



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



UZAY TEKNOLOJİLERİNDE KULLANILAN
ÇOK EKLEMLİ GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
PERFORMANSLARININ YANSIMA
ÖNLEYİCİ ÖZELLİKLİ MİKRO LENS
DİZİLERİ İLE GELİŞTİRİLMESİ

Buğrahan İDARE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Buğrahan İDARE tarafından hazırlanan “Uzay Teknolojilerinde Kullanılan Çok Eklemlı Güneş Hücrelerinin Performanslarının Yansıma Önleyici Özellikli Mikro Lens Dizileri ile Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 29/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Danışman

Doç. Dr. Ömer Faruk KESER

Üye

Prof. Dr. Hidayet OĞUZ

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARALI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Buğrahan İDARE

Tarih: 20.06.2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UZAY TEKNOLOJİLERİNDE KULLANILAN ÇOK EKLEMLİ GÜNEŞ HÜCRELERİNİN PERFORMANSLARININ YANSIMA ÖNLEYİCİ ÖZELLİKLİ MİKRO LENS DİZİLERİ İLE GELİŞTİRİLMESİ

Buğrahan İDARE

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Ömer Faruk KESER

2018, 91 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Ömer Faruk KESER

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Prof. Dr. Hidayet OĞUZ

Uydunun ana sistemlerinden olan güç sistemi uydu için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. Güç sisteminde en çok kullanılan enerji kaynağı ise güneş hücreleridir. En yüksek performansa sahip güneş hücrelerinin üçüncü nesil çok eklemlı güneş hücreleri olduğu bilinmektedir. Güneş hücrelerinin performanslarının artırılması sürecinde Mikro Lens Dizileri-MLA ile yansımaya önleyici kaplamalar kullanılabilir. Uydu teknolojilerinde gerekli enerjinin yüksek verimde elde edilmesi ve ilgili kaynağın düşük kütlede olması beklenmektedir. Uzay ortamı radyasyon, atomik oksijen ve ısıl döngü gibi pek çok etkeni içermektedir. Bu çalışmada uydu güç sistemleri için çok eklemlı güneş hücrelerinin performansını artırmaya yönelik geliştirilen yansımaya önleyici özellikli bir mikro lens dizisi tasarımı sunulmaktadır. Yapılan araştırmalar güneş hücresinin performanslarının geliştirilmesinde kullanılan ışığı soğurma etkinliğinin artırıldığı yansımaya önleyici özellikli MLA'da, hücre ısısının artmadığını ve güneş hücresinin kütlelerinin yok denecek kadar az oranda değiştiğini göstermektedir. Ancak güneş hücrelerinin MLA ile kaplanması üzerine yapılan az sayıdaki çalışmanın uzay uygulamalarına yönelik olmadığı da tespit edilmiştir.

Bu tasarımla güneş hücrelerinden üretilen akım miktarında toplam %5.9'luk performans artışı sağlanmıştır. Bu performansın %4.4'ünün mikro lens dizisinin yapısal özelliklerinden, %1.5'inin yansımaya önleyici kaplamalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca tasarım sonrasında MLA'ların ve yansımaya önleyici kaplamanın eklenmesiyle bir birim hücrenin toplam kütlelerinin 0.585 g düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu bulgular doğrultusunda tasarlanan uzay kalifiye yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin yapısal ve performans açısından uydu platformlarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş hücreleri, MLA, mikro lens dizileri, uzay kalifiye, uydu güç sistemleri

ABSTRACT

MS THESIS

IMPROVING PERFORMANCE OF MULTIJUNCTION PHOTOVOLTAICS WITH ANTI-REFLECTIVE COATED MICROLENS ARRAYS FOR SPACE TECHNOLOGIES

Buğrahan İDARE

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF ENERGY SYSTEMS
ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer Faruk KESER

2018, 91 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Ömer Faruk KESER

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Prof. Dr. Hidayet OĞUZ

The power system, one of the main systems of satellite, provides energy required for the satellite. Solar cells are also the most used energy source in the power system. The third generation multi-junction solar cells are known as the ones with highest performance. In the process of improving the performance of solar cells, microlens arrays-MLA and anti-reflective coatings-ARC may be used. It's expected that satellite technologies have high power efficiency and low mass. The space environment has many effects like atomic oxygen, radiation and thermal cycles. In this study, an anti-reflective coated microlens array design was developed to improving the performance of multi-junction solar cells for satellite power systems. Researches for increasing the solar cells performance shows that solar cell with anti-reflective coated MLA has increased light absorption performance and less cell heating with very low additional mass. However, it is established that few studies on MLA coatings of solar cells are not applicable on space platforms.

With this design, the total performance of the amount of electrical current generated from solar cells increased by 5.9%. It has been determined that 4.4% of this performance is caused by structural properties of the microlens array and 1.5% by antireflective coatings. It was also found that the total mass of a unit cell was 0.585 g by addition of MLA and anti-reflection coating after design. It has been concluded that space qualified anti-reflective coated microlens arrays designed in the direction of these findings can be used in satellite platforms in terms of structural and performance.

Keywords: MLA, microlens arrays, Solar cells, space qualified, satellite power systems,

ÖN SÖZ

Güneş hücrelerinin yeryüzündeki avantajlarının tespit edilmesi sonrasında uzay uygulamalarında kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Gelişen teknolojik gelişmeler ile birlikte ihtiyaç duyulan enerjinin artmasıyla güneş hücrelerinin performanslarının geliştirilmesi en önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Bu kapsamda güneş hücrelerinin içyapısında gerçekleştirilen iyileştirmelerin yanında dış yapısında da optik açıdan iyileştirmeler gerçekleştirilerek performansın arttığı tespit edilmiştir. Güneş hücrelerinin yakıtının güneş ışığı olmasından dolayı optik bakımdan gerçekleştirilen iyileştirmelerin oldukça önemli olduğu görülmüştür. Bu bakımdan bu çalışmayla uzay uygulamalarında tercih edilen çok katmanlı güneş hücrelerini, mikro lens dizilerini ve yansıma önleyici kaplamalarını konu alarak güneş hücrelerinin optik olarak performanslarının iyileştirilmesine yönelik bir tasarım ürünü geliştirmek amaçlanmaktadır. Umarım bu çalışma uzay teknolojileri ve güç üretim teknolojileri alanında çalışan araştırmacılara ışık tutacaktır.

Yürütülen bu çalışma boyunca her zaman bana vakit ayırıp sabırla dinleyen, beni yönlendiren, bilgi ve ilgisini esirgemeyen; hoşgörüsü ve heyecanı ile bana kazandırdığı değerler için her zaman minnettar olacağım kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Ömer Faruk KESER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı zamanda çalışmamı yürütmem için gerekli izin ve desteği sunan TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'nün başta müdürümüz Sayın Doç. Dr. Lokman KUZU ve onun şahsında tüm yöneticilerine ve personeline değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Diğer yandan TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı (OPMER) koordinatörü Sayın Doç. Dr. Ömer Faruk KESER'in şahsında ihtiyaç duyulan alt yapı ve ekipman gibi imkanlardan yararlanma noktasında tecrübe ve destekleriyle beni yönlendiren Optik Üretim Grubu Lideri Uzman Araştırmacı Adem YENİSOY'a ve Uzman Araştırmacı Kemal RÜZGAR yanında Optik Sistemler ile Optik Üretim Grubunun tüm üyelerine gönülden teşekkür ederim.

Sadece yüksek lisans sürecinde değil her zaman yanımda olan, sevinçlerimi, heyecanlarımı ve üzüntülerimi kısacası tüm hayatımı paylaştığım, bugüne gelmemde büyük emeği olan, her koşulda beni destekleyen, varlıklarıyla kendimi şanslı hissettiğim aileme ve eşime teşekkür ederim.

Aynı süreçte görüş ve önerileriyle sağladıkları katkılardan dolayı değerli jüri üyelerinden Sayın Prof. Dr. Şerafettin EREL'e ve aynı zamanda Anabilim Dalı Başkanımız olan Sayın Prof. Dr. Hidayet OĞUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Buğrahan İDARE
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Hücreleri	4
1.1.1. Çok Katmanlı Güneş Hücreleri.....	8
1.1.2. Optik Kayıplar	11
1.1.3. Optik Kayıpları Engelleme Teknikleri	15
1.1.4. Güneş Hücreleri ve Uzay	23
1.2. Uzay Ortamı Etkileri.....	25
1.2.1. AM 0 Işıması	25
1.2.2. Vakum Ortamı	26
1.2.3. Nötral Ortam	27
1.2.4. Radyasyon Ortamı	28
1.2.5. Parçacık Ortamı	31
1.2.6. Termal Ortam.....	31
1.2.7. Uzay Kalifiye Güneş Hücreleri.....	32
1.3. Literatür Araştırması.....	34
1.3.1. Mikro Lens Dizilerinin Karakteristik Özellikleri	36
1.3.2. Mikro Lens Dizilerinin Güneş Hücreleri Uygulamaları	39
1.4. Araştırmanın Problemi.....	44
1.5. Araştırmanın Amacı.....	44
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
2.1. Çalışmanın Yöntemi	45
2.2. Çalışmanın Materyali.....	48
2.3. Verilerin Analizi	49
2.4. Tasarım Süreci	49
2.4.1. Tasarım İsterleri	50
2.4.2. Malzeme Seçimi	50
2.4.3. Optik Tasarım	52
2.4.3.1. Mikro Lens Dizisinin Tasarımı.....	53
2.4.3.2. Yansıma Önleyici Kaplamanın Tasarımı.....	57
2.4.4. Performans Testleri.....	61
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	64

3.1. Mikro Lens Dizisinin Karakteristik Yapısına Dair Bulgular.....	64
3.2. Yansıma Önleyici Kaplamannın Yapısına Dair Bulgular.....	66
3.3. Performans Testlerinin Bulguları.....	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	91



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
°C	Santigrat derece
eV	Elektron Volt
g	Gram
GeV	Giga Elektron Volt
keV	Kilo Elektron Volt
kg	Kilogram
km	Kilometre
m ²	Metrekare
mm	Milimetre
MeV	Mega Elektron Volt
nm	Nanometre
W	Watt
µm	Mikrometre
λ	Dalga boyu - Lambda
Δ	Faz Farkı
₺	Türk Lirası
\$	Dolar
s	Saniye
Ø	Lens Çapı

Kısaltmalar

A	Dalganın Genliği
Ar	Argon
A ₁	1. Dalganın Genliği
A ₂	2. Dalganın Genliği
ARC-MLA'lı	Yansımaya Önleyici Özellikli Mikro Lens Dizisine Sahip Güneş Hücresi
AIAA	Amerikan Havacılık ve Uzay Bilimleri Enstitüsü
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
AM	Hava Kütlesi – Air Mass
AM 0	Uzaydaki Işıma Miktarı
ARC	Yansımaya Önleyici Kaplama – Anti-reflective Coating
ATOX	Atomik Oksijen
AU	Dünya ile Güneş Arasındaki Mesafe – Astronomical Unit
a-Si	Amorf Silikon
BOL	Ömür Başlangıç – Begin of Life
CPV	Yoğunlaştırıcı Güneş Hücreleri – Concentrator Solar Cell
c	Vakumdaki Işık Hızı
CdS	Kadmiyum Sülfür
Cd	Kadmiyum
CuS ₂	Bakır Sülfür
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenit
CdTe	Kadmiyum Tellür
CeO ₂	Seryum Oksit

CTGT	Yüzeyin Kalınlığını Belirlenen Değerden Daha Büyükte Tutan
CTLT	Yüzeyin Kalınlığını Belirlenen Değerden Daha Düşükte Tutan
CVCM	Toplanan Uçucu Yoğunlaşabilir Malzeme
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme – Chemical Vapour Deposition
<i>d</i>	Alınan Mesafe
EOL	Ömür Sonu – End of Life
GaAs	Galyum Arsenit
GaInAs	Galyum İndiyum Arsenit
GaInP	Galyum İndiyum Fosfit
Ge	Germanyum
GEO	Yer Eş Zamanlı Yörünge – Geostationary Orbit
GPS	Global Konumlandırma Sistemi - Global Positioning System
H	Hidrojen
He	Helyum
HfO ₂	Hafniyum Dioksit
I	Akım
In ₂ O ₃	İndiyum Oksit – İndium Oxide
ISS	Uluslararası Uzay İstasyonu – International Space Station
ITO	İndiyum Kalay Oksit – İndium Tin Oxide
KOH	Potasyum Hidroksit
LEO	Düşük dünya yörüngesi – Low Earth Orbit
MEO	Orta Dünya Yörüngesi – Middle Earth Orbit
MgF ₂	Magnezyum Florür
MISSE	Materials International Space Station Experiment
MJ	Çok Katmanlı – Multi Junction
MLA	Mikro Lens Dizisi – Mikro Lens Array
MLA'lı	Mikro Lens Dizisine Sahip Güneş Hücresi
ML-ARC	Çok Katmanlı ARC – Multi Layer Anti-Reflective Coating
MNSD	Minimum Yarı-Çap – Minimum Semi-Diameter
MXCV	Maksimum Eğrilik – Maximum Curvature
MXSD	Maksimum Yarı-Çap – Maximum Semi-Diameter
N ₂	Moleküler Azot
NaOH	Sodyum Hidroksit
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
Nb ₂ O ₅	Niobium Pentaoksit
O	Atomik Oksijen
O ₂	Moleküler Oksijen
OPMER	Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı
PMMA	Polimetil Metakrilat
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme – Physical Vapour Deposition
Si	Silikon
SiO ₂	Silikon Dioksit
SC	Güneş Hücresi – Solar Cell
SL-ARC	Tek Katmanlı ARC – Single Layer Anti-Reflective Coating
SnO ₂	Kalay Oksit – Tin Oxide
SOG	Spin-on Glass
<i>T</i>	Dalganın Periyodu
<i>t</i>	Zaman
Ta ₂ O ₅	Tantalum Pentaoksit
TCL	Şeffaf İletken Katmanlar – Transparent Conductive Layers

TCO	Şeffaf İletken Oksit – Transparent Conductive Oxide
TE	Enine Elektrik – Transverse Electric
TM	Enine Manyetik – Transverse Magnetic
TML	Toplam Kütle Kaybı – Total Mass Loss
TiO ₂	Titanyum Dioksit
Ti ₃ O ₅	Titanyum Oksit
V	Voltaj
QW	Kuantum Kuyular
ZnO	Çinko Oksit – Zinc Oxide
ZrO ₂	Zirkonyum Dioksit
α	Temas Açısı
A _{SC}	Güneş Hücresinin Alanı
f	Lensin Odak Uzaklığı
FF	Dolum Faktörü – Fill Factor
FF _{MLA}	Lensin Dolum Faktörü
h _L	Lensin Tepe Noktasındaki Yükseklik
I _{SC}	Kısa Devre Akımı – Short Circuit Current
K	Asferiklik Sabiti
η	Performans
n	Dalganın Yayılım Gösterdiği Ortamın Kırılma İndisi
n _i	i Ortamının Kırıcılık İndisi
n _L	Lensin Kırıcılık İndisi
n _t	t Ortamının Kırıcılık İndisi
P _{ışınım}	Işınım Şiddeti
P _{in}	Güneş Hücresinin Üzerine Düşen Işınımın Gücü
P _{mpp}	Maksimum Güç Noktası – Maximum Power Point
p _x	X yönündeki mesafe
p _y	Y yönündeki mesafe
R	Lens Eğrilik Yarıçapı
R _G	Güneş Işığının Yansımaya Katsayısı
R _{TE}	Yansımaya Katsayısı (Elektrik Alan)
R _{TM}	Yansımaya Katsayısı (Manyetik Alan)
r _{TE}	Yansıyan Işığın Giren Işığa Oranı (Elektrik Alan)
r _{TM}	Yansıyan Işığın Giren Işığa Oranı (Manyetik Alan)
θ	Güneş Işığının Giriş Açısı
θ_i	Giren Güneş Işığının Normalle Yaptığı Açısı
θ_r	Yansımaya Açısı
θ_t	Kırılma Açısı
t	Zaman
V _{OC}	Açık Devre Gerilimi – Open Circuit Voltage
ω	Açısal Frekans
β	Kabul Açısı
δ	Akım Miktarındaki Artış

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Farklı güç kaynaklarının yaklaşık kullanım aralıkları	3
Şekil 1.2. Işık soğurulması sonucunda elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmesi.....	4
Şekil 1.3. a) p ve n tipi katmanların birleştirilmesi ve b) yapısal elektrik alan oluşumu	5
Şekil 1.4. Bir güneş hücresinin $I-V$ ve $P-V$ eğrileri ve FF	6
Şekil 1.5. MJ güneş hücresinin yapısının şematik gösterimi	9
Şekil 1.6. Farklı sıcaklık değerleri için $I-V$ grafiği	10
Şekil 1.7. Hücrelerin kuantum verim eğrilerinin AM 0 spektrumunda gösterimi. Foton enerjisi band genişliğini aştığında, spektral etkinlik eğrileri ile spektrum arasındaki alan kuantum verimliliğinin dışında olduğundan dolayı ısı olarak kaybolur	11
Şekil 1.8. Güneş hücresinde meydana gelen yansımalar	12
Şekil 1.9. a) Bir eksen boyunca ilerleyen ışığın elektromanyetik dalga gösterimi, b) Işık dalgasının düzlemsel arayüzdeki yansımaları ve kırılması.....	13
Şekil 1.10. QW MJ epitaksiyel katmanların üzerine düşen ışığın dalga boyuna göre yansıtma grafiği – Fresnel kayıpları	14
Şekil 1.11. Sabit sıcaklıktaki farklı ışınım miktarlarındaki $I-V$ grafiği	15
Şekil 1.12. Faz farkı π rad olan iki denk dalganın yıkıcı girişimi	16
Şekil 1.13. a) Yüzeyi şekillendirilmiş silikonun yüzey yansımalarının şematik gösterimi, b) Yüzeyi şekillendirilmiş optik mikroskop görüntüsü	18
Şekil 1.14. MJ güneş hücresine yönelik ITO filmin kalınlığına göre yansımaların ve katman direncinin değişimi	19
Şekil 1.15. Farklı güneş hücreleri performansının yoğunlaştırma oranına göre değişimi	20
Şekil 1.16. Giriş açısının azaltılmasının gösterimi	21
Şekil 1.17. Mikro lensin kavisli ara yüzeyinin giriş açısına etkisi	22
Şekil 1.18. Mikro lensin ışığı kırarak güneş hücresinin içine yönlendirmesinin gösterimi	22
Şekil 1.19. AM 0 spektrum ile AM1.5 spektrum gösterimi	26
Şekil 1.20. Vakumda UV testi sırasında güneş hücresi üzerindeki optik materyalin geçirgenliğindeki değişim	30
Şekil 1.21. Mikro lens dizileri ile gerçekleştirilen a) paralelleştirme, b) odaklama, c) aydınlatma ve d) görüntüleme işlemlerinin grafiksel gösterimi	36
Şekil 1.22. Bir plano-konveks lensin şematik olarak gösterimi	36
Şekil 1.23. Mikro lens dizisinin dizilişlerinin gösterimi	37
Şekil 1.24. Kabul açısının şematik gösterimi	38
Şekil 1.25. Optik malzemeler ve geçirgenlik bölgeleri	39
Şekil 1.26. Lens çapı $48 \mu\text{m}$, temas açısı 62° ve boşluk $15 \mu\text{m}$ olan mikro lens dizisinin üstten ve yandan görünüşü	40
Şekil 1.27. Silika parçacıklarla oluşturulan MLA'nın üretimi	41
Şekil 1.28. Nam ve arkadaşlarının ürettikleri MLA'nın şematik gösterimi	41

Şekil 1.29. Vessey'in önerdiği hibrit CPV	42
Şekil 1.30. a) 0.6 μm , b) 1 μm , c) 1.5 μm ve d) 2 μm aralıklı MLA'ların SEM görüntüsü	43
Şekil 2.1. TÜBİTAK UZAY'a bağlı Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı (OPMER).....	48
Şekil 2.2. Bu çalışmanın tasarımına temel teşkil eden güneş hücresinin yapısı	53
Şekil 2.3. Lens verilerinin tanımlandığı Lens Data penceresi	54
Şekil 2.4. Temel sistem parametrelerin tanımlandığı System Explorer penceresi.....	54
Şekil 2.5. Güneş hücresinin üzerindeki yarı silindirik şekle sahip mikro lens dizisinin beklenen dizilimi ve mikro lensin optik açıklığının gösterimi	55
Şekil 2.6. Optimizasyonda kullanılan Merit Fonksiyon penceresi	56
Şekil 2.7. Layout penceresinden mikro lens sistemine 0° ve $\pm 50^\circ$ den gelen ışığın gösterimi ...	57
Şekil 2.8. Başlangıç parametrelerinin tanımlandığı filtre özellikleri penceresi	58
Şekil 2.9. Kaplama malzemelerinin basit katman penceresine tanıtılması	59
Şekil 2.10. Yansıma önleyicilik özellik göstermesi hedeflenen aralığın tanıtılması	59
Şekil 2.11. Needles tekniği ile optimizasyon işlemlerinin yürütüldüğü pencere	60
Şekil 2.12. Optimizasyon işlemleri sonrası kalınlıkların okunduğu Front Layers penceresi.....	60
Şekil 2.13. Dalga boylarına göre yansıma miktarını gösteren pencere.....	61
Şekil 2.14. Sistem oluşturan parametrelerin tanımlandığı Component Editor penceresi.....	62
Şekil 2.15. Mikro lens yapısındaki detektörün bulunduğu yerin gösterimi	62
Şekil 2.16. Detektör üzerine düşen ışık yeri ve miktarı gibi verilere ulaşmaya yarayan Detector Viewer penceresi.....	63
Şekil 3.1. Mikro lensin nihai şekli	65
Şekil 3.2. Güneş hücresi üzerindeki mikro lens dizisinin üstten görünümü	65
Şekil 3.3. Mikro lens dizisinin üzerindeki yansıma önleyici kaplamanın gösterimi.....	66
Şekil 3.4. Yansıma önleyici kaplamaya sahip olmayan mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafiği.....	67
Şekil 3.5. Yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafiği	68
Şekil 3.6. OpenFilters programından elde edilen yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafiği	69
Şekil 3.7. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açlarına sahip ışık altında üretilen akım miktarlarının grafiksel olarak karşılaştırılması.....	71
Şekil 3.8. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açlarına sahip ışık altında üretilen güç miktarlarının grafiksel olarak karşılaştırılması	72
Şekil 3.9. MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinin düz yüzeyli güneş hücresine göre farklı giriş açlarına sahip ışık altındaki akım kazanım miktarı grafiği	73
Şekil 4.1. Tasarlanan yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerine sahip MJ güneş hücresinin kütle dağılımı	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Güneş hücrelerinin uzay kalifikasyon sürecinde kullanılan bazı testler ve detayları	33
Çizelge 2.1. Seçilen malzemelerin özellikleri	52
Çizelge 2.2. Mikro lensin tasarımı için belirlenen parametreler	55
Çizelge 2.3. Yansıma önleyici tasarımı için belirlenen parametreler	58
Çizelge 3.1. Optimize edilen mikro lensin nihai karakteristik yapısı	64
Çizelge 3.2. Yansıma önleyici kaplamanın yapısına ait veriler	66
Çizelge 3.3. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine farklı giriş açılarında giren ışık enerjisi miktarı verileri	70
Çizelge 3.4. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açlarına sahip ışık altında üretilen akım miktarları	70
Çizelge 3.5. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açlarına sahip ışık altında üretilen güç miktarları	71
Çizelge 3.6. Mevcut güneş hücresi ve malzemelerin kütleleri	74
Çizelge 4.1. Bu çalışmada tasarlanan ARC-MLA'lı yapının karşılaştırmalı performans değerleri	81

1. GİRİŞ

İlk yapay uydu Sputnik I'ın 1957 yılında fırlatılarak yörüngeye yerleştirilmesi ile yörüngedeki bir cihazın yeryüzüne bir dizi sinyal göndermesi ülkelerin uzay programına başlamasını tetiklemiştir. İlk zamanlar uzay programları daha çok iletişim uydularından oluşmaktayken ilerleyen yıllarda bilimsel araştırma uyduları ön plana çıkmıştır. Bu uydular sayesinde haberleşme, astronomi, yeraltı kaynakları, meteoroloji, doğal felaketler ve haritalamanın yanında keşif gibi oldukça çeşitli alanlarda doğru ve fazla verinin kısa sürede elde edilmesi sağlanmaktadır (Kuru, 2005; Fortescue, ve ark., 2004). Bu özellikleri sayesinde uydular ülkelerin teknolojik gelişimi, iletişimi ve ekonomisine ek olarak askeri faaliyetleri bakımından ülkelerin altyapılarının en önemli stratejik unsurları haline gelmiştir.

Haberleşme uyduları genel olarak yer eş zamanlı yörüngede – *geostationary orbit* (GEO) görev yapmaktadır. GEO'da bulunan bir uydu yaklaşık 36000 km irtifada ve ekvatorial düzlemde belirli bir coğrafi konuma yönelik eş zamanlı olarak dönmektedir. Yer görüntüleme uyduları ise 2000 km ve daha aşağı irtifalarda yani *low earth orbit* (LEO) – düşük dünya yörüngesinde bulunmaktadır. LEO'daki görüntüleme uyduları dönme hareketini kutupsal düzlemde gerçekleştirmektedir. Navstar Global Positioning System (GPS) gibi takım uyduları ise *middle earth orbit* (MEO) – orta dünya yörüngesi olarak adlandırılan GEO ile LEO irtifalarının arasındaki irtifalarda görev yapmaktadır (Fortescue, ve ark., 2004). Genelde LEO'da görev yapan ve günümüzde popüler olan bir başka uydu çeşidi de nano uydulardır. Bu uyduların, tarihçe kazandırılmış mevcut malzemeler ile üretilebilmesi, büyük uyduların yanında ek yük olarak fırlatılabilmesi, uzayda ilk defa kullanılacak parçaların test edilebilmesinin yanı sıra bilimsel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi ve maliyetinin nispeten düşük olması gibi olumlu özellikleri vardır.

Hangi göreve sahip olursa olsun tüm uydular belirlenen görevlere özel gereksinimleri karşılamak üzere tasarlanmış çeşitli sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemler, faydalı yük – *payload* ve taşıyıcı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Faydalı yük, iletişim uydularında haberleşme cihazlarından oluşmakta iken araştırma uydularında araştırılan konuya yönelik cihazlardan oluşmaktadır. Taşıyıcı ise faydalı yükün çalışması için yardımcı sistemlerden oluşmaktadır (Patel, 2005). Bu yardımcı sistemler;

- Mekanik yapı,
- İletişim ve veri işleme sistemi,
- Telemetri sensörleri,

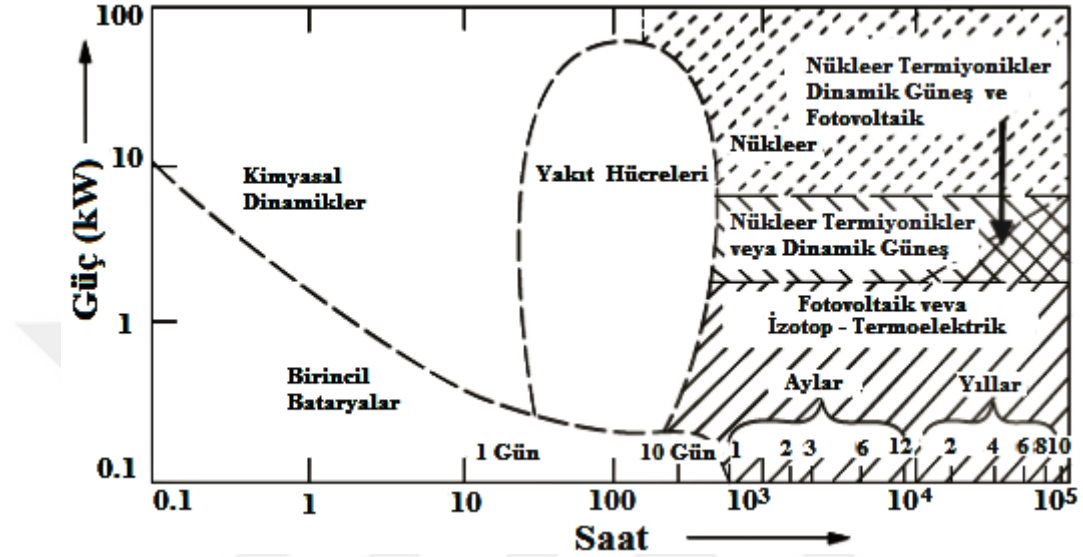
- Isıl kontrol sistemi,
- İtki sistemi,
- Merkezi bilgisayar sistemi ve
- Güç sistemi olarak sıralanabilmektedir.

Uydular modern dünyaya güçlü bir dayanak oluşturdukları için teknik performanslarını ve neticede yatırımcılar için getiri oranını optimize etmek önemlidir. Uydunun çalışabilmesi için gerekli enerjiyi üreten güç sistemi; uydunun faydalı yükünü, uydu ölçülerini, çalışma ömrünü, görev verimliliğini ve maliyetini belirlemektedir (Shenai, 2007). Bu süreçte ağırlığın azaltılması ve sürdürülebilirliğin sağlanması, uydu için güç sistemlerinin performansının iyileştirilmesinde oldukça önemli görülmektedir (Keser, ve ark., 2017).

Uydunun faydalı yüküne ve taşıyıcı sistemine yönelik belirlenen enerjinin üretiminden kontrollü şekilde dağıtımına kadar olan süreci yöneten sistem uydu güç sistemidir. Genel olarak uydu güç sistemleri; birincil enerji kaynakları, ikincil enerji kaynakları ve güç kontrolü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır (Keser, ve ark., 2017).

Birincil enerji kaynakları bir yakıtı elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Birincil enerji kaynakları olarak güneş hücreleri – *solar cell* (SC), yakıt hücreleri, nükleer sistemler ve radyoizotop termoelektrikler kullanılmaktadır. Günümüzde birçok uzay aracı birincil enerji kaynağı olarak güneş hücrelerini tercih etmektedir. Bu durumda yakıt, fotovoltajik etki yoluyla elektrik enerjisine dönüştürülen güneş ışınım enerjisidir. Yakıt hücreleri daha çok kısa süreli göreve sahip uydular için kullanılırken, uzun süreli uçuşlar için güneş hücreleri ile yakıt hücreleri birlikte kullanılmaktadır. Yakıt hücreleri kontrollü bir şekilde kimyasal reaksiyona girerek elektrik enerjisi üreten elektrokimyasal cihazlardır. Hidrojen ve oksijen kullanan yakıt hücreleri reaksiyon sonucu olarak su üretmektedir. Dolayısıyla bu ürün astronotlar için su kaynağı olarak kullanılabilir. Nükleer sistemler ise enerji kaynağı oluşturmak için ya bir radyoaktif bozunma işlemini ya da bir nükleer fisyon işlemini kullanmaktadır. Radyoizotop termoelektrikler, termoelektrik etki ile radyoaktif bozunma işlemini bir arada kullanarak elektrik enerjisi üretmektedir. Fisyon reaktörleri ise uranyum gibi bölünebilir materyalin bir ısı kaynağı olarak kullanıldığı yeryüzündeki geleneksel nükleer enerji santrallerine benzer şekilde çalışmaktadır (Fortescue, ve ark., 2004). Güneş hücreleri verimli olmalarına ve yaygın kullanılmasına rağmen sadece dünya yörüngeleri ve güneş yörüngesi gibi güneş

ışınımının yeterli olduğu yörüngelerde enerji sağlayabilmektedir. Derin uzay görevleri gibi güneş ışınımının yeterli olmadığı görevlerde nükleer enerji sistemleri ön plana çıkmaktadır (Zaitsev, 2007). Uzay uygulamalarında genel olarak kullanılan güç kaynakları ve ortalama olarak kullanım süreleri Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1. Farklı güç kaynaklarının yaklaşık kullanım aralıkları (Miller ve Keese, 2003)

İkincil enerji kaynakları ise birincil enerji kaynağının enerji üretmediği durumda uyduya elektrik gücü sağlayan ve enerjiyi depolayan sistemlerdir. Bu sistemlerin bir yakıt elemanı yoktur. Örneğin uydunun güneşi gördüğü *aydınlık bölgede* birincil enerji kaynağı olan güneş hücreleri uydu için gerekli olan enerjiyi sağlamaktayken, uydunun güneşi görmediği *karanlık bölgede* ise ilgili enerji ikincil enerji kaynağı olan bataryalar tarafından sağlanmaktadır (Keser, ve ark., 2017).

Güç kontrolü ve dağıtım ağı, uzay aracının tüm cihazlarına uygun voltaj ve akım seviyelerini sağlamak için gereklidir. Örneğin; tüm birincil enerji kaynakları gibi güneş hücreleri de uzay ortamı etkilerine maruz kalarak bozulmaktadır. Bu bozulma ile birlikte güneş ışığının hücrelere giriş açılarının değişmesinden dolayı üretilen akım ve voltajda dalgalanmalar meydana gelmektedir. Bu durum sonrası birincil enerji kaynağından kaynaklanan güç eksikliğini telafi etmek amacı ile ikincil enerji kaynaklarını yönlendirerek uyduya yeterli gücü sağlayan sistem ise güç kontrol sistemidir. Bunlara ek olarak uydu güç sistemlerinde birincil enerji kaynakları ömür sonu – *end of life* (EOL) performansları dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Uydu görevinin ilk dönemlerinde güç sisteminin ömür başlangıç – *begin of life* (BOL) performansı uydunun ihtiyacından fazla

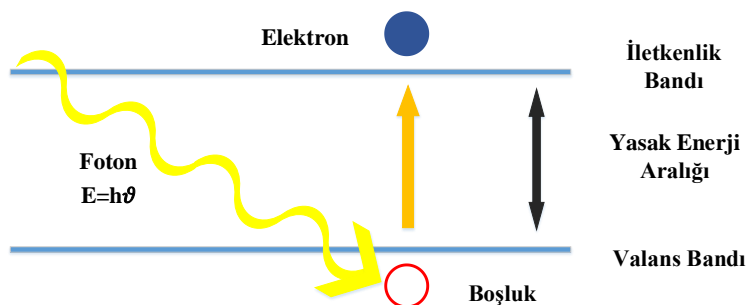
güç üretmesine neden olmaktadır. Bu ihtiyaç fazlası gücün ikincil enerji kaynaklarına depolanması ya da daha basit olarak ilave bir yük üzerinden tüketilmesi aynı güç kontrol sistemi tarafından gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bir batarya sisteminin şarj kontrolü, bataryaların ömrünü ve güvenilirliğini korumak için özellikle gereklidir (Fortescue, ve ark., 2004). Bu etkenlerden dolayı uydular için güç yönetimi alanındaki araştırmalar birincil enerji kaynakları kadar büyük önem taşımaktadır.

En eski uzay araçlarında kullanılan bataryalar, sadece birkaç gün yeterli güç sağlayabildiği için araştırma ve askeri keşif görevlerine sahip uydularda tatmin edici olamamıştır. Bu nedenle yapılan çalışmalar sonucunda ihtiyaç duyulan enerjinin sağlanmasında öncelikli olarak yeryüzü uygulamalarındaki olumlu göstergeler dikkate alınarak uzay uygulamalarında da güneş hücrelerinden yararlanılmaya başlandığı görülmektedir. 1950'li yıllarda kullanılan ilk güneş hücreleri, güneş enerjisini etkili bir şekilde elektrik enerjisine dönüştüremese de ilave tüketim malzemesi gerektirmediği için uzay araçlarına güç sağlayıcı olarak uygun görülmüştür (Bailey ve Raffaele, 2003).

Uzay uygulamalarının daha iyi anlaşılması için güneş hücrelerinin yapısal özelliklerinin bilinmesinde yarar görülmektedir.

1.1. Güneş Hücreleri

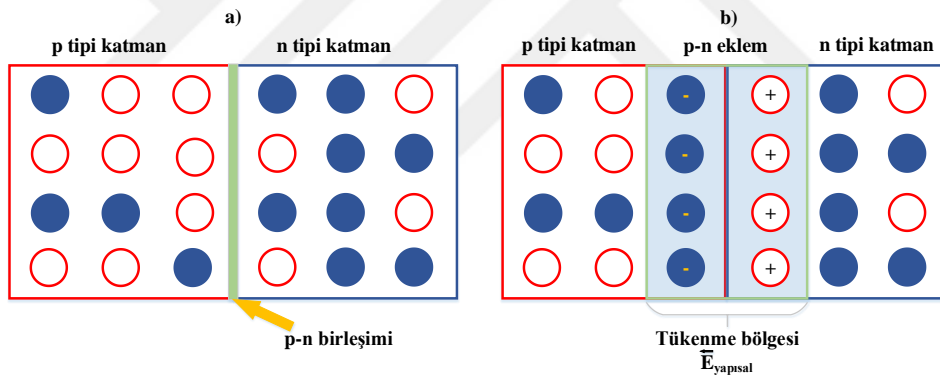
Güneş enerjisinden doğrudan elektrik üretebilen yarıiletken cihazlara güneş hücreleri denir (Keser, ve ark., 2017). Fotovoltaik etki yoluyla çalışan güneş hücreleri, p ve n tipi yarıiletken katmanlar sayesinde üzerine ışık düştüğünde potansiyel fark oluşturmaktadır. Bu olay genelde kullanılan yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya daha yüksek enerjili bir fotonu soğurduğunda, valans bandında bulunan elektronun uyarılarak iletkenlik bandına geçmesi ile başlamaktadır. Bu geçiş sonrasında bir elektron-boşluk çifti oluşmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Işık soğurulması sonucunda elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmesi

Oluşan bu elektron-boşluk çifti, p-n katmanlarının bir araya gelerek oluşturduğu p-n eklemi bölgesinde meydana gelen yapısal elektrik alan ortamında birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 1.3). Ayrılma sonrasında güneş hücresinin kontaklarında potansiyel fark oluşmaktadır. Kontakların bir direnç ile devreyi tamamlaması sonucu akım meydana gelmektedir (Kouzehkonani, 2014).

P-n eklemi bölgesinde, n tipi yarıiletkende bulunan bir kısım elektronlar p-tipi yarıiletkenine geçerek boşluklarla, p-tipi yarıiletkenindeki boşluklar da n-tipi yarıiletkenine geçerek elektronlarla birleşmektedir. Bundan dolayı elektronların ve boşlukların tüketildiği bu bölgeye tükenme bölgesi adı verilmektedir (Beiser, 2015). Işığın, yapısal elektrik alan dışına yani tükenme bölgesi dışına düşmesi sonucunda da elektron boşluk çifti oluşmaktadır. Ancak bu elektron boşluk çiftinin ayrılması için gereken elektrik alan olmadığı için, bu çift birleşerek kaybolmaktadır. Rekombinasyon olarak adlandırılan bu olay sonucu oluşan çiftlerin akıma katkıları olmamaktadır (Boz, 2011).



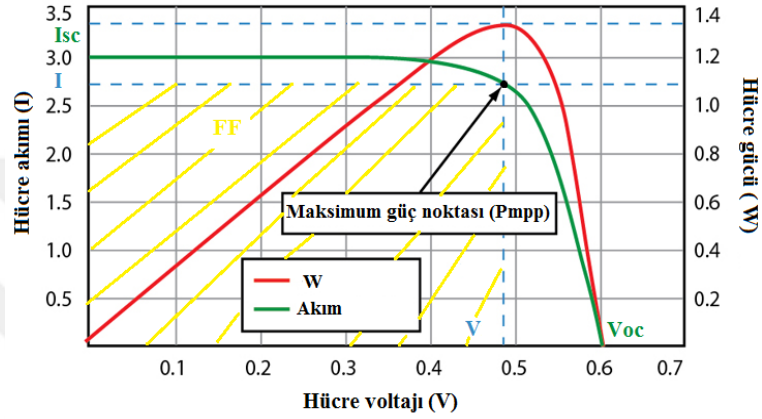
Şekil 1.3. a) p ve n tipi katmanların birleştirilmesi ve b) yapısal elektrik alan oluşumu

Çalışma mantığı kısaca anlatılan güneş hücresi, bir takım parametrelerle tanımlanmaktadır. Bu parametreler; kısa devre akımı – *short circuit current* (I_{SC}), açık devre gerilimi – *open circuit voltage* (V_{OC}), maksimum güç noktası – *maximum power point* (P_{mpp}), dolun faktörü – *fill factor* (FF) ve performans (η) olarak kabul edilmektedir (Chaar, ve ark., 2011).

I_{SC} , güneş hücresinin aydınlatılarak bağlantı uçlarının kısa devre edilmesi ile ($V=0$) oluşturulan akım değeridir. Aynı zamanda güneş hücresinin ulaşabileceği maksimum akım değeridir (Tseng , ve ark., 2011).

V_{OC} , güneş hücresinin aydınlatılarak bağlantı uçları arasında herhangi bir devre tamamlayıcı elemanın bağlanmaması durumundaki ($I=0$) gerilim değeridir. Bu değer iki uç arasındaki maksimum gerilim farklılığı değeridir (Tseng , ve ark., 2011).

P_{mpp} , güneş hücresinin akım (I) ve voltaj (V) değerlerinin çarpımının en büyük değerini aldığı yani gücün en yüksek olduğu zamanki noktadır. Doğal olarak V_{OC} ve I_{SC} değerlerinde güneş hücresinden güç elde edilememektedir (Bedeloğlu, 2009). Şekil 1.4'te bir güneş hücresinin parametreleri grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Bir güneş hücresinin I - V ve P - V eğrileri ve FF

FF , güneş hücresi içindeki seri dirençlerin ölçümü ve I - V eğrisinin altındaki en büyük alandır (Özen, 2015). Dolu faktörünün yüksek olması hücrenin şönt direnci kayıplarının ve seri direncinin az olduğunu, bundan dolayı mevcut akımın az bir kısmının ısı olarak kaybolacağı anlamına gelmektedir. FF , Denk. 1.1'de tanımlanmıştır.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (1.1)$$

η , güneş hücrelerinin performans değeri olarak tanımlanmaktadır. P_{mpp} 'nin, güneş hücresinin üzerine düşen ışınımın gücüne – *total power of the incident light* (P_{in}) oranıdır (Kaplan, 2012). Denklem 1.2'de A_{SC} , güneş hücresinin alanı, $P_{ışınım}$ ise gelen ışınım şiddetidir.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} \times 100 = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{A_{SC} \cdot P_{ışınım}} \quad (1.2)$$

Güneş hücreleri üzerine düşen ışınımın ne kadarını elektrik enerjisine dönüştürebiliyorsa o kadar performansı vardır. Dönüşümü etkileyen en büyük faktör ise yarıiletkenin üzerine düşen ışığın hangi dalga boylarını elektrik enerjisine

dönüştürebildiğiyle ilgilidir. Bu durum ise güneş hücresinin üretiminde kullanılan yarıiletkenin türüne bağlıdır.

Güneş hücreleri, farklı maddelerden yararlanılarak üretilmektedir. Malzeme seçiminin kullanım alanına göre yapılması, üretilen güneş hücrelerinin dayanıklı ve yüksek performanslı ayrıca ekonomik olması açısından büyük önem taşımaktadır. Güneş hücreleri yapısal bakımdan *mono* – tek kristal, *poli* – çok kristal veya *multi-junction* – çok katmanlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca güneş hücreleri teknolojik bakımdan da dört nesil altında incelenebilmektedir.

Birinci nesil güneş hücreleri ilk üretilen silisyum - *silikon* (Si) güneş hücrelerinden oluşmaktadır. Performansları düşük olmasına rağmen üretim kolaylıkları ve nispeten ucuzluğu sebebiyle oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Tek kristal Si güneş hücreleri daha yüksek performanslı iken çok kristalli olanları ise daha düşük maliyetlidir. Kristal silikon saflaştırma ve alttaş üretim işlemleri uygun maliyetli olmadığı için güneş hücreleri içindeki yarıiletken kullanımını azaltarak maliyet düşürme çalışmaları yapılmıştır. Bu girişimler sonucu ikinci nesil güneş hücreleri olan ince film güneş hücre teknolojisi ortaya çıkmıştır. İnce film teknolojisi ile güneş hücrelerinde kullanılan aktif madde önemli miktarda azaltılmaktadır. Bu hücrelerin maliyetleri düşük olmasına rağmen performansları yüksek değildir. İkinci nesil güneş hücrelerinin önde gelenleri kadmilyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum selenit (CIGS) ve amorf silikon (a-Si) güneş hücreleridir (Bailey ve Raffaele, 2003).

Güneş hücreleri üzerinde yapılan ilk araştırmalar; yüzey rekombinasyon hızı, seri direnç, gelen ışığın yansımaları ve ideal olmayan diyot davranışı gibi hücre performansını sınırlayan faktörleri anlamaya ve azaltmaya odaklanmıştır (Bailey ve Raffaele, 2003). İlk güneş hücreleri tasarlandığında teorik olarak Si güneş hücresinin performansı %20, optimum bant aralığına (yaklaşık 1.5 eV) sahip bir güneş hücresinin performansı ise %26 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra genel performansı artırmak için çok katmanlı – *multi junction* (MJ) güneş hücresi kavramı önerilmiştir. Optimize edilmiş üç katmanlı güneş hücresinin teorik performansının %37 olduğu belirtilmiştir. Yeni malzemeler, yeni kavramlar ve nanoyapılar gibi yenilikler kullanan bu yeni güneş hücreleri üçüncü nesil güneş hücreleri olarak adlandırılmaktadır. Nanokristal silikon güneş hücreleri, foto-elektrokimyasal güneş hücreleri, boya duyarlı güneş hücreleri, organik güneş hücreleri, hibrit (organik-inorganik) güneş hücreleri ve çok katmanlı güneş hücreleri bu neslin üyelerindedir (Kouzehkonani, 2014; Selimoğlu, 2013). Henüz tasarım aşamasında olan dördüncü nesil güneş hücreleri ise bitkilerdir. Araştırmacılar bitkilerin yaptığı

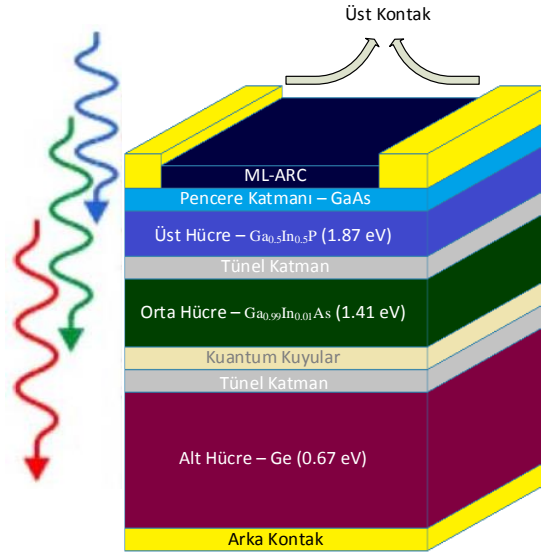
fotosentezden elektrik enerjisi elde ederek bitkileri doğal güneş hücresi olarak kullanılmayı hedeflemektedir (Hubenova ve Mitov, 2012; Boz, 2011)

Uzayda gerekli olan enerji ihtiyacının karşılanması bakımından hafiflik ve performansın önemli olduğu uzay uygulamaları için çok katmanlı güneş hücreleri önemli görülmektedir.

1.1.1. Çok Katmanlı Güneş Hücreleri

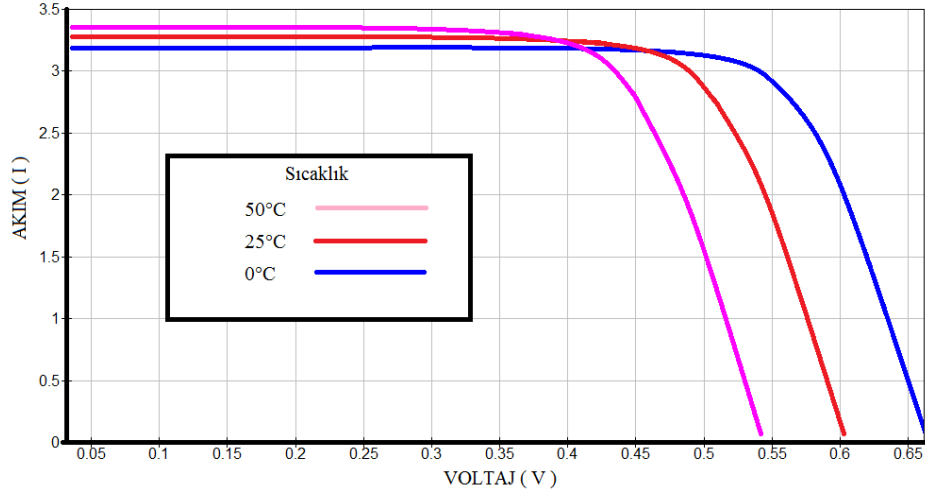
Çok katmanlı güneş hücreleri, genellikle periyodik tablonun III ve V gruplarındaki elementlerin bileşiklerinden oluşan güneş hücreleridir. Bundan dolayı bu hücreler III-V grubu güneş hücreleri olarak da bilinmektedir. Çok katmanlı güneş hücreleri güneş spektrumunun farklı bölgelerine duyarlı farklı güneş hücrelerinin birbiri üzerine eklem haline getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu sayede enerji dönüşümünü sınırlayan yasak enerji aralığı – *band gap* etkisi azaltılarak, güneş spektrumunun etkin bir şekilde kullanılması sağlanmaktadır. Yüksek performanslı olmaları ise farklı III-V grubu yarı iletkenlerin büyütülebilme özelliğinden kaynaklanmaktadır (Philipps, ve ark., 2012).

GaInP, GaInAs ve Ge gibi III-V grubu yarı iletkenleri birbiri üzerine büyütülerek üç katmanlı GaInP/GaInAs/Ge güneş hücresini oluşturmaktadır. Üç alt hücreden oluşan bu güneş hücresi birbirine tünel katmanlarla bağlı bir seridir. Güneş spektrumunun optimum şekilde kullanılması için her bir alt hücre altındaki alt hücreye göre daha yüksek bir bant aralığına sahip olacak şekilde büyütülmektedir (Şekil 1.5). Bu şekilde, her bir alt hücre kendi band aralığına en yakın bir spektral aralıktan ışığı absorbe eder. Bu hücrelerde absorbe edilebilen spektral alan yaklaşık olarak 300-1800 nm dalga boyu aralığıdır (Kaminski, ve ark., 2014; Diederhofen, ve ark., 2012). Geniş spektral alanın absorbe edilmesi sayesinde ısıdan kaynaklı kayıplar azaltılmaktadır (Philipps, ve ark., 2012).



Şekil 1.5. MJ güneş hücresinin yapısının şematik gösterimi

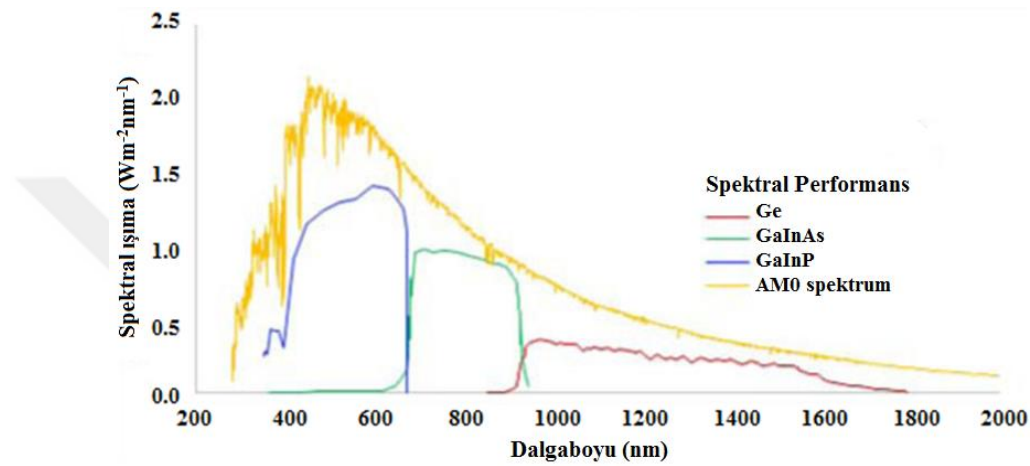
Isıdan kaynaklanan kayıplar, güneş hücrelerinin üzerine düşen ışınımında mevcut olan dalga boylarının tamamını elektrik enerjisine dönüştürememesinden meydana gelmektedir (Jakhar, ve ark., 2016). Güneş hücresinin üzerine elektrik enerjisine dönüştüremediği dalga boylarındaki ışınımın düşmesi ile hücre ısınmaktadır. Sıcaklığın artması ile hücrede kısa devre akımı artmaktadır. Ancak enerji bant aralıklarının sıcaklık artması ile azalmasından dolayı açık devre voltajı da sıcaklık artışı ile azalmaktadır (Sharaf ve Orhan, 2015) (Şekil 1.6). Açık devre voltajının azalma miktarı kısa devre akımının artışına göre çok daha büyük olmasından dolayı güneş hücresinin performansı azalmaktadır. Dolayısıyla performans azalmasının önüne geçmek için soğutma sistemleri kullanılmaktadır (Bahaidarah, ve ark., 2016).



Şekil 1.6. Farklı sıcaklık değerleri için I - V grafiği (Aparicio, ve ark., 2013)

Çok katmanlı güneş hücrelerinin performansını daha da artırmak için araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlar geliştirilmektedir. Bu yaklaşımlardan bazıları; örgü uyumu – *lattice matched*, kuantum kuyular – *quantum well (QW)*, dik metamorfik – *upright metamorphic*, döndürülen metamorfik – *inverted metamorphic*, iki taraflı büyütme – *bifacial growth*, Si'nin üzerinde III-V grubu güneş hücresi yaklaşımı ve üç katmandan daha fazla katmanlı hücrelerdir. Son zamanlarda uzay uygulamalarında örgü uyumu yaklaşımıyla üretilen $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ üç katmanlı güneş hücreleri kullanılmaktadır (Philipps, ve ark., 2012). Bu güneş hücresinde alt hücreler seri bağlandığından toplam akım alt hücrelerden biri tarafından üretilen en düşük akım ile sınırlanır. Dolayısıyla çok katmanlı güneş hücrelerinin tasarımında alt hücrelerin akım uyumu büyük rol oynamaktadır. Bir çok katmanlı güneş hücresinde kullanılan malzemeler neredeyse aynı örgü sabitine – *lattice constant* sahip olmalarına rağmen alt hücrelerin yasak band aralığı enerjileri güneş spektrumunu optimum şekilde bölmemektedir (Şekil 1.7). Bu durum, alt hücrelerin güneş spektrumunu optimum aralıklarla soğurmadığı için akım uyumsuzluğuna ve dolayısıyla performans kaybına neden olmaktadır (Philipps, ve ark., 2012). Söz konusu akım uyumsuzluğunu önleyebilmek için kullanılan yöntemlerden birisi, orta hücrenin band aralığı enerjisini düşürmektir. Fakat band aralığı enerjisinin düşürülmesi ile hücrelerde örgü uyumsuzluğu meydana gelmektedir. Örgü uyumsuzluğunu engelleyebilmek için ise, yapıya çok katmanlı kuantum kuyular (QW) entegre edilmektedir. 1.41 eV'den daha düşük band aralığı enerjisine sahip kuantum kuyuları orta hücrenin daha uzun dalga boylarındaki ışığı soğurma kabiliyetini artırır. Sıradan bir MJ güneş hücresine göre QW MJ güneş

hücresinde açık devre voltajı daha düşük olmasına karşın akım yoğunluğunun artmasından dolayı herhangi bir performans kaybı olmamaktadır. Hatta bazı literatürde güneş hücresinin enerji toplama verimliliğinin %9'a kadar arttığı bile belirtilmektedir (Philipps, ve ark., 2012). Şekil 1.5 QW üç katmanlı hücre yapısının oldukça basit bir gösterimidir. Gerçekte her bir alt hücre n katmanı – *emitter*, p katmanı – *base* ve katkısız katman – *undoped* gibi birçok katmandan oluşurken ön kontak ve yansıma önleyici kaplama ise bu katmanların üstünde bulunmaktadır.



Şekil 1.7. Hücrelerin kuantum verim eğrilerinin AM 0 spektrumunda gösterimi. Foton enerjisi band genişliğini aştığında, spektral etkinlik eğrileri ile spektrum arasındaki alan kuantum verimliliğinin dışında olduğundan dolayı ısı olarak kaybolur (Pritchard, ve ark., 2016).

Literatürde QW MJ güneş hücresinin performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda yapılan şekilsel değişikliklerle kısa devre akımını, açık devre voltajını, dolum faktörünü ve toplam dönüşüm etkinliğini arttırmak amaçlanmaktadır. Bu değişiklikler şönt direnç kayıplarını, rekombinasyon kayıplarını, seri direnç ve optik kayıpları da azaltarak gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte güneş hücrelerinin performansını etkileyen en önemli kayıpların optik kaynaklı olduğu belirtilmektedir (Sharaf ve Orhan, 2015).

1.1.2. Optik Kayıplar

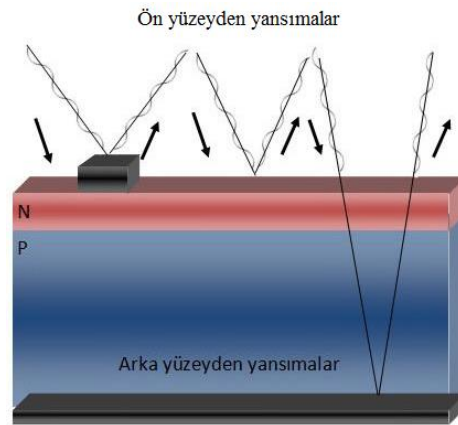
Güneş hücreleri için enerji kayıpları birçok yolla meydana gelmektedir. Bunların başlıcaları atmosferdeki absorbe ve yansıma etkisi yanında geliş açısı etkileridir (Tseng , ve ark., 2011). Işık atmosferden geçerken geliş açısı ile oluşan enerji kayıplarının bağlı olduğu hava kütlesi – *air mass* (AM) denklem 1.3'te gösterilmektedir;

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.3)$$

Burada θ , giriş açısını yani giren ışık ile yüzeyin normali arasındaki açıyı temsil etmektedir. AM değeri arttıkça enerji kaybı daha da artmaktadır. Böylece, θ ne kadar büyükse, o kadar çok enerji kaybı olur. Yeryüzüne ulaşan ışım miktarının ölçüsü AM 1.5 olarak kabul edilmekte ve bu değer 1000 W/m^2 'ye karşılık gelmektedir. Bunun yanında giren ışım miktarının bir kısmı; atmosferdeki toz bulutlarından, nemden, hava moleküllerinden ve ozon tabakasından dolayı geri yansıdığı için bu değer değişim gösterebilmektedir. Uzay ortamında bu tür atmosfer etkileri olmadığından dolayı uzaydaki ışım miktarı AM 0 olarak değerlendirilmekte ve yaklaşık olarak 1367 W/m^2 olarak kabul edilmektedir (Tseng , ve ark., 2011).

Güneş ışının farklı enerji türlerine çevrilme sürecinde de bir takım kayıplar yaşanmaktadır. Güneş hücreleri aracılığıyla elektrik enerjisinin elde edilmesi sürecinde yaşanan optik kayıplar üç şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 1.8) (Chattopadhyay, ve ark., 2010).

- Yarı iletkenler ile hava arasındaki yüksek kırılma indisi farkından dolayı oluşan yansımalar,
- Arka yüzeye kadar ilerleyebilen uzun dalgaboylu ışınların yansımaları,
- Ön kontaklar üzerinden meydana gelen yansımalar.



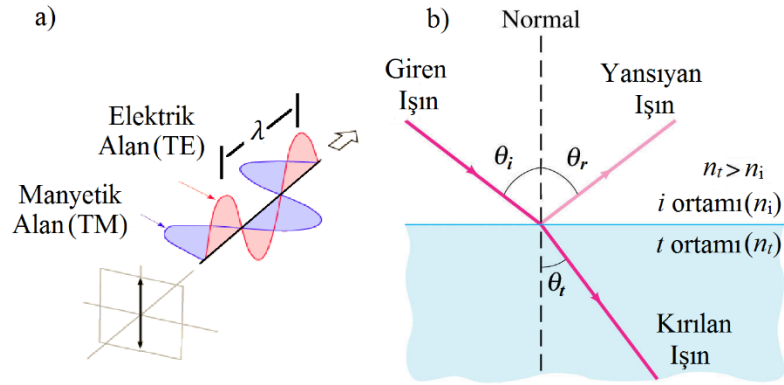
Şekil 1.8. Güneş hücresinde meydana gelen yansımalar (Kouzehkonani, 2014)

Bu yansımalar a ve b maddeleri Fresnel yansımaları olarak adlandırılmaktadır. Yaşanan bu enerji kayıpları Snell yasaları ve Fresnel denklemleri ile analiz edilebilmektedir. Işık, farklı ortamlar aracılığıyla yayıldığından yansıma ve kırılma arasındaki ilişkinin temeli Snell yasasında tanımlanmaktadır (Şekil 1.9).

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.4)$$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1.5)$$

Burada θ_i giriş açısını, θ_r yansıma açısını, θ_t kırılma açısını, n_i i ortamının kırıcılık indisini, n_t ise t ortamının kırıcılık indisini ifade etmektedir.



Şekil 1.9. a) Bir eksen boyunca ilerleyen ışığın elektromanyetik dalga gösterimi, b) Işık dalgasının düzlemsel arayüzdeki yansıması ve kırılması

Fresnel denklemleri ise ışığın bir düzlem yüzeyinden iletilirken veya yansıtılırken enerjisinin değişimini analiz etmek için kullanılmaktadır. Işık, yansıma ve kırılma yasaları tarafından yönetilen bir elektromanyetik dalga olarak kabul edilmektedir. Öncelikle bir elektromanyetik dalga için, düzlemsel iki ortamın arayüzüne gelen bir ışık ışınının durumu tanımlanmalıdır. Yüzeğe gelen ışıkta gözlenen kutuplanma doğrultusu, geliş düzlemine göre tanımlanmaktadır. Bu dalganın doğrultusu geliş düzlemine paralel ise p-kutuplanması – enine manyetik – *transverse magnetic* (TM), geliş düzlemine dik ise s-kutuplanması – enine elektrik – *transverse electric* (TE) olarak ayrılır (Şekil 1.9). Daha sonra yüzeyden yansıyan kısım için Fresnel denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$r_{TE} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (1.6)$$

$$r_{TM} = \frac{-n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (1.7)$$

Burada r_{TE} ve r_{TM} , yansıyan ışığın giren ışığa oranıdır. Bu enerji kayıplarına Fresnel yansıma kayıpları denir. Buna ek olarak, yansıma katsayısı R_{TE} ve R_{TM} olarak tanımlanır;

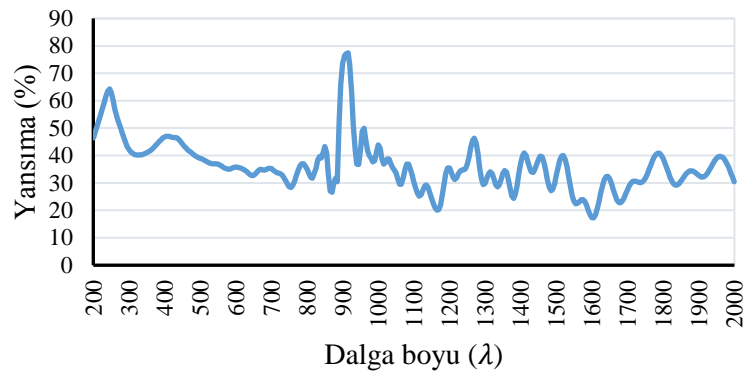
$$R_{TE} = r_{TE}^2 \quad (1.8)$$

$$R_{TM} = r_{TM}^2 \quad (1.9)$$

Güneş ışığının yansıma katsayısı R_G ; R_{TE} ve R_{TM} 'nin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır;

$$R_G = \frac{R_{TE} + R_{TM}}{2} \quad (1.10)$$

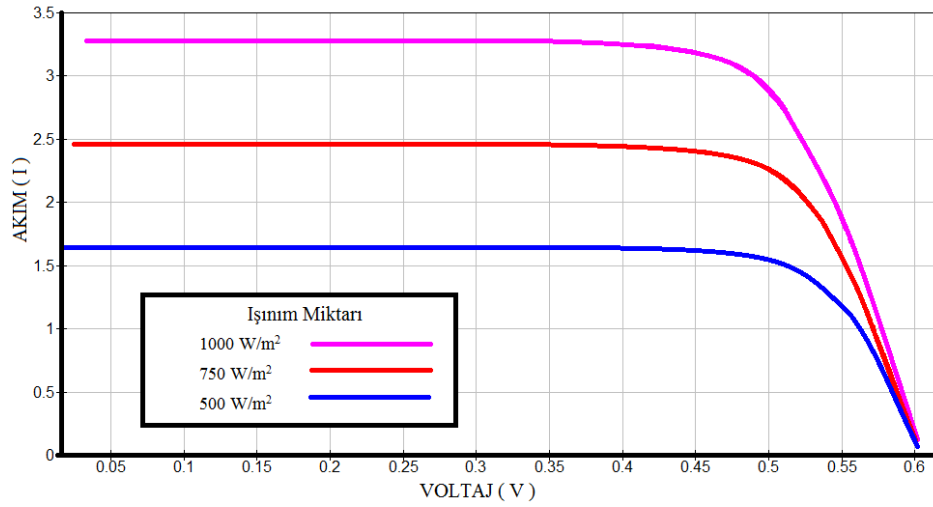
Güneş hücrelerindeki kayıpların ne kadar önemli boyutlarda olabileceğini göstermek için ışığın dalga boylarına göre yüzeyden yansıma miktarlarını gösteren Şekil 1.10 iyi bir örnek teşkil etmektedir. Burada QW MJ güneş hücresinin kontaklarının ve yansıma önleyici kaplamasının yapılmamış hali olan epitaksiyel katmanların yüzey yansıması Perkin Elmer LAMBDA 950 spektrofotometre ile ölçülmüştür. Ayrıca 1.4 ile 1.10 arasındaki denklemlerden yola çıkarak meydana gelen bu yansımaların ışığın giriş açısının artması ile artarak daha fazla enerji kaybına sebep olduğu anlaşılmaktadır (Tseng, ve ark., 2011).



Şekil 1.10. QW MJ epitaksiyel katmanların üzerine düşen ışığın dalga boyuna göre yansıtma grafiği – Fresnel kayıpları

Diğer optik kayıplar ise ön kantağa düşen ışığın yansımaları ve bundan dolayı tükenme (fotoaktif) bölgesinde meydana gelen gölgelenmelerdir (Kouzehkonani, 2014) (Şekil 1.8). Si güneş hücrelerinde arka kontak – *back contact* tekniği kullanarak bu optik kayıplar engellenebilirken, $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ güneş hücresinde çok katmanlı olduğu için doğal olarak böyle bir strateji uygulanamamıştır (Nam, ve ark., 2013). Bu güneş hücresine yönelik optimum performansı elde etmek için ön yüzey alanının %5'i metal kontak ile kaplanmaktadır (Lin, ve ark., 2013). Dolayısıyla kontak ile kaplanan bölgeler enerji dönüşümünü dikkate değer şekilde azaltmaktadır.

Genel olarak bir güneş hücresinde bu optik kayıplar yaklaşık olarak %30-40'tır (Kaminski, ve ark., 2014; Guo, ve ark., 2014). Bu kayıplar sonucu hücreye daha az miktarda ışık girmesinden dolayı yeterince elektron-boşluk çifti oluşamamakta ve kısa devre akımı azalarak optimum güç çıkışı elde edilememektedir. Şekil 1.11'de güneş hücresine giren güneş ışığının azalmasıyla kısa devre akımının azaldığı grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Sabit sıcaklıktaki farklı ışınım miktarlarındaki I-V grafiği (Aparicio, ve ark., 2013)

Optik kayıplar yoluyla meydana gelen performans düşüşünü engellemeye yönelik bir takım teknikler geliştirilmiştir. Sadece ışık enerjisinden elektrik enerjisi üreten güneş hücreleri için oldukça kritik olan bu tekniklerin incelenmesi önemlidir (Sharaf ve Orhan, 2015).

1.1.3. Optik Kayıpları Engelleme Teknikleri

Güneş ışığının büyük bir bölümünün güneş hücresinin yüzeyinden çeşitli yollarla yansiyarak kaybolduğu bilinmektedir (Chattopadhyay, ve ark., 2010). Bu negatif durumu ortadan kaldırmak için, yansıma önleyici kaplamalar, mikro lens dizileri ve yoğunlaştırıcı güneş hücreleri gibi teknolojiler kullanılmaktadır (Keser, ve ark., 2017; Kouzehkonani, 2014). Bu bölümde optik kayıpların en aza indirilmesi ve absorpsiyonun en üst düzeye çıkarılması için yapılan çalışmaların önde gelenleri sunulmaktadır.

1.1.3.1. Yansıma Önleyici Kaplama

Yansıma önleyici kaplama – *anti-reflective coating* (ARC), yıkıcı girişim etkisi yoluyla yüzey yansımasını engellemek için tasarlanan ince bir dielektrik katmandır (Bahrami, ve ark., 2013; Kouzehkonani, 2014). Bu yıkıcı girişim, ortam sınırında kırılma indisinin değiştirilmesi ile meydana gelmektedir (Kaminski, ve ark., 2014). Kırılma indisinin değişmesi gelen ışık dalgası için bir ortam değişikliğidir. Ortam değişikliğinin bir sonucu olarak, iletilen ve yansıyan dalga denklemleri Fresnel katsayıları kullanılarak hesaplanabilir. ARC sisteminde, koherent dalgaların faz farkının sabit kalması koşulu ile

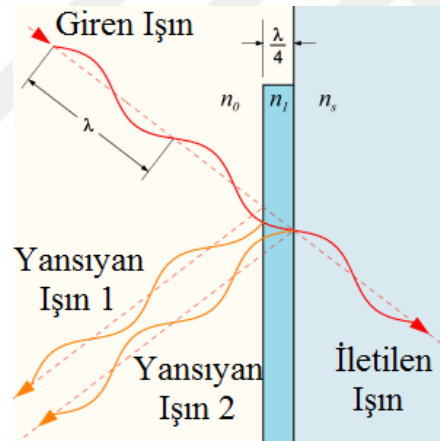
farklı ortamlar arasında yansıtılan dalgalar engellenebilmektedir. İki denk dalga, faz farkına (Δ) bağlı olarak aşağıdaki denklemde tanımlandığı şekilde etkileşmektedir (Kaminski, ve ark., 2014):

$$A = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(\omega t + \Delta) \quad (1.11)$$

Burada; A genlik, ω açısal frekans ve t zamandır. Faz farkı, $\Delta = k\pi$ (k , herhangi bir tam sayıyı ifade eder.) olduğunda, yıkıcı girişim olur ve böylece ışığın genliği minimuma indirilir ($A_1 = A_2$ olduğunda genlik 0'a düşer) (Şekil 1.12). Dalgaların bir ortam vasıtasıyla yayılmasının bir sonucu olarak, faz farkı katman kalınlığının ayarlanması ile kontrol edilebilir. Ortam içerisinde alınan mesafenin bir fonksiyonu olarak faz farkı aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$\Delta = \frac{dc/n}{\lambda} \cdot T \quad (1.12)$$

Burada d alınan mesafe, c vakumdaki ışık hızı, n dalganın yayılım gösterdiği ortamın kırılma indisi, λ dalga boyu ve T dalga periyodudur.



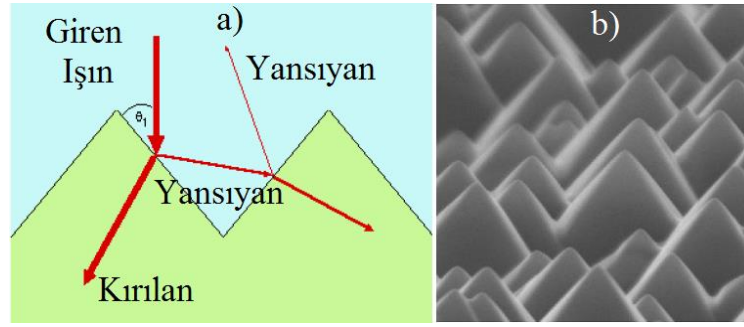
Şekil 1. 12. Faz farkı π rad olan iki denk dalganın yıkıcı girişimi

Genel olarak ARC'ler sabit ve kademeli kırılma indisine sahip tek, çift ve çoklu tabakalardır (Bahrami, ve ark., 2013). Tek katmanlı ARC'de – *single layer anti-reflective coating* (SL-ARC) bu girişim, $\lambda/4$ 'e eşit kalınlıkta bir katmanın oluşturulması ile sağlanmaktadır. Yıkıcı girişim, güneş hücrelerini oluşturan epitaksiyel katman yüzeyinden yansıyan ışık ile ARC kaplama yüzeyinden yansıyan ışık arasında oluşmaktadır. Bu, belirli bir dalga boyu için yansımamın azaltılmasını sağlar. Gelen ışığın belirlenen dalga boyundan büyük veya küçük olduğu durumlarda yansıma hızlı bir şekilde arttığından, bu tür kaplamaya "V" kaplama da denir (Kaminski, ve ark., 2014; Seyhun, 2012).

Çok katmanlı ARC'de – *multi layer anti-reflective coating* (ML-ARC) ise birleşmiş orta sınırlar bulunmaktadır. Bu orta sınırlar sayesinde belirlenen dalga boyu aralığının genişlemesi sağlanarak, yansıma önleyicilik performansı artırılmaktadır (Glaubitt ve Löbmann, 2012). Bu tür geniş bant aralığında yansıma önleyen kaplamalar *broadband* ARC'ler olarak bilinmektedir. Bu ARC'ler aralarındaki kırılma indisi farkı yüksek olacak şekilde büyük ve küçük kırılma indisli malzemeler kullanılarak oluşturulmaktadır (Glaubitt ve Löbmann, 2012; Jung, ve ark., 2011). Bu amaç için kullanılan yüksek kırılma indisine sahip materyaller genellikle zirkonyum dioksit (ZnS), titanyum dioksit (TiO₂), seryum oksit (CeO₂), hafniyum dioksit (HfO₂), titanyum oksit (Ti₃O₅), niobium pentaoksit (Nb₂O₅) ve tantalum pentaoksit (Ta₂O₅)'dir. Düşük kırılma indise sahip olanlar ise magnezyum florür (MgF₂), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve silikon dioksit (SiO₂)'dir (Bahrami, ve ark., 2013; Kaminski, ve ark., 2014; Saylan, ve ark., 2015). Bu tür kaplamalar ile yansıyan ışığın miktarı %1'in altına düşürülebilmektedir (Özen, 2015).

1.1.3.2. Yüzey Şekillendirme

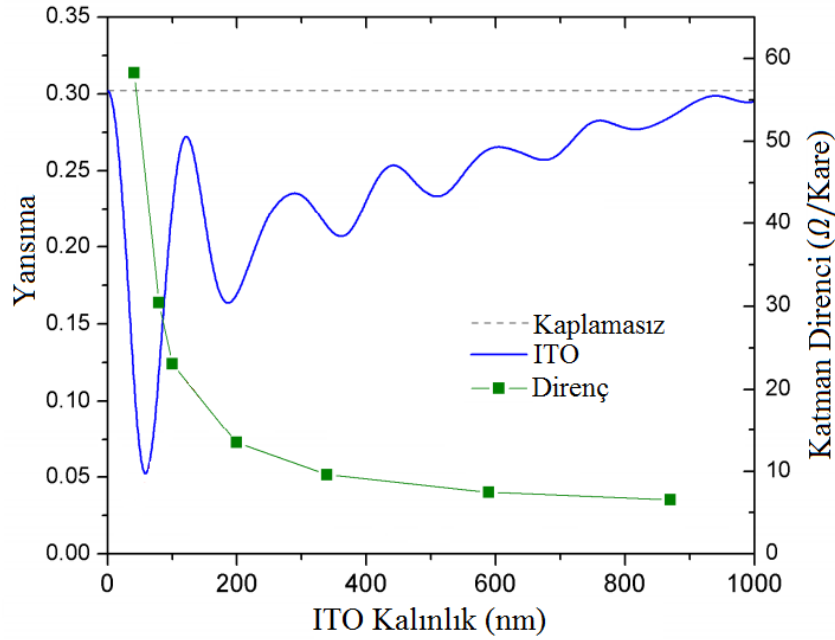
Yüzey şekillendirme – *surface texturing* tekniği, yüzeyden yansıyan ışığın havaya gitmesini engelleyip yüzeye geri dönmesini sağlamak için yüzeyin pürüzlendirilmesi mantığına dayanmaktadır. Bu sayede yansımanın azaltılması hedeflenmektedir. En yaygın yüzey şekillendirmenin, potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) gibi çözeltiler kullanılarak yapılan ıslak aşındırma yöntemi olduğu belirtilmektedir. Genellikle Si güneş hücrelerinde kullanılan bu yöntem, tek kristal güneş hücresinin çözeltiye daldırılması sonucu yüzey anizotropik şekilde aşınmaktadır. Bu aşınma sonrasında yüzey kare tabanlı piramitlerden oluşacak biçimde şekillenmektedir (Şekil 1.13). Piramit yükseklikleri ve taban genişlikleri genellikle birkaç mikron düzeyindedir. Piramit boyutları aşındırma süresine, çözelti sıcaklığına ve çözelti yoğunluğuna bağlı olarak kontrol edilebilmektedir (Al-Turk, 2011). GaInP/GaInAs/Ge güneş hücrelerinde ise bu işlem farklıdır. Öncelikle güneş hücresinin yüzeyi polimer bir katman ile kaplanmaktadır. Daha sonra yüzeyi şekillendirilen kristal Si, kalıp olarak kullanılmak için bu katman üzerine yerleştirilmektedir. Polimer katmana kalıbın şeklini alması için yeterince sıcaklık uygulandıktan sonra kalıp kaldırılmaktadır. İşlem sonunda GaInP/GaInAs/Ge güneş hücresinin yüzeyi şekillendirilmektedir. Yüzey şekillendirme tekniği ile bu güneş hücresinin performansı geleneksel ARC'ye göre %1.7 daha arttığı belirtilmektedir (Han, ve ark., 2013).



Şekil 1.13. a) Yüzeyi şekillendirilmiş silikonun yüzey yansımasının şematik gösterimi, b) Yüzeyi şekillendirilmiş optik mikroskop görüntüsü (Dzhafarov, 2013)

1.1.3.3. Şeffaf İletken Katmanlar

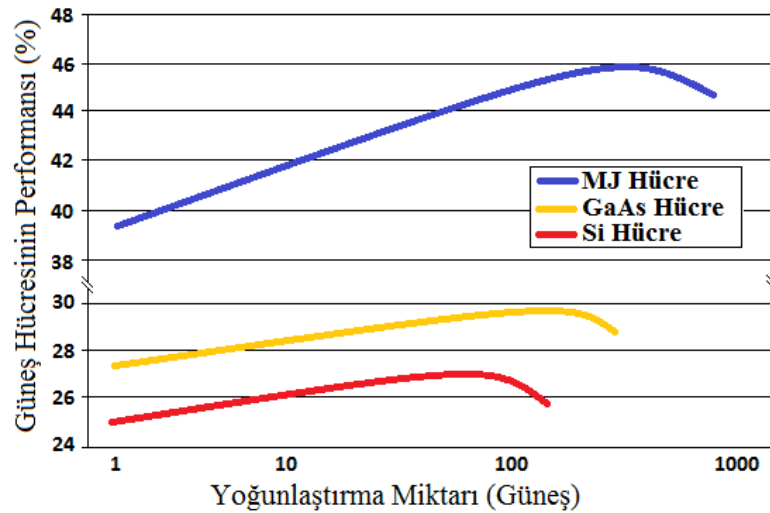
Şeffaf iletken katmanlar – *transparent conductive layers* (TCL), bir güneş hücresinin ön kontaklarının yerini alarak gölgelenmeyi ortadan kaldırma ve yansıma önleyici katmanlar gibi hareket ederek ARC görevi görme potansiyeline sahiptir (Valdivia, ve ark., 2008). Genellikle TCL'ler yüksek optik geçirgenliğe ve düşük elektrik direncine sahip katkılı oksitlerdir. Günümüzde kalay oksit – *tin oxide* (SnO_2), indiyum oksit – *indium oxide* (In_2O_3), indiyum kalay oksit – *indium tin oxide* (ITO) ve çinko oksit – *zinc oxide* (ZnO) gibi şeffaf iletken oksit – *transparent conductive oxide* (TCO) materyalleri geliştirilmektedir. Bunlardan ITO en yaygın kullanılan TCO materyalidir (Valdivia, ve ark., 2008). TCO'lar CdTe, CIGS ve a-Si gibi güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen MJ güneş hücrelerinde kullanımı bir takım etkenlerden dolayı kısıtlanmaktadır. İlk olarak MJ güneş hücreleri için TCO'nun 300-1800 nm dalga boyu aralığında yüksek geçirgenliğe sahip olması gereklidir. Fakat TCO'larda kullanılan malzemelerin kızılötesi bölgede geçirgenliği sınırlıdır. MJ güneş hücresindeki Ge alt hücresinden elde edilen aşırı akım nedeniyle düşük kızılötesi geçirgenliği bir dereceye kadar tolere edilebilmektedir. Ancak akım dengelemesi bakımından geliştirilmiş olan örgü uyumsuz metamorfik – *lattice-mismatched metamorphic* ve kuantum kuyulu – *quantum well* (QW) MJ güneş hücresi tasarımlarında bu tolerans azalmaktadır. Diğer etken ise özellikle Başlık 1.1.3.4'de anlatılan CPV'lerde kullanılan MJ güneş hücrelerinin daha büyük akım üretmelerinden kaynaklı olarak büyük direnç kayıplarının meydana gelmesidir. Bu direnç kayıplarını engellemek için TCO kalınlığını arttırmak mümkündür. Fakat TCO kalınlığının artması sonucunda şeffaflık büyük oranda azalmaktadır. Dolayısıyla TCO'nun direnci ve şeffaflığı arasında bir denge sağlanmalıdır (Şekil 1.14).



Şekil 1.14. MJ güneş hücresine yönelik ITO filmin kalınlığına göre yansımının ve katman direncinin değişimi (Valdivia, ve ark., 2008)

1.1.3.4. Yoğunlaştırıcı Güneş Hücreleri

Kırma, yansımaya veya her ikisini de kullanarak oluşturulan hibrit bir yapıyla güneş hücrelerinin üzerine düşürülen ışık miktarını artıran teknolojilere yoğunlaştırıcı güneş hücreleri – *concentrator solar cell* (CPV) denir. CPV teknolojilerinin mantığı güneş hücresine belirli seviyede yoğunlaştırılmış ışık göndererek performansını artırmaya dayanmaktadır (Sharaf ve Orhan, 2015). Yoğunlaştırılan ışık altında güneş hücrelerinin performansı artma eğilimindedir. Daha yüksek yoğunlaştırma seviyelerinde güneş hücrelerinin içerisindeki kayıp kaynaklarının bazıları sabit kalmakta veya yoğunlaştırma seviyesine göre daha az artmaktadır (Şekil 1.15). Bu optimum noktada maksimum performansın elde edilmesi beklenir. Bu noktadan sonraki yoğunlaştırma seviyelerinde kayıpların artarak performansın azalmasına neden olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yüksek yoğunluktaki ışık güneş hücrelerinin performansını belirli bir optimum seviyeye kadar artırmaktadır. Örneğin MJ güneş hücrelerinin ulaştığı en yüksek performans %38'dir. Aynı güneş hücrelerinin 508 kat yoğunlaştırma yapabilen CPV sistemde kullanılması ile performansları %46'ya ulaşmaktadır (National Renewable Energy Laboratory, 2016).



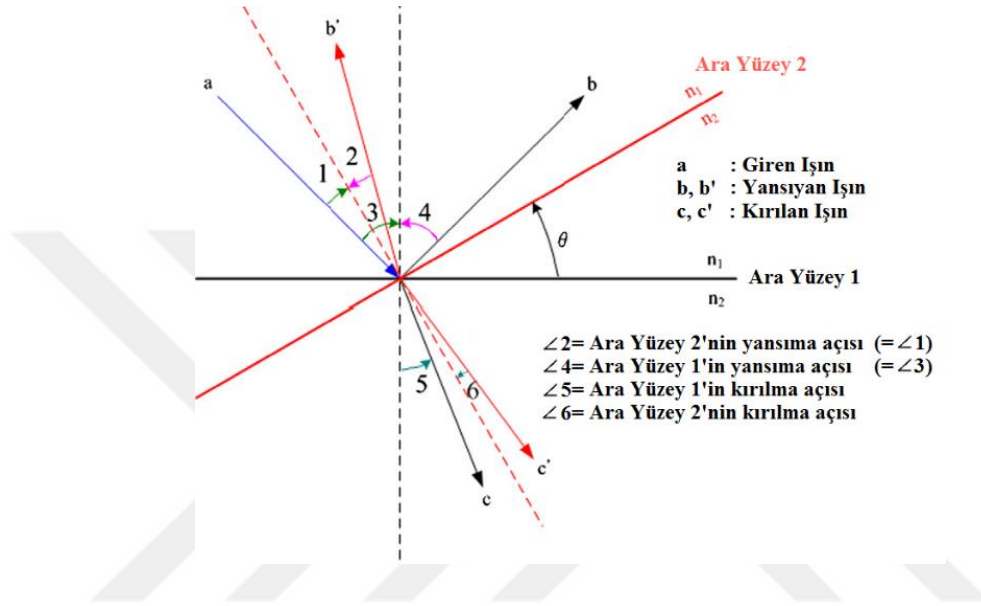
Şekil 1.15. Farklı güneş hücreleri performansının yoğunlaştırma oranına göre değişimi (National Renewable Energy Laboratory, 2016)

CPV, güneş hücresinin performansını iyileştirirken bir takım sorunlar da meydana getirmektedir. CPV sistem çalışırken güneş hücrelerinin ısınarak yüksek sıcaklıklara maruz kalması ve yoğunlaştırıcı optiğin odağının sapması bu sorunların başlıcalarıdır. Yüksek sıcaklıklar güneş hücresinin yapısını bozarak çalışamaz hale gelmesine neden olmaktadır. Güneşin günlük hareketinden dolayı yoğunlaştırıcı optiğin odağı da güneş hücresinin üzerinden saptmaktadır. Bu etkenlerden dolayı CPV'ye uygun soğutma ve takip sisteminin eklenmesi gerekmektedir (Sharaf ve Orhan, 2015). Bu unsurlar CPV'nin kütle ve hacmini artırmakla birlikte CPV'nin daha karmaşık yapıya sahip olmasına ve maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu olumsuz durumların üstesinden gelmek için geleneksel yoğunlaştırıcılardan farklı olan mikro lens dizi yoğunlaştırıcılar – *microlens array concentrator* (MLA – *concentrator*) geliştirilmiştir (Al-Hamdani, 2013). Bu yoğunlaştırıcıların güneş ışığını takip etmek için herhangi bir elektrikli araca ihtiyaç duymamalarının yanında üretimleri de kolaydır. Geleneksel yoğunlaştırıcılara göre ölçülerinin küçük olmasından dolayı hafiflerdir (Al-Hamdani, 2013). Ayrıca mikro yoğunlaştırma yaptıkları için güneş hücreleri daha fazla ısınmamakta ve herhangi bir soğutma sistemine de ihtiyaç duymamaktadırlar (Nam, ve ark., 2013). Bu özellikleri bakımından mikro lens dizi yoğunlaştırıcıların incelenmesi önemlidir.

1.1.3.4.1. Mikro Lens Dizi Yoğunlaştırıcılar

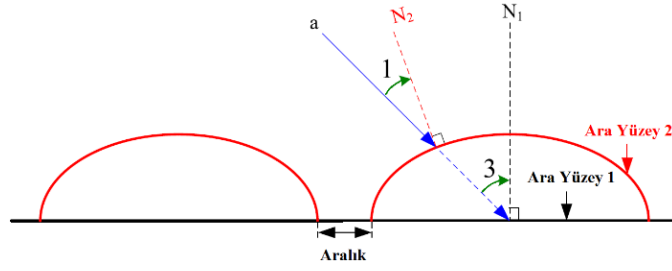
Mikro lensler 1 mm'den küçük genellikle 10 μm civarında çapa sahip olan küçük lenslerdir (ISO 14880-1:2016, 2016). Mikro lens dizilerinin çalışma mantığı, belirli bir

noktadan gelen ışığın güneş hücresine giriş açısını azaltarak yansıma miktarını azaltmaya dayanmaktadır (Tseng , ve ark., 2011). Bu durumu görsel olarak açıklamak gerekirse öncelikle Şekil 1.16'de ışığın n_1 kırılma indisine sahip bir ortamdan n_2 kırılma indisine sahip başka bir ortama geçerken ki davranışı gösterilmektedir. Aynı noktadan gelen ışık için ara yüzey 1, ara yüzey 2 durumuna döndürüldüğünde ise ışığın giriş açısının azaldığı görülmektedir.



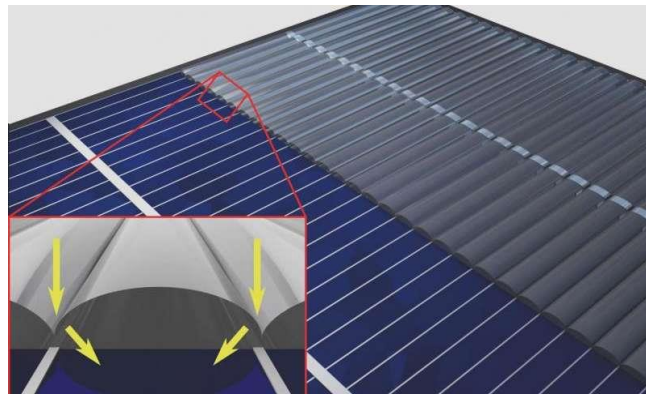
Şekil 1.16. Giriş açısının azaltılmasının gösterimi (Tseng , ve ark., 2011)

Sonuç olarak, Şekil 1.17'de gösterildiği gibi kavisli bir ara yüzey, bu yaklaşıma dayanarak belirlenmektedir. Hava ve lens arasındaki kavisli ara yüzey, lens yüzeydir. Bu lens yüzeyi sayesinde aynı geliş açısı için giriş açısı azaltılmaktadır (Tseng , ve ark., 2011). Bu olaya farklı bir bakış açıdan bakılırsa kavisli lens yüzeyi kullanılarak büyük giriş açılarındaki ışığın güneş hücresine girebildiği görülmektedir. Dolayısıyla bu kavisli lens, Güneş'i takip ederek ışığın güneş hücresine küçük giriş açıları ile girmesini sağlayan takip sistemine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Ek olarak MLA yapısının mikron boyutlarında olması güneş hücresine yok denecek kadar az bir ağırlık getirdiğini göstermektedir (Keser, ve ark., 2017).



Şekil 1.17. Mikro lensin kavisli ara yüzeyinin giriş açısına etkisi (Tseng , ve ark., 2011)

Mikro lens dizilerinin soğurmayı artırma ve takip sistemine olan ihtiyacı azaltma niteliklerinin yanında ışığı belirli bir bölgeye yönlendirme kabiliyetleri de bulunmaktadır. Bu sayede ışığın yansıtıcı özelliğe sahip kontaklar üzerine düşmesi engellenebilmektedir (Nam, ve ark., 2013). Kontaklar üzerine düşerek kaybolan ışığın güneş hücresinin fotoaktif bölgesine yönlendirilerek kullanılabilir hale gelmesi mikro lens dizilerin diğer avantajıdır (Şekil 1.18). Mikro lens dizilerinin elektron-boşluk çiftinin oluşmasını kolaylaştırmak için bir mikro yoğunlaşma etkisi sağlamak ve güneş hücresinin üzerini tamamen örtecek şekilde oluşturulması halinde çevre koşullarından korumak gibi avantajları da bulunmaktadır. Yoğunlaştırma seviyesinin mikron mertebesinde olmasıyla güneş hücresinin sıcaklığı artmamaktadır (Nam, ve ark., 2013). Genel olarak incelendiğinde MLA sayesinde MJ güneş hücresinin performansının %11.19 artabildiği belirtilmektedir (Kang, ve ark., 2015). Yoğunlukla MLA'lar polimer malzemeler kullanılarak fotolitografi yöntemi ile ya da cam malzemeler kullanılarak CNC yöntemiyle üretilmektedir (Xie, ve ark., 2015; Nam, ve ark., 2013).



Şekil 1.18. Mikro lensin ışığı kırarak güneş hücresinin içine yönlendirmesinin gösterimi (Karlsruhe Institute of Technology, 2015)

Optik kayıpları engelleyerek performansı artırmak için kullanılan tekniklerin oldukça çeşitli olduğu görülmektedir. Söz konusu tekniklerin uzay uygulamalarına yönelik kullanımlarını ele almak için öncelikle güneş hücrelerinin uzay tarihinin bilinmesinde fayda görülmektedir.

1.1.4. Güneş Hücreleri ve Uzay

1950'li yılların sonunda tek kristal Si güneş hücresinin yeryüzündeki performansının %14'e ulaşması uzay araçlarında güneş hücrelerinin kullanımının kapısını açmıştır (Bailey ve Raffaella, 2003). 1958'de güneş enerjisi ile çalışan ilk uydu Vanguard I fırlatılmıştır. Vanguard I, 48 adet Si güneş hücresine sahiptir. Bu uydudaki güneş hücreleri ile ilgili verilerin iletilmesi için kullanılan iki ayrı radyo vericisinin akülü olanı sadece 20 gün çalışırken, güneş hücreli olanı ise 1964 yılına kadar çalışmıştır. Uzun süre veri iletimi yapması sayesinde o yıllardaki uydu ömrü bakımından rekor kıran Vanguard I uydusu, güneş hücrelerinin avantajını kanıtlamıştır. İlerleyen günlerde güneş hücrelerinin hafifliği ve performansından etkilenilerek tasarlanan çoğu iletişim uydusu, askeri uydular ve araştırma uyduları gereken enerjiyi güneş hücreleri ile elde etmişlerdir (Bailey ve Raffaella, 2003).

İlk zamanlarda uyduların güç ihtiyacının birkaç watt ile birkaç yüz watt arasında değiştiği bilinmektedir (Bailey ve Raffaella, 2003). Fırlatma maliyetinin ise yaklaşık olarak 10.000 \$/kg gibi yüksek bir değerde olması, güç kaynaklarının güvenilir ve yüksek bir spesifik güce (W/kg) sahip olmasını gerektirmiştir. Bu nedenle bu uyduların güç sisteminin maliyeti, uydunun ve fırlatma maliyetinin küçük bir kısmını oluşturacak şekilde planlanmıştır. O zamanlarda uydulara yönelik güneş hücresi dizilerinin montajı sadece uydu gövdesi üzerine yapıldığı için gövde boyutundan dolayı üretilen güç kısıtlanmaktaydı. Bu nedenle uydularda artan enerji ihtiyacına bağlı olarak güneş hücrelerinin performansını artırmaya yönelik çalışmalar ön plana çıkmıştır.

İletişim uydularının gelişmesine bağlı olarak güç gereksinimleri de artmıştır. Bu nedenle güç ihtiyacını karşılamak için kullanılan güneş hücresi dizilerinin boyutunun artmasına bağlı olarak kütlesi de artmaktaydı. Artan kütle problemini çözmeye yönelik CuS_2/CdS (bakır sülfür/kadmiyum sülfür) farklı katmanlı – *hetero-junction* hücreler gibi ince film güneş hücreleri geliştirilmiştir. Ne yazık ki, bu hücrelerin zamanla deforme olmasının yanında içeriğindeki kadmiyumun (Cd) en zehirli çevre kirleticilerinden birisi olmasından dolayı kullanımı yasaklanmıştır (Lou, ve ark., 2013).

1980'lerde Si, galyum arsenit (GaAs) ve indiyum fosfit (InP) güneş hücreleri için teorik performans ile deneysel performans arasındaki fark neredeyse yok olmuştur. Yeni a-Si ve CIGS ince film güneş hücreleri daha yüksek performanslı, esnek ve hafif olma ihtimalini meydana getirmiştir. Uzay uygulamaları için ince film güneş hücreleri maliyetleri düşüreceği için bugün hala üzerinde yoğun şekilde çalışılan bir araştırma alanıdır. Fakat silikon güneş hücrelerinin daha yüksek performanslı olması ve kararlılığı, uzun yıllar boyunca uydu güç sistemlerinde kullanılmasını sağlamıştır (Bailey ve Raffaele, 2003).

1958'de fırlatılan Explorer I, Van Allen radyasyon kuşaklarını keşfetmiştir. Bu keşif, güneş hücreleri için elektron ve proton radyasyon hasarı gibi yeni kaygılar meydana getirmiştir. 1962'de fırlatılan Telstar'ın ömür başlangıç gücü 14 W'tı. Ancak "Starfish" adındaki yüksek irtifalı nükleer silah testinin neden olduğu yüksek radyasyon Telstar'da kullanılan güneş hücrelerinin güç çıkışı performansını azaltmıştır. Explorer I ve Telstar'dan alınan dersler uzayda kullanılan güneş hücrelerinin radyasyondan korunması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Bailey ve Raffaele, 2003).

1990'lı yıllarda yürütülen araştırmalar daha yüksek performansa sahip olan ve radyasyon ortamına daha toleranslı olan III-V grubu çok katmanlı güneş hücrelerine yönelmiştir. Uydu görevlerinin büyümesi ile uydunun hacmi ve güç gereksinimi artmıştır. Bu nedenle uyduların görevlerine göre güneş hücrelerinin tasarımlarının farklılaştığı görülmektedir. Bu güç ihtiyacını karşılamaya yönelik büyük güneş dizileri kullanabilmek için açılabilir kanatlar şeklinde güneş hücre dizileri tasarlanmıştır. Ancak bu büyük dizilerin kontrolünde ortaya çıkan kütle ve yakıt sorunu daha da performanslı hücreler geliştirilmesini gerektirmiştir (Bailey ve Raffaele, 2003).

1998'de fırlatılan Deep Space 1 uzay aracı, iyon itki motorlarına güç sağlamak için SCARLET yoğunlaştırıcı güneş hücre – *concentrator solar cell* (CPV) dizilerini kullanan ilk uzay aracıydı. CPV dizileri, güneş ışığını daha küçük boyutlardaki güneş hücresine yönlendirmek için kırıcı veya yansıtıcı optikleri kullanmaktadır. Deep Space 1 gibi derin uzay görevlerine sahip uydularda Güneş'ten uzaklaştıkça güneş hücrelerine gelen ışık miktarı azaldığı için güneş hücrelerinin performansı da azalmaktaydı. CPV sayesinde ışığın güneş hücrelerine yoğunlaştırılarak düşürülmesi ile mesafeye bağlı performans azalmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir (Murphy, 2001).

Genel olarak değerlendirildiğinde uzayda kullanılan güneş hücreleri içerisinde en çok tercih edilenlerin III-V grubu çok katmanlı güneş hücreleri olduğu görülmektedir (Kouzehkonani, 2014; Roman, 2004). Bu nedenle çok katmanlı güneş hücrelerinin uzay

uygulamalarında kullanılmasının nedenlerinin ayrıntılı olarak incelenmesinde yarar görülmektedir. Çünkü çok katmanlı güneş hücreleri yüksek güvenilirliğe, mükemmel radyasyon dayanımına ve küçük sıcaklık katsayılarına sahip olmasının yanında yüksek gerilim üretebilme olanağı da sunmaktadır. Uzay uygulamalarında uydunun çalışır durumda tutulmasına ek olarak fırlatma maliyetleri de dikkate alındığından dolayı $\text{£}/W$ yerine $\text{£}/kg$ daha belirleyicidir. Bundan dolayı W/kg oranı yüksek olan MJ güneş hücrelerinin uzay uygulamalarında kullanılmaya ideal hücreler olduğu belirtilmektedir (Philipps, ve ark., 2012).

Uzay ortamının güneş hücrelerinin performansını ve ömrünü olumsuz yönde etkileyecek bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu nedenle uzay ortamı etkilerinin güneş hücrelerinin performansını artırıcı tekniklerin üzerinde belirleyici olduğu söylenebilir. Dolayısıyla güneş hücrelerinin performansını etkileyen bu uzay ortamı etkilerinin bilinmesi önemlidir.

1.2. Uzay Ortamı Etkileri

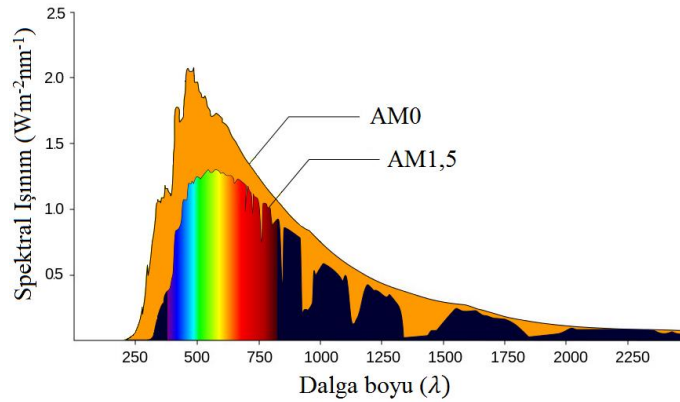
Güneş hücrelerinin uzay araçlarında kullanımı yeryüzü uygulamalarından farklıdır (AIAA, 2005). Öncelikle uzay araçlarında kullanılacak olan tüm sistemlerin hafif ve hacminin az olması beklenmektedir. Çünkü bu sayede uzay aracının fırlatma maliyetinin daha az ve yörüngedeki kontrolünün daha kolay olması sağlanmaktadır. Bunun yanında güneş hücrelerinin performanslarının yüksek ve güç çıkışının sürekli olması beklenmektedir (Keser, ve ark., 2017). Aksi takdirde güneş hücrelerindeki performans kaybı, güç çıkışının istikrarsızlığı ve arıza uzay aracının görevini tamamlayamamasına neden olacaktır. Ayrıca güneş hücreleri güneş ışığından başka yakıtta ihtiyaç duymadığı için performanslarındaki azalmalar ve meydana gelebilecek arızalar yalnızca güneş hücresinin bileşenlerinin bozulması ile sınırlanmaktadır. Bu bozulmalar genel olarak AM 0 ışması, vakum etkisi, uzay ortamındaki radyasyon etkisi, termal döngü etkisi ve atomik oksijen etkisi (ATOX) gibi zararlı uzay ortamı etkenlerinden kaynaklanmaktadır (Myers, ve ark., 2016). Uzay ortamının güneş hücresi üzerindeki olumsuz etkilerinin ve bileşenlerinin bilinmesi performansın artırılmasına yönelik çalışmalar için önemli görülmektedir.

1.2.1. AM 0 Işması

Uzaydaki ışımaya, atmosfer tarafından filtrelenemediği için yeryüzüne düşen ışımadan oldukça farklıdır (Şekil 1.19). Dünya ile Güneş arasındaki mesafe 1

astronomical unit (AU) olarak adlandırılmaktadır. Güneş'ten, 1 AU mesafedeki birim alana dik olarak düşen güneş ışınlarının enerji miktarı güneş sabiti olarak adlandırılmakta ve 1367 W/m^2 değerinde olduğu kabul edilmektedir. Güneş ışığı yoğunluğu zamanla sürekli olarak değişmektedir. Güneş sabitinin değerindeki değişim yörüngedeki güneş hücresinin çalışma sıcaklığının da değişmesine neden olmaktadır (Bailey ve Raffaele, 2003).

Başlık 1.1.2'de belirtildiği gibi uzay ortamındaki ışımaya AM 0 olarak kabul edilmekte ve bu değer güneş sabiti ile aynıdır. Uzayda kullanılması planlanan güneş hücreleri filtrelenmemiş AM 0 ışımaya göre tasarlanmakta ve test edilmektedir. AM 0, yeryüzündeki güneş hücrelerini test etmek için standart olarak belirlenen AM1,5 güneş spektrumunun yaklaşık olarak bir buçuk katıdır. Dolayısıyla uzayda kullanılmak üzere tasarlanan hücreler farklı bir spektrum ile karşılaşmaktadır. Şekil 1.19'da görüldüğü gibi AM 0'da yayılan enerjinin %77'si 300 nm ile 1200 nm arasında bulunmaktadır. AM 0'da ışık yoğunluğu daha yüksek olmasına rağmen güneş hücresinin çalışma sıcaklığını artırarak performansında düşüşe sebep olmaktadır (Bailey ve Raffaele, 2003). Bu ısınma sorunu belirli dalga boylarındaki ışığı geçirgen ya da yansıtan kaplamalar geliştirilerek giderilebilmektedir. Sadece elektrik enerjisine dönüştürülebilen dalga boyu aralığındaki ışığın güneş hücresine girmesi sağlanarak ısınma sorunu nispeten azaltılmaktadır.



Şekil 1.19. AM 0 spektrum ile AM1.5 spektrum gösterimi (Unzicker, 2014)

1.2.2. Vakum Ortamı

Uyduların yeryüzünden uzaklaşması ile üzerine etkiyen basınç miktarı azalmaktadır. Basınç miktarının yüksek seviyelerde azalması sonucu vakum ortamı oluşmaktadır. Örneğin, LEO'da bulunan bir uydu yaklaşık olarak 10^{-7} torr vakuma maruz kalmaktadır (Wernham, 2011). Bu vakuma maruz kalan uydunun içinde ve dışında oluşan

basınç farkı materyallerde baskı meydana getirmektedir. İnsanlı görevlere sahip uydular için oldukça önemli olan bu durum uydularda kullanılan materyallerden gaz çıkışına da – *outgassing* sebep olabilmektedir. Güneş hücreleri bakımından bu gaz çıkışı oldukça önemlidir. Çünkü vakum ortamı, materyallerin içerisinde bulunan uçucu kimyasalların malzemeden çıkararak uzay ortamına karışmasına neden olmaktadır (Anwar, ve ark., 2015). İncelenen deneysel araştırmalarda bu kimyasalların ince kirletici tabaka olarak güneş hücreleri ve optik parçalar gibi hassas yüzeyler üzerine biriktiği görülmektedir. Bu birikme sonucu yüzeye düşen ışığın geçişine yönelik olumsuz bir etki oluşturduğu belirtilmektedir (Keser, ve ark., 2016).

Bu tür olumsuz etkilerin meydana gelmemesi için uydularda kullanılacak materyaller Amerikan Test ve Malzeme Kurumu'nun belirlediği ASTM-E595 veya Avrupa Uzay Standartları Enstitüsü'nün belirlediği ECSS-Q-ST-70-02C standartlarına göre seçilmektedir. Bu standartlara göre malzemeler 125 °C sıcaklıkta ve 7×10^{-3} Pa (5×10^{-5} Torr) vakumda 24 saat boyunca tutularak Toplanan Uçucu Yoğunlaşabilir Malzeme – *Collected Volatile Condensable Material* (CVCMM), Toplam Kütle Kaybı – *Total Mass Loss* (TML) gibi önemli parametreler ölçülmektedir. TML değerinin %1'den ve CVCMM değerinin %0,1'den küçük olması durumunda ölçülen malzemenin uzayda kullanılmaya uygun olduğu söylenebilmektedir (Anwar, ve ark., 2015).

1.2.3. Nötral Ortam

Yeryüzü atmosferinin nötr atmosferik bileşenlerini içeren ve yaklaşık 90 ile 600 km arasında yer alan bölgesi nötr termosfer, 600 km ve üzeri ise ekzosfer olarak bilinir (James ve Norton, 1994). Nötral ortam argon – Ar, moleküler oksijen – O₂, atomik oksijen – O, moleküler azot – N₂, helyum – He ve atomik hidrojen – H'den oluşmaktadır. Bu bileşenlerin yoğunluğu, basıncı ve sıcaklığı irtifaya bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Diğer yandan bu bölgede, nötr gaz parçacıkları esas olarak moleküler ağırlığına dayanarak katmanlaşma eğilimi gösterirler. Atomik oksijen etkisi daha düşük irtifada yoğun iken daha yükseklerde He ve H yoğundur. Nötral ortam 200 km'den daha düşük irtifalarda genellikle atmosferik sürüklenme nedeniyle sabit değildir. 300 km irtifadaki nötral ortam, deniz seviyesindeki moleküler azotun %23'üne ve moleküler oksijenin %10'una sahiptir. Ayrıca 300 km üzerindeki nötral ortamın %80'ini oluşturan bileşenin reaktif atomik oksijen (ATOX) olduğu belirtilmektedir (Bailey ve Raffaele, 2003). ATOX 1000 km'ye kadar oldukça yoğun ve etkilidir. 1000 km üzerindeki

irtifalarda ise nötral ortamın etkileri yok denecek kadar azdır. Nötral ortam bulunduğu irtifadan dolayı LEO yörüngedeki uydular üzerinde etkilidir.

ATOX'un yoğun olduğu irtifalarda bulunan uydular, yörüngelerindeki atmosfere göre 7-8 km/s hızla hareket etmektedir. Bu hızdan dolayı yörüngede bulunan ATOX, uydunun yüzeyine yaklaşık olarak 5 eV'lik bir enerji ile çarpılmaktadır. Bu enerji yüzeydeki materyal ile ATOX'un tepkimeye girmesine neden olmaktadır. ATOX'un güneş hücreleri üzerindeki etkisi güneş hücrelerinde kullanılan gümüş kontaklarının oksitlenerek aşınması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Kontakların aşınması, güneş hücresinden planlanan güç çıkışının elde edilememesine neden olmaktadır. ATOX'un bazı malzemeler üzerindeki etkisi ise aşındırma yerine malzeme yüzeyinde oksit bir tabaka oluşumu şeklinde gözlenebilmektedir. Örneğin silikonun ATOX ile etkileşimi sonucu yüzeyde SiO₂ katmanı meydana gelebilmektedir (Menteş, 2015).

Güneş hücrelerinin ve diğer optik bileşenlerin yüzeylerinde daha fazla ATOX etkisi oluşmaması için ilgili yüzey Al₂O₃, TiO₂ ve Ti₃O₅ gibi oksit tabanlı materyallerle kaplanmaktadır (Pellicori, ve ark., 2014; De Rooij, 2010). Bu yöntem ile yüzey daha fazla oksitlenememekte ve doğal olarak bir korunma sağlanmaktadır.

1.2.4. Radyasyon Ortamı

Uyduların görevleri boyunca maruz kaldığı ortamlardan biri de radyasyon ortamıdır. Uzaydaki radyasyon ortamını oluşturan üç ana radyasyon kaynağı galaktik ve güneş kaynaklı kozmik ışınlar ve Van Allen kuşaklarıdır.

Yıldızlar süpernova sürecine girdiğinde galaksiye tüm atom numaralarında yüksek enerjili (~ 25 MeV - ~ 20 GeV) parçacıklar saçılmaktadır. Galaktik ışımaya neden olan bu parçacıkların yaklaşık %88'i hidrojen, %10'u helyum ve geriye kalan kısmı ise ağır iyonlardan oluşmaktadır. Bu yüksek enerjili parçacıkların güneş sistemine akışı uzayın herhangi bir noktasına her yönden eşit yoğunlukta ulaşacak şekilde yani izotropik şekilde gerçekleşmektedir. Ancak bu parçacıkların galaktik kozmik ışınları Güneş'in doğal 11 yıllık döngüsünden etkilenmektedir. Bu parçacıkların yoğunluğu, güneşin en çok aktif olduğu güneş maksimum – *sun maximum* dönemlerinde güneş rüzgârlarının plazma hacminin artması sonucu düşük enerjili kozmik ışınların sapmasıyla azalmaktadır (Camp ve Tung, 2007). Öyle ki güneş maksimum ve güneş minimum dönemleri arasındaki galaktik kozmik ışınların yoğunluk farkı beş kat kadar büyük olabilmektedir (Copeland, 2012).

Güneş kozmik ışınları ise güneşten sürekli olarak yayılan düşük enerjili güneş rüzgârları parçacıkları ve yüksek enerjili güneş parçacık olayları – *solar particle events* (SPE) olmak üzere iki tür radyasyondan oluşmaktadır. Güneş rüzgârları, Güneş'in üst atmosferinden salınan yüklü parçacıkların akışıdır. Aynı zamanda plazma olan güneş rüzgârları 1,5 ila 10 keV arasında enerjiye sahip elektronlar, protonlar ve alfa parçacıklarından oluşmaktadır (Owens ve Forsyth, 2013). Güneş parçacık olayları temelli radyasyon ise güneş yüzeyindeki bozulan manyetik bölgelerden kaynaklanan taçküre kütle atımının – *coronal mass ejection* bir sonucudur. Taçküre kütle atımı ile oluşan yüksek enerjili parçacıklar uzayın küçük bölgelerini etkileyerek ilerlemektedir. Ancak çok yüksek parçacık yoğunluklarına sahip olduklarından dolayı uzay sistemleri ve mürettebatlı uzay araçları için son derece tehlikeli görülmektedir. Bunun yanında Güneş'in tipik 11 yıllık döngüsünde nispeten aktif olmayan dört yıllık dönemi yedi yıllık artan güneş parçacık olayları dönemi takip etmektedir (Copeland, 2012).

Yerkürenin erimiş demir çekirdeğinin hareketiyle oluşan Dünya'nın manyetik alanı, Dünya çevresinde radyasyon bantları meydana getirmektedir. Van Allen kuşakları olarak adlandırılan bu bantlar güneş kozmik ışınlarını ve düşük enerjili galaktik kozmik ışınlarının iyonize parçacıklarını toplar ve hapsederler. Tipik olarak mürettebatlı uzay araçları için bu bantların etkisi galaktik kozmik ışınlarına ve güneş kozmik ışınlarına göre daha küçüktür (Copeland, 2012).

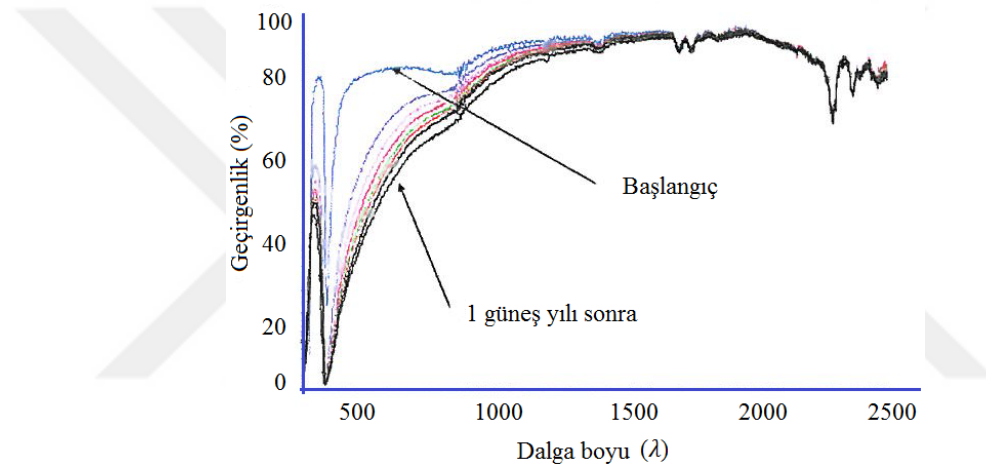
Bu doğal kaynaklar içerdikleri elektron, proton ve iyonlar sayesinde radyasyon ortamının temel bileşenleri olan elektromanyetik ve parçacık radyasyonunu meydana getirmektedir (Bailey ve Raffaella, 2003).

Elektromanyetik radyasyon elektromanyetik dalgalardan oluşmaktadır. Bu dalgalar ise salınan manyetik ve elektrik alanlarından oluşmaktadır. Elektromanyetik dalgalar, çeşitli dalga boylarına, frekanslarına göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma elektromanyetik spektrum olarak bilinmektedir (Cloude, 2003). Bunlara ek olarak elektromanyetik radyasyon, foton adı verilen enerji paketleri özelliği göstermektedir. Enerji taşıyıcıları olarak davranan fotonlar farklı enerji seviyelerine sahip olabilmektedir (Tippens, 1984). Bunlardan eV seviyesinde olanlar morötesi – *ultraviolet* (UV) ışınlar, keV seviyesinde olanlar X ışınları ve MeV seviyesinde olanlar ise gama – *gamma* ışınları olarak adlandırılmaktadır (Drake, 2014). Enerji seviyeleri farklı olan ışınların uydu yüzeyindeki materyallere etkisi farklıdır. Morötesi ve X ışınlarının materyalde absorbe edilmesi sonucunda fotoelektrik olay görülmektedir. Bu olay

materyal üzerine düşen ışının sahip olduğu enerjinin materyaldeki elektron tarafından absorbe edilerek kopması ile meydana gelmektedir.

Fotoelektrik olay sonucu uydunun dış yüzeyinde bir yüklenme oluşabildiği gibi bu yükün daha iç kısımlardaki diğer materyallere aktarılmasıyla uydu alt sistemlerinde oluşabilecek istenmeyen durumlar da ortaya çıkabilmektedir. Elektronik yapıdaki alt sistemlerde istenmeyen durumların yüksek enerjili gama ışınlarından kaynaklandığı bilinmektedir.

Morötesi ışınlar ise uydu yüzeylerindeki organik polimerlere etkiyerek yüzey bozulmasına da yol açabilirler. Bu yüzey bozulması sonucunda güneş hücresinin üzerindeki optik materyalin geçirgenliği değişmektedir (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Vakumda UV testi sırasında güneş hücresi üzerindeki optik materyalin geçirgenliğindeki değişim (Wernham, 2011)

Uzay ortamındaki parçacık radyasyonu ise yüksek enerjili elektron ve proton parçacıklarından oluşmaktadır. Elektronlar, ark oluşturma potansiyeline sahip bir elektrostatik yüklemeye sebep olabilirken, protonlar uydu yüzeyindeki materyallerin bozulmasına neden olabilmektedir. Bu bozulmalar, güneş hücrelerinin üzerindeki optik materyallerde renk merkezleri ya da f merkezleri oluşturarak kararmalar meydana getirmektedir. F merkezleri, MJ güneş hücrelerindeki üst hücrenin elektrik enerjisine dönüştürebildiği dalga boylarına kadar uzanan kısa dalga boylu ışıkları absorbe eden bantlar olarak tanımlanmaktadır (Pellicori, ve ark., 2014). Bu olaylar, güneş hücresinin performansında kayıplara neden olmaktadır.

Radyasyon ortamından kaynaklanan kararmalara karşı koruyucu kaplamalar geliştirilmektedir. Bu kaplamalar güneş hücrelerinin yüzeyine kaplanarak zararlı UV

ışığın yansımısını sağlarken diğer taraftan parçacık radyasyonuna karşı da koruma sağlamaktadır. Kaplamalar için genellikle Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 ve seryum oksit (CeO_2) gibi materyaller kullanılmaktadır (Pellicori, ve ark., 2014; Iles, 2001). Dolayısıyla bu tür materyaller ile oluşturulan yansımaya önleyici kaplamalar sayesinde uzay uygulamalarında kullanılması hedeflenen güneş hücresi korunabilmektedir.

1.2.5. Parçacık Ortamı

Parçacık ortamı, hem doğal yollardan meydana gelen göktaşlarından hem de insan kaynaklı uzay çöplerinden oluşmaktadır. Uydu platformları için özellikle dikkat edilen parçacıklar 10^{-3} ve 10^{-6} gram arasındadır. Çünkü uzay ortamında 10^{-3} gramın üzerindeki parçalara daha az rastlanırken, 10^{-6} gramın altında olanlar da önemli hasara neden olacak kadar yeterli enerjiye sahip değildir. Asteroidlerden veya kuyruklu yıldızlardan oluşan göktaşları ortalama olarak 20 km/s hıza sahiptir. Göktaşlarının uzay ortamındaki yoğunluğu Dünya'nın Güneş etrafındaki pozisyonu ile değişmektedir. Uzay çöpleri ise fırlatılan uzay aracı sayısı ve bunların yörüngedeki görev sürelerinin artması sonucu önemli bir problem haline gelmiştir. Ancak yörüngede oluşan çöpler ile yörünge hızı arasındaki fark azaldığı için uzay çöplerinin hasarı nispeten daha azdır. Göktaşları ve uzay çöplerinin uyduların üzerindeki güneş hücrelerine zarar verdiği belirtilmektedir. Bu zararlar güneş hücreleri üzerindeki optik malzemenin aşınması ve parçalanması olarak gözlenmektedir (Bailey ve Raffaella, 2003). Güneş hücresinin performansını olumsuz yönde etkileyen bu faktörler radyasyon ortamı etkilerinden korunmak için kullanılan kaplamalar sayesinde giderilmektedir (Pellicori, ve ark., 2014).

1.2.6. Termal Ortam

Uzaydaki bir güneş hücresinin sıcaklığı, büyük ölçüde aydınlatma yoğunluğuna ve süresine göre değişmektedir. Örneğin; LEO'da görev yapan Uluslararası Uzay İstasyonunun – *International Space Station* (ISS) üzerindeki Si güneş hücrelerinin çalışma sıcaklıkları, aydınlık bölgede $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar yüksek seviyelere çıkmakta iken karanlık bölgede $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ seviyelerine kadar düşmektedir. Bu sıcaklık değişiminin periyodu uydunun bulunduğu yörüngeye göre değişmektedir. ISS yörüngesini bir günde yaklaşık olarak 16 kere tamamlamaktadır. Yani güneş hücreleri bir yılda yaklaşık olarak 5800 kere bu sıcaklık değişimine maruz kalmaktadır. Benzer şekilde uzay aracının Güneş'ten uzaklaşmasıyla ortalama güneş hücresi sıcaklığı düşerken Güneş'e yaklaştıkça da artmaktadır. Bu durum aydınlık bölgedeki ortalama güneş hücresi sıcaklığının Jüpiter'in

yörüngesinde -125 °C, Merkür'ün yörüngesinde ise 140 °C olması ile açıklanmaktadır. Dolayısıyla uydunun yörünge özellikleri güneş hücreleri için önemli bir termal değişim kaynağıdır. Ayrıca bir gezegenin ya da Dünya'nın albedo etkisinden dolayı uzay aracının yörüngede izlediği yol da güneş hücresinin sıcaklığını etkilemektedir. Çünkü Dünya'nın ortalama albedosu 0,34 olmasına rağmen bu değer ormanlık alanlar üzerinde 0,03'e inerken bulutların üstünde 0,8'e çıkabilmektedir (Bailey ve Raffaele, 2003). Bu bakımdan güneş hücrelerinde kullanılacak olan materyallerin bu sıcaklık etkenlerine karşı dayanıklı olması gereklidir.

Güneş hücresi tarafından üretilen gücün çalışma sıcaklığına bağlı olarak değiştiği Başlık 1.1.1'de detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Uzay uygulamalarında bu performanstaki değişim sıcaklık katsayıları ile açıklanmaktadır. Bu katsayılar güneş hücresini tanımlayan I_{SC} , V_{OC} ve P_{mpp} gibi parametrelerin değerlerindeki değişime dayanmaktadır. Ölçümler sonucu parametre değerlerindeki fark katsayıyı belirlemek için kullanılmaktadır. Uzayda kullanılan çoğu güneş hücrelerinin güç çıkışındaki değişim 100 °C ile -100 °C sıcaklıklar arasında doğrusaldır (Bailey ve Raffaele, 2003).

1.2.7. Uzay Kalifiye Güneş Hücreleri

Uzay araçlarında kullanılması hedeflenen güneş hücrelerinin uzay ortamı etkilerine karşı dayanıklı olması beklenmektedir. Örneğin, uzay araçları fırlatıldıktan sonra güneş hücrelerinde meydana gelen bir arızanın giderilmesi önemli problemlerden birisidir. Dolayısıyla güneş hücrelerinin uzay ortamındaki davranışları hakkında fırlatmadan önce bilgi sahibi olmak için bu uzay ortamı etkileri mümkün olduğunca yeryüzünde oluşturularak güneş hücreleri test edilmektedir. Yapılan test çalışmalarında tüm uzay ortamı etkileri eş zamanlı olarak oluşturulamadığı için güneş hücreleri tüm testlerden tek tek geçmiş olsa bile fırlatma ve bu etkilerin hepsinin bulunduğu uzay ortamı sürecinde bir takım olumsuz sonuçlar alınabildiği görülmüştür (Murphy, 2001; Guidice, ve ark., 1997). Bu nedenle son zamanlarda bu testler, Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS) üzerinde Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi – National Aeronautics and Space Administration (NASA) tarafından yürütülen Materials International Space Station Experiment – MISSE programı sayesinde doğrudan uzayda da yapılabilmektedir (Myers, ve ark., 2016).

Güneş hücrelerinin üzerinde Amerikan Havacılık ve Uzay Bilimleri Enstitüsü – *The American Institute of Aeronautics and Astronautics* (AIAA) tarafından Uzay Güneş Hücreleri için Kalifikasyon ve Kalite Gereklilikleri (AIAA S-111A-201X) standartları

sunulmuştur (AIAA, 2005). Bu standartlara göre güneş hücreleri; nem testi, elektron ve proton radyasyon testi, bükme testi, kırılma yükü testi, farklı sıcaklıklarda *I-V* testleri, termal döngü sonrası *I-V* testleri, kuantum verimliliği testi, karanlık *I-V* testleri, kapasitans testi, elektrostatik deşarj testi, ATOX testi ve hızlandırılmış ömür testi gibi testlerden geçmeli ve başarılı olmalıdır. Bu testlerde başarılı olan güneş hücreleri uzay kalifiye güneş hücreleri olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca yapılan literatür incelemesinde The American Institute of Aeronautics and Astronautics tarafından kabul edilen ve gerekli görülen benzer yapıdaki yeterlilik testleri Çizelge 1’de sunulmuştur (AIAA, 2005).

Çizelge 1.1. Güneş hücrelerinin uzay kalifikasyon sürecinde kullanılan bazı testler ve detayları

Testler		Test İşlemleri	Beklenen Sonuçlar
Nem testi		Hücre 60 gün boyunca 45 °C’de %95 ±5 bağıl neme maruz bırakılır.	Test sonrası P_{mpp} en fazla %3 azalmalıdır.
Radyasyon Testleri	Elektron	Hücre farklı parçacık yoğunluğunda farklı enerjilerde elektronlara maruz bırakılır. Örn. (1×10^{16} 1 MeV)	Seçilen yoğunluk ve enerjili elektronlara maruz bırakıldıktan sonra P_{mpp} ’deki azalma aralığı en az %5 olmalıdır.
	Proton	Hücre farklı parçacık yoğunluğunda farklı enerjilerde protonlara maruz bırakılır. Örn. (1×10^{13} 3 MeV)	Seçilen yoğunluk ve enerjili elektronlara maruz bırakıldıktan sonra P_{mpp} ’deki azalma aralığı en az %5, en fazla %40 olmalıdır.
Mekanik Testler	Bükme	Hücre 1500 mm yarıçaplı ve azalan yarıçaplı silindir üzerine bükülür.	En az 10 kere tekrarlanan bükme işlemleri sonrasında ilk kırılma yarıçapı belirlenir.
	Kırılma yükü	Hücreye en az 0,1 Newtonluk kademelerle yük bindirilir.	Hücresinin kırıldığı en yüksek ve en düşük yük belirlenir.
Sıcaklık Testi		Hücre 20 °C adımlarla -150 °C ve +150 °C arasında sıcaklıklara maruz bırakılır. Radyasyon testi tekrarlanır.	Her sıcaklık ve maruz bırakılan radyasyon değeri için <i>I-V</i> grafiği oluşturulur.
Ömür Testi		Hücrelerin 50 °C, 80°C ve 110°C’lerde ortalama ilk bozulma süresi ve zaman içinde bozulma araştırılır.	Beklenen ortalama ilk bozulma süresi ve zaman içerisindeki bozulmalar tespit edilir.

Tüm bunlara ilave olarak uzayda kullanılan güneş hücreleri için dikkate alınması gereken bir diğer faktör ise güneş ışığının güneş hücresine giriş açısıdır. Güneş’ten çıkan ışınlar Dünya’nın eksen eğikliğinden kaynaklı olarak farklı yörüngedeki uyduların üzerine yıl boyunca farklı açılarda gelmektedir. Örneğin, yıl içerisinde GEO yörüngede bulunan bir uydu yüzeyine gelen ışığın beta yönündeki giriş açısı $\pm 24^\circ$ değişirken diğer yandan LEO yörüngede bulunan bir uydu için $\pm 50^\circ$ değişmektedir (O’Neill, ve ark., 2015; Piszczor, ve ark., 2006). Bu durum hem kosinüs etkisine hem de fresnel denklemlerine dayalı olarak güneş hücrelerinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bu olay yüksek performanslı CPV teknolojilerini daha çok etkilemektedir. Çünkü

yoğunlaştırıcı optik üzerine düşen ışığın giriş açısı az miktarda değiştiğinde odak noktası güneş hücresi üzerinden sapmakta ve beklenen güç üretilememektedir (Murphy, 2001). Bu olumsuz durumun üstesinden gelmek için takip sistemleri kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler jiroskoplara ya da step motorlara sahip olduklarından dolayı uyduda daha ağır ve kompleks bir yapıya sebep olmaktadır. Bu bakımdan güneş ışığının güneş hücrelerine giriş açısı değişim miktarını azaltan ya da engelleyen hafif teknolojilerin güneş hücrelerinin optimum performansta çalışması için oldukça önemli olduğu belirtilmektedir (Keser, ve ark., 2017).

1.3. Literatür Araştırması

Günümüzde uzay araçlarının hedeflenen ömrünün 3 ile 15 yıl arasında değiştiği düşünülürse güneş hücrelerinin bu süreçte yüksek performanslı olması ve istikrarlı güç çıkışının sağlanması için performansa etkiyen faktörlerin yanında uzay ortamına dayanıklı olmaları da gerekmektedir. Fakat CPV'ler yeryüzü uygulamalarında en yüksek performansa sahip olmalarına rağmen aynı durum uzay uygulamaları için geçerli değildir. Çünkü uzay uygulamalarındaki hacim ve kütle kısıtlaması CPV'nin optik yapısını ve yardımcı sistemlerinin kullanımını sınırlamaktadır. Bu durum doğal olarak CPV'nin performans artışını da sınırlandırmaktadır. Başlık 1.1.3.4'te yeryüzü uygulamalarında 500 kata kadar yoğunlaştırma yapabilen CPV'lerin, uzay uygulamaları için bu sınırlılıklardan dolayı çok daha düşük yoğunlaştırma seviyelerinde tasarlandığı görülmektedir. Örneğin uzay uygulamaları için tasarlanan bir CPV'nin 4.2 kat yoğunlaştırma yaptığı ve buna bağlı olarak güneş hücresinin performansının %4 arttığı belirtilmektedir (O'Neill, ve ark., 2015). Ayrıca CPV'ler beraberinde takip ve soğutma sistemine ihtiyaç duymaktadır (Sharaf ve Orhan, 2015). Uyduların enerji ihtiyacını karşılamak için yapılan çalışmalar incelendiğinde alan sınırlılığı, takip ve soğutma sistemlerinin toplam kütle üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı farklı yöntemlerin geliştirilmesi ve denenmesi gerektiği belirtilmektedir (Aydın, 2010; Baş, ve ark., 2012; Cihan, 2011).

Uzay uygulamaları için ağırlık, alan ve performans incelemesi yapıldığında yansımaya önleyici kaplamalar, yüzey şekillendirme teknikleri, şeffaf iletken katmanlar ve mikro lens dizileri ön plana çıkmaktadır (Sharaf ve Orhan, 2015; Reuna, 2016; Spinelli, 2013; Tseng , ve ark., 2011). Yansımaya önleyici kaplamaların uzay uygulamaları için oldukça önemli olduğu görülmektedir. Çünkü uzay ortamına dayanıklı üretilen bir yansımaya önleyici kaplama ile sadece güneş hücresinin değil uzay ortamına dayanıksız

olan polimer yapıdaki lenslerin de korunabileceği belirtilmektedir (Pellicori, ve ark., 2014; De Rooij, 2010).

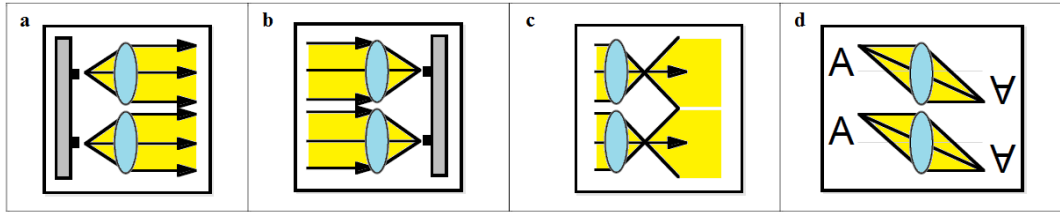
Yansıma önleyici tekniklere yönelik çalışmalar dikkate alınarak polimer malzemeler ile gerçekleştirilen yüzey şekillendirme işlemi ve mikro lens dizileri arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa mikro lens dizilerinin MJ güneş hücresinin performansına katkısının daha büyük olduğu görülmektedir (Pritchard, ve ark., 2016).

Şeffaf iletken katmanlar ele alındığında ise güneş hücreleri için yaygın olarak kullanılan ITO'nun uzay ortamına dayanıklı olmadığı belirtilmektedir (Pellicori, ve ark., 2014). MJ güneş hücrelerinde şeffaf iletken katmanların kullanımı değerlendirildiğinde ise oldukça önemli olan geçirgenlik sorunuyla karşılaşılmaktadır.

Sürekli hareket eden uydu platformları açısından değerlendirildiğinde yansıma önleyici kaplamaların, yüzey şekillendirme teknolojilerinin ve şeffaf iletken katmanların yüksek performans elde etmek için takip sistemine ihtiyaç duydukları tespit edilmiştir. Buna karşın mikro lens dizileri kavisli yapısıyla hücreye eğik açılarda gelen ışığı hücre içine iletebildiğinden takip sistemine ihtiyaç duymamaktadır (Pritchard, ve ark., 2016). Buna ek olarak mikro lens dizilerinin ışığı kırma becerisi sayesinde kontaklardan kaynaklanan yansıma etkileri de engellenmektedir. Ayrıca mikro yoğunlaştırma yapıldığı için fazladan soğutma sistemine de ihtiyaç duyulmamaktadır (Nam, ve ark., 2013). Diğer yandan mikro lens dizisinin yüzeyine kaplanan yansıma önleyici kaplama ile oluşturulan hibrit yapı sayesinde ışık geçirme verimliliği daha da artırılabilir (Paivanranta, ve ark., 2008). Ayrıca uzay ortamına dayanıklı yani uzay kalifiye bir şekilde tasarlanacak yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerin dikkate değer bir potansiyel içerdiği vurgulanmaktadır (Pritchard, ve ark., 2016). Yukarıdaki incelemeye göre mikro lens dizilerinin uzay uygulamalarındaki güneş hücreleri için birçok yönden avantajlı olduğu görülmektedir. Bu bakımdan güneş hücrelerine yönelik gerçekleştirilen mikro lens dizi çalışmalarının incelenmesi oldukça önemlidir.

Güneş hücrelerinin üzerine ışığı toplamak için kullanılan mikro lens dizileri yeni bir konsept değildir. Mikro lens dizileri uzun zamandan beri ışığı paralelleştirme veya odaklama işlemlerinin yanında aydınlatma ve görüntüleme işlemleri için kullanılmaktadır (Şekil 1.21) (Nussbaum, ve ark., 1997). Mikro lens dizilerinin güneş hücrelerinde kullanımı bu uygulamalara nispeten daha yenidir. Bilimsel bir alandaki herhangi bir araştırmada olduğu gibi ilgili konunun iyileştirme ihtiyacına yönelik bir fikir edinmek için geçmiş araştırmalara göz atmak önemlidir. Ancak konunun daha iyi anlaşılması

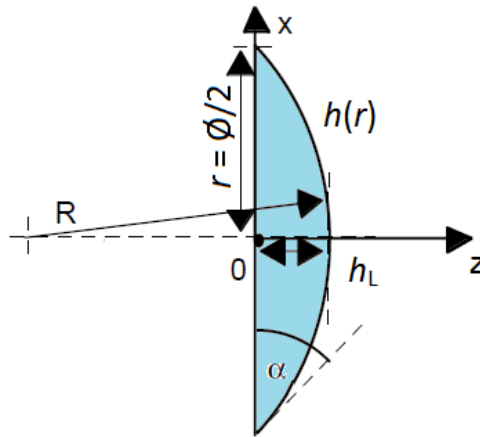
açısından öncelikle mikro lens dizilerinin fiziksel ve optik özellikleri kısaca açıklanmaktadır.



Şekil 1.21. Mikro lens dizileri ile gerçekleştirilen a) paralelleştirme, b) odaklama, c) aydınlatma ve d) görüntüleme işlemlerinin grafiksel gösterimi (Nussbaum, ve ark., 1997)

1.3.1. Mikro Lens Dizilerinin Karakteristik Özellikleri

Mikro lens dizileri çok farklı şekillerde karşımıza çıkmasına rağmen çalışmalarda yaygın olarak kullanılan plano-konveks –*plano-convex* şeklindeki mikro lensler olduğu görülmektedir. Bu bakımdan mikro lens dizilerinin özellikleri bu tip mikro lensler üzerinden anlatılmaktadır. Plano-konveks mikro lens bir tarafı düzlem öbür tarafı dışbükey olan ince kenarlı mercek şeklindedir (Şekil 1.22). Bu mikro lens eğrilik yarıçapı (R), lens çapı (\emptyset), tepe noktasındaki yükseklik (h_L), kırıcılık indisi (n_L), temas açısı (α), dolum faktörü (FF_{MLA}) ve kabul açısı (β) gibi parametreler ile tanımlanmaktadır (Vessey, 2015; Nussbaum, ve ark., 1997).



Şekil 1.22. Bir plano-konveks lensin şematik olarak gösterimi (Nussbaum, ve ark., 1997)

Öncelikle bir eksen boyunca simetrik olan bir plano-konveks lensin lens profili $h(r)$, genel olarak aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır.

$$h(r) = \frac{1}{R} \frac{r^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)r^2/R^2}} + \text{yüksek dereceli terimler} \quad (1.13)$$

Burada h , r 'den optik eksene olan mesafenin bir fonksiyonu olarak lensin yüksekliğidir. R , tepe noktasındaki eğrilik yarıçapı ve K asferiklik sabitidir. Lens profili $h(r)$, küresel ($K = 0$), eliptik ($-1 < K < 0$ veya $K > 0$), parabolik ($K = -1$), hiperbolik ($K < -1$) veya daha karmaşık olabilmektedir. Tepe noktasındaki eğrilik yarıçapı aşağıda verilmektedir.

$$R = (K + 1) \frac{h_L}{2} + \frac{r^2}{2h_L} \quad (1.14)$$

Burada h_L tepe noktasının yüksekliğidir. Bir plano-konveks kırıcı lensin tepe odak uzaklığı (f) aşağıdaki denklemde verilmektedir.

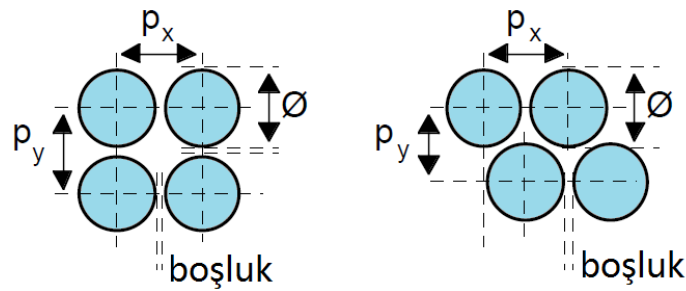
$$f = \frac{R}{n(\lambda)-1} = \frac{h_L+r^2/h_L}{2(n(\lambda)-1)} \quad (1.15)$$

Burada n kırıcılık indisi ve λ dalga boyudur. Dolayısıyla bir madde içerisinde ışık hızının dalga boyuna göre değişmesine bağlı olarak odak uzaklığı da değişmektedir. Küresel bir plano-konveks lens ($K=0$) sınırındaki temas açısı, aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir.

$$\sin \alpha = \frac{r}{R} = \frac{r}{f(n-1)} \quad (1.16)$$

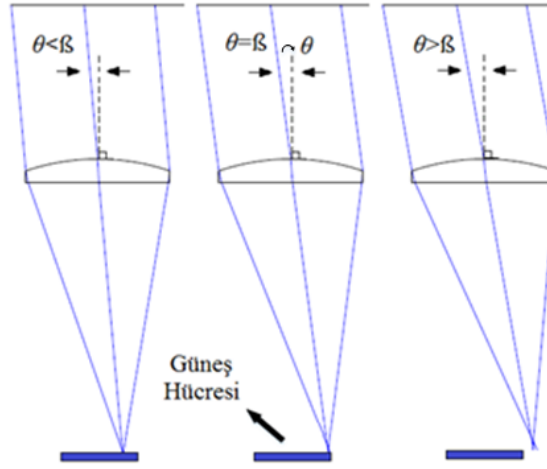
Bir mikro lensin kapladığı alanın birim yüzey alanına oranı mikro lenslerin dolum faktörü FF_{MLA} olarak adlandırılmaktadır. FF_{MLA} denklem 2.5'teki gibi elde edilmektedir. Lensler arasındaki boşluk ise $\emptyset - p_x$ ya da $\emptyset - p_y$ ile bulunmaktadır. Şekil 1.23'de mikro lenslerin dikdörtgen ve altıgen diziler halinde dizilişleri gösterilmektedir.

$$FF_{MLA} = \frac{r^2 \pi}{p_x p_y} \quad (1.17)$$



Şekil 1.23. Mikro lens dizisinin dizilişlerinin gösterimi (Nussbaum, ve ark., 1997)

Kabul açısı β , gelen güneş ışığının mikro lens tarafından yakalanabileceği maksimum açıdır. Işığı iki boyutta kıran mikro lensler için kabul açısı, iki farklı yönde ve farklı değerlerde olabilmektedir. Mikro lenslerden kabul açısının büyük olması beklenmektedir.

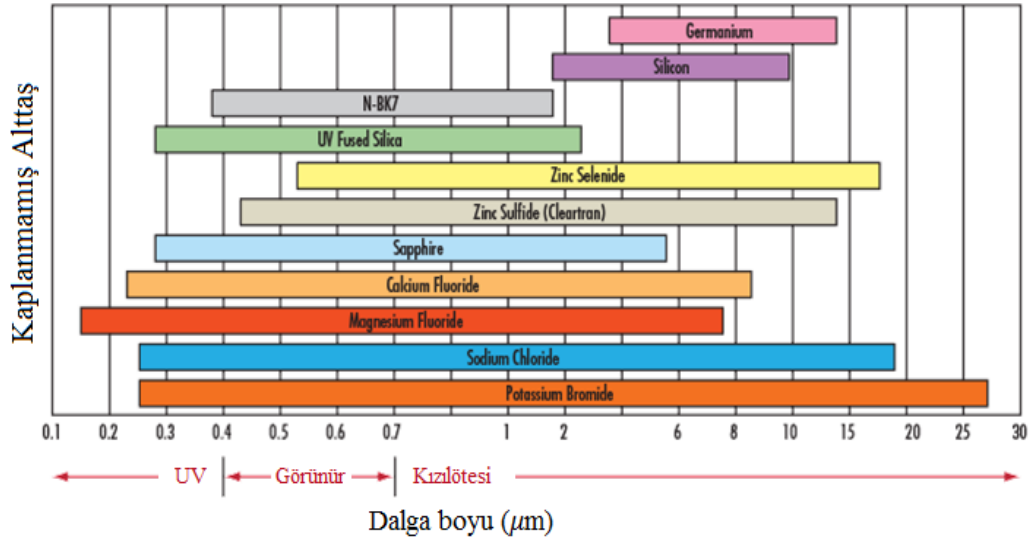


Şekil 1.24. Kabul açısı etkisinin şematik gösterimi

Kabul açısı etkisi Şekil 1.24'te şematik olarak gösterilmektedir. Sol tarafta bulunan mikro lensin üzerine optik eksene göre $\theta < \beta$ açısında gelen bir dizi paralel ışın gösterilmektedir. Gelen ışınlar güneş hücresinin üzerine odaklandığı için bu ışınların tamamı yakalanmaktadır. Ortadaki mikro lensin üzerine optik eksene $\theta = \beta$ açısında gelen başka bir paralel ışın kümesi gösterilmektedir. İdeal mikro lens durumunda gelen ışınların tamamı yakalanabilmektedir. Sağ taraftaki mikro lensin üzerine ise optik eksene göre $\theta > \beta$ açısında gelen başka bir paralel ışın demeti gösterilmektedir. Fakat bu açıda gelen ışınlar güneş hücresinin üzerine düşmediği için kaybedilmektedir. Sonuç olarak ışığın giriş açıları $\theta < \beta$ durumunda olduğunda gelen ışığın tamamı yakalanabilirken giriş açıları $\theta > \beta$ durumunda ise tamamen kaybolmaktadır. Bu bakımdan mikro lensin bir kabul açısına β veya toplam kabul açısına 2β (lens optik eksene $\pm \beta$ açıları içinde ışık kabul ettiği için) sahip olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca pratikte kabul açısı, güneş hücresinin performansının %90'a düştüğü açı olarak da tanımlanmaktadır (Sharaf ve Orhan, 2015).

Mikro lensin diğer karakteristik özelliği ise geçirgenlik spektrumudur. Geçirgenlik spektrumu, gelen fotonun dalga boyuna göre mikro lensin geçirgenlik miktarının ölçümüdür. Bu geçirgenlik miktarı mikro lensi oluşturan optik malzemeye bağlıdır. Genellikle optik malzemenin geçirgenlik spektrum aralığı ile kullanılan güneş hücresinin çalışma spektrum aralığının birbiriyle uyumlu olması beklenmektedir. Ayrıca güneşten gelen en yüksek radyasyonun yaklaşık 500 nm dalga boyu civarında olduğu düşünülürse mikro lensten bu bölgede yüksek geçirgenliğe sahip olması istenmektedir.

Şekil 1.25'te yaygın olarak kullanılan bir takım optik malzemelerin geçirgenlik bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 1.25. Optik malzemeler ve geçirgenlik bölgeleri (Keser, ve ark., 2017)

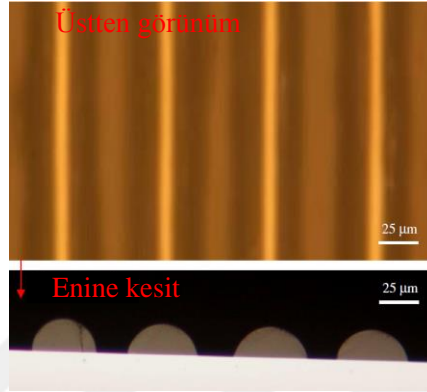
1.3.2. Mikro Lens Dizilerinin Güneş Hücreleri Uygulamaları

Bu araştırma kapsamında bu bölüm güneş hücrelerine yönelik önceki mikro lens dizileri çalışmalarına bir bakış niteliğindedir.

2011 yılında Tseng ve arkadaşları Si güneş hücrelerinin yüzeyini mikro lens dizileri ile kaplayarak yüzeye gelen ışığın büyük geliş açılarındaki yüzey yansımalarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Tercih ettikleri bu mikro lens dizileri yatay silindirik forma sahip polimetil metakrilat (PMMA) bazlı bir optik katmandır. Mikro lenslerin temas açısı ve aralarındaki boşluk miktarı gibi parametreler TracePro simülasyon programı kullanılarak optimize edilmiştir. Simülasyon programı ile yansımaya katsayısının 40°'den küçük geliş açılarında sabit olduğunu, 40° sonrasında ise kademeli olarak arttığını tespit etmişlerdir. Bu yüzden mikro lensin kontak açısının tasarımında 40°'nin ötesindeki açılara odaklanmışlardır. Buradan yola çıkarak simülasyon için 40°, 50°, 60° ve 70° kontak açılarını seçmişlerdir. Optimizasyon sonuçlarına göre 50 µm çapa sahip bir mikro lensin temas açısı 60° ve lensler arası boşluğun 14 µm olduğu durumda en yüksek güç toplayabildiği belirtilmektedir. Bu özelliklerdeki mikro lens dizilerinin üretimi litografi, elektro kaplama ve döküm teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

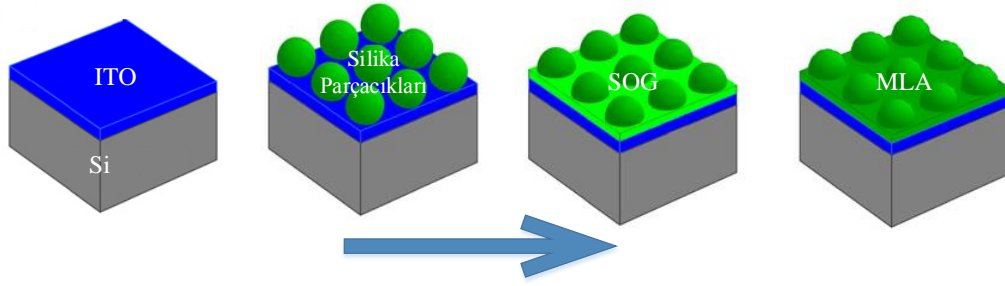
Üretim işlemleri boyunca boyut kontrolünün zorluğundan kaynaklı olarak mikro lenslerin tasarımdan küçük farklılıklarla üretilebildiği belirtilmektedir. Dolayısıyla

üretim sonrası lens çapı $48 \mu\text{m}$, temas açısı 62° ve lensler arası boşluk $15 \mu\text{m}$ olmuştur (Şekil 1.26). Güç ölçüm sonuçlarında 0° 'den 80° 'ye kadar olan geniş açılardaki ışınlar için mikro lensli güneş hücrelerinin mikro lenssiz güneş hücrelerine göre %3.3 daha fazla akım ürettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca mikro lens dizileri sayesinde yüzeye düşen ışığın etkili bir şekilde kırılarak güneş hücresi tarafından herhangi bir takip sistemine ihtiyaç duyulmadan absorbe edilebildiğini belirtmişlerdir (Tseng , ve ark., 2011).



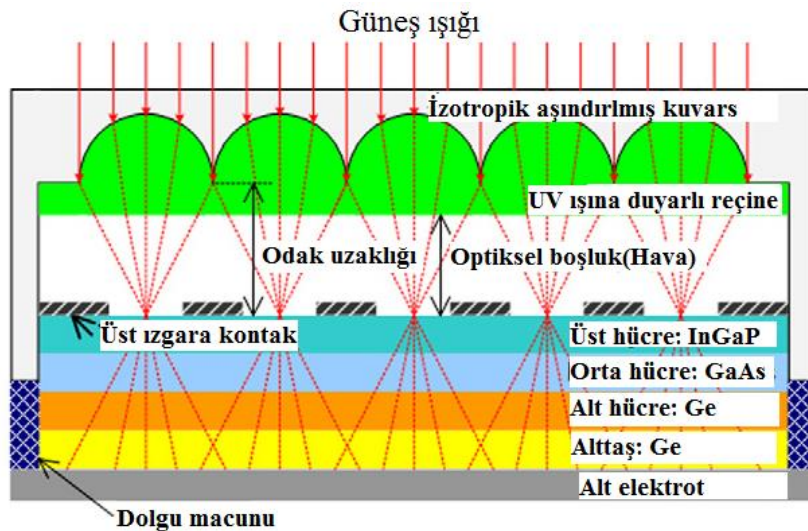
Şekil 1.26. Lens çapı $48 \mu\text{m}$, temas açısı 62° ve boşluk $15 \mu\text{m}$ olan mikro lens dizisinin üstten ve yandan görünüşü (Tseng , ve ark., 2011)

Chen ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada Si güneş hücresinin yüzeyini mikro lenslerle kaplayarak referans hücreye göre performans analizi yapmışlardır. Bu çalışmada mikro lens yapılarını oluşturmak için $3 \mu\text{m}$ çapa sahip silika (SiO_2) parçacıklarını kullanmışlardır. Öncelikle bu parçacıkları, metanol ile ağırlıkça %0.2 oranında karıştırarak solüsyon haline getirmişlerdir. Daha sonra bu solüsyonu ultrasonik sprey enjektör vasıtasıyla yüzeye püskürterek parçacıkları yüzeye kaplama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Son olarak parçacıklar arasında oluşan boşlukları da *spin-on glass* (SOG) tekniği ile kapatarak mikro lens yapılarını oluşturmuşlardır. Analiz sonuçlarında mikro lensli güneş hücresinin performansının referans hücreye göre normalden (0° 'den) gelen ışık için %7.4 daha fazla, 60° 'den gelen ışık için ise %13.5'e olduğu belirtilmektedir. Bu sonuçlara dayalı olarak mikro lensler sayesinde her yönde – *omnidirectional* yansıma önleyeme yapılabildiğini ispatladıklarını ifade etmişlerdir (Chen, ve ark., 2011).



Şekil 1.27. Silika parçacıklarla oluşturulan MLA'nın üretimi (Chen, ve ark., 2011)

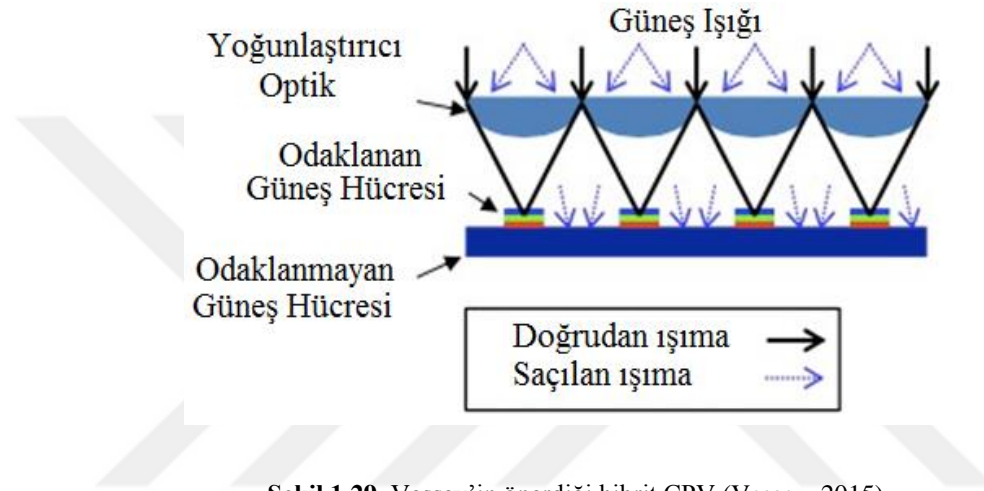
Nam ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin ön kontaklarından kaynaklanan yansımayı ve buna bağlı olarak güneş hücresinde oluşan gölgelenmeyi azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu olumsuz durumların üstesinden gelmek için bir mikro lens dizisi kullanmışlardır. Mikro lensleri üretmek için planladıkları aşındırma yöntemi ile elde edebilecek optimum mikro lens yüksekliğinin $45.26 \mu\text{m}$, çapının $70.75 \mu\text{m}$ olduğunu hesaplamışlardır. Bu değerlere göre üretimini gerçekleştirdikleri mikro lenslerin hem mikro yoğunlaştırma etkisi yoluyla hem de optik gölgelenmeyi engelleyerek güneş hücresinin performansında artış sağladığını belirtmişlerdir. Bu performans artışının normal bir cam kaplamaya göre %18.5 olduğunu tespit etmişlerdir (Nam, ve ark., 2013).



Şekil 1.28. Nam ve arkadaşlarının ürettikleri MLA'nın şematik gösterimi (Nam, ve ark., 2013)

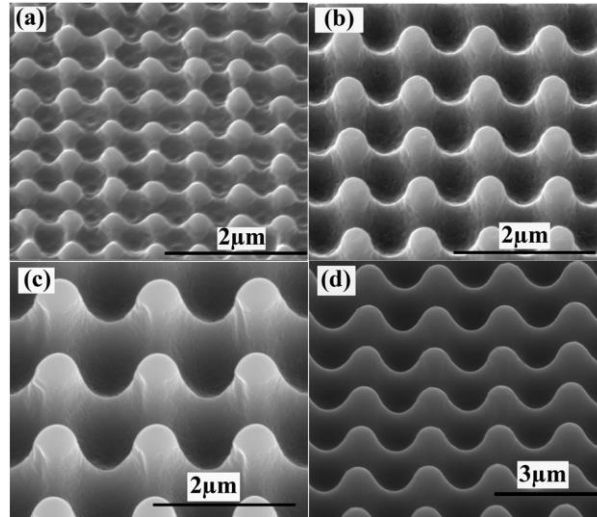
Vessey 2015 yılında yaptığı tez çalışmasında CPV'lerin doğrudan gelen ışığı güneş hücresine yoğunlaştırdığını ancak ışığın bir miktarının saçıldığını belirtmiştir.

Saçılan ışığın yoğunlaştırma bölgesindeki güneş hücresine düşmemesinden dolayı performans kaybı meydana geldiğini ifade etmiştir. Saçılan ışıktan geri kazanım yapabilmek için CPV'nin odağı dışındaki bölgelere güneş hücreleri yerleştirmeyi önermiştir. Yapılan bu çalışmada öncelikle CPV olarak bir mikro lens dizisi tasarlanmış ve üretilmiştir. Mikro lens dizisinin tasarımı, kabul açısı ve geçirgenlik spektrumu parametreleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Üretim sonrasında bu kabul açısının $\pm 2.5^\circ$ olduğu, geçirgenlik spektrumunun ise beklendiği gibi olduğu belirtilmiştir (Vessey, 2015).



Şekil 1.29. Vessey'in önerdiği hibrit CPV (Vessey, 2015)

Chen ve arkadaşları 2015 yılında, optik kayıpları azaltmak için organik güneş hücrelerinin üzerini polimer bazlı mikro lens dizileri ile kaplamışlardır. $2 \mu\text{m}$ 'den daha az çapa sahip $0.6 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ ve $2 \mu\text{m}$ gibi farklı aralıklı mikro lenslerin üretimini yumuşak litografi – *soft lithography* yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Üretim sonrasında güneş hücrelerinin performanslarını incelemişlerdir. Değerlendirmelere göre $1 \mu\text{m}$ aralıklı mikro lens dizilerini kullanan güneş hücresinin performansı, yüzeyinde mikro lens olmayan hücreye göre %10 daha fazladır. Bu mikro lens dizilerinin güneş hücresinin aktif yapısının dışında olduğundan dolayı her türlü güneş hücresine uygulanabileceğini belirtilmiştir (Chen, ve ark., 2015).



Şekil 1.30. a) $0.6 \mu\text{m}$, b) $1 \mu\text{m}$, c) $1.5 \mu\text{m}$ ve d) $2 \mu\text{m}$ aralıklı MLA'ların SEM görüntüsü (Chen, ve ark., 2015)

Keser ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada; GaInP/GaInAs/Ge güneş hücresinin performansını geliştirmeye yönelik uzay ortamına dayanıklı mikro lens dizilerinin üretilmesine dayalı bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Uydu güç sistemleri, güneş hücreleri, uzay ortamı etkileri ve mikro lens dizileri gibi konular bakımından yapılan kapsamlı bir literatür çalışmasına göre değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Bu değerlendirme sonucunda mikro lens üretiminin tasarım, üretim ve test süreçlerinden oluştuğunu belirtmişlerdir. Mikro lens dizilerinin tasarım sürecinin öncelikle uzay ortamına dayanıklı malzemelerin kullanılması ile başladığı ifade edilmektedir. Mikro lenslerin yüzey profilinin belirlenmesinde ise hücre kontaklarından kaynaklanan ve büyük giriş açlarına sahip ışıkta meydana gelen yansıma etkilerinin dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Yüzey profili tasarımı için Zemax optik tasarım programının kullanılacağı ifade edilmektedir. Mikro lenslerin üretimine yönelik olarak düşük maliyetli ve yüksek kalitede olan litografi tekniğine dayalı izotropik aşındırma yöntemi önerilmiştir. Üretim sonrasında mikro lensli güneş hücrelerinin performans araştırmasını mikro lense sahip olmayan hücrelere göre yapılacağını belirtmişlerdir. Uzay ortamına dayanıklılığı araştırmak için çok sayıda test mevcut olmasına rağmen performansa dayalı bir araştırma yapıldığı için parçacık radyasyonu, atomik oksijen ve termal döngü testlerinin yapılması önerilmiştir. Bu test sonuçlarının uzay kalifiye bir güneş hücresi ile karşılaştırılarak üretimin uzay ortamına dayanıklı olup olmadığına dair fikir sahibi olunacağı ifade edilmiştir.

Yürütülen literatür incelemesinde birçok avantaja sahip olan mikro lens dizilerinin güneş hücrelerine dayalı uygulamalarının az sayıda olduğu görülmektedir. Bu uygulamalardaki mikro lens dizilerinin karakteristik yapıları, hammadde, tasarım, üretim yöntemi ve kullanıldığı alanlar gibi etkenlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. İlgili literatür incelemesinde ayrıca yüksek performanslı güneş hücrelerine ihtiyaç duyan uzay araçlarına yönelik çalışmalarda mikro lens dizilerinin mevcut potansiyelinin dikkate alınmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen mikro lens dizilerinin uzay araçlarında kullanılan çok eklemlili güneş hücrelerinin performansını geliştirme sürecinde yapılacak çalışmalar için dikkate değer bir potansiyel taşıdığı değerlendirilmektedir.

Bunun yanında mikro lens dizilerinden yüksek performans elde edebilmek için yüzeyden yansıyan ışığın azaltılması temel amaçlardan biridir (Schulz, 2015). Bu amaç doğrultusunda mikro lens dizilerin yansımaya önleyici özellik kazanması için yansımaya önleyici kaplamalar ile kaplanmaktadır (Guo, ve ark., 2016). Bu sayede güneş hücresinin performansı daha da geliştirilebilmektedir (Kosten, 2014).

Ancak söz konusu literatür incelemesinde uzay ortamı etkilerine uygun mikro lens dizilerinin nasıl bir karakteristik yapıya sahip olduklarına dair özel bir literatür bulgusuna rastlanılmamıştır. Bu nedenle yürütülen bu çalışma daha yüksek bir performansın sağlanması için uzay ortamı etkilerine uygun çok katmanlı güneş hücrelerine yönelik yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin tasarlanabilirliği üzerine kurgulanmıştır.

1.4. Araştırmanın Problemi

Uzay ortamı etkilerine uygun çok katmanlı güneş hücrelerinin performansını artırmaya yönelik yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizileri tasarlanabilir mi?

1.5. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı uydularda kullanılan çok katmanlı güneş hücrelerinin performansını artırmaya yönelik uzay ortamı etkilerine uygun yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerini tasarlamaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada uydularda kullanılan çok katmanlı güneş hücrelerinin performansını artırmaya yönelik uzay ortamı etkilerine uygun mikro lens dizilerinin tasarımını yapmak amaçlanmaktadır. Bu süreçte öncelikle ilgili literatüre dayalı olarak uzay uygulamalarında kullanılacak mikro lens dizilerinin tasarım basamakları ve tasarım istekleri belirlenmektedir.

Bu bölümde çalışmanın yöntemi ve kullanılan materyal detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bunun yanında tasarım sonrası elde edilen verilerin analizinde benimsenen yaklaşım ve bu yaklaşımın bulgulara nasıl yansıtılacağı kapsamlı bir şekilde açıklanmaktadır.

2.1. Çalışmanın Yöntemi

Yürütülen araştırmanın konusu tespit edildikten ve ilgili literatür taraması gerçekleştirildikten sonra kullanılan yöntem gerekçeleri ile birlikte bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Yansıma önleyici özellikli mikro lens dizileri sayesinde güneş hücrelerinin performansının arttığı yapılan literatür incelemesinde belirtilmektedir. Bu incelemede uzay uygulamaları için mikro lens dizilerinin geliştirilmesini konu alan iki çalışma bulunmaktadır (Keser, ve ark., 2016; Keser, ve ark., 2017). Söz konusu çalışmalarda Keser ve arkadaşları tarafından yapılan kapsamlı araştırma ve değerlendirmeler sonucunda güneş hücrelerine yönelik uzay ortamına uygun yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerinin geliştirilmesi için bir yöntemsel bakış sunulmaktadır. İlgili çalışmalarda sunulan yansıma önleyici özellikli mikro lenslerin tasarım süreci, bu alanda yapılacak yeni çalışmalar için kapsamlı bir temel oluşturmaktadır. Bu nedenle yürütülen bu çalışmanın yönteminin belirlenmesinde Keser ve arkadaşlarının önerdiği tasarım yöntemi ağırlıklı olarak kullanılmıştır. Bunun yanında, yansıma önleyici kaplama tasarımının gerçekleştirilmesini konu alan literatürdeki çalışmalar (Larouche ve Martinu, 2008; Diedenhofen, ve ark., 2012) ve TÜBİTAK Uzay Teknolojileri ve Araştırma Enstitüsü'ndeki başuzman ve uzmanların fikir ve görüşleri etkili olmuştur.

İlk başta tasarımı sadece Zemax programı kullanılarak yapılması planlanmıştır. Bu tasarım sonrasında elde edilen mikro lens dizisinin yapısı ve malzemelerin kalınlıkları elde edilmiştir. Ancak başuzman ve uzmanlara göre bu kalınlıkların büyük olduğu ve buna dayalı olarak malzemelerin optik açıdan geçirgenliğinin önemli miktarda azalacağı belirtilmiştir. Dolayısıyla yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerinin

tasarlanmasında sadece Zemax programının yeterli olmadığı görülmüştür. İlgili malzemelerle hem uzay ortamına dayanıklılık açısından hem de yansımayı azaltıp geçirgenliği artırmak açısından gerçekçi bir tasarım elde etmek için bir kaplama programının kullanılmasının gerektiği ifade edilmiştir. Bu nedenle başuzman ve uzman görüşlerinin alınmasının yöntemin iyileştirilmesi sürecine olumlu yansıdığı söylenebilir. Alınan bu görüşler doğrultusunda yöntemde iyileştirmeye gidilerek yansıma önleyici kaplama için OpenFilters programının kullanılmasına karar verilmiştir.

İlgili çalışmalar (Keser, ve ark., 2017; Tseng , ve ark., 2011) ve görüşler doğrultusunda uzay uygulamalarına yönelik bir yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin tasarım sürecinin; kullanılacak malzemenin seçimi, mikro lens dizisi ve yansıma önleyici kaplamanın yapısının belirlenmesi ile birlikte performans testlerinin yürütülmesi işlemlerinden oluşması önerilmektedir.

Yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisi için malzeme seçim işleminde öncelikle malzemelerin dalga boyuna göre geçirgenlik ve yansıtma özellikleri dikkate alınmalıdır. Malzemelerin türüne göre değişkenlik gösteren bu özelliklerin GaInP/GaInAs/Ge güneş hücresinin çalışma dalga boyu aralığıyla uyumlu olması beklenmektedir. Aksi takdirde güneş hücresinin ısınması ve bozulması gibi istenmeyen durumlarla karşılaşarak beklenen güç çıkışı elde edilememektedir. Ayrıca bu malzemelerin sahip olduğu optik özelliklerin uzay ortamında değişmemesi istenmektedir. Bu sebepten dolayı uzay ortamı etkilerine dayanıklı malzemeler tercih edilmelidir. Böylelikle güneş hücresinin zararlı uzay ortamı etkilerinden korunması da sağlanmış olacaktır.

Malzeme seçiminden sonra mikro lens dizisinin yüzey profili, kalınlığı gibi özellikleri ve yansıma önleyici kaplamanın yapısı, kalınlıkları optimize edilerek tasarlanmalıdır. Bu tasarım sürecinde Zemax ve OpenFilters gibi lens ve kaplama programları kullanılarak lens yüzeyine düşen ışığın geçen, yansıyan miktarları ve yüzeyde oluşturduğu görüntü belirlenebilir.

Bir mikro lensin yüzey profili silindirik, dairesel ve altıgen gibi farklı geometrik yapılarla olabilmektedir. Mikro lens dizisinin yüzey profili tasarımında özellikle güneş hücresinin kontak yapısı dikkate alınmalıdır. Çünkü güneş hücrelerinin üzerinde bulunan yansıtıcı özelliğe sahip kontaklara düşen ışık yansıyarak kaybolmaktadır. Bu durumu engellemek için yüzeyde oluşan görüntünün kontaklar üzerinde oluşmamasına dikkat edilmelidir. Göz önünde bulundurulana diğer etken ise büyük giriş açılarında gelen güneş ışığıdır. Uzay aracının yörüngedeki hareketinden dolayı güneş ışığının güneş hücresine

giriş açısı zamanla değişmektedir. Giriş açısının artmasından dolayı gelen ışık yüzeyden yansıyarak kaybolmaktadır. Bu yansımanın önüne geçmek için mikro lensin yüzey profilinin gelen ışığın giriş açısının değişimine karşı toleranslı yapıda tasarlanması gerekmektedir.

Mikro lens dizisi tasarlandıktan sonra yansıma önleyici kaplama tasarımı uygun bir tasarım programı ile gerçekleştirilmelidir. Yansıma önleyici kaplamanın yapısı tek ya da çoklu katmandan oluşabilmektedir. Öncelikle yansımanın en aza indirilmesi için hedeflenen dalga boyu aralığı belirlenmelidir. Bu aşamadan sonra dalga boyu aralığına göre belirlenen malzemelerden oluşan katman ya da katmanların kalınlıkları optimize edilerek tasarım işlemleri yürütülmelidir.

Son aşamada tasarlanan yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin güneş hücresinin performansına etkisinin belirlenmesi amacıyla performans testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Performans testleri AM 0 ışınması altında güneş hücresinin fotoaktif bölgesine giren ışık enerjisi miktarı ölçülerek gerçekleştirilmelidir. Bu sayede bu çalışmada kullanılan 0.344 g ağırlığındaki, performansı %30 ve ortalama çıkış voltaj değeri 2,35 V olan MJ güneş hücrelerinin üreteceği güç ve akım miktarı hesaplanabilecektir (Azur Space, 2016).

Performans testleri yürütülürken ilk olarak mikro lens dizisinin güneş hücresinin performansına etkisi incelenmelidir. Bu bakımdan öncelikle düz yüzey profiline sahip normal güneş hücresi ile mikro lens dizisine sahip güneş hücresinin fotoaktif bölgelerine giren ışık miktarı ölçülmelidir. Devamında yansıma önleyici kaplamanın güneş hücresinin performansına etkisine dair bilgi edinmek için yansıma önleyici kaplamalı ve kaplamasız mikro lens dizilerine sahip güneş hücrelerinin ölçümleri gerçekleştirilmelidir.

Bu ölçümler ilk olarak güneş hücrelerinin normali ile 0° yapacak şekilde gelen ışık ile yapılmalıdır. Devamında güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine giren ışık enerjisinin ışığın giriş açısına bağlı olarak değişimi incelenmelidir. Bunun için ölçümler güneş ışığının güneş hücresine giriş açısı 10° 'den 80° 'ye kadar 10° 'ar derece artırılarak gerçekleştirilmelidir (Tseng , ve ark., 2011). Yapılan ölçümler sonrasında sözü edilen yapıların güneş hücresinin performansına etkisi hakkındaki nitelikli bilgiler ölçüm verilerinin analizi sonucu elde edilebilir. Verilerin analizi Başlık 2.3'te detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

2.2. Çalışmanın Materyali

Bu çalışma danışmanımın koordinatörlüğünü yürüttüğü ve yaklaşık 20 uzman ve başuzmanın görev yaptığı ayrıca benim de araştırmacı ve bursiyer olarak görev aldığım TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı (OPMER) kapsamındaki alt yapı ve teknik imkânlarla yürütülmüştür (Şekil 2.1). Bu kapsamda ilgili laboratuvarında bulunan teknik donanım yanında mikro lens dizilerinin tasarımı için Zemax Optic Studio ve OpenFilters gibi optik sistem tasarım programları kullanılmıştır. Tüm tasarım işlemleri, performans testlerinin ve metrolojinin yürütülmesi sürecinde danışmanımın gözetiminde ve OPMER'deki başuzman ve uzmanlar ile iletişim halinde olmaya özen gösterilmiştir. Bu programların birisi mikro lens dizisinin karakteristik yapısının tasarımı için diğeri ise performansını artırmaya yönelik olarak yansıma önleyici kaplama yapısının tasarımına yöneliktir.



Şekil 2.1. TÜBİTAK UZAY'a bağlı Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı (OPMER)

Mikro lens dizisinin karakteristik yapısının oluşturulması için doğru optimizasyon yapabilme bakımından güçlü bir optik tasarım programı olan Zemax tercih edilmiştir. Bu program ile sıralı – *sequential* ya da sıralı olmayan *non-sequential* optik sistemler tasarlanabilmekte ve bu sistemlerin optik performans analizleri yapılabilmektedir (Bayar, 2009). Dolayısıyla hem lens profili oluşturmamıza yarayan hem de bu lensin performansını incelememizi sağlayan Zemax çalışmamız için uygun görülmüştür.

Girişim olayına dayalı optik kaplamaların tasarımı ve optimizasyonu için yeni ve güncel yöntemler içerdiği için mikro lens dizisinin performansını artırmaya yönelik hedeflenen yansıma önleyici kaplama yapısı için OpenFilters programı kullanılmıştır. Ayrıca kullanım kolaylığı ve basitliği ve kapsamlılığı bakımından OpenFilters'in çalışmamız için elverişli olduğu değerlendirilmiştir (Larouche ve Martinu, 2008).

2.3. Verilerin Analizi

Mikro lens dizilerinin ve yansımaya önleyici kaplamaların tasarımı tamamlandıktan sonra düz yüzeye, mikro lens dizisine ve yansımaya önleyici kaplamalı mikro lens dizisine sahip güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine giren ışık enerjisi miktarı verileri değerlendirilmiştir. Bu ışık enerjisi miktarı verileri ile elektriksel güç denkleminde yola çıkılarak güneş hücrelerinin ürettiği güç ve akım değerleri hesaplanmıştır (Denk. 2.1). Kullanılan MJ güneş hücresinin %30 performansına sahip olduğu ve ortalama çıkış voltaj değerinin 2,35 V olduğu bilinmektedir. Hesaplanan güç ve akım değerleri bulguların yer aldığı Başlık 3’de tablolar halinde verilerek grafikler eşliğinde açıklanmıştır.

$$P = V \cdot I \quad (2.1)$$

Burada P gücü, V voltajı ve I akımı ifade etmektedir. Bunun yanında güneş hücresinin akımı, güneş hücresine giren güneş ışığının etkisini doğrudan göstermektedir. Bundan dolayı akım miktarındaki artış farklı yüzey yapılarının etkisini belirlemek için bir göstergedir. Diğer bir şekilde ifade etmek gerekirse, akım miktarındaki artış aynı zamanda güneş hücresinin performansındaki artış miktarını ortaya koymaktadır. Bu akım miktarındaki artış (δ) denklem 2.2’de ki gibi hesaplanmaktadır (Tseng , ve ark., 2011). Bu artış değerine göre, tasarım sonrası güneş hücrelerinin yüzey yapıları hakkında değerlendirmelerde bulunulmuştur.

$$\delta = \frac{I_{\text{Yüzeyi değiştirilmiş}} - I_{\text{Düz yüzeyli}}}{I_{\text{Düz yüzeyli}}} \times 100 \quad (2.2)$$

Son olarak tasarlanan yapının uzay ortamında çalışmaya uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir. Yürütülen çalışmada bir tasarım gerçekleştirildiği için ilgili ürün geliştirildikten sonra Başlık 1.2.7’de belirtilen uzay kalifikasyon testleri gerçekleştirilebilecektir. Dolayısıyla bu çalışmada yansımaya önleyici mikro lens dizisine sahip güneş hücrelerinin uzay ortamına uygunluğu konusundaki değerlendirmeler, seçilen materyalin yapısal özelliklerine dayalı olarak yürütülmüştür.

2.4. Tasarım Süreci

Optik tasarım; maliyet ve üretim sınırlamaları dâhil olmak üzere bir dizi kısıtlamaları ve performans gereksinimlerini göz önünde bulundurarak bir optik eleman tasarlama sürecidir (Fischer, ve ark., 2008). Bu bağlamda yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizisine dair sınır şartlarını belirlemek için öncelikle tasarım isterleri belirlenmiştir. İsterlerin belirlenmesi ile kullanılacak malzemenin seçim işlemi, mikro

lens dizilerinin ve yansımaya önleyici kaplamanın karakteristik yapısının tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. İlgili tasarımlar gerçekleştirildikten sonra tasarımı doğrulamak ve güneş hücresi üzerindeki performansı hakkında bilgi sahibi olmak için performans testleri yürütülmüştür. Bu süreç hakkında detaylı bilgi bu başlık altında sunulmuştur.

2.4.1. Tasarım İsterleri

MJ güneş hücrelerine yönelik uzay ortamı etkilerine uygun yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin doğru bir şekilde tasarımı için öncelikle tasarım isterleri belirlenmelidir.

Tasarım isterleri, yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin tasarımına öncülük eden sınır şartları olarak tanımlanabilir. Bu bakımdan uzay uygulamalarına yönelik yapılacak tasarım için Başlık 1.2'de ayrıntılı bir şekilde açıklanan uzay aracının çalışacağı yörünge şartları göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca MJ güneş hücresinin optimum performansta çalışabilmesi için isterler de bulunmaktadır. Bu bakımdan LEO yörüngede çalışması düşünülen tipik bir uyduya ait MJ güneş hücrelerinin üzerine tasarlanacak yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizisinin;

- Güneş ışığının ön kontaklara düşmesini engelleyip kontaklar arasındaki fotoaktif bölgeye düşmesini sağlaması,
- 300-1800 nm dalga boyu aralığında yüksek geçirgenliğe sahip olması,
- Gelen ışığın $\pm 50^\circ$ giriş açısı değişimine karşı toleranslı olması,
- AM 0 ışımaya dayanıklı olması,
- 10^{-7} torr vakum değerindeki basınçlarda gaz çıkışı olmaması,
- Nötral ortam etkilerine (özellikle ATOX etkisine) karşı dayanıklı olması,
- Radyasyon ortamından kaynaklanan bozulmalara karşı dayanıklı olması,
- Parçacık ortamını oluşturan parçacıklara dayanıklı olması ve
- -80°C ile $+55^\circ\text{C}$ arasında meydana gelen termal döngüye dayanıklı olması gerekmektedir.

2.4.2. Malzeme Seçimi

İsterler belirlendikten sonra tasarım işlemlerinin birinci basamağı olan malzeme seçim işlemine geçilmektedir. Ancak bu isterlerin yanında ilgili yapının üretilebilirliği de düşünülerek tasarlama sürecinde üretim yöntemi de göz önünde bulundurulmalıdır.

Çünkü üretim yönteminin kabiliyetleri ve gereksinimleri tasarımda dikkate alınması gereken en önemli faktörlerdendir.

Mikro lens dizilerinin üretim yöntemleri, temel fotolitografi işlemlerine dayanmaktadır. Fotolitografi işlemleri; ışığa duyarlı polimer madde olan fotorezisti (PR) bir alttaş üzerine kapladıktan sonra pozlama olarak adlandırılan, belirli dalga boylarında ışığa maruz bırakarak istenilen yüzey üzerine belirlenen deseninin oluşturulması işlemlerinin bütünüdür (Badar, 2012; Mack, 2007). Bu konu dâhilinde fotolitografi işlemlerine dayalı üretim yöntemleri; izotropik aşındırma, çok katmanlı, yeniden akıtma – *reflow*, hibrit ve lazerle yazmaya ek olarak elektron demetiyle yazma olarak sıralanabilir (Daly, 2001). Bu yöntemler içerisinde lazer ile yazma yöntemi maske tabanlı yöntemlere göre pahalı maskelere ihtiyaç duymamasından dolayı avantajlıdır. Bunun yanında lazer ile yazma yöntemi elektron demeti ile yazma yöntemine göre işletim maliyeti, yazma süresi ve sistem kararlılığı bakımından da avantajlıdır (Ivan, ve ark., 2009). Bu avantajları dolayısıyla mikro lens dizilerinin lazer ile yazma yöntemiyle üretilmesi hedeflenerek tasarım işlemleri gerçekleştirilecektir. Yürütülen bu çalışmanın anlaşılmasını kolaylaştırmak açısından lazer ile yazma üretim yönteminin kısaca açıklanmasında fayda görülmektedir.

Lazer ile yazma yöntemi genellikle fotorezist kaplı alttaşlar üzerinde iki boyutlu desen yapmak için kullanılmaktadır. Bu işlem için lazer ışığının yoğunluğu, desen yazımı sırasında lazer “açık” durumda iken fotorezisti tamamen pozlayacak şekilde seçilir. Üç boyutlu desen yazımı sürecinde ise lazer ışığının yoğunluğu mekânsal olarak değiştirilerek fotorezisti pozlama seviyeleri değiştirilir. “Grayscale” fotolitografi olarak da adlandırılan bu tip bir pozlama sayesinde 0 ila 300 μm arasında farklı yükseklik seviyelerinde yüzey profiline sahip fotorezist elde edilmektedir (Lee, ve ark., 2015). Yüzeyde oluşan bu üç boyutlu mikro yapı bir optik eleman olarak kullanılmaktadır (Helton, 2005). Dolayısıyla tasarım sürecinde güneş hücresi üzerinde mikro lens dizilerinin yapısını oluşturan polimer bir fotorezist katman olduğu dikkate alınmaktadır (Kloe, 2018; Lee, ve ark., 2015). Mikro lens dizilerinin temel yapısını oluşturan malzeme belirlendikten sonra uzay ortamından korunmasına yönelik malzemeler belirlenmektedir.

Optik materyaller ve güneş hücreleri zararlı uzay ortamı etkisinden korunmak amacıyla uzay ortamına dayanıklı koruyucu kaplamalar ile kaplanmaktadır. Bu kaplamalar Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , CeO_2 , ve Ti_3O_5 , tantalum pentaoksit (Ta_2O_5) ve zirkonyum dioksit (ZrO_2) gibi malzemeler kullanılarak tekli ya da çoklu katmanlar halinde yapılmaktadır (Pellicori, ve ark., 2014; De Rooij, 2010). İlgili kaplamaların belirlenen

yüzeze kaplanabilmesi için buhar fazda, sıvı fazda ve katı halde büyütme teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar arasından buhar fazda büyütme tekniklerinden olan kimyasal buhar biriktirme – *chemical vapour deposition* (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme – *physical vapour deposition* (PVD) teknikleri, kaplama işlemi sonrası kaliteli kaplama elde edilmesinden dolayı en çok tercih edilenlerdendir (Kouzehkonani, 2014).

Bu malzemeler içerisinde MJ güneş hücrelerinin çalıştığı dalga boyu aralığı ile uyumlu geçirgenlik özelliğine sahip olmaları, atomik oksijen etkilerine karşı koruma ve ultraviyole ışığa karşı filtre sağlamaları bakımından uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücrelerinde standart haline gelen Al_2O_3 ve TiO_2 malzemeleri tercih edilmektedir (Keser, ve ark., 2017; Azur Space, 2016; Minton, ve ark., 2010; Iles, 2001). Yürütülen bu çalışmada ilgili tasarım için aynı kaplama malzemeleri seçilmiştir. Bu bağlamda bu çalışmada kullanılan malzemeler ve kırılma indisleri Çizelge 2.1’de belirtilmektedir.

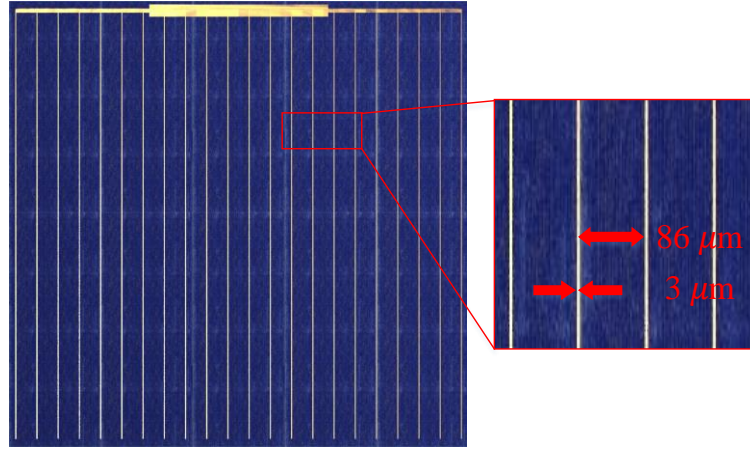
Çizelge 2.1. Seçilen malzemelerin özellikleri (Polyanskiy, 2018; Berkeley, 2018)

Malzemeler	Kırılma indisi (632.8 nm)	Yoğunluk (g/cm^3)
Polimer fotorezist	1.5007	1.18
Al_2O_3	1.6773	3.98
TiO_2	2.3894	4.23

2.4.3. Optik Tasarım

Kullanılacak malzemeler belirlendikten sonra yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin tasarımına geçilmektedir. Mikro lens dizilerinin yapısı Zemax programı aracılığıyla gerçekleştirilecektir. Mikro lens dizilerinin üzerine hem yansımaya önleyici olarak hem de koruyucu kaplama olarak görev alacak olan kaplama yapısının tasarımı OpenFilters programı ile gerçekleştirilecektir.

Mikro lens dizisinin yapısındaki en büyük etkenin güneş hücresinin ön kontak yapısı olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.2’de bu çalışmada gerçekleştirilecek tasarıma temel teşkil eden 20 mm x 20 mm ölçülerine sahip güneş hücresi gösterilmektedir. Bu güneş hücresinin ön yüzeyinin %5’ni kaplayan ön kontakların kalınlığı $3 \mu m$ ve iki kontak arasındaki mesafe $86 \mu m$ ’dir.

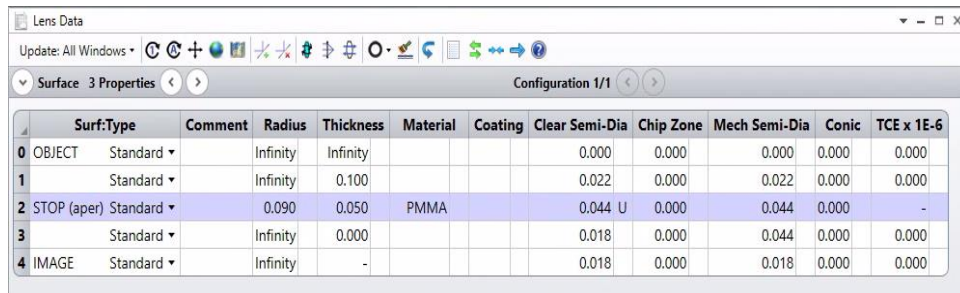


Şekil 2.2. Bu çalışmanın tasarımına temel teşkil eden güneş hücresinin yapısı

2.4.3.1. Mikro Lens Dizisinin Tasarımı

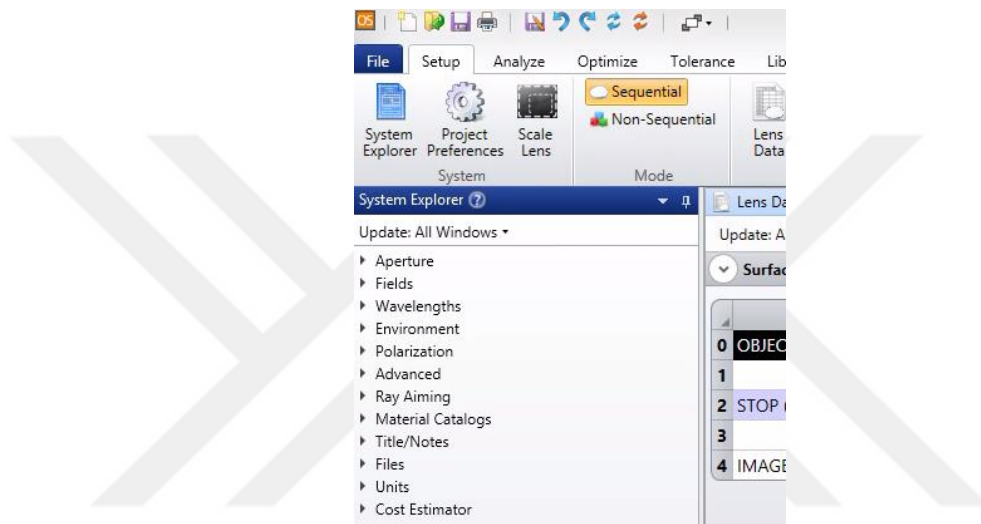
Mikro lens dizileri bir lensin bir düzlem üzerinde tek ya da iki yönde sıralanmasıyla meydana gelmektedir. Dolayısıyla belirlenen isterler çerçevesinde bir mikro lensin tasarlanması, mikro lens dizisinin aynı isterleri karşılaması anlamına gelmektedir. Bunun yanında yapılan tasarımın basit bir yapıda olması ve anlaşılır olması açısından tasarım işlemleri tek bir mikro lens üzerinden yürütülmüştür.

Zemax, bir lensin parametrelerini belirlenen isterlere dayalı olarak optimize etme mantığıyla çalışmaktadır. Bu bakımdan öncelikle Zemax'da bir mikro lensi oluşturan parametrelerin nasıl tanımlandığının bilinmesinde fayda görülmektedir. Zemax programında bir mikro lens tanımlanırken, Başlık 1.3.1'de de anlatıldığı gibi, eğrilik yarıçapı – *Radius*, kalınlık – *thickness*, cam tipi – *glass type*, asferik verisi – *aspheric data*, yüzey tipi – *surface type*, ve lens yarıçapı – *semi-diameter* gibi parametreler kullanılmaktadır. Bu değerler Lens Data olarak adlandırılan düzenleme penceresine tanımlanmaktadır (Şekil 2.3) (Sharples, 2009). Bunlarla beraber bir optik sistemin temelini oluşturan optik açıklık – *aperture*, görüş alanı – *field of view* (kabul açısı) ve dalga boyları – *wavelengths* gibi parametreler System Explorer penceresi üzerinden tanımlanmaktadır (Şekil 2.4) (Zemax, 2016).



Surf-Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0 OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	Standard	Infinity	0.100			0.022	0.000	0.022	0.000	0.000
2 STOP (aper)	Standard	0.090	0.050	PMMA		0.044 U	0.000	0.044	0.000	-
3	Standard	Infinity	0.000			0.018	0.000	0.044	0.000	0.000
4 IMAGE	Standard	Infinity	-			0.018	0.000	0.018	0.000	0.000

Şekil 2.3. Lens verilerinin tanımlandığı Lens Data penceresi

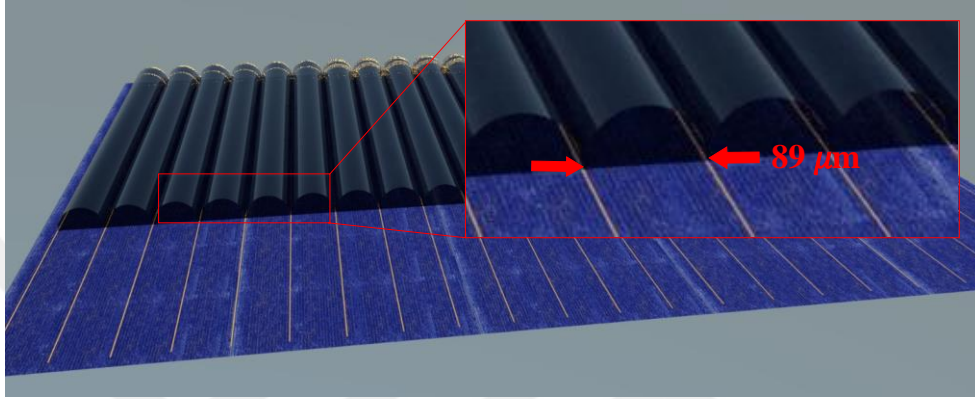


Şekil 2.4. Temel sistem parametrelerin tanımlandığı System Explorer penceresi

Optimizasyon işlemlerinden doğru sonuç elde edilebilmesi için özellikle başlangıç değerlerini oluşturan parametrelerin programa doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir. Bu bakımdan tasarıma ilk olarak sistemin temel değerlerini oluşturan optik açıklık, görüş alanı ve dalga boyları belirlenmiştir.

Optik açıklık, bir lense giren ışık demetinin boyutu olarak ifade edilmektedir (Zemax, 2016). Bu çalışmada optik açıklık, bir kontak kalınlığı ile kontaklar arasındaki fotoaktif bölge genişliğinin toplamı olarak belirlenmiştir. Çünkü bir mikro lensin bir kantağın ortasından sonraki kantağın ortasına kadar olan bölge üzerine konumlandırılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla bu mikro lensin optik açıklığı $89 \mu\text{m}$ 'dir. Ayrıca bu mikro lensin yüzey tipi kontaklardan kaynaklı olarak yarı silindirik şekildedir (Şekil 2.5). Görüş alanı ise lensin görebildiği en geniş açısal aralık olarak belirtilmektedir. Belirlenen isterlere göre mikro lensin görüş alanının $\pm 50^\circ$ değerini sağlaması gerektiği belirlenmiştir. Daha sonra optik sistemin hangi dalga boyu aralığında çalışacağına karar

verilmiştir. Bu aralık, MJ güneş hücresinin enerji üretiminde ve performansında büyük ölçüde rol oynayan yaklaşık olarak 450 – 900 nm dalga boyu aralığı olarak seçilmiştir (Victoria, ve ark., 2012). Bunun yanında lensin asferik bir yapıya sahip olması üretiminde ve analizinde zorluklara sebebiyet vereceği için mikro lens küresel – *sferik* bir yapıda tasarlanmıştır (Bielke, ve ark., 2004). Sonuç olarak optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için belirlenen parametreler Çizelge 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.5. Güneş hücresinin üzerindeki yarı silindirik şekle sahip mikro lens dizisinin beklenen dizilimi ve mikro lensin optik açıklığının gösterimi

Çizelge 2.2. Mikro lensin tasarımı için belirlenen parametreler

Parametre	Tür/Değer
Cam Tipi	Polimer Fotorezist
Lens Kalınlığı (h_L)	0-300 μm
Yüzey Tipi	Yarı Silindirik
Asferiklik Verisi	0
Lens çapı – Optik Açıklık	89 μm
Görüş Alanı	$\pm 50^\circ$
Dalga Boyu Aralığı	450-900 nm

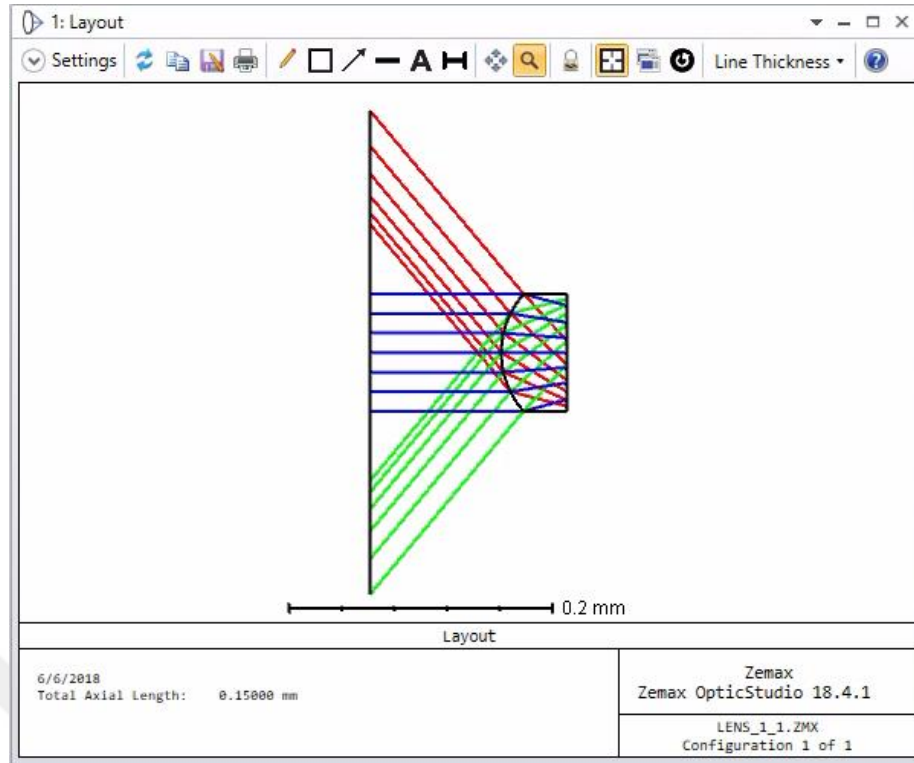
Bu değerler Lens Data penceresine tanımlandıktan sonra optimizasyon işlemlerine geçilebilmektedir. Optimizasyon işlemleri, isterler doğrultusunda mümkün olan en iyi lens yapısını ortaya çıkarmak için belirli lens parametrelerini değiştiren işlemler bütünüdür. İsterler, mikro lens yapısının yüzeye $\pm 50^\circ$ açıları arasında gelen bir ışığı güneş hücresinin kontakları arasındaki bölgeye yönlendirecek şekilde olması gerektiğini göstermektedir. Bu gereklilikleri sağlayabilmek için parametreler incelendiğinde optimize edilecek parametrelerin lens kalınlığı (h_L) ve lens eğrilik yarıçapı

(*R*) parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin optimizasyonu ise Merit Fonksiyon – Merit Function penceresi üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). Merit fonksiyon tasarımı ulaşılmaması hedeflenen değerler dizisi olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyon ulaşılmaması beklenen hedefler ile mevcut durum arasındaki farkı hesaplayarak sıfıra indirmeye çalışmaktadır. Bu çerçevede fonksiyona operand olarak adlandırılan hedefler tanımlanarak optimizasyon işlemleri yürütülmektedir (Zemax, 2016). Çalışmamızda maksimum eğrilik – *maximum curvature* (MXCV), maksimum yarı-çap – *maximum semi-diameter* (MXSD), minimum yarı-çap – *minimum semi-diameter* (MNSD), bir yüzeyin kalınlığını belirlenen değerden daha büyükte tutan – *center thickness greater than* (CTGT) ve bir yüzeyin kalınlığını belirlenen değerden daha düştükte tutan – *center thickness less than* (CTLT) gibi operandlar kullanılmıştır. MXSD ve MNSD operandları ışığın kontaklar arası bölgeye düşmesini sağlamak için, CTGT ve CTLT operandları lens kalınlığını 0-300 μm arasında tutmak için kullanılmıştır.

Optimizasyon işlemleri sonrasında mikro lens parametrelerinin yeni değerlerine Lens Data penceresinden, görsel yapısına da Layout penceresinden ulaşılabilmektedir (Şekil 2.7). Optimizasyon sonrasında elde edilen mikro lense ait veriler Başlık 3.1’de sunulmuştur.

Type	Op#	Target	Weight	Value	% Contrib	
1 MXCV	2	1	0.100	1.000	0.100	0.000
2 MXSD	2	2	0.043	11.000	0.044	1.523
3 MNSD	2	2	0.040	11.000	0.040	0.000
4 CTLT	2		1.000E-02	1.000	0.050	98.477
5 CTGT	2		1.000E-03	1.000	1.000E-03	0.000
6 OPLT	5		0.000	0.000	1.000E-03	0.000
7 DMFS						

Şekil 2.6. Optimizasyonda kullanılan Merit Fonksiyon penceresi



Şekil 2.7. Layout penceresinden mikro lens sistemine 0° ve $\pm 50^\circ$ 'den gelen ışığın gösterimi

Bu süreçten sonra analiz işlemlerine geçilebilmektedir. Ancak henüz mikro lens yüzeyinde herhangi bir yansıma önleyici kaplama bulunmamaktadır. Konu bütünlüğünün sağlanması açısından mikro lens yüzeyine bir yansıma önleyici kaplama tasarlandıktan sonra tüm analizlerin gerçekleştirilmesi daha doğru olacaktır. Dolayısıyla bu aşamada mikro lense yönelik yansıma önleyici kaplama tasarlama işlemlerine geçilmiştir.

2.4.3.2. Yansıma Önleyici Kaplamanın Tasarımı

OpenFilters, girişim olayına dayalı çalışan optik kaplamaların tasarımı ve optimizasyonu için çok sayıda yöntem içeren bir araçtır (Larouche ve Martinu, 2008). Kaplamalara dair geçirgenlik, yansıtıcılık ve absorpsiyona dayalı birçok hesaplamının yapılabildiği bu programda çalışmamız için yansıma önleyici kaplama tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımın yürütülmesi için kullanılacak kaplama materyalleri, yansımanın en aza indirilmesi istenilen dalga boyu aralığı, kaplamanın yapılacağı alttaş, alttaşın bulunduğu ortam ve tasarım için çalışılacak dalga boyu aralığı belirlenmektedir. Çalışılacak dalga boyu aralığı, yansımanın en aza indirileceği dalga boyu aralığı olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda belirlenen parametreler Çizelge 2.3'te gösterilmektedir. Tasarımın gerçekleştirilebilmesi için öncelikle bu parametrelerin programa tanıtılması

gerekmektedir. Bu doğrultuda çalışılacak dalga boyu aralığı, alttaş ve alttaşın bulunduğu ortam parametreleri programdaki filtre özellikleri penceresine tanımlanmıştır (Şekil 2.8).

Çizelge 2.3. Yansımaya önleyici tasarımı için belirlenen parametreler

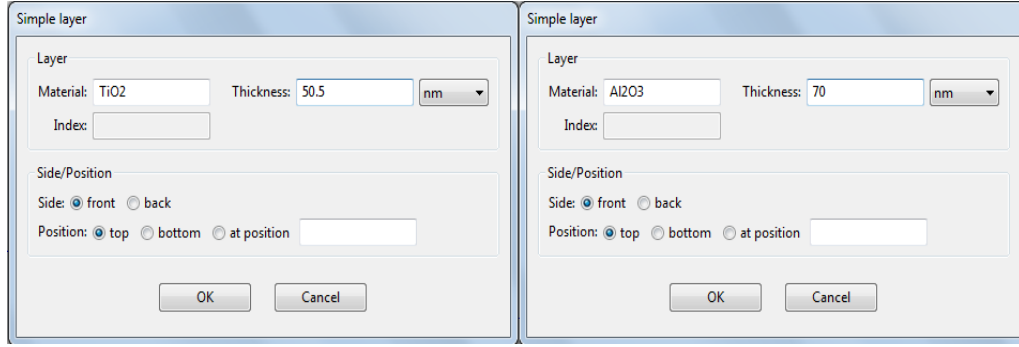
Parametre	Tür/Değer
Kaplama Malzemeleri	Al ₂ O ₃
	TiO ₂
Yansımaya Önleyicilik Aralığı	450-900 nm
Alttaş	Polimer Fotorezist
Alttaşın Bulunduğu Ortam	Hava

The screenshot shows the 'Properties' dialog box with the following settings:

- Substrate and mediums:** Substrate: PMMA, Thickness: 0.05 mm, Front medium: air, Back medium: air. Don't consider substrate and mediums.
- Wavelengths:** Reference wavelength: 595.0 nm, Wavelengths: 450.0 to 900.0 every 1.0 nm.
- Graded-index layers:** Step spacing: deposition 0.01, Sublayer minimum thickness: 0.0 nm.
- Color:** Illuminant: CIE-D65, Observer: CIE-1931.
- Analysis:** Consider backside, Ellipsometer type: RAE RPE RCE, Delta min: -90.0 degrees.
- Monitoring:** Consider backside, Ellipsometer type: RAE RPE RCE, Delta min: -90.0 degrees, Sublayer thickness: 1.0 nm.

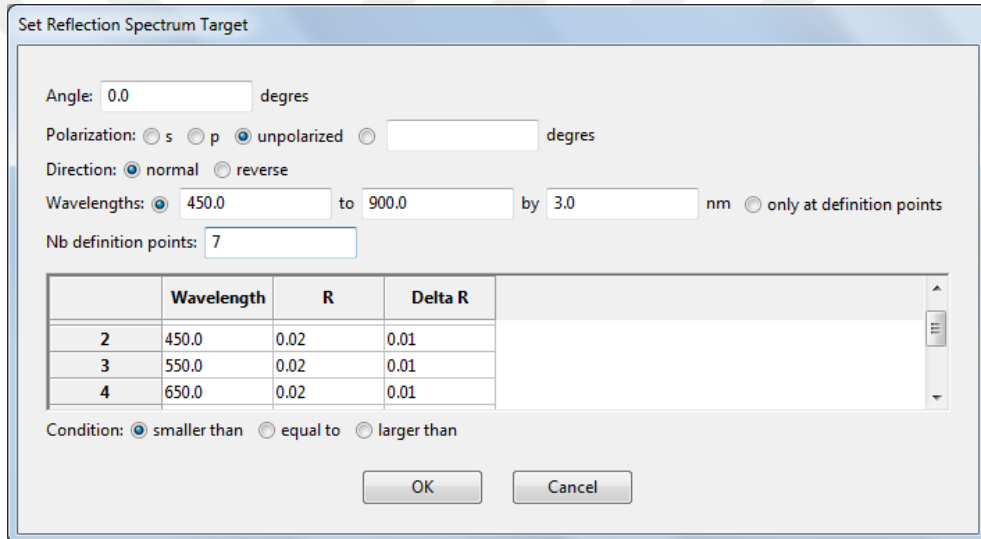
Şekil 2.8. Başlangıç parametrelerinin tanımlandığı filtre özellikleri penceresi

Sonrasında kaplama malzemeleri basit katman penceresinden programa tanıtılmıştır (Şekil 2.9).



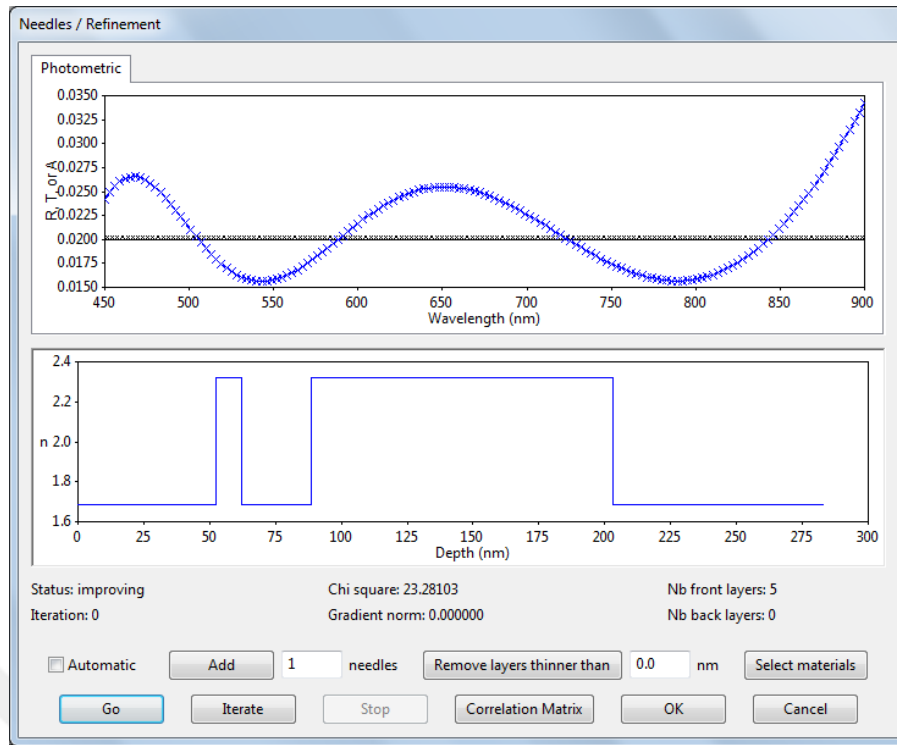
Şekil 2.9. Kaplama malzemelerinin basit katman penceresine tanıtılması

Yansımının minimuma indirilmesi hedeflenen dalga boyu aralığı, hedeflenen yansıma spektrumu düzenleme penceresinden tanımlanmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Yansıma önleyicilik özellik göstermesi hedeflenen aralığın tanıtılması

Gerekli tanımlamaların yapılması sonrasında Design/Optimize penceresi üzerinden Needles tekniği kullanılarak optimizasyon işlemleri yürütülmüştür (Şekil 2.11). Bu tekniğin kullanım sebebi uzun yıllardır birçok tasarım probleminin üstesinden gelmesinden kaynaklanmaktadır (Tikhonravov, ve ark., 1996).

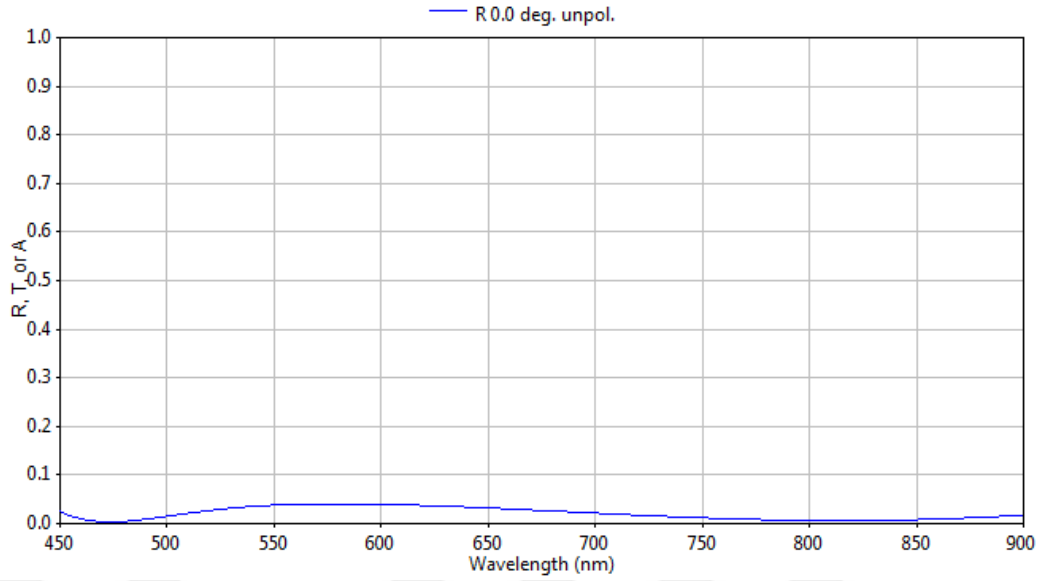


Şekil 2.11. Needles tekniği ile optimizasyon işlemlerinin yürütüldüğü pencere

Optimizasyon işlemi sonrasında kaplama malzemelerinin sırasına ve kalınlık verilerine Front Layers penceresinden ulaşılmıştır (Şekil 2.12). Bunun yanında dalga boylarına göre yansıma miktarı, Analyse sekmesi üzerinden Calculate Reflection komutu ile hesaplatılarak grafiksel olarak elde edilebilmektedir (Şekil 2.13). Ayrıca bu dalga boylarına göre yansıma miktarı grafiğine Zemax programı üzerinden de erişilebilmektedir. Bunun için kaplama malzemelerini ve kalınlık bilgilerini Zemax programına tanıtırak Reflection vs. Wavelength adlı analizi komutu kullanılmaktadır (Zemax, 2016). Optimizasyon sonrasında erişilen mikro lense yönelik yansıma önleyici kaplamaya ait veriler Başlık 3.2’de sunulmuştur.

Front Layers										
	Material	Thickness (nm)	Index	OT	Refine thickness	Refine index	Preserve OT	Add needles	Add steps	Description
1	Al2O3	61.070	1.6773	0.161867	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	TiO2	21.780	2.2789	0.078438	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Al2O3	16.990	1.6773	0.045033	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	TiO2	69.020	2.2789	0.248562	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Al2O3	84.442	1.6773	0.223817	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Şekil 2.12. Optimizasyon işlemleri sonrası kalınlıkların okunduğu Front Layers penceresi



Şekil 2.13. Dalga boylarına göre yansımaya miktarını gösteren pencere

Mikro lens dizisinin ve yansımaya önleyici kaplamanın tasarımlarının gerçekleştirilmesinden sonra bu yapıların performans testleri yürütülmüştür.

2.4.4. Performans Testleri

Performans testlerinin temeli düz yüzeye, mikro lens dizisine ve yansımaya önleyici kaplamalı mikro lens dizisine sahip güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine giren ışık enerjisi miktarının elde edilmesine dayalıdır. Bu bakımdan performans testleri; yüzeyden saçılan, yansıyan ve geçen ışıkların analizini yapma kabiliyeti ile her iki yapının aynı anda test edilmesine olanak sunan Zemax programının Non-sequential modu üzerinden yürütülmüştür (Zemax, 2016). Bu analizlerin yapılabilmesi için sisteme giren ışık enerjisini belirleyen bir ışık kaynağı, mikro lens yapısı, yansımaya önleyici kaplamanın yapısı ve fotoaktif bölgeye giren ışık miktarını algılamaya yarayan detektörler Component Editor penceresinden tanımlanmıştır (Şekil 2.14).

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	X
1 Source Rectangle	Kaynak	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-	
2 Rectangular Pipe	Perde	0	0	0.000	0.000	0.983	0.000	0.000	0.000	ABSORB	
3 Detector Rectangle	Gelen	0	0	0.000	0.000	0.983	0.000	0.000	0.000		
4 Toroidal Lens	MLA	0	0	0.000	0.000	0.967	0.000	0.000	0.000	PMMA	
5 Detector Rectangle	Aktif bolge	0	0	0.000	0.000	1.017	0.000	0.000	0.000	ABSORB	
6 Detector Rectangle	Alt kontak	0	0	0.000	-0.044	1.017	0.000	0.000	0.000	ABSORB	
7 Detector Rectangle	Ust kontak	0	0	0.000	0.044	1.017	0.000	0.000	0.000	ABSORB	

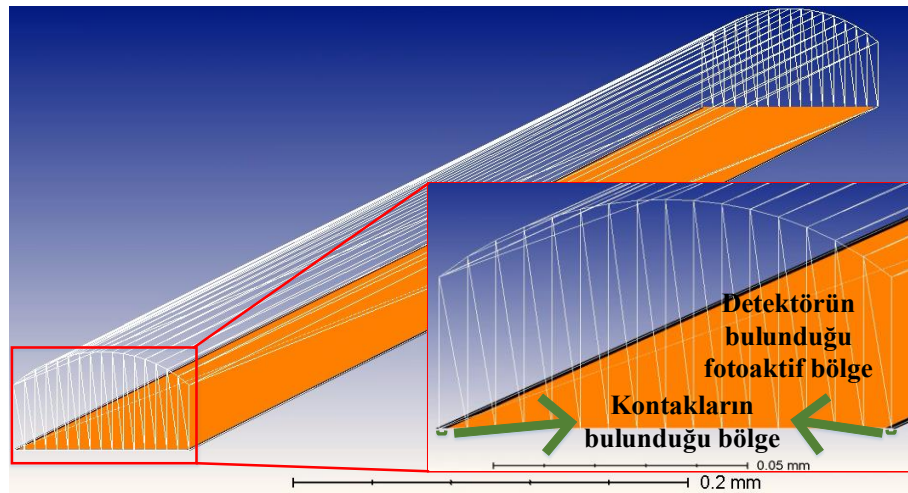
Şekil 2.14. Sistem oluşturan parametrelerin tanımlandığı Component Editor penceresi

Işık kaynağının enerjisi, uzay ortamındaki güneş ışığı enerjisi olarak tanımlanan ve AM 0 olarak adlandırılan 1367 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Işık kaynağından gelen ışığın açısı Component Editor listesinde bulunan Tilt sütunundan ayarlanmıştır. Bu sayede farklı giriş açılarında gelen ışık için performans testleri yürütülebilmektedir.

Mikro lensin yapısına ait veriler Lens Data penceresinden elde edilerek Component Editor penceresine tanımlanmıştır.

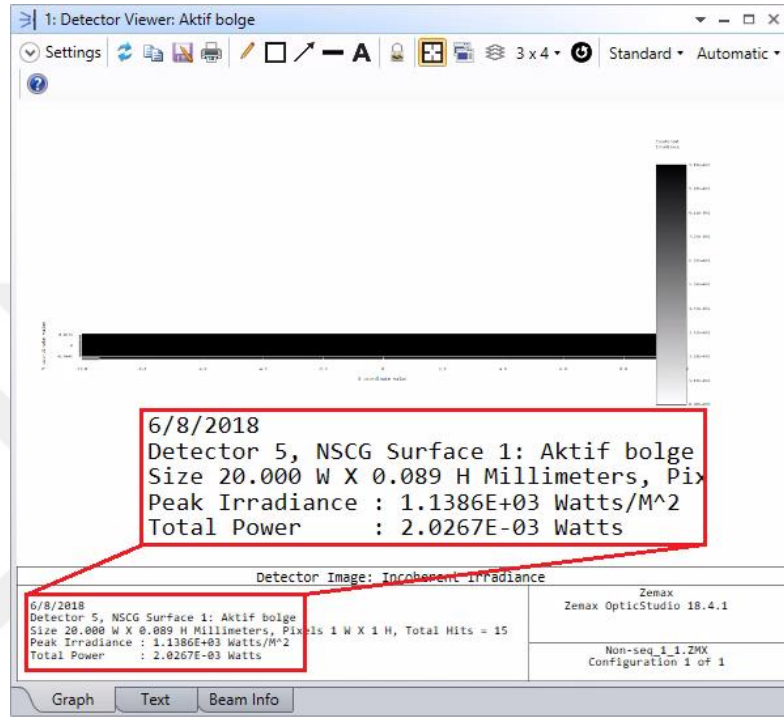
Farklı bir programda tasarlanan yansımaya önleyici kaplama yapısına ait veriler Zemax'a Edit Coating File penceresinden tanımlanmıştır (Zemax, 2016).

Detektörün önündeki optik yapının değiştirilmesi ile detektör üzerine düşen ışık enerjisi miktarında meydana gelen değişim incelenebilmektedir. Buradan yola çıkılarak detektör, güneş hücresinin fotoaktif bölgesi olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla detektörün ölçüleri, mikro lensin tasarımında kullanılan fotoaktif bölgenin ölçüleri ($20 \text{ mm} \times 86 \mu\text{m}$) ile aynı olarak belirlenmiş ve tanımlanmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Mikro lens yapısındaki detektörün bulunduğu yerin gösterimi

Parametrelerin sisteme tanıtılması sonrasında detektörler üzerine düşen ışık miktarını hesaplabilmek için Ray Trace ışık izleme motoru kullanılmıştır. Hesaplanan bu ışık miktarı verilerine Detector Viewer penceresinin sol alt kısmındaki Total Power başlığından erişilmiştir (Şekil 2.16). Bu veriye aynı pencerenin Text kısmından da erişilebilmektedir.



Şekil 2.16. Detektör üzerine düşen ışık yeri ve miktarı gibi verilere ulaşmaya yarayan Detector Viewer penceresi

Tasarımların 20 mm (2000 μm) x 89 μm ölçüleri üzerinden yürütüldüğü ve mevcut güneş hücresinin 20 mm x 20 mm ölçülere sahip olduğu düşünüldüğünde farklı yüzey yapılarına sahip olan hücrelerine giren toplam enerji miktarı bilgisine ulaşmak için detektör üzerine düşen ışık miktarı verisi 222 ile çarpılmıştır. Bu ulaşılan verilerden sonra Başlık 2.3’de belirtilen verilerin analizi gerçekleştirilmiştir.

Mikro lens dizisinin ve yansıma önleyici kaplamanın karakteristik yapıları yanında bu yapılara dayalı performans testlerinin verileri ve analizleri araştırma bulguları ve tartışma bölümünde sunulmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yürütülen araştırmaya ait bulgular; mikro lens dizisi ve yansımaya önleyici kaplamanın tasarım sürecinin yanında performans testleri dikkate alınarak üç kısımda incelenmiştir.

Başlık 3.1’de tasarımı gerçekleştirilen mikro lens dizisinin karakteristik yapısına ait bulgular ve Başlık 3.2’de mikro lens dizilerine yönelik yansımaya önleyici kaplamanın karakteristik yapısına ait bulgular detaylı bir şekilde sunulmuştur.

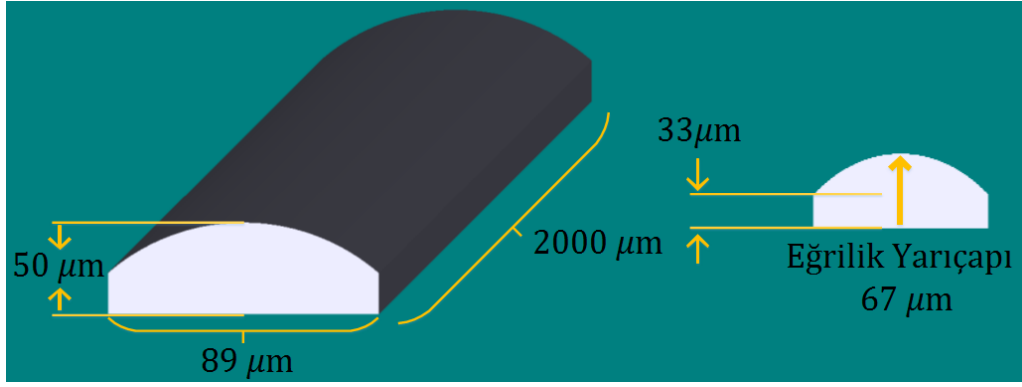
Başlık 3.3’de ise performans testlerine dayalı olarak mikro lens dizisinin ve yansımaya önleyici kaplamanın isterlere uygun yapıda olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmaktadır.

3.1. Mikro Lens Dizisinin Karakteristik Yapısına Dair Bulgular

Başlık 2.4.2.1’de detaylı bir şekilde açıklanan mikro lense ait Zemax programı ile yürütülen optimizasyon işlemleri sonrasında mikro lensin karakteristik yapısına ait veriler elde edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen veriler Çizelge 3.1’de sunulmuş ve Şekil 3.1’de görsel olarak gösterilmiştir.

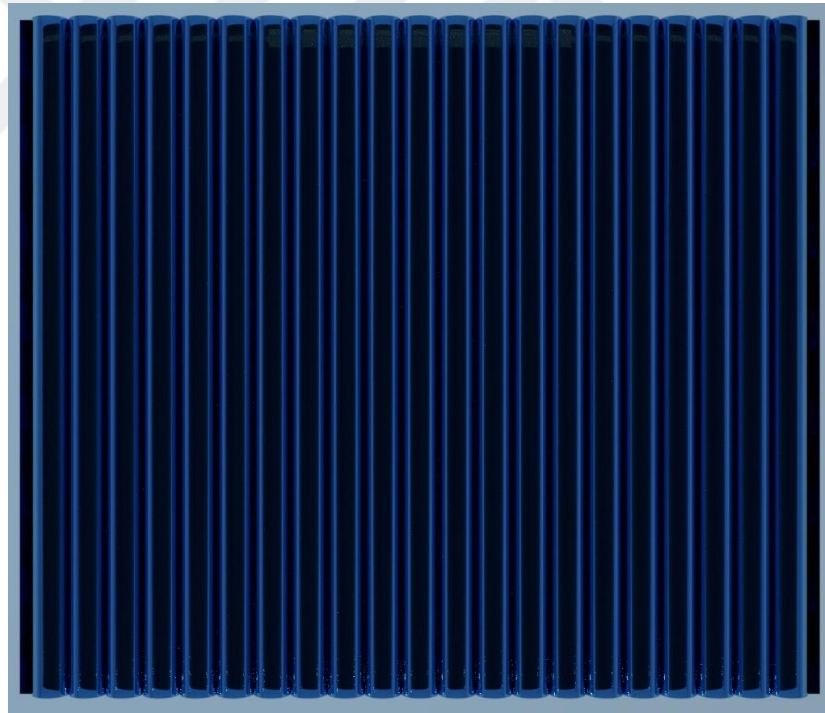
Çizelge 3.1. Optimize edilen mikro lensin nihai karakteristik yapısı

Parametre	Tür/Değer
Cam Tipi	Polimer Fotorezist
Yüzey Tipi	Yarı Silindirik
Lens Kalınlığı	50 μm
Eğrilik Yarıçapı	67 μm
Lens Uzunluğu	2000 μm
Lens Çapı – Optik Açıklık	89 μm
Görüş Alanı – Kabul Açısı	$\pm 50^\circ$
Asferiklik Verisi	0



Şekil 3.1. Mikro lensin nihai şekli

Mikro lensin yapısına ait verilere ulaşıldıktan sonra mikro lens dizisi yapılandırılmıştır (Şekil 3.2). Mikro lens dizisinin yapısı incelendiğinde mikro lensler arasında herhangi bir boşluk bulunmadığı için FF_{MLA} değerinin %100 olduğu bilgisine erişilmiştir.



Şekil 3.2. Güneş hücresi üzerindeki mikro lens dizisinin üstten görünümü

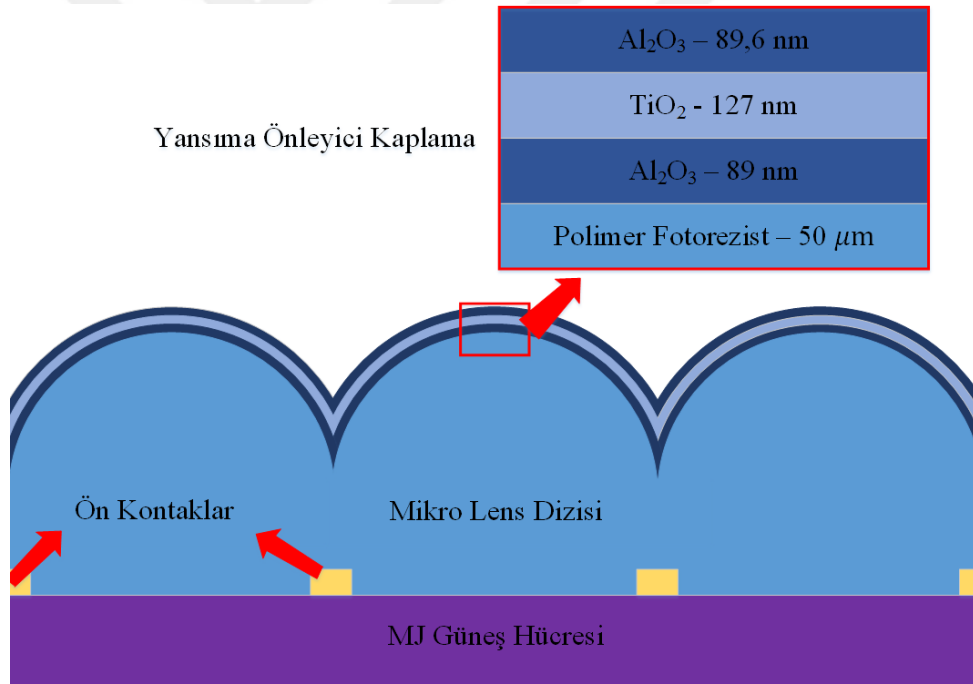
Mikro lens dizisinin yapısı incelendikten sonra yansıma önleyici kaplamanın yapısına dair elde edilen bulgular incelenmiştir.

3.2. Yansımaya Önleyici Kaplamanın Yapısına Dair Bulgular

Mikro lens dizisine yönelik yansımaya önleyici kaplamanın optimizasyon işlemleri sonrasında yansımaya önleyici kaplamanın yapısına ait veriler elde edilmiştir. Elde edilen yansımaya önleyici kaplama malzemelerinin sırası ve kalınlık bilgileri Çizelge 3.2’de belirtilmektedir. Bu yapının mikro lens dizisi üzerindeki görüntüsü ise Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

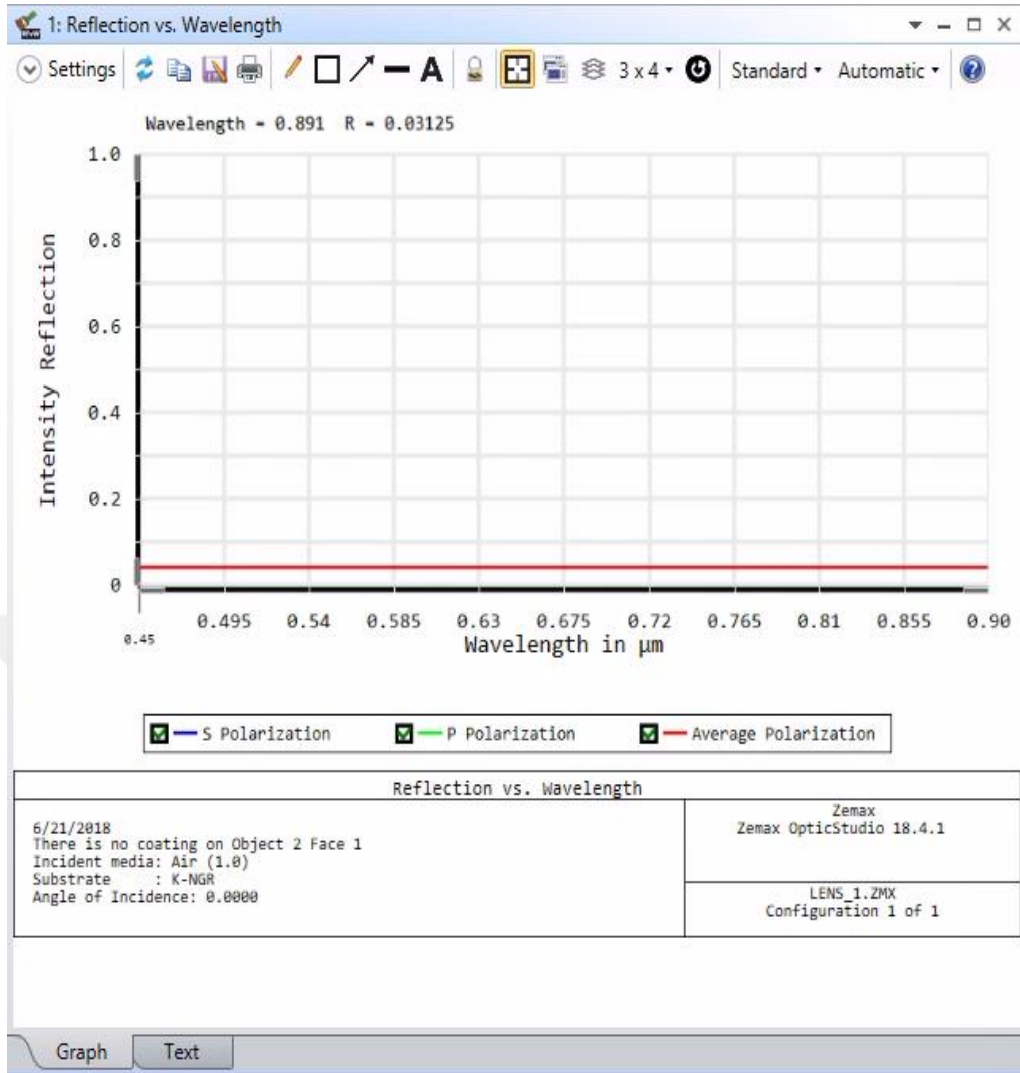
Çizelge 3.2. Yansımaya önleyici kaplamanın yapısına ait veriler

Malzeme	Kalınlık
Al_2O_3	89.6 nm
TiO_2	127 nm
Al_2O_3	89 nm

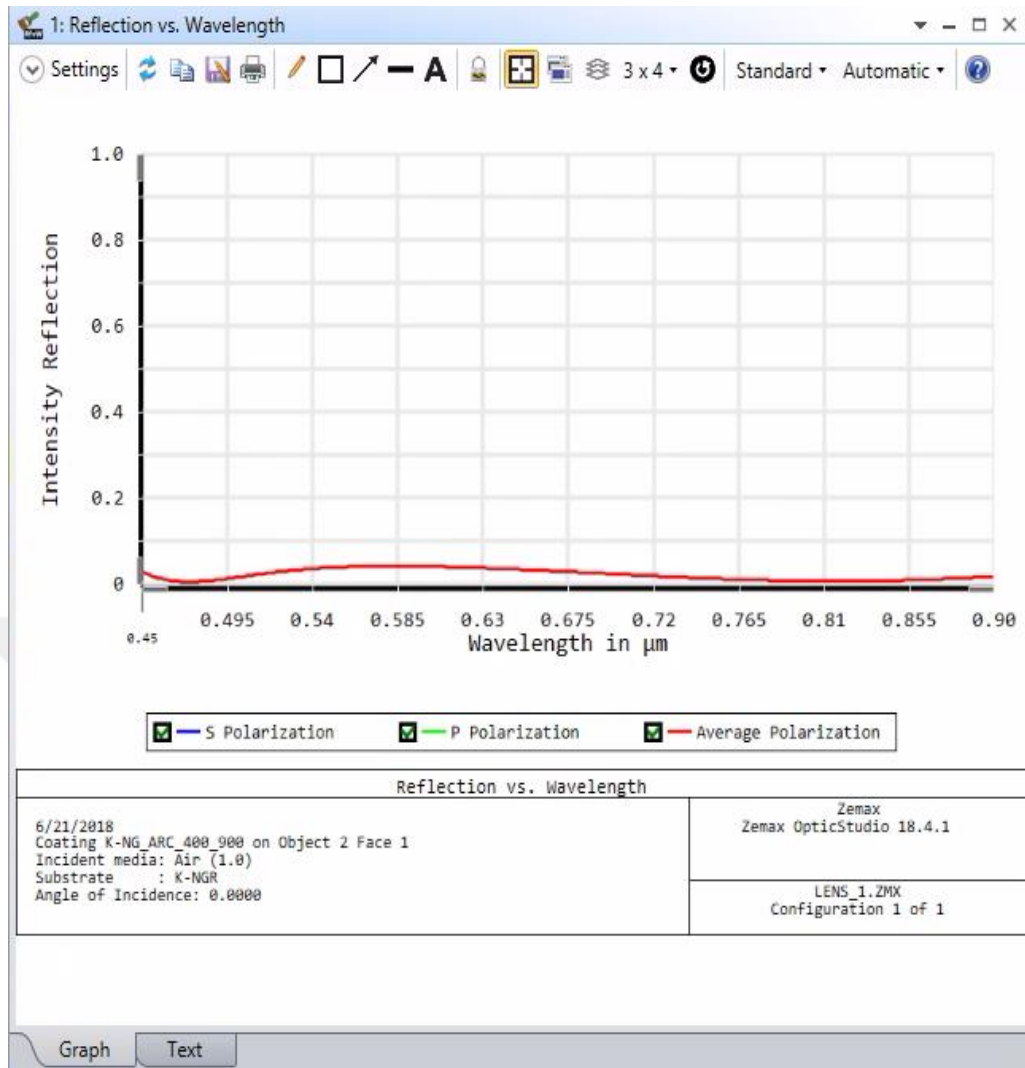


Şekil 3.3. Mikro lens dizisinin üzerindeki yansımaya önleyici kaplamanın gösterimi

Yansımaya önleyici kaplama ile kaplanan mikro lens dizisi ya da yansımaya önleyici özellik kazandırılan mikro lens dizisi ve bu yapıya sahip olmayan mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafikleri Zemax tasarım programında analiz edilmiştir. Bu analiz grafikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yansıma önleyici kaplamaya sahip olmayan mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafiği

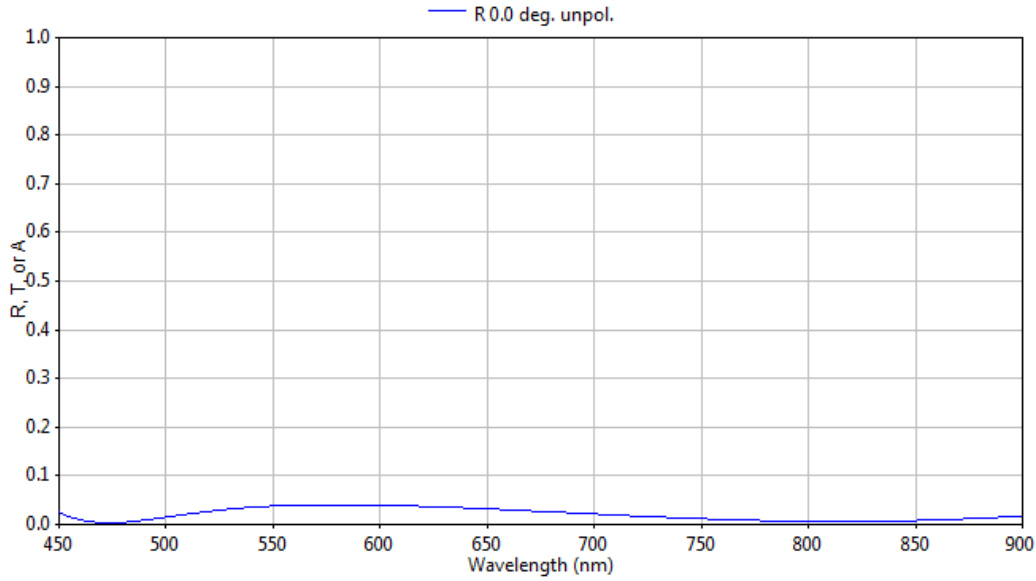


Şekil 3.5. Yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafiği

Şekil 3.4'deki yansıma önleyici kaplamaya sahip olmayan mikro lens dizisini oluşturan polimer fotorezistin yüzey yansıma grafiği incelendiğinde yüzey yansıma miktarının yaklaşık olarak %4 olduğu görülmektedir. Mikro lens dizilerinin yansıma önleyici kaplama ile kaplanarak yansıma önleyici özellik kazandırılmasıyla Şekil 3.5'teki grafikte, 450-550 nm ve 630-900 nm dalga boyları arasında yüzey yansıtma miktarında önemli derecede azalma olduğu ve toplam yüzey yansıtma miktarının %1'in altına kadar indiği tespit edilmiştir.

Aynı zamanda yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin yüzey yansıma miktarı analizleri OpenFilters programı ile de gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da bu analiz sonucunda elde edilen yansıma miktarı grafiği ve Şekil 3.5'deki yansıma miktarı grafiği incelendiğinde iki grafik arasındaki benzerlik açıkça görülmektedir. Bu bakımdan her iki programdan elde edilen bulgulara dayanarak mikro lens dizisinin yüzeyini yansıma

önleyici kaplama ile kaplayarak ortalama yüzey yansıma miktarında azalma sağlandığı görülmektedir.



Şekil 3.6. OpenFilters programından elde edilen yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisinin yansıtıcılık grafiği

Mikro lens dizisinin ve yansıma önleyici kaplamanın yapılarına dair bilgilere erişildikten sonra bu yapıların performans testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında elde edilen bulgular, bu yapıların güneş hücresinin performansına etkisi hakkında nitelikli bilgilere erişebilmesi bakımından oldukça önemlidir.

3.3. Performans Testlerinin Bulguları

Mikro lens dizisinin ve yansıma önleyici kaplamanın yapısı elde edildikten sonra yansıma önleyici kaplamaya sahip olmayan düz yüzeyli güneş hücresinin, yansıma önleyici kaplamaya sahip olmayan mikro lens dizili güneş hücresinin (MLA'lı) ve yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisine sahip olan güneş hücresinin (ARC-MLA'lı) performans testleri yürütülmüştür. Bu testler sonucunda yukarıda belirtilen güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine giren ışık enerjisi miktarı verilerine ulaşılmıştır. Performans testleri sonrası bu güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine giren ışık enerjisi miktarı verileri ışığın geliş açısı dikkate alınarak Çizelge 3.3'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinin fotoaktif bölgelerine farklı giriş açılarında giren ışık enerjisi miktarı verileri

Işığın Giriş Açısı (°)	Düz Yüzeyli (W)	MLA'lı (W)	ARC-MLA'lı (W)
0	0.49525	0.51722	0.52425
10	0.45506	0.50509	0.51542
20	0.42302	0.47710	0.48951
30	0.38922	0.44407	0.44886
40	0.33173	0.37860	0.39283
50	0.27561	0.32032	0.32476
60	0.21815	0.25228	0.25905
70	0.13244	0.19091	0.19316
80	0.05160	0.13994	0.14232

Çizelge 3.3'teki verilerden yola çıkılarak %30 performansa sahip ve ortalama çıkış voltaj değeri 2,35 V olan MJ güneş hücrelerinin ürettiği akım ve güç bilgilerine ulaşılmıştır. Farklı yüzey yapılarına sahip güneş hücrelerinden üretilen akım bilgileri Çizelge 3.4'te, güç bilgileri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

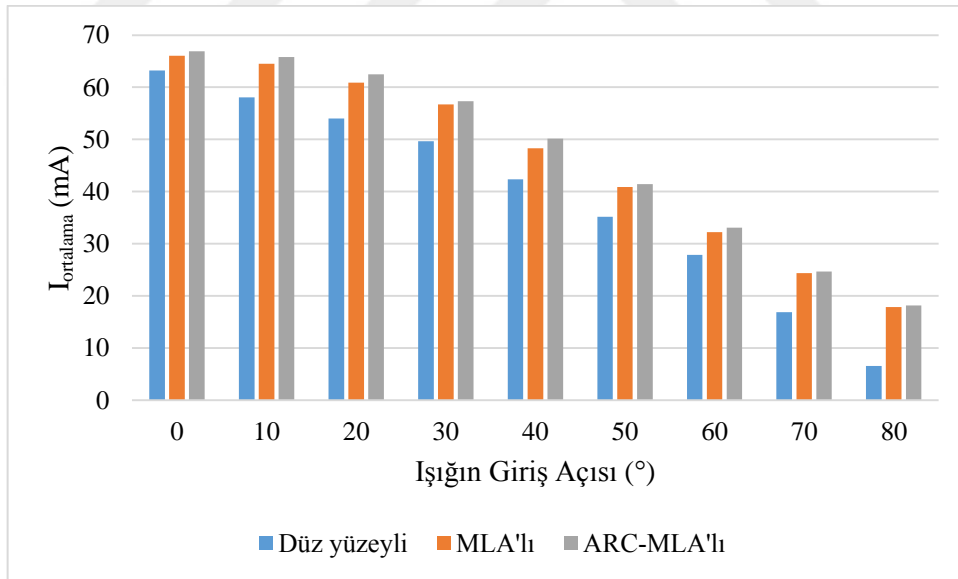
Çizelge 3.4. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açılarına sahip ışık altında üretilen akım miktarları

Işığın Giriş Açısı (°)	Düz Yüzeyli (mA)	MLA'lı (mA)	ARC-MLA'lı (mA)
0	63.223	66.0275	66.926
10	58.093	64.480	65.798
20	54.002	60.906	62.491
30	49.688	56.689	57.302
40	42.349	48.332	50.148
50	35.184	40.892	41.459
60	27.848	32.206	33.070
70	16.906	24.372	24.659
80	6.588	17.864	18.169

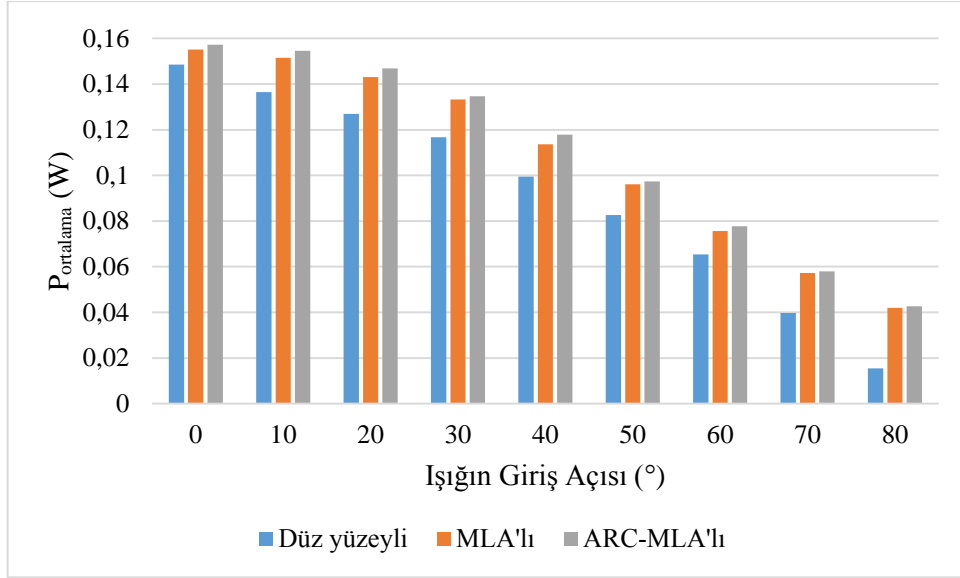
Çizelge 3.5. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açlarına sahip ışık altında üretilen güç miktarları

Işığın Giriş Açısı (°)	Düz Yüzeyli (W)	MLA'lı (W)	ARC-MLA'lı (W)
0	0.14857	0.15516	0.15728
10	0.13652	0.15152	0.15462
20	0.12690	0.14313	0.14685
30	0.11677	0.13322	0.13465
40	0.09952	0.11358	0.11784
50	0.08268	0.09610	0.09742
60	0.06544	0.07568	0.07771
70	0.03973	0.05727	0.05794
80	0.01548	0.04198	0.04270

Farklı yüzey yapılarına sahip güneş hücrelerinin ürettiği akım miktarı verilerinin ışığın geliş açısına dayalı olarak karşılaştırılması Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Benzer şekilde farklı yüzey yapılarına sahip güneş hücrelerinin ürettiği güç miktarı verilerinin ışığın geliş açısına dayalı olarak karşılaştırılması da Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



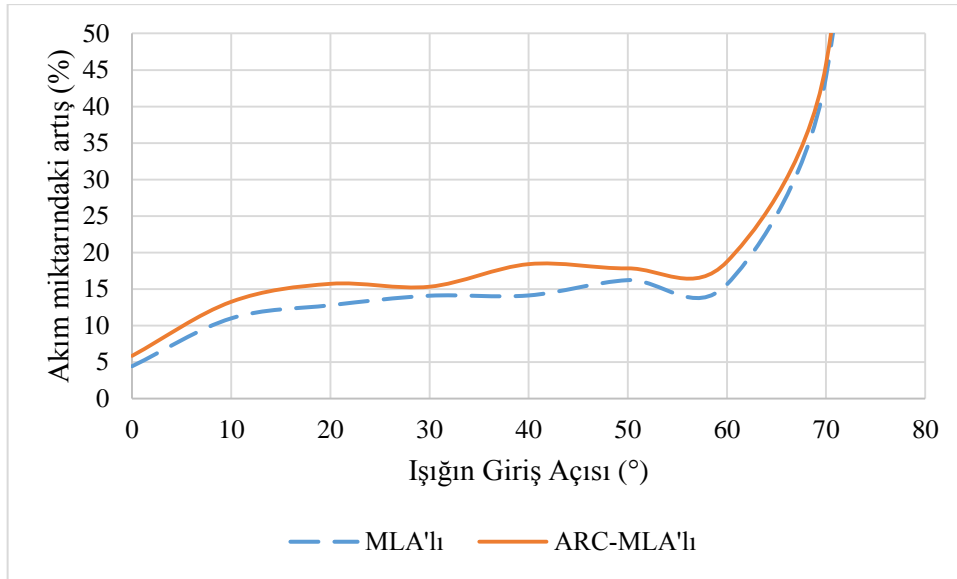
Şekil 3.7. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açlarına sahip ışık altında üretilen akım miktarlarının grafiksel olarak karşılaştırılması



Şekil 3.8. Düz yüzeyli, MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinden farklı giriş açılara sahip ışık altında üretilen güç miktarlarının grafiksel olarak karşılaştırılması

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de farklı yapıdaki güneş hücrelerinden üretilen akım ve güç değerleri arasındaki farkın giriş açısının artmasıyla belirginleştiği açık olarak görülmektedir. Diğer bir deyişle bu durum güneş hücresinin fotoaktif bölgelerine giren güneş enerjisi miktarını, güneş hücresi yüzeyinin geometrisini değiştirerek başarıyla değiştirdiğimizin göstergesidir.

İlerleyen süreçte güneş hücresinin yüzeyindeki farklı yapıların değerlendirmesini yapabilmek için güneş hücresine giren güneş ışığının etkisini doğrudan gösteren akım miktarındaki artış incelenmiştir. Düz yüzeyli güneş hücresi ile yansımaya önleyici kaplamasız mikro lens dizilerine sahip güneş hücresi arasında ve düz yüzeyli güneş hücresi ile yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizisine sahip güneş hücresi arasında olmak üzere iki farklı yapının akım artış miktarı denklem 2.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan artış miktarı verileri Şekil 3.9'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. MLA'lı ve ARC-MLA'lı güneş hücrelerinin düz yüzeyli güneş hücresine göre farklı giriş açılarına sahip ışık altındaki akım kazanım miktarı grafiği

Şekil 3.9'deki grafik incelendiğinde, 0° giriş açısında gelen ışık altında MLA'lı güneş hücresinin akım miktarının düz yüzeyli güneş hücresinin akım miktarına kıyaslanması sonucunda akım artış değerinin %4.44 olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde 0° giriş açısına sahip ışık altında ARC-MLA'lı güneş hücresinin akım miktarının düz yüzeyli güneş hücresinin akım miktarına kıyaslanmasıyla akım miktarındaki artışın %5.9'a ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, MJ güneş hücresinin yüzeyinin yaklaşık olarak %5'ni kaplayan kontaklar üzerinden yansiyarak kaybolan ışıkların mikro lens dizileri sayesinde geri kazandırıldığını göstermektedir. Dolayısıyla bu tasarım sonrasında elde edilen mikro lens yapısı ile gelen ışığın kontaklardan ziyade güneş hücresinin fotoaktif bölgelerinin üzerine düşürüldüğü tespit edilmiştir. Bunun yanında mikro lens dizilerinin yansıma önleyici özellik kazandırılması ile güneş hücresinin akım miktarında yaklaşık olarak %1.5 artış elde edilmiştir.

Tasarım gereklilikleri incelendiğinde $\pm 50^\circ$ giriş açılarında gelen güneş ışığının güneş hücresinin fotoaktif bölgesine düşmesi beklenmektedir. Şekil 3.8'de $\pm 50^\circ$ giriş açısında mikro lens dizilerine sahip olan güneş hücresinin düz yüzeyli güneş hücresine göre akım miktarındaki artışın %16.2 daha fazla olduğu görülmektedir. ARC-MLA'lı yapıda ise akım miktarındaki artış %17.8 daha fazladır. Bu durum mikro lens dizisi sayesinde, $\pm 50^\circ$ giriş açısına sahip ışığın güneş hücresinin fotoaktif bölgesine düştüğünü ve kontaklarına düşmediğini göstermektedir. Ayrıca akım miktarındaki artış incelendiğinde kosinüs etkisine dayalı kayıpların da azaltıldığı tespit edilmiştir. Çünkü

sadece kontaklara düşen ışığın güneş hücresinin fotoaktif bölgesine düşmesi sağlandığında akımdaki artış %4.44 olmakta iken buradaki akım miktarındaki artış %16.2 olmuştur.

Bunların yanında genel olarak 0°'den 80°'ye kadar ki tüm açılarda gelen ışık için güneş hücresinin akım miktarındaki değişim de incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda düz yüzeyli güneş hücresinin ürettiği ortalama akım miktarının 39.2 mA olduğu, MLA'lı güneş hücresi ise bu değerden %16.4 daha fazla olarak 45.8 mA akım ürettiğine ulaşılmıştır. ARC-MLA'lı yapının ortalama akım üretim miktarının 46.7 mA olduğu ve bu değer için düz yüzeyli güneş hücresinden %18.7 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Performans testleri incelendikten sonra yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin uzay ortamı etkilerine karşı dayanıklı olup olmadığı konusunda ki değerlendirmeler seçilen materyalin yapısal özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Yansımaya önleyici kaplamaya sahip olmayan mikro lens dizili güneş hücresi ele alındığında, mikro lens dizisi yapısını oluşturan maddenin polimer olmasından dolayı doğrudan uzay ortamı etkilerine karşı dayanıklı olmadığı belirtilmektedir. İlgili literatürde yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizisine sahip güneş hücresi incelendiğinde ise yansımaya önleyici kaplamanın uzay ortamı etkilerine dayanıklı malzemelerden olan Al₂O₃ ve TiO₂ malzemeleri kullanılarak tasarlandığı görülmektedir. Bu malzemeler ile uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücreleri, polimerler ve optik materyaller gibi birçok materyalin uzay ortamı etkilerinden korumasına yönelik koruyucu kaplamalar yapıldığı bilinmektedir. Dolayısıyla tasarımı gerçekleştirilen yansımaya önleyici kaplamanın, koruyucu kaplamaların yapıldığı kaplama teknikleri ile benzer şekilde mikro lens dizisinin yüzeyine kaplandığı takdirde yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizisine sahip güneş hücresinin uzay ortamına dayanıklı olacağı ön görülmektedir.

Çizelge 3.6. Mevcut güneş hücresi ve malzemelerin kütleleri

Malzeme		Kütle (g)	Kütle Oranı (%)
MJ Güneş Hücresi		0.344	58.8
Mikro Lens Dizisi (Polimer fotorezist)		0.236	40.3
Yansımaya önleyici kaplama	Al ₂ O ₃	0.00287	0.5
	TiO ₂	0.0022	0.4
Toplam		0.585	100

Bu değerlendirmelerin yanında malzemelerin güneş hücresi üzerinde kütle bakımından etkisi incelenmiştir. Çizelge 3.6'da görüldüğü üzere toplam kütle 0.585 g olan yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisine sahip MJ güneş hücresinin yaklaşık %40.3'ünün mikro lens dizileri oluşturan polimer fotorezist yapıdan, %0.9'unun yansıma önleyici kaplamayı oluşturan Al_2O_3 ve TiO_2 'den oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum toplam kütlenin yardan fazlasnn MJ güneş hücresine ait olduğunu göstermektedir.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yürütülen bu çalışmada öncelikle literatüre dayalı araştırmalar yürütülmüş ve ilgili çalışmanın problemi bu kapsamda gerekçelendirilmiştir. Bu bağlamda öncelikle ilgili literatüre dayalı değerlendirmelerden elde edilen sonuçların sunulması uygun görülmüştür.

Uzay araçlarının teknoloji, iletişim, ekonomi ve askeri alanlarda avantajının farkına varılmasıyla uzay teknolojilerine verilen önemin yanında yüklenen görevler de artmıştır. Bu sebepten dolayı uzay araçlarının teknik performansının yüksek ve ekonomik açıdan da elverişli olmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte uzay aracının hem faydalı yükünün hem de taşıyıcı sistemlerinin görevini doğru bir şekilde yürütebilmesi için gerekli enerji ihtiyacını sağlayan güç sisteminin performansının geliştirilmesi ön plana çıkmıştır. İlk zamanlarda güç sisteminin birincil enerji kaynaklarından güneş hücrelerinin ilave bir tüketim malzemesine ihtiyaç duymaması, uzun süre kullanılabilirliği, hafifliği ve performansı gibi avantajlarından dolayı birçok uydu, güç ihtiyacını güneş hücreleri ile sağlamıştır. Teknolojik gelişmelerin ışığında uydu görevlerinin ve boyutlarının artması ile artan güç ihtiyacından dolayı güneş hücrelerinin performansını artırma çalışmaları ortaya çıkmıştır. Bunun yanında teknolojik gelişmeler sayesinde uzay ortamının zararları tespit edilmiş ve güneş hücrelerinin bu zararlı etkenlerden korunması gerekliliği anlaşılmıştır. Bu çalışmalar çerçevesinde; güneş hücrelerinin performansını büyük ölçüde etkileyen faktörlerin güneş hücresini oluşturan yarıiletken türü, optik kayıplar olduğu belirlenmiştir. Bu bakımdan en yüksek performansa sahip güneş hücrelerini oluşturan yarıiletken türü ve optik kayıpları engellemek için kullanılan teknikler uzay ortamı etkileri göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda III-V grubu elementlerinden oluşan MJ güneş hücrelerinin en yüksek performansa sahip olduğu ve aynı zamanda radyasyona dayanımı, yüksek gerilim üretmesi, küçük sıcaklık katsayılarına sahip olması gibi avantajlarından dolayı da uzay uygulamalarında tercih edildiği görülmüştür.

Literatür üzerinde yapılan genel değerlendirmelerde ve optik kayıpları engelleme tekniklerinde vurgulanan ağırlık, yüzey alanı ve zararlı uzay ortamı etkileri parametreleri bakımından incelendiğinde güneş hücresinin performansının artırılması sürecinde yansıma önleyici kaplamaların ve mikro lens dizilerinin araştırılmaya değer düzeydeki en önemli değişkenler olduğu tespit edilmiştir.

Bu nedenle uydularda kullanılan çok katmanlı güneş hücrelerinin performansının artırılmasını hedefleyen bu çalışmada uzay ortamı etkilerine uygun yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerini tasarlanması amaçlanmıştır.

Bu bağlamda öncelikle belirlenen isterler yanında uzman görüşleri de dikkate alınarak uzay uygulamalarına yönelik bir mikro lens dizisi ve bu mikro lens dizisine yönelik bir yansımaya önleyici kaplamanın tasarım işlemleri yürütülmüştür.

Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde uzay uygulamalarında kullanılan MJ güneş hücrelerinin performansını artırmak ve uzay ortamı etkilerinden korumak amacıyla yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin üretimine yönelik etkin bir tasarımın geliştirilebilir olduğu temel sonucuna ulaşılmıştır.

Bu bağlamda yürütülen bu çalışmanın temel probleminin çözümü kavuştuğu söylenebilir.

Bu kapsamda; çalışmanın yöntemi, tasarım süreci, performans testleri ve tasarımın son şekli üzerinde elde edilen bulgular hakkında yapılan değerlendirmelerde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

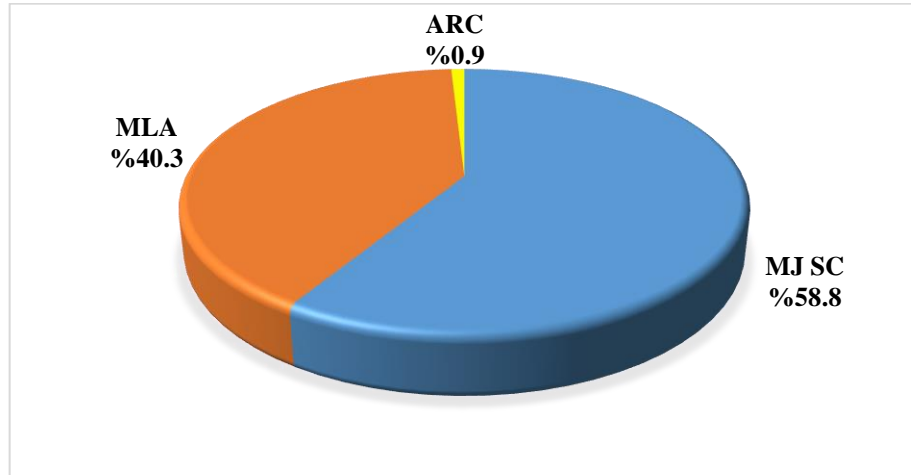
- Araştırmacının TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'nün uzman ve başuzmanlarıyla beraber katıldığı uluslararası kongrede çalışmanın yöntemi üzerine yaptığı sunum ve tartışmalarla bir basılı bildiri (Keser, ve ark., 2016) ve hakemli uluslararası bir dergide de bir makale yayınlamış olması (Keser, ve ark., 2017) nedeniyle ilgili çalışmanın yöntemsel yaklaşımının güçlü bir geçerlik ve güvenilirliğe sahip olduğu sonucuna varılabilir. Bu alanda yapılan ilgili literatür taramasında da çalışmada tercih edilen yöntemi destekleyici çok sayıda bulguya rastlanmıştır (Badar, 2012; Mack, 2007; Daly, 2001).
- Ulaşılan tasarımla sağlanan performans artışı göz önüne alındığında, tasarım yönteminin iyileştirilmesi sürecinde tasarıma uygun programın seçildiği ve elde edilen tasarımın gerçekçi olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada yöntemsel açıdan yapılan literatür incelemesi yanında başuzman ve uzman görüşlerinin oldukça önemli ve faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Bu alanda yapılan kapsamlı literatür incelemesi sonucunda; uzay uygulamalarına yönelik MJ güneş hücrelerinin performansının artırılması

sürecinde yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerinin daha önce çalışılmamış olması nedeniyle özgün bir çalışma olduğu kanaatine varılmıştır.

- Tasarım sürecine ait isterler, literatüre dayalı olarak uydu platformlarında kullanılan güneş hücrelerinin ve optik yapıların yüksek performansta çalışabilmesi için ihtiyaç duyduğu yapısal ve tasarım gerekliliklerini dikkate alarak belirlendiği için tasarlanan yapının uydu platformlarında kullanılmaya uygun olduğu söylenebilir.
- Tasarımın gerçekleştirilmesi için tercih edilen malzemelerin, uzay kalifiye olan yani gerekli testlerden sonra zararlı uzay ortamına karşı dayanıklı olduğuna karar verilen malzemelerden seçilmesiyle zararlı uzay ortamına karşı dayanıklı bir yapının sağlandığı düşünülmektedir. Tasarlanan bu uzay kalifiye yapı ile güneş hücresinin aynı zamanda belirtilen zararlı etkilerden korunması sağlanmıştır.
- Tasarım sürecinde ilgili yapının üretim kabiliyetlerinin dikkate alınmasıyla, meydana gelmesi beklenen tasarım yenileme işlemlerinin önüne geçilerek iş gücü, süre ve maliyet bakımından kazanım sağlanmasının yanında TÜRKSAT-6A ve gözlem uydusu İMECE'nin yapıldığı TÜBİTAK UZAY'a ait OPMER'de çalışan uzman ve başuzmanların görüşleri de alınarak tasarım sonrası elde edilen yapının üretilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Tasarlanan yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerine ait, yüzey tipi ve optik açıklık parametrelerinin kullanılan güneş hücresinin ön kontak yapısına göre belirlenmesi yanında lens kalınlığı, cam tipi ve asferiklik parametrelerinin de üretim yöntemi kabiliyetlerine göre şekillenmesinden kaynaklı olarak tasarım işlemlerinin optik etkenlere ek olarak diğer etkenler tarafından da karakterize edildiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Tasarım sonrasında elde edilen yapıların karakteristik özelliklerinin literatürde sunulan yapıların karakteristik özellikleriyle (Nam, ve ark., 2013; Tseng , ve ark., 2011) benzerlik göstermesinin ilgili tasarımın doğru

şekilde yapıldığını ve üretilebilir olduğu sonucunu desteklediği söylenebilir.

- Çizelge 3.6'da sunulan bulgulardan 20 mm x 20 mm ebadındaki bir yansıma önleyici özellikli mikro lens dizisine sahip MJ güneş hücresinin toplam kütesinin 1 g'dan daha az bir şekilde 0.585 g olduğu görülmektedir. Bu hücre üzerindeki mikro lens dizilerinin toplam kütledeki oranın %40.3 olduğu, yansıma önleyici kaplamanın ise toplam kütleye etkisinin %1'den daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum beklenen düşük ağırlık değerleri için yapılan tasarımın literatürle de (Keser, ve ark., 2017; Bailey ve Raffaele, 2003) büyük ölçüde uyum göstermesi açısından anlamlı bir sonuç olarak değerlendirilmektedir (Şekil 4.1).
- Çizelge 3.6'da sunulan bulgular aynı zamanda zaten sınırlı olan uydu yüzeyinde fazladan alana ihtiyaç duymaksızın ve düşük kütleli yapısıyla performans üzerinde olumlu etkide bulunması beklenmektedir. Dolayısıyla bu sonucun fırlatma maliyetleri yanında uzun vadede uydunun ömrüne de olumlu katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Tasarlanan yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerine sahip MJ güneş hücresinin kütle dağılımı

- Performans testleri sonrasında elde edilen bulgular güneş hücresinin performansındaki artış miktarının literatürdeki çalışmalarda yer alan (Tseng , ve ark., 2011; Nam, ve ark., 2013) bulgularla uyumlu olduğu ve

kullanılan tasarım (Zemax ile OpenFilters) programlarından elde edilen bulguların birbirine benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.5 – Şekil 3.6). Bu durum tasarlanan yapıya dair ulaşılan verileri doğrular nitelikte olduğundan ilgili tasarımın bilimsel ve uygulanabilir nitelikte olduğu sonucuna varılabilir.

- Tasarım sonrasında elde edilen yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerinin FF_{MLA} değerinin %100 olması mikro lens dizilerinin güneş hücresi üzerinde aralıksız olarak dizildiğini (Şekil 3.1 – 3.2), bundan dolayı üzerine gelen ışığı güneş hücresinin fotoaktif bölgesine düşürebilme bakımından yüksek performanslı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Tasarımı gerçekleştirilen mikro lens dizisiyle 0° giriş açısına sahip ışık altında güneş hücresinin akım üretim performansında %4.4 seviyesinde artış sağlanabildiği ve mikro lens dizisinin yansıma önleyici kaplamayla kaplanması sonrasında %1.5'lik artışla güneş hücresinin akım üretim performansının toplam %5.9'a çıkmasıyla tekrar artış görülmesi iki yapının birlikte kullanılmasıyla elde edilen hibrit yapının daha faydalı olduğunu göstermiştir.
- Elde edilen yapılar ile güneş hücresine $\pm 50^\circ$ giriş açılarında gelen güneş ışığının kontaklara düşmeden fotoaktif bölgeye iletilmesini ve akım üretim performansında MLA'lı yapıda %16.2 artış sağlandığını bunun yanında ARC-MLA'lı yapıda ise 17.3 artış sağlandığını göstermiştir. Bu artış miktarlarından yola çıkarak ulaşılan son tasarımla, ön kontaklardan kaynaklanan ve kosinüs etkisine dayalı kayıpların giderildiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 3.8).
- 0° den 80° ye kadar olan tüm açılarda gelen ışık için incelendiğinde akım üretim performansındaki artışın mikro lens dizisi ile %16.4, yansıma önleyici özellikli mikro lens dizileri ile %18.7 daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum tasarlanan yapının, 50° den daha büyük açılarda gelen ışınlarında performansa katkı sağlayabildiğini göstermektedir (Şekil 3.8).

- Tasarımı gerçekleştirilen MLA'lı güneş hücresinin polimer bir yapıdan oluşması sebebiyle zararlı uzay ortamı etkilerine dayanıklı olmayacağı bilinmektedir. Bu bağlamda ARC-MLA'lı güneş hücresinin yapısı uzay ortamı etkilerine karşı dayanıklı malzemelerden oluştuğu ve uzay ortamından koruyucu kaplamalar ile benzerlik gösterdiği için bu yapının uzay ortamına dayanıklı bir yapı olacağı sonucuna ulaşılmış olması ilgili literatürle de uyumlu olması açısından anlamlıdır (Pellicori, ve ark., 2014; De Rooij, 2010).
- Performans artışının bir kısmı seçilen güneş hücresinin özelliklerinden bir kısmı da bu çalışmayla geliştirilen tasarımın yapısal özelliklerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda %21'lik performansa sahip Si güneş hücreleri yerine %30'luk performansla %9 daha fazla performansa sahip çok katmanlı güneş hücreleri tercih edilerek %42.8'lik bir performans artışı oranı sağlanmıştır. Bunun yanında tasarımla birlikte daha önce belirtildiği üzere yansıma önleyici özellikli mikro lens diziler ile birlikte performanstaki artış oranı %51.28'e yükselmiştir. Bu değer tercih edilen çok katmanlı güneş hücrelerinin performansı üzerinde bu çalışma ile yapılan tasarımın etkisi olarak %8.48'lik artışa karşılık gelmektedir (Çizelge 4.1).
- MJ güneş hücreleri bakımından performans artışı oranı incelendiğinde, güneş hücresinin üzerinin mikro lens dizileri ile şekillendirilmesi ile performans artışı oranı %4.4'e yükselirken, yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerine sahip olan güneş hücrelerinde bu oranın %5.9'a yükseldiği sonucuna ulaşılmaktadır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Bu çalışmada tasarlanan ARC-MLA'lı yapının karşılaştırmalı performans değerleri

Güneş Hücresi	Yüzey Tipi	Performans Değeri (%)	Performans Farkı (Si'ye göre) (%)	Performanstaki Artış Oranı (Si'ye göre)	Performanstaki Artış Oranı (MJ'ye göre)
Si Güneş Hücresi	Düz yüzeyli	21	-	-	-
MJ Güneş Hücresi	Düz yüzeyli	30	9	42.8	-
	MLA'lı	31.32	10.3	49.04	4.4
	ARC-MLA'lı	31.77	10.77	51.28	5.9

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere tercih edilen güneş hücresi ve geliştirilen tasarım ve performansı hakkında elde edilen bulgu ve sonuçlardaki anlamlı ve beklenen iyileşme ile yürütülen bu çalışmanın başarıyla tamamlandığı sonucuna varılabilir.

Elde edilen bulgulara dayalı olarak geliştirilen sonuçlar ilgili tasarımın üretilebilirlik yönünden kapsamlı bir içeriğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda uzay platformlarına yönelik yürütülecek uzay kalifiye güç sistemlerinin üretimi sürecinde bu alanda çalışan araştırmacılar için bu çalışmayla geliştirilecek bilimsel ve uygulanabilir önerilerin büyük bir öneme sahip olduğu düşünülmektedir.

- Tasarlanan bu yapının üretilebilirlik, uygulanabilirlik ve performans göstergeleri dikkate alındığında yansıma önleyici özellikli mikro lens dizilerinin uzay uygulamalarında kullanımına yönelik üretim sürecinin gerçekleştirilmesi ve iyileştirilmesi açısından bu alanda çalışan araştırmacılar için araştırılmaya değer görülmektedir.
- Özellikle yeni araştırmacılar için bu çalışma ile benimsenen metodolojik yapının örnek ve önerilebilir bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir.
- Performans artışının yanında uzay ortamına karşı dayanıklı bir yapıda olması bakımından ilgili yapının üretiminin ve üretim kabiliyetlerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu açıdan ülkemizde optik tasarım, fotolitografi ve kaplama gibi konulara yönelim teşvik edilmelidir.
- Tasarım işlemlerinde öncelikli olarak güneş hücresinin ön kontaklarından kaynaklanan yansımaları engellemek için yüzeydeki kontak yerleşimi dikkate alındığından kontakların yapısındaki iyileştirmelerin ya da yüzeyde kapladığı alanı azaltmaya yönelik çalışmaların bu kapsam çerçevesinde araştırılması önerilmektedir.
- Tasarım sürecinde çeşitli parametreleri bir araya getirip optimizasyon yapabilen programların kullanıldığı ve maliyetlerinin yüksek olduğu düşünüldüğünde bu alanda yerli optimizasyon programlarının geliştirilmesi özellikle son zamanlarda TÜBİTAK Uzay OPMER, ASELSAN ve ROKETSAN gibi merkezlerde optomekanik ve optoelektronik alanlarında altyapı yatırımlarının arttığı ülkemizde mali

kaynakların verimli kullanılmasını sağlamak açısından ilgililere önerilmektedir.

- Yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin, yüzeyinin %5'i ön kontaklarla kaplı olan MJ güneş hücrelerinde dikkate değer bir performans artışı meydana geldiği bu çalışmayla tespit edilmiştir. Bu bağlamda yüzeyinin %15'i gibi büyük bir kısmının ön kontaklarla kaplı olan ve uzay uygulamalarında halen kullanılmakta olan Si ve diğer güneş hücrelerinde böyle bir tasarımın uygulanmasının performans etkisi araştırılabilir.
- Yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizileri ile $\pm 50^\circ$ giriş açılarında gelen ışığın güneş hücresinin fotoaktif bölgesine düşürüldüğü dikkate alındığında CPV'lerdeki giriş açısının değişimine bağlı olarak performanstaki azalmanın önüne geçmek açısından bu yapının CPV sistemlerde kullanılması konusunun incelenmeye ve araştırmaya değer olduğu görülmektedir.
- LEO yörüngede çalışan bir uyduya göre tasarlanan yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizilerinin güneş hücrelerinin performansına olan katkısından dolayı GEO yörüngede çalışan ve bir devletin altyapısı açısından oldukça önemli bir yere sahip olan iletişim uydularına yönelik tasarlanması ve performansa olan etkilerinin araştırılması önerilmektedir.
- Tasarlanan yansımaya önleyici özellikli mikro lens dizisinin üretimi gerçekleştirildikten sonra uzay kalifikasyon testlerinin yürütülmesi yanında bu testler için altyapı imkanlarının da geliştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- AIAA, 2005. Qualification and Quality Requirements for Space Solar Cells (AIAA S-111A-2005). *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Standards*.
- Al-Hamdani, A.H., 2013. Experimental and Theoretical Design for A New Array Micro-Lenses Silicon Solar Cell Concentrator. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(3), pp. 169-172.
- Al-Turk, S., 2011. *Analytic Optimization Modeling of Anti-Reflection Coatings for Solar Cells*. Hamilton: Master Thesis, Master of Applied Science, McMaster University.
- Anwar, A. ve diğ erleri, 2015. Outgassing Effect on Spacecraft Structure Materials. *International Journal of Astronomy, Astrophysics and Space Science*, 2(4), pp. 34-38.
- Aparicio, M., Sebastiá, J., Sogorb, T. & Llario, V., 2013. Modeling of Photovoltaic Cell Using Free Software Application for Training and Design Circuit in Photovoltaic Solar Energy. P. H. Arman, dü. *New Developments in Renewable Energy*.
- Aydın, K., 2010. *Design and implementation of a flywheel energy storage unit for integrated satellite power and attitude control system*. Ankara: Master Thesis, Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Azur Space, 2016. *Space Solar Cells*. [Çevrimiçi] Available at: http://www.azurspace.com/images/products/0003421-01-02_DB_3G30C_80x80.pdf [Erişildi: 2018 05 28].
- Badar, F., 2012. *Fabrication of Microlens in Polymers with Thermal Reflow*. Barcelona: Master Thesis, Institut Antoni de Martí i Franquès, University of Barcelona.
- Bahaidarah, H., Baloch, A. & Gandhidasan, P., 2016. Uniform cooling of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 57, pp. 1520-1544.
- Bahrami, A., Mohammadnejad, S., Abkenar, N. & Soleimaninezhad, S., 2013. Optimized Single and Double Layer Antireflection Coatings for GaAs Solar Cells. *International Journal of Renewable Energy Research*, Cilt 3, pp. 79-83.
- Bailey, S., Raffaele, R., 2003. IIIId-2 – Operation of Solar Cells in a Space Environment. T. C. L. Markvart, dü. *Practical Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, pp. 705-721.
- Bailey, S., Raffaele, R., 2003. Space solar cells and arrays. %1 içinde *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: John Wiley and Sons.
- Baş, M., Akyol, İ., Uludağ, M. & Aslan, A., 2012. *Turksat 3USAT küp uydusu için elektrik güç sistemi tasarlanması*. İstanbul, IV. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı, UHUK-2012-076, Hava Harp Okulu.
- Bayar, C., 2009. *Optical Design and Analysis of a Riflescope System*. Ankara: Master Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

- Bedeloğlu, A., 2009. *Development of Fibres with Photovoltaic Effects*. İzmir: Ph. D. Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Beiser, A., 2015. *Concepts of Modern Physics*. Seventh Edition dü. New Delhi: McGraw Hill Education Private Limited.
- Berkeley, L., 2018. *X-Ray Interactions With Matter*. [Çevrimiçi] Available at: <http://henke.lbl.gov/cgi-bin/density.pl> [Erişildi: 09 07 2018].
- Bielke, A. ve diğerleri, 2004. Fabrication of aspheric optics – process challenges arising from a wide range of customer demands and diversity of machine technologies. *Proc. SPIE*, Cilt 5252, pp. 1-12.
- Boz, O.H., 2011. *Current Alternative Energy Resource Photovoltaic Solar Cells*. Balıkesir: Master Thesis, Balıkesir University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Camp, C.D., Tung, K.K., 2007. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. *Geophysical Research Letters*, Cilt 34, p. L14703.
- Chaar, L.E., Lamont L.A., Zein N.E., 2011. Review of Photovoltaic Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 15, p. 2165–2175.
- Chattopadhyay, S. ve diğerleri, 2010. Anti-reflecting and photonic nanostructures. *Materials Science and Engineering R*, Cilt 69, pp. 1-35.
- Chen, C. ve diğerleri, 2011. The effect of surface treatment on omni-directional efficiency of the silicon solar cells with micro-spherical texture/ITO stacks. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Cilt 95, p. 2545–2548.
- Chen, Y. ve diğerleri, 2015. Reducing optical losses in organic solar cells using microlens arrays: theoretical and experimental investigation of microlens dimensions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, Cilt 17, pp. 3723--3730.
- Cihan, M., 2011. *A new conceptual structure design for nanosatellites*. İstanbul, Ph. D. Thesis, İstanbul University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Cloude, S., 2003. *An Introduction to Electromagnetic Wave Propagation and Antennas*. 2 ed. London: Taylor & Francis.
- Copeland, S., 2012. *The Deep Space Radiation Environment*. [Çevrimiçi] Available at: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/copeland2/> [Erişildi: 23 5 2018].
- Daly, D., 2001. *Microlens Arrays*. 1. dü. London and New York: Taylor&Francis.
- De Rooij, A., 2010. Corrosion in Space. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, pp. 1-15.
- Diedenhofen, S. ve diğerleri, 2012. Broadband and omnidirectional anti-reflection layer for III/V multi-junction solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Cilt 101, pp. 308-314.

- Drake, S., 2014. *What are the Energy Range Definitions for the Various Types of Electromagnetic Radiation?* [Çevrimiçi] Available at: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/headates/spectrum.html> [Erişildi: 26 05 26].
- Dzhafarov, T., 2013. Silicon Solar Cells with Nanoporous Silicon Layer. A. Morales-Acevedo, dü. *Solar Cells - Research and Application Perspective*. basım yeri bilinmiyor:İntech, pp. 27-58.
- Fischer, R.E., Tadic-Galeb, B.; Yoder, Paul R., 2008. *Optical System Design*. 2 dü. New York: McGraw-Hill.
- Fortescue, P., Stark, J., Swinerd, G., 2004. *Spacecraft Systems Engineering*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Glaubitt, W. & Löbmann, P., 2012. Antireflective coatings prepared by sol-gel processing: Principles and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(12), pp. 2995-2999.
- Guidice, D. A., Davis, V. A., Curtis, H. B., et al., 1997. *Photovoltaic Array Space Power Plus Diagnostics (PASP Plus) Experiment- Final report*, basım yeri bilinmiyor: NASA.
- Guo, C., Kong, M., He, W., 2016. Optimization of the spectral performance of an antireflection coating on a micro-spherical substrate. *CHINESE OPTICS LETTERS*, 14(9), pp. 093101-1-4.
- Guo, X. ve diğerleri, 2014. Design of broadband omnidirectional antireflection coatings using ant colony algorithm. *Optics Express*, 22(S4), pp. A1137-A1144.
- Han, H. ve diğerleri, 2013. Improve GaAs solar cells efficiency by using high-transmittance textured PDMS film. *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices II*, Cilt 8620V1, pp. 1-6.
- Helton, J.T., 2005. Laser Direct Write Grayscale Photolithography. *National Nanotechnology Infrastructure Network*, pp. 46-47.
- Hubenova, Y., Mitov, M., 2012. Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in Direct Photosynthetic Plant Fuel Cell. *Bioelectrochemistry*, Cilt 87, pp. 185-191.
- Iles, P.A., 2001. Evolution of space solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Cilt 68, pp. 1-13.
- ISO 14880-1:2016, 2016. *Optics and photonics - Microlens arrays - Part 1: Vocabulary and general properties*, basım yeri bilinmiyor: International Organization for Standardization.
- Ivan, M., Vaneya, J., Verhaartb, D. & Meindersa, E., 2009. Direct Laser Write (DLW) as a Versatile Tool in Manufacturing Templates for Imprint Lithography on Flexible Substrates. *Alternative Lithographic Technologies*, Cilt 7271, pp. 72711S-1 - 72711S-8.
- Jakhar, S., Soni, M. & Gakkhar, N., 2016. Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 60, pp. 41-59.

- James, B.F., Norton, O.W., 1994. *The Natural Space Environment*, Alabama: NASA Reference Publication 1350.
- Jung, S.M., Kim, Y.H., Kim, S.I., Yoo, S.I., 2011. Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III-V solar cell. *Current Applied Physics*, Cilt 11, pp. 538-541.
- Kaminski, P., Lisco, F. & Walls, J., 2014. Multilayer Broadband Antireflective Coatings for More Efficient Thin Film CdTe Solar Cells. *Journal of Photovoltaics*, Cilt 4, pp. 452-456.
- Kang, E. ve diğerleri, 2015. Improved Light Absorption of GaInP/GaAs/Ge Solar Cell Modules With Micro/Nanoengineered Coverglasses. *Journal of Photovoltaics*, 5(4), pp. 1130-1136.
- Kaplan, Z., 2012. *Photovoltaic System Design*. Kütahya: Master Thesis, Dumlupınar University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Karlsruhe Institute of Technology, 2015. *Invisibility cloak might enhance efficiency of solar cells*. [Çevrimiçi] Available at: <https://phys.org/news/2015-09-invisibility-cloak-efficiency-solar-cells.html> [Erişildi: 22 2 2018].
- Keser, Ö.F., Yenisoy, A., İdare, B. , 2016. Development of Anti-Reflective Micro Lens Arrays for Multi Junction Solar Cells Used on Satellite Platforms. *ISITES ,4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Issue A13, pp. 1839-1848.
- Keser, Ö.F., Yenisoy, A., İdare, B., 2017. Development of space qualified microlens arrays for solar cells used on satellite power systems. *Sakarya University Journal of Science*, 21(4), pp. 627-635.
- Kischkat, J. ve diğerleri, 2012. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride. *Applied Optics*, Cilt 51, pp. 6789-6798.
- Kloe, 2018. *Kloe Materials*. [Çevrimiçi] Available at: <http://www.kloe.fr/equipement/en/materials> [Erişildi: 28 05 2018].
- Kosten, E.D., 2014. *Optical designs for improved solar cell performance*. Los Angeles: Ph.D. Thesis, California Institute of Technology.
- Kouzehkonani, O.T., 2014. *Production of Hydrogenated Amorphous Silicon Based Antireflection Coatings and Investigation of Optical Properties*. Ankara: Master Thesis, Department of Renewable Energy, Hacettepe University.
- Kuru, E., 2005. *Satellites: Purposes of use and a practice*. Adana: Master Thesis, Çukurova University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Larouche, S., Martinu, L., 2008. OpenFilters: open-source software for the design, optimization, and synthesis of optical filters. *Applied Optics*, Cilt 47, p. C219–C230.

- Lee, J., Choi, K. & Yoo, H., 2015. Innovative SU-8 Lithography Techniques and Their Applications. *Micromachines*, Cilt 6, pp. 1-18.
- Lin, G. ve diğerleri, 2013. III-V Multi-Junction Solar Cells. P. S. Pyshkin, dü. *Optoelectronics - Advanced Materials and Devices*. basım yeri bilinmiyor: Intech, pp. 445-471.
- Lou, Y., Luo, H., Hu, T., Li, H., Fu, J., 2013. Toxic effects, uptake, and translocation of Cd and Pb in perennial ryegrass. *Ecotoxicology*, Cilt 22, pp. 207-214.
- Mack, C.A., 2007. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. London: John Wiley & Sons.
- Menteş, E., 2015. *Kompozit 3U küp uyduların yapısal analiz ve tasarımları*. İstanbul: Master Thesis, Istanbul Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Miller, D.W., Keese, J., 2003. *MIT Open Course Ware, Massachusetts Institute of Technology, Spacecraft Power Systems*. [Çevrimiçi] Available at: https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-851-satellite-engineering-fall-2003/lecture-notes/l3_scpowersys_dm_done2.pdf [Erişildi: 10 01 2018].
- Minton, T. ve diğerleri, 2010. Protecting Polymers in Space with Atomic Layer Deposition Coatings. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(9), pp. 2515-2520.
- Murphy, D.M. , 2001. *The Scarlet Solar Array: Technology Validation and Flight Results*, Hampton: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- Myers, M. ve diğerleri, 2016. *NASA Glenn Research Center Solar Cell Experiment onboard the International Space Station*. Portland, yazarı bilinmiyor
- Nam, M. ve diğerleri, 2013. Concentrating microlens array mounted on an InGaP/GaAs/Ge solar cell for photovoltaic performance enhancement. *Solar Energy*, Cilt 91, p. 374–380.
- National Renewable Energy Laboratory, 2016. *National Center for Photovoltaics, “Best Research-Cell efficiencies”*. [Çevrimiçi] Available at: http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg [Erişildi: 10 01 2017].
- Nussbaum, P. ve diğerleri, 1997. Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Cilt 6, pp. 617-639.
- O’Neill, M., McDanal, A. & Brandhorst, H., 2015. *Recent Space PV Concentrator Advances: More Robust, Lighter, and Easier to Track*. New Orleans.
- Owens, M.J., Forsyth, R.J., 2013. The Heliospheric Magnetic Field. *Living Reviews in Solar Physics*, 10(5), pp. 1-52.
- Özen, Y., 2015. *Development Of III-V Group Solar Cells And Production Of Concentrators Photovoltaic Modules Prototype*. Ankara: Ph. D. Thesis, Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

- Paivanranta, B. ve diğeri, 2008. Antireflective nanostructured microlenses. *Microelectronic Engineering*, Cilt 85, p. 1089–1091.
- Patel M.R., 2005. *Spacecraft Power System*. London: CRC Press.
- Pellicori, S., Martinez, C., Hausgen, P. & Wilt, D., 2014. Development and testing of coatings for orbital space radiation environments. *Optical Society of America*, Cilt 53, pp. A344-A350.
- Philipps, S., Dimroth, F. & Bett, A., 2012. High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells. *Practical Handbook of Photovoltaics*. basım yeri bilinmiyor: Academic Press, pp. 417-448.
- Piszczor, M.F., O'Neill, M.J. et al. , 2006. *The Stretched Lens Array SquareRigger (SLASR) for Space Power*. San Diego, yazarı bilinmiyor
- Polyanskiy, M.N., 2018. *Refractive index database*. [Çevrimiçi] Available at: <https://refractiveindex.info/> [Erişildi: 29 05 2018].
- Pritchard, J., Simon, K., Dowd, C., Joshi, E., 2016. Solar Power Concentrators for Space Applications. *PAM Review: Energy Science & Technology*, Cilt 3, pp. 2-26.
- Reuna, J., 2016. *Anti-Reflective Coatings for Multi-Junction Solar Cells*. Tampere: Master of Science Thesis, Master's Degree Programme in Science and Engineering, Tampere University of Technology.
- Roman, J.S., 2004. State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications. *Advanced Photovoltaic Cell Design, EN548*, pp. 1-8.
- Saylan, S. ve diğeri, 2015. Multilayer antireflection coating design for GaAs_{0.69}P_{0.31}/Si dual-junction solar cells. *Solar Energy*, Cilt 122, pp. 76-86.
- Schulz, U., 2015. *Broadband antireflection coatings for optical lenses*. [Çevrimiçi] Available at: <http://spie.org/newsroom/6093-broadband-antireflection-coatings-for-optical-lenses> [Erişildi: 2018 05 24].
- Selimoğlu, Ö., 2013. *Design and realization of a new concentrating photovoltaic solar energy module based on loss less horizontally tagged light guide*. Ankara: Ph. D. Thesis, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Seyhun, S., 2012. *Kaçak Isınların Analizi, İstenmeyen Etkilerinin Yazılım Destekli Pratik Çözüm Yöntemleriyle Giderilmesi ve Yazılım Modelinin Üretilen Prototipler Üzerinden Alınan Ölçümlerle Doğrulanması*. Ankara: Master Thesis, Graduate School Of Natural Sciences, Ankara Universty.
- 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*, Cilt 50, pp. 1500-1565.
- Sharaf, O.Z., Orhan, M.F., 2015. Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II – Implemented systems, performance assessment, and

future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 50, pp. 1566-1633.

- Sharples, R., 2009. *Optical Design Lecture*. [Çevrimiçi]
Available at: <http://astro.dur.ac.uk/~rsharp/opticaldesign/>
[Erişildi: 29 05 2018].
- Shenai, K., 2007. *Spacecraft Power Systems Design to Minimize Electro Magnetic Interference (EMI) Effects*. Prague, PIERS Proceedings.
- Spinelli, P., 2013. *Light trapping in solar cells using resonant nanostructures*. Amsterdam: Ph.D. Thesis University of Amsterdam.
- Tikhonravov, A., Trubetskov, M. & DeBell, G., 1996. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings. *APPLIED OPTICS*, 35(28), pp. 5493-5508.
- Tippens, P., 1984. *Applied Physics*. 3. dü. basım yeri bilinmiyor: McGraw-Hill/Glencoe.
- Tseng, J. ve diğerleri, 2011. Application of optical film with micro-lens array on a solar concentrator. *Solar Energy*, Cilt 85, p. 2167–2178.
- Unzicker, A., 2014. *Ist die Sonne wirklich gasförmig?*. [Çevrimiçi]
Available at: <https://www.heise.de/tp/features/Ist-die-Sonne-wirklich-gasfoermig-3366334.html>
[Erişildi: 25 02 2018].
- Valdivia, C.E., Desfonds, E., Masson, D., Fafard, S., 2008. *Optimization of antireflection coating design for multijunction solar cells and concentrator systems*. Montréal, Canada, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).
- Vessey, A.L., 2015. *Design and Evaluation of Polycarbonate Microlens Arrays for Hybrid Concentration Photovoltaic Cells*. Delaware: Electrical and Computer Engineering Faculty of the University of Delaware.
- Victoria, M., Domínguez, C., Antón, I. & Sala, G., 2012. Antireflective coatings for multijunction solar cells under wide-angle ray bundles. *OPTICS EXPRESS*, 20(7), pp. 8136-8147.
- Xie, J., Wu, K., Cheng, J. ve arkadaşları, 2015. The micro-optic photovoltaic behavior of solar cell along with microlens curved glass substrate. *Energy Conversion and Management*, Cilt 96, pp. 315-321.
- Wernham, D., 2011. Optical Coatings in Space. *Proc. SPIE*, Cilt 8168.
- Zaitsev, Y., 2007. *Spacedaily - Nuclear Power In Space*. [Çevrimiçi]
Available at: http://www.spacedaily.com/reports/Nuclear_Power_In_Space_999.html
[Erişildi: 04 01 2018].
- Zemax, LLC, 2016. *Getting Started With OpticStudio 16*. [Çevrimiçi]
Available at: http://customers.zemax.com/ZMXLLC/media/PDFLibrary/Brochures/OpticStudio16_GettingStarted.pdf?ext=.pdf
[Erişildi: 2018 05 31].

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Buğrahan İDARE
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA – 1992
e-mail : bugrahanidare@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, OSMANİYE	2014
Yüksek Lisans (Ders Dönemi)	: Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D., KONYA	2014-2016

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2015	KARAR DESTEK LTD. ŞTİ.	Mühendis/MÜDÜR
2016-2017	TÜBİTAK UZAY – TÜRKSAT 6A Haberleşme Uydusu Projesi – Metre Altı Kamera Projesinin Yürütüldüğü Optik Sistemler Grubu –OPMER	Mühendis/Lisansüstü BURSİYER
2017-halen	TÜBİTAK UZAY – İMECE Gözlem Uydusu Projesi – Optik Üretim Grubu – OPMER	Mühendis/Lisansüstü BURSİYER

YABANCI DİL: İngilizce

YAYINLAR

Uluslararası Makale

Keser, Ö.F., Yenisoy, A., İdare, B., 2017. Development of space qualified microlens arrays for solar cells used on satellite power systems. *Sakarya University Journal of Science*, 21(4), pp. 627-635. DOI: 10.16984/saufenbilder.294872

Uluslararası Bildiri

Keser, Ö.F., Yenisoy, A., İdare, B. , 2016. Development of Anti-Reflective Micro Lens Arrays for Multi Junction Solar Cells Used on Satellite Platforms. *ISITES ,4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Issue A13, pp. 1839-1848. Published in:

<http://isites.info/PastConferences/ISITES2016/ISITES2016/papers/A13-ISITES2016ID261.pdf>

Keser, Ö.F., Yenisoy, A., İdare, B. , 2016. Development of Anti-Reflective Micro Lens Arrays for Multi Junction Solar Cells Used on Satellite Platforms. Oral Presentation in: *ISITES ,4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, (ISITES2016) 3-5 Nov. 2016 Alanya/Antalya - Turkey