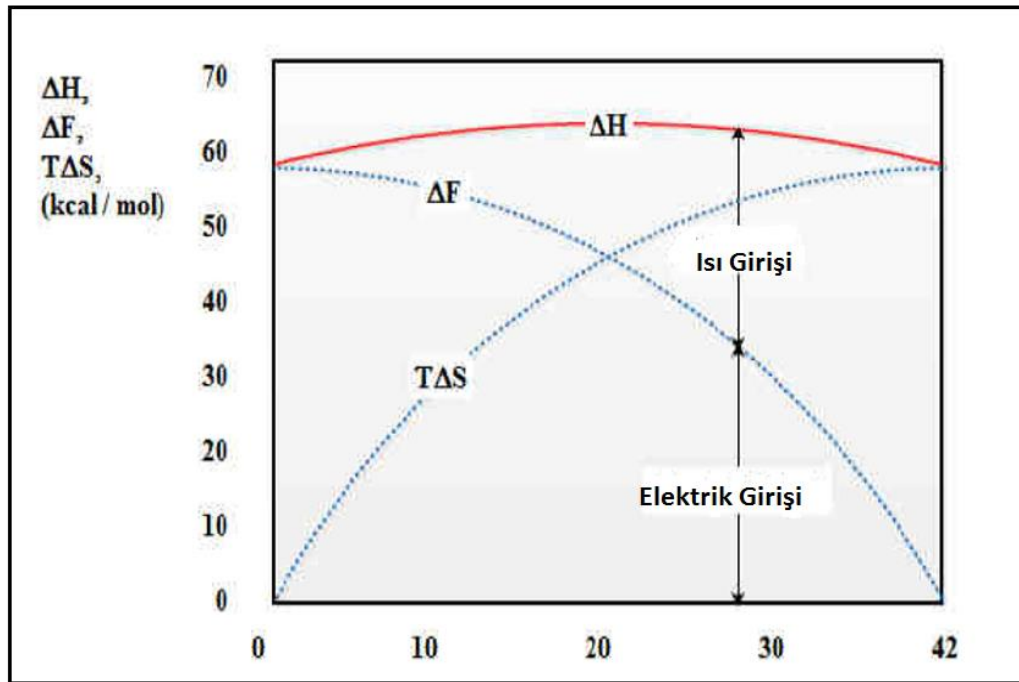
2.3.3. Katı Oksit Elektrolizör

Genel olarak katı oksit elektroliz hücreleri, esas olarak, bir elektrolit olarak katı bir malzeme kullanan katı oksit yakıt hücreleridir. Elektrolit seçici olarak oksijen anyonlarını yüksek sıcaklıkta geçirir. Katı oksit elektrolizör, alkali sistem gibi çalışır, çünkü oksijen iyonu elektrolit içinden geçerken, reaktif olmayan bir buhar akışında hidrojen bırakır. Katı oksit elektrolizör, 80-100 °C sıcaklıklarda çalışan PEM elektrolizörlerine ve 100-150 °C sıcaklık aralığında çalışan alkali elektrolizörlere kıyasla 500-800 °C'lik yüksek sıcaklıklarda çalışır. Katı oksit elektrolizörleri, sudan hidrojen üretimi için gerekli elektrik enerjisinin miktarını azaltmak için bu yüksek sıcaklıklarda (nükleer enerji dâhil olmak üzere çeşitli kaynaklardan) etkili bir şekilde ısıyı kullanabilir.

Daha yüksek sıcaklıklar, elektroliz sırasında anot ve katottun performansında düşüşe neden olan aşırı voltajı azalttığından elektrolizörün verimliliğini artırır. Örneğin, 100 °C'den 770 °C'ye bir sıcaklık artışı, aparatların ısı ve elektrik enerjisinin birleşimini neredeyse % 35 azaltmaktadır. KOE sistemlerinde yüksek sıcaklıkta çalışma, elektrotların aktivitesini geliştirmektedir [71]. Yüksek sıcaklıkta toplam elektrik ihtiyacı, ısı talebin yükselişine kıyasla önemli ölçüde azalmaktadır. Elektrolitin iyonik iletkenliği ve elektrot yüzeylerindeki elektrokimyasal reaksiyonların oranı, yüksek sıcaklıkta artmaktadır. Şekil 2.5'de elektroliz prosesinin sıcaklığı arttıkça, elektrik ve ısı enerji gereksinimini gösterilmektedir [72].

Yüksek ısıda elektroliz işleminin en önemli avantajı, elektroliz işlemi için gerekli olan enerjinin önemli bir bölümünün, elektrik enerjisine göre çok daha ucuz olan ısı enerjisinden karşılanmasıdır. Ayrıca, yüksek sıcaklık kinetik reaksiyonu hızlandırarak, elektrot polarizasyonuna bağlı enerji kaybını azaltır ve böylece toplam sistem verimini artmış olur [73].

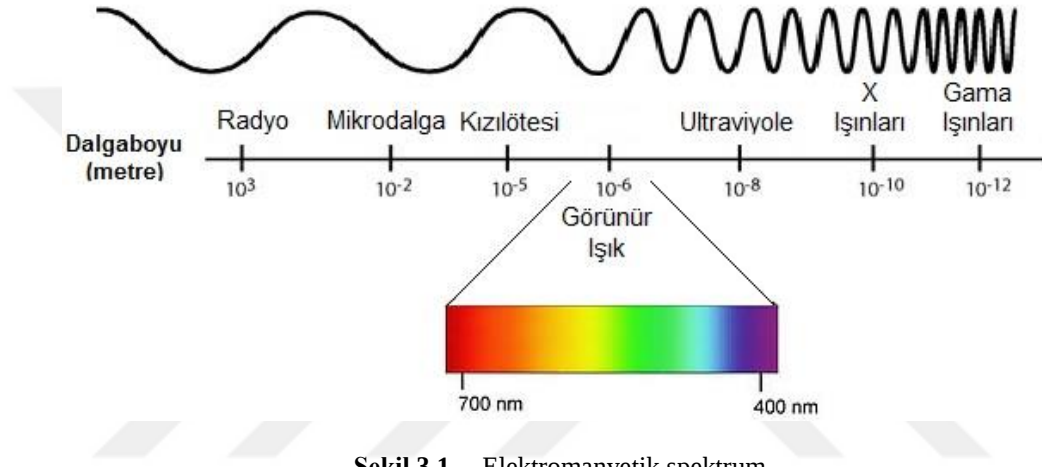
Katı oksit için kullanılan malzemeler ZrO_2 ve Y_2O_3 gibi katı oksit yakıt hücreleri için geliştirilen malzemelere benzer. Anot için materyal Co-ZrO₂ veya Ni-ZrO₂ iken, katot için stronsiyum katkılı LaMnO₃ kullanılır. Yüksek sıcaklık elektrolizinin verimi, sıcaklığa ve termal kaynağa bağlıdır ve % 85-90 değerine ulaşabilir [59].



Şekil 2.5. Sıcaklık değişimleri ile elektroliz işlemi için gerekli enerji durumu.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE TEKNOLOJİLERİ

Işık, herhangi bir dalga boyundaki yayılan elektromanyetik ışıdır. 280-4000 nm dalga boyu arasında ışık yayan güneş ışığını da içerisinde bulunduran, evren üzerinde tüm elektromanyetik ışıdır (radyasyon), elektromanyetik spektrum (Tayf) adı verilen çizelge ile şematik olarak gösterilir. Elektromanyetik spektrum Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Elektromanyetik spektrumun altında bulunan güneş ışığının küçük bir bölgesini oluşturan 390-750 nm dalga boyu aralığı görünür ışıdır.



Şekil 3.1. Elektromanyetik spektrum.

Elektromanyetik radyasyon, foton adı verilen temel yapılardan oluşur. Fotonlar, hem dalga hem de parçacık özelliklerine sahip olan küçük ışık paketleridir. Fotonlar elektrik yüklü değildir ve foton enerjileri, fotonun dalga boyuna göre Denklem 3.1’deki gibi belirlenir [74]:

$$E_{\lambda} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.1)$$

burada, h Planck sabitini, c ışık hızını ve λ dalga boyunu ifade etmektedir. Bir fotonun enerjisi ile dalga boyu arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Foton akısı (ϕ), saniyede bir birim alandan geçen foton sayısı olarak tanımlanır ve Denklem 3.2’deki gibi ifade edilir [74]:

$$\phi = \frac{\text{foton sayısı}}{t \cdot A} \quad (3.2)$$

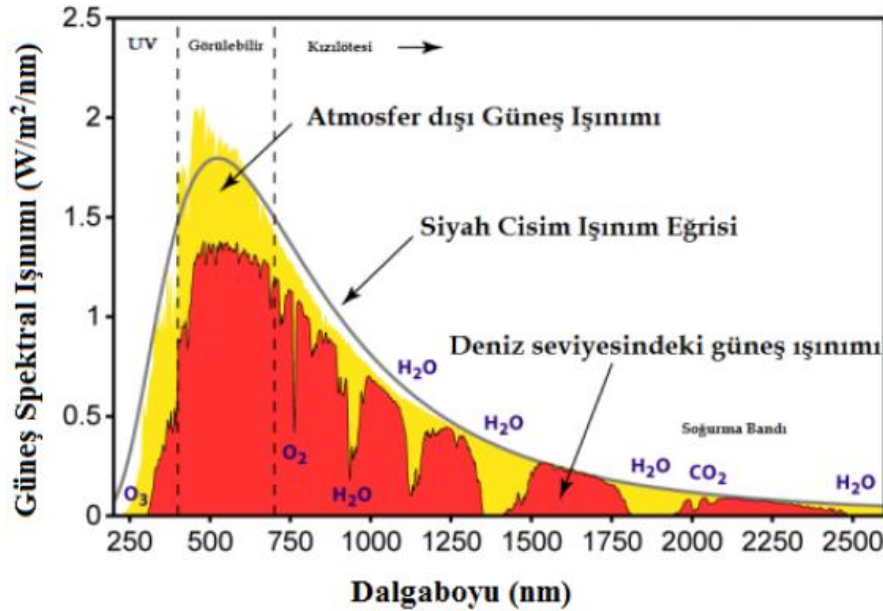
burada, t süreyi (sn) ve A birim alanı (m^2) ifade etmektedir. Foton akısı, her bir fotonun dalga boyu veya enerjisi ile ilgili ayrıntıları içermez. Dalga boyu belirtilmezse, akı çeşitli dalga boylarından oluşabilir. Güç yoğunluğu ise dalga boyuna özgü bir foton akısından elde edilebilir ve Denklem 3.3’ile bulunur [74]:

$$H = \phi \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.3)$$

burada, H güç yoğunluğunu ve ϕ foton akısını ifade etmektedir.

Güneş G sınıfında bulunan bir yıldızdır. Güneş yeryüzünden yaklaşık 150 milyon kilometre uzaklıkta ve yaklaşık 1,4 milyon kilometre çapındadır. Temelde % 84 Hidrojen, % 6 Helyum ve % 0,13 oranında diğer elementlerden (karbon, azot, oksijen) oluşmaktadır [75]. Kendi içerisinde sürekli olarak Hidrojeni helyuma dönüştüren doğal bir nükleer füzyon tepkimesi gerçekleşmekte olup bu tepkimeler sonucunda çekirdeğinde yaklaşık $15,7 \times 10^6$ K sıcaklığa ulaşmaktadır. Güneşin yüzey sıcaklığı ise yaklaşık 5780 K'dir. Güneş Spektrumu yaklaşık 6000 K sıcaklığında bir kara cismin spektrumu gibidir. Güneş ışınımı yeryüzüne farklı dalga boyu ve şiddetlerde gelmektedir. Yaklaşık 0,5 eV ile 3,5 eV arasında enerji fotonları içeren güneş ışınımının, dalga boyuna göre ışıma şiddeti Şekil 3.2'de gösterilmiştir [76].

Güneşte açığa çıkan bu yüksek miktardaki enerji uzay boşluğunda saçılmakta ve atmosfer yüzeyinin dışına sadece 1367 W/m^2 enerji ulaşmaktadır. Dünya atmosferine gelen güneş radyasyonunun enerjisi uzay boşluğunda hareket ettiği için genellikle sabit kabul edilir, ancak dünyanın yüzeyindeki ışıma miktarı soğurma, saçılma ve yansıma ile birlikte değişir. Güneş radyasyonunun yaklaşık % 70'i dünyanın deniz seviyesine ulaşır, çünkü % 18'i atmosfer tarafından emilir, % 12'si dünya atmosferi tarafından saçılır [77].



Şekil 3.2. Güneş ışınımının dalga boyuna göre şiddeti.

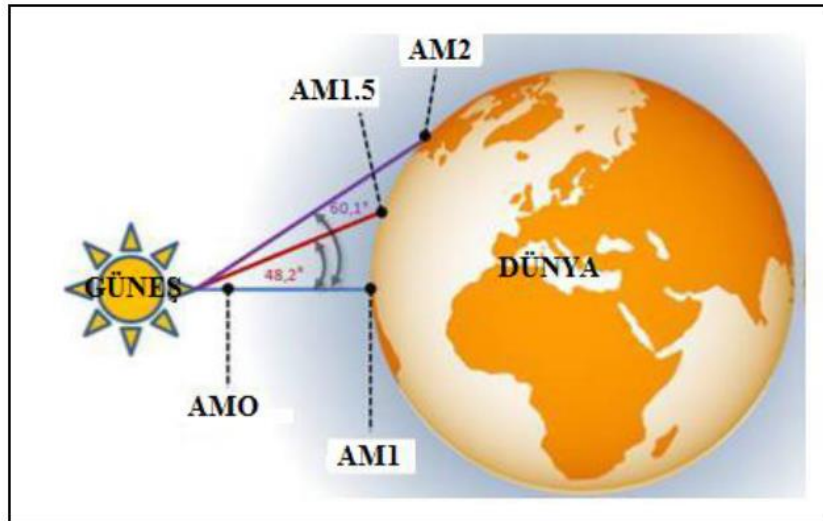
Yeryüzüne belirli bir alana gelen güneş ışınımını doğrudan ışıma, saçılmış ışıma ve küresel ışıma olmak üzere 3 farklı isimde adlandırılır. Doğrudan ışıma, belirli bir alana doğrudan gelen güneş ışınımıdır. Saçılmış ışıma, coğrafi etmenlerden veya havada bulunan su buharı-toz gibi

nesnelerden yansiyarak yüzey üzerine düşen ışıdır. Küresel ışıdır da, yüzey üzerine düşen doğrudan ve saçılmış ışıının toplamını ifade etmektedir.

Hava Kütlesi (AM), ışıının atmosferden Dünya'ya yol uzunluğuna göre kat ettiği atmosfer oranını temsil eder. Işık, hava ve tozdan oluşan atmosferden geçerken, saçılma ve soğurulma ile yoğunluğu azalır. AM, ışıının geçtiği atmosferin derinliğini ifade eder ve Denklem 3.4 ile ifade edilir [78]:

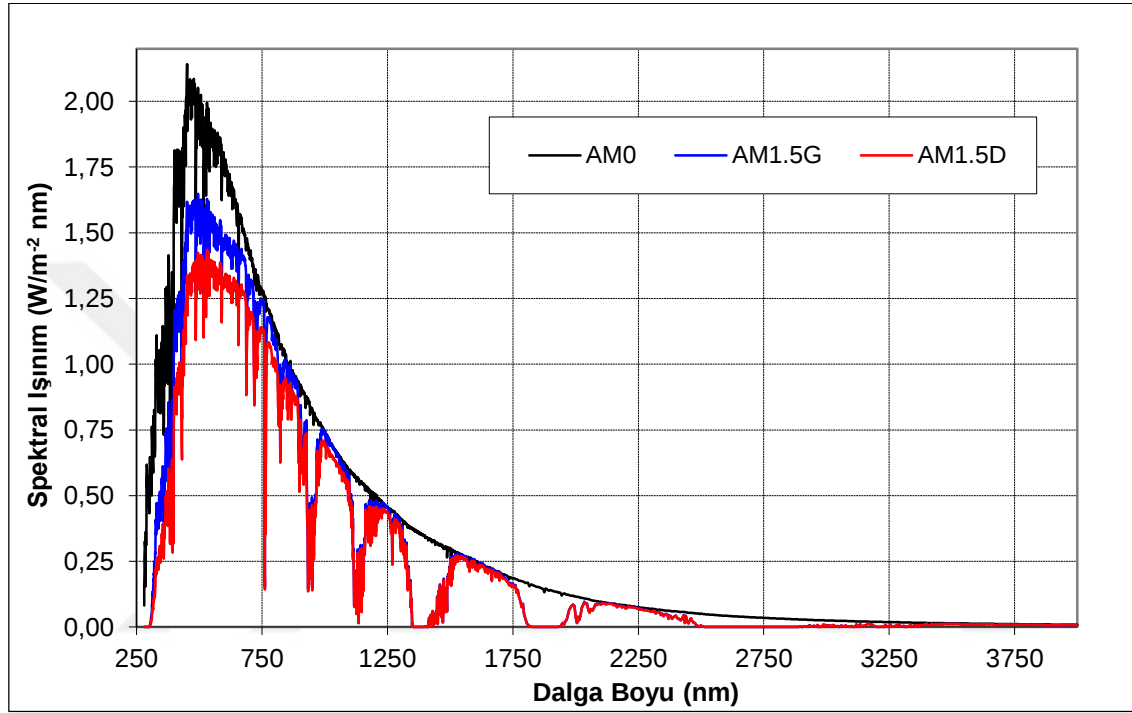
$$\text{Hava Kütlesi} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.4)$$

burada, θ güneşin düşey ile yaptığı açığı ifade etmektedir. Hava Kütlesi "0" değeri yani AM0 değeri güneş ışıının atmosfer dışındaki spektral dağılımını ifade etmektedir ve bu değeri 1367 W/m² değerindedir. Güneş ışıının yeryüzüne dik gelmesi durumunda yani θ açısının "0" değerinde olması durumunda bu ışıının AM1 değerine eşit olmaktadır. Hava Kütlesi 1.5 (AM1.5) değerinde, güneşin ışıının yatay ile yaptığı açı 48,2°'dir. Orta enlemlerde (ekvatora yakın bölgeler) yazın, günün orta saatlerinde AM sayısı 1.5'ten azdır, ancak sabah ve akşam saatlerinde ve yılın diğer zamanlarında daha yüksek sayılar uygulanır. Bu nedenle, AM1.5, orta enlemler için genel yıllık ortalamayı temsil etmekte kullanışlıdır. Ayrıca AM1.5, 1970'lerde Amerika Birleşik Devletleri'ndeki güneş ışıını verilerinin analizine dayanarak standartlaştırma amaçları için seçilmiştir [78]. O zamandan beri, güneş endüstrisi, yoğunlaştırma sistemlerde kullanılanlar da dâhil olmak üzere, tüm standartlaştırılmış test veya yerel güneş hücreleri veya modüllerin derecelendirmesi için AM1.5 kullanmaktadır. Hava Kütlesi değerleri Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Hava Kütlesi (AM).

AM1.5 standartları ASTM G-173 ve IEC 60904'tür ve tümü SMARTS kodundan elde edilen simülasyonlardan türetilmiştir. ASTM G-173 referans değerlerine göre oluşturulan AM0, AM1.5G ve AM1.5D spektral ışınlam değerlerinin dalga boylarına göre dağılımları Şekil 3.4'te gösterilmiştir [79]. Burada "G" ile AM1.5G spektrumu küresel ışınlamı ifade ederken AM1.5D doğrudan gelen ışınlamı ifade etmektedir.

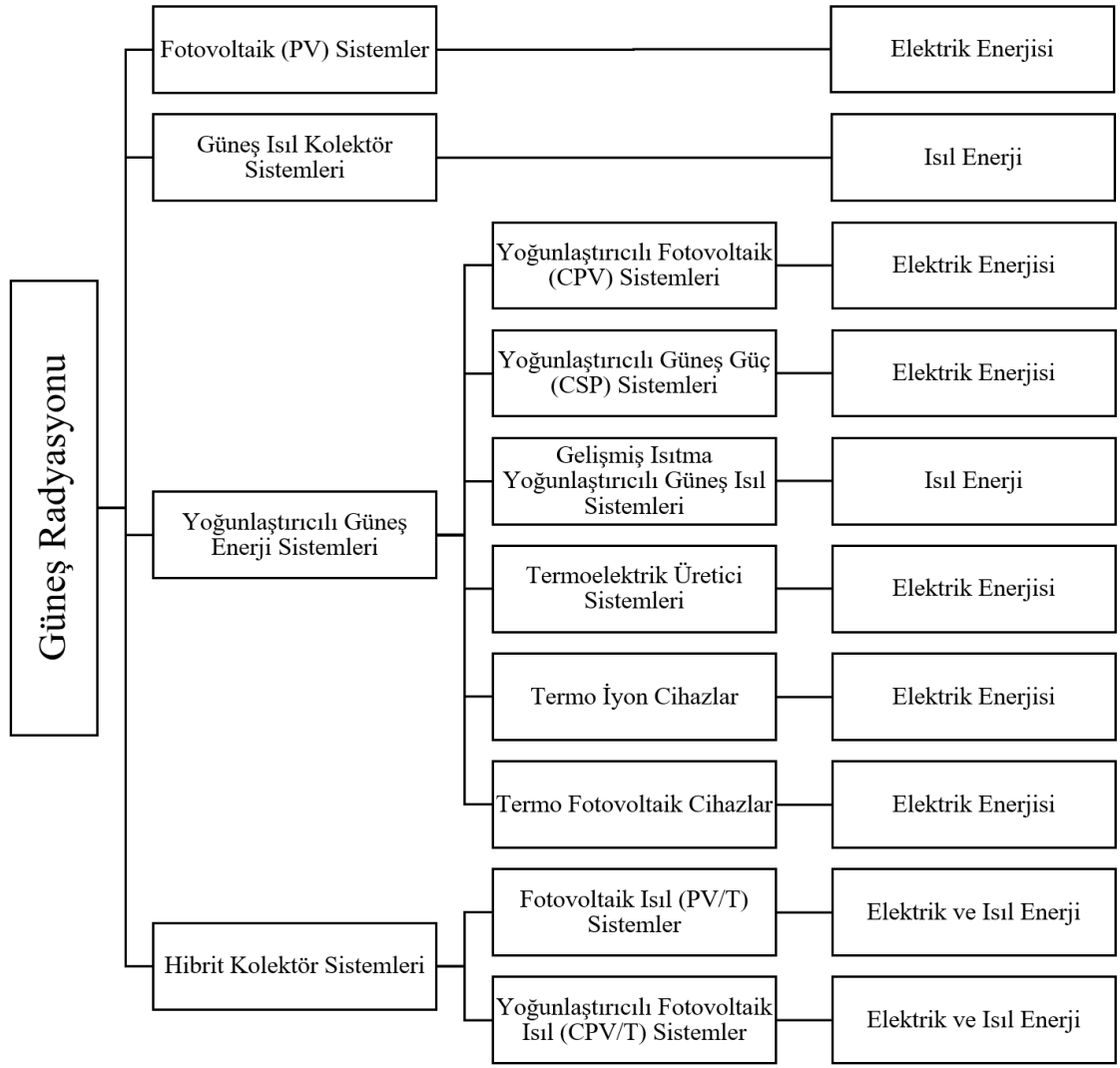


Şekil 3.4. ASTM G-173-03'e göre AM0-AM1.5G-AM1.5D referans güneş spektral ışınlam değerleri.

3.1. Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneş enerjisi, sınırsız ve yenilenebilir bir kaynaktır ve dünyanın enerji ihtiyaçlarının karşılanması için önemli bir potansiyele sahiptir. Güneş enerjisi sistemleri, güneş enerjisinin kullanılarak, bu enerjiden ısı, elektrik veya hem elektrik hem de ısı enerjisini beraber üreten sistemlerdir. Şekil 3.5'de güneş enerjisi sistemleri ve enerji dönüşümleri detaylı olarak gösterilmiştir [80].

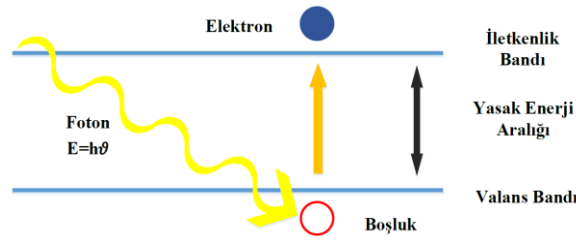
Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü için genellikle Fotovoltaik (PV) adı verilen güneş hücreleri kullanılmaktadır. Günümüzde bu hücrelerin verimliliklerini arttırmak için farklı teknolojiler, yaklaşımlar ve tasarımlar ile ilgili çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir.



Şekil 3.5. Güneş enerjisi sistemleri ve enerji dönüşümleri.

3.2. Güneş Hücresi

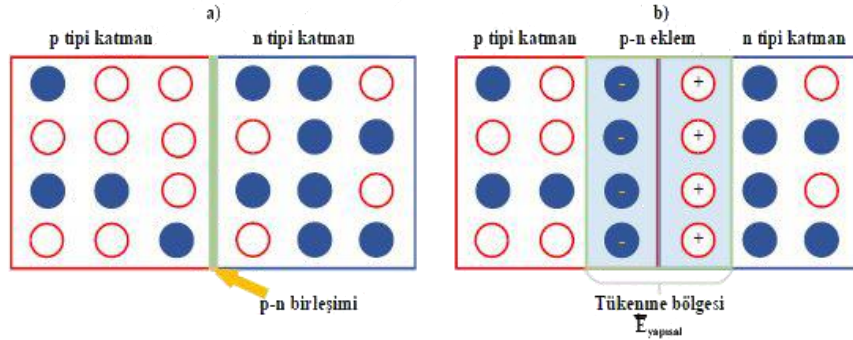
Güneş enerjisini, içerisinde herhangi bir mekaniksel hareket gerçekleştirmeden yarıiletkenler vasıtası ile doğrudan elektrik enerjisine çeviren cihazlara güneş hücresi adı verilir. Güneş hücreleri yapısal olarak basitçe p ve n tipi yarıiletken katmanlardan oluşmaktadır. Güneş ışığının soğurularak Fotovoltaik etki ile çalışan bu hücrelerde katmanlar arasında potansiyel fark oluşmaktadır. Güneş hücresinden elektrik enerjisi üretimi, kullanılan yarı iletkenin minimum yasak enerji aralığına eşit bir fotonun soğurulması ile elektronun valans bandından iletkenlik bandına geçmesi ile başlamaktadır. Böylelikle Şekil 3.6’da gösterildiği gibi bir elektron boşluk çifti oluşmaktadır.



Şekil 3.6. Elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmesi.

Güneş hücresinin p ve n tipi katmanları arasında p-n eklem bölgesinde bu oluşan elektron çifti birbirinden ayrılmakta ve güneş hücresi kontaktları arasında potansiyel fark meydana gelmektedir. Bu kontaktların bir direnç ile elektriksel devrenin tamamlanması sonucunda akım oluşmaktadır.

P-n eklemi bölgesinde, n tipi ve yarıiletken içindeki bazı elektronlar, p-tipi yarıiletken içine geçerek boşluklarla birleşmektedir. Benzer şekilde, p-tipi yarıiletken içindeki boşluklar da n-tipi yarıiletken içine geçerek elektronlarla birleşmektedir. Bu nedenle, elektronların ve boşlukların tüketildiği bu bölgeye "tükenme bölgesi" adı verilmektedir. Eğer ışık, yapısal elektrik alanının dışında, yani tükenme bölgesinin ötesinde düşerse, bir elektron-boşluk çifti yine oluşur. Ancak bu çiftin ayrılabilmesi için gerekli olan elektrik alan yoktur ve bu nedenle çift birleşerek kaybolur. Bu olaya rekombinasyon denir ve bu çiftler, akıma herhangi bir katkı sağlamazlar. Şekil 3.7’de p ve n tipi katmanların birleşimi ve tükenme bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Hücrede p ve n tipi katmanların a) birleşimi b) tükenme bölgesi oluşumu.

Bir güneş pilinin performansı, verimliliği ile gösterilir. Bir güneş pilinin verimliliği (η_{PV}), kısa devre akımı (I_{SC}), açık devre voltajı (V_{OC}), doldurma faktörü (FF) ve ölçülen maksimum gücü (P_{mpp}) içeren çalışma özelliklerine göre belirlenebilir. Bir güneş pilinin verimliliği, hücre tarafından üretilen gücün gelen foton gücüne oranıdır ve Denklem 3.5’deki gibi ifade edilir [11]:

$$\eta_{PV} = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{G} \quad (3.5)$$

burada, I_{SC} kısa devre akımını, V_{OC} açık devre voltajını, FF doldurma faktörünü ve G gelen foton gücünü ifade etmektedir.

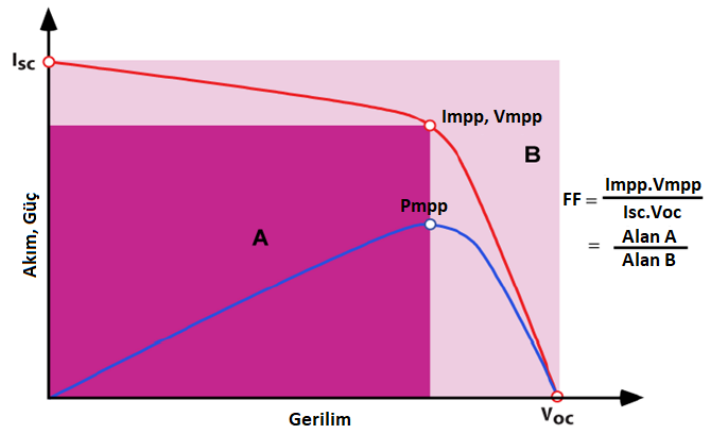
Kısa devre akımı, I_{SC} , güneş hücresinin ışık altında kontak noktalarının kısa devre edilmesi ile oluşan akım değeridir. Bu durumda hücredeki potansiyel fark sıfırdır ($V=0$) ve bu akım değeri güneş hücresinin maksimum ulaşabileceği akım değeridir. I_{SC} , hücredeki ışık konsantrasyonuna, ışık spektrumuna, dış kuantum verimliliğine ve optik özelliklerine (soğurma ve yansıma) bağlıdır.

Açık devre voltajı, V_{OC} , güneş hücresinin ışık altında kontak noktalarının arasında herhangi bir devre elemanın olmaması durumunda uçlar arasında oluşan gerilim değeridir. Bu durumda hücre üzerinden akım geçmemekte ($I=0$) ve oluşan potansiyel fark hücrede oluşabilecek maksimum gerilimi göstermektedir.

Doldurma faktörü, FF , güneş hücresi direnç altında elektriksel karakterizasyonu ifade eden I-V grafiğindeki minimum alanın, maksimum alana oranı olarak ifade edilir ve Denklem 3.6'daki gibi ifade edilir [11]:

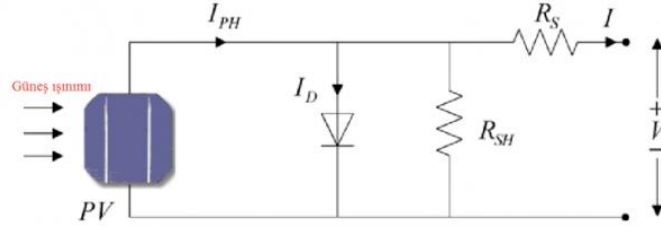
$$FF = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (3.6)$$

burada, I_{mpp} ve V_{mpp} hücreden elde edilen akım verim çarpımlarının en yüksek olduğu nokta yani maksimum güneş hücresi gücü noktasındaki akım ve gerilimi ifade etmektedir. Şekil 3.8'de güneş hücresi örnek I-V grafiği verilmiştir.



Şekil 3.8. Güneş hücresi akım gerilim (I-V) grafiği.

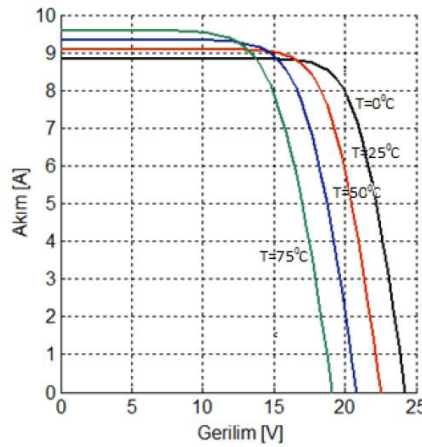
Güneş hücresinin basit bir eşdeğer elektrik devresi, güneş hücresi (akım kaynağı), diyot, seri ve şönt direncinden oluşmaktadır. Güneş hücresi tek diyot eşdeğer elektrik devresi Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Güneş hücresi eşdeğer elektrik devresi.

Güneş hücresinde, şönt ve seri direncin etkilerinden dolayı FF her zaman birden küçüktür. Bu tür etkiler tüm elektronik cihazlarda mevcuttur. Güneş pilleri p-n bağlantılı cihazlardır ve tüm p-n bağlantılı cihazlar diyot özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, ışık ortamında olmayan bir güneş pili, bir diyot ile aynı elektriksel özelliklere sahiptir. Işık altında güneş pili, bir diyota paralel bağlı bir akım kaynağı olarak kabul edilir.

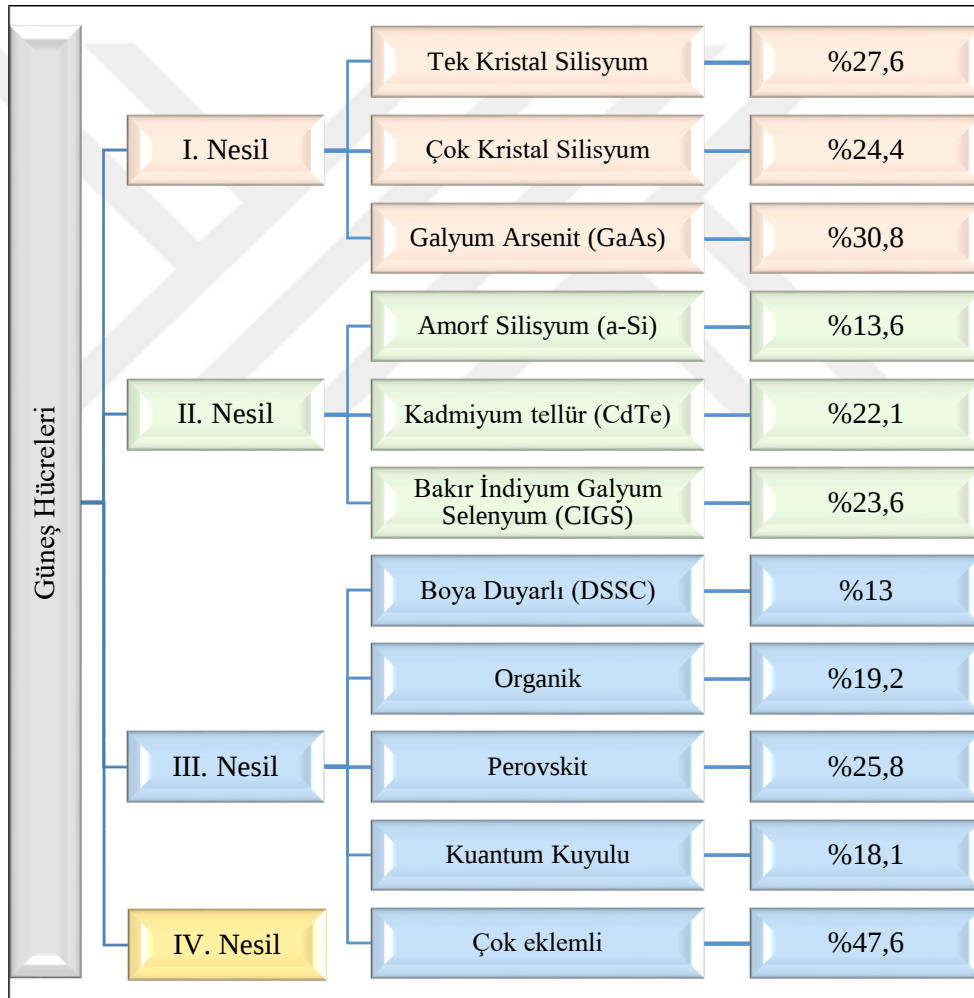
Bir güneş pilinin hem seri hem de şönt direnci, V_{oc} ve I_{sc} noktalarına yakın IV eğrisinin eğiminden tahmin edilebilir. Güneş pili verimliliği, şönt direncini artırarak ve seri direnci azaltarak optimize edilebilir. Bir güneş pili içindeki seri direnç kaynakları, iç direnci, yarı iletkenin üstündeki ve altındaki metal temas direncini içerir. Seri direnç bir güneş pilinin V_{oc} değerini etkilemez ancak elektrik hücresi akımını düşürerek FF 'yi etkiler. Şönt direnci normalde kötü tasarımlardan ziyade imalat hatalarından kaynaklanır. Düşük şönt direncine sahip güneş pilleri, akımın alternatif yollardan yönlendirilmesine izin verir ve daha düşük bir V_{oc} ve I_{sc} ile sonuçlanır. Güneş pilleri yarı iletkenlerle yapılır ve bu nedenle yarı iletken bir cihazın termal özelliğine sahiptir. Yarı iletken bir cihazda, sıcaklıktaki bir artış, malzemenin bant aralığı enerjisini azaltır. Genel olarak, daha yüksek sıcaklıklara sahip güneş pilleri, daha düşük bir açık devre gerilimi ile biraz daha büyük bir kısa devre akım yoğunluğu üretir. Aynı güneş hücresi farklı sıcaklıklarında elde edilen I-V grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Farklı sıcaklıklarda güneş hücresi I-V grafiği.

3.3. Güneş Hücresi Çeşitleri

1839 yılında fotovoltaiik olayın keşfinden sonra bu alanda çalışmalar artmış ve 1876 yılında bakır oksit ve selenyumdan meydana getirilen ilk güneş pili üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bu güneş pilinin verimliliğinin % 1-2 arasında olduğu rapor edilmiştir. Bundan sonra güneş pili üzerinde günümüze kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve farklı malzeme, tasarım ve teknolojiler kullanılarak birçok güneş pili üretilmiştir. Günümüzde laboratuvar ortamında güneş pillerinde 665 yoğunlaştırma oranı altında % 47,6 verimlilik değerine ulaşılmıştır [81]. Güneş hücreleri, üretim teknolojisi açısından Şekil 3.11’de gösterildiği gibi 4 Nesil altında incelenmektedir [82].



Şekil 3.11. Üretim teknolojilerine göre güneş hücreleri ve laboratuvar ortamındaki mevcut verimlilikleri.

3.3.1. I. Nesil Güneş Hücreleri

Silisyum (Si) tabanlı PV hücreleri, mikro elektronik endüstrisi tarafından sağlanan işleme bilgilerini ve ham maddelerini kullanarak pazara giren ilk fotovoltaiik sektörü oldu. Si tabanlı güneş

pilleri artık dünyanın kurulu kapasitesinin % 80'inden fazlasını oluşturuyor ve % 90 pazar payına sahip. Nispeten yüksek verimlilikleri nedeniyle, en yaygın kullanılan hücrelerdir. Birinci nesil, Si tabanlı tek kristal silisyum (Monokristal), çok kristal silisyum (Polykristal) ve bunun yanı sıra tek eklemlili Galyum Arsenit (GaAs) güneş hücrelerinden oluşmaktadır [83, 84].

3.3.1.1 Tek Kristal Silisyum Güneş Hücresi (c-Si)

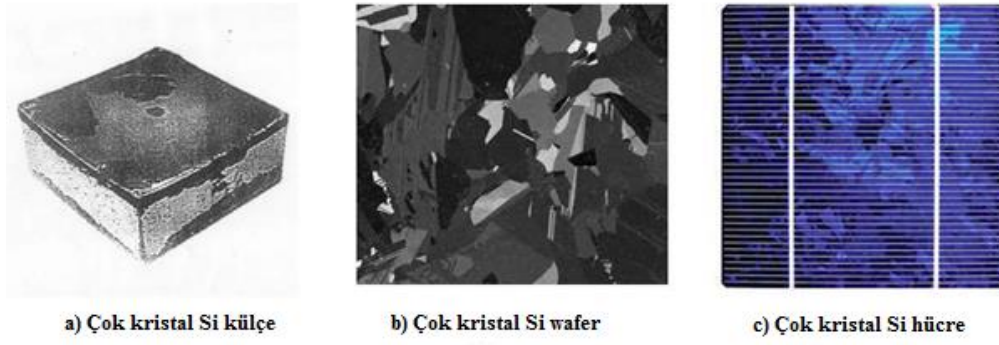
Tek kristal hücreler yüksek saflıkta eritilmiş Si'nin bir kılavuz ile çekilmesi sonucunda oluşan kristal külçenin 150-200 mikron kalınlıkta kesilmesi ile oluşur. Bu hücrelerde, saf tek kristal Si üretim teknolojisinin, çok kristal Si üretimine kıyasla daha maliyetli olması sebebi ile daha pahalı bir güneş hücresidir. Teorik olarak verimi % 29,4, laboratuvar şartları altındaki en iyi verimi yoğunlaştırma olmadan % 26,1 [82] ve 93X yoğunlaştırma altında % 27,6 [85] iken açık hava şartlarındaki verimliliği % 15-19 arasındadır [80]. Şekil 3.12'de tek kristal güneş hücresi gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Tek kristal güneş hücresi.

3.3.1.2 Çok Kristal Silisyum Güneş Hücresi (mc-Si)

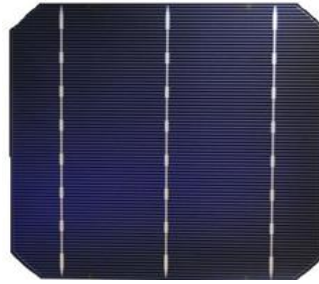
Si maliyeti, bir güneş pili maliyetinin önemli bir bölümü olduğundan dolayı bu maliyetleri azaltmak için büyük çalışmalar yapılmıştır. Blok döküm yöntemi yetmişli yıllara kadar uzanır ve pahalı çekme işlemine alternatif bir teknolojidir. Bu teknolojiye Si eritilir ve kare SiO/SiN-kaplanmış grafit pota içine dökülür. Kontrollü soğutma ile büyük kristal tane yapısına sahip çok kristal silikon blok üretilmiş olur [86]. Üretim teknoloji sebebi ile tek kristal güneş hücresine göre nispeten daha ucuz bir teknolojidir. Teorik olarak verimi % 29,4 [42], laboratuvar şartları altındaki en iyi verimi % 24,4 [85] iken açık hava şartlarındaki verimliliği % 13-15 [42] arasındadır. Şekil 3.13'de çok kristal güneş hücresi gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Üretilen çok kristal Si; a) külçe, b) wafer, c) güneş hücresi.

3.3.1.3 Galyum Arsenit (GaAs) Güneş Hücresi

Kristal galyum Arsenit (GaAs) güneş hücresi, metal-organik kimyasal buhar çöktürme veya sıvı faz epitaksi yöntemleri kullanılarak imal edilebilirler. Teorik olarak verimi % 38 [87], laboratuvar şartları altındaki en iyi verimi yoğunlaştırma olmadan % 29,1 ve 61X yoğunlaştırma altında % 30,8 [82]. Maliyet yüksekliği ve üretim sürecinin uzunluğundan dolayı pazar payının % 1'den daha azını oluşturmaktadır [63]. Üzerine gelen güneş ışınlarını daha kısa mesafede soğurabildikleri için daha incedirler (3-5 μm). Bu nedenle kavisli yüzeylere yerleştirilebilen hafif, esnek cihazlar olarak üretilebilir. Sıcaklığa olan hassasiyet düşüklüğü ve dayanıklılığı sebebi ile uzay uygulamalarında ve yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılabilmektedirler. Şekil 3.14'de GaAs güneş hücresi gösterilmiştir.



Şekil 3.14. GaAs güneş hücresi.

3.3.2. II. Nesil Güneş Hücreleri

II. Nesil güneş hücreleri, ince film güneş hücrelerinin bulunduğu sınıftır. İnce film güneş hücreleri I. Nesil kristal silisyum tabanlı güneş hücrelerine daha düşük maliyetli alternatif güneş hücreleri olacak şekilde tasarlanmıştır. Esnek uygulamalar için ideal olan gelişmiş mekanik özellikler sunarlar, ancak bu, verimliliğin düşmesi riskini de beraberinde getirir. İlk nesil güneş pilleri bir mikro elektronik örneği, ince filmlerin evrimi yeni büyütme yöntemleri gerektirdi

ve sektörü elektrokimya da dâhil olmak üzere diğer alanlara yönelmiştir. II. Nesil güneş hücreleri Amorf silikon (a-Si), Bakır indiyum galyum selenyum (CIGS) ve Kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş hücrelerinden oluşmaktadır.

3.3.2.1 Amorf silisyum (a-Si) ince film güneş hücreleri

İnce film güneş hücreleri, kristalin silikon güneş hücrelerine kıyasla daha düşük maliyetli bir alternatif sunmaktadır. Amorf silisyum (a-Si) ince film güneş hücreleri, 1970'lerin başlarında keşfedildi ve geliştirilmeye başlandı.

Amorf silisyum (a-Si), genellikle plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) adı verilen bir üretim yöntemi kullanılarak üretilir. PECVD, düşük sıcaklıkta çalışan bir yöntemdir ve ince film tabakalarının oluşturulması için yaygın olarak kullanılır. Amorf silisyum üretimi için, silikon tetraklorür (SiCl_4) veya silan (SiH_4) gibi silisyum bileşikleri, bir plazma reaktöründe kullanılır. Bu reaktörde, gaz halindeki silisyum bileşikleri, elektrik enerjisi yardımıyla plazma haline getirilir. Plazma, silisyum atomlarına ayrışır ve bu atomlar, alt tabakada biriktirilmek üzere bir substrat üzerine çöktürülür. Alt tabaka sıcaklığı, PECVD sürecinde önemli bir parametredir. Genellikle 150-300°C arasında nispeten düşük bir sıcaklık kullanılır. Bu düşük sıcaklık, malzemenin cam veya plastik gibi düşük maliyetli substratlara çöktürülmesini mümkün kılar. Ayrıca, düşük sıcaklık, enerji tasarrufu sağlar ve maliyetleri azaltır [88].

Amorf silisyum ince film güneş hücrelerinin en önemli avantajlarından biri, düşük ışık koşullarında iyi performans gösterme yetenekleridir. 300 nm kalınlığındaki bir amorf silisyum hidrojen (a-Si:H) katmanı, güneş ışığının yaklaşık % 90'ını tek bir geçişte soğurabilmektedir. Bu hücreler, bulutlu havalarda veya iç mekanlarda da etkili bir şekilde enerji üretebilirler. Diğer güneş hücreleri türlerine kıyasla daha iyi bir düşük ışık tepkisi sunarlar. Ayrıca, amorf silisyum güneş hücreleri esnek substratlar üzerine uygulanabilmektedir. Bu, hücrelerin farklı şekil ve yüzeylere kolayca entegre edilebilmesini sağlar. Esnek substratlar, hücrelerin daha hafif, ince ve taşınabilir olmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede giyilebilir elektronik cihazlar veya mobil cihazlar gibi farklı uygulamalarda kullanılabilmektedirler. Amorf silisyum hücreleri, düşük verimlilikleri nedeniyle, genellikle küçük ölçekli uygulamalar için tercih edilir. Ancak, son yıllarda yapılan çalışmalar, amorf silisyum hücrelerinin verimliliklerinin artırılması yönünde önemli ilerlemeler kaydetti. Bu ilerlemeler sayesinde, amorf silisyum hücreler, büyük ölçekli güneş enerjisi projeleri veya entegre bina uygulamaları gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Teorik olarak verimi % 27 [80], laboratuvar şartları altındaki en iyi verimi % 13,6 [85] iken açık hava şartlarındaki verimliliği % 5-8 [80] arasındadır. Pazar payının % 3'ünü oluşturmaktadır. Şekil 3.15'de a-Si güneş hücresinden oluşan bir modül gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Amorf silisyum hücre paneli.

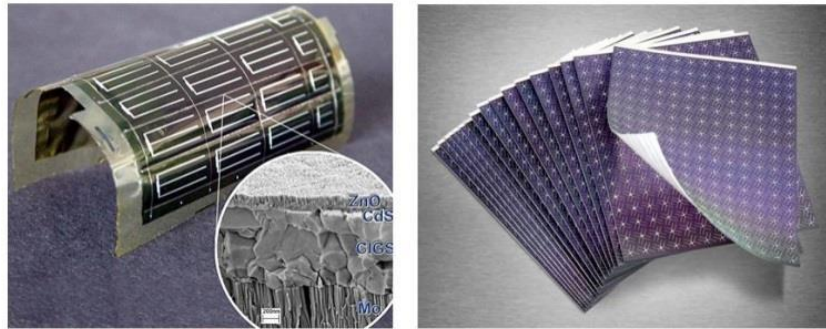
3.3.2.2 Bakır indiyum galyum selenyum (CIGS) ince film güneş hücreleri

Bakır indiyum galyum selenyum (CIGS) güneş hücrelerinin üretimi, CIGS malzemesinin vakum altında çökeltilmesiyle gerçekleştirilir. Bu malzeme, bakır, indiyum, galyum ve selenyum elementlerinden oluşan bir bileşiktir. Üretim sürecinde, CIGS tabakası çeşitli tekniklerle malzeme üzerine depolanır. CIGS hücreleri, cam, metal film veya polimer gibi farklı malzemelere uygulanabilir. Cam, rijit modüllerin üretiminde kullanılırken, metal ve polimer filmler daha hafif veya esnek modüllere olanak sağlar.

CIGS hücrelerinin üretiminde kullanılan yöntemler arasında metal öncüllerinin sülfoselenizasyonu, reaktif birlikte çökeltme, elektro-kaplama ve çözelti işleme bulunur. CIGS hücreleri genellikle cam malzeme üzerine mknatıs püskürtme yöntemiyle bir dizi ince film tabakası şeklinde üretilir. Bu tabakalar arasında alt tabaka olarak molibden (Mo) elektrotu, CIGS emici tabakası, CdS tampon tabakası ve çinko katkılı oksit (ZnO:Al) üst elektrotu bulunur.

CIGS güneş hücreleri, geniş çalışma spektrumu, yüksek verimlilik, esneklik ve çevresel etki açısından diğer fotovoltaik teknolojilere kıyasla daha avantajlı bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

CIGS hücrelerinin, teorik olarak verimi % 29, laboratuvar şartları altında en iyi 15X yoğunlaştırmada % 23,3 ve yoğunlaştırma olmadan % 23,6 iken ticari ölçekte % 7-11 arasında verimlilik değerine sahiptir. CIGS güneş hücresi Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. CIGS ince film güneş hücresi.

3.3.2.3 Kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş hücreleri

CdTe kristal yapısı, Cd ve Te atomlarının bir araya gelmesiyle oluşur. Düşük maliyetli malzemelerden üretildiği için diğer güneş hücreleri teknolojilerine göre daha ekonomiktir. Cd ve Te gibi malzemeler doğal olarak bol miktarda bulunur ve ucuzdur. CdTe, doğal olarak yüksek bir ışık emilim katsayısına sahiptir, bu da güneş ışığını etkin bir şekilde absorbe etmesini sağlar. Bu, bulutlu havalarda veya düşük güneş ışığı yoğunluğuna sahip bölgelerde bile etkili bir şekilde çalışabilecekleri anlamına gelmektedir. CdTe güneş hücreleri genellikle ince film deposisyon teknikleri kullanılarak üretilir. CdTe hücrelerinin çevresel etkisi, diğer güneş hücreleri teknolojilerine kıyasla daha düşüktür. CdTe'nin toksisite seviyesi düşüktür ve geri dönüştürülebilir malzemeler içermektedir.

CdTe hücrelerinin, teorik olarak verimi % 30, laboratuvar şartları altında en iyi verimi % 22,1 iken ticari ölçekte % 8-11 arasında verimlilik değerine sahiptir. CdTe güneş hücresi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



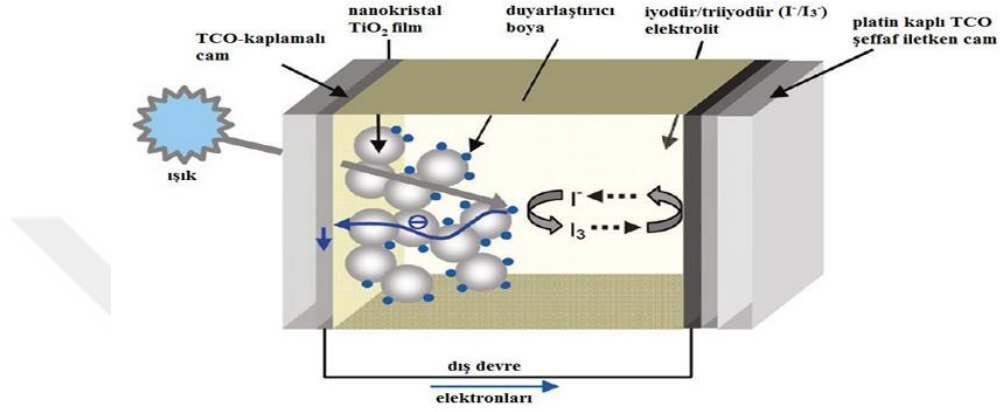
Şekil 3.17. CdTe güneş hücresi.

3.3.3. III. Nesil Güneş Hücreleri

Geleneksel güneş hücreleri yıllardır güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmede önemli bir rol oynamıştır. Ancak, sürekli olarak daha yüksek verimlilik, daha düşük maliyetler ve daha çevre dostu seçenekler arayışıyla güneş enerjisi teknolojilerinde yeni bir nesil hücreler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu yeni nesil hücreler, III. nesil güneş hücreleri olarak adlandırılmaktadır. III. nesil güneş hücreleri, bazıları 25 yıldan uzun süredir çalışılmış olsa da, zayıf pazar nedeniyle bazen "gelişmekte olan kavramlar" olarak anılır [89]. III. nesil güneş hücreleri, bina entegrasyonundan uzay uygulamalarına kadar uzanan uygulamalar için ucuz düşük verimli sistemlerden pahalı yüksek verimli sistemlere kadar geniş bir yaklaşım yelpazesini temsil eder. Üretim teknolojisi ve verimlilik iyileştirmelerine ilişkin en ileri çalışmalar artık III. nesil güneş hücreleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC), organik güneş hücreleri, perovskit güneş hücreleri, kuantum kuyulu güneş hücreleri ve çok eklemlili güneş hücreleri (III-V grubu güneş hücreleri) III. Nesil güneş hücreleri sınıfında yer almaktadır.

3.3.3.1 Boya duyarlı güneş hücresi (DSSC)

Konjuge polimerler ve organik yarı iletkenler, düz panel ekranlarda ve LED’lerde başarılı olmuştur, bu nedenle mevcut nesil fotovoltaik hücrelerde gelişmiş malzemeler olarak kabul edilirler. Boyaya duyarlı organik fotovoltaik hücrelerin (DSSC’ler) şematik bir gösterimi Şekil 3.18’de gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Boya duyarlı güneş hücresi şematik gösterimi.

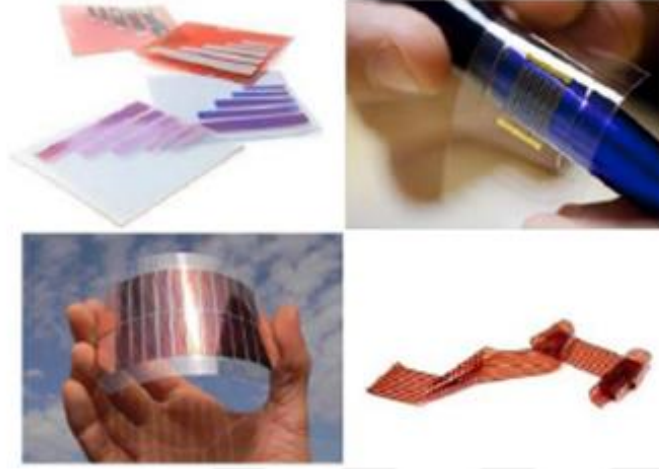
Temel olarak, DSSC’ler, yüksek gözenekli bir titanyum dioksit (TiO_2) tabakasının üzerine emdirilmiş bir organik boya katmanı ve bir elektrolit çözeltisinden oluşur. Güneş ışığı, organik boyalar tarafından absorbe edilir ve elektronlar uyarılır. Uyarılan elektronlar, TiO_2 tabakasında iletkenine doğru hareket eder ve bir devre üzerinde elektrik akımı oluştururlar. Bu akım, güneş enerjisini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır.

DSSC’ler, basit imalatları, düşük malzeme maliyetleri ve şeffaflık, renk kapasitesi ve mekanik esneklikteki faydaları nedeniyle fotovoltaik cihazlar olarak umut vaat ediyor. DSSC’lerin ticarileştirilmesindeki ana zorluklar, zayıf fotoelektrik dönüşüm verimliliği ve hücre kararlılığıdır. Erişilebilir en yüksek teorik enerji dönüştürme verimliliği, DSSC’ler için % 32 olarak tahmin edilmiştir; ancak bugüne kadar bildirilen en yüksek verimlilik yalnızca % 13’tür [85].

3.3.3.2 Organik güneş hücresi

Organik güneş hücreleri (OGH) iki metal elektrot arasına yerleştirilen aktif katman bölgesinde organik malzemelerin kullanılması ile elektrik üreten hücrelerdir. OGH’lerde kullanılan organik malzemeler genellikle iki ana kategoriye ayrılır: polimerler ve küçük moleküller. Polimer tabanlı OGH’ler düşük maliyetli işleme ve esneklik gibi avantajlar sunarken, küçük moleküller daha iyi cihaz performansı için hassas moleküler kontrol sağlar. Aktif malzemenin güneş spektrumuyla eşleşecek şekilde emilim spektrumunun ayarlanması bu hücrelerin en büyük

avantajlarındandır. Ancak bu hücrelerde kullanılan organik malzemelerin çevresel dirençleri çok zayıf olduğundan, ömürleri kısadır. Şekil 3.19’da organik güneş hücreleri örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Organik güneş hücresi.

OGH’lerinin laboratuvar şartları altındaki en iyi verimi % 19,2 [85] iken açık hava şartlarındaki verimliliği % 3-4 [80] arasındadır.

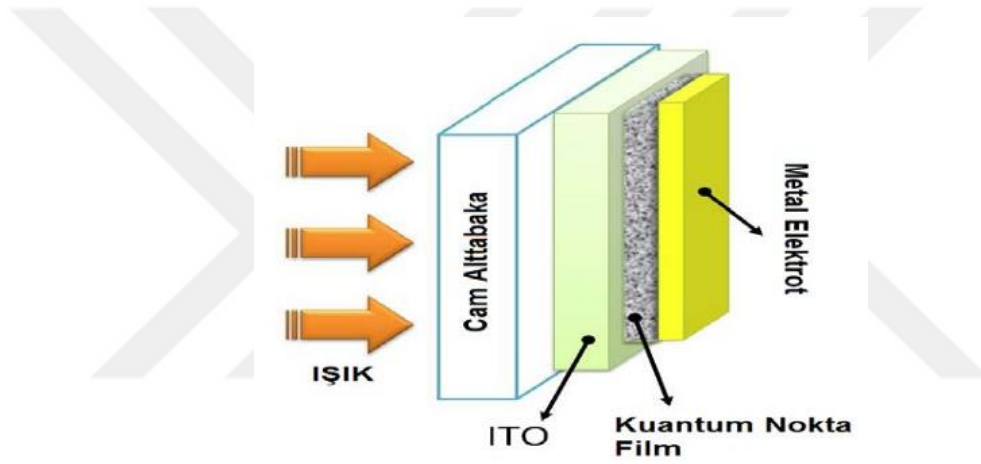
3.3.3.3 Perovskit güneş hücresi

Perovskit güneş hücreleri, yüksek verimlilik potansiyeli ve düşük maliyetleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Perovskit malzemeleri, kimyasal formülü ABX_3 olan kristal yapıya sahip malzemelerdir. Tipik olarak, bir metal katyonu (A), bir pozitif yüklü iyon (B) ve bir negatif yüklü iyon (X) içerirler. Perovskit güneş hücrelerinde en yaygın olarak kullanılan perovskit malzemesi, metil amonyum kurşun halür perovskitidir ($CH_3NH_3PbI_3$). Perovskit malzemeleri, düşük işleme sıcaklıklarında çözelti işleme yöntemleriyle üretilmektedir. Perovskit güneş hücreleri, güneş ışığının enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için bir p-n birleşimi prensibine dayanır. Perovskit tabakası, güneş ışığını emerek içerisinde elektron/hole çiftlerinin oluşmasını sağlar. Bu çiftler, elektron taşıyıcı malzemeler aracılığıyla ayrıştırılır ve dış devre üzerinden elektrik akımı olarak toplanır. Elektronlar bir elektron taşıyıcısı aracılığıyla anot elektrotuna, boşluklar ise elektrolit tabakası üzerinden katot elektrotuna yönlendirilir. Bu akış, elektriksel enerji üretir ve hücrenin çalışmasını sağlar. Laboratuvar şartlarında verimlilikleri % 25,8’e ulaşmıştır [85]. Ancak bu güneş hücrelerinin kararlılık ve dayanıklılık sorunları hala mevcuttur. Malzemelerin nem, ısı ve oksidasyona karşı duyarlı olması, hücrelerin uzun ömürlü kullanımını kısıtlamaktadır.

3.3.3.4 Kuantum kuyulu güneş hücresi

Kuantum noktaları (QD'lar) adı verilen malzemelerden yapılan güneş pilleridir ve aynı zamanda nano kristal güneş pilleri olarak da bilinir. Kuantum noktaları, nanometre boyutunda yarı iletken kristallerdir ve boyutlarına bağlı olarak farklı enerji seviyelerine sahiptirler. Boyutları değiştirilerek foton enerjisinin absorbe edildiği ve elektron/hole çiftlerinin oluştuğu spesifik enerji seviyeleri ayarlanabilir. Nano kristal hücreler nispeten yüksek absorpsiyon katsayılarına sahiptir ve boyutları değiştirilerek enerji seviyelerinin ayarlanabilmesi en büyük avantajlarıdır [90].

Bu hücrelerin teorik verimleri % 44 [91] olmasına rağmen laboratuvar şartları altında yayınlanan en yüksek verim % 18,1'dir [85]. Buda bu hücrelerin geliştirmeye açık olduğunu göstergesidir. Şekil 3.20'de kuantum kuyulu güneş hücresinin şematik görüntüsü verilmiştir.



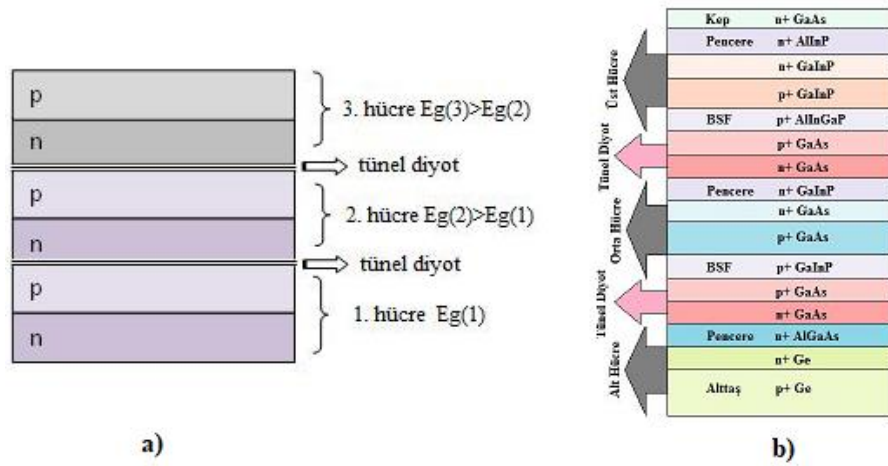
Şekil 3.20. Kuantum kuyulu güneş hücresi şematik görüntüsü.

3.3.3.5 Çok eklemli güneş hücresi

Geleneksel tek eklemli güneş hücreleri, yalnızca dar bir spektral bant aralığında verimli çalışabilirler. Ancak, güneş ışığının geniş bir yelpazesini kullanarak verimliliği artırmak için daha gelişmiş hücre yapılarına ihtiyaç vardır. Bu noktada, çok eklemli (multi-junction) III-V grubu olarak da adlandırılan güneş hücreleri önem kazanmaktadır.

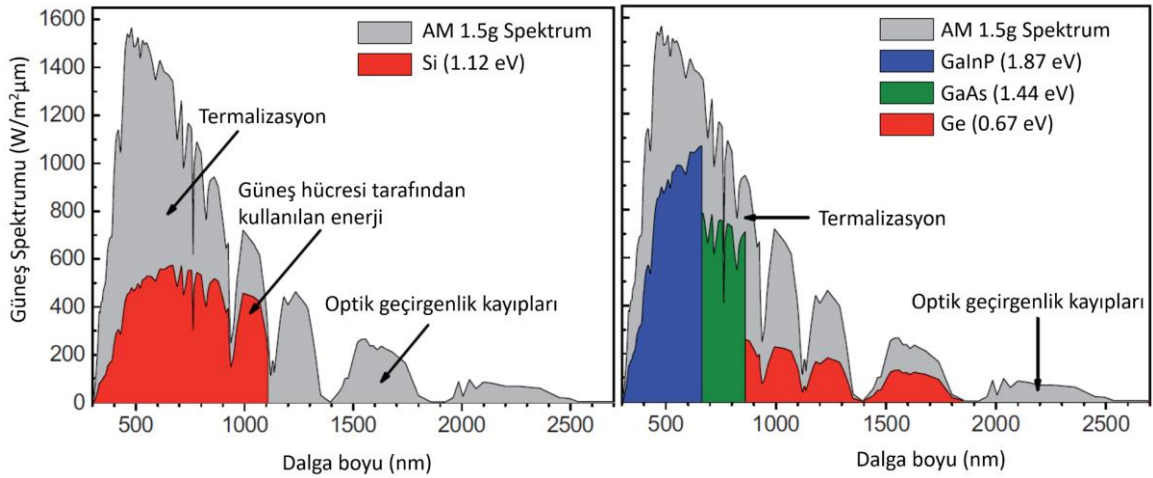
Periyodik tablonun III. grubunda bulunan (Al, Ga, In) ve V. grubunda bulunan (N, P, As, Sb) yarıiletkenlerin uygun bir biçimde farklı katkılama oranlarında birleşmesi (GaInP, GaInAs, GaAs, GaAsSb vb.) farklı enerji seviyelerine (E_g) sahip tabakalar oluşturulabilmektedir.

Çok eklemli veya III-V grubu güneş hücreleri, alt hücrenin en düşük enerji seviyesine sahip ve üst hücrenin en yüksek enerji seviyesine sahip birden fazla yarıiletken malzeme tabakasının bir araya getirildiği yapılar olarak tanımlanır. Şekil 3.21'de çok eklemli güneş hücresinin şematik yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Çok eklemlili güneş hücresi a) şematik görüntüsü b) yapısı.

Her bir tabaka, farklı enerji bant yapısına sahip yarıiletken malzemelerden oluştuğundan, güneş ışığının farklı dalga boylarını emerek daha geniş bir spektral bant aralığında çalışmayı mümkün kılar. Şekil 3.22’de geleneksel kristal silisyum yapılı güneş hücresi ve çok eklemlili güneş hücresinin, güneş ışıının spektrumu altındaki çalışma aralığı gösterilmiştir [92].

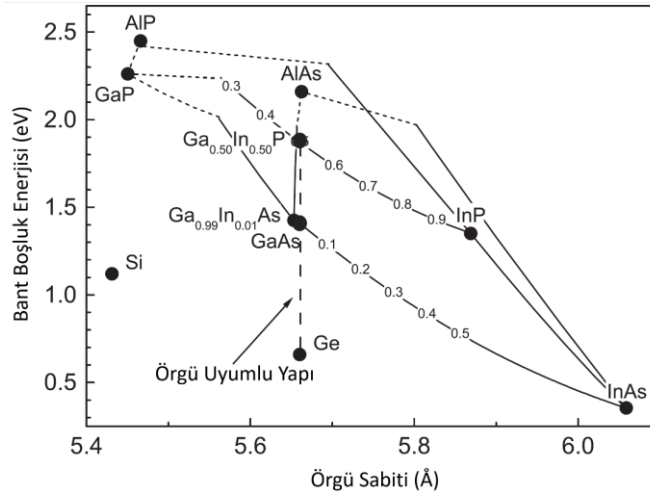


Şekil 3.22. Güneş spektrum kullanımı a) silisyum güneş hücresi b) 3 eklemlili güneş hücresi.

Çok eklemlili güneş hücreleri geniş spektral bant aralığı kullanarak çalıştığından yüksek verimlilik değerleri elde edilebilmektedir. Bu hücrelerin teorik olarak verimi %68 olarak hesaplanmıştır. Laboratuvar şartları altındaki 3 eklemlili güneş hücresi için yoğunlaştırma olmadan en iyi verimi % 39,46 iken, 302X yoğunlaştırma altında % 44,4 olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde 4 eklemlili güneş hücresi için yoğunlaştırma olmadan en iyi verimi % 39,2 iken, 665X yoğunlaştırma altında % 47,6 olarak ölçülmüştür ve bu değer bugüne kadar PV güneş hücrelerinde kaydedilen en yüksek elektriksel dönüşüm verimliliği olma özelliği taşımaktadır. Yüksek verim ve dayanımları

sayesinde uzay araştırmaları, uydu sistemleri ve askeri alanlarda kullanılabildiği gibi ticari ve endüstriyel güneş enerjisi projelerinde tercih edilir.

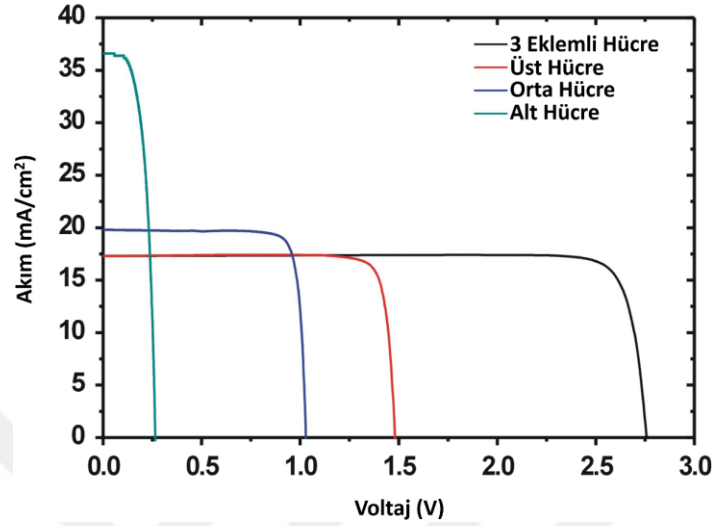
Çok eklemlili güneş hücrelerinde yarı iletken tabakalar farklı enerji seviyelerine sahiptir ve bunların birleştirilmesinde seçilecek olan bu yarı iletkenlerin bant aralığı enerji değerlerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Güneş ışığını soğurma yeteneklerine göre güneş ışınımından maksimum faydalanabilmek için bu yarı iletkenlerin sahip oldukları bant aralığı enerjilerinin birbirine ne çok yakın nede uzak olmalıdır. Birbirine yakın olan aralıklarda aynı spektrum alanda çalışacakları için verim sağlanamayacağı gibi birbirinden çok uzak olduğuunda arada kalan spektrum kullanılamaz ve hücre üzerinde termal enerjiye dönüşür. Bu yüzden çok eklemlili yapılarda kullanılan yarıiletken tabakaların bant aralığı enerjilerinin güneş spektrumuna göre optimize edilmesi gerekmektedir. Güneş spektrumuna göre 3 eklemlili güneş hücresi için kullanılabilecek en uygun enerji bant değerleri 1,74, 1,17 ve 0,7 eV'dur. Ancak bu birleşimlerde bant aralığı enerjisi kadar örgü uyumları da (kafes sabiti) önemli bir etkidir. Her bir yarıiletken tabaka kristal yapılardan oluşmaktadır. Bu tip hücrelerde maksimum akım iletkenliği ve optik geçirgenlik için örgü uyumunun sağlanması gerekmektedir. Örgü uyumu (lattice-match), farklı yarıiletken malzemeler arasındaki kristal yapıların uyumlu olması anlamına gelir. Yakın zamana kadar ticari olarak kullanılan ve en iyi örgü uyumuna sahip 3 eklemlili güneş hücreleri $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$, $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ ve Ge alt hücrelerinden oluşmaktadır. şekil 3.23'de farklı yarıiletkenlerin bant aralığı enerjileri ve örgü uyum değerleri gösterilmiştir [93].



şekil 3.23. Farklı yarıiletkenlerin enerji boşluk ve örgü uyumu değerleri.

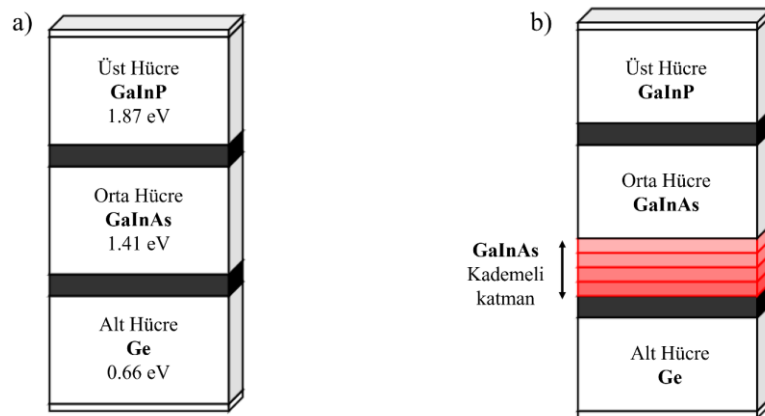
Ancak bu hücrelerde de temel sorun Ge alt hücrenin diğer iki hücreye kıyasla daha fazla güneş spektrumdan faydalanmasından dolayı aşırı akım üretimidir. Çok eklemlili güneş hücrelerinde her bir yarıiletken tabaka seri olarak birbirlerine bağlandığından hücre içerisinde minimum akım üreten hücrenin akımı toplam hücre akımına eşit olduğuundan Ge hücre tarafından üretilen aşırı akım

sistem üzerinde aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Şekil 3.24’de 3 eklemli örgü uyumlu güneş hücresi I-V karakteristiği gösterilmiştir [94].



Şekil 3.24. Örgü uyumlu 3 eklemli güneş hücresi I-V karakteristiği.

Çok eklemli örgü uyumlu güneş hücrelerinde bu aşırı akımı önlemek ve hücre verimliliğini yükseltmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve metamorfik olarak adlandırılan yapılar geliştirilmiştir. Bu hücrelerde farklı akım ve örgü uyumlu yarı iletken kullanımı (döndürülen metamorfik-inverted metamorfik) veya akım uyumlu örgü uyumsuz yarıiletkenlerin uyumsuz kristal yapılarını aralarda katmanlar kullanarak geliştirmeyi amaçlamaktadır (dik metamorfik-upright metamorfik). Günümüzde ticari olarak üretimi gerçekleştirilen çok eklemli güneş hücrelerin 3 eklemli dik metamorfik yapıya sahip güneş hücreleridir. Şekil 3.25’de örgü uyumlu çok eklemli güneş hücresi ile dik metamorfik güneş hücresinin yapısal olarak şematik karşılaştırılması verilmiştir [95].



Şekil 3.25. Çok eklemli güneş hücresi yapısı a) örgü uyumlu b) dik metamorfik.

3.3.4. IV. Nesil Güneş Hücreleri

Dördüncü nesil fotovoltaik hücreler, polimer tabanlı ince filmler kullanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren geleneksel fotovoltaik hücrelerin ötesine geçmektedir. Aynı zamanda bu hücreler nano fotovoltaik güneş hücreleri olarak da anılmaktadırlar. Bu hücreler, organik nano yapılarla birleştirilmiş inorganik malzemeleri kullanarak hem verimlilik hem de stabilite açısından daha iyi performans sağlamayı hedeflemektedir. Örneğin, metal nano partiküller veya metal oksitler, güneş ışığını daha iyi absorbe edebilir ve elektron taşınımını iyileştirebilir. Karbon nano tüpleri veya grafen gibi karbon tabanlı nano yapılar, yüksek iletkenlik ve mekanik esneklik sağlar. Bu şekilde, dördüncü nesil fotovoltaik hücreler, daha yüksek verimlilik, daha düşük maliyet, esneklik ve uzun ömür gibi avantajları bir arada sunar [96].

Nano fotovoltaikler, güneş enerjisi dönüşümünde yeni bir yaklaşım sunarak, daha iyi enerji verimliliği sağlama potansiyeline sahiptir. Ancak, bu teknolojinin ticari kullanıma geçmeden önce daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Dördüncü nesil fotovoltaik hücreler, fotovoltaik enerjinin gelecekteki gelişimi için heyecan verici bir adımdır ve temiz ve sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunabilecek önemli bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

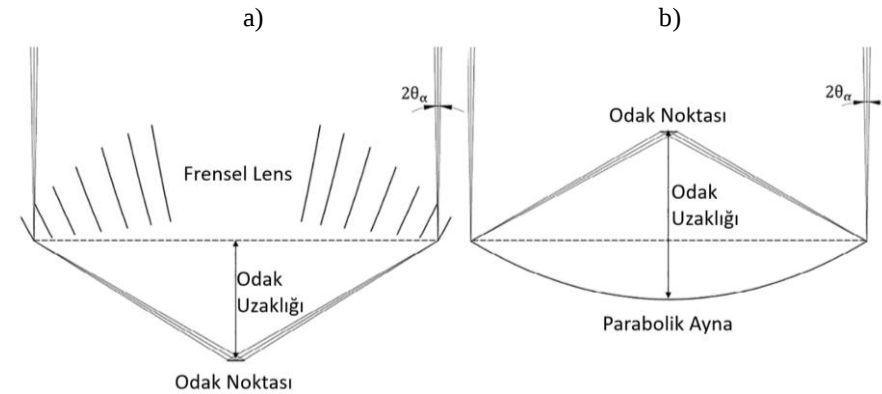
4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektör ile KOE kullanılarak sistemin hidrojen üretim potansiyeli sayısal olarak araştırılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için sistemin optik tasarım ve modeli, güneş hücresi modeli ve elektrolizör modeli sayısal olarak oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada optik tasarım için Zemax Optik Studio programı, CPV güneş hücresi elektrik modeli için MATLAB® programı, CPV güneş hücresi ısı model ve elektrolizör modeli için COMSOL multiphysics programı kullanılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilecek sayısal modeller optik model, CPV model ve elektrolizör model olarak 3 alt başlık altında detaylı olarak verilmiştir.

4.1. Optik Model

Güneş hücrelerinin, üzerine düşen güneş ışınının yoğunlaştırılması ile belirli bir seviyeye kadar verimliliklerinde artış gözlenmektedir. CPV veya CPV/T sistemler, güneş ışınlarını 2-1000X seviyesi aralarında yoğunlaştırarak güneş hücresinin üzerine düşmesini sağlarlar. Bu sistemlerde temel amaç hem yoğunlaştırmanın artırılarak güneş hücresinin daha verimli çalışmasını sağlamak hem de güneş hücresi gibi pahalı sistemler yerine çevreye zararsız daha ucuz maliyetli optik elemanların kullanılmasını sağlamaktadır [97]. Günümüzde güneş hücresini yoğunlaştırmak için genellikle aynalar, mercekler ve fresnel lensler kullanılmaktadır. Optik malzemeler ışığı, kırarak veya yansıtarak güneş hücresi üzerine düşürmektedir. Şekil 4.1’de Fresnel lens ile ışığın kırılarak ve ayna ile ışığın yansıtılarak güneş hücresi üzerine düşürüldüğü örnekler verilmiştir [98]. Yoğunlaştırılmış güneş hücreleri için yoğunlaştırma oranı Denklem 4.1’deki gibi ifade edilir [99]:

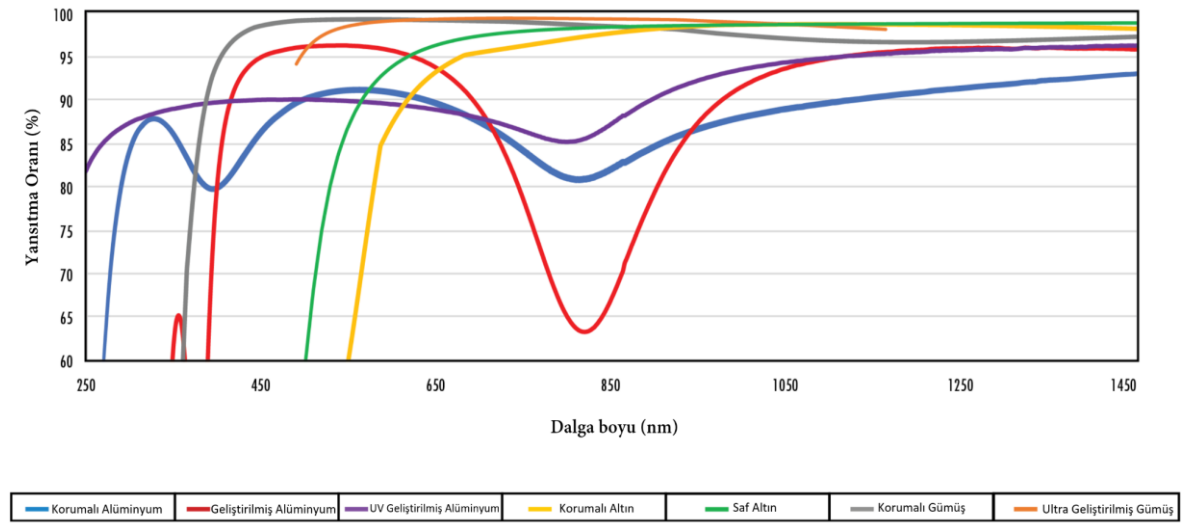
$$\text{Yoğunlaştırma Oranı} (X) = \frac{\text{Yoğunlaştırıcı Yüzey Alanı}}{\text{Hücre Alanı}} \quad (4.1)$$



Şekil 4.1. Gelen ışığın odaklanması a) kırılarak b) yansıtılarak.

CPV veya CPV/T sistemlerde optik verimlilik önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle optik sistem tasarımlarda % 85 optik verimlilik değeri temsili olarak referans alınmaktadır [100, 101]. Her sistemde olduğu gibi optik sistemlerinde kayıpları bulunmaktadır. Bu yüzden optik sistem tasarımında bu kayıpların minimize edilmesi gerekmektedir.

Optik sistemlerdeki kayıplardan bir tanesi optik malzemenin özelliklerinden ve geometrisinden kaynaklı oluşmaktadır. Bunlar optik elemanın ışığı soğurma ve kırılma indisinden kaynaklı yansıma-saçılma ile gerçekleşen kayıplardır. Şekil 4.2’de farklı malzemelere göre kaplanmış optik elemanın yansıtıcılık indisleri dalga boylarına göre gösterilmiştir [102]. Bu kayıplar yüksek yansıtıcılık indisine sahip malzemeler kullanılarak en aza indirilebilmektedir. Kullanılan optik elemanın geometrisine göre de yine kayıplar oluşabilmektedir.

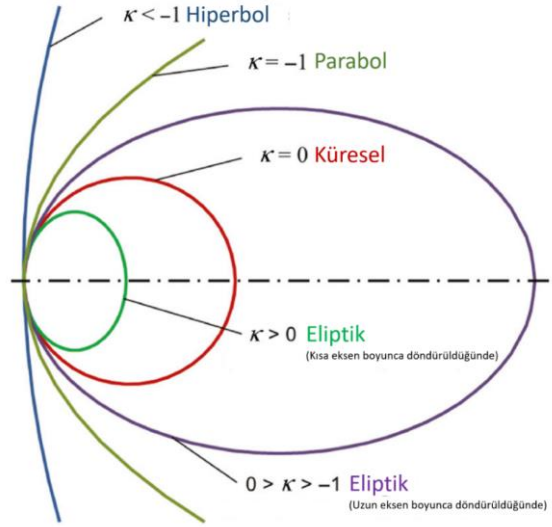


Şekil 4.2. Farklı malzemelerin dalga boylarına göre yansıtma oranları.

Kullanılan optik elemanın geometrisine göre de yine küresel bozulma kayıpları oluşabilmektedir. Küresel bozulma, küresel simetriye sahip optik sistemlerde görülen bir sapmadır. Genellikle mercek veya ayna yüzeylerindeki eğriliklerdeki düzensizlikler veya eğrilerin yanlış seçimi nedeniyle ortaya çıkar. Bu bozulma türünde, ışık ışını çeşitli dalga boylarında farklı odak noktalarında birleşir, yani farklı odak uzaklıkları sergiler. Bu da ışığın yansıtılan yere homojen düşmemesine, saçılmasına veya geri yansımaya sebep olmaktadır [103]. Bu nedenle, küresel bozunumu minimize etmek için optik tasarımda düzeltici optik elemanlar veya asferik yüzeyler kullanılabilir. Asferik lenslerin tanımlayıcı denklemi Denklem 4.2’deki gibi ifade edilebilir [104]:

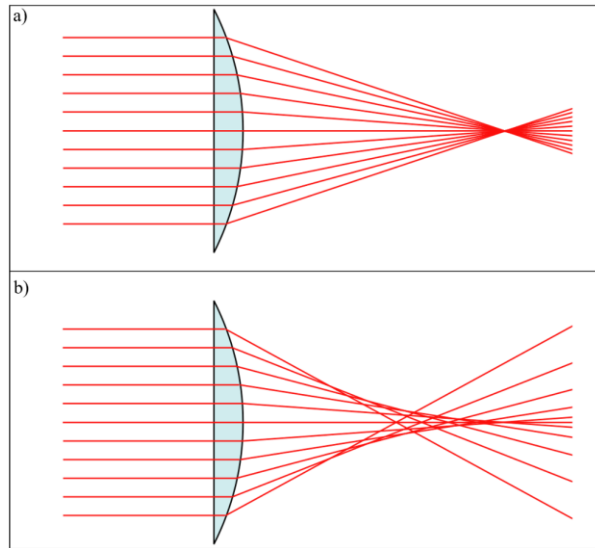
$$Z_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_e}\right)s^2}{1 + \sqrt{1 - \left(1 + \left(\frac{1}{K}\right)^2 s^2\right)}} + s^2 + s^2 \dots \quad (4.2)$$

burada, s merceğin merkezinden olan mesafeyi, R_e eğrilik yarıçapını, κ koniklik sabitini, A_4 ve A_6 asferiklik terimlerini ifade etmektedir. Şekil 4.3’de farklı geometrilerin koniklik sabitleri gösterilmiştir [105].



Şekil 4.3. Farklı geometriler ve koniklik sabitleri.

CPV sistemlerde yansıtıcı geometri olarak genellikle parabol geometriler kullanılmaktadır. Bunun sebebi küresel bozunma etkisini en aza indirerek odaklama verimliliği arttırmaktır. Şekil 4.3’de farklı geometrilerin koniklik sabitleri gösterilmiş olup, Şekil 4.4’de küresel bir ayna ile parabol ayna arasında küresel bozunma kaynaklı odak oluşumları karşılaştırılmıştır [106].



Şekil 4.4. Farklı geometrilerde oluşan odak noktası ve küresel bozunma a) parabol lens b)küresel lens.

Güneşin boyutu, geometrisi ve dünyaya olan uzaklığı göz önünde bulundurulduğunda güneş ışığının ışınlarının birleştiği noktada açısal bir dağılım oluşturur. Bu değer, güneş ışığının her bir ışınının, ortak bir noktada birleştiğinde, yatay ve dikey yönde $\pm 0,267$ derecelik bir açısal dağılıma sahip olduğunu gösterir [107]. Ayrıca CPV sistemlerde kullanılan güneş takip sistemlerinden kaynaklıda açısal hatalar meydana gelmektedir. Bu yüzden güneş ışınımının açısal dağılımı ve takip sistemlerinden kaynaklı hatalardan dolayı tasarlanacak CPV sistemlerde yüksek kabul açısı ($\pm 0,5$ - $1,5$ derece) tercih edilmektedir.

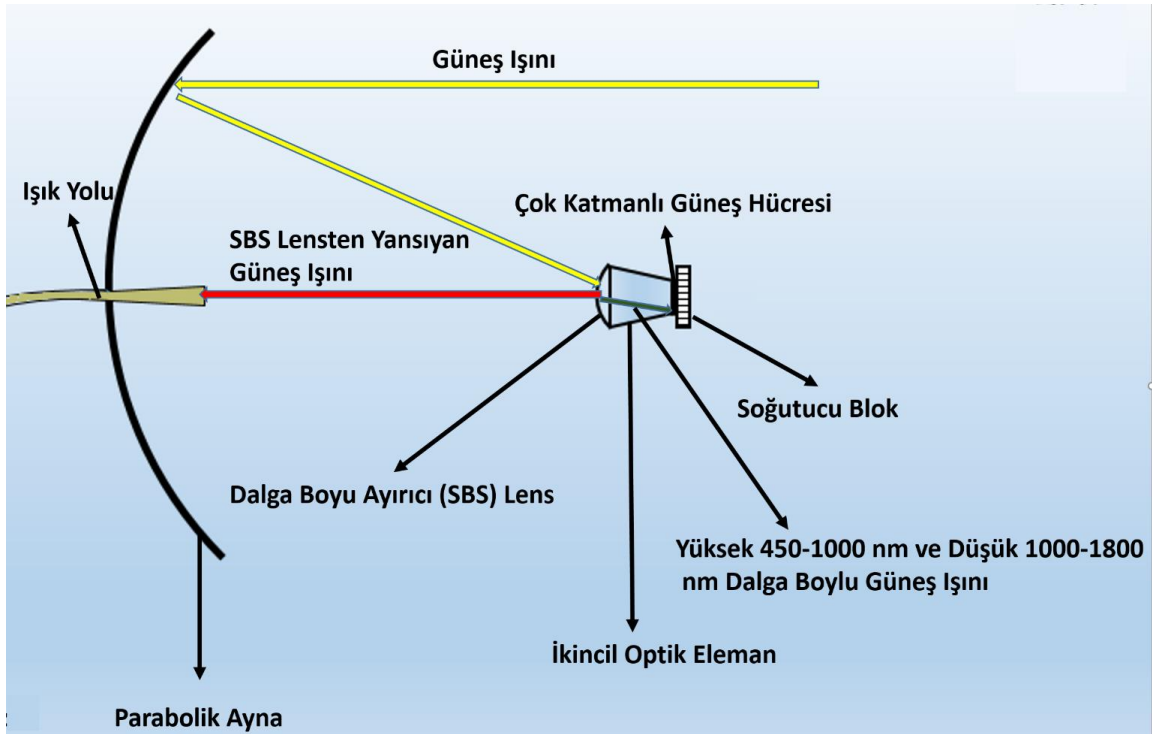
Güneş hücresi üzerine düşen ışınımın homojen dağılım sergilememesi CPV sistemlerde tasarım aşamasında çözülmesi gereken başlıca problemlerden bir tanesidir [108]. Homojen olmayan ışınım güneş hücresi üzerinde iki negatif etki yaratmaktadır [109]. Bunlardan birincisi, üniform olmayan ışınım durumunda, bazı bölgeler diğer bölgelere kıyasla daha fazla ışık alır. Bu durumda, aşırı ışınım alan bölgelerde büyük akımlar oluşur ve hücreler ısınır. Isınma, hücrelerin performansını etkiler ve hücre sıcaklığı yükseldikçe verim düşer. Ayrıca aşırı ısınma, hücrelerin ömrünü de kısaltabilir. Aynı şekilde, üniform olmayan ışınım nedeniyle bazı bölgelere çok az ışınım gelmektedir ve bu bölgelerde elektrik üretimi azalır. Sonuç olarak, hücrenin bazı bölgeleri çalışmaz hale gelir. Üniform olmayan ışınım durumunda hücre üzerinde gerçekleşecek ikinci etki ise, bazı bölgeler diğer bölgelere kıyasla daha fazla gölgelenir. Gölgelenme, hücrede üretilen elektrik enerjisinin, gölgelenen hücrelerde dağılmasına neden olur. Bu da verim kaybına yol açar. Ayrıca, aşırı gölgelenen bölgelerde enerji üretimi neredeyse durur ve bu hücreler ısınır. Isınma, hücre direncini artırır ve elektrik verimliliğini düşürür. Üniform olmayan ışınım nedeniyle enerjinin % 40'ının kaybedilebilir hatta hücre zarar görebilir. Hücrenin zarar görmesini engellemek için, üniform ışınım sağlamak ve gölgelenmeyi en aza indirmek, CPV sistemlerinin tasarımında ve optimizasyonunda önemli bir hedeftir. Bu sebeple CPV sistemlerde hem kabul açısını arttırmak hem de hücre üzerine düşen ışınımın homojen olmasını sağlamak amacı ile ikincil optik eleman kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında yoğunlaştırma oranı, optik kayıplar, homojen dağılım ve yüksek kabul açısı parametreleri göz önünde bulundurularak Cassegrain tipi SBS-CPV/T kolektör tasarımı güçlü bir optik tasarım programı olan Zemax Optic Studio programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zemax Optic Studio programına, akademik lisans başvurusu yapılmış ve firma tarafından uygun görülerek ücretsiz akademik lisans sağlanarak erişilmiştir. Ayrıca sistem tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilirken seçilen ekipmanlar ticari olarak erişilebilir olmasına önem verilmiştir. Cassegrain tipi SBS-CPV/T güneş kolektörü temelde 6 ana bileşenden oluşmaktadır.

Bunlar:

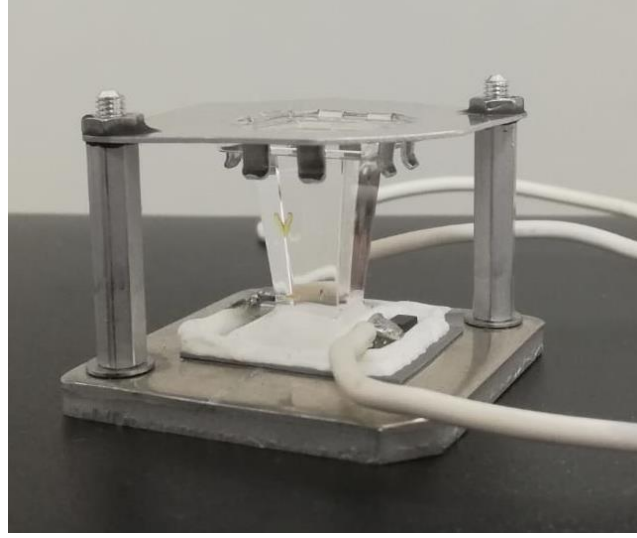
- Birincil ayna
- SBS lens
- İkincil optik eleman
- Işık yolu
- CPV 3 eklemli (GaInP/GaInAs/Ge) güneş hücre
- Pasif soğutucu bloktur.

Şekil 4.5' de tasarımı düşünülen Cassegrain tipi SBS-CPV/T güneş kolektörü şematik görüntüsü verilmiştir.



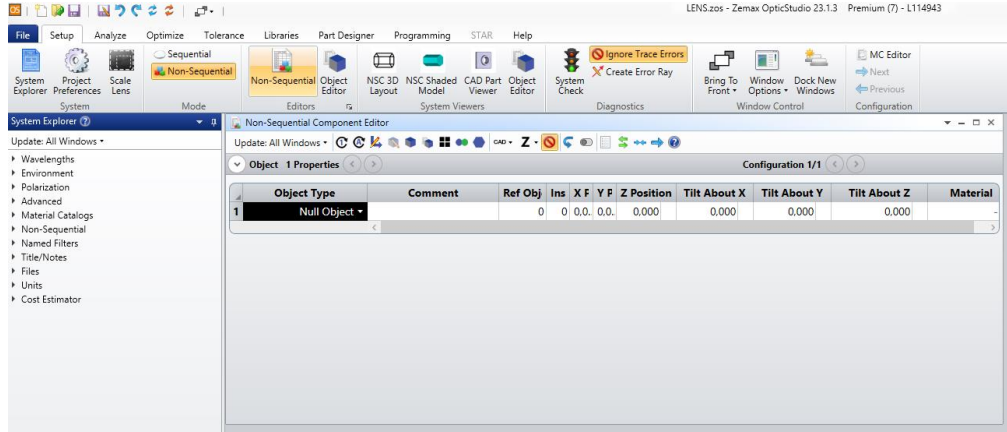
Şekil 4.5. Cassegrain tipi SBS-CPV/T güneş kolektörü.

Optik elemanların geometrilerini hesaplayabilmek için öncelikli olarak güneş hücresinin belirlenmesi gerekmektedir. Dünyadaki yoğunlaştırılmış güneş paneli üreticilerinden olan BSQ Solar firması tarafından bu tez çalışmasında kullanılmak üzere CPV ve ikincil optik eleman göndermiştir. Çalışmada kullanılmak üzere gönderilen CPV ve ikincil optik eleman görseli Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Çalışmada kullanılmak için referans alınan CPV ve SOE.

BSQ solar tarafından gönderilen CPV 7x7 mm² kare boyutlarında özel kesim olan ve Azur Space firmasına ait GaInP/GaInAs/Ge 3 katmanlı metamorfik yapıya sahiptir ve ikincil optik eleman, S-TIM2 tipi cam kare prizma şeklindedir. CPV ve SOE referans alınarak diğer optik elemanların (birincil ayna, SBS lens ve ışık yolu) geometrileri Zemax Optic Studio programında non-sequential modu kullanılarak oluşturulmuştur. Programın non-sequential ara yüz görüntüsü Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



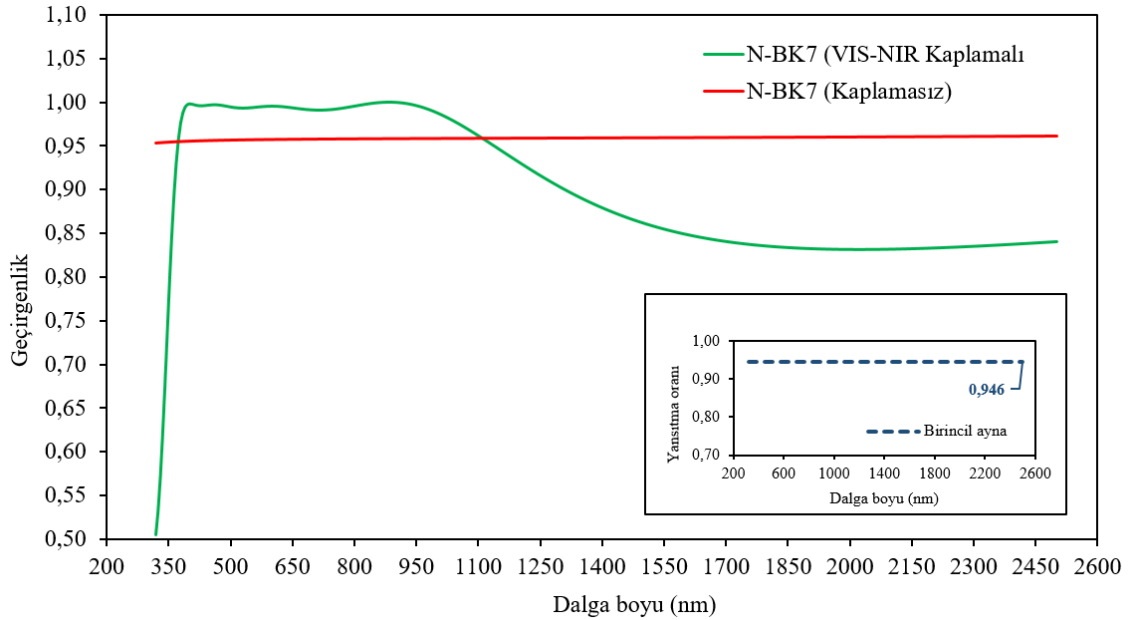
Şekil 4.7. Zemax Optik Studio non-sequential ara yüz görüntüsü.

Çalışmada kullanılan 4 temel optik eleman ve özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. SBS lens ve ışık yolu için yüksek spektral aralık ışınım geçirgenliğine sahip N-BK7 tipi cam tercih edilirken ikincil optik eleman olarak S-TIM2 tipi cam kullanılmıştır. Birincil ayna optik sistemlerin verimliliklerinde önemli rol oynamaktadır ve bu yüzden yüksek yansıtıcılık oranına sahip cam üzeri gümüş kaplama tercih edilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan optik elemanlar ve özellikleri.

Malzeme	Materyal	Şekil ve Geometri	Kırıcılık İndisi
Birincil ayna	Cam üzeri gümüş kaplama	Kare çukur parabol	-
SBS lens	N-BK7 cam	Tümsek küresel	1,5168
İkincil optik eleman	S-TIM2 cam	Kare prizma	1,62004
Işık yolu	N-BK7 cam	Kare prizma	1,5168

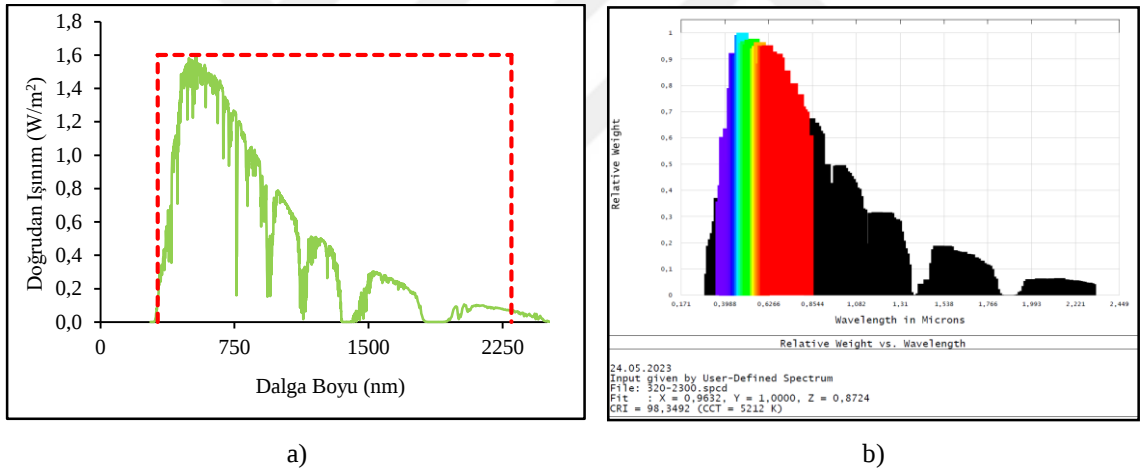
SBS lens için seçim yapılırken yine ticari olarak erişilebilir kaplama seçenekleri tercih edilmiştir. GaInP/GaInAs/Ge 3 eklemlili güneş hücresi için en verimli çalışma spektral bölgesi 450-900 nm arasındaki dalga boyu aralığıdır. Ayrıca, Ge alt hücre 1000-1800 nm dalga boyu aralığında çalışmakta ve fazla akım üreterek hücre ısınmasına ve verim düşüşüne sebep olduğu da bilinmektedir. Bu sebeple 450-1000 nm dalga boyu aralığında ışık geçirgenliği yüksek, 1000-1800 nm dalga boyu aralığında ışık geçirgenliği daha düşük olan kaplama seçenekleri araştırılmıştır. İstenilen aralıklarda en uygun Edmund Optic firması tarafından geliştirilen VIS-NIR kaplamalı lensler belirlenmiş ve çalışmada kullanılmıştır. Birincil ayna, N-BK7 kaplamasız lens ve SBS olarak kullanılan N-BK7 VIS-NIR kaplamalı lense ait dalga boylarına göre yansıtıcılık ve geçirgenlik değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir.

**Şekil 4.8.** Kullanılan VIS-NIR kaplamalı ve kaplamasız N-BK7 lensin geçirgenlik ve aynanın yansıtıcılık değerleri.

CPV güneş hücresi arkasında bulunan pasif soğutucu blok gölgelenme oluşturmakta ve bu alan kadar bölgeden sisteme ışık düşmemektedir. Bu yüzden daha doğru sonuçlar elde edebilmek

için soğutucu blok alanı kadar bir detektör oluşturularak kaynak önüne yerleştirilmiş ve bu alandan sisteme ışık gelmesi engellenmiştir. Aynı şekilde CPV üzerine düşecek ve ışık yoluna girecek ışık miktarı bu noktalarda detektörler oluşturularak belirlenmiştir. Son olarak tüm işlemler dalga boylarına göre gerçekleştirildiğinden daha doğru sonuçlar alabilmek için program varsayılan kaynak değerleri, güneş ışığı spektrum değerleri ile değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak program sadece 200 dalga boyu değeri girişine izin verdiğinden, ASTM G173-03 güneş spektral doğrudan ışıınım (DNI) referans değerleri [79] kullanılarak 320-2300 nm arasında her 10 nm dalga boyu aralığındaki değerler kullanılarak kaynak spektral ağırlık dağılımı oluşturulmuştur. Programa tanımlanan kaynak spektrum ağırlık değerleri ve ASTM G173-03 güneş spektral doğrudan ışıınım (DNI) referans değerleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

SBS-CPV/T hibrit kolektör için optik tasarım gerçekleştirilirken 765X yoğunlaştırma oranında ve 0,7° kabul oranı kabul edilmiş ve Optic Studio programında bulunan ışın takip analizi ile CPV üzerine düşecek maksimum ışık ve yüksek ışık homojenliği göz önünde bulundurularak optik elemanların geometri ve konumlandırılmaları optimize edilmiştir.

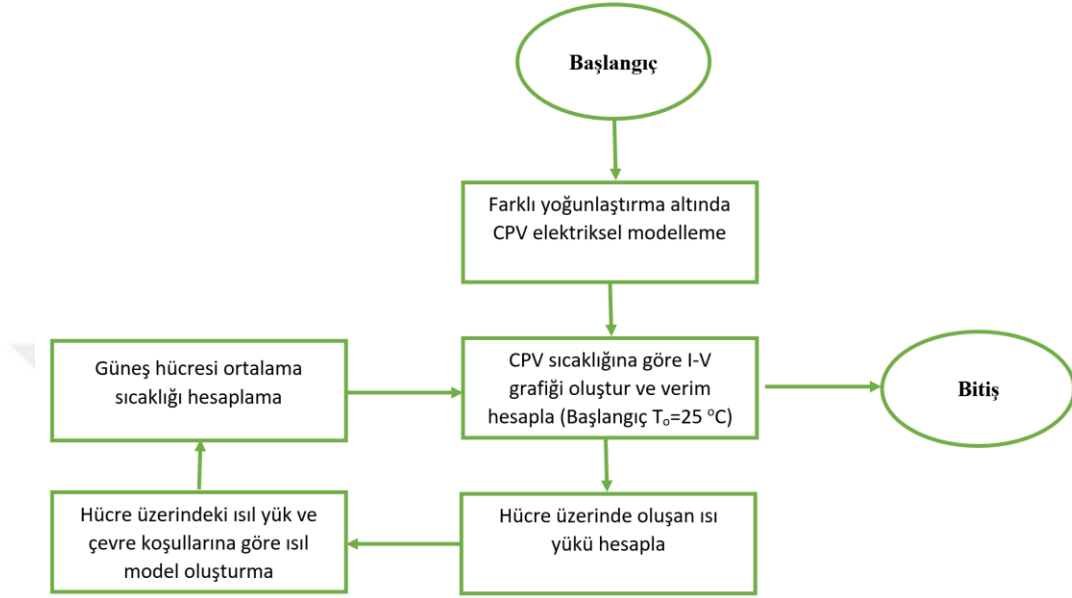


Şekil 4.9. Güneş spektral a) ASTM G173-03 doğrudan ışıınım (DNI) referans değerleri b) Zemax kaynak spektrum ağırlıkları.

4.2. CPV Güneş Hücresi Model

Bu bölümde yüksek verimli güneş hücresinin performans karakterizasyonu ve matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada modeli oluşturulan PV güneş hücresi, Azur Space firmasına ait 3 eklemlı GaInP/GaInAs/Ge yarı iletkenlerinden oluşan yoğunlaştırılmış PV (CPV) güneş hücresidir. CPV güneş hücrelerinin performansını etkileyen en önemli faktör CPV güneş hücresinin sıcaklığıdır. Bu yüzden CPV güneş hücresi modellenirken hem elektriksel hem ısı olarak modelleme gerçekleştirilmiştir. Daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi için standart çalışma koşullarına göre elektriksel modelden alınan sonuçlar ısı modeline aktarılmış ve hücrenin ortalama

sıcaklığı belirlendikten sonra bu sıcaklığa göre elektriksel model sonuçları tekrarlanmıştır. Bu tez çalışmasında CPV güneş hücresi modellenirken gerçekleştirilen akış diyagramı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

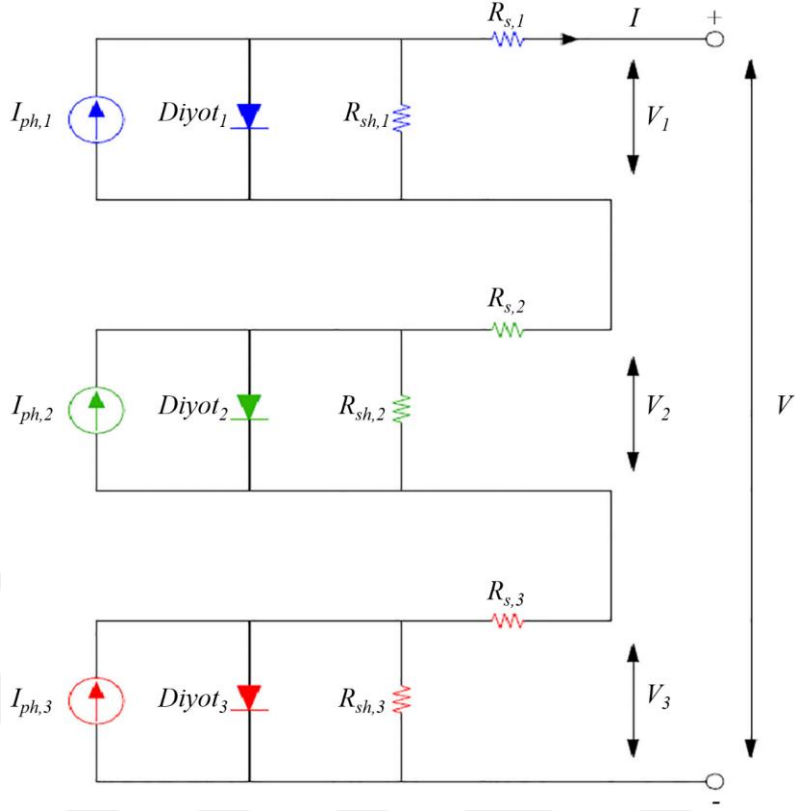


Şekil 4.10. CPV güneş hücresi modeli akış diyagramı.

4.2.1. Elektriksel Model

I-V eğrileri, hücre tarafından üretilen gerilim ve akım arasındaki ilişkiyi temsil eder. Bu yöntem, hücre performansını karakterize etmek ve değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 3 eklemli bir güneş hücresini temsil edebilecek, üç farklı yarıiletken malzemenin (alt hücrenin) elektriksel modeli, tek bir hücre olarak modellenmiştir. Buradaki amaç her eklemdeki malzemenin performansını ayrı ayrı görebilmektir.

Tek diyot modeli, 3 eklemli güneş hücrelerini tanımlamanın en uygun yolu olarak kabul edilir [110, 111]. CPV uygulaması için, Shockley by-pass diyotları elektriksel kayıpları ve gölgelenme gibi hasar riskini azaltmak için kullanılır. Ek olarak, hücre başına bir diyot bağlanması en uygun yapı olarak kabul edilir [112]. Farklı III-V malzemelerinden oluşan çok eklemli bir hücre, alt taban üzerinde doğrudan büyütülen bağlantı noktaları ve tünel bağlantılarıyla birbirine bağlanmıştır ve iki terminale sona erer. Şekil 4.11'de, tek diyotlu 3 eklemli güneş hücresinin elektriksel eşdeğer devresini göstermiştir [113].



Şekil 4.11. Tek diyotlu 3 eklemli güneş hücresinin elektriksel eşdeğer devresi.

Bu model, elektriksel özellikler için tek bir hücre ve diyot eşdeğer devresi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Hücre eklemleri, GaInP/GaInAs/Ge malzemelerinden oluşur ve elektriksel olarak seri bağlantılıdır. 3 eklemli elektriksel model, MATLAB® programı kullanılarak oluşturulmuş olup model, referans koşullarda ($DNI = 1000 \text{ W/m}^2$, $AM = 1.5D$ ve 25°C sıcaklıkta) kurulmuştur.

Hücre alanı üzerindeki spektral ışıyım dağılımının homojen olduğu ve gelen ışığın spektrumu tarafından her alt hücrede bir kısa devre akım yoğunluğunun üretileceği varsayılarak matematiksel olarak model oluşturulmuştur.

Güneş hücrelerinde maksimum akım yoğunluğunun tahmin edilmesinin, bir dizi faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında, gelen foton sayısı, malzeme Emilimi ve bant aralığı enerjisi gibi etmenler bulunmaktadır. Her bir alt hücrenin kısa devre akım yoğunluğu ($I_{sc,i}$) Denklem 4.3'teki gibi hesaplanabilir [114]:

$$I_{sc,i} = A_c \cdot CR \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SR_{i(\lambda)} \cdot \eta_{opt(\lambda)} \cdot G_{(\lambda)} \cdot d\lambda \quad (4.3)$$

burada, CR yoğunlaştırma oranını, SR spektral tepki, η_{opt} optik verimliliği, G gelen spektral ışıyımı, A_c hücrenin alanını ve λ foton dalga boyunu ifade etmektedir. Denklemden kullanılan “ i ” alt indisleri hesaplama yapılan alt hücreyi ifade etmektedir. SR Denklem 4.4'deki gibi ifade edilir:

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (4.4)$$

burada, q elektron yükünü, h Plank sabitini, c ışık hızını ve EQE dış kuantum verimliliğini ifade etmektedir.

Dış kuantum verimliliği, güneş hücrelerinin performansının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olup, güneş enerjisi alanındaki araştırma ve geliştirmelerde sıkça kullanılan bir ölçüttür.

EQE , güneş hücresinin belli bir dalga boyunda aldığı fotonların ne kadarını elektriksel akıma dönüştürdüğünü gösteren bir ölçüttür. Yüksek EQE değerleri, hücrenin o dalga boyunda daha fazla fotonu elektriksel enerjiye dönüştürme yeteneğini gösterir. EQE , hücrenin bant aralığına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Ölçüm genellikle bir monokromatik ışık kaynağı kullanılarak gerçekleştirilir ve her bir dalga boyunda hücrenin üretebildiği akım miktarı ölçülür. Bu şekilde, farklı dalga boylarında hücrenin performansı hakkında bilgi elde edilir. Modelde kullanılan 3 eklemlı GaInP/GaInAs/Ge güneş hücresinin EQE değerleri üretici firma tarafından resim formatında paylaşılmaktadır. Bu yüzden modelde kullanılan EQE değerleri dijitalize edilerek kullanılmıştır.

Ters doyum akımı ($I_{o,i}$) Denklem 4.5’de gösterildiği gibi hesaplanabilir [115]:

$$I_{o,i} = A_c K T_c^{(3+\frac{\gamma}{2})} \exp \frac{-E_g}{n K_b T_c} \quad (4.5)$$

burada, K_b Boltzmann sabitini, n idealite faktörünü, E_g bant aralığı enerjisi, T_c güneş hücresinin sıcaklığını, K ve γ malzemeye ait sabitleri ifade etmektedir. Alt hücrelerde kullanılan yarı iletkenler farklı İndiyum (In) katkılama oranlarında alaşım halinde bulunmaktadır. Bu yüzden bu alaşımların E_g değerleri Denklem 4.6’daki gibi hesaplanır [116]:

$$E_g(\xi_1 - \xi_x) = (1-x).E_g(\xi) + x.E_g(\xi) - x.(1-x).P \quad (4.6)$$

burada, $\xi_1 - \xi_x$ alaşımların katkılama oranlarını ve P alaşıma bağlı parametreyi ifade etmektedir. Malzemelerin bant aralığı enerji değeri sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olduğundan, E_g Denklem 4.7’deki gibi sıcaklığa bağlı olarak Varshni ampirik ifadesi ile açıklanmaktadır [117]:

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T_c^2}{T_c + \beta} \quad (4.7)$$

burada, α ve β malzeme özelliklerine bağlı sabitleri ifade ederken, $E_g(0)$ malzemelerin “0” Kelvin’de bant aralığı enerji değerini ifade etmektedir. Denklem 4.8’de güneş hücresi tarafından üretilen akım (I) karakteristiği Shockley diyot eşitliğine göre bulunabilir [110]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V + I.R_s)}{n.K_b.T_c} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (4.8)$$

burada, V gerilimi, R_s seri direnci, R_{sh} şönt direncini ve I_{ph} fotoakımı ifade etmektedir. İdeal koşullarda I_{ph} kısa devre akımına eşittir ($I_{ph} = I_{sc}$).

Hücresinin açık devre gerilimi (V_{oc}) Denklem 4.9’deki gibi hesaplanır [118]:

$$V_{oc} = \frac{n.K_b.T_c}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) + \frac{n.K_b.T_c}{q} \cdot \ln CR \quad (4.9)$$

3 eklemlili güneş hücresi 3 farklı yarı iletken malzemenin seri bağlanması ile oluştuğundan hücrenin toplam kısa devre akımı ($I_{sc,tot}$), alt hücrelerin kısa devre akımlarının en az olanına ve açık devre gerilimi ($V_{oc,tot}$), alt hücreleri açık devre gerilimi toplamına eşittir. Hücresinin toplam kısa devre akımı ve açık devre voltajına Denklem 4.10 ve 4.11’de verildiği gibi ifade edilir:

$$I_{sc,tot} = \min(I_1, I_2, I_3) \quad (4.10)$$

$$V_{oc,tot} = \sum_{i=1}^3 V_{oc,i} \quad (4.11)$$

Firma tarafından 5,5x5,5 mm² hücrenin farklı yoğunlaştırma değerlerinde (250X, 500X, 1000X) verileri paylaşıldığından, bu çalışmada öncelikli olarak bu alana sahip hücre için model oluşturulmuştur. Modelde kullanılan ve belirsiz olan parametreler (n , γ , K , R_s ve R_{sh}) optimize edilerek değerler belirlendikten sonra çalışmada kullanılan 7x7 mm² boyutlarında hücre için sonuçlar elde edilmiştir. Model ile referans değerler arasındaki hata oranı hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Hata oranı, ortalama hata karekökü eşitliği (RMSE) ile Denklem 4.12’deki gibi hesaplanır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (i_{ref} - i_{mod})^2} \quad (4.12)$$

burada, i_{ref} ve i_{mod} sırasıyla referans değeri ve modelden elde edilen değeri ifade ederken N eşleştirmede kullanılan veri sayısını temsil etmektedir.

4.2.2. Isıl Model

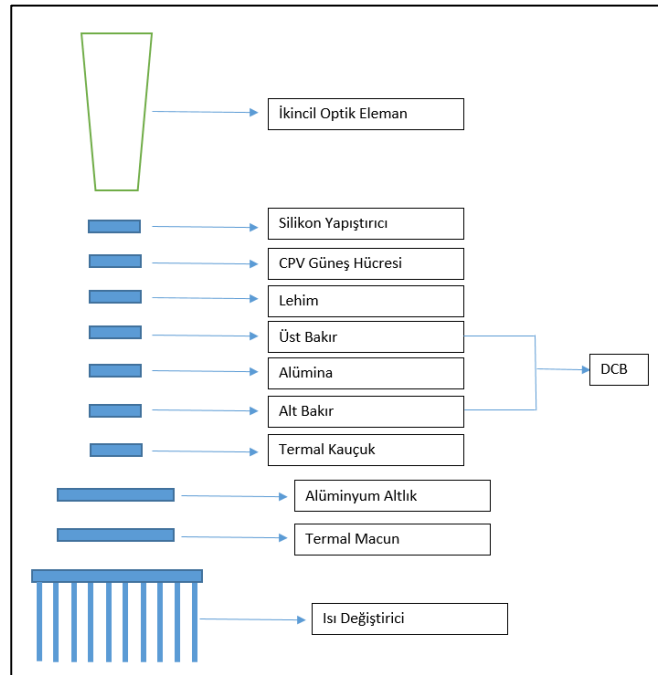
CPV sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için, çalışma sıcaklığının tahmin edilmesi ve sıcaklık etkilerinin kontrol altında tutulması önemlidir. Yüksek yoğunluklu güneş enerjisi kullanılarak elektrik üreten CPV sistemlerinde, ısı yönetim, elektrik dönüşüm verimliliğini arttırmak, ısıl hasarı önlemek ve hücre ömrünü uzatmak için kritik bir faktördür [119].

Yüksek yoğunlaştırma altında çalışan CPV hücreleri için hücre sıcaklığının 80°C veya altında olması önerilir [120, 121].

Hücre üzerinde oluşan ısı, aktif veya pasif soğutma yöntemleriyle dağıtılabilir [122]. Aktif soğutma, fanlar, sıvı soğutma sistemleri veya termoelektrik soğutma gibi aktif bileşenlerin kullanıldığı bir yöntemdir. Pasif soğutma ise, doğal taşınım veya ısı emici malzemelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir. Her iki yöntem de CPV sisteminin sıcaklık kontrolünü sağlamak ve çalışma sıcaklığını istenilen aralıkta tutmak için kullanılabilir.

CPV sistemlerinin ısıl performansını analiz etmek ve optimize etmek için ısı transferi modelleri kullanılır. Bu modeller, ısı yönetimi incelemek ve tasarım iyileştirmeleri yapmak için kullanılan araçlardır. Isı transferi modelleri, güneş ışınlarının emilimi, ısı iletimi ve radyasyon gibi ısı transfer mekanizmalarını modeller.

Bu çalışmada, CPV alıcı sistemde pasif soğutma ile ısı atılımı düşünülerek alıcı kısmına doğal taşınıma uygun minimum gölgelenme oluşturacak geometride ısı değiştirici seçimi yapılmıştır. CPV alıcıda bulunan bileşenler katmanlar halinde Şekil 4.12'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.12. CPV alıcıyı oluşturan bileşenler.

COMSOL Multiphysics programı yardımı ile sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak güneş hücresi ve tüm alıcı boyunca ısı dağılımını belirlenmiştir. Çalışmada COMSOL Multiphysics programı fiziğinde katılarda ısı transferi seçilmiş ve hücrenin ne zaman istikrarlı sıcaklığı ulaşılabilirliğinin tam olarak belirlenmesi için zamana bağlı çözümler gerçekleştirilmiştir.

Alıcıda bulunan katı bileşenler arasında iletim yoluyla aktarılan ısı (q_{iletim}) Denklem 4.13'de gösterilen Fourier yasası ile açıklanabilir [111]:

$$q_{iletim} = -k.A \frac{dT}{dx} \quad (4.13)$$

burada, k ısı iletkenlik katsayısını (W/m.K) , A ısı iletimi gerçekleşen alanı (m^2) ve dT / dx sıcaklık gradyanını ifade etmektedir. Alıcı katı cisimden çevreye olan taşınım yolu ile ısı transferi ($q_{taşınım}$) Denklem 4.14'de gösterilen Newton soğutma kanununa göre ifade edilir [111]:

$$q_{taşınım} = h_t.A.\Delta T \quad (4.14)$$

burada, h_t taşınım ısı transfer katsayısını (W/m².K) ve ΔT cismin çevre ile arasındaki sıcaklık farkını ifade etmektedir. Cisimden elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılarak ışıınım yolu ile gerçekleşen ısı transferi ($q_{ışıınım}$) Stefan-Boltzmann kanunu ile Denklem 4.15'deki gibi açıklanır [111]:

$$q_{ışıınım} = \varepsilon_y . \sigma . (T_s - T_\varphi^4) \quad (4.15)$$

burada, ε_y yüzeyin yayıcılığını, σ Stefan-Boltzmann sabitini, T_s cismin sıcaklığını ve T_φ çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

CPV hücre üzerine düşen güneş ışıınımlarının bir bölümü elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı hücre üzerinde ısı enerjisine dönüşmektedir. CPV hücre tarafından üretilen ısı (q_{isi}) Denklem 4.16'daki gibi ifade edilir [123, 124]:

$$q_{isi} = G.(1 - \eta_{PV}) \quad (4.16)$$

burada, G hücre üzerine düşen güneş ışıınım miktarını (W) ve η_{PV} güneş hücresinin elektriksel dönüşüm verimliliğini temsil etmektedir. Modelde kullanılan alıcı devresine ait bileşenlerin termofiziksel ve boyutsal özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

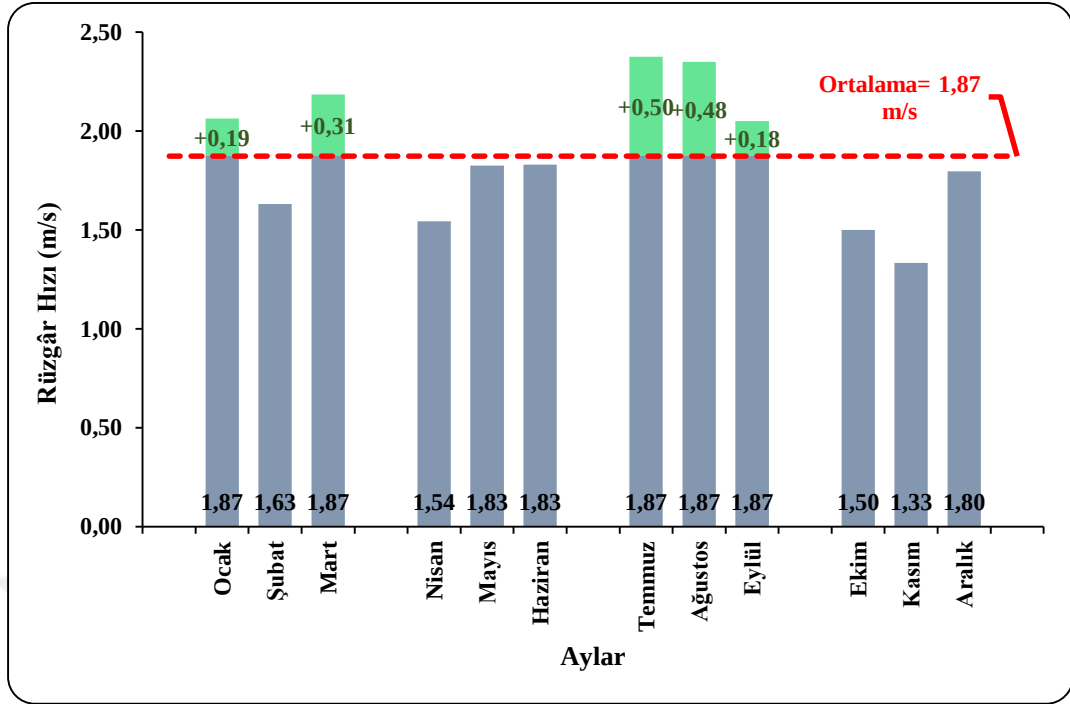
Tablo 4.2. Modelde kullanılan bileşenlere ait termofiziksel ve boyutsal özellikler.

Bileşen	Materyal	Isıl İletkenlik Katsayısı k (W/m.K)	Özgül Isı Kapasitesi C_p (J/g-°C)	Yayıcılık Katsayısı ϵ	Kalınlık (mm)	Alan (mm ²)
İkincil Optik Eleman	S-TIM2	1,40	0,858	0,84	22	7x7
Silikon Yapıştırıcı	Silikon KE-1031	0,15	0,7		0,2	7x9
CPV Hücre	GaInP/GaInAs/Ge	60	0,32		0,19	7x7
Lehim	Sn99,3Cu0,7	65	0,22		0,05	7x9
Üst Bakır	Bakır	400	0,385		0,3	25x25
Alümina	%96 Alümina	24	0,800		0,38	26x26
Alt Bakır	Bakır	400	0,385		0,3	25x25
Termal Kauçuk	Silikon TXS2	3,3	0,83		0,5	30x30
Alüminyum Altlık	AL 5052 H34	138	0,880		4	40x40
Termal Macun	KS-609	0,7	1		0,2	40x40
Isı Değiştirici	A6063	200	0,9	0,8	4	200x200

Alıcı kısımda ısı değiştirici dışında kalan alanlarda doğal taşınım gerçekleşirken ısı değiştirici bulunduğu dış ortamın rüzgâr hızına bağlı olarak zorlanmış taşınım esaslı ile de ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu yüzden ısı değiştiricisinde taşınım ile ısı transferi hesaplanırken doğal taşınım ve rüzgâr hızına bağlı zorlanmış taşınım ile birlikte değerlendirilmesi (birleşik taşınım) daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi için önemlidir. Bu birleşik taşınım ile ısı transferi hesaplanırken taşınım transfer katsayısı (h_{bt}) dış ortam rüzgâr hızına bağlı olarak Denklem 4.17'deki gibi hesaplanabilir [125]:

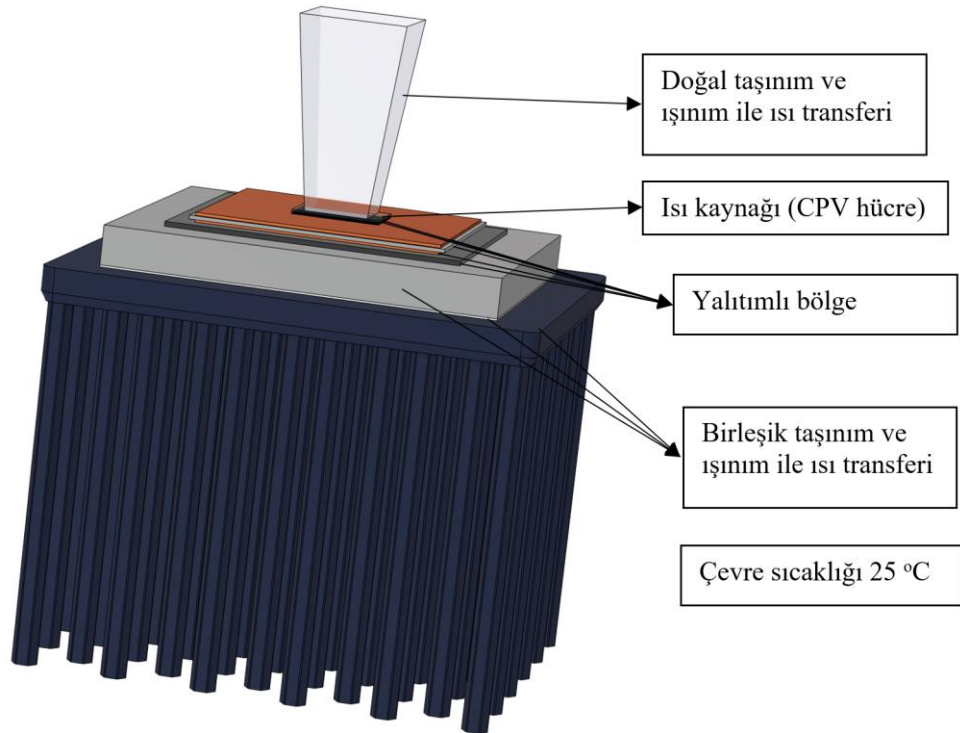
$$h_{bt} = 15 + 1.5WS \quad (4.17)$$

burada, h_{bt} birleşik taşınım ısı transfer katsayısını ifade ederken WS dış ortam rüzgar hızını temsil etmektedir. Elazığ ili 2019 yılına ait aylık ortalama rüzgâr hızları Şekil 4.13'de gösterilmiştir [126]. Modelde kullanılan dış ortam rüzgâr hızı değeri Şekil 4.13'e göre yıllık ortalama hesaplanarak gerçekleştirilmiş olup yıllık ortalama dış ortam rüzgâr hızı 1,87 m/s olarak alınmıştır. Işınımın yüksek olduğu yaz aylarında dış ortam rüzgâr hızının yıllık ortalamasının üzerinde olduğu görülmektedir.

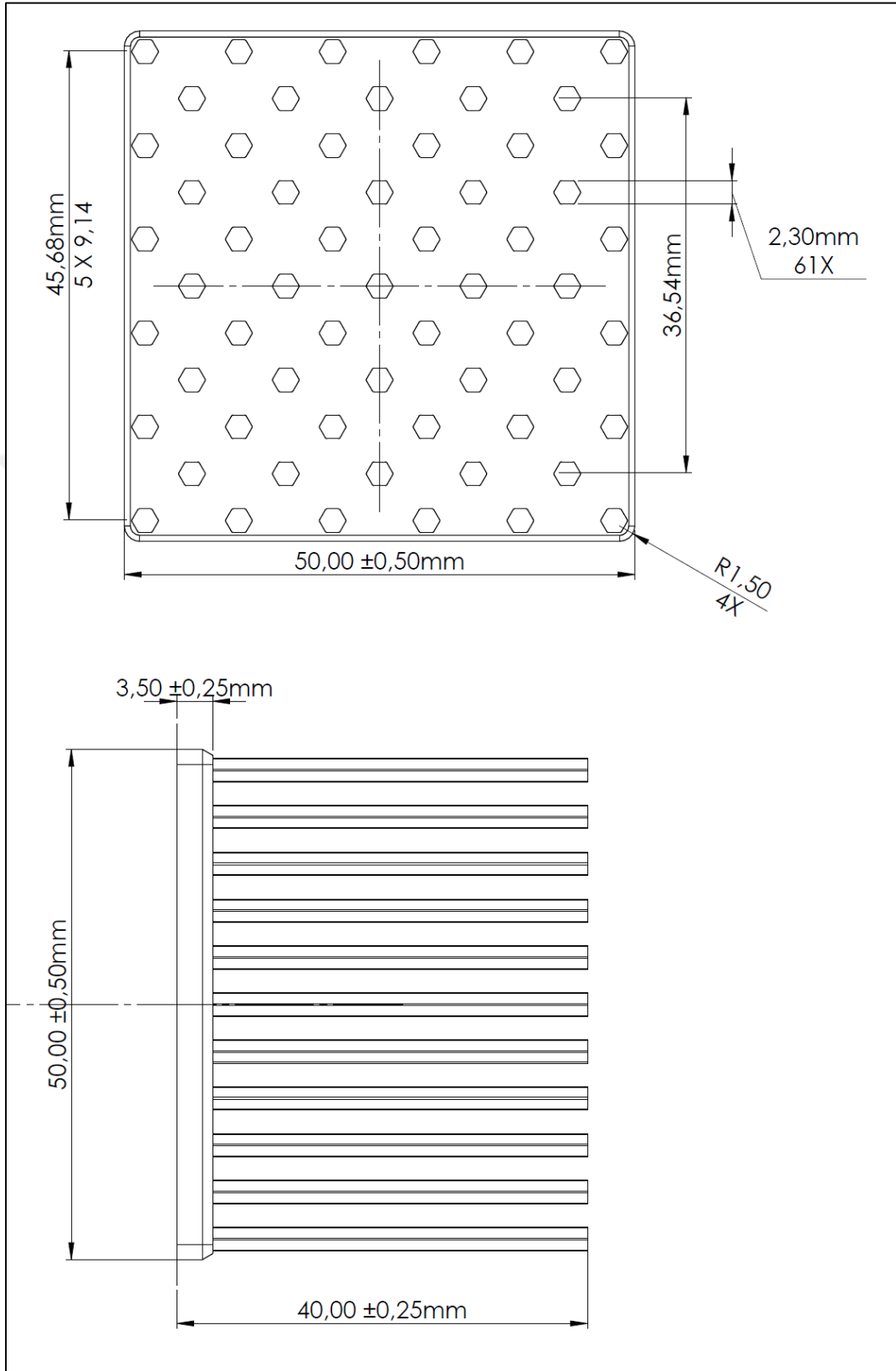


Şekil 4.13. Elazığ ili 2019 yılına ait aylık ortalama dış ortam rüzgâr hızı.

Modelde uygulanan sınır şartları Şekil 4.14’de ve modelde kullanılan kanatçıklı soğutucu elemanın teknik çizimi Şekil 4.15’de detaylı olarak gösterilmiştir.



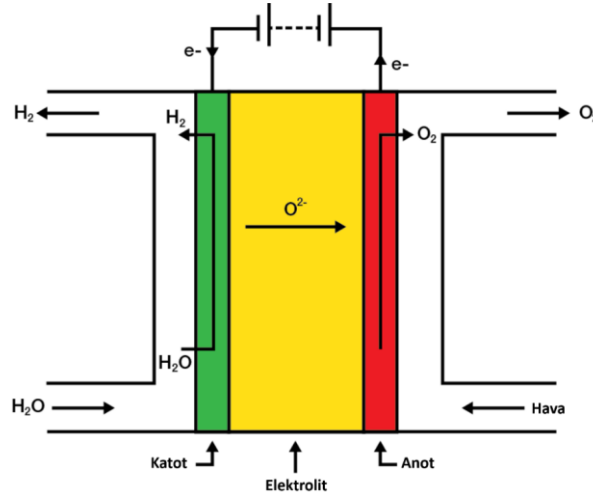
Şekil 4.14. Modelde belirlenen sınır şartları.



Şekil 4.15. Modelde kullanılan kanatçıklı soğutucu elemanın teknik çizimi.

4.3. Katı Oksit Elektrolizör (KOE) Model

Elektrolizörlerde sıcaklık arttıkça hidrojen üretimi için gerekli olan elektrik enerjisi miktarı düşmekte bu da elektrolizör verimliliğini arttırmaktadır. SBS-CPV/T hibrit kolektör ile elektrik enerjisinin yanı sıra ısı enerjide elde edilmektedir. Bu ısı enerjinin kullanılmasına olanak tanıyan yüksek sıcaklıklarda (600-1000 °C) çalışan KOE ile hem ısı enerjiden faydalanılabilmekte hem de yüksek verimlilikle hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. KOE çalışma prensibi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Katı oksit elektrolizör çalışma prensibi.

Şekil 4.16'da görüldüğü üzere KOE'lerde katot tarafından su buharı beslenir ve elektrotlar arasında elektriksel potansiyel farkından dolayı su buharı indirgenmesi ile hidrojen gazı ve oksijen iyonlarına ayrışır. Oksijen iyonları elektrolit içerisinde geçerek anot tarafından beslenen havada oksidize edilerek oksijen gazı olarak anottan çıkar. KOE anot bölgesinde, katot bölgesinde ve toplam gerçekleşen reaksiyonlar Denklem 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilmiştir [127].



Bu çalışmada 3 boyutlu (aktif alan= 0,1 cm²) tek hücreli ve tek kanallı KOE, COMSOL multiphysics ticari yazılımı ile modellenmiş ve elde edilen sonuçlar ışığında CPV değerlerine göre optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu modelde anot tarafında sadece oksijen bulunduğu ve basıncın sabit kaldığı varsayılarak ayrıca modellenmemiştir. Bu sebeple model,

katot gaz kanalı, katot elektrot, elektrolit ve anot elektrottan oluşmaktadır. Model oluşturulurken şarj dengesi, kütle korunumu ve momentumun korunumu denklemleri kullanılmıştır.

4.3.1. Şarj Dengesi

Şarj dengesi, hücre içerisindeki iyonik ve elektronik aktarımları içerir. Bu çalışmada, hücre içerisinde anot ve katot elektrotların kompozit yapıda olduğu varsayıldığından, anot ve katot elektrotlarda hem elektronik hem de iyonik taşınımın gerçekleştiği, elektrolitte yalnızca iyonların geçisi sağlandığından sadece iyonik aktarımın gerçekleştiği varsayılmıştır. Şarj dengesi için Ohm yasası kullanılabilmektedir. Ohm yasasına göre, şarj dengesi için anot ve katot tarafı için elektronik iletkenlik Denklem 4.21'deki gibi ifade edilebilirken anot, katot ve elektrolit tarafında iyonik iletkenlik Denklem 4.22'de gibi ifade edilebilir [128]:

$$\begin{aligned} \text{Elektronik Şarj} \rangle \quad & \text{Katot Elektrot} : \nabla \cdot (\sigma_c^{eff} \nabla \phi_e) = i_{c,ct} A_v \\ & \text{Anot Elektrot} : \nabla \cdot (\sigma_a^{eff} \nabla \phi_e) = i_{a,ct} A_v \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \text{İyonik Şarj} \rangle \quad & \text{Katot Elektrot} : \nabla \cdot (\sigma_c^{eff} \nabla \phi_i) = i_{c,ct} A_v \\ & \text{Elektrolit} : \nabla \cdot (\sigma_i^{eff} \nabla \phi_i) = 0 \\ & \text{Anot Elektrot} : \nabla \cdot (\sigma_a^{eff} \nabla \phi_i) = i_{a,ct} A_v \end{aligned} \quad (4.22)$$

burada, ϕ_i ve ϕ_e sırasıyla iyonik ve elektronik potansiyeli ifade etmektedir. σ_c^{eff} ve σ_a^{eff} katot ve anot etkin elektronik iletkenliğini ifade ederken, σ_i^{eff} elektrolit etkin iyonik iletkenliğini ifade etmektedir. A_v ise hacimsel aktif yüzey alanı ifade etmektedir.

Katot ve anot tarafında yerel akım yoğunluğu ($i_{c,ct}$, $i_{a,ct}$) Bulter-Volmer denklemleri ile sırasıyla Denklem 4.23 ve Denklem 4.24'deki gibi ifade edilebilir [129]:

$$i_{c,ct} = \left[\chi_{H_2O} \frac{C_t}{C_{H_2O,ref}} \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta_c\right) - \chi_{H_2} \frac{C_t}{C_{H_2,ref}} \exp\left(-\frac{(1-\alpha)F}{RT} \eta_c\right) \right] \quad (4.23)$$

$$i_{a,ct} = \left[\exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta_a\right) - \chi_{O_2} \frac{C_t}{C_{O_2,ref}} \exp\left(-\frac{(1-\alpha)F}{RT} \eta_a\right) \right] \quad (4.24)$$

burada, η_a ve η_c sırasıyla anot ve katot aktivasyon kayıplarını temsil etmektedir. C_t toplam türlerin konsantrasyonunu ifade ederken, $C_{H_2O,ref}$, $C_{H_2,ref}$ ve $C_{O_2,ref}$ sırasıyla su buharı, hidrojen ve oksijenin referans konsantrasyonunu ifade etmektedir. χ_{H_2O} , χ_{H_2} ve χ_{O_2} sırasıyla su buharı,

hidrojen ve oksijenin molar oranlarını tanımlamaktadır. α şarj transfer katsayısını belirtirken, F Faraday sabitini ve R gaz sabitini ifade etmektedir.

4.3.2. Kütle ve Türlerin Korunumu

Elektrolizörlerde türlerin transferinin modellenmesi için Denklem 4.25’de verilen Maxwell-Stefan denklemleri ile ifade edilebilir [128]:

$$\nabla \left(\omega_i \rho u - \rho \omega_i \sum_{j=1}^k D_{ij} \left(\frac{M}{M_j} \left(\nabla \omega_j + \omega_j \frac{\nabla M}{M} \right) + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla P}{P} \right) \right) = R_i \quad (4.25)$$

burada, R_i türlerin reaksiyon kaynak terimini, ω_i türlerin kütle oranını, x_j türlerin molar oranını, D_{ij} , i ve j türleri için ikili difüzyon değerini ifade etmektedir. ρ , u ve P sırasıyla yoğunluk, hız ve basıncı tanımlamaktadır. D_{ij} Denklem 4.26’daki gibi gösterilebilir:

$$D_{ij} = \frac{1.43e^{-8}T^{1.75}}{PM_{ij}^{\frac{1}{2}} \left(V_i^{\frac{1}{3}} + V_j^{\frac{1}{3}} \right)} \quad (4.26)$$

burada, M_{ij} moleküler kütle değerini ifade etmektedir. M_{ij} Denklem 4.27’deki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$M_{ij} = \frac{2}{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j}} \quad (4.27)$$

burada, M_i ve M_j sırasıyla i ve j türlerinin moleküler kütle değerini ifade etmektedir. Etkili difüzyon katsayısı D_{ij}^{eff} , Knudsen difüzyonu ve ikili difüzyonun bir araya getirildiği gözenekli elektrotlarda çok-türlü taşınımı karakterize etmek için Denklem 4.28’deki gibi kullanılabilir [130]:

$$D_{ij}^{eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{D_{ij} D_{\kappa n, i}}{D_{ij} + D_{\kappa n, i}} \right) \quad (4.28)$$

burada, $D_{\kappa n, i}$ Knudsen difüzyon katsayısını ifade etmektedir. $D_{\kappa n, i}$ Denklem 4.29’daki gibi hesaplanabilir:

$$D_{\kappa n, i} = \frac{97}{2} d_{pore} \sqrt{\frac{T}{M_i}} \quad (4.29)$$

burada, d_{pore} boşluklu yapılarda boşluk çapını ifade etmektedir. Ortalama molekül ağırlığı (M) Denklem 4.30 ile bulunabilir:

$$M = \sum_{j=1}^n x_j M_j \quad (4.30)$$

İdeal gazlar için yoğunluk Denklem 4.31'deki gibi hesaplanabilir:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (4.31)$$

4.3.3. Momentumun Korunumu

Yüksek sıcaklık ve normal dış ortam basıncındaki ($P_{\text{çevre}} = 1 \text{ atm}$) çalışma koşullarından dolayı Denklem 4.32 ve Denklem 4.33'de verilen Navier-Stokes denklemlerinin kanallardaki az sıkıştırılabilir akışı modellemek için kullanılabilimektedir [131]:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-PI + \mu \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)I \right] \quad (4.32)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (4.33)$$

burada, μ dinamik viskoziteyi ve I momentumu ifade etmektedir. Gözenekli yapıdaki elektrotlarda momentumun korunumu Denklem 4.34'de verilen Brinkman denklemi ile tanımlanabilir:

$$\left(\frac{\mu}{K} + Q \right) u = \nabla \cdot \left[-PI + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)I \right] \quad (4.34)$$

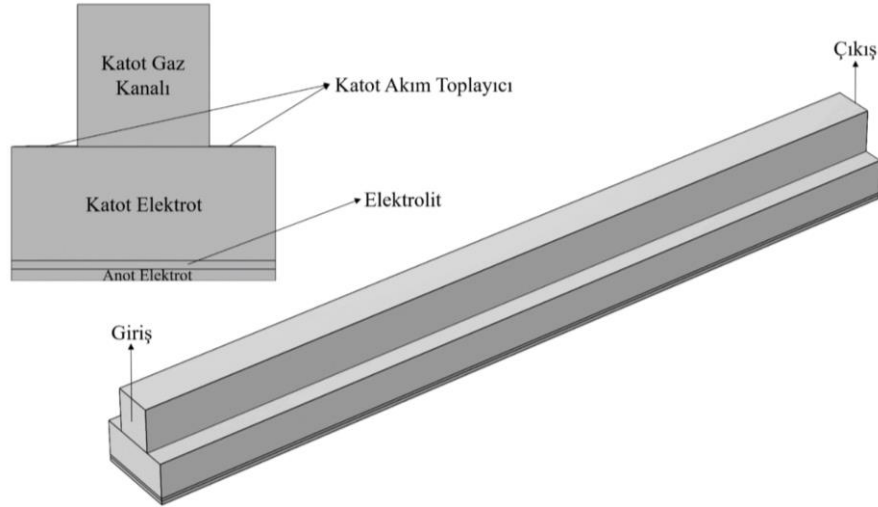
burada, K geçirgenliği ifade ederken, Q kütle kaynak terimini temsil etmektedir ve Denklem 4.35 ile hesaplanabilir.

$$Q = \sum_i \frac{i_{ct} M_i}{n_i F} \quad (4.35)$$

KOE model için kullanılan geometrik ve fiziksel parametreler Tablo 4.3'te verilmiştir. COMSOL Multiphysics yazılımı tarafından Tablo 4.3'e göre oluşturulan modelin izometrik görüntüsü ve katmanları Şekil 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.3. KOE modelde kullanılan geometrik ve fiziksel parametreler.

Parametre	Değer	[Birim]	Açıklama
l_c	0,01	[m]	Hücre uzunluğu
w_c	1	[mm]	Hücre genişliği
$d_{cathode}$	0,4	[mm]	Katot kalınlığı
$d_{electrolyte}$	0,03	[mm]	Elektrolit kalınlığı
d_{anode}	0,04	[mm]	Anot kalınlığı
$l_{channel}$	0,01	[m]	Katot gaz kanalı uzunluğu
$w_{channel}$	0,5	[mm]	Katot gaz kanalı genişliği
$d_{channel}$	0,5	[mm]	Katot gaz kanalı kalınlığı
T	800	[°C]	Hücre sıcaklığı
$i_{0,c}$	0,1	[A/m ²]	Katot değişken akım yoğunluğu
$i_{0,a}$	1	[A/m ²]	Anot değişken akım yoğunluğu
ε	0,4		Porosite değeri
ξ	0,3		İyonik taşınım için volumetrik oran
$\sigma_{e,cathode}$	$9,5 \cdot 10^7 \exp(-1150 / T) / T$	[S/m]	Elektron iletkenliği, katot
$\sigma_{e,anode}$	$4,2 \cdot 10^7 \exp(-1200 / T) / T$	[S/m]	Elektron iletkenliği, anot
$\sigma_{i,electrolyte}$	$33,4 \cdot 10^3 \exp(-10300 / T)$	[S/m]	İyonik iletkenliği, elektrolit
α	0,5		Şarj transfer katsayısı
A_v	10^9	[m ⁻¹]	Elektrot spesifik yüzey alanı



Şekil 4.17. KOE katmanları ve izometrik görüntüsü.

Elektrolizörler için faraday verimi ($\eta_{elektrolizör}$), elektrolizörde üretilen hidrojenin teorik olarak maksimum ve gerçek miktarı arasındaki bir orandır. $\eta_{elektrolizör}$ Denklem 4.36'daki gibi ifade edilebilir [132]:

$$\eta_{elektrolizör} = \frac{N_{H_2} I_e}{2.F} \quad (4.36)$$

burada, N_{H_2} saniyede üretilen hidrojen mol miktarını ve I_e elektrolizör akımını ifade etmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında SBS-CPVT hibrit kolektör ile hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için Materyal ve Metot bölümünde, gerçekleştirilen tasarım ve yöntemler detaylı olarak alt başlıklar halinde verilmiştir. Bu bölüm aynı şekilde 3 alt başlık altında incelenmiştir. Bunlar SBS-CPVT optik sistem tasarım sonuçları, CPV güneş hücresi elektriksel ve ısı performansı, KOE'ün hidrojen dönüşüm verimliği ve SBS-CPV/T hibrit sistem ile en uygun çalışma aralıklarındaki toplam sistem performansından oluşmaktadır.

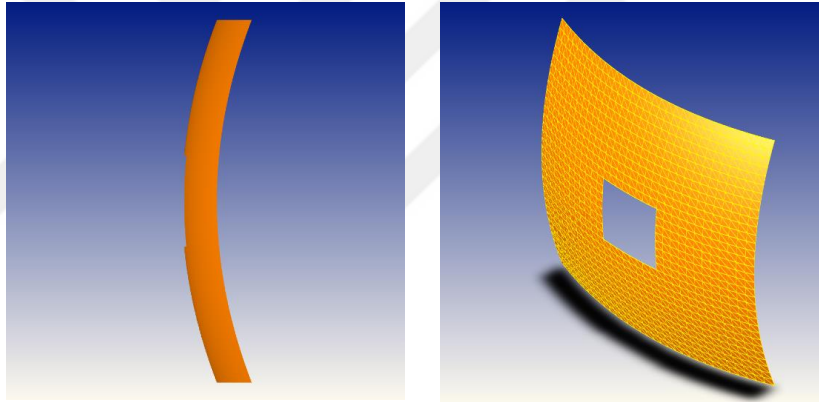
5.1. Optik Model Sonuçları

Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektör, birincil yansıtıcı ayna, SBS lens, ikincil optik eleman ve ışık yolunun dahil olduğu optik sistemlerin bileşiminden oluşmaktadır. Tasarımlarda malzeme seçiminde öncelikli olarak ticari ürün olarak hali hazırda bulunan bileşenler tercih edilmiş ve optimum tasarım bu malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boyutlandırma işlemi gerçekleştirilirken çalışmada kullanılan $7 \times 7 \text{ mm}^2$ aktif alana sahip CPV güneş hücresi ve $50 \times 50 \text{ mm}^2$ boyutlarında pasif soğutma elemanı olan ısı değiştirici göz önünde bulundurulmuştur. 765X yoğunlaştırma oranına göre Denklem 4.1 kullanılarak birincil ayna alanı belirlenmiştir. Ayrıca ayna alanı hesaplanırken ısı değiştirici tarafından $50 \times 50 \text{ mm}^2$ alanda oluşacak olan gölgelenme etkisi de dahil edilmiştir. Kullanılan güneş hücresinin kare geometride olması sebebi ile hücre üzerine düşen ışıının daha homojen olması için birincil ayna da kare geometride oluşturulmuştur. Zemax Optik Studio programı kullanılarak oluşturulan optik sistemde, kaynak olarak 1.5 AM ASTM G-173-03 doğrudan ışıının referans değerleri kullanılmıştır. ASTM G-173-03'e göre doğrudan ışıının (DNI) değeri 900 W/m^2 'dir. Ancak çalışmada kullanılan CPV güneş hücresi üretici firma tarafından sağlanan değerler ASTM G-173-03'e göre 1000 W/m^2 DNI ve $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edildiğinden karşılaştırmaların doğruluğu açısından bu çalışmada ASTM G-173-03 DNI referans değerleri 1000 W/m^2 'ye göre genişletilerek kullanılmıştır. Optik verimlilikte gölgelenme etkisini de göz önünde bulundurulduğu tasarımda, Zemax Optik Studio programında kaynak gücü birincil aynanın aktif alanına göre değil tüm alanına göre hesaplanmıştır. Güneş spektrumu 280-4000 nm dalga boyu arasındadır ancak optik elemanlar 320-2300 nm dalga boyu arasında çalışmaktadır. Geriye kalan ışıının miktarı optik elemanlar tarafından soğurulmakta ya da yansyarak kaybolmaktadır. Birincil ayna tüm yüzey alanına gelen güneş ışıının miktarı $39,985 \text{ W}$ 'dır. Bu ışıının miktarının 320-2300 nm arasındaki gücü $39,290 \text{ W}$ olarak hesaplanmış ve Zemax programına kaynak gücü olarak bu değer yazılmıştır. Ancak optik verimlilik hesaplanırken yüzeye gelen tüm ışıının miktarı olan $39,985 \text{ W}$ değerine göre hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Tasarımda kullanılan alıcı boyutu, birincil ayna boyutları ve kaynak gücü Tablo 5.1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.1. Tasarımda kullanılan parametre ve değerleri.

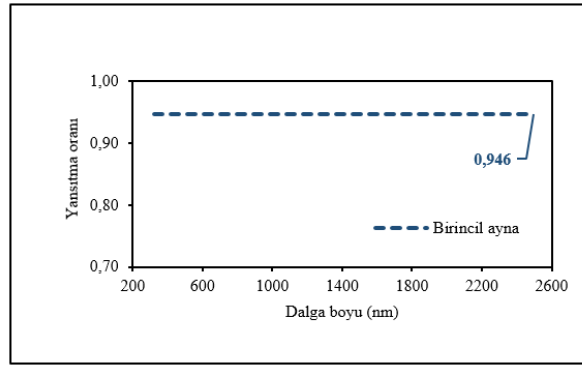
Parametre	Değer			
Yoğunlaştırma Oranı	765X			
Gölgeleme Oranı	% 6,1			
CPV Güneş Hücresi Boyutları-Alanı	7 mm	7 mm	49 mm ²	
Alıcı Boyutları-Alanı	50 mm	50 mm	2500 mm ²	
Birincil Ayna Boyutları-Tüm/Aktif Alanı	200 mm	200 mm	39985 mm ²	37485 mm ²
Kaynak Gücü	-	-	39,985 W	37,485 W

Odaklamada küresel hatayı ortadan kaldırmak için birincil ayna parabol (koniklik sabiti=-1) olarak seçilmiş materyal özelliği MIRROR olarak seçilmiştir. Zemax Optik Studio programı tarafından oluşturulan aynanın görüntüsü Şekil 5.1’de ve dalga boylarına göre yansıtıcılık oranları Şekil 5.2’de verilmiştir.

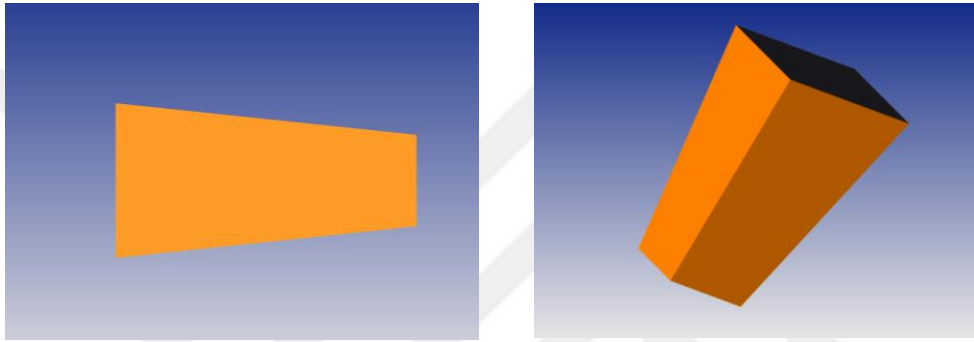


Şekil 5.1. Zemax programında tasarlanan birincil ayna görüntüsü a) Y-Z ekseninde b) izometrik.

Çalışmada kullanılan 7x7 mm² boyutlarında CPV güneş hücresi ve ikincil optik eleman BSQ solar firması tarafından tez çalışmasında kullanılması için gönderilmiş olup bu çalışmada ikincil optik eleman olarak o referans alınmıştır. Gönderilen ikincil optik eleman S-TIM2 cam malzeme olup CPV güneş hücresine tam uyumlu olarak 7x7 mm² ve 11x11 mm² boyutlarında kare prizma şeklindedir. Bu SOE değişiklik yapılmadan Zemax programında boyutlandırılmıştır. SOE’nin Zemax programındaki görüntüsü Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

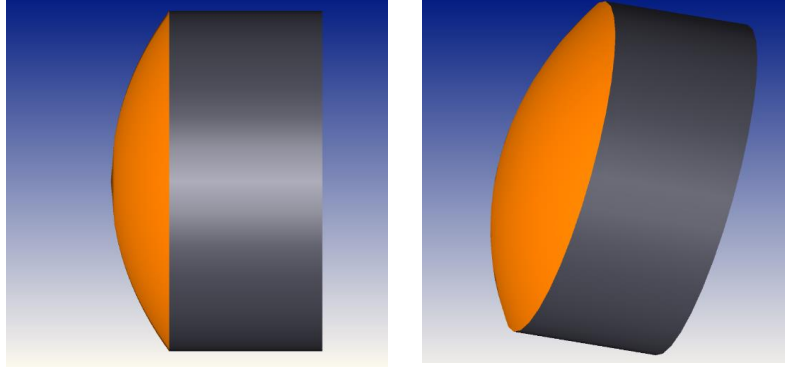


Şekil 5.2. Zemax programında tanımlanan aynanın dalga boylarına göre yansıtıcılık oranları.



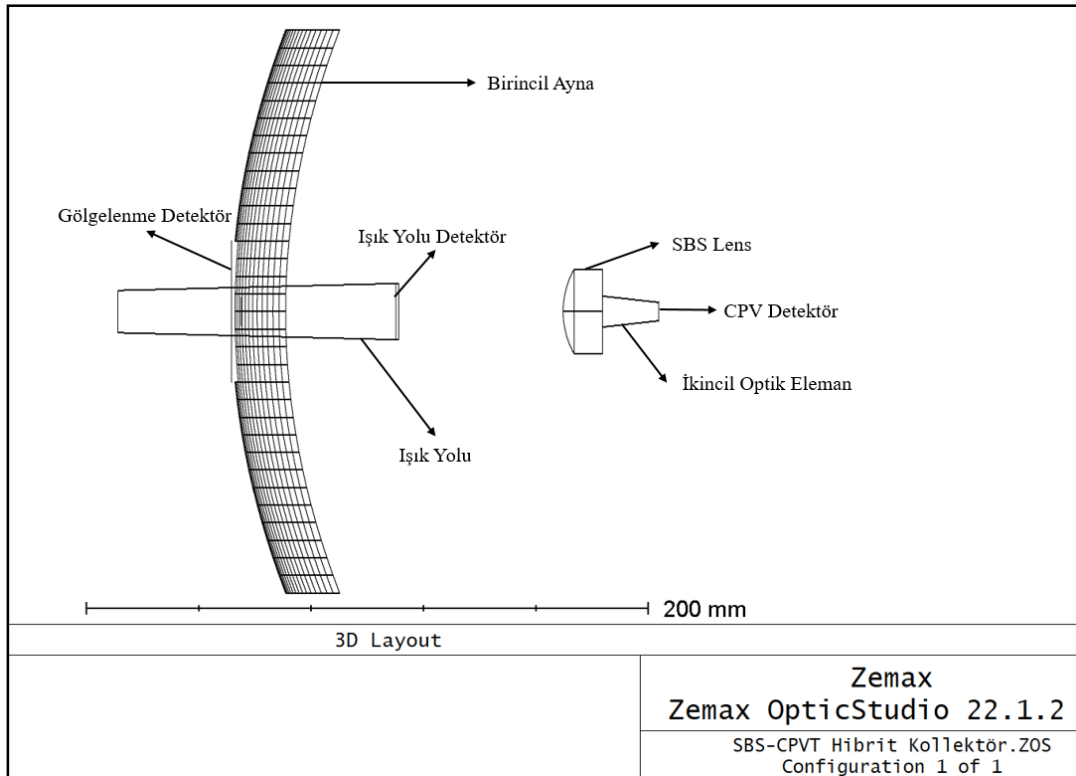
Şekil 5.3. İkincil optik eleman Zemax görüntüsü a) Y-Z ekseninde b) izometrik.

Cassegrain tipi ikincil bir yansıtıcı noktası olan sistemlerde küresel ve kromatik hataların önlenmesi ve odak noktasının küçültülmesi için asferik yüzey (Koniklik sabiti<-1) lensler tercih edilmektedir. Ancak özel boyutlarda bu lenslerin üretimi çok maliyetli olmaktadır hatta az miktarlarda üretim gerçekleştirilememektedir. Bu çalışmada CPV güneş hücresi için uygun olabilecek SBS kaplama özelliği ve gölgelenme alanını geçmeyecek SBS lens seçimi yapılmıştır. SBS lens olarak Edmund optik tarafından üretilen N-BK7 cam malzemeden yapılmış 31,01 derecelik 30 mm çapında küresel lensin, SBS lens olarak kullanımı tercih edilmiştir. Üretilen bu lens farklı kaplama seçeneklerine sahiptir. Bu kaplama seçenekleri arasında CPV güneş hücresinin en iyi çalışma dalga boyu aralığı olan 450-1000 nm'yi yüksek verimlilikte geçiren ve Ge alt hücresi tarafından üretilen fazla akımı kesmesi için 1000 nm'den sonrasını kısmı olarak yansıtan kaplama seçeneğine en uygun olan VIS-NIR kaplama seçeneği bu çalışmada analiz edilmiştir. Ticari sır olması sebebi ile lenste kullanılan kaplama malzemesi ve kalınlıkları bilinmese de Zemax programı tarafından bu lens seçilebilmektedir. Zemax programı tarafından boyutlandırılan bu lense, Zemax programında Coating alanından EO_VISNIR_517 kaplama kodu ile sadece ön yüzeyine kaplama seçeneği uygulanmış ve sonuçlar kaplamalı ve kaplamasız olarak karşılaştırmalı şekilde elde edilmiştir. Zemax programında boyutlandırılan SBS lensin görüntüleri Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4. SBS lensin Zemax görüntüsü a) Y-Z ekseninde b) izometrik.

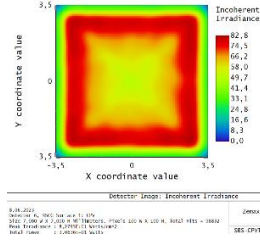
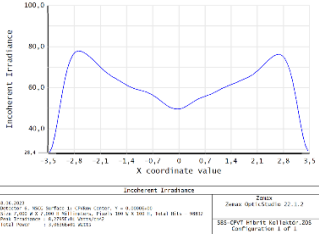
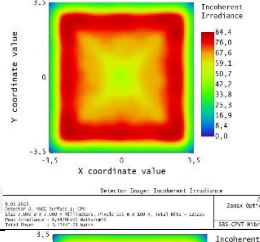
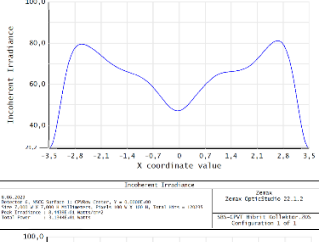
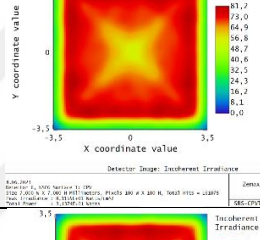
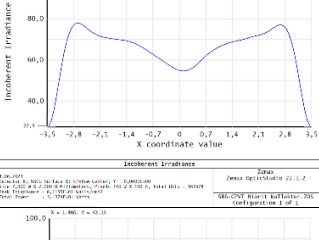
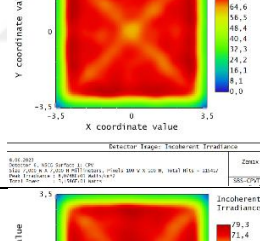
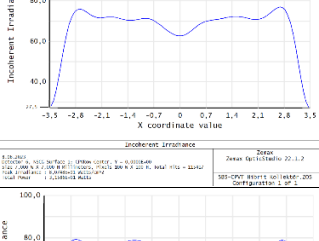
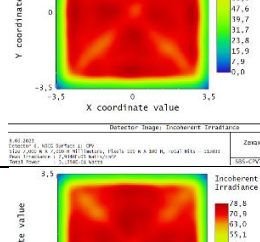
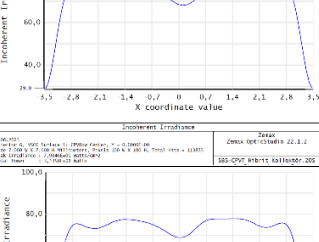
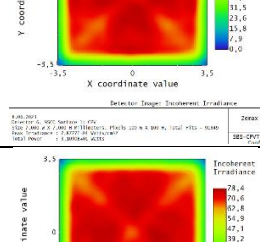
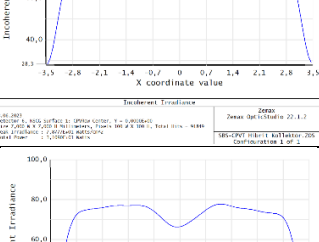
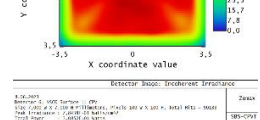
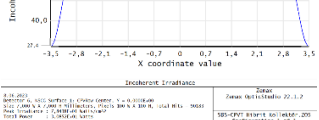
Cassegrain tipi CPV/T hibrit kolektöründeki son optik eleman olan ışık yolu sistem kabul açısını arttırmak amacı ile kare prizma olarak düşünülmüş ve geniş spektrum aralığında çalışan ve yüksek geçirgenliğe sahip olan N-BK7 cam malzemeden üretilmiş malzemeden seçilmiştir. Boyutlandırma, SBS lens'den yansıyan ışıkları yüksek kabul oranı ile alabilecek aynı zamanda aynadan yansıyarak SBS lense ve oradan CPV güneş hücresine giden ışınlara engel olmayacak şekilde oluşturulmuştur. Zemax Optik Studio programında non-sequential modu kullanılarak tasarlanan Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektörün tüm optik elemanlarının programda oluşturulan görüntüsü Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5. Zemax programında oluşturulan SBS-CPV/T hibrit kolektörün 3 boyutlu görüntüsü.

Şekil 5.5’de verilen SBS-CPV/T hibrit kolektör optik bileşenlerinin, birbirleri arasında en uygun konumlandırılması Zemax programında bulunan ışın takip analizi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ışın takip analizi 1×10^5 ışın ile gerçekleştirilmiştir. Ancak optik elemanların çalışma aralığı CPV güneş hücresi üzerine düşecek ışınım miktarının maksimum olmasının yanı sıra yüksek homojen ışınım dağılımının da gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu sebeple en uygun konumlandırma, maksimum ışınım miktarı yüksek ışınım homojenliği çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.2’de birincil ayna merkezinden ve alıcı başlangıç noktası arasındaki farklı mesafelerde CPV detektörden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tablo 5.2’de görüldüğü üzere birincil ayna ve alıcı arasındaki mesafe değiştikçe CPV güneş hücresi üzerine düşen ışınım şiddeti ve özellikle dağılımı büyük oranda değişiklik göstermektedir. 114-115 ve 116 mm düşük mesafe aralıklarında hücre üzerine düşen ışınım dağılımının hücre üzerinde ciddi verim düşüşleri gerçekleştirebilecek hatta zarar verebilecek pozisyonudadır. Bunun sebebi birincil aynadan yansıyan ışınların odak noktasının, CPV güneş hücresine yakınlığı ile açıklanabilir. Ayrıca ikincil optik eleman içerisinde çok fazla çarpma gerçekleştirmediği için iç yansıma gerçekleşmeden güneş hücresi üzerine düşen ışın sayısı çok fazladır. Yine 114 mm mesafe için ikincil optik eleman içerisine giren ışın açısı maksimum iç yansıma açısında fazla olduğundan SOE içerisinde yansıma gerçekleştirmeden dışarı çıkmaktadır. Bu da bu mesafe aralığı için güneş hücresi üzerine düşen ışınım gücünü düşürerek optik verimliliği azaltmaktadır. 119 ve 120 mm yüksek mesafe aralıklarında odak noktası SOE dışında oluşmaktadır. Bu mesafelerde CPV güneş hücresi üzerine düşen ışınım gücü nispeten daha düşüktür. Bunun sebebi CPV güneş hücresi ile arasındaki mesafe artışından dolayı iç yansılarda saçılma ile ışınım miktarının azalması ile gösterilebilir. Ayrıca yine bu mesafelerde de CPV güneş hücresi üzerine düşen ışınım dağılımı yeterince homojen değildir ve bu da hücre verimlilik düşüşüne sebep olmaktadır. 117 ve 118 mm mesafe aralıklarında optik verimlilikler sırasıyla % 81,84 ile % 81,28 olarak hesaplanmıştır. 117 mm mesafe aralığında optik verimlilik daha iyi olmasına rağmen 118 mm mesafe aralığında daha homojen bir ışınım dağılımı mevcuttur. Işığın CPV güneş hücresi üzerinde homojen dağılımı CPV/T hibrit sistem toplam performansını daha fazla etkileyeceğinden en uygun mesafe aralığı bu çalışmada 118 mm olarak belirlenmiştir.

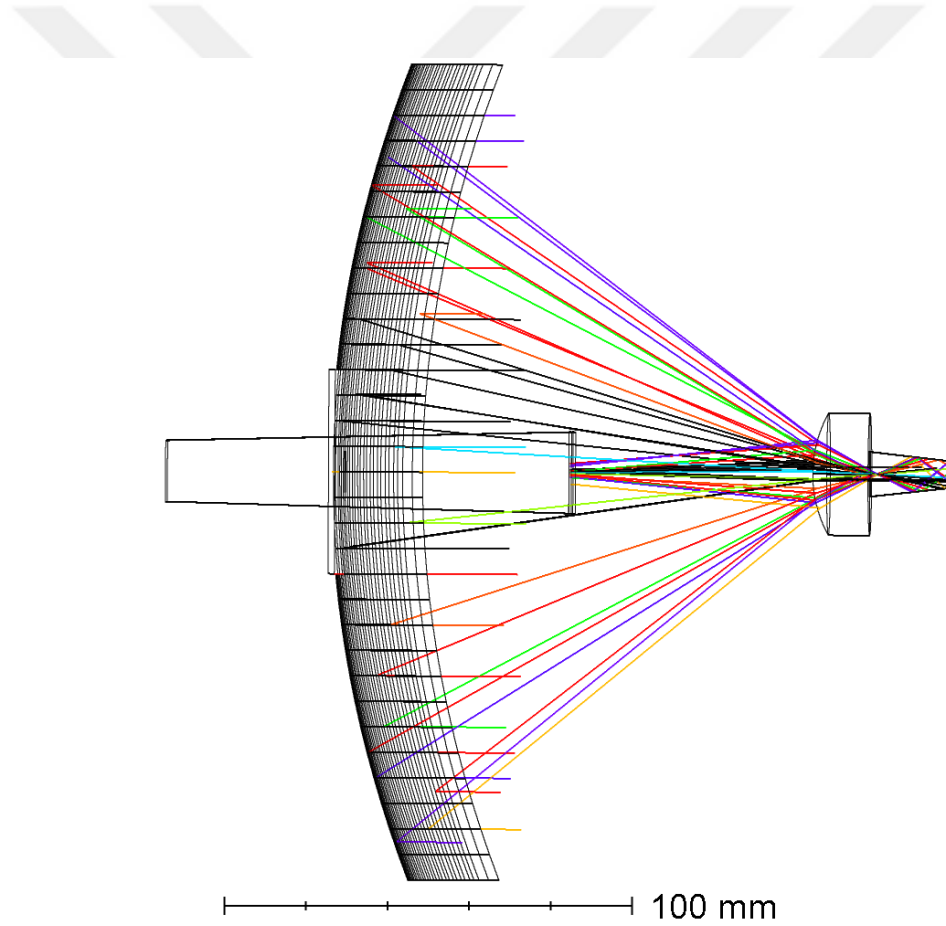
Tablo 5.2. Farklı birincil ayna-alıcı mesafelerinde CPV detektör üzerine düşen ışınım durumları.

Mesafe (mm)	Işık Yolu + CPV detektör güçleri ve optik verimlilik	CPV detektör ışınım dağılımı	CPV detektör X eksenı boyunca ışınım dağılımı
114	0,801W+30,636W=31,43W $\eta_{opt} = \% 78,62$		
115	1,176W+31,344W=32,52W $\eta_{opt} = \% 81,33$		
116	1,392W+31,374W=32,76W $\eta_{opt} = \% 81,94$		
117	1,141W+31,586W=32,72W $\eta_{opt} = \% 81,84$		
118	1,145W+31,358W=32,50W $\eta_{opt} = \% 81,28$		
119	1,156W+31,090W=32,24W $\eta_{opt} = \% 80,6$		
120	1,158W+30,852W=32,01W $\eta_{opt} = \% 80,0$		

Işın takip analizi ile detektörlerden elde edilen sonuçlar ışığında gerçekleştirilen en uygun konumlandırmaya ait bileşen özellikleri ve konumları Şekil 5.6'da program içerisinde bulunan bileşen editörü ekran görüntüsü ile verilmiştir. En uygun konumlandırma neticesinde oluşan SBS-CPV/T hibrit kolektörün 20 adet ışında çalışma görüntüsü de Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

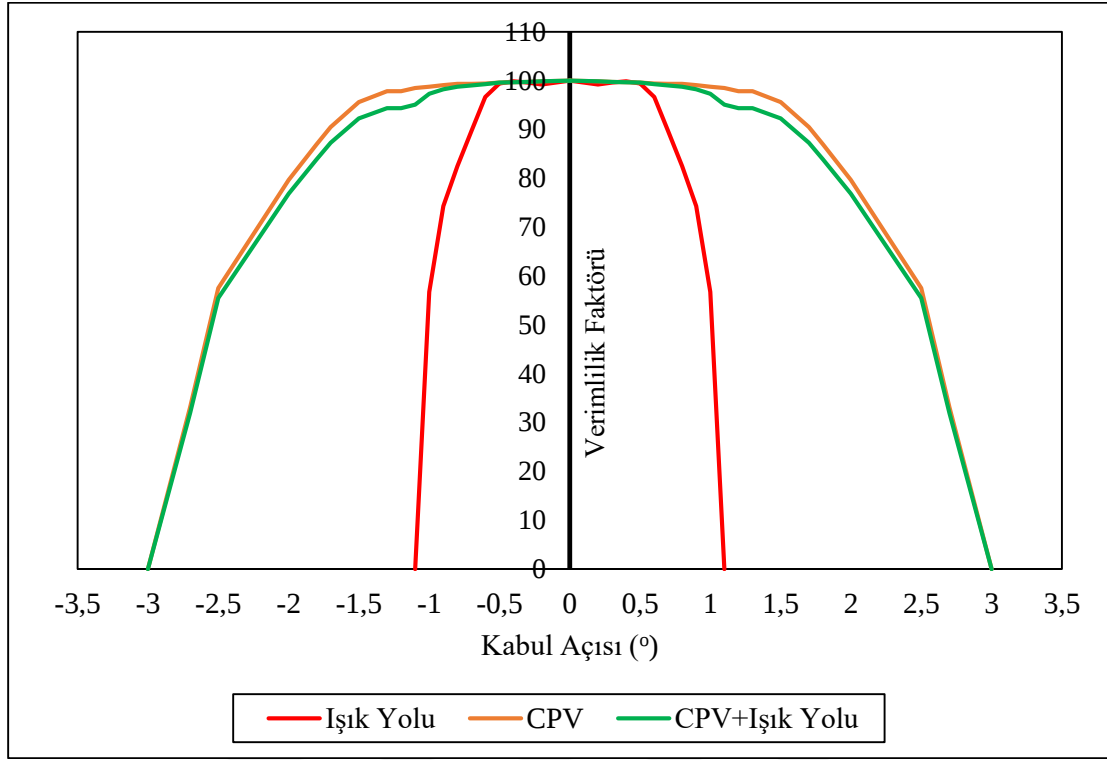
Object Type	Comment	Ref Obj	Ins	X	F	Y	Z	Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	X Half Width	Y Half Width	# X Pixels	# Y Pixels	Data Type	Color	Smoothing	Scale
1 Source Rectangle	Güneş	0	0	0.0	0.0	35.000	180.000	0.000	0.000	0.000	0.000	MIRROR	260.000	-1.000	99.981	99.981	25.000	25.000	0.000	0.000
2 Aspheric Surface 2	Parabolik Çukur Ayna	0	0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	N-BK7	31.010	0.000	15.000	15.000	14.000	0.000	0.000	15.000
3 Standard Lens	SBS Lens	0	0	0.0	0.0	118.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	S-TIM2-2	5.500	5.500	20.000	3.250	3.250	0.000	0.000	0.000
4 Rectangular Volume	İkinci Optik Eleman	0	0	0.0	0.0	132.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	N-BK7	12.500	12.500	100.000	7.500	7.500	0.000	0.000	0.000
5 Rectangular Volume	Işık Yolu	0	0	0.0	0.0	59.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	3.500	3.500	100	100	0	0	0	0
6 Detector Rectangle	CPV	0	0	0.0	0.0	152.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	12.500	12.500	100	100	0	0	0	0
7 Detector Rectangle	Işık Yolu	0	0	0.0	0.0	58.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	25.000	25.000	100	100	0	0	0	0
8 Detector Rectangle	Gölgeleme Alanı	0	0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ABSORB	25.000	25.000	100	100	0	0	0	0

Şekil 5.6. SBS-CPV/T hibrit kolektör için en uygun konumlandırma durumunda bileşen editörü ekran görüntüsü.



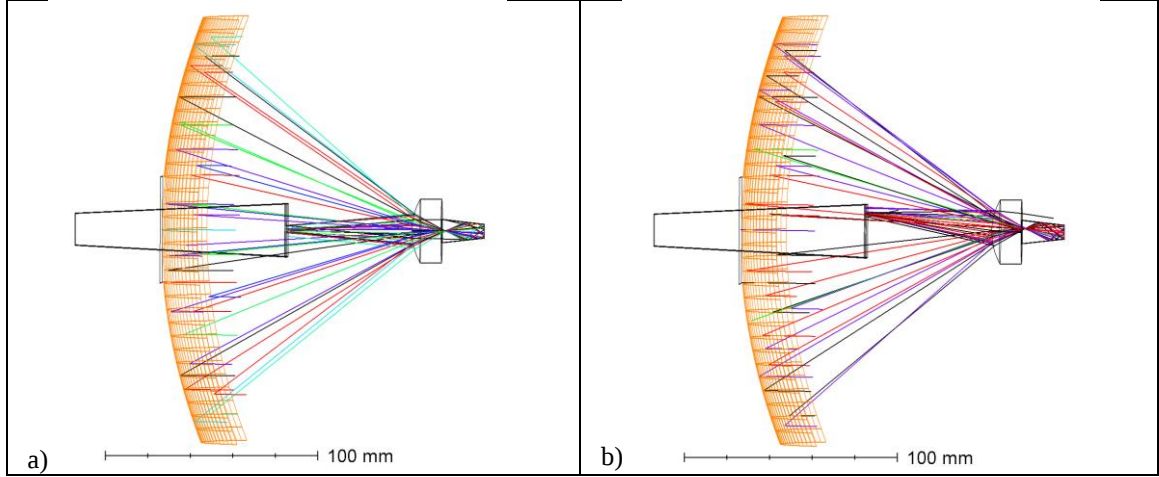
Şekil 5.7. SBS-CPV/T hibrit kolektör en uygun konumda 20 ışın altında çalışma görüntüsü.

Optik sistem tasarımlarında kabul açısı, sistem değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kabul açısı CPV sistemlerde sistem üzerine düşen ışınlam miktarının % 90'a düştüğü açı olarak ifade edilir. En uygun koşullarda konumlandırılmış SBS-CPV/T hibrit kolektörün kabul açısı Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



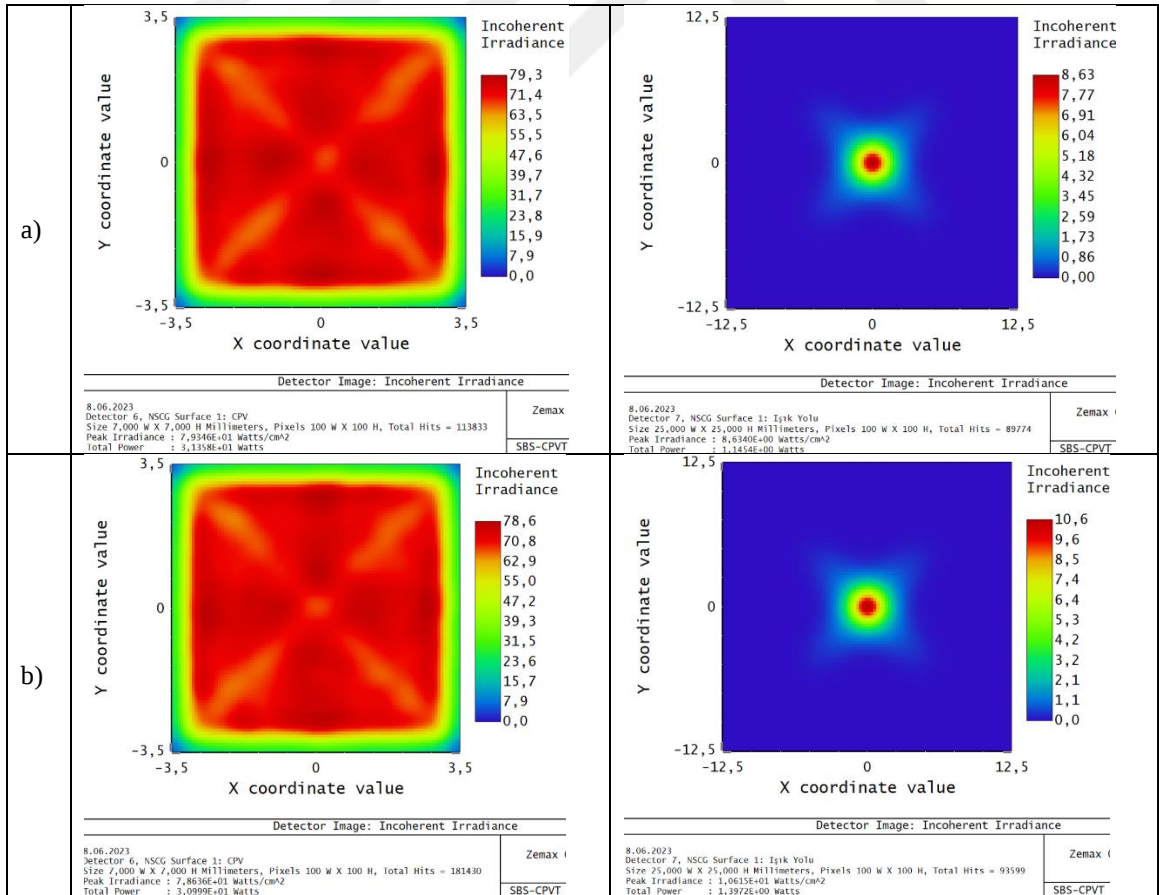
Şekil 5.8. SBS-CPV/T hibrit kolektör kabul açısı.

Zemax üzerinde tasarlanan SBS-CPV/T hibrit kolektör için $0,5^\circ$ açı artışları ile detektör üzerine düşen ışınlam miktarları ölçülmüştür. Ancak kurulan sistemde 2 adet detektör bulunmaktadır. Bunlarda birincisi CPV güneş hücresi üzerine düşen ve elektrik enerjisi dönüşümü için kullanılacak olan ışınlam miktarını ölçerken diğeri ışık yolunda bulunmakta ve ısı enerjisi olarak kullanılacak ışınlam miktarını göstermektedir. Bu sebeple Şekil 5.8’de görüldüğü üzere CPV, Işık Yolu ve her ikisinin toplamı üzerinden kabul açıları hesaplanmıştır. Işık yoluna gelen ışınlamların kabul açısı $0,7^\circ$ olarak hesaplanırken, CPV ve toplam sistem kabul açısı $1,7^\circ$ olarak hesaplanmıştır. CPV ve toplam sistem kabul açısı $1,7^\circ$ olarak hesaplanmasına rağmen Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektör amacı kullanılmayan veya aşırı ısınmaya sebep olan ışınlamın ısı enerjisi olarak kullanılması olduğu için kolektörün kabul açısı $0,7^\circ$ olarak alınması gerekmektedir. $0,7^\circ$ ’lik kabul açısı CPV ve CPV/T kolektörler için kabul edilebilir kabul açısı aralığında olmasına rağmen sistemde kullanılan SBS küresel lensin, asferik yüzey lens olması durumunda odak noktası küçüleceğinden bu kabul açısının artması mümkün olabilmektedir. Optik sistemin, hatasız ve $0,7^\circ$ ’lik sapma açısında çalışma görüntüsü ve ışınlam dağılımları Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Optik sistemin çalışma görüntüsü ve ışınım dağılımları a) hatasız b) 0.7 derece sapma açısında.

Bu tez çalışmasında ön yüzeyinde kaplama bulunan yani SBS lens ile kaplamasız N-BK7 lensin karşılaştırılması ve değerlendirilmesi her aşamada gerçekleştirmiştir. Zemax programı tarafından gerçekleştirilen optik tasarımda SBS lens ve kaplamasız N-BK7 cam lens kullanımı durumunda detektörlerde oluşan ışınım dağılımı ve güçleri Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

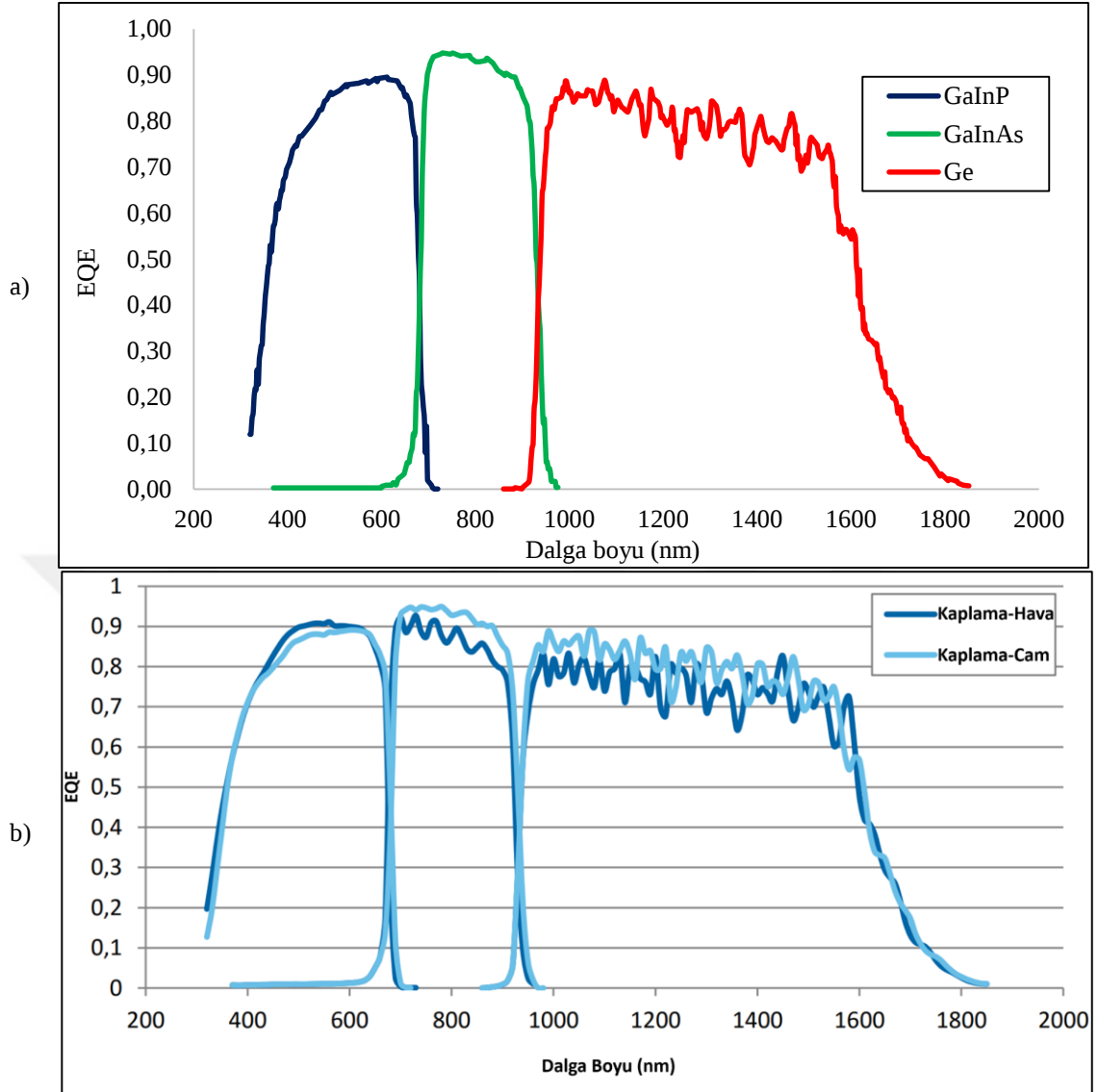


Şekil 5.10. Detektör üzerindeki ışınım dağılımları ve güçleri a) SBS lens b) kaplamasız N-BK7 lens.

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere SBS lens kullanıldığı durumlarda CPV, ışık yolu detektör üzerine düşen ve toplam ışıyım güç miktarı sırasıyla 31,358 W, 1,145 W ve 32,503 W olarak ölçülmüştür. Kaplamasız N-BK7 cam lens kullanımı durumunda bu sıralama 30,999 W, 1,397 W ve 32,387 W olarak ölçülmüştür. Burada SBS lens veya kaplamasız lens kullanımı durumlarında toplam ışıyım miktarının değışmediğı ancak SBS lens kullanıldığı durumlara CPV detektör üzerine düşen ışıyım miktarının kaplamasız lens kullanıldığı durumlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, SBS lensin 450-1000 nm dalga boyu aralığında yüksek ışıyım geçirgenliğine sahip olmasıdır. Ayrıca SBS lens kullanımı durumunda her ne kadar toplam ışıyım miktarları değışmemiş olsa da burada önemli olan faktör CPV güneş hücresinin en uygun çalışma aradığındaki dalga boylarının en yüksek seviyede geçirilmesi ve Ge alt hücresi tarafından oluşan atık ısıyım hücre üzerine düşmeden ısıyım enerji olarak başka noktada kullanılabilir olacak olmasıdır. Sonuç olarak Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektör için tasarlanan optik sistemde, optik verimlilik SBS lens kullanılması ve kaplamasız N-BK7 kullanılması durumunda sırasıyla % 81,28 ve % 80,99 olarak hesaplanmıştır.

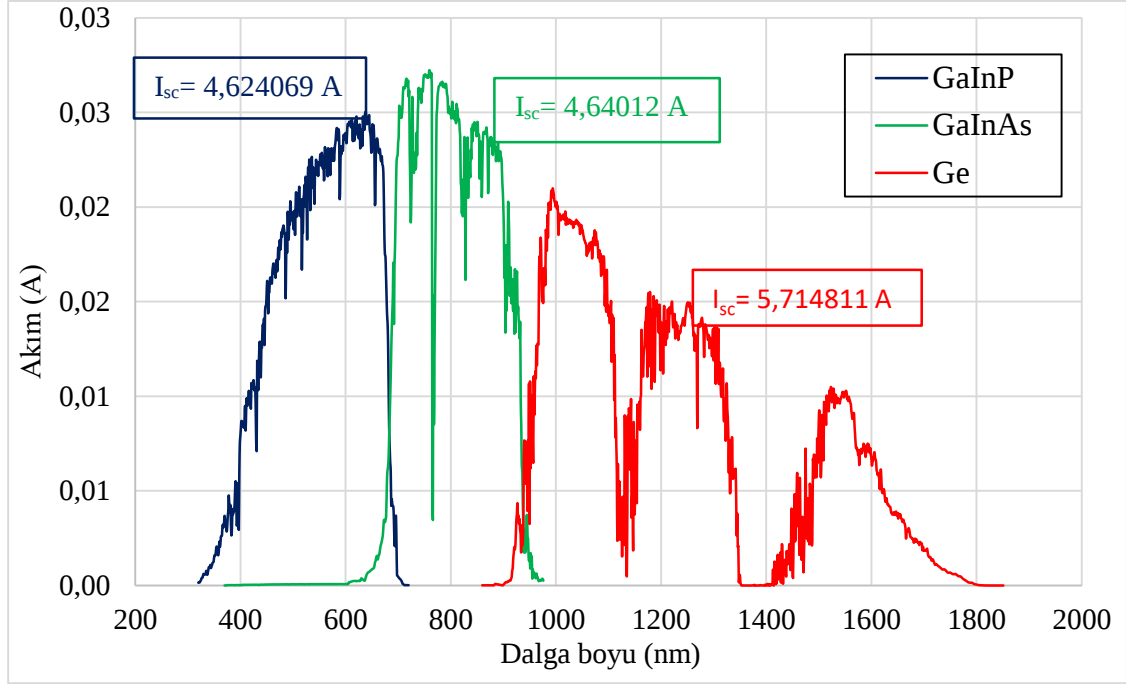
5.2. CPV Güneş Hücresi Model Sonuçları

Bu tez çalışmasında, Azur Space firmasına ait 7x7 mm² boyutlarında GaInP/GaInAs/Ge 3 eklemlı güneş hücresi, Materyal ve Metot bölümünde verilen denklemler kullanılarak MATLAB[®] programı ile modellenmiş ve sonuçlar alınmıştır. Model kullanılan denklemlerde bilinmeyen parametreler firma tarafından sağlanan 3C44C model 5,5x5,5 mm² boyutlarında güneş hücresinin 1.5 AM – 1000 W/m² doğrudan ışıyım değeri (ASTM G 173-03) altında ve 25 °C sıcaklıklarındaki ölçüm koşullarında ölçülen referans değeri ile optimize edilerek elde edilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için öncelikle hücrenin dalga boylarına göre dış kuantum verimliliğinin (EQE) bilinmesi gerekmektedir. Firma tarafından resim formatında sunulan bu değeri dijitalize edilmiş ve dijitalize edilen EQE değeri dalga boylarına göre Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. EQE değeri a) dijitalize edilen b) firma tarafından paylaşılan.

Firma tarafından sunulan EQE değeri hücre kaplama seçeneklerine göre hava-hücre yansıma önleyici kaplama ve cam-hücre yansıma önleyici kaplama olarak sunulmuştur. Bu çalışmada ikincil optik eleman kullanıldığında cam-hücre yansıma önleyici kaplama güneş hücresi EQE değeri kullanılmıştır. Dijitalize edilen EQE değeri Denklem 4.3 ve 4.4 kullanılarak 5,5x5,5 mm² güneş hücresinde her bir hücrenin 1000W/m² doğrudan ışınlam ve 1000X yoğunlaştırma altında dalga boylarına göre üretilen foto-akımları hesaplanmış ve Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



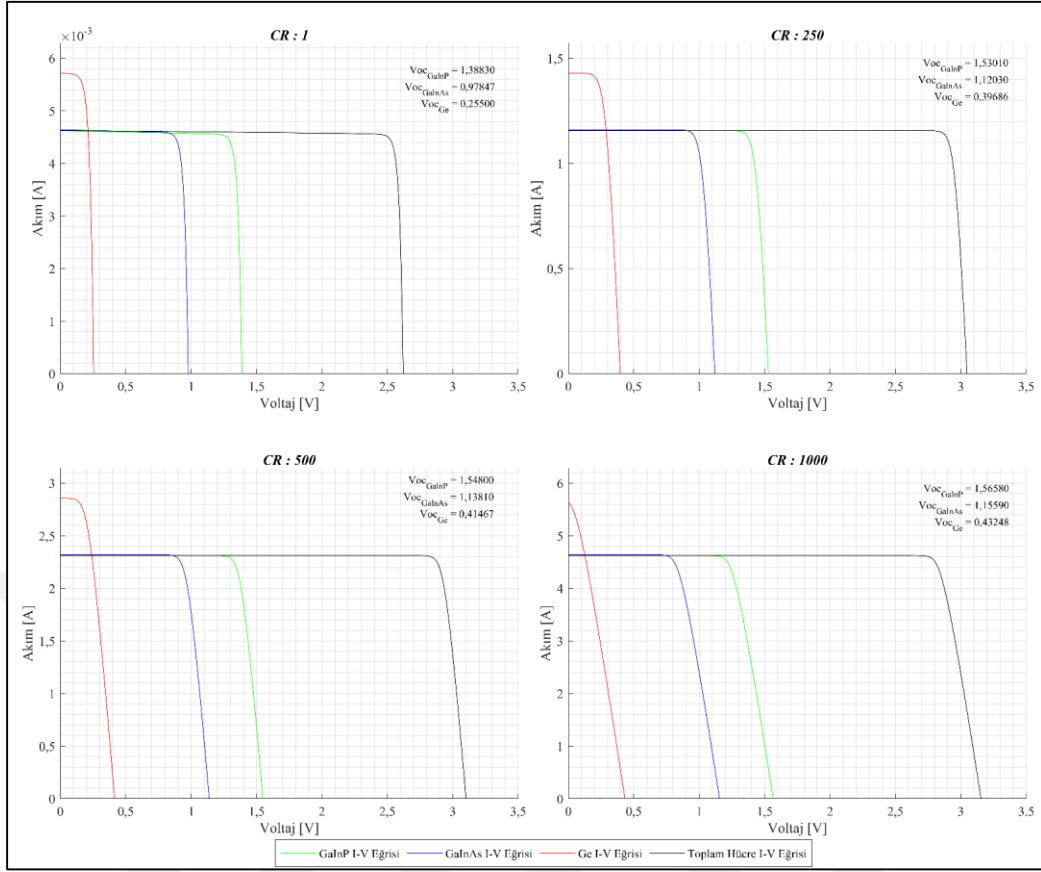
Şekil 5.12. 1000W/m² doğrudan ışınım ve 1000X yoğunlaştırma altında alt hücrelerin fotoakım değerleri.

Şekil 5.12’de görüldüğü üzere GaInP alt hücresi için toplam foto-akım ($I_{ph}=I_{sc}$) değeri 4,624 A, GaInAs alt hücresi için 4,64 A ve Ge alt hücresi için 5,714 A olarak hesaplanmıştır. Burada hücre metamorfik yapıya sahip olmasına rağmen Ge alt hücre tarafından oluşan aşırı akım açıkça görülmektedir. Oluşan bu aşırı akım hücre üzerinde ısı enerjisine dönüşerek hücre sıcaklığını arttırmakta dolayısıyla hücre verimliliğini düşürmektedir. MATLAB® programı kullanılarak oluşturulan modelde bilinmeyen parametreler, referans hücre sonuçları Newton-Raphson eşitliği kullanılarak optimize edilmiştir. Modelde kullanılan bilinmeyen parametreler Tablo 5.3’de verilmiştir.

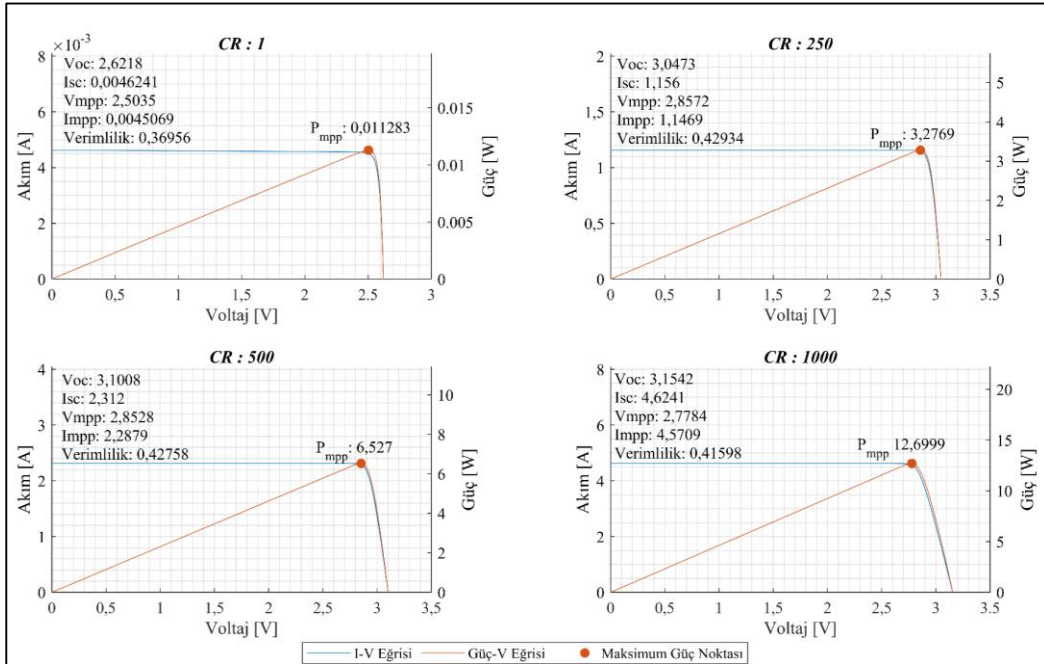
Tablo 5.3. Modelde kullanılan bilinmeyen parametreler.

Parametreler	GaInP	GaInAs	Ge
n	1	1	1
γ	2	2	2
K (A/cm ² .K ⁴)	1,999E-05	4,958E-07	1,972E-05
R_s (Ω /cm ²)	0,209	0,209	0,209
R_{sh} (Ω /cm ²)	6600	6600	6600

Tablo 5.3’de kullanılan bilinmeyen parametrelere göre 5,5x5,5 mm² aktif alana sahip CPV güneş hücresinin 1X, 250X, 500X ve 1000X yoğunlaştırma altında 1.5 AM 1000W/m² doğrudan ışınım altında her bir alt hücrenin I-V grafiği oluşturulmuş Şekil 5.13’de verilmiştir. Ayrıca aynı yoğunlaştırma değerlerinde toplam hücre I-V grafiği ve güç eğrisi Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



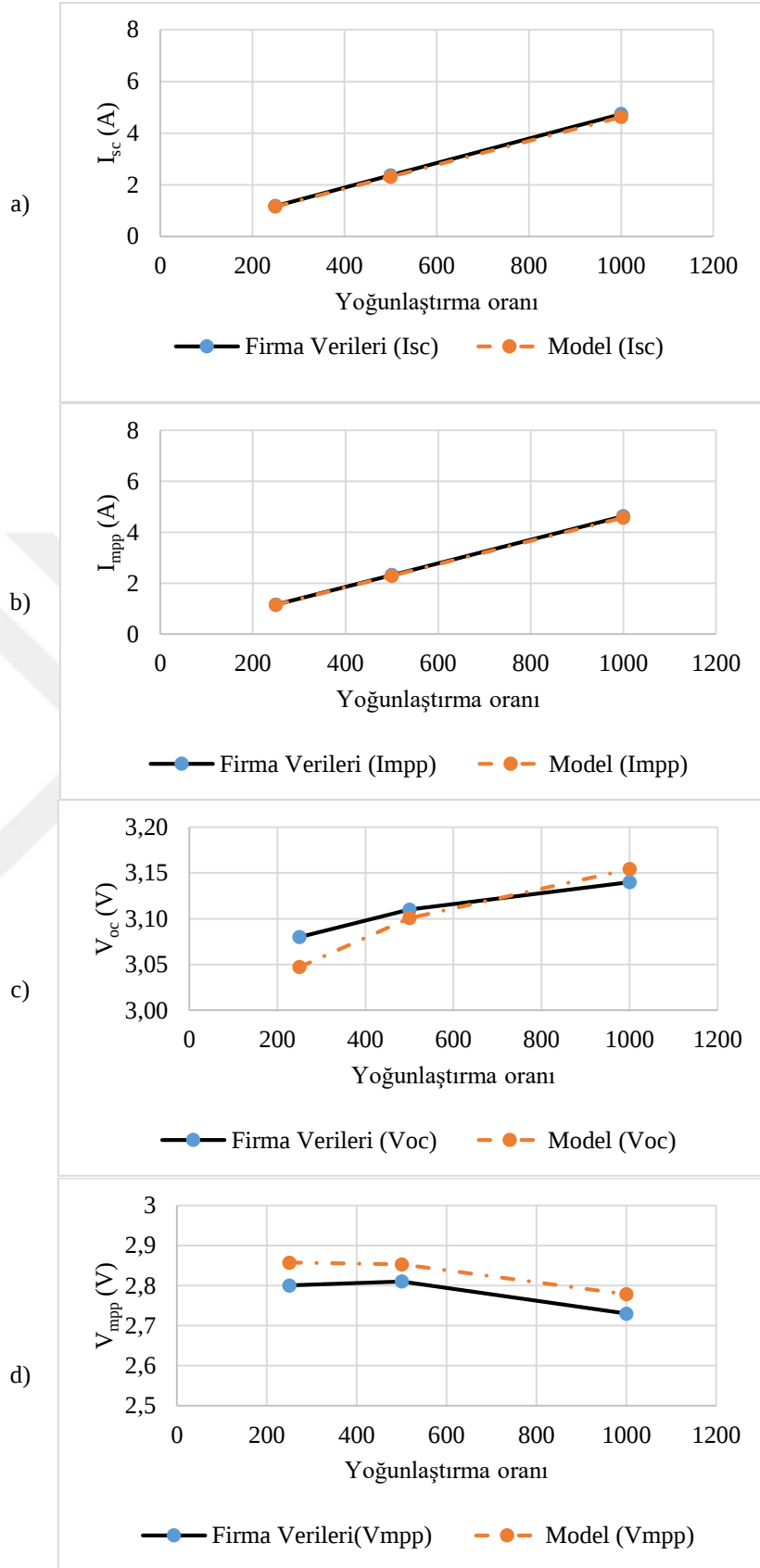
Şekil 5.13. Tüm alt hücelere ait farklı yoğunlaştırma oranlarında I-V eğrileri a) 1X b) 250X c) 500X d) 1000X.



Şekil 5.14. Toplam hücreye ait farklı yoğunlaştırma değerlerinde I-V ve güç eğrileri a) 1X b) 250X c) 500X d) 1000X.

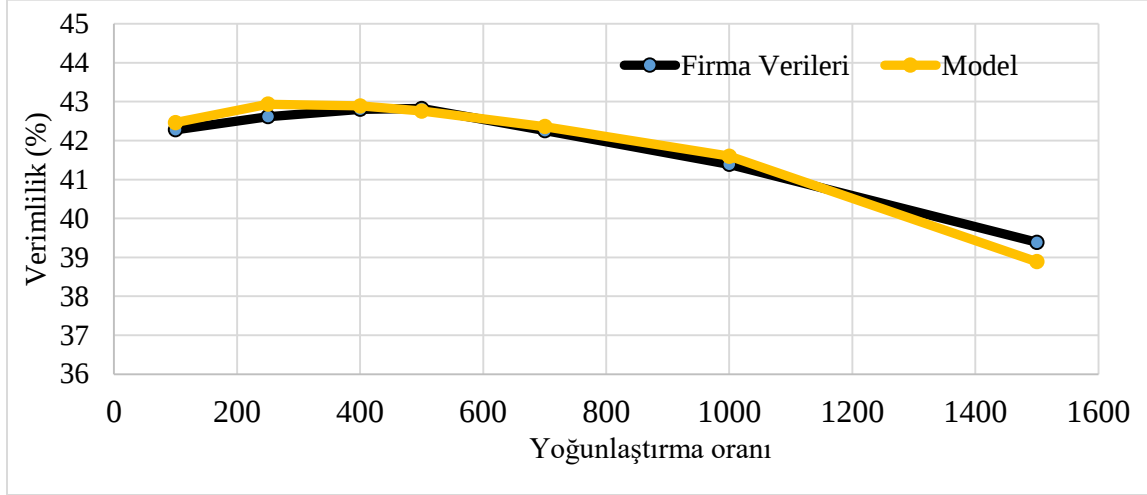
Şekil 5.13 ve 5.14’de görüldüğü üzere 1X, 250X, 500X ve 1000X yoğunlaştırma altında toplam hücre açık devre voltajı sırasıyla 2,6218 V, 3,0473 V, 3,10 V ve 3,1542 V olarak hesaplanmıştır. Kısa devre akımları ile sırasıyla 0,0046 A, 1,156 A, 2,2879 A ve 4.5709 A olarak bulunmuştur. Burada yoğunlaştırma oranı arttıkça kısa devre akımı lineer bir artış sağlarken, açık devre voltajının logaritmik olarak arttığı açıkça görülmektedir. Azur Space firmasının GaInP/GaInAs/Ge 3 eklemli CPV güneş hücresi metamorfik bir hücre yapısına sahip olmasına rağmen Şekil 5.13’de Ge alt hücresinin diğer iki alt hücreye göre daha fazla akım ürettiği fark edilmektedir. Bu da birbirlerine seri olarak bağlı toplam hücrenin akımında fazla olacağından hücre içerisinde aşırı ısınmaya sebep olacaktır. Şekil 5.14’de görüldüğü üzere toplam hücre verimlilikleri 1X, 250X, 500X ve 1000X yoğunlaştırma altında sırasıyla % 36,95, % 42,93, % 42,75 ve % 41,59 olarak hesaplanmıştır. Hücre üzerindeki yoğunlaştırma oranı yaklaşık 500X’e kadar hücre verimliliğinde artış gözlemlenmekte 500X den sonra ise hücre toplam verimliliğinde düşüş yaşanmaktadır. Bu da yoğunlaştırma oranının arttıkça seri direnç etkisinin artması ile açıklanabilir. Belirlenen yüksek şönt direnç sebebi ile kısa devre akımı ile maksimum hücre akımı arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Bu da literatürde bulunan birçok yayında şönt direncinin ihmal edilebilir olduğu gerçeğini kanıtlamaktadır.

5,5x5,5 mm² CPV güneş hücresi için elde edilen değerler firma verileri ile karşılaştırılmış ve Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Şekil 5.15’de görüldüğü üzere I_{sc} değeri yoğunlaştırma oranı ile lineer olarak arttığından model ile firma değerleri arasında fark yok denecek kadar azdır. Aynı şekilde şönt direncinin büyük seçilmesi ile yüksek yoğunlaştırma etkisinde dahi hücrenin maksimum akım değeri de doğrusal şekilde artış göstermiştir. Bu da seçilen şönt direnci değerinin model için uygun olduğunu göstermektedir. I_{sc} ve I_{mpp} değerleri için RMSE değerleri sırasıyla 0,076 ve 0,040 Amper olarak hesaplanmıştır. Açık devre gerilimi ve hücrenin maksimum gerilimi, akım değerleri ile logaritmik olarak artış gösterdiği görülmektedir. V_{oc} ve V_{mpp} değeri için model en önemli parametre olan hücre seri direncidir. Model ile firma değeri arasında V_{oc} ve V_{mpp} değeri yaklaşık aynı yoğunlaştırma oranına kadar artış gösterirken bu yoğunlaştırma değerinden daha yüksek değerler de düşüşe geçmiştir. Buda model için kullanılan seri direnç değerlerinin bu hücre için uygun olduğunu göstermektedir. V_{oc} ve V_{mpp} değerleri için sırasıyla RMSE değerleri 0,021 ve 0,049 Volt olarak hesaplanmıştır.



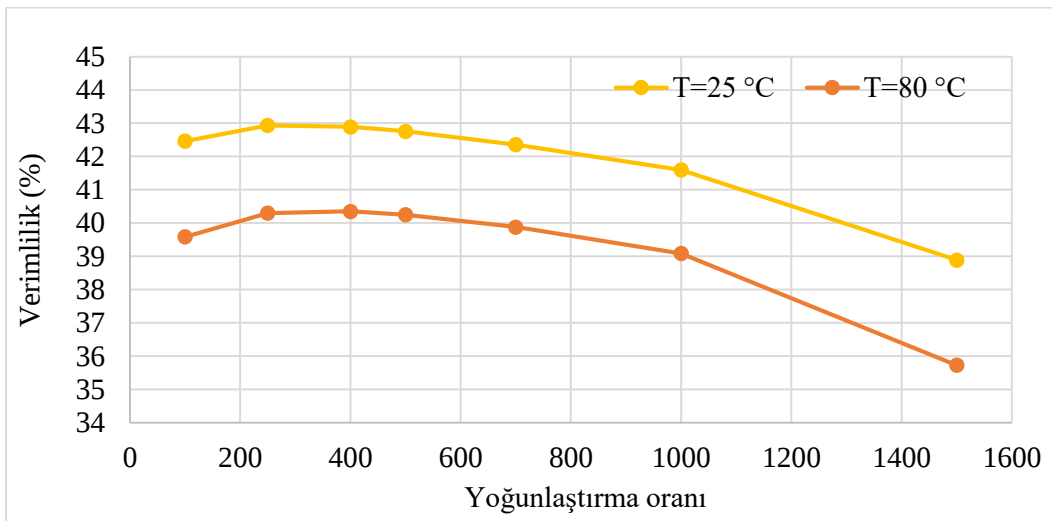
Şekil 5.15. Güneş hücresinin firma ve model değerlerinin karşılaştırılması a) I_{sc} b) I_{mpp} c) V_{oc} d) V_{mpp} .

Sıcaklık hücre verimliliği üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle MATLAB® programında elektriksel eş değer devre sıcaklık parametresinin de göz önünde bulundurulacağı bir model tasarlanmıştır. Modellenen CPV güneş hücresinin 25 °C sıcaklığında verimlilik değerleri firma verileri ile karşılaştırmış ve Şekil 5.16’da verilmiştir.



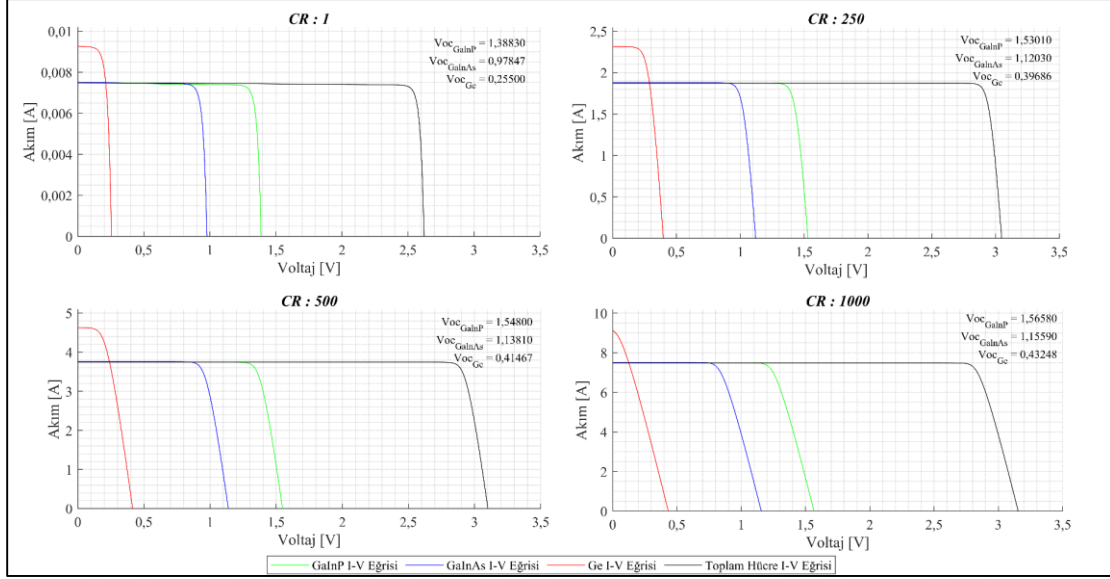
Şekil 5.16. CPV güneş hücresi model ve firma verimlilik değerleri.

Şekil 5.16’da görüldüğü üzere model ile firma verimlilik değerleri arasında yüksek benzerlik görülmektedir. Bu da Tablo 5.3’de model için kullanılan bilinmeyen parametrelerin bu hücre için uygun olduğunu göstermektedir. Model ile firma verimlilikleri RMSE değeri % 0,25 olarak hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda da model verimlilikleri hesaplanmış olup Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Şekil 5.17’de de görüldüğü üzere her 1 °C sıcaklık artışında verimde % 0,05 azalma meydana gelmektedir.

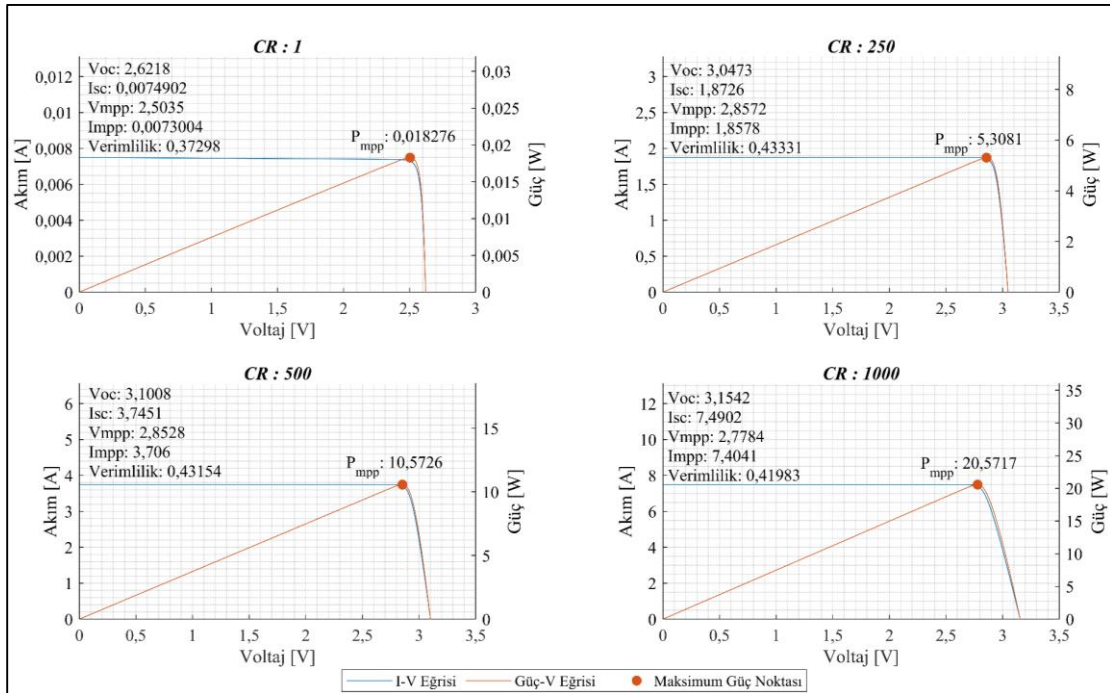


Şekil 5.17. CPV güneş hücresi farklı sıcaklıklarda model verimlilikleri.

Model parametreleri belirlenip firma değerleri ile yüksek doğruluğu sağlandıktan sonra bu çalışmada kullanılan $7 \times 7 \text{ mm}^2$ özel kesim CPV güneş hücresi için I-V ve güç eğrileri elde edilmiştir. Öncelikli olarak herhangi bir optik eleman kullanılmadan referans değerler altında (1000 W/m^2 DNI değeri altında ve 25°C sıcaklıkta) farklı yoğunlaştırma değerleri altında $7 \times 7 \text{ mm}^2$ CPV güneş hücresi I-V grafiği Şekil 5.18’de ve toplam hücre I-V ve güç eğrileri Şekil 5.19’da verilmiştir.



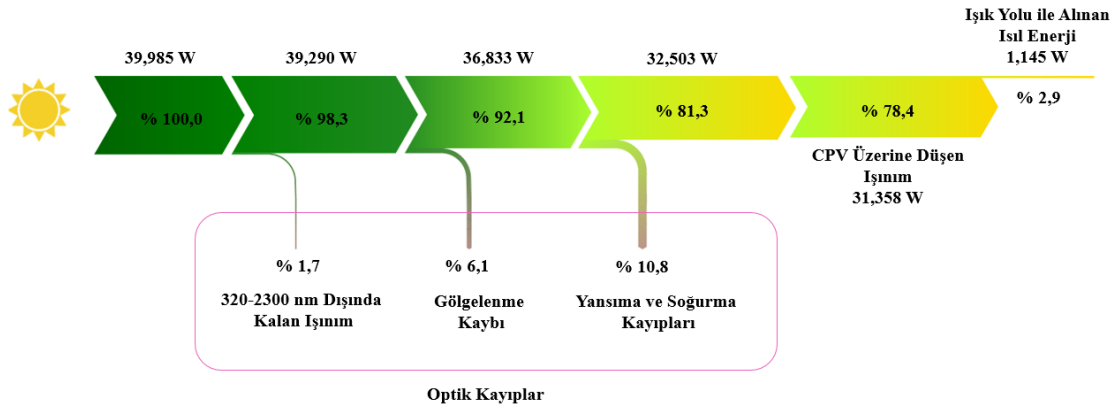
Şekil 5.18. $7 \times 7 \text{ mm}^2$ CPV güneş hücresi tüm alt hücre I-V eğrileri.



Şekil 5.19. $7 \times 7 \text{ mm}^2$ CPV güneş hücresi toplam I-V grafiği ve güç eğrileri.

Çalışmada kullanılan $7 \times 7 \text{ mm}^2$ hücre için Zemax Optik programı tarafından 765X yoğunlaştırma altında tasarlanan SBS-CPV/T hibrit kolektör için 25°C hücre sıcaklığında I-V grafikleri ve güç eğrileri elde edilmiştir. Bu hesaplamalar yapılırken hem optik verimliliğin dâhil edildiği hem de sadece güneş hücresi üzerine düşen güneş ışınım miktarına göre hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

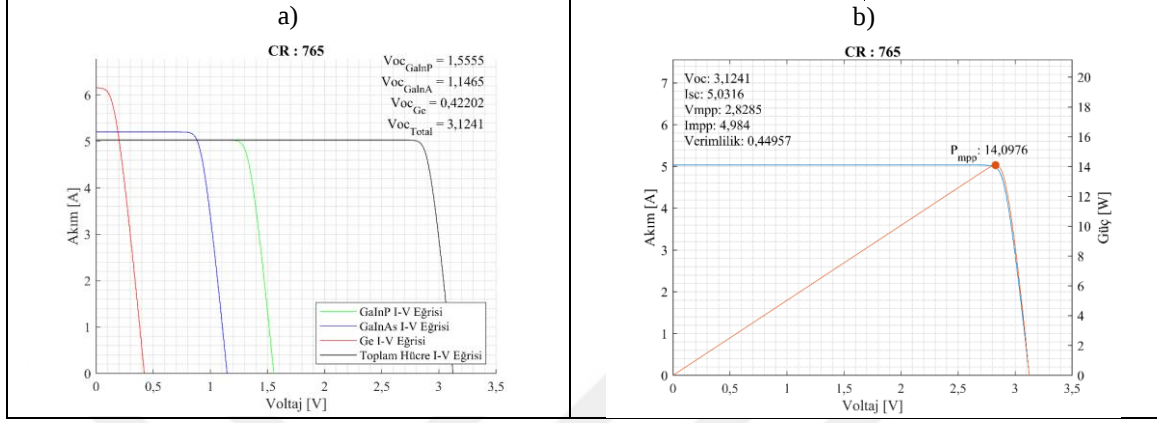
Sistem üzerine gelen güneş ışıınımdan güneş hücresi üzerine düşen güneş ışıınıma kadar gerçekleşen kayıplar Sankey diyagramı ile Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20. SBS-CPV/T hibrit kolektör için Sankey diyagramı ile optik kayıplar ve ışıınımları.

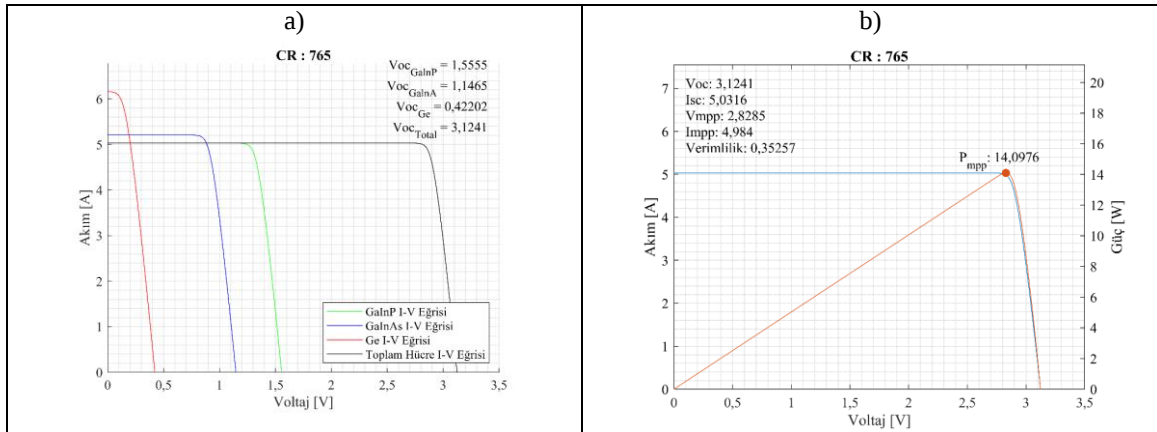
Optik tasarım kısmında detaylı bir şekilde bahsedilen sistemde $7 \times 7 \text{ mm}^2$ hücre için 765X yoğunlaştırma oranı kabul edilmiş ve sistemde $50 \times 50 \text{ mm}^2$ boyutlarında soğutucu blok kullanılmıştır. Buda gölgelenmeden dolayı kayıp oluşturmuş ve birincil ayna alanını arttırmıştır. $7 \times 7 \text{ mm}^2$ hücre için 765X yoğunlaştırmada ve $50 \times 50 \text{ mm}^2$ gölgelenme alanı için birincil ayna boyutları yaklaşık olarak $200 \times 200 \text{ mm}^2$ olarak belirlenmiştir. Bu da sistem üzerine gelen güneş ışıınımlarını $39,985 \text{ W}$ olmasına sebep olmuştur. $280\text{--}4000 \text{ nm}$ dalga boyu arasında olan güneş ışıınımlarının, $320\text{--}2300 \text{ nm}$ dalga boyu aralığı dışında kalan kısım optik elemanlar ve hava tarafından ya soğurulmakta ya da yansyarak sistem tarafından kaybolmaktadır. Bu sebeple programa $320\text{--}2300 \text{ nm}$ dalga boyu aralığı dâhil edilmiştir, ancak geriye kalan kısım da doğruluk açısından optik kayıp olarak hesaplamalara dâhil edilmiştir. $320\text{--}2300 \text{ nm}$ dalga boyu aralığı dışında kalan kısım, tüm güneş spektrumunun yaklaşık % 1,7’sini oluşturmaktadır. Bu sebeple Zemax programına tanımlanan kısım $39,290 \text{ W}$ ’dır. Bu aralıkta gelen güneş ışıınımlarının soğutucu bloktan kaynaklı gölgelenme etkisi sebebi ile yaklaşık % 6,1 kolektör için kayıp oluşmaktadır. Optik elemanlar tarafında yansıma ve soğurma kaynaklı ise yaklaşık %10,8 oranında optik kayıp meydana gelmektedir. Tüm bu kayıplar sonrasında SBS-CPV/T güneş kolektörü toplam optik verimliliği % 81,3 olarak hesaplanırken sadece SBS-CPV güneş kolektörü optik verimliliği % 78,4 olarak bulunmuştur.

7x7 mm² boyutlarında sistemde kullanılan güneş hücresi için güneş hücresi üzerine düşen ışınım miktarına göre 765X yoğunlaştırma oranı ve 25 °C hücre sıcaklığında elde edilen alt hücreler ait I-V eğrisi ve toplam hücre I-V ve güç eğrisi Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. 765X yoğunlaştırma ve 25 °C sıcaklık değerinde a) alt hücreler ait I-V eğrileri b) toplam hücre I-V ve güç eğrisi.

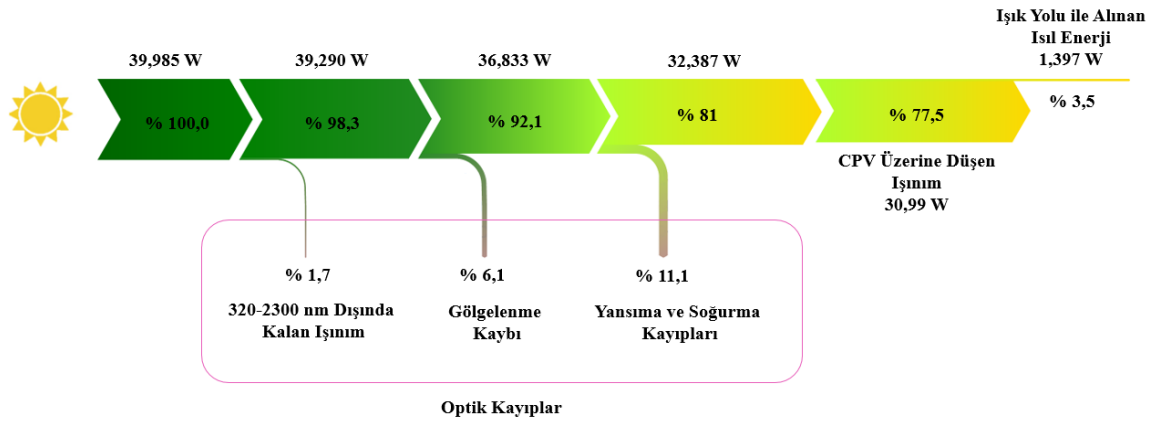
Şekil 5.21’de görüldüğü üzere 765X yoğunlaştırma altında toplam hücre V_{oc} değeri tüm alt hücrelerin V_{oc} değerlerinin toplamı olan 3,12 V iken I_{sc} değeri tüm alt hücreler arasında minimum I_{sc} olan 5.03 A olarak hesaplanmıştır. Toplam hücrenin maksimum gücü 14,09 W iken hücre üzerine düşen güneş ışınımına göre verimi % 44,96 bulunmuştur. Hücre veriminin yüksek olmasının sebebi sadece 320-2300 nm dalga boyu aralığındaki ışınımına göre hesaplamaların gerçekleştirilmesi ve sadece hücre üzerine düşen ışınım miktarı ile hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Sistemin yaklaşık % 78,42 değerinde elde edilen ısı enerjisinin dâhil edilmediği sadece SBS-CPV için optik kaybını da göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen SBS-CPV/T hibrit kolektör için elektriksel sonuçlar Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22. 765X yoğunlaştırma ve 25 °C sıcaklık değerinde a) alt hücreler ait I-V eğrileri b) toplam hücre I-V ve güç eğrisi.

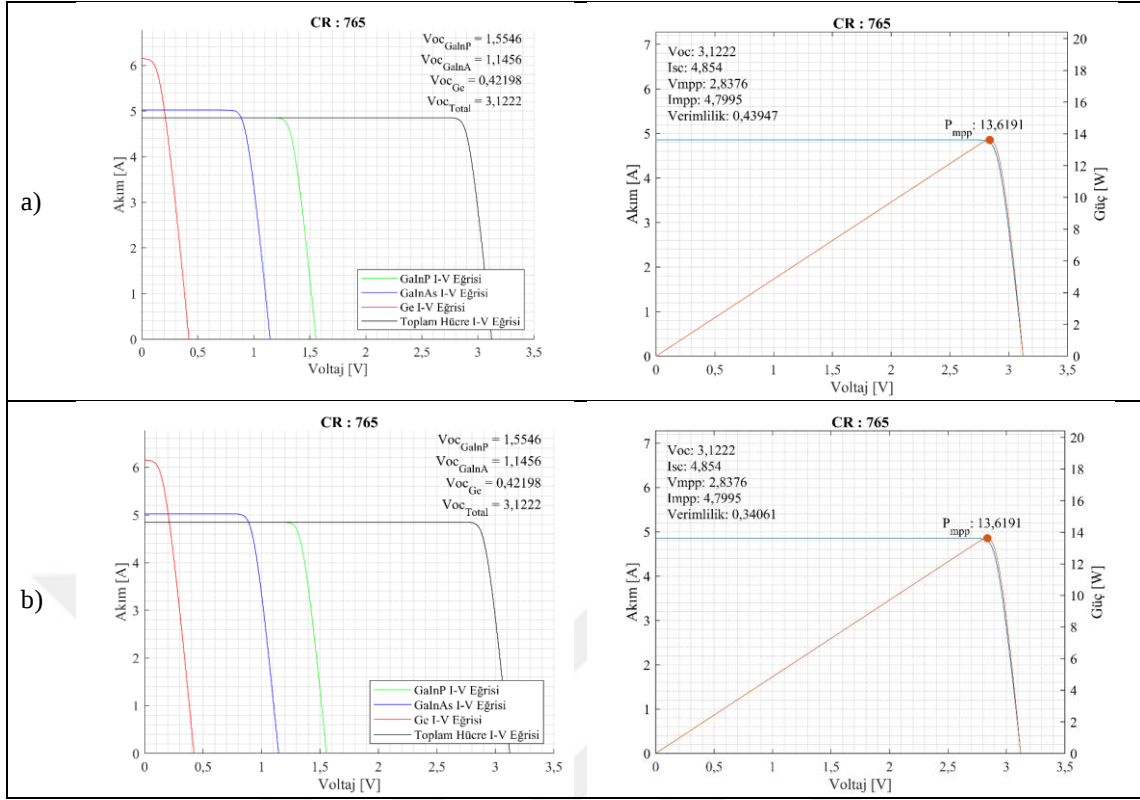
Burada tüm SBS-CPV/T hibrit kolektöre giren ışınlm değeri ne sonuçlar elde edilmiş hücre tarafından üretilen tüm değeri ler aynı kalırken verimlilik % 35,27 değeri nde hesaplanmıştır. Bu değeri SBS-CPV/T hibrit kolektörün elektrik dönüşüm verimliliğini ifade etmektedir.

Bu tez çalışmasında, spektral ışınlm ayırıcı lensin sistem üzerinde etkisini görebilmek için aynı işlemler kaplamasız N-BK7 tipi cam kullanıldığı durumlar içinde oluşturulmuştur. Kaplamasız lensin kullanıldığı CPV/T kolektör için optik kayıplar ve ışınlm miktarları Sankey diyagramı ile Şekil 5.23’de verilmiştir.



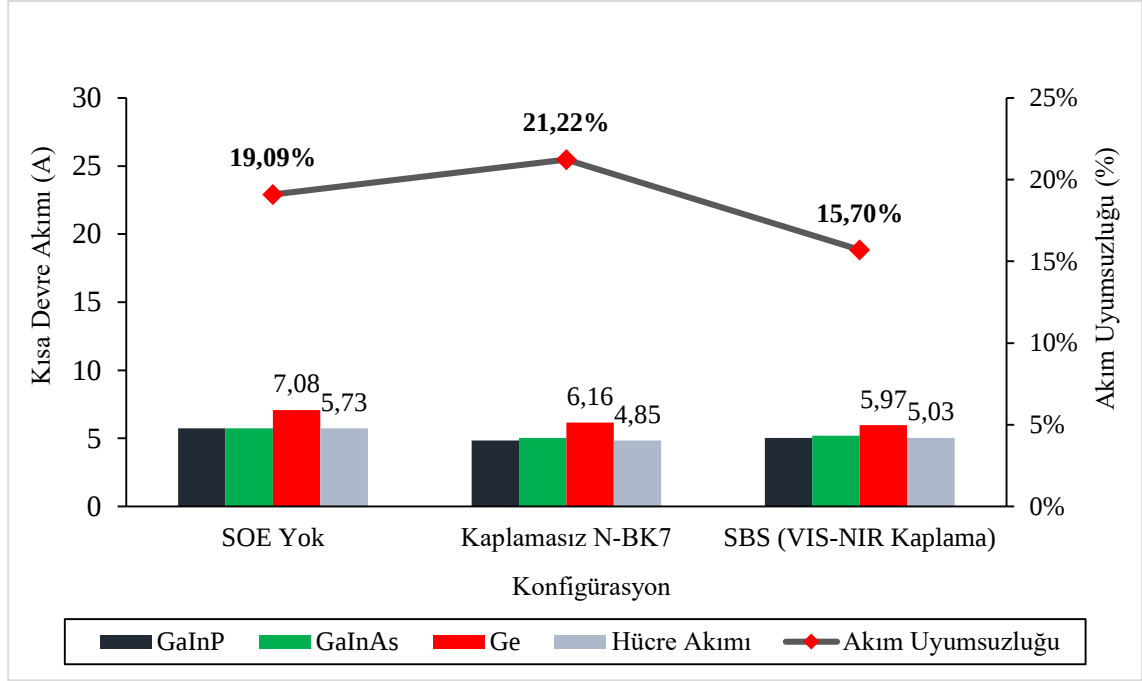
Şekil 5.23. CPV/T hibrit kolektör için Sankey diyagramı ile optik kayıplar ve ışınlm miktarları.

Şekil 5.23’de görüldüğü üzere sisteme giren toplam enerji 39,985 W ve güneş ışınlm spektrumunda 320-2300 nm dalga boyu dışında kalan enerji kaybı ve gölgeleme kaybı değışmezken kaplamasız lens kullanılması ile yansıma oranı artmış ve sistemin toplam optik kaybı % 18,9 olarak hesaplanmıştır. Tüm optik kayıplar değeri lendirildiğinde CPV güneş hücresi üzerine düşen ışınlm miktarı yaklaşık 30,99 W olarak hesaplanmıştır. CPV/T hibrit kolektör ile sadece güneş hücresine gelen ışınlma göre ve tüm sisteme gelen ışınlma göre alt hücreler ait I-V eğrisi ve tüm hücre I-V güç eğrileri toplu halde Şekil 5.24’de gösterilmiştir. Şekil 5.24’de görüldüğü üzere güneş hücresi üzerine gelen güneş ışınlmasına göre elektriksel verimlilik % 43,9 iken tüm sisteme gelen güneş ışınlmasına göre CPV elektriksel dönüşüm verimliliği % 34,06 olarak hesaplanmıştır. SBS lens kullanılması durumunda CPV güneş hücresi üzerine gelen ışınlm miktarı yaklaşık % 1,2 arttırılmış iken toplam hibrit kolektör elektriksel dönüşüm verimliliği değeri nde kaplamasız duruma göre yaklaşık % 1,19 artış ile % 3,37 oranında iyileşme sağlandığı görülmüştür. Bu da SBS lensin spektral dalga boylarına göre geçirgenlik eğrisinin CPV güneş hücresi için uygun olduğunu göstermektedir.



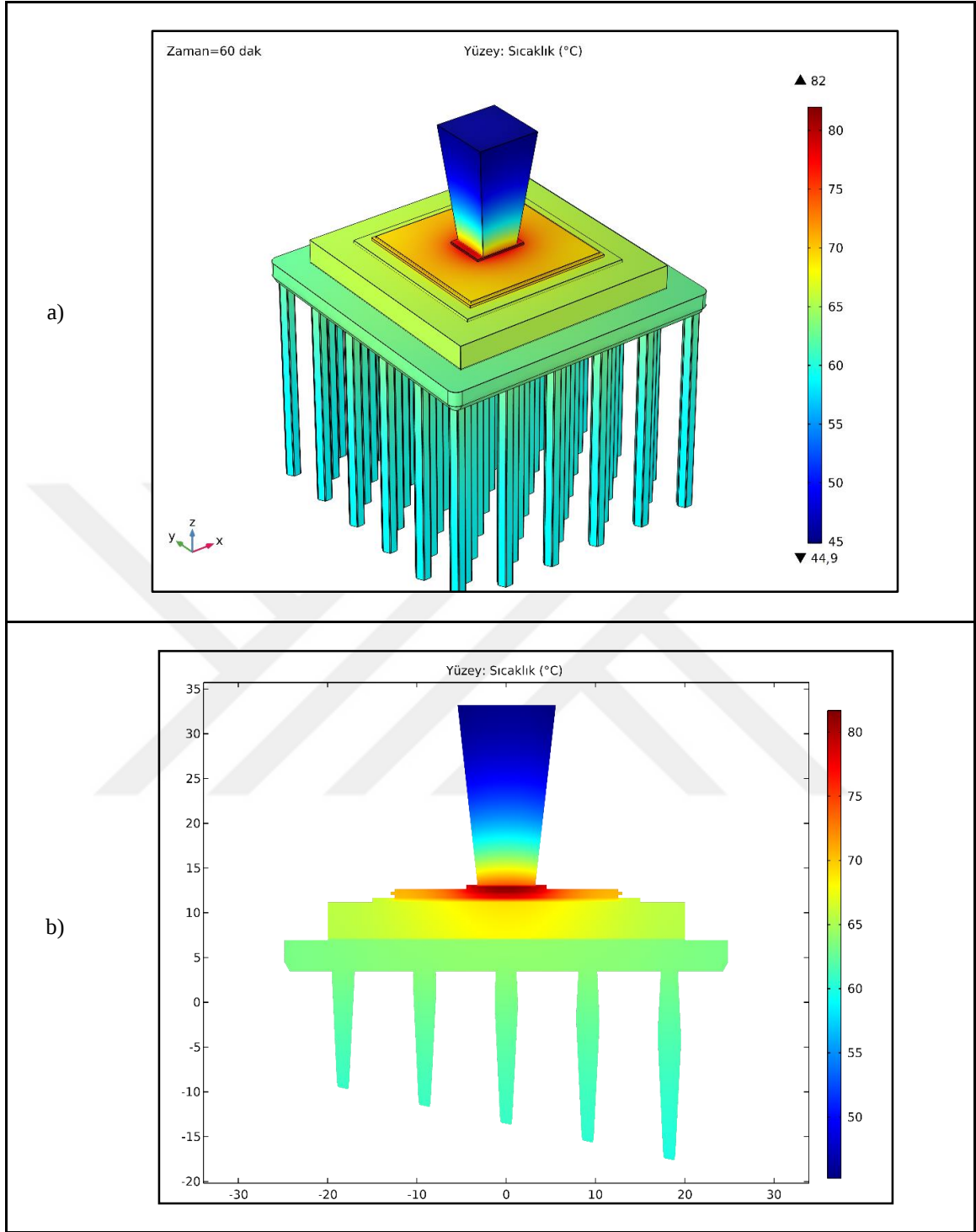
Şekil 5.24. Kaplamasız N-BK7 lens kullanımında alt hücreler ait I-V eğrileri ve toplam hücre I-V ve güç eğrisi a) hücre üzerine düşen ışınım değerinde b) toplam sisteme gelen ışınım değerinde.

Hücre üzerine gelen güneş ışınımı değeriyle verimlilikler arasında aynı oranda bir artış bulunmaktadır. Bunun en önemli sebebi SBS lensin güneş hücresi çalışma aralığında iyi bir ışınım geçirgenliğine sahip olması ve aşırı akım üretimi gerçekleşen Ge alt hücresi çalışma dalga boyunda nispeten kötü bir geçirgenliğe sahip olmasıdır. Bu da bu tez çalışmasında SBS lens kullanımının sebebini açıklamaktadır. Şekil 5.25’de SBS lens kullanımı ve kaplamasız N-BK7 kullanımı durumunda alt hücreler tarafından üretilen I_{sc} değerleri ve Ge hücresi tarafından gerçekleşen akım uyumsuzluğu gösterilmiştir. Kaplama olmayan N-BK7 tipi cam küresel lens kullanılması durumunda Ge alt hücresi ile toplam hücre arasında kısa devre akım uyumsuzluğu % 21,22 iken VIS-NIR kaplamalı N-BK7 küresel lens kullanılması durumunda bu uyumsuzluk değeri % 15,70’dir. Bu sebeple SBS lens kullanımının CPV güneş hücresi için kaplamasız lense göre daha uygun olacağı açıktır. Ayrıca SBS lens kullanımı ile verimliliğin artırılmasına ek olarak akım uyumsuzluğu sebebi ile hücre üzerinde oluşacak olan aşırı ısınmanın da önüne geçilmiş olacaktır. Bu kaplama ticari bir ürün olduğu için dalga boyu geçirgenliği üzerinde yapılandırma yapılmamıştır, bu da yeniden tasarlanacak ve CPV güneş hücresi ile daha uyumlu kaplama seçenekleri ile bu akım uyumsuzluğunun çok daha fazla düşmesine olanak tanımaktadır.



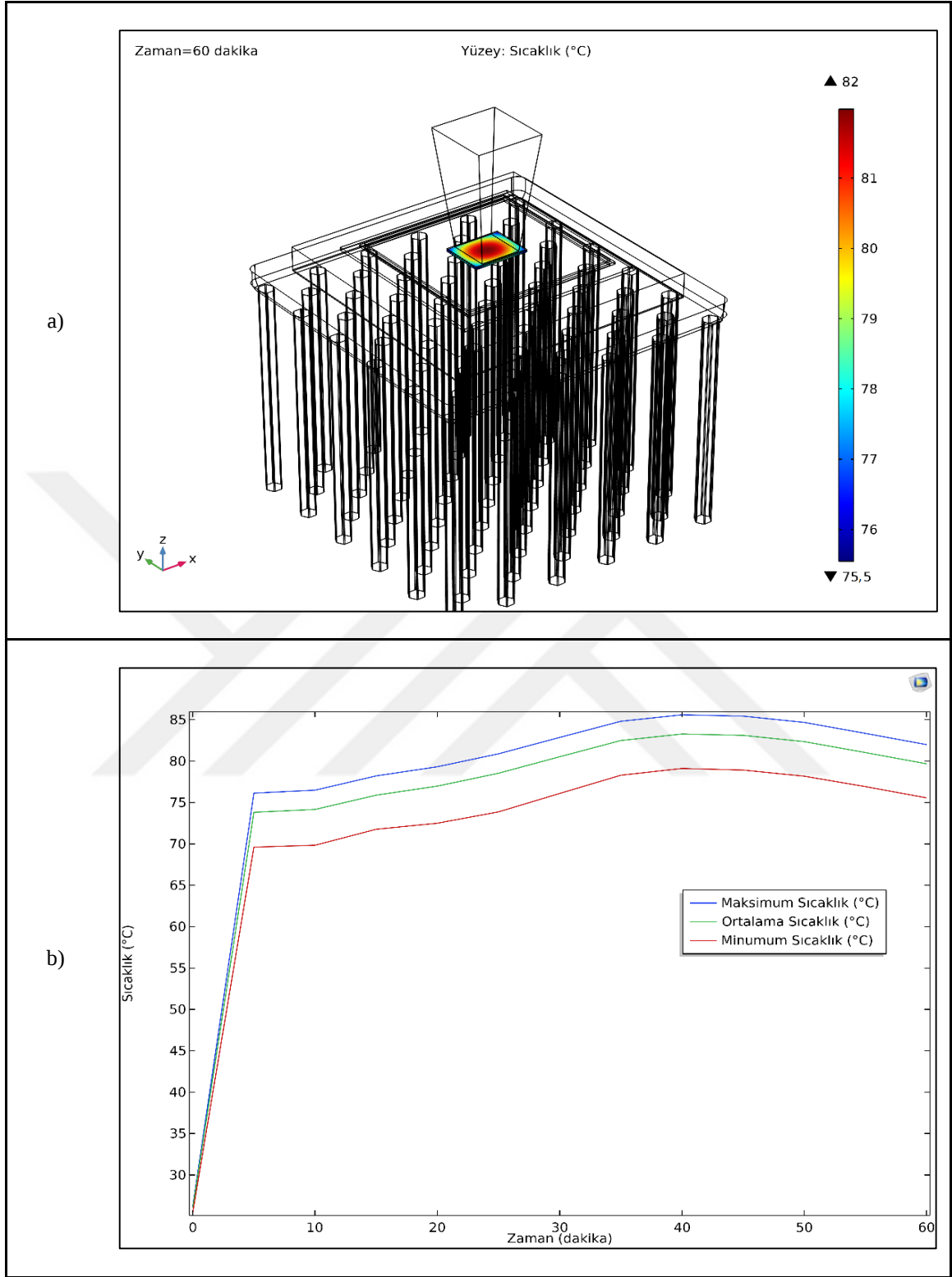
Şekil 5.25. VIS-NIR kaplamalı ve kaplamasız lens için Ge alt hücre akım uyumsuzluğu.

Bu tez çalışmasında, CPV güneş hücresi modellenirken, güneş hücresinin sıcaklığı da iklim koşullarına göre değerlendirilmiş ve nihai hücre verileri elde edilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için Elazığ ili iklim koşullarına göre SBS-CPV/T alıcı kısmı tüm detaylarına kadar tasarlanmış ve COMSOL Multiphysics programı kullanılarak zamana bağlı CPV güneş hücresi sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Elazığ ili 2019 yılı ortalama dış ortam rüzgâr hızı 1,87 m/s olarak hesaplanmış ve bu değere göre çözümler gerçekleştirilmiştir. Hücre üzerinde oluşan ısı akısı, Denklem 4.16'da gösterildiği gibi hücre üzerine gelen ışıınım miktarının elektriksel enerjiye dönüşmeyen kısmı hesaplanarak belirlenmiştir. SBS-CPV/T hibrit kolektör için hücre üzerine düşen ışıınım miktarı 31,358 W iken elektriksel enerjiye dönüşüm verimliliği % 44,96 olarak bulunmuş ve hücre üzerinde oluşan ısı 17,25 W olarak alınmıştır. Şekil 5.27'de kolektör tüm alıcı kısmı elemanları sıcaklık sonuçları izometrik ve X-Z ekseninde kesit olarak gösterilmiştir. Şekil 5.26'da görüldüğü üzere kolektör alıcı kısmı sıcaklık değerleri yaklaşık 45 ile 82 °C arasında bir dağılıma sahiptir. Alıcı kısmında en düşük sıcaklık değeri ikincil optik eleman olan S-TIM2 tipi camda gerçekleşirken en yüksek sıcaklık değeri, ısı yükü oluşturan güneş hücresi üzerinde gerçekleşmiştir. Isı değiştirici olarak doğal taşınımına uygun kanatçıklı soğutucu elamanın kanatçık sıcaklığı ortalama 60 °C'ye ulaşmaktadır. Üretici firma tarafından maksimum çalışma koşullarının 110 °C olduğu bildirilen ve literatürde yaklaşık 80 °C'nin çok fazla aşılması gerektiği ifade edilen CPV güneş hücresi için ortalama 80 °C sıcaklığa ulaştığı görülmektedir. Bu da 756X yoğunlaştırma altında 7x7 mm² boyutlarında güneş hücresinin kullanıldığı SBS-CPV/T hibrit kolektör alıcı kısmı için seçilen ısı değiştirici soğutucu elamanın uygun olduğunu göstermiştir.



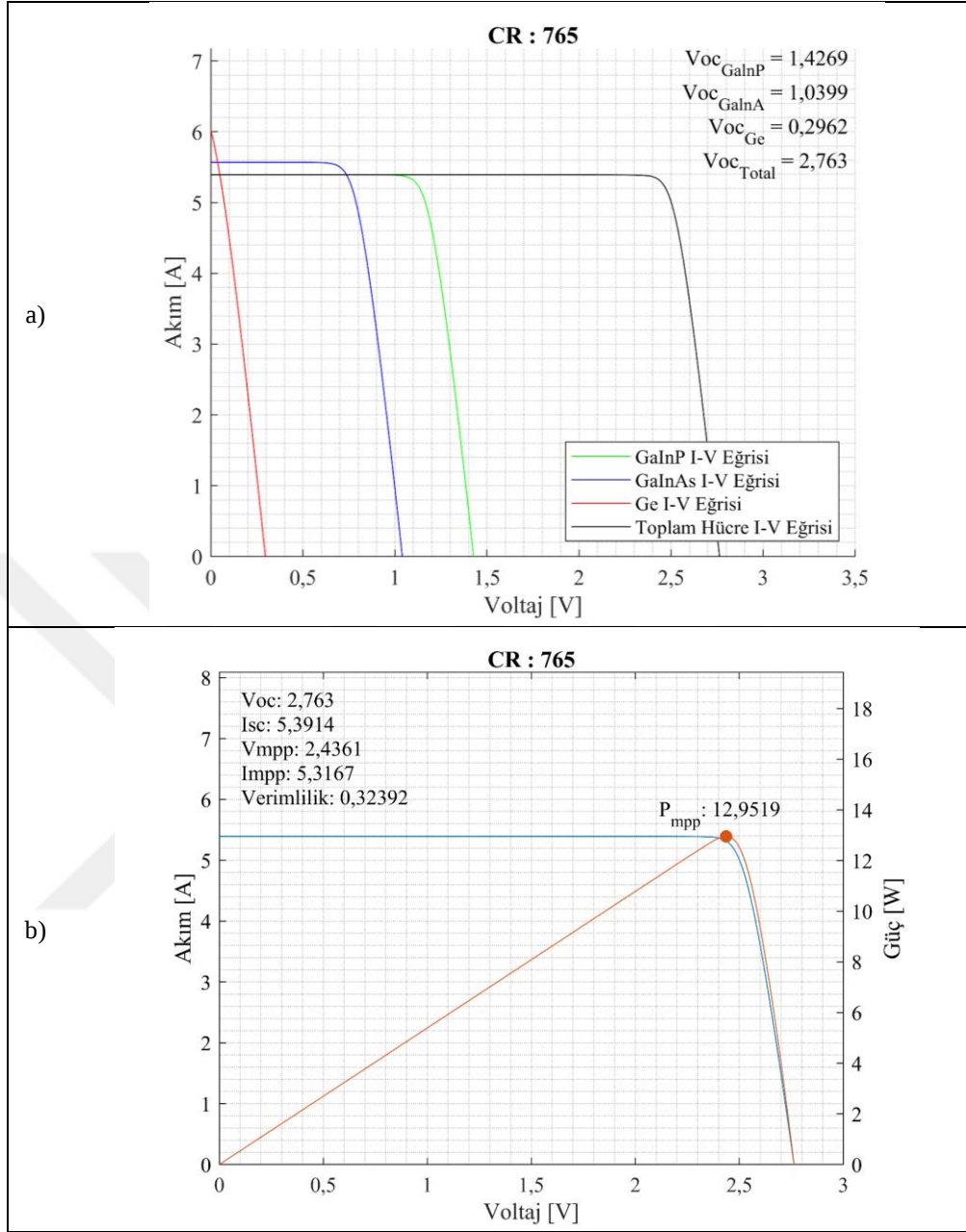
Şekil 5.26. SBS-CPV/T hibrit kolektör alıcı kısmı sıcaklık dağılımı a) izometrik b) X-Z eksenli.

Şekil 5.27’de güneş hücresi yüzey sıcaklık dağılımı ve zamana bağlı sıcaklık değerleri verilmiştir. Şekil 5.27’de görüldüğü üzere hücrenin minimum sıcaklık değeri 75,5 °C iken maksimum sıcaklık değeri 82 °C olarak ölçülmüştür. Hücrenin ortalama sıcaklık değeri ilk 5 dakika içerisinde hızla artarak yaklaşık 73 °C ye ulaşırken, 40. dakikada 82 °C’ye ulaşmakta ve tekrar düşüşe geçerek 60. dakikada ortalama sıcaklık değeri 80 °C ile sürekli duruma ulaşmaktadır.



Şekil 5.27. CPV güneş hücresi a) yüzey sıcaklık dağılımı b) zamana bağlı sıcaklık değerleri.

CPV güneş hücresinde ortam koşullarına bağlı gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için güneş hücresi sıcaklığına göre tekrar elektriksel sonuçlar elde edilmiş ve CPV güneş hücresi alt hücre I-V eğrileri ve toplam hücre I-V güç eğrisi oluşturulmuş ve Şekil 5.28’de gösterilmiştir.

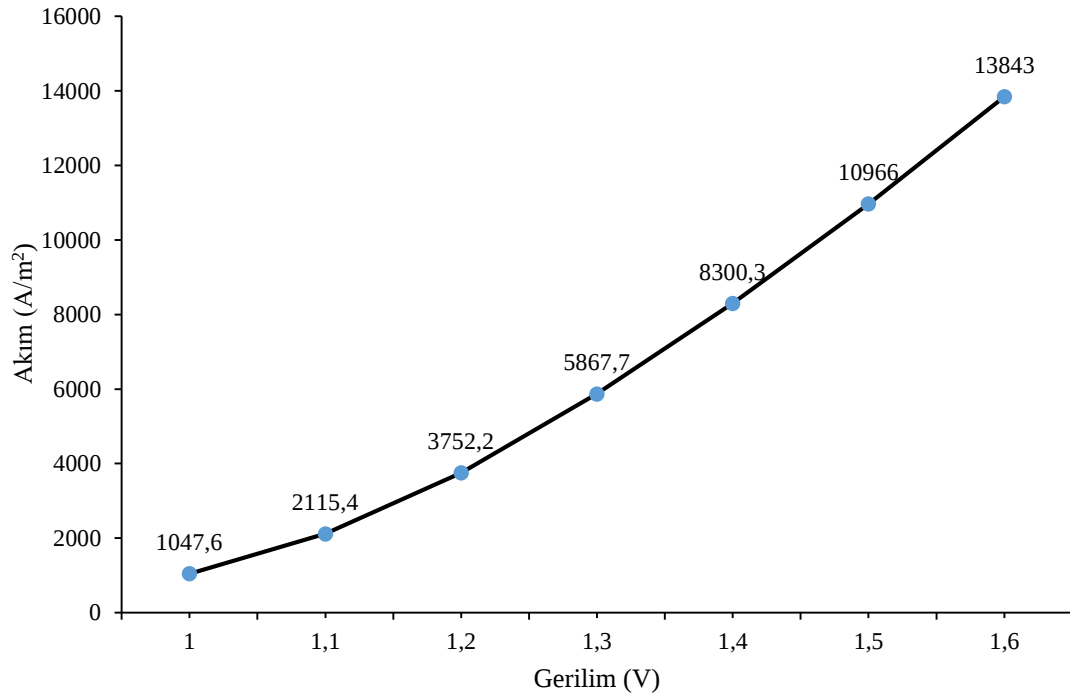


Şekil 5.28. CPV güneş hücresi a) alt hücre I-V eğrileri b) toplam hücre I-V ve güç eğrisi.

Şekil 5.28’de görüldüğü üzere SBS-CPV/T hibrit kolektör ile 80 °C de akım uyumsuzluğu yüksek oranda azaltılmış görülmektedir. Buda tasarım ve sistem elemanları seçiminin uygun olduğunun açık bir göstergesidir. Tasarlanan sistemde dış ortam koşulları altında hücrenin açık devre gerilimi 2,763 V hesaplanırken kısa devre akımı 5,391 A olarak bulunmuştur. Sistemin maksimum güç üretimi noktasında gerilim ve akımları sırasıyla 2,43 V ve 5,31 A olarak bulunurken, optik kayıplarında dâhil edildiği tüm sisteme gelen güneş ışıyım miktarına göre SBS-CPV/T hibrit kolektör elektriksel dönüşüm verimliliği % 32,39 olarak hesaplanmıştır.

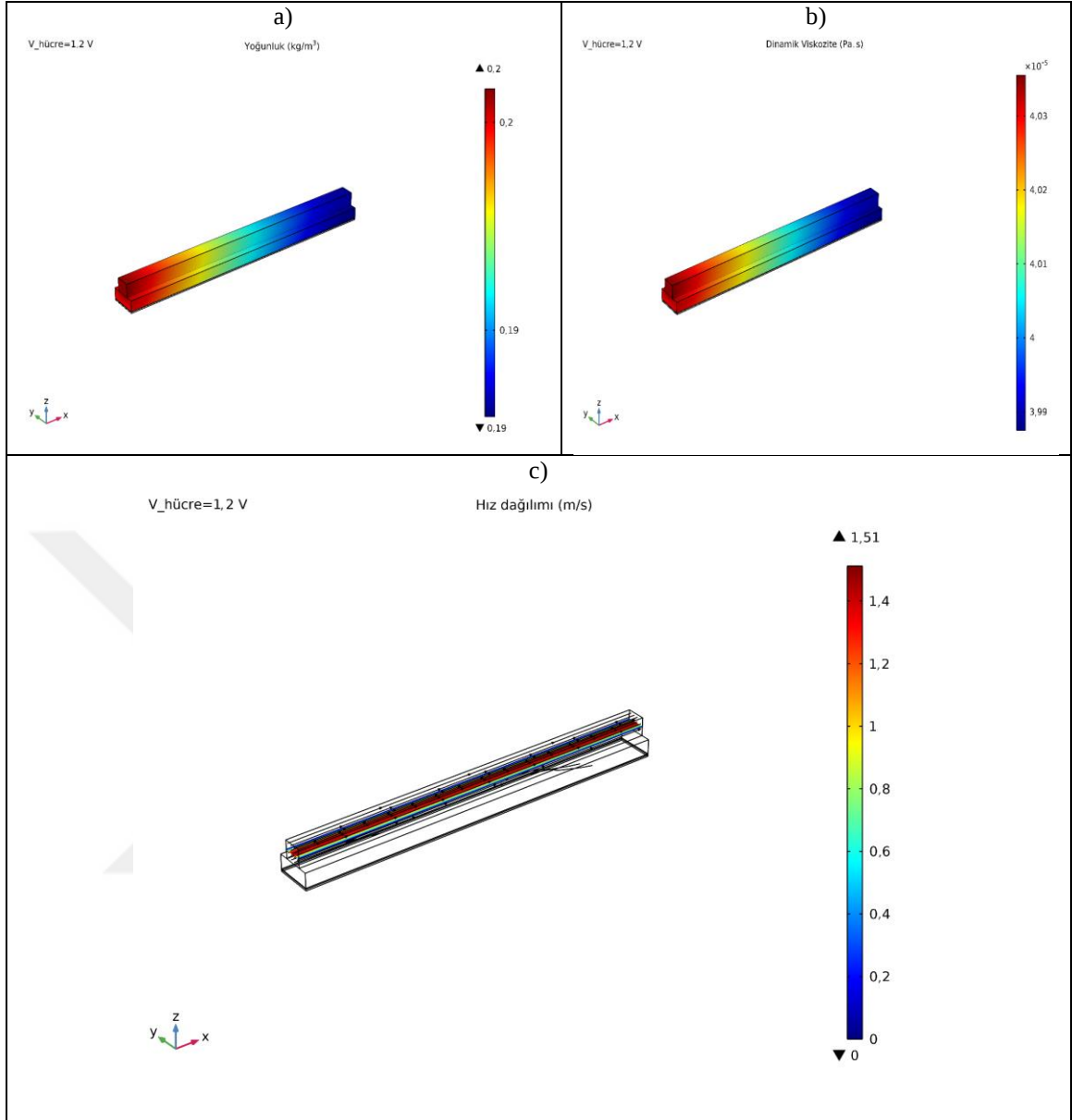
5.3. Elektrolizör Sonuçları

Bu tez çalışmasında, COMSOL Multiphysics ticari yazılımı ile $0,1 \text{ cm}^2$ aktif alana sahip tek kanallı tek hücre modellenmiş olup farklı gerilim potansiyel farklarında akım eğrisi hesaplanmıştır. 1-1,6 V arasından anot ve katot bölgeleri arasında 0,1 V aralıklar ile potansiyel farklar oluşturularak akım probu ile katot bölgesinde akım değerleri elde edilmiş ve Şekil 5.29'da verilmiştir. Şekil 5.29'da görüldüğü üzere 0,1 V aralıklar ile 1 V-1,6 V potansiyel farklara göre hücre akım değerleri sırası ile 1047, 2115, 3752, 5867, 8300, 10966 ve 13843 A/m^2 'dir. CPV güneş hücresi tarafından 80°C sıcaklıkta maksimum güç noktasında gerilim değeri 2,43 V olduğundan ara eleman kullanılmaması adına KOE için çalışma gerilimi 1,2 V seçilerek seri bağlı 2 hücre olarak değerlendirilmiştir. Bu yüzden KOE için elde edilen değerler 1,2 V için sunulmuştur.



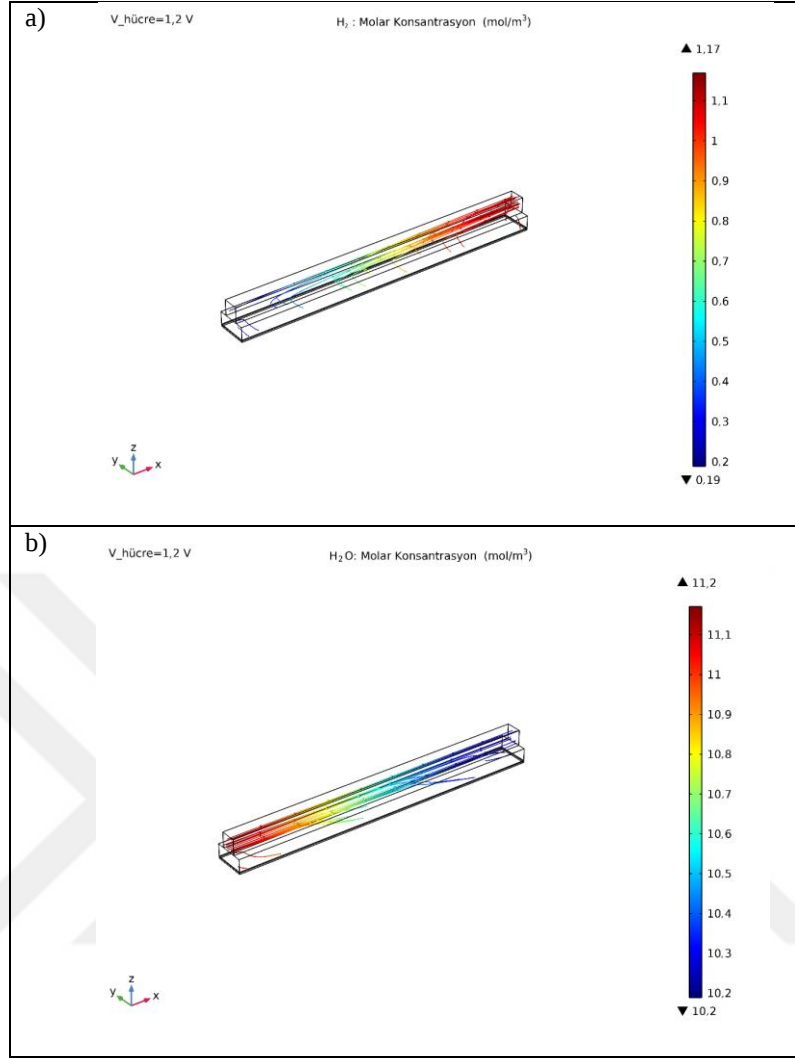
Şekil 5.29. KOE 1 V-1,6 V arası için I-V eğrisi.

KOE kanal içerisindeki hız, yoğunluk ve dinamik viskozite dağılımı Şekil 5.30'da gösterilmiştir. Şekil 5.30'da görüldüğü üzere hız dağılımı kanal kenarlarında sıfıra yaklaşırken kanal ortasında hız değeri $1,51 \text{ m/s}$ ile maksimum hıza ulaşmaktadır. Kanal içerisinde yoğunluk ve dinamik viskozite değeri gerçekleşen tepkimeye bağlı olarak giriş alanının çıkış alanına doğru az da olsa azaldığı görülmüştür. Yoğunluk değeri kanal girişinde $0,20 \text{ kg/m}^3$ iken çıkış kısmında $0,19 \text{ kg/m}^3$ değerine düşmüş ve aynı şekilde giriş kısmında dinamik viskozite değeri $4,03 \times 10^{-5}$ değerinde iken çıkış kısmında $3,99 \times 10^{-5}$ olduğu gözlemlenmiştir.



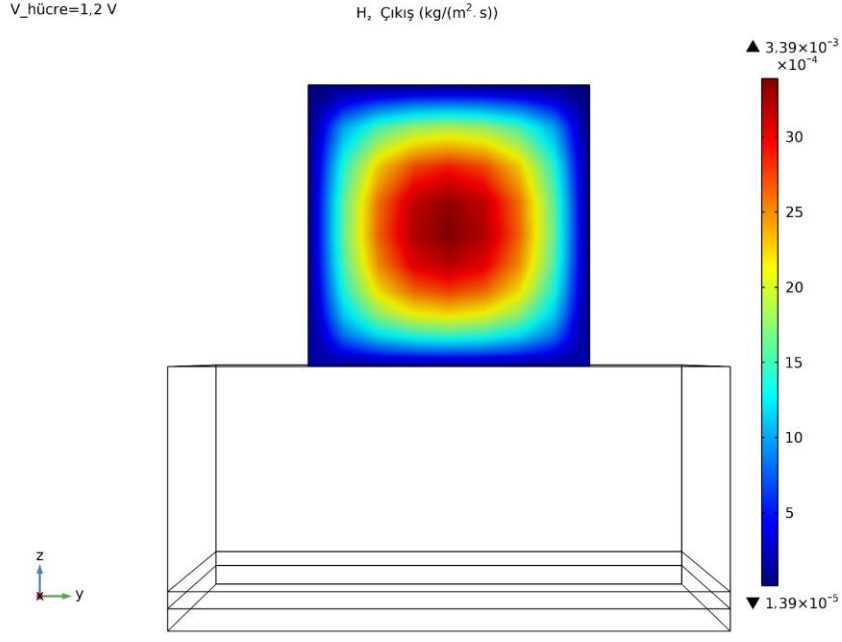
Şekil 5.30. 1,2 V potansiyel farkta KOE model için sonuçlar a) yoğunluk b) dinamik viskozite c) hız dağılımı.

KOE hücresi tarafından katot bölgesinde hidrojen üretim ve su buharı tüketim sonuçları Şekil 5.31’de verilmiştir. Şekil 5.31’de görüldüğü üzere $11,2 \text{ mol/m}^3 \text{ H}_2\text{O}$ katot bölgesinden beslenirken $10,2 \text{ mol/m}^3 \text{ H}_2\text{O}$ çıkışı gözlemlenmiştir. Yaklaşık $1 \text{ mol/m}^3 \text{ H}_2\text{O}$ tepkimeye girerek H_2 gazına ve O^{2-} iyonlarına ayrılmıştır. $0,19 \text{ mol/m}^3 \text{ H}_2$ katot kanalına girerken çıkışta H_2 molar konsantrasyonu $1,17 \text{ mol/m}^3$ olarak gözlemlenmiştir. Buda $1 \text{ mol/m}^3 \text{ H}_2$ gazı üretildiğini göstermektedir.



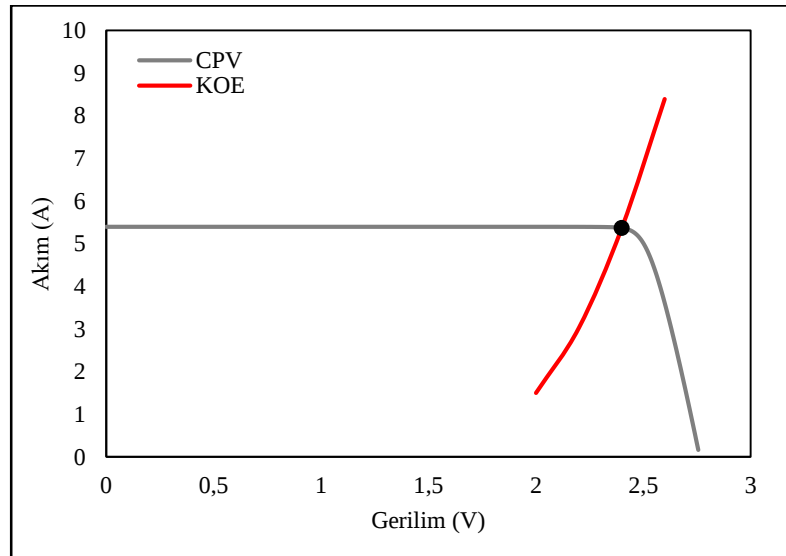
Şekil 5.31. KOE model 1,2 V gerilimde molar konsantrasyon a) H₂ b) H₂O.

Elektrolizör verimliliğini hesaplayabilmek için 1 saniyede elektrolizörden üretilen H₂ miktarının bilinmesi gerekmektedir. Çıkış katot kanalı çıkış gölgesinde H₂ üretim miktarı Şekil 5.32’de gösterilmiştir. Şekil 5.32’de görüldüğü üzere kanal kenarlarında gözlemlenen H₂ miktarı $1,39 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ile en az iken bu değer kanal ortasında $3,39 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ değerinde maksimum değere ulaşmaktadır. Ancak burada doğrusal bir değerlendirme yapılamayacağı için kanaldan 1 saniyede çıkan H₂ gazı miktarını belirlemek için yüzey alanına ölçüm probu yerleştirilerek değerler elde edilmiş ve alana bağlı integral alınarak yaklaşık değer elde edilmiştir. Probdan elde edilen değerlerin alana bağlı integral sonucuna göre KOE elektrolizör için 1,2 V potansiyel farkında H₂ üretim miktarı $3,998 \times 10^{-10} \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır. Faraday yasasına bağlı olarak gerçekleştirilen elektrolizör verimlilik değeri % 102,81 olarak hesaplanmıştır. Burada verimlilik değerinin %100’ün üstünde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi KOE’ün 800 °C derece sıcaklıkta çalışmasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklık arttıkça elektroliz işlemi için gerekli elektrik enerjisi miktarı düşmekte bu da elektrolizörün verimliliğinin yükselmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.32. KOE modelin 1,2 gerilim değerinde katot kanal çıkışındaki H₂ dağılımı.

Elde edilen sonuçlar 1,2 V gerilim değerinde bir kanallı ve tek hücre için elde edilmiştir. CPV güneş hücresi maksimum güç noktasında $V_{mpp} = 2,43$ V ve $I_{mpp} = 5,39$ A olarak bulunduğu için KOE kanal sayısı ve hücre sayısı bu değerlere göre optimize edilerek tekrar boyutlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 143 kanal ve seri 2 hücre yığın dizaynı CPV güneş hücresi için en uygun boyutlandırma sonucuna ulaşılmıştır. 143 kanal hücre aktif alanı 14,3 cm² olarak hesaplanmıştır. CPV güneş hücresi ve optimum boyutlandırılmış KOE I-V eğrileri Şekil 5.33’de verilmiştir.



Şekil 5.33. KOE ve CPV I-V eğrileri.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Cassegrain tipi spektral ışın ayırıcılı yoğunlaştırılmış fotovoltaiik/ısı (SBS-CPV/T) hibrit kolektör tasarlanmış olup katı oksit elektrolizör ile hidrojen üretim potansiyeli sayısal olarak araştırılmıştır.

Çalışmada optik modellemede Zemax Optik Studio programı kullanılmış olup 765X yoğunlaştırma altında SBS-CPV/T optik tasarımı gerçekleştirilmiştir. En uygun alıcı-birincil ayna mesafesi 118 mm olarak bulunmuştur. Optik sistemin kabul açısı 0.7° olarak hesaplanmıştır. SBS lens kullanımı durumunda CPV, ışık yolu detektör üzerine düşen ve toplam ışıyım güç miktarı sırasıyla 31,358 W, 1,145 W ve 32,503 W olarak bulunmuştur. N-BK7 cam lens kullanımı durumunda bu sıralama 30,999 W, 1,397 W ve 32,387 W olarak ölçülmüştür. SBS-CPV/T hibrit kolektör için tasarlanan optik sistemde, optik verimlilik SBS lens kullanılması ve kaplamasız N-BK7 kullanılması durumunda sırasıyla % 81,28 ve % 80,99 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca SBS lens kullanımı durumunda optik sistemin ısı verimliliği % 2,86 olduğu görülmüştür.

Sistemde güneş enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm için Azur Space firmasına ait 7×7 mm² boyutlarında GaInP/GaInAs/Ge 3 eklemlili yoğunlaştırıcılı fotovoltaiik (CPV) güneş hücresi kullanımı değerlendirilmiştir. CPV güneş hücresi için MATLAB® programı kullanılarak elektriksel model oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan model sonuçları ile firma verileri karşılaştırılmıştır.

Modelde $0,5 \times 0,5$ mm² aktif alana sahip güneş hücresi için 25°C ve 1000W/m^2 doğrudan ışıyım değerleri kullanılarak 1X, 250X, 500X ve 1000X yoğunlaştırma altında toplam hücre açık devre voltajı sırasıyla 2,6218 V, 3,0473 V, 3,10 V ve 3,1542 V olarak hesaplanmıştır. Kısa devre akımları ile sırasıyla 0,0046 A, 1,156 A, 2,2879 A ve 4,5709 A olarak bulunmuş ve aynı yoğunlaştırma değerleri altında hücre elektriksel verimliliklerinin % 36,95, % 42,93, % 42,75 ve % 41,59 olduğu görülmüştür.

Bu değerlerin firma verileri ile karşılaştırılması sonucunda oluşturulan modelin açık devre voltajı, kısa devre akımı ve hücre elektriksel verimliliği için RMSE değerleri sırasıyla 0,021 V, 0,076 A ve % 0,25 olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan 7×7 mm² aktif alana sahip CPV güneş hücresi için 25°C , 1000W/m^2 doğrudan ışıyım değerleri altında hücre performansı incelenmiş 765X yoğunlaştırma altında toplam hücre V_{oc} değeri tüm alt hücrelerin V_{oc} değerlerinin toplamı olan 3,12 V iken I_{sc} değeri tüm alt hücreler arasında minimum I_{sc} olan 5,03 A olarak hesaplanmıştır. Toplam hücrenin maksimum üretilebilecek gücü 14,09 W olarak bulunmuştur. CPV güneş hücresinin, hücre üzerine düşen güneş ışıyımına göre verimlilik değeri % 44,96 olarak bulunmuşken, SBS-CPV/T hibrit kolektöre giren tüm ışıyım değerine göre, kolektörün elektrik enerjisi dönüşüm verimlilik değeri % 35,27 olarak hesaplanmıştır.

CPV güneş hücrelerinin verimlilik değerleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için CPV güneş hücresi Elazığ ili iklim koşullarına göre ısı analiz gerçekleştirilmiştir. COMSOL Multiphysics ticari programı kullanılarak CPV güneş hücresi için ısı analiz gerçekleştirilmiş olup Elazığ ili dış ortam şartlarında, hücre sıcaklığının 60. dakikada 80 °C ortalama hücre sıcaklık değeri ile sürekli duruma ulaştığı sonucuna varılmıştır. Bu değer firma tarafından sunulan maksimum çalışma koşulları değeri olan 110 °C'den az olmasından dolayı optik sistem tasarım ve soğutucu eleman seçiminin SBS-CPV/T hibrit kolektör için uygun olduğunu göstermektedir.

CPV güneş hücresi için 80 °C'de 1000 W/m² doğrudan ışıınım değeri altında güneş hücresinin ve SBS-CPV/T hibrit kolektörün analizleri gerçekleştirilmiştir. Dış ortam koşulları altında hücrenin açık devre gerilimi 2,763 V hesaplanırken kısa devre akımı 5,391 A olarak bulunmuştur. Sistemin maksimum güç üretimi noktasında gerilim ve akımları sırasıyla 2,43 V ve 5,31 A olarak hesaplanmış olup SBS-CPV/T hibrit kolektör elektriksel dönüşüm verimliliğinin % 32,39 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında, hidrojen üretim potansiyelinin araştırılması için tek kanallı ve tek hücre olarak COMSOL Multiphysics programı kullanılarak katı oksit elektrolizör (KOE) modellenmiştir. 800 °C çalışma sıcaklığı ve 0,1 cm² aktif alana sahip elektrolizör için 1-1,6 V arasında akım karakteristiği incelenmiş olup CPV güneş hücresi için uygun gerilim değerinin 1,2 V olduğu gözlemlenmiştir. 1,2 V gerilim değerinde hücre akım değerinin 3752 A/m² olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma koşullarında KOE hücrede 11,2 mol/m³ H₂O katot bölgesinden beslenirken 10,2 mol/m³ H₂O çıkışı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 1 mol/m³ H₂O tepkimeye girerek H₂ gazına ve O²⁻ iyonlarına ayrıştığı gözlemlenmiştir. 0,19 mol/m³ H₂ katot kanalına girerken çıkışta H₂ molar konsantrasyonu 1,17 mol/m³ olarak gözlemlenerek 1 mol/m³ H₂ gazı üretildiğini sonucuna ulaşılmaktadır. Yine bu çalışma koşullarında H₂ üretim miktarı 3,998x10⁻¹⁰ kg/s olarak hesaplanmıştır. KOE elektrolizör verimlilik değeri bu çalışma ve koşullar altında % 102,81 olarak hesaplanmıştır. KOE için CPV güneş hücresi arasında çevirici bir sistem kullanılmaması için KOE boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve CPV güneş hücresi ile uyumlu çalışabilecek KOE için 143 kanallı ve 2 hücre yığının en uygun olacağı sonucu varılmıştır.

Bu tez çalışmasının ana konusu olan SBS-CPV/T hibrit kolektör ile hidrojen üretim potansiyeli tüm bileşenler modellenerek en uygun tasarım ve boyutlandırma gerçekleştirilmiş olup Cassegrain tipi SBS-CPV/T hibrit kolektör ile KOE vasıtasıyla hidrojen üretim verimliliği %33,3 olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan SBS-CPV/T hibrit kolektör ile hidrojen üretim verimliliğinin, geleneksel PV-Elektroliz sistemler ile hidrojen üretim verimliliğinin yaklaşık 3 katı olduğu sonucu ulaşılmıştır. Bu yüzden çok eklemi güneş hücrelerinin kullanıldığı ve ısı enerjisinin de dâhil edilebildiği optik tasarımlar ile hidrojen üretiminin umut verici olduğu görülmektedir.

ÖNERİLER

Bu çalışmada spektral ışın ayırıcı lens ile Cassegrain tipi CPV/T hibrit kolektör tasarımı gerçekleştirilerek 3 eklemlili güneş hücresi performansında iyileştirme amaçlanmış ve ısı enerjisinin de kullanıldığı katı oksit elektrolizör ile sistemin hidrojen üretim potansiyeli araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde sistemin hidrojen üretim potansiyelinin geleneksel PV-elektrolizör sistemlere göre yaklaşık 3 katı olduğu açıkça görülmektedir. Burada verimliliği arttıran en önemli faktörün yüksek verimlilikte çalışan 3 eklemlili güneş hücreleri olsa da optik sistem tasarımının ve SBS lensin etkisi yadsınamaz bir gerçektir. Bu çalışmada SBS lens olarak mevcut ticari bir ürün seçilmiş olup değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. SBS lensin sisteme ve CPV güneş hücresi üzerine etkisinin kaplamasız lens kullanım durumuna göre karşılaştırılmış ve sistemin iyileştirildiği sonuçlarda görülmüştür. SBS lens için CPV güneş hücresine uygun spesifik bir kaplama kullanımı durumunda bu sonuçların daha da yüksek olması ve CPV güneş hücresinde alt hücrelerin akım uyumsuzluğunun tamamen giderilmesi mümkün olabilir. Bundan sonraki çalışmalarda 3 eklemlili güneş hücresi için spesifik kaplama çalışmaları gerçekleştirilmesi düşünülmektedir.

Tez kapsamı içerisinde birçok analiz gerçekleştirildiğinden SBS-CPV/T hibrit kolektör ısı verimliliğinin KOE hücreyi tamamen yalıtımlı bir oda içerisinde 800 °C sıcaklığa ulaştırabildiği varsayılarak hidrojen üretim potansiyeli hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda kolektörden elde edilen ısı enerjisi ile KOE sıcaklık ilişkisi detaylı olarak açıklanabilir.

Ayrıca her sistem gibi SBS-CPV/T hibrit kolektör ile hidrojen üretim sistemlerinin ekonomik analizi de tasarım ve verimlilik kadar önemli bir parametredir. Optik sistemler düşük adetlerde yüksek fiyatlandırmalara sahip olduklarında tek hücre için analizleri gerçekleştirilen bu çalışmada yapılacak ekonomik analizin yanıltıcı sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Bu sebeple bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında bundan sonraki çalışmalarda tasarlanacak büyük sistemlerde ekonomik analizler gerçekleştirilerek literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Alazemi, J., Andrews, J. (2015). Automotive hydrogen fuelling stations: An international review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, C. 48, 483–499. doi:10.1016/j.rser.2015.03.085
- [2] Caliskan, H., Hepbasli, A. (2010). Energy and exergy prices of various energy sources along with their CO₂ equivalents, *Energy Policy*, C. 38, Sayı. 7, 3468–3481. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.020
- [3] Prentiss, M. (2015). *Energy Revolution: The Physics and the Promise of Efficient Technology*, Harvard University Press, Massachusetts
- [4] Dincer, I. (2002). Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 27, Sayı. 3, 265–285. doi:10.1016/S0360-3199(01)00119-7
- [5] Othman, E.-S. A., Nawar, S. K., Fahmy, F. H., El-Shafy, A., Nafeh, A. (2015). A New design of A Hydrogen Fueling Station Powered By Renewable Energy Sources, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering Ver. II*, C. 10, Sayı. 5, 2278–1676. doi:10.9790/1676-1052116125
- [6] Hosseini, S. E., Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2015.12.112
- [7] Manage, M. N., Hodgson, D., Milligan, N., Simons, S. J. R., Brett, D. J. L. (2011). A techno-economic appraisal of hydrogen generation and the case for solid oxide electrolyser cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 36, Sayı. 10, 5782–5796. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2011.01.075
- [8] Shah, M., Prajapati, M., Yadav, K., Sircar, A. (2022). A review of the geothermal integrated hydrogen production system as a sustainable way of solving potential fuel shortages, *Journal of Cleaner Production*, C. 380. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2022.135001
- [9] Ghazvini, M., Sadeghzadeh, M., Ahmadi, M. H., Moosavi, S., Pourfayaz, F. (2019). Geothermal energy use in hydrogen production: A review, *International Journal of Energy Research*, C. 43, Sayı. 14, 7823–7851. doi:10.1002/ER.4778
- [10] Zhang, L., Jing, D., Zhao, L., Wei, J., Guo, L. (2012). Concentrating PV/T hybrid system for simultaneous electricity and usable heat generation: A review, *International Journal of Photoenergy*, C. 2012. doi:10.1155/2012/869753
- [11] Mojiri, A. (2016). *Spectral beam splitting for solar collectors A photovoltaic-thermal receiver for linear solar concentrators*, PhD Thesis, RMIT
- [12] Mojiri, A., Stanley, C., Rosengarten, G. (2014). Spectrally Splitting Hybrid Photovoltaic/thermal Receiver Design for a Linear Concentrator, *Energy Procedia*, C. 48, 618–627. doi:10.1016/J.EGYPRO.2014.02.072
- [13] Atiz, A., Erden, M., Karakilcik, M. (2023). Investigation of electricity, and hydrogen generation and economical analysis of PV-T depending on different water flow rates and conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.106
- [14] Lu, K., Yu, Q., Zhao, B., Pei, G. (2023). Performance analysis of a novel PV/T hybrid system based on spectral beam splitting, *Renewable Energy*, C. 207, 398–406. doi:10.1016/J.RENENE.2023.03.007
- [15] Diedenhofen, S. L., Grzela, G., Haverkamp, E., Bauhuis, G., Schermer, J., Rivas, J. G. (2012). Broadband and omnidirectional anti-reflection layer for III/V multi-junction solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, C. 101, 308–314. doi:10.1016/J.SOLMAT.2012.02.022
- [16] Kaminski, P. M., Lisco, F., Walls, J. M. (2014). Multilayer broadband antireflective coatings for more efficient thin film CdTe solar cells, *IEEE Journal of Photovoltaics*, C. 4, Sayı. 1, 452–456. doi:10.1109/JPHOTOV.2013.2284064
- [17] Wiesenfarth, M., Philipps, S. P., Bett, A. W., Horowitz, K., Kurtz, S. (2017). *Current Status Of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology Version 1.3*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) - National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report, Germany

- [18] Baiju, A., Yarema, M. (2022). Status and challenges of multi-junction solar cell technology, *Frontiers in Energy Research*, C. 10, 1453. doi:10.3389/FENRG.2022.971918/BIBTEX
- [19] Kribus, A., Kaftori, D., Mittelman, G., Hirshfeld, A., Flitsanov, Y., Dayan, A. (2006). A miniature concentrating photovoltaic and thermal system, *Energy Conversion and Management*, C. 47, Sayı. 20, 3582–3590. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2006.01.013
- [20] Ahmad, N., Hatakeyama, K., Ota, Y., Nishioka, K. (2016). Designing of long wavelength cut thin film filter for temperature reduction of concentrator photovoltaic, *MATEC Web of Conferences*, C. 65, 1–4. doi:10.1051/mateconf/20166504002
- [21] Bernardes, S., Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., Fernandes, C. A. F. (2021). Characterization and design of photovoltaic solar cells that absorb ultraviolet, visible and infrared light, *Nanomaterials*, 1–16. doi:10.3390/nano11010078
- [22] Ju, X., Pan, X., Zhang, Z., Xu, C., Wei, G. (2019). Thermal and electrical performance of the dense-array concentrating photovoltaic (DA-CPV) system under non-uniform illumination, *Applied Energy*, C. 250, 904–915. doi:10.1016/J.APENERGY.2019.05.083
- [23] Ju, X., Xu, C., Liao, Z., Du, X., Wei, G., Wang, Z., Yang, Y. (2017). A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR), *Science Bulletin*, C. 62, Sayı. 20, 1388–1426. doi:10.1016/j.scib.2017.10.002
- [24] Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, *Solar Energy*, C. 78, Sayı. 5, 661–669. doi:10.1016/J.SOLENER.2004.09.003
- [25] Parra, D., Patel, M. K. (2016). Techno-economic implications of the electrolyser technology and size for power-to-gas systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 41, Sayı. 6, 3748–3761. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2015.12.160
- [26] Burgess, G., Fernández-Velasco, J. G. (2007). Materials, operational energy inputs, and net energy ratio for photobiological hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 32, Sayı. 9, 1225–1234. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2006.10.055
- [27] AlZahrani, A. A., Dincer, I. (2017). Thermodynamic and electrochemical analyses of a solid oxide electrolyzer for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 42, Sayı. 33, 21404–21413. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2017.03.186
- [28] Bilgen, E. (2001). Solar hydrogen from photovoltaic-electrolyzer systems, *Energy Conversion and Management*, C. 42, Sayı. 9, 1047–1057. doi:10.1016/S0196-8904(00)00131-X
- [29] Gu, X., Ying, Z., Zheng, X., Dou, B., Cui, G. (2023). Photovoltaic-based energy system coupled with energy storage for all-day stable PEM electrolytic hydrogen production, *Renewable Energy*, C. 209, Sayı. August 2022, 53–62. doi:10.1016/j.renene.2023.03.135
- [30] Wang, H., Li, W., Liu, T., Liu, X., Hu, X. (2019). Thermodynamic analysis and optimization of photovoltaic/thermal hybrid hydrogen generation system based on complementary combination of photovoltaic cells and proton exchange membrane electrolyzer, *Energy Conversion and Management*, C. 183, Sayı. November 2018, 97–108. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.106
- [31] Amori, K. E., Salman, S. M., Kareem, Z. H. (2017). Hydrogen Production by Hybrid photovoltaic Thermal System, *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, C. 20, Sayı. 1, 250–261
- [32] Burhan, M., Chua, K. J. E., Ng, K. C. (2016). Long term hydrogen production potential of concentrated photovoltaic (CPV) system in tropical weather of Singapore, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 41, Sayı. 38, 16729–16742. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2016.07.183
- [33] Peharz, G., Dimroth, F., Wittstadt, U. (2007). Solar hydrogen production by water splitting with a conversion efficiency of 18%, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 32, Sayı. 15, 3248–3252. doi:10.1016/j.ijhydene.2007.04.036
- [34] Burhan, M., Oh, S. J., Chua, K. J. E., Ng, K. C. (2017). Solar to hydrogen: Compact and cost effective CPV field for rooftop operation and hydrogen production, *Applied Energy*, C. 194, 255–266. doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.062
- [35] Khan, M. A., Al-Shankiti, I., Ziani, A., Idriss, H. (2021). Demonstration of green hydrogen production using solar energy at 28% efficiency and evaluation of its economic viability, *Sustainable*

Energy and Fuels, C. 5, Sayı. 4, 1085–1094. doi:10.1039/d0se01761b

- [36] Burhan, M., Shahzad, M. W., Ng, K. C. (2018). Sustainable Cooling with Hybrid Concentrated Photovoltaic Thermal (CPVT) System and Hydrogen Energy Storage, *International Journal of Computational Physics Series*, C. 1, Sayı. 2, 40–51. doi:10.29167/a1i2p40-51
- [37] Burhan, M., Chen, Q., Shahzad, M. W., Ybyraiymkul, D., Akhtar, F. H., Ng, K. C. (2021). Innovative concentrated photovoltaic thermal (CPV/T) system with combined hydrogen and MgO based storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 46, Sayı. 31, 16534–16545. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.09.163
- [38] Lasich, J. B., Cleeve, A., Kaila, N., Ganakas, G., Timmons, M., Venkatasubramanian, R., Colpitts, T., Hills, J. (1994). Close-packed cell arrays for dish concentrators, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, C. 2, 1938–1941. doi:10.1109/wcpec.1994.520748
- [39] Lasich, J. B. (1999). *Production of hydrogen from solar radiation at high efficiency*, U.S. Patent Sayı. 5,973,825. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [40] Rajeshwar, K., McConnell, R., Licht, S. (2008). Solar hydrogen generation: Toward a renewable energy future, *Solar Hydrogen Generation: Toward a Renewable Energy Future*, 1–318. doi:10.1007/978-0-387-72810-0
- [41] Ma, B. C., Lin, H., Zhu, Y., Zeng, Z., Geng, J., Jing, D. (2022). A new Concentrated Photovoltaic Thermal-Hydrogen system with photocatalyst suspension as optical liquid filter, *Renewable Energy*, C. 194, 1221–1232. doi:10.1016/j.renene.2022.06.013
- [42] Zhu, Y., Ma, B., He, B., Ma, X., Jing, D. (2023). Liquid spherical lens as an effective auxiliary optical unit for CPV/T system with remarkable hydrogen production efficiency, *Applied Energy*, C. 334, 120733. doi:10.1016/j.apenergy.2023.120733
- [43] Shafiei Kaleibari, S., Yanping, Z., Abanades, S. (2019). Solar-driven high temperature hydrogen production via integrated spectrally split concentrated photovoltaics (SSCPV) and solar power tower, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 44, Sayı. 5, 2519–2532. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.12.039
- [44] Solmaz, R. (2009). *Hidrojen Gazı Eldesi ve Metanol Elektrokoksasyonu İçin Katalitik Elektrot Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [45] Hosseini, S. E., Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, C. 57, 850–866. doi:10.1016/J.RSER.2015.12.112
- [46] Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.03.173
- [47] Suleman, F., Dincer, I., Agelin-Chaab, M. (2016). Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.12.225
- [48] Likkasit, C., Maroufmashat, A., Elkamel, A., Ku, H., Fowler, M. (2018). Solar-aided hydrogen production methods for the integration of renewable energies into oil & gas industries, *Energy Conversion and Management*, C. 168, 395–406. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2018.04.057
- [49] Koumi Ngoh, S., Njomo, D. (2012). An overview of hydrogen gas production from solar energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2012.07.027
- [50] Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R. L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2006.07.012
- [51] Xu, J. G., Froment, G. F. (1989). Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift .1. Intrinsic Kinetics, *Aiche Journal*. doi:10.1002/aic.690350109
- [52] IEA. (2007). *Energy Technology Essentials: Hydrogen Production & Distribution*, IEA report, Paris
- [53] Docekal, J. (1986). Hydrogen production from hydrocarbons, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/0360-3199(86)90139-4

- [54] Acar, C., Dincer, I., Zamfirescu, C. (2014). A review on selected heterogeneous photocatalysts for hydrogen production, *International Journal of Energy Research*. doi:10.1002/er.3211
- [55] Wang, Y., Zhang, S. (2017). Economic assessment of selected hydrogen production methods: A review, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*. doi:10.1080/15567249.2017.1350770
- [56] Choi, J.-S., Shin, Y.-J., Lee, K.-Y., Choi, J.-H. (2015). Two-dimensional simulation of hydrogen iodide decomposition reaction using fluent code for hydrogen production using nuclear technology, *Nuclear Engineering and Technology*. doi:10.1016/j.net.2015.01.006
- [57] Dincer, I., Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.12.035
- [58] Funk, J. E. (2001). Thermochemical hydrogen production: Past and present, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/S0360-3199(00)00062-8
- [59] Bičáková, O., Straka, P. (2012). Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.05.047
- [60] Bičáková, O., Straka, P. (2010). The resources and methods of hydrogen production, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, C. 7, Sayı. 2, 175-188
- [61] Tolga Balta, M., Dincer, I., Hepbasli, A. (2009). Thermodynamic assessment of geothermal energy use in hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.01.087
- [62] Ni, M., Leung, D. Y. C., Leung, M. K. H., Sumathy, K. (2006). An overview of hydrogen production from biomass, *Fuel Processing Technology*. doi:10.1016/j.fuproc.2005.11.003
- [63] Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies, *Catalysis Today*. doi:10.1016/j.cattod.2008.08.039
- [64] Licht, S., Wang, B., Mukerji, S., Soga, T., Umeno, M., Tributsch, H. (2001). Over 18% solar energy conversion to generation of hydrogen fuel; theory and experiment for efficient solar water splitting, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/S0360-3199(00)00133-6
- [65] Meher Kotay, S., Das, D. (2008). Biohydrogen as a renewable energy resource-Prospects and potentials, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2007.07.031
- [66] Das, D., Veziroglu, T. N. (2008). Advances in biological hydrogen production processes, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.098
- [67] Konieczny, A., Mondal, K., Wiltowski, T., Dydo, P. (2008). Catalyst development for thermocatalytic decomposition of methane to hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2007.07.054
- [68] Balat, M., Balat, M. (2009). Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.02.067
- [69] Sørensen, B. (2005). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*. Academic Press, Cambridge
- [70] Turner, J., Sverdrup, G., Mann, M. K., Maness, P.-C., Kroposki, B., Ghirardi, M., Evans, R. J., Blake, D. (2008). Renewable hydrogen production, *International Journal of Energy Research*. doi:10.1002/er.1372
- [71] Sanz-Bermejo, J., Muñoz-Antón, J., Gonzalez-Aguilar, J., Romero, M. (2014). Optimal integration of a solid-oxide electrolyser cell into a direct steam generation solar tower plant for zero-emission hydrogen production, *Applied Energy*. doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.028
- [72] Burgess, G., Fernández-Velasco, J. G. (2007). Materials, operational energy inputs, and net energy ratio for photobiological hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.10.055
- [73] Zoulias, E., Varkaraki, E. (2004). A review on water electrolysis, *Tcjtst*, C. 4, Sayı. 2, 41–71
- [74] Chow, S. K. M. (2011). *Integration of High Efficiency Solar Cells on Carriers for Concentrating System Applications*, M.Sc Thesis, Ottawa

- [75] Durak, B. (2014). *Güneş Enerjisi İle Çalışan Küçük Ölçekli Pompalama Sisteminin Doğrudan Ve Enerji Yedeklemeli Çalışma Modlarının Karşılaştırılması*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü
- [76] Şen, Z. (2008). Solar energy fundamentals and modeling techniques: Atmosphere, environment, climate change and renewable energy, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy*, 1–276. doi:10.1007/978-1-84800-134-3/COVER
- [77] Hu, C., White, R. M. (1983). *Solar cells : from basics to advanced systems*, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, United States
- [78] Gueymard, C. A., Myers, D., Emery, K. (2002). Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing, *Solar Energy*, C. 73, Sayı. 6, 443–467. doi:10.1016/S0038-092X(03)00005-7
- [79] Solar Spectra, www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra.html, Erişim: 12 Haziran 2023
- [80] Sharaf, O. Z., Orhan, M. F. (2015). Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I – Fundamentals, design considerations and current technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, C. 50, 1500–1565. doi:10.1016/J.RSER.2015.05.036
- [81] Parliament, E., States, M., Podimata, R. A., Ftt, T., Ftt, T., Kong, H., Ftt, A., Eu-wide, P. (2022). *Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE Report, Freiburg
- [82] Pastuszak, J., Węgierek, P. (2022). Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development, *Materials*, C. 15, Sayı. 16. doi:10.3390/MA15165542
- [83] Suman, Sharma, P., Goyal, P. (2020). Evolution of PV technology from conventional to nano-materials, *Materials Today: Proceedings*, C. 28, 1593–1597. doi:10.1016/J.MATPR.2020.04.846
- [84] Richter, A., Hermle, M., Glunz, S. W. (2013). Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells, *IEEE Journal of Photovoltaics*, C. 3, Sayı. 4, 1184–1191. doi:10.1109/JPHOTOV.2013.2270351
- [85] NREL Best Research-Cell Efficiency Chart, www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html, Erişim: 16 Haziran 2023
- [86] Goetzberger, A., Hebling, C., Schock, H. W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, C. 40, Sayı. 1, 1–46. doi:10.1016/S0927-796X(02)00092-X
- [87] Kosten, E. D., Atwater, J. H., Parsons, J., Polman, A., Atwater, H. A. (2013). Highly efficient GaAs solar cells by limiting light emission angle, *Light: Science & Applications* 2:1, C. 2, Sayı. 1, e45–e45. doi:10.1038/lssa.2013.1
- [88] Ya'u Muhammad, J., Bello Waziri, A., Muhammad Shitu, A., Muhammad Ahmad, U., Hassan Muhammad, M., Alhaji, Y., Taofeek Olaniyi, A., Abdulkadir Bala, A. (2019). Recent Progressive Status of Materials for Solar Photovoltaic Cell: A Comprehensive Review, *Science Journal of Energy Engineering*, C. 7, Sayı. 4, 77. doi:10.11648/J.SJEE.20190704.14
- [89] Dunlap-Shohl, W. A., Zhou, Y., Padture, N. P., Mitzi, D. B. (2019). Synthetic Approaches for Halide Perovskite Thin Films, *Chemical Reviews*, C. 119, Sayı. 5, 3193–3295. doi:10.1021/ACS.CHEMREV.8B00318/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CR-2018-00318H_0058.GIF
- [90] Tian, J., Cao, G. (2013). Semiconductor quantum dot-sensitized solar cells, *Nano Reviews*, C. 4, Sayı. 1, 22578. doi:10.3402/NASAYI.V4I0.22578
- [91] Özçelik, S. (2016). *Fotovoltaik (PV) teknolojileri*, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara
- [92] Wolfgang Guter. (2010). *Optimierung von III-V Basierten Hochleistungssolarzellen*, PhD thesis, Univ. of Constance
- [93] Philipps, S. P., Dimroth, F., Bett, A. W. (2013). *High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells, Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation* (Second Edi.), Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-12-386964-7.00012-3

- [94] Zhang, L., Niu, P., Li, Y., Song, M., Zhang, J., Ning, P., Chen, P. (2017). Investigation on high-efficiency Ga_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.01}Ga_{0.99}As/Ge triple-junction solar cells for space applications, *AIP Advances*, C. 7, Sayı. 12, 125217. doi:10.1063/1.5006865/994291
- [95] Bernardes, S., Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., Fernandes, C. A. F. (2021). Characterization and Design of Photovoltaic Solar Cells That Absorb Ultraviolet, Visible and Infrared Light, *Nanomaterials 2021*, C. 11, Page 78, C. 11, Sayı. 1, 78. doi:10.3390/NANO11010078
- [96] Pastuszak, J., Węgierek, P. (2022). Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development, *Materials*, C. 15, Sayı. 16. doi:10.3390/MA15165542
- [97] Dreger, M., Wiesenfarth, M., Schmidt, T. S., Bett, a. W. (2013). Analysis of High Concentration Passively Cooled CPV Module Designs Using Mirror Optics, *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Sayı. December, 599–604
- [98] Garcia, D., Liang, D., Almeida, J., Tibúrcio, B. D., Costa, H., Catela, M., Vistas, C. R. (2021). Analytical and numerical analysis of a ring-array concentrator, *International Journal of Energy Research*, C. 45, Sayı. 10, 15110–15123. doi:10.1002/ER.6787
- [99] Sahin, F. E., Yilmaz, M. (2019). High concentration photovoltaics (HCPV) with diffractive secondary optical elements, *Photonics*, C. 6, Sayı. 2. doi:10.3390/photonics6020068
- [100] Martínez, M., Sánchez, D., Rubio, F., Fernández, E. F., Almonacid, F., Abela, N., Zech, T., Gerstmaier, T. (2016). CPV Power Plants, *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, 433–490. doi:10.1002/9781118755655.CH08
- [101] Wiesenfarth, M., Anton, I., Bett, A. W. (2018). Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies, *Applied Physics Reviews*, C. 5, Sayı. 4. doi:10.1063/1.5046752/998839
- [102] Metallic Mirror Coatings, www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/metallic-mirror-coatings/, Erişim: 24 Haziran 2023
- [103] Algora, C., Rey-Stolle, I. (2016). *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, John Wiley & Sons, New Jersey
- [104] Selimoğlu, Ö. (2013). *Design And Realization Of A New Concentrating Photovoltaic Solar Energy Module Based On Lossless Horizontally Staggered Light Guide*, PhD thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
- [105] Schuhmann, R. (2019). Description of aspheric surfaces, *Advanced Optical Technologies*, C. 8, Sayı. 3–4, 267–278. doi:10.1515/AOT-2019-0011/MACHINEREADABLECITATION/RIS
- [106] Soykuvvet, H. (2015). *İki Yönlü Yanal Etki Algılayıcılı Optik Sistem Tasarımı Ve Bu Sistemin Operasyonel Kullanımı İle Işıma Kaynaklarının Konumlarının Bulunması*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [107] Dreger, M., Wiesenfarth, M., Kisser, A., Schmid, T., Bett, A. W. (2014). Development and investigation of a CPV module with cassegrain mirror optics, *AIP Conference Proceedings*, C. 1616, Sayı. September, 177–182. doi:10.1063/1.4897055
- [108] Pfeiffer, H., Bihler, M. (1982). The effects of non-uniform illumination of solar cells with concentrated light, *Solar Cells*, C. 5, Sayı. 3, 293–299. doi:10.1016/0379-6787(82)90045-X
- [109] Segev, G., Kribus, A. (2013). Performance of CPV modules based on vertical multi-junction cells under non-uniform illumination, *Solar Energy*, C. 88, 120–128. doi:10.1016/J.SOLENER.2012.11.020
- [110] Segev, G., Mittelman, G., Kribus, A. (2012). Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, C. 98, 57–65. doi:10.1016/J.SOLMAT.2011.10.013
- [111] Theristis, M., O'Donovan, T. S. (2015). Electrical-thermal analysis of III–V triple-junction solar cells under variable spectra and ambient temperatures, *Solar Energy*, C. 118, 533–546. doi:10.1016/J.SOLENER.2015.06.003
- [112] Micheli, L. (2015). *Enhancing Electrical and Heat Transfer Performance of High-Concentrating Photovoltaic Receivers*, PhD Thesis, University of Exeter

- [113] Omar, A., Maka, M. (2020). *Performance analysis and characterisation of a high concentrating solar photovoltaic receiver*, PhD Thesis, Heriot-Watt University
- [114] Peharz, G., Siefer, G., Bett, A. W. (2009). A simple method for quantifying spectral impacts on multi-junction solar cells, *Solar Energy*, C. 83, Sayı. 9, 1588–1598. doi:10.1016/J.SOLENER.2009.05.009
- [115] Steiner, M. A., Geisz, J. F., Friedman, D. J., Olavarria, W. J., Duda, A., Moriarty, T. E. (2011). Temperature-dependent measurements of an inverted metamorphic multijunction (IMM) solar cell, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, Seattle
- [116] Vurgaftman, I., Meyer, J. R., Ram-Mohan, L. R. (2001). Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, *Journal of Applied Physics*, C. 89, Sayı. 11 I, 5815–5875. doi:10.1063/1.1368156
- [117] Varshni, Y. P. (1967). Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, *Physica*, C. 34, Sayı. 1, 149–154. doi:10.1016/0031-8914(67)90062-6
- [118] Wilkins, M., Hinzer, K. (2017). *Multijunction solar cells. In Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation*, CRC Press, Florida
- [119] Sendhil Kumar, N., Matty, K., Rita, E., Simon, W., Ortrun, A., Alex, C., Roland, W., Tim, G., Tapas Kumar, M. (2012). Experimental validation of a heat transfer model for concentrating photovoltaic system, *Applied Thermal Engineering*, C. 33–34, Sayı. 1, 175–182. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.09.031
- [120] Gualdi, F., Arenas, O., Vossier, A., Dollet, A., Aimez, V., Arès, R. (2013). Determining passive cooling limits in CPV using an analytical thermal model, *AIP Conference Proceedings*, C. 1556, Sayı. 1, 10–13. doi:10.1063/1.4822187
- [121] Aldossary, A., Mahmoud, S., Al-Dadah, R. (2016). Technical feasibility study of passive and active cooling for concentrator PV in harsh environment, *Applied Thermal Engineering*, C. 100, 490–500. doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.02.023
- [122] Royne, A., Dey, C. J., Mills, D. R. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, C. 86, Sayı. 4, 451–483. doi:10.1016/J.SOLMAT.2004.09.003
- [123] Fernández, E. F., Rodrigo, P., Almonacid, F., Pérez-Higueras, P. (2014). A method for estimating cell temperature at the maximum power point of a HCPV module under actual operating conditions, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, C. 124, 159–165. doi:10.1016/J.SOLMAT.2014.01.050
- [124] Ota, Y., Nagai, H., Araki, K., Nishioka, K. (2013). Thermal transfer simulation for concentrator photovoltaic receiver under concentration condition, *AIP Conference Proceedings*, C. 1556, Sayı. 1, 18–21. doi:10.1063/1.4822189
- [125] Theristis, M. (2016). *Development of a spectral dependent electrical & thermal model for High Concentrating Photovoltaic (HCPV) receivers*, PhD Thesis, Heriot-Watt University
- [126] NREL National Solar Radiation Database, www.nsrdb.nrel.gov/data-viewer, Erişim: 28 Haziran 2023
- [127] Zheng, J., Kang, Z., Han, B., Mo, J. (2023). Three-Dimensional Numerical Simulation of the Performance and Transport Phenomena of Oxygen Evolution Reactions in a Proton Exchange Membrane Water Electrolyzer, *Materials* 2023, C. 16, Page 1310, C. 16, Sayı. 3, 1310. doi:10.3390/MA16031310
- [128] Jin, X., Xue, X. (2010). Computational fluid dynamics analysis of solid oxide electrolysis cells with delaminations, *International Journal of Hydrogen Energy*, C. 35, Sayı. 14, 7321–7328. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2010.04.158
- [129] Kaya, M. F. (2021). Bir katı oksit elektrolizörün sayısal modellenmesi ve farklı çalışma koşullarındaki performansının incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, C. 36, Sayı. 4, 2109–2120. doi:10.17341/GAZIMMFD.852230
- [130] Weber, A. Z., Newman, J. (2005). Modeling gas-phase flow in porous media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, C. 32, Sayı. 7, 855–860. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2004.08.026

- [131] Jin, X., Xue, X. (2010). Mathematical modeling analysis of regenerative solid oxide fuel cells in switching mode conditions, *Journal of Power Sources*, C. 195, Sayı. 19, 6652–6658. doi:10.1016/J.JPOWSOUR.2010.04.018
- [132] Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., Vitale, G. (2020). Faraday's efficiency modeling of a proton exchange membrane electrolyzer based on experimental data, *Energies*, C. 13, Sayı. 18. doi:10.3390/EN13184792



ÖZGEÇMİŞ

Cihangir KALE

[illegible]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Gökçek M., Kale C. “Techno-economical evaluation of a hydrogen refuelling station powered by Wind-PV hybrid power system: A case study for İzmir-Çeşme.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10615-10625, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.082>.
2. Gökçek M., Kale C. “Optimal design of a Hydrogen Refuelling Station (HRFS) powered by Hybrid Power System.” *Energy Conversion and Management*, 161, 215-224, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.007>.

3. Kale, C., Gökçek, M. "A techno-economic Assessment of Landfill Gas Emissions and Energy Recovery Potential of Different Landfill Areas in Turkey." Journal of Cleaner Production, 275, 122946, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122946>.
4. Gürtürk, M., Kale, C., Kok, B. "Investigation of the performance of a new thermosyphon heat pipe design for applications heat transfer from liquid to gas." Applied Thermal Engineering, 186, 116520, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116520>.
5. Gökçek, M., Kale, C. "Optimal sizing of off-grid hydrokinetic-based hybrid renewable power systems for a house load demand." International Journal of Energy Research, 45(7), 10208-10225, 2021.
<https://doi.org/10.1002/er.6509>.
6. Kapıcıoğlu, A., Kale, C. (2023). "Techno-economic analysis of ground source heat pump powered by hybrid photovoltaic–wind–diesel systems in a temperate climate region." Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1-15, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s10973-023-12071-x>.

Bildiriler:

1. Gökçek, M. and Kale, C., Feasibility study of a wind-PV-diesel hybrid power system for a reverse osmosis desalination system, Solar Tr2016 Conference & Exhibition, 06-08 December 2016, İstanbul, Turkey.
2. Gökçek, M. and Kale, C., Optimal design of a hydrogen refueling station powered by wind-pv hybrid power system, The Second International Hydrogen Technologies Congress (ihtec-2017), 15-18 March 2017, Adana, Turkey.
3. Gökçek, M. and Kale, C., Estimating greenhouse gas emission and energy potential of Eskişehir landfill area, 7th International 100% Renewable Energy Conference, 18-20 May 2017, İstanbul, Turkey.
4. Kale, C. and Esen, H., Investigation of a Distillation System with the Solar Energy Source in Elazığ Climatic Conditions. 8th International Advanced Technology Symposium, 19-22 October 2017, Elazığ, Turkey.
5. Esen, H., Kale, C., Feasibility Study of a PV-Electrolyzer-Fuel Cell hybrid power system for Off-Grid Applications in Elazığ. 8th International Advanced Technology Symposium, 19-22 October 2017, Elazığ, Turkey.
6. Gökçek, M., Kale, C., Estimation of landfill gas and energy potential in Turkey. International Conference on Engineering Technologies, 7-9 December 2017, Konya, Turkey.
7. Gökçek, M., Kale, C., Pre-Feasibility Study of Eskişehir Landfill Gas to Energy. International Conference on Engineering Technologies, 7-9 December 2017, Konya, Turkey.

8. Bekar, G., Kale C., Gökçek, M., Öcal S., Kati Atik Depolama Sahalarında Elektrik Enerjisi Üretiminin Araştırılması: Niğde Örneği, 4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 18-20 April 2018, Edirne, Turkey.
9. Gökçek, M., Öcal, S., Kale, C., Comparative Experimental Investigation of Thermal Conductivities of Al_2O_3 -distilled water and TiO_2 -distilled water Nanofluids. International Conference on Innovative Engineering Applications, 20-22 September 2018, Sivas, Turkey.
10. Esen, H., Kuloğlu, İ.C., Gürtürk, M., Kale, C., Cooling Prefabricated Place with Phase Changing Material. International Conference on Innovative Engineering Applications, 20-22 September 2018, Sivas, Turkey.
11. Kale, C., Esen, H., Investigation of Hydrogen Production by Using Concentrated Photovoltaic/Thermal Hybrid Collector with Spectral Beam Splitting. International Conference on Natural Science and Technologies, 01-03 June 2023, Bulgaria.