

**ORGANİK BOYA TABANLI DALGA KILAVUZLU
LÜMİNESANT GÜNEŞ YOĞUNLAŞTIRICILARIN OPTİK
TASARIMLARININ OPTİMİZASYONU VE YENİ BİR
OPTİK SİSTEM TASARIMININ ÖNERİLMESİ**

**THE OPTIMIZATION OF ORGANIC DYE BASED AND
WAVEGUIDE LUMINESCENT SOLAR
CONCENTRATORS' OPTIC DESIGN AND A PROPOSAL
FOR A NEW OPTICAL SYSTEM**

HASAN CAN KARAKUŞ

DOÇ. DR. ŞULE ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

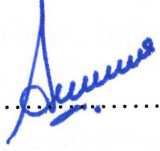
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

HASAN CAN KARAKUŞ'un hazırladığı "**Organik Boya Tabanlı Dalga Kılavuzlu Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcıların Optik Tasarımlarının Optimizasyonu Ve Yeni Bir Optik Sistem Tasarımının Önerilmesi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

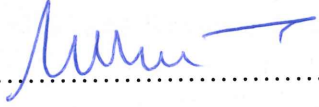
Prof. Dr. Aynur ERAY

Başkan


.....

Doç. Dr. Şule ERGÜN

Danışman


.....

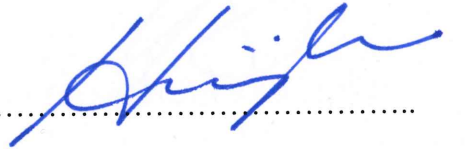
Prof. Dr. Semra İDE

Üye


.....

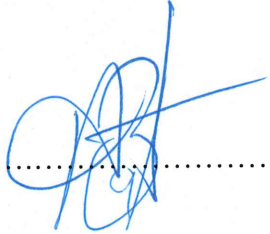
Prof. Dr. Hüseyin SARI

Üye


.....

Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Üye


.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23 / 09 / 2019


HASAN CAN KARAKUŞ

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezimin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin olarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

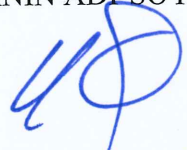
Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamında tezimin aşağıda belirtilen koşullar hariçince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezimin ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

23 / 09 / 2019

(İmza)

ÖĞRENCİNİN ADI-SOYADI


Hasan Can Karakoyun

ÖZET

ORGANİK BOYA TABANLI DALGA KILAVUZLU LÜMİNESANT GÜNEŞ YOĞUNLAŞTIRICILARIN OPTİK TASARIMLARININ OPTİMİZASYONU VE YENİ BİR OPTİK SİSTEM TASARIMININ ÖNERİLMESİ

Hasan Can KARAKUŞ

Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule Ergün

Ağustos 2019, 57 sayfa

Güneş Enerjisi sistemlerine yapılan yatırımlar ve Ar-Ge çalışmalarının sonucunda farklı fotovoltaik sistemler ortaya çıkmıştır. Bu sistemlerin birçoğu sahada kullanıma daha elverişlidir. Bugün yapılan güneş enerjisi yatırımlarında görülmektedir ki elektrik tüketimin daha yoğun olduğu şehir merkezlerinde yapılacak fotovoltaik sistem yatırımlarına da ihtiyaç vardır. Bu ihtiyacı daha verimli ve düşük maliyetli bir şekilde giderecek yeni bir panel tasarımına ihtiyaç vardır.

LGY sistemler, daha az güneş gözesi kullanılması, ucuz optik malzemelerle tasarlanması ve takip sistemine ihtiyaç duymaması sebebiyle binaya entegre fotovoltaik sistem olarak önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında, modelleme ve simülasyon araçları kullanılarak üç farklı boyut ($10 \times 10 \text{ cm}^2$, $30 \times 30 \text{ cm}^2$, $50 \times 50 \text{ cm}^2$) için en verimli panel tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar esnasında LGY sistemlerin kalınlık, boya özellikleri ve miktarı, ayna konfigürasyonu gibi parametrelerinin cihazın optik verimiyle olan ilişkisi irdelenmiş ve her boyut için en iyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda 10×10

cm² cihazlar için % 14,0, 30x30 cm² cihazlar için % 14,2 ve 50x50 cm² cihazlar için % 13,7 değerlerinde optik verime ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: fotovoltaik sistemler, binaya entegre fotovoktaik sistemler, dalga kılavuzu, lüminesant güneş yoğunlaştırıcı

ABSTRACT

THE OPTIMIZATION OF ORGANIC DYE BASED AND WAVEGUIDE LUMINESCENT SOLAR CONCENTRATORS' OPTIC DESIGN AND A PROPOSAL FOR A NEW OPTICAL SYSTEM

Hasan Can KARAKUŞ

Master of Science, Department Renewable Energy

Supervisor: Doç. Dr. Şule Ergün

Ağustos 2019, 57 sayfa

Diverse photovoltaic systems emerged as a result of investments to solar energy systems and research-development activities. Most of those systems are more suitable for field-usage. Today, it is seen through the investments to solar energy systems that, there is also a need of photovoltaic system investments in city centers where electricity consumption is more intensive. Accordingly, there is a need of a new solar panel design by which the electricity need can be satisfied in a more productive and cost-efficient way.

Luminescent Solar Concentrator systems have been proposed as a photovoltaic system which is integrated in the building, as in this way, less solar cells are used, the design can be made with cheap optical materials and there is no need of a tracking system.

In this thesis, the most efficient panel design for three different dimensions (10x10 cm², 30x30 cm², 50x50 cm²) has been realized by using modeling and simulation tools. During these designs, the relationship between the parameters such as thickness, paint

characteristics and quantity, mirror configuration of the Luminescent Solar Concentrator systems and the optical efficiency of the device were examined and optimization studies were performed for each dimension. As a result of these studies, optical efficiency of 14% for 10x10 cm² devices, 14.2% for 30x30 cm² devices and 13.7% for 50x50 cm² devices were achieved.

Keywords: photovoltaic systems, building integrated photovoltaic systems, waveguide, luminescent solar concentrator

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecim boyunca yaşadığım talihsizliklerden güçlenerek çıkmama vesile olan, akademik bilgi ve birikimi ile beni en doğru şekilde yönlendiren, kendime ve akademiye olan inancımı hiçbir zaman kaybetmeme müsaade etmeyen ve hoşgörüsünü benden hiç esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç.Dr.Şule ERGÜN'e,

Tez çalışmama başlarken önerileri ve yönlendirmeleriyle katkı sağlayan Özgür Selimoğlu'na,

Bu süreç boyunca teknik destek ve dostluğunu hiçbir zaman esirgemeyen Eda Dal ve Barış Tanyeli'ye,

Desteğini bir an olsun benden esirgemeyen, bana her zaman inanan ve beni daha iyisini yapabileceğime ikna eden Sevgilim Eda Ünalın'a

Ben doğmadan önce “Asıl olan bilime yandaş/haklıya kardeş olmasıdır” diye yazan ve beni böyle büyüten Babam'a, emek vermeden üretilmeyeceğini öğreten Annem'e ve çalışkanlığı ve başarılarıyla her daim iyi örnek olup bana yeni yollar açan Ablam'a

en içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Mevcut Sorun	10
1.2.Tezin Amacı ve Hedefleri	10
1.3.Tezin Yapısı	11
2. LÜMİNESANT GÜNEŞ YOĞUNLAŞTIRICILAR.....	12
2.1. Giriş 12	
2.2. Güneş Enerjisi	12
2.3. Çalışma Prensibi.....	15
2.4. Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı Sistemlerin Verimi etkileyen mekanizmaları	18
2.5.Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı Birleşenleri	23
2.5.1.Lüminesant Malzemeler	24
2.5.2. Ana Malzeme	29
2.5.3. Güneş gözesi.....	30
3. Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı Sistemin Modellenmesi ve simülasyonu	32
3.1. Tasarım Parametreleri	32
3.1.1. Ana Malzeme	33
3.1.2. Organik Boya	34
3.1.3. Ayna Konfigürasyonu	36

3.2.Ön Tasarımların Yapılması.....	36
3.3. İleri Tasarımların Yapılması.....	42
3.3.1. 10x10 cm ² Cihazların Simülasyonu.....	43
3.3.2. 30x30 cm ² Cihazların Simülasyonu.....	45
3.3.3. 50x50 cm ² Cihazların Simülasyonu.....	47
4. Sonuç	51
EKLER.....	62
EK 1 – Simülasyon çıktıları.....	62
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Yakıt türüne göre Dünya birincil enerji tüketimi,1990-2018[2].....	1
Şekil 1.2: Yıllara göre CO ₂ miktarındaki artış[4].....	2
Şekil 1.3: Yıllara göre Dünya yüzey sıcaklığı [6]	3
Şekil 1.4: Toplam Enerji Tüketimindeki Yenilenebilir Enerjinin Payı, 2015 [7]	4
Şekil 1.5: Dünya’da Yenilenebilir Enerji Güç Kapasiteleri, 2016[7]	4
Şekil 1.6: Avrupa ve Türkiye Güneş ışınımı değerleri[10]	5
Şekil 1.7: Güneş gözesi Verim Arttırma Çalışmaları[11]	7
Şekil 1.8: Güneş enerjisinden elektrik üreten 3 farklı cihaz gösterilmiştir.[21].....	9
Şekil 2.1: AM0 (siyah) ve AM1.5 (gri) Güneş Işınımı Spektrumu[23]	13
Şekil 2.2: AM1.5G Güneş Işınım Spektrumunun Foton Akısı ve Işınım Gücü Grafikleri[23].....	14
Şekil 2.3: Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcıların şematik gösterimi[27]	15
Şekil 2.4: Organik boyalar için Jablonski enerji seviyeleri diyagramı[34]	24
Şekil 2.5: Lumogen F Orange 240 boyasının emilim ve salım spektrumu[34]	25
Şekil 2.6: Organik boyalar için salım dalga boyu ile kuantum verimi arasındaki ilişki[34]	26
Şekil 2.7: CdSe / ZnS ve PbS kuantum noktalarının emilim ve salım spektrumları[34]	28
Şekil 2.8: AM1.5g Güneş ile R305 organik boyanın spektrumları[34]	30
Şekil 3.1: Simülasyonda kullanılan boyanın emilim spektrumu	35
Şekil 3.2: Simülasyonda kullanılan boyanın salım spektrumu.....	35
Şekil 3.3: 1. ve 2. aynaların yerleşimi	37
Şekil 3.4: 3. aynaların yerleşimi	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Optik verimi etkileyen verimi etkileyen mekanizmalarının büyüklükleri .	19
Çizelge 3.1: Yazılımda kullanılan PMMA'nın özellikleri.....	33
Çizelge 3.2: LGY'de kalınlık-verim ilişkisi	34
Çizelge 3.3: Simülasyon yazılımında kullanılan boyanın özellikleri ve Saçılma parametreleri	34
Çizelge 3.4: Aynaların yerleştirme şekilleri ile verim arasındaki ilişki	36
Çizelge 3.5: Simülasyon Çıktıları.....	38
Çizelge 3.6: 10x10 cm ² alana sahip LGY sistemin kalınlık-verim ilişkisi.....	43
Çizelge 3.7: 10x 10 cm ² 'lik LGY sistemin boyutları ve kütlesi	44
Çizelge 3.8: Kullanılacak boya miktarı – verim ilişkisi	44
Çizelge 3.9: 30x30 cm ² alana sahip LGY sistemin kalınlık-verim ilişkisi	45
Çizelge 3.10: 30x30 cm ² 'lik LGY sistemin boyutları ve kütlesi	46
Çizelge 3.11: 30x30 cm ² 'lik LGY sistemde kullanılacak boya miktarı – verim ilişkisi	46
Çizelge 3.12: 50x50 cm ² alana sahip LGY sistemin kalınlık-verim ilişkisi.....	48
Çizelge 3.13: 50x50 cm ² 'lik LGY sistemin boyutları ve kütlesi	48
Çizelge 3.14: 50x50 cm ² 'lik LGY sistemde kullanılacak boya miktarı – verim ilişkisi	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	Enerji
ν	Frekans
h	Planck sabiti
c	Işık hızı
λ	Dalgaboyu
α_k	Sınır açısı
n	Kırma indisi
η_{opt}	Optik verim
R	Levha üzerinden yansıyan güneş ışınımı miktarı
P_{TIY}	Tam iç yansıma olasılığı
η_{em}	Emilim verimi
η_{FLK}	Kuantum verimi
η_{Stokes}	Stokes kayması verimi
η_{ana}	Ana malzeme (dalga kılavuzu) verimi
η_{TIY}	Tam iç yansıma verimi
η_{ye}	Yeniden emilim verimi
C	Yoğunlaştırma oranı
A	Alan
Ω	Katı açısı

U	Etendue
e	Foton enerjisi
k	Boltzman sabiti
T	Sıcaklık

Kısaltmalar

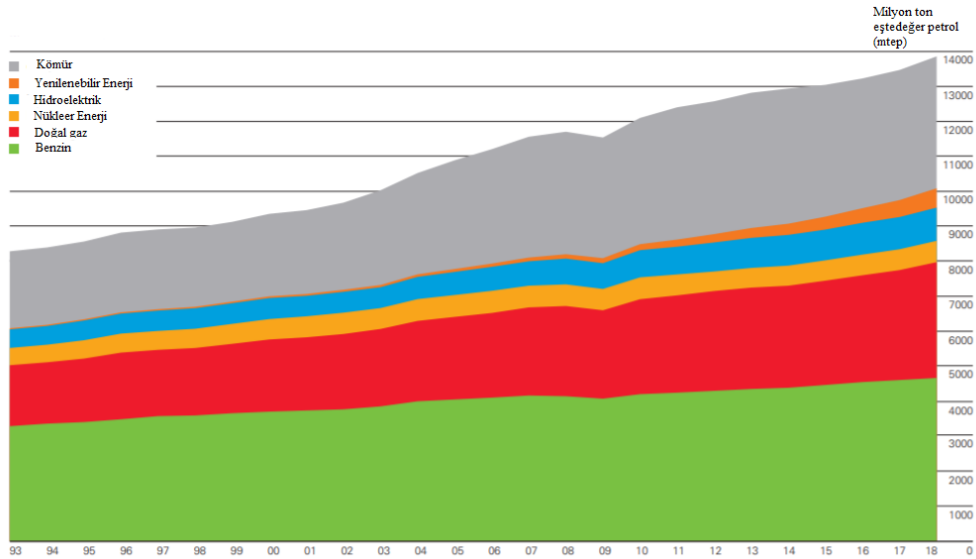
BRICS	Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika
AB-28	28 Avrupa Birliği ülkesi
CSP	Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi
FV	Fotovoltaik
AM0	Atmosfere ulaşan güneş ışınımı spektrumu
AM1.5	Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı spektrumu
IR	Kızılötesi
UV	Morötesi
NIR	Yakın kızıl ötesi
PMMA	Polimetilmetakrilat

1. GİRİŞ

Enerji, en basit haliyle, iş yapabilme yeteneği olarak ifade edilmektedir. Bu sebepten, insanlık tarihi boyunca değişmeyen ihtiyaçlarımızın başında gelmiştir ve yaşamsal faaliyetlerimizin sürdürülebilirliği açısından hava, su ve besin gibi yaşamsal ihtiyaçlarımız kadar önemli bir duruma gelmiş ve bu ihtiyaçlarla iç içe geçmiştir.

Enerji kavramının bugünün dünyasındaki yerini günlük hayatlarımızı irdeleyerek görebileceğimiz gibi yüzyıllar öncesinin yazınsal kaynakları olan Yunan mitolojisinde tanrılar, insan ve enerjiyi imgeleyen ateş arasında kurulan bir üçgenle de görebiliriz. Zeus'un ateşten mahrum bırakarak barbar kalmasını istediği insanlığa bu gücü verdiği için Prometheus cezalandırılır çünkü Prometheus'un, tanrılardan ateşi çalmasıyla, yani ateşin keşfiyle beraber insanlık tarihi, uygarlık tarihine dönüşmeye başlar[1].

Enerji tüketimi, insanların yaşamsal alışkanlıklarının enerji tüketimine dayalı olarak değişmesi, nüfus yoğunluğu ve sanayi devrimi sonucunda hızlı bir şekilde artmıştır. Sanayi devrimiyle beraber oluşan ihtiyaçlar doğrultusunda 16.yy başlarında kömür, 19.yy başlarında ise petrol dönemin yakıtı olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1973 yılında yaşanan petrol krizi ile beraber enerji çeşitlendirmesinin ve yerli kaynaklarla enerji elde edebilmenin önemi anlaşılmaya başlanmış ve yeni enerji kaynakları için çalışmalar yürütülmesi hızlandırılmıştır[1].

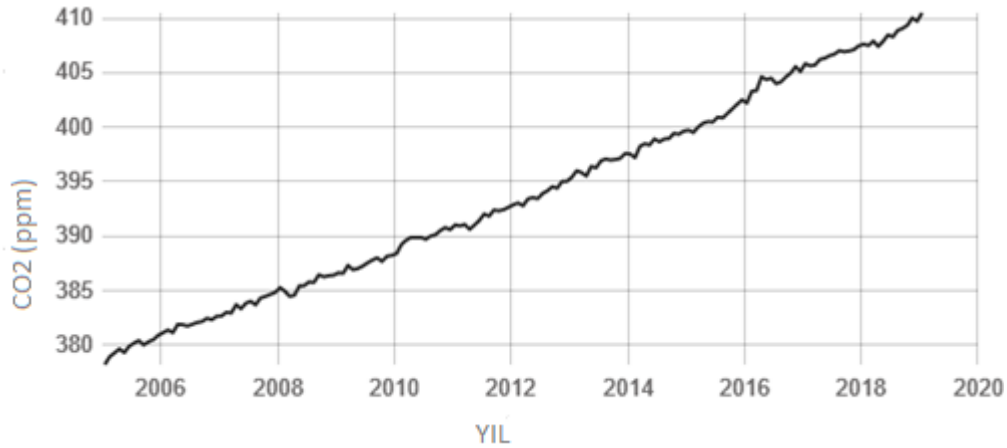


Şekil 1.1: Yakıt türüne göre Dünya birincil enerji tüketimi,1990-2018[2]

Şekil-1.1’de görüldüğü üzere küresel ölçekte enerji tüketimi artmaktadır. Bu artış devam ettiği sürece ihtiyaçları karşılayabilmek ve enerji güvenliğini sağlayabilmek için enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesinin de ihtiyaçlarla beraber arttığı görülmektedir.

Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi üzerine yapılan bu çalışmaların altında 1900’lerin son çeyreğinde önemi gittikçe anlaşılan ve gerekli önlemler alınmadığı takdirde insanlığın geleceğini derinden etkileyeceği kabul edilen küresel ısınma sorunu yatmaktadır.

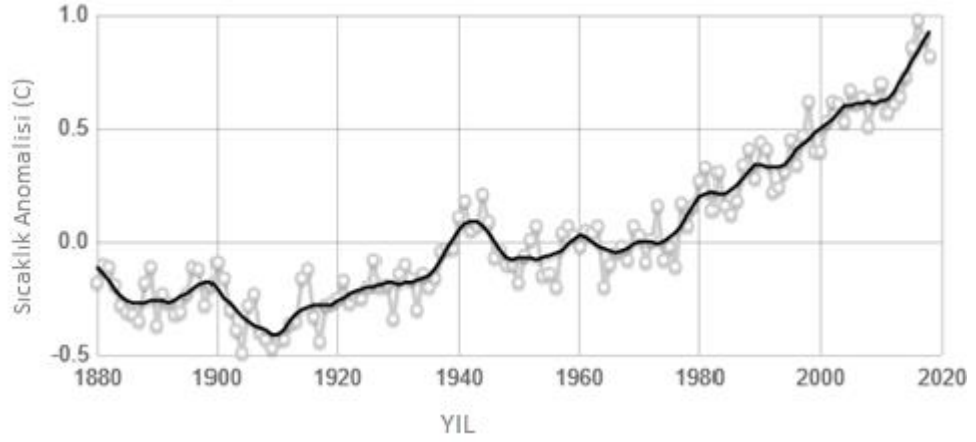
Sanayi devriminden sonra salınan sera gazı miktarının üçte ikisinin fosil yakıtlardan kaynaklandığı, dolayısıyla fosil yakıtların kullanımının küresel ortalama sıcaklıklardaki artışı etkileyen en önemli unsur olduğu bilinmektedir. Dünyadaki toplam enerji ihtiyacının %29’unu tek başına karşılayan kömür, CO² salımının %44’sini tek başına yapmaktadır[3]. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi sanayi devriminden sonra artan CO₂ salımı 2000’li yıllarda da hızla artmaya devam etmektedir.



Şekil 1.2: Yıllara göre CO₂ miktarındaki artış[4]

Küresel ısınmaya neden olan süreçlerden birisi, sera gazları olarak bilinen gazların atmosfer üzerinde bir tabaka oluşmasını sağlayarak okyanus ve yeryüzündeki ortalama sıcaklığı arttırması olarak açıklanmıştır. Bilim insanlarına göre, iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerinden korunmak için sanayi devrimi öncesine göre ortalama sıcaklıklardaki artışı azami 1,5°C ile sınırlamak gerekmektedir[5]. Uluslararası Enerji Ajansının açıklamalarına göre ise sıcaklık artışını 2°C’de tutabilmek için fosil yakıt rezervlerinin

üçte ikisini yer altında bırakılması gerektiği belirtilmektedir [3]. Şekil 1.3’de görüldüğü üzere sanayi devriminden bu yana yeryüzü-okyanus ortalama sıcaklığı artmaktadır.



Şekil 1.3: Yıllara göre Dünya yüzey sıcaklığı [6]

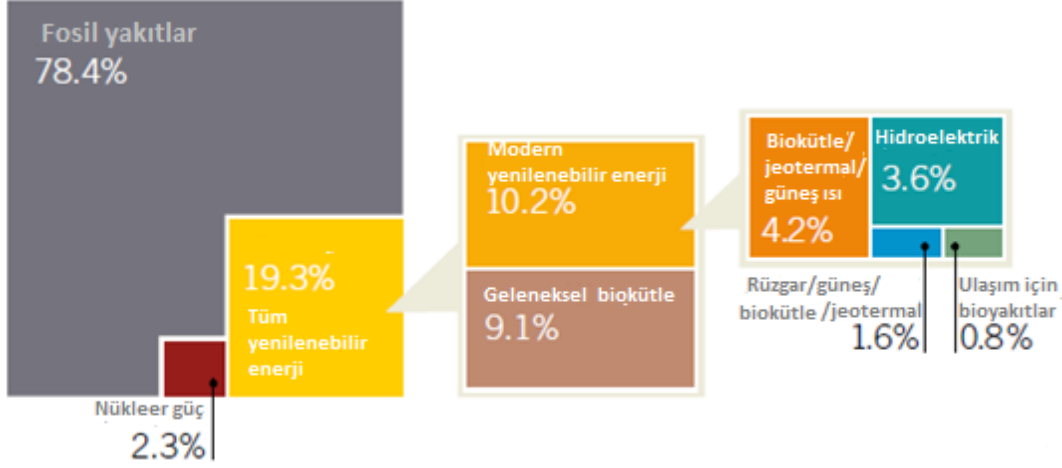
Enerjinin güvenilirliğinin ekonomik ve politik açıdan öneminin anlaşılması enerji çalışmaları konusundaki hassasiyeti arttırmıştır. Küresel ısınma gibi göz ardı edilemeyecek bir sorunla beraber, enerji çalışmaları, uluslararası düzeyde de önemli çalışma alanları yaratmıştır. Bu alanların arasında yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır.

Yenilenebilir enerji, kendi kendine var olan doğal süreçlerden fizikteki en temel prensiplerden biri olan enerjinin dönüşümü prensibinden yola çıkarak elde edilen enerji türleri olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerjilerin en temel çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

- Biyokütle
- Hidro
- Jeotermal
- Rüzgar
- Güneş

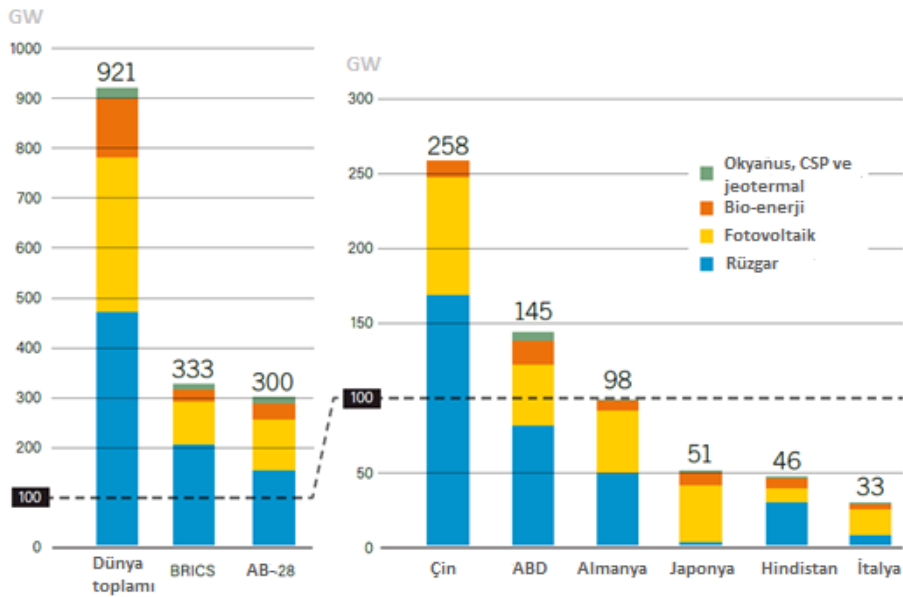
Şekil 1.1’de enerji ihtiyacının yıllara göre artış miktarı ve paylarının dağılımı ifade edilmiştir. Şekil 1.4’deki grafikte ise 2015 yılındaki toplam enerji tüketiminin paylarının yüzdelik olarak ifadesi verilmiştir. Bu grafiğe göre yenilenebilir enerji kaynaklarının

toplam tüketimdeki payı 19,3% olarak görünmektedir. Bu pay ise kendi arasında biyo-kütle, jeotermal, solar, hidroenerji, rüzgâr ve biyo-yakıt gibi ön plana çıkmış olan yenilenebilir enerjiler arasında dağılmıştır.



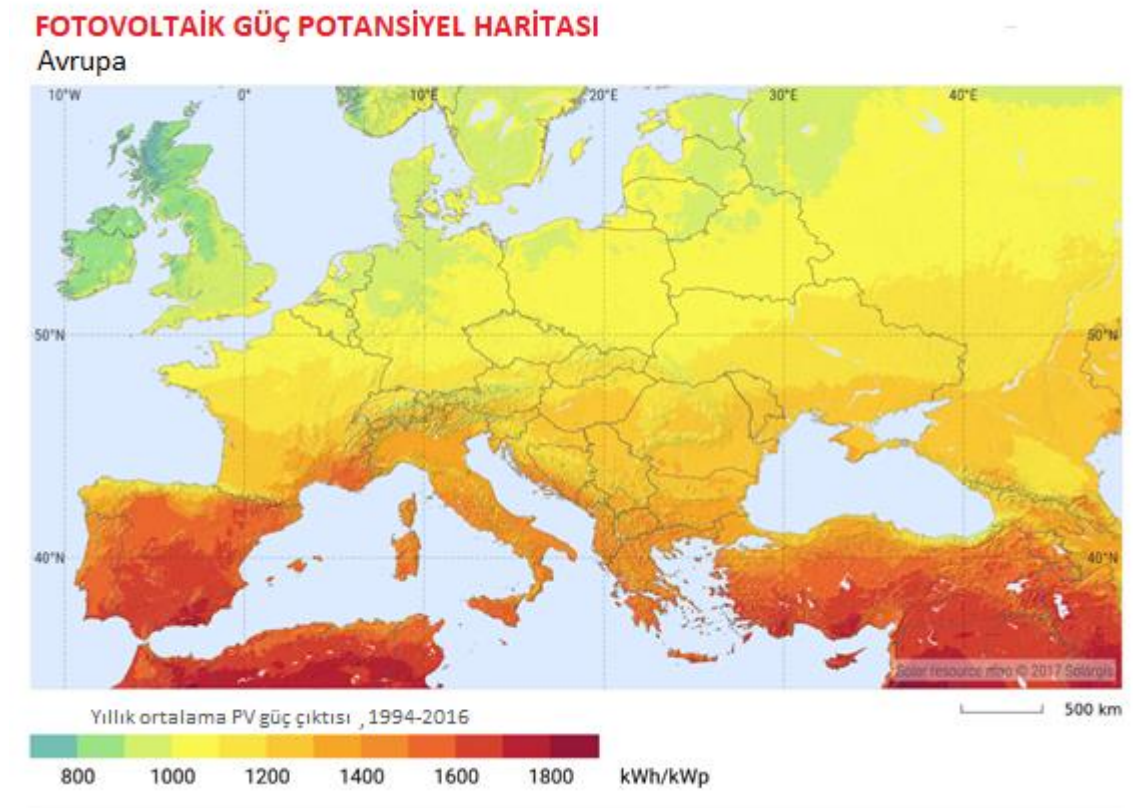
Şekil 1.4: Toplam Enerji Tüketimindeki Yenilenebilir Enerjinin Payı, 2015 [7]

Güneş'ten Dünya atmosferine ulaşan ışınımın şiddeti 1370 kW/m^2 olmasına rağmen yeryüzüne ulaşan ışınım değerleri $0-1100 \text{ kW/m}^2$ arasında değişmektedir[8]. Bu değerler temel alınarak incelendiğinde Güneşten dünyamıza gelen anlık enerji miktarı, yıllık enerji ihtiyacımızdan çok daha fazla görünmektedir.



Şekil 1.5: Dünya'da Yenilenebilir Enerji Güç Kapasiteleri, 2016[7]

Şekil 1.5’da Dünya’da genelinde 921 GW değerinde yenilenebilir enerji sisteminin kurulu olduğu görülmektedir. Bu değer yaklaşık 300 GW kadar güneş enerjisi tarafından üretilmektedir. Güneş enerjisinden elde edilen değerler BRICS ülkelerinde 90 GW iken Avrupa Birliği ülkelerinde 100 GW kapasiteye ulaşılmıştır. Ülkemizde, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından açıklanan güneş enerjisi kurulu güç verileri doğrultusunda 2018 yılında 5 GW değerine ulaşıldığı görülmektedir. [9]. Avrupa ve Türkiye için ışıma değerleri incelendiğinde, Türkiye’nin birçok Avrupa ve BRICS ülkesine göre daha iyi ışıma değerlerine sahip olduğu görülmektedir[10].



Şekil 1.6: Avrupa ve Türkiye Güneş ışıma değerleri[10]

Güneş enerjisinde temel olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

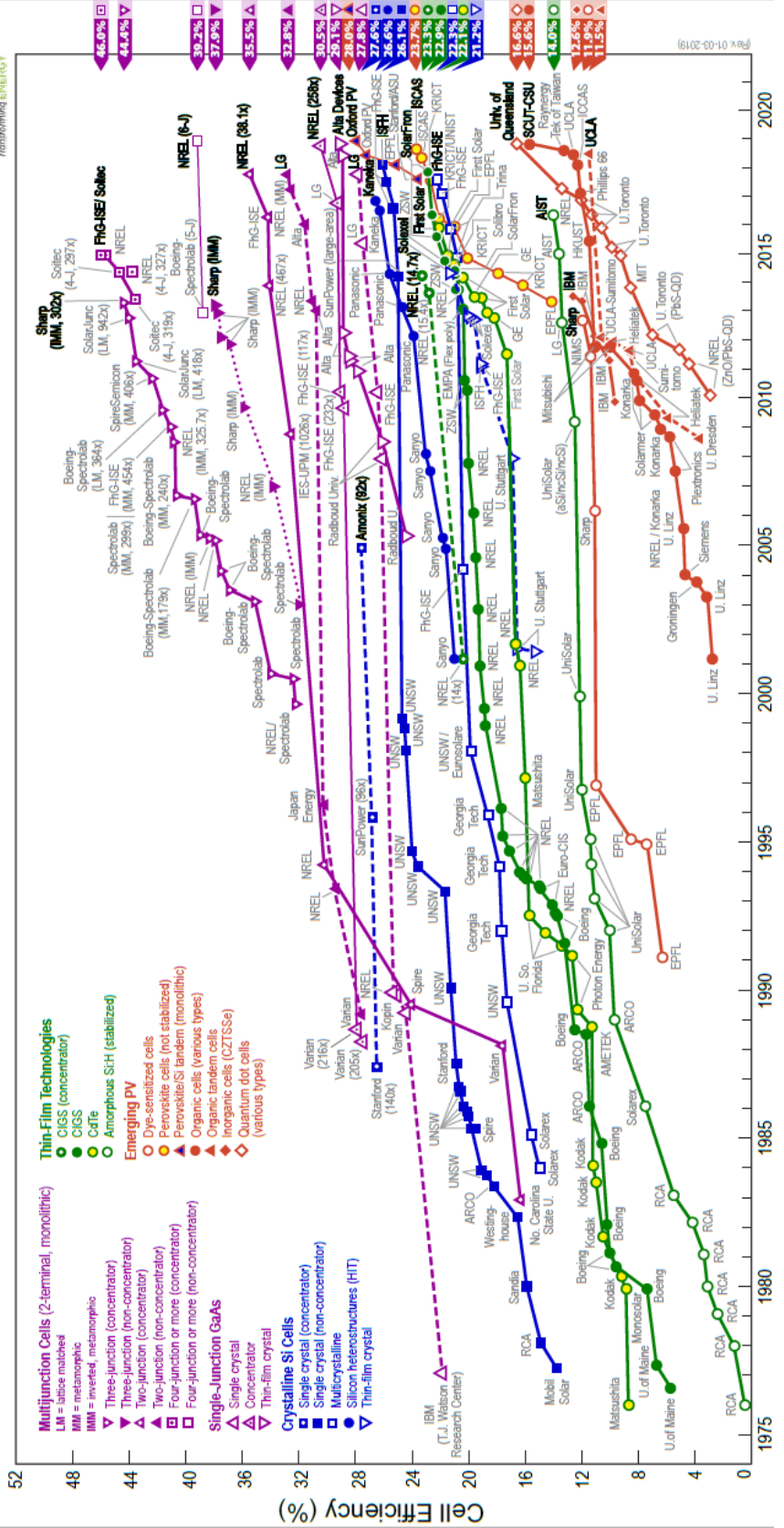
- Güneş-Isı
- Güneş-Elektrik (Fotovoltaik sistemler)

Güneş ısı teknolojileri, dünyanın her yerinde elektrik enerjisi üretmek, sıcak su sağlamak, alan ısıtmak-soğutmak, endüstriyel işlemler için ürünleri kurutmak ve ticari pişirme

hizmetlerine buhar sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye güneş ısı sistemlerini en yoğun şekilde kullanan ülkelerin başında gelmektedir.

Fotovoltaik sistemler, temel olarak yarıiletken malzemeler kullanılarak güneş-elektrik dönüşümünün doğrudan gerçekleştirildiği cihazlardır. Fotovoltaik sistemler, güneş gözeleri, elektrik bağlantıları ve mekanik aksamdan oluşmaktadır. Uzay araştırmalarında kullanılan fotovoltaik sistemler, temiz enerji ve maliyet düşürme çalışmalarıyla beraber, yenilenebilir enerji sistemleri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin yenilenebilir enerji olarak kullanılmaya başladığı günden bugüne verim artırma çalışmaları devam etmektedir.[11]

Best Research-Cell Efficiencies



Şekil 1.7: Güneş gözesi Verim Artırma Çalışmaları[11]

Şekil 1.7’de 1975’den bu yana güneş gözelerinin verimlerini arttırmak için yapılan çalışmaların en iyileri görselleştirilmiştir. 45 yıllık süreç içinde ulaşılan verim değerleri oldukça yükselmiş olsa da bu güneş gözelerinin birçoğu seri üretime uygun hale veya maliyet açısından ticarileştirilebilir fiyatlara getirilememiştir.

Bu sebepten fotovoltaik teknolojisinde sadece güneş gözesi araştırma geliştirme faaliyetleri yapılmamaktadır. Farklı tasarımlar içinde güneş gözelerinden nasıl yararlanılacağı ile ilgili önemli araştırma geliştirme faaliyetleri de yapılmaya devam edilmektedir. Bu faaliyetlerin en önemli amaçları arasında,

- Maliyetleri düşürmek,
- Üretim süreçlerini kolaylaştırmak,
- Fotovoltaik panellerin dezavantajlı olduğu yerlerde avantaj sağlayacak sistemler geliştirmek vardır.

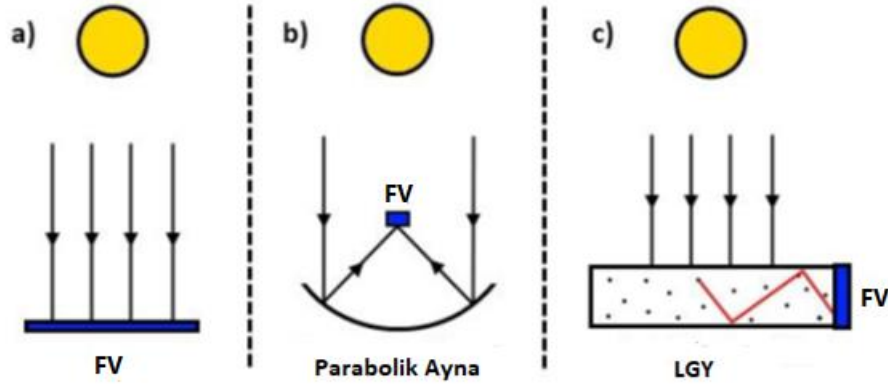
Fotovoltaik uygulamalarda önemli ar-ge çalışmalarından birisi de yoğunlaştırıcı sistemler üzerine yapılmaktadır. Yoğunlaştırıcı sistemler, fotovoltaik cihazlarda kullanılan yarıiletken malzemelerin daha ucuz malzemeler kullanarak maliyetin düşürülmesini sağlayabilmektedir. Bu sistemlerdeki temel yaklaşım daha geniş bir alana düşen Güneş ışınımını daha dar bir alana toplayarak, akı miktarını arttırmak üzerinedir. Yoğunlaştırıcı sistemler, optik biliminin yansıma ve kırılma özelliklerinden faydalanarak çalışmaktadır[12].

Yansıma temelli çalışan ilk yoğunlaştırıcı sistem, gelen güneş ışığını odak noktasına yansıtan parabolik bir ayna olan nokta-odak yoğunlaştırıcıdır[13]. Bu odak noktasına yerleştirilen FV gözenin üzerine yoğunlaştırılan güneş ışınımı sayesinde akı artmıştır.

Kırılma temelli çalışan yoğunlaştırıcılar, çoğunlukla fresnel mercekler olmak üzere merceklere dayalı çalışan sistemlerdir[14][15][16]. Fresnel merceklerdeki oluklar asimetric prizma benzeri yapılar, küresel merceklerin eğriliğini taklit eder. Bir Fresnel merceğin içinden geçen ışık, küresel bir mercekteki gibi odak noktasına odaklanır. Fresnel merceklerin, küresel merceklere göre dezavantajı odaklanmanın küresel merceklere göre daha az olmasıdır. Ayrıca kırılma temelli yoğunlaştırıcı sistemlerin önemli dezavantajlarından birisi gelen ışığın kabul açısının oldukça sınırlı olmasıdır.

Doğrudan güneş ışığı için, katı açı sıfır olduğundan, bu sistemlerin maksimum yoğunlaştırma oranı çok yüksek olabilir, ancak bu doğrudan güneş ışığı yoğunlaştırıcıya her zaman aynı açıda girmelidir. Bunu başarmak için, yoğunlaştırıcılar güneş takip sistemi ile birleştirilir[17][18]. Bu izleme cihazlarının dezavantajı, yoğunlaştırma sistemine maliyet katmaları ve nispeten küçük bir yoğunlaştırıcıya boyut katmalarıdır. Bu durum, yoğunlaştırıcı sistemleri binalarda uygulama için istenmeyen bir duruma getirir[19][20].

Daha yüksek yoğunlaştırma oranı elde etmek için, bir izleme cihazına gerek duymayan düz panel güneş enerjisi yoğunlaştırıcılarına ihtiyaç vardır. Düz plaka yoğunlaştırıcılar, dalga kılavuzu olarak işlev gören ince polimer veya cam levhalara dayanır. Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcılar(LGY) hakkında ayrıntılı bilgi 2. bölümde verilecektir.



Şekil 1.8: Güneş enerjisinden elektrik üreten 3 farklı cihaz gösterilmiştir.[21]

- Fotovoltaik modül
- Yüksek verimli fotovoltaik gözenin kullanıldığı yansıtma temelli yoğunlaştırıcı sistem
- Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı sistem

LGY sistemler binaya entegre olarak kullanılmak üzere tasarlanmış fotovoltaik sistemlerdir. Bu sistemler, fotovoltaik panellerin binaya entegre olarak kullanımında oluşan dezavantajları yok etmek ve maliyet azaltmak adına önerilmiştir[12].

1.1.Mevcut Sorun

Ülkemizde enerji ihtiyacı giderek arttığı ve tüketilen enerjinin büyük bir kısmının elektrik enerjisi olduğu bilinmektedir. Güneş enerjisi ülkemiz için oldukça önemli bir enerji kaynağı olduğu ve son 10 yıllık süreçte güneş santrallerine önemli yatırımlar yapıldığı gözlenmektedir.

Ülkemiz, güneş enerjisinden faydalanmak konusunda termal sistemlerde geçmişten bu yana Avrupa'nın en önde gelen ülkelerinden birisi konumundadır. Fotovoltaik sistemlerde ise son 10 yıllık süreçte önemli bir atılım gerçekleştirmiş ve yatırımlarına devam etmektedir. Ülkemiz yenilenebilir enerji teşvik politikalarına göre öncelikli olarak arazilere uygulanacak fotovoltaik güneş enerjisi santrallerine teşvik sağlanmıştır. 2018 yılında çıkan yeni yönetmeliklerle çatı ve cephe uygulamalı güneş elektrik tesislerine de teşvikler getirilmiştir.

Güneş elektrik sistemlerinde öncü olan ülkelerin teşvik sistemleri incelendiğinde çatı-cephe sistemlerine verilen teşviklerin araziye kurulan sistemlere oranla daha önce başlatıldığı görülmektedir. Araziye kurulan güneş elektrik sistemlerinin önemli dezavantajları aşağıda listelenmiştir.

- Elektriğin üretildiği yerden, tüketileceği yere iletimi esnasında oluşacak büyük kayıplar
- Büyük arazilerin uzun yıllar boyunca kullanılamaması ve bu süre boyunca güneş ışığından mahrum kalması

Binaya entegre sistemlere getirilen teşvikle beraber ülkemizde oldukça önemli çatı-cephe uygulamaları yapılmaya başlanmıştır. Fakat bu çalışmalarda yoğun olarak arazi uygulamaları için avantajlı olan modüller kullanılmaktadır. Bu modüller dik gelen ışınımlarda oldukça iyi çalışırken dağınık ışınımda verimleri oldukça düşmektedir. Bu durum bina cephelerine entegre edilmelerinde ekstra maliyet ve kurulum zorluğuna sebep olmaktadır.

1.2.Tezin Amacı ve Hedefleri

Yenilenebilir enerji sistemleri üzerine tüm hızıyla devam eden araştırmaların yoğun olarak dönüşüm verimlerini yükseltme, maliyetleri düşürme ve bu sistemlerin hayatımıza

entegrasyonunu sağlamak üzerine odaklanmıştır. Bu kapsamda bakıldığında LGY sistemlerin umut vaat eden sistemler olduğu fark edilmektedir.

Fotovoltaik paneller üzerinde yapılan verim çalışmaları kaydedilen ilerleme teorik sınırlara yaklaşıldıkça ciddi artışlar gösterememektedir. Verim ve güneş gözeleri üzerinde yapılan çalışmalardan alınan sonuçlardaki ilerleme yavaşladıkça güneş enerjisi sistemlerinde optik konusu önem kazanmaya başlamıştır.

LGY sistemlerin verimleri cihazın optik verimine ve güneş gözesinin verimine bağlıdır. Optik verim ışığın cihaza geldiği andan gözeye iletiildiği ana kadarki sürecin parametreleri tarafından belirlenir.

Güneş enerjisi optiğinde, sistemden beklenen amaçlar klasik bir optik sistemden farklılaştığı için yeni bir bakış açısı olan görüntüsüz optik kullanılmaya başlamış ve geliştirilmiştir. Bu optik sistem ile iyi görüntü oluşturmak yerine daha iyi yoğunlaştırma oranı hedeflenmiştir.

Bu çalışmada LGY sistemlerde optik verimi etkileyen parametrelerin verimle olan ilişkileri incelenecektir. Her bir parametrenin verime katkısı modellenip simüle edildikten sonra $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $30 \times 30 \text{ cm}^2$ ve $50 \times 50 \text{ cm}^2$ boyutlarında aygıtlar tasarlanacaktır.

1.3. Tezin Yapısı

Çalışmanın ilk bölümünde konu ile ilgili genel bilgi, mevcut sorun, çalışmanın amacı ve hedefleri hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde LGY sistemleri anlamak için çalışma prensibi, verimi etkileyen mekanizmaları ve LGY sistemlerde kullanılan malzemelere dair teorik bilgiler paylaşılmıştır.

Üçüncü bölümde tasarlanması planlanan LGY sistemin parametreleri modellenmiş ve simüle edilmiştir. Bu simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla 3 farklı boyut için prototip tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde simülasyon sonuçları değerlendirilmiş ve ileri çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. LÜMINESANT GÜNEŞ YOĞUNLAŞTIRICILAR

2.1. Giriş

Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcılar, geleneksel güneş panellerinin kentsel ortamlara uygulanmasının dezavantajlarından kaçarak panel yüzeyine gelecek dik ışınım ihtiyacı duymadan, izleme sistemleri kullanmadan ve büyük alanlara düşen ışınımı daha küçük alanlara toplayarak güneş enerjisinden elektrik üretimi için geliştirilmiştir. Yoğunlaştırma sistemlerinin avantajlarından faydalanan ve binaya entegre sistemler olarak kullanılabilir LGYlar yaklaşık 45 yıl önce önerilmiş sistemlerdir. LGY tipi güneş yoğunlaştırıcılar için ilk öneri 1973'de Lerner tarafından yapılmıştır[22]. Kısa bir süre sonra birçok bilim insanı LGY'ler üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. 1980'lerde petrol fiyatlarındaki düşüş, araştırmanın neredeyse terk edilmesine yol açmıştır. Son zamanlarda petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve geleneksel yakıtlardan elektrik üretiminin çevreye etkilerine karşı, özellikle son 5 yılda, LGY'ler üzerine yapılan çalışmalar kayda değer bir şekilde artmıştır[23]. Bunun en önemli sebepleri arasında insanların çevre konusunda duyarlılığının artması, geleneksel FV sistemlerinin kentte uygulanmasındaki dezavantajlar olarak gösterilebilir.

LGY'lar, oldukça düşük maliyetlerde enerji üretimi vaat etmektedir. Ayrıca diğer avantajları da aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilir.

- Hem dağınık hem doğrudan ışınımda iyi çalışır[24][25].
- Kalıcı gölge alanı olan bölgelerde iyi çalışır[12].
- Binaya entegre sistem olarak dış cephelere uygulanması daha kolaydır.[12]
- Optik verimi arttırılarak giren foton/çıkan foton değeri yeterince yükseltirse üretilen elektriğin maliyeti şebeke ile rekabet edebilir[12].
- Mimarların ihtiyaç duyabileceği renk ve şekilde üretilebilir.

2.2. Güneş Enerjisi

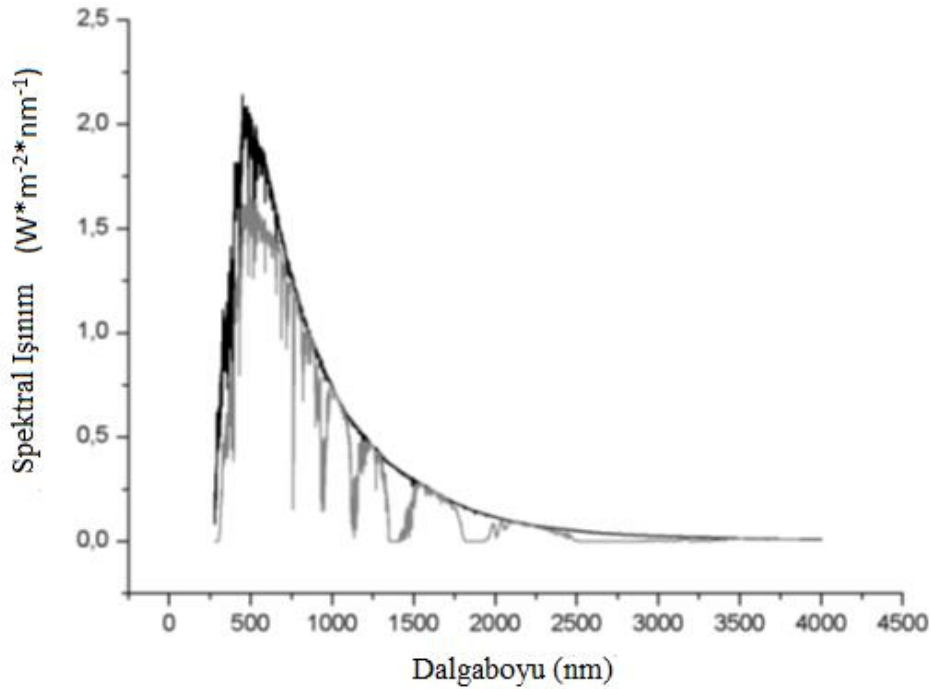
Güneş'in yaydığı 174 PW değerinde elektromanyetik dalga Dünya atmosferine ulaşır. Bu enerji miktarında Dünya'ya ulaşmadan önce atmosferdeki yansıma ve emilim, bulutlardaki saçılma ve emilmeden kaynaklı olarak %30 oranında kayıp yaşanır. Dünya enerji tüketimi 15-20 TW arasındadır. Bu nedenle güneşten gelen enerji kullanılabilir

enerjiye dönüştürülebilirse, yalnızca güneş enerjisi, dünyanın ihtiyaç duyduğu enerjiyi birkaç kez karşılayacak kadar enerji üretebilir [23].

$$E = h \nu = \frac{h c}{\lambda} \quad (2.1)$$

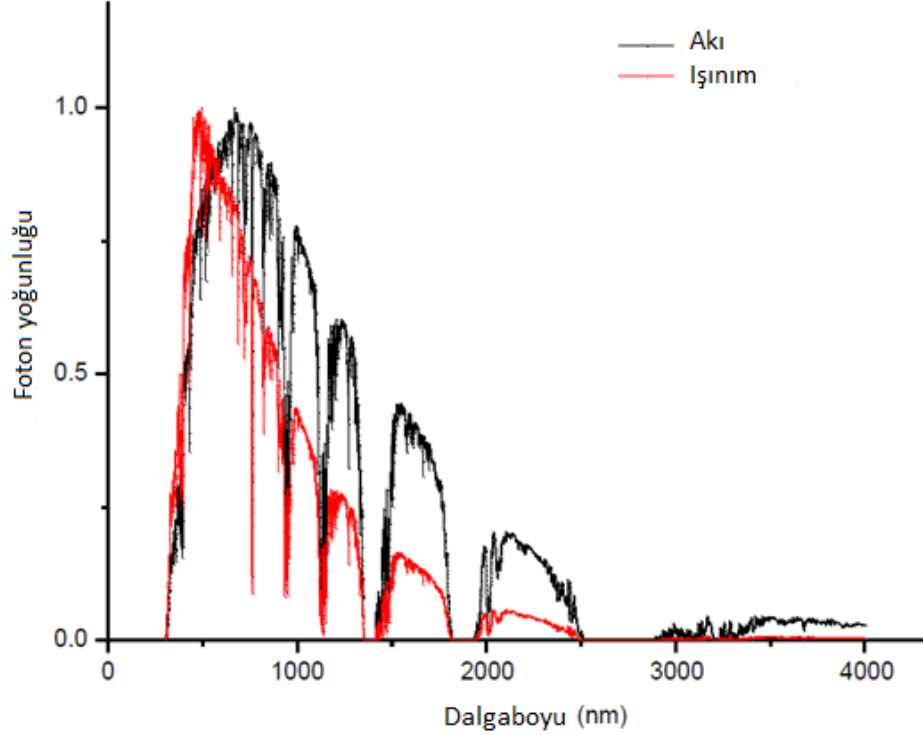
Denklem 2.1’de yer alan h, Planck sabitini ($6,626 \times 10^{-34}$ Js) ve c, ışık hızını (3×10^8 m/s) ifade etmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi güneş ışınımı yeryüzüne ulaşmadan %30’nu kaybeder. Fotonların atmosferde yaşadığı saçılma ve yansıma dalga boyuna bağlı bir durumdur; bu nedenle, yeryüzüne ulaşan güneş ışınımının spektrumu değişecektir.

Güneş spektrumu içinde bulunan gün ve lokasyona göre değişmektedir. Farklı araştırma laboratuvarların aynı standartlarla çalışması için referans güneş spektrumları belirlenmiştir. ASTM E-490 standardı ile belirlenen AM0 güneş spektrumu uzay araştırmalarında kullanılmak üzere önerilmiştir. ASTM G-173-03 standardı ile karasal güneş spektrumları için iki farklı parametre önerilmiştir. AM1.5G, plaka halindeki modüllerde yapılan çalışmalarda referans edilmek üzere önerilmiştir. AM1.5D ise yoğunlaştırıcı sistemlerde referans edilmek üzere önerilmiştir[8]. AM0 ve AM1.5 güneş ışınım spektrumları Şekil 2.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1: AM0 (siyah) ve AM1.5 (gri) Güneş Işınımı Spektrumu[23]

Emisyon spektrumlarını veya ışık kaynaklarının spektrumlarını ölçerken iki ana birim vardır. Bunlar spektral ışınım (güç birimleri) ve spektral foton akısı birimleridir. Şekil 2.2’de her birimin spektrum üzerinde nasıl bir etkisi olduğu görünmektedir.



Şekil 2.2: AM1.5G Güneş Işınım Spektrumunun Foton Akısı ve Işınım Gücü Grafikleri[23]

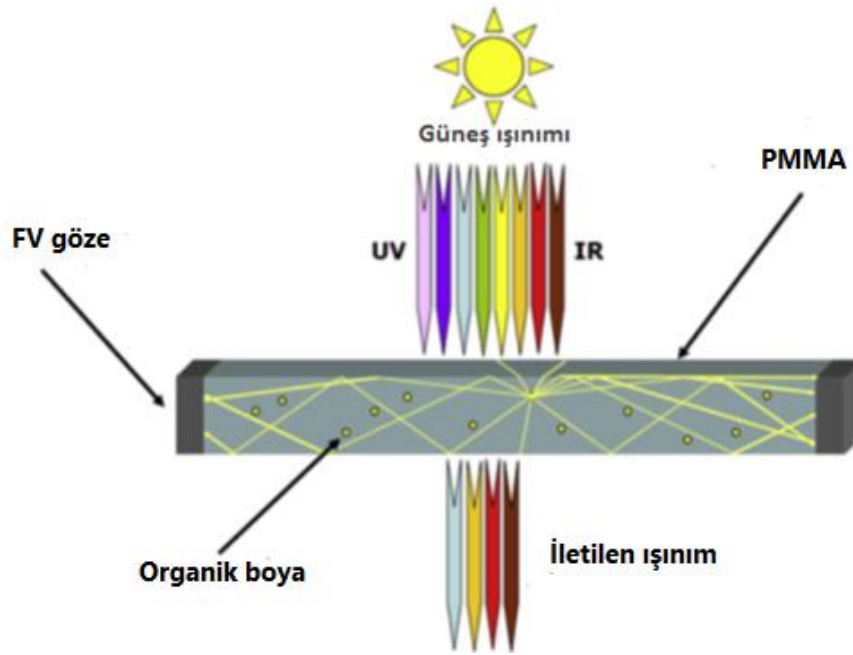
LGY sistemlerde Stokes Kaymasından dolayı lüminesant malzemeler tarafından emilen fotonlar enerji kaybedeceği için spektrumu foton akısı olarak düşünmek daha uygundur. Lüminesant malzemelerin emilim ve salım yaptığı fotonlar arasındaki enerji farkından dolayı kayıplar olacaktır. Bununla birlikte LGY sisteme bağlanmış Güneş gözelerinde termalleşme kayıpları genellikle düşük olacaktır çünkü sistemin salım spektrumu, kullanılan güneş gözesinin band aralığına optimize edilmiş olacaktır [26].

2.3. Çalışma Prensibi

Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı sistemlerin tasarım temellerinde 3 ana bölüm vardır.

- Plastik veya cam dalga kılavuzu
- Dalga kılavuzuna gömülü olan lüminesant moleküller
- Güneş gözeleri

Güneşten gelen ışınım, dalga kılavuzunun üst yüzeyinden içeri girerek dalga kılavuzuna gömülü olan lüminesant moleküller tarafından emilir. Emilen foton daha büyük bir dalga boyu ile tekrar salınır. Dalga kılavuzunun içinde tekrar salınan fotonların bir kısmı tam iç yansıma yapar ve plakanın istenen kenarlarında yoğunlaşması sağlanır. Toplanan ışığın elektriğe dönüştürülmesi için plakanın bir kenarına veya kenarlarına güneş gözeleri yerleştirilir. LGY sistemlerin çalışma prensibi Şekil-2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcıların şematik gösterimi[27]

Lüminesant molekül tabanlı olmayan başka yoğunlaştırıcı sistemler de önerilmiştir. Bu sistemler kırınım elemanlarına [28], ışık kapanlarına [29], özel arka aynalara veya kırma indisi varyasyonlarına [30] sahiptir. Ancak bu tasarımların her birinin ekonomik ve verimli olması için kendi zorlukları vardır.

LGY'ya gelen ışığın, Şekil-2.3'de gösterilen dalga kılavuzu içinde sıkışıp kalan kısmı bu dalga kılavuzunun kırma indisi ile belirlenir. Snell yasasına göre eğer fotonlar malzemeye sınır açısından(α_k) daha büyük bir açıyla gelirse tamamen yansıtılırlar. Bu kritik açı;

$$\alpha_k = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de; n, dalga kılavuzunun kırma indisidir. Bir malzemenin kritik açısı, malzemenin optik verimi ile ilgili önemli bir parametredir. Kritik açı, malzemenin üst yüzeyine gelen ışığın içeri alınmasını ve emilen ışığın malzemenin içinde iç yansımalar gerçekleştirmesini belirleyecektir. Bununla birlikte LGY'ların verimliliği sadece kritik açı verimliliğine bağlı değildir.

LGY sistemlerin optik verimi (η_{opt}) denklem 2.3'de gösterildiği gibi ifade edilebilir[31].

$$\eta_{opt} = (1 - R) P_{TiY} \eta_{em} \eta_{FLK} \eta_{Stokes} \eta_{ana} \eta_{TiY} \eta_{ye} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de verilen ifadeler;

R : Levha üzerinden yansıyan güneş ışınımı miktarı

P_{TiY} : Tam iç yansıma olasılığı

η_{em} : Emilim verimi

η_{FLK} : Kuantum verimi

η_{Stokes} : Stokes kayması verimi

η_{ana} : Ana malzeme (dalga kılavuzu) verimi

η_{TiY} : Tam iç yansıma verimi

η_{ye} : Yeniden emilim verimi

yukarıda ifade edildiği gibidir ve kesim 2.4’de açıklanacaktır.

Fotonların, dalga kılavuzunda taşınma verimliliği ($\eta_{\text{taşınma}}$) ise yeniden emilim (η_{ye}) verimiyle ilişkilidir. Fotonların taşınma verimliliği, dalga kılavuzunda meydana gelen sıralı yeniden emilim ve yeniden salım sayısı ile belirlenir.

$$\eta_{self} = \prod_{i=1}^{\bar{x}} \eta_{FLK} \eta_{stokes,i} \eta_{taşınma,i} \quad (2.4)$$

Burada x , fotonun yeniden emilim ortalama sayısıdır. Foton yeniden emilim sayısı, lüminesans moleküllerinin yoğunluğuna, fotonun lüminesans tabakası boyunca geçirdiği yola, LSC’de yayılan fotonun malzemedeki sönme katsayısına bağlıdır [23].

Termodinamik kurallar, birleşik parabolik yoğunlaştırıcı (CPC) ve Fresnel mercekler gibi geleneksel geometrik yoğunlaştırıcıların verimlerini sınırlar[32][33]. Bir yoğunlaştırıcıya giren ve çıkan ışık hem bir alana ($A_{giriş}$ ve $A_{çıkış}$) hem de bir katı açıya ($\Omega_{giriş}$ ve $\Omega_{çıkış}$) sahiptir. Bir yoğunlaştırıcı tarafından elde edilebilecek maksimum yoğunlaştırmanın (C) malzemenin kırma indisine ve katı açılara bağlıdır. [23]

$$U_{çıkış} \geq U_{giren}$$

$$C = \frac{E_{çıkış}}{E_{giren}} = \left(\frac{L_{çıkış} U_{çıkış}}{A_{çıkış}} \right) \left(\frac{L_{giren} U_{giren}}{A_{giriş}} \right)^{-1} \leq \left(\frac{n_{çıkış}}{n_{giren}} \right)^2 \frac{\Omega_{çıkış}}{\Omega_{giriş}} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5’de $E(Wm^{-2})$ ışınım şiddeti, $L(Wm^{-2}ster^{-1})$ ışığın parlaklığını ve n kırma indisini ifade eder. Maksimum yoğunlaştırma için giden katı açısı 90 derece, gelen katı açısı ise mümkün olduğunca küçük olmalıdır.

Hava ortamındaki bir yoğunlaştırıcı için maksimum yoğunlaştırma oranı aşağıdaki gibidir:

$$C_{maks,diff} = n^2 \quad (2.6)$$

Bu nedenle, bu yoğunlaştırıcılar ışınımın fazlaca saçıldığı ortamlara uygun değildir. LSC sistemlerde fotonların emilimi ve yeniden emisyonu sistemin entropisini değiştirir. Bu nedenle, LSC sistemlerin maksimum yoğunlaştırma, emilim ve salım sırasındaki ısı üretimine ve lüminesant moleküllerin Stokes kaymasına bağlıdır. Bir LSC'nin maksimum güç konsantrasyonu aşağıdaki gibidir:

$$C_{maks} \approx \frac{e_2^3}{e_1^3} \exp\left(\frac{e_1 - e_2}{kT_0}\right) \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de, e_2 ve e_1 , emilen ve salınan fotonların enerjisini, k , Boltzman sabitini, T_0 ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir. 0,2 eV değerinde bir Stokes Kaymasına sahip lüminesant malzeme için maksimum yoğunlaştırma yaklaşık 2000 katına çıkmaktadır[32][33].

2.4. Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı Sistemlerin Verimi Etkileyen Mekanizmaları

LGY sistemlerin, optik verimini önemli etkileyen mekanizmaları vardır. Bu verimi etkileyen mekanizmalarının azaltılması veya ortadan kaldırılması, LGY sistemlerin geliştirilmesinde en büyük zorluklardan birisidir. Bu başlıkta bütün verimi etkileyen mekanizmalara ayrıntılı olarak bakılacak ve büyüklükleri tartışılacaktır.

LGY sistemlerde optik verim, sistemin içinde gerçekleşen farklı optik süreçlerin verimliliğinin ürünü olarak ifade edilebilir ve denklem 2.3'de gösterildiği gibi η_{opt} ile gösterilir [31].

$$\eta_{opt} = (1 - R) P_{TIY} \eta_{em} \eta_{FLK} \eta_{Stokes} \eta_{ana} \eta_{TIY} \eta_{ye}$$

Verimi etkileyen mekanizmaların sisteme olan etkilerini tek tek hesaplamak için yapılan çalışmada tek bir organik boya kullanılan, 40x 40 x 0,3 cm³ boyutlarındaki bir kare levha için optik verimi etkileyen verimi etkileyen mekanizmaların büyüklükleri Çizelge 2.1’de listelenmiştir[31].

Çizelge 2.1: Optik verimi etkileyen mekanizmaların büyüklükleri

Parametre	Değer
1-R	0,96
P _{TIY}	0,75
η _{em}	0,2-0,3
η _{FLK}	0,95-1,0
η _{Stokes}	0,75
η _{ana} + η _{TIY}	0,9-0,95
η _{ye}	0,75
η _{opt}	0,07-0,012

Her bir verimi etkileyen mekanizmaların optik verime etkisi ve önemi aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır.

- **Gelen ışığın plakaya iletilen kısmı (1-R)**

LGY sistemin ön yüzeyine gelen ışığın bir kısmı Fresnel yansımaları nedeniyle yansır. Bu yansımaları ışığın geliş açısının sadece 0° olduğu özel durumu ifade eden denklem aşağıdaki gibidir:

$$R = (n - 1)^2 / (n+1)^2 \quad (2.8)$$

LGY sistemlerde tercih edilen cam ve PMMA gibi malzemelerin kırma indisi yaklaşık n=1,5 kabul edilirse, bu mekanizmada yaşanan kayıp %4 civarındadır. Levhanın arka

yüzeyinden yansıyan ışık daha az önemlidir çünkü yararlı dalga boyu aralığının çoğu sistemin arka yüzeyine ulaşana kadar emilmiş olacaktır[34].

- **Tam iç yansıma olasılığı (P_{TIY})**

Levha içindeki ışık yüzeylere yalnızca kritik açıdan büyük bir açıyla çarptığında LGY sistemin içinde tutulabilir. Kritik açı aşağıdaki denklemden hesaplanabilir. Bu denklemde, n, optik malzemenin kırma indisidir[34].

$$\theta_k = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \right) \quad (2.9)$$

Levha içindeki ışığın tam iç yansıma olasılığı aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir.

$$P_{TIY} = \frac{\sqrt{n^2-1}}{n} \quad (2.10)$$

Işığın bir cismin içinde hareket ettiği süreçlerde cismin iç yüzeyine kritik açıdan daha büyük açılarda gelip cismi terk edeceği hacimler kaçış konisi olarak adlandırılmaktadır. Kırma indisinin, n=1,5 kabul edildiği durumda ön ya da arka yüzeydeki kaçış konilerinden ışığın iletilmesi olasılığı %25 olarak görülmektedir. Bu olasılık yeniden emilim süreciyle birlikte artar; çünkü her yeniden emilim olayıyla birlikte salınan foton için yeniden %25'lik iletilme olasılığı ortaya çıkar. Kırma indisine bağlı olan bu kaybı gidermek her ne kadar oldukça zor olsa da optik verimde artışa neden olacak çalışmalar yapılmıştır[34].

- **Emilim verimi (η_{em})**

LGY sistemler, güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak için güneş spektrumunun mümkün olan en geniş dalgaboyu aralığında emilim gerçekleştirebilmektedir. Eğer sistemin 550 nm ve altında emilim yapabildiğini düşünecek olursak, $\eta_{em}=0,26$ olacaktır. Çünkü AM1.5G güneş spektrumunun yalnızca %26'sı bu dalga boyunun altındadır. Tek kristal Si güneş gözelerinden optimum verim almak için LGY sistemin 950 nm ve altında emilim

gerçekleştirmelidir ve tek kristal Si gözelerin maksimum spektral tepkisine karşılık gelen 950-1000 nm aralığında salım gerçekleştirilmelidir[35]. 950 nm ve altındaki dalga boylarını emilim mümkün olsaydı $\eta_{em}=0,71$ değerlerine çıkardı.

- **Kuantum verimi (η_{FLK})**

Fotoluminesans kuantum verimi, kuantum verimi, lüminesant kuantum verimi veya floresans kuantum verimi olarak da bilinir. Uyarılmış bir lüminesant molekülünün salım yapma olasılığını ifade eder[34]. Aşağıdaki eşitlikte η_{FLK} ifadesi verilmiştir:

$$\eta_{FLK} = \frac{\text{Salınan Foton Sayısı}}{\text{Uyarılan Molekül Sayısı}} \times 100 \% \quad (2.11)$$

Yüksek kuantum verimi, LGY sistemlerin performansları için oldukça önemlidir. Özellikle de geniş spektral örtüşmenin ve yeniden emilimin gerçekleştiği durumlarda daha önemli bir rol oynamaktadır. Kuantum verimi, yeniden emilim süreçlerinde de geçerli olduğundan, her yeniden emilim olayından sonra kuantum veriminden kaynaklanan kayıp büyür. Örneğin %95 kuantum verimine sahip bir lüminesant malzeme kullanılan LGY sistemde 5 kez yeniden emilim olayı gerçekleşirse $0,95^5=0,77= \%77$ kuantum verimi gerçekleşir[34].

- **Stokes verimi (η_{Stokes})**

Floresans işleminde, salınan fotonun dalgaboyu, emilen fotonun dalgaboyundan her zaman daha uzundur. Sonuç olarak lüminesant malzeme %100 η_{FLK} verimine sahip olsa bile floresans sırasında net bir enerji kaybı vardır. Floresans sonrasında kalan enerjinin oranı η_{Stokes} ile ifade edilir. Bu durum, LGY sistemlerde gerekli olan dalgaboyu kaydırma işleminin doğal bir özelliği olduğundan her zaman mevcuttur ve yaklaşık olarak 0,75 değerinde kabul edilebilir[34].

- **Ana malzeme verimliliği (η_{ana})**

LGY sistemlerde olası verimi etkileyen mekanizmalarından bir tanesi, levha içinde toplanmış fotonların ana malzeme tarafından emilmesinden kaynaklanır. Bu durumda, η_{ana} , ana malzeme tarafından emilmeden iletilen foton oranını ifade eder. Ana malzemenin verimliliğinin polimerler ve camlar için görünür bölgede çok az etkisi vardır.

Fakat birçok polimerin harmonikleri 700 nm civarında önemli emilim özelliği gösterdiği için, yakın kızıl altı (NIR) bölgede çalışılırken dikkat edilmesi gerekmektedir[36]. Ana malzeme ayrıca ışığın saçılmasına sebep olarak da kayıplar yaşanmasına sebep olabilir. Görünür bölgede PMMA malzemeler için ana malzeme verimliliği 0,95-0,98 arasında değişmektedir.

- **Tam iç yansıtma verimliliği (η_{TY})**

Teorik olarak tam iç yansıtma %100 verime sahip olmalıdır. Bununla birlikte levha yüzeyindeki toz veya nem damlacıkları gibi yabancı parçacıkların varlığı ışığın levhadan saçılmasına sebep olabilir. Levha yüzeyindeki çizilme gibi fiziksel hasarlar da verimi etkileyen mekanizmalardaki kaybın artmasına neden olacaktır. LGY yüzeyinde, üretim yöntemine bağlı olarak mikro-yapılar oluşabilir ve bu durumda kayba yol açabilir. Thomas ve diğerlerinin yaptığı çalışmalarda, dikkatlice temizlenmiş PMMA yüzeyleri incelendiğinde, $\eta_{TY} = 0,9998$ 'lerde görünmektedir[37]. Her yansıtma için 0,0002 değerinde küçük yansıtma kayıplar saptanmıştır. Tam iç yansıtma verimindeki kaybın nedeni ne olursa olsun, birkaç yüz yansıtmadan sonra bile çok küçük bir kayba neden olur. Örneğin 200 yansıtmadan sonra kalan kısım $0,9998^{200} = 0,96$ değerindedir.

- **Yeniden emilim verimi (η_{ye})**

Yeniden emilim verimi, emilim ve salım spektrumlarının örtüşmesinden dolayı salımı gerçekleştiren fotonların tekrar emilmeden güneş gözesine ulaşma olasılığını ifade eder. Stokes kayması, emilim ve salım spektrumlarının tepe noktaları arasındaki fark olarak ifade edilirken, lüminesant malzeme olarak kullanılan organik boyalar, kuantum noktalar ve nadir yer elementlerinde örtüşen emilim ve salım spektrumları meydana gelebilir. Dolayısıyla bir molekülün salımı başka bir molekül tarafından emilebilir. Her ne kadar tekrar bir salım gerçekleşecek olsa da kuantum verimi, kaçış konileri gibi verimi etkileyen mekanizmalarını tekrar göz önünde bulundurmamak gerekir. Bu sebeple yeniden emilim olayı LGY sistemlerin verimlerinde kayıplar yaşanmasına neden olur[38][39]. Aynı şekilde kaçış konisine giren fotonların tekrar sistem içerisine yönlendirilmesini sağlayarak verimi arttıracak düşünülse de kaçış konilerinin kapladığı hacim ile diğer yüzeylerin kapladığı hacimler kıyaslandığından verime negatif etki yapacağı görülmektedir. LGY sistemdeki fotonlar, her bir fotonun kaybolma şansını arttıran çoklu

yeniden emme olayları yaşayabilir. Organik bir boya içeren LGY sistemler için yeniden emilim verimi genellikle %40-80 arasındadır. Bu durum büyük oranda boyanın konsantrasyonuna ve kuantum verimine bağlıdır.

- **Başat faktörler**

Genel kayıplara en büyük katkı P_{TIR} , η_{em} , η_{stokes} ve η_{ye} verimi etkileyen mekanizmalarından gelmektedir. LGY sistemlerin verimlerini arttırmak için bu verimi etkileyen mekanizmalarının etkilerini azaltmak gerekmektedir.

P_{TIR} değerini arttırmak oldukça zordur çünkü bu tam iç yansıma olasılığı doğrudan ana malzemenin kırıcılık indeksine bağlıdır. Malzemelerin kırıcılık indeksindeki değişim miktarları oldukça küçüktür. Bununla birlikte kaçış konisi kayıplarının levha içinde kalması için çalışmalar yapmak mümkündür. Fotonik filtreler ile kaçış konisindeki kayıplar azaltılabilir.

Emilim spektrumunun genişliğini arttırmak için farklı organik boyaların karışımı kullanılabilir. Daha uzun dalgaboylu boyaların genel olarak daha düşük kuantum verimine sahip olduğu bilinse de emilim verimini arttıracaktır.

Stokes verimi, LGY sistemde meydana gelen doğal bir olay olduğundan geliştirilemez. Yine de emilim spektrumu genişletilirse emilim-salım sürecinde enerjide daha büyük bir ortalama düşüş olduğundan η_{stokes} azalır.

η_{stokes} , bir LSC'de meydana gelen dalga boyu kaydırma işleminde doğal olduğu için geliştirilemez. Aslında, absorpsiyon aralığı arttırılırsa, absorpsiyon / emisyon işleminde enerjide daha büyük bir ortalama düşüş olduğundan η_{stokes} azalır.

Son olarak yeniden emilim kayıplarını azaltmak için daha büyük stokes kaymalarına ve daha düşük spektral örtüşmelere sahip olan lüminesant malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir.

2.5.Lüminesant Güneş Yoğunlaştırıcı Bileşenleri

LGY sistemler farklı özelliklere sahip malzemelerden oluşmaktadır.

- Plastik veya cam dalga kılavuzu

- Dalga kılavuzuna gömülü olan lüminesant moleküller
- Güneş gözeleri

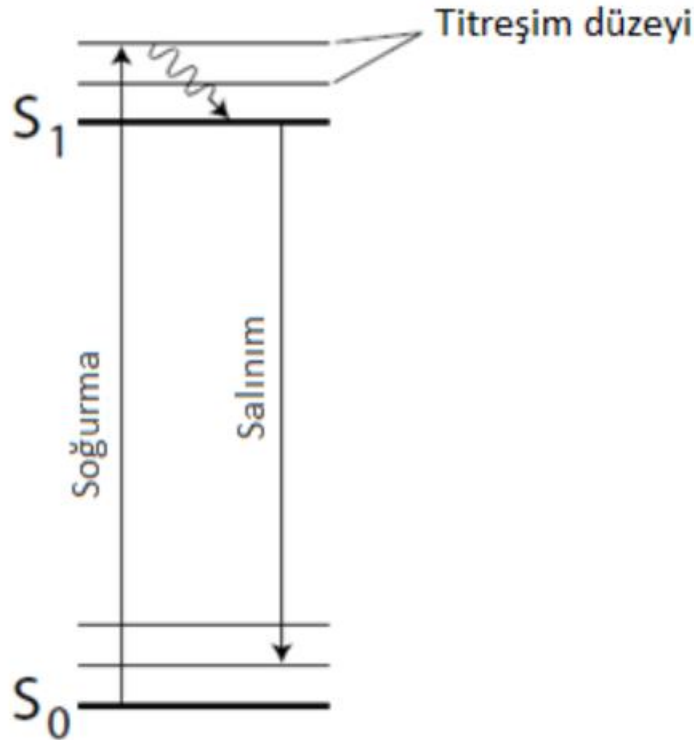
Bu başlıkta LGY sistemlerde kullanılan malzemelerin teknik özellikleri ifade edilecektir.

2.5.1.Lüminesant Malzemeler

LGY sistemlerde, cihazın lüminesans özellik kazanması için üç farklı malzeme kullanılabilir: organik boyalar, kuantum noktalar ve nadir toprak elementleri.

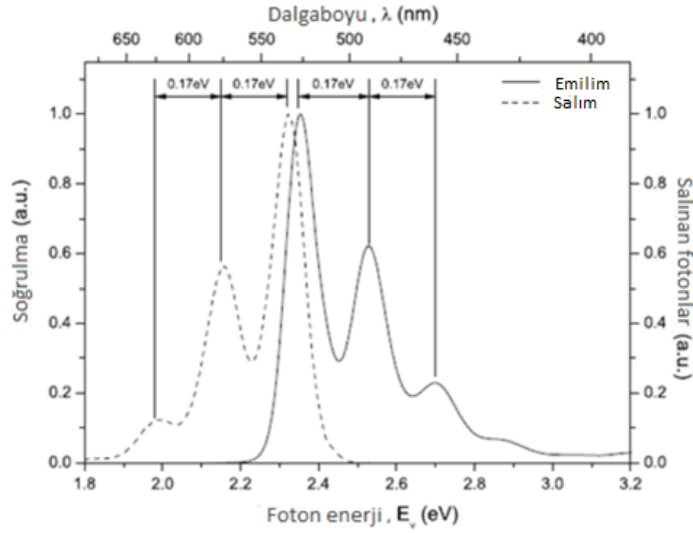
2.5.1.1. Organik Boyalar

Organik boyaların enerji seviyesi diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Malzemeye gelen bir fotonun uyarılması sonucu, elektron temel elektronik durum olan S_0 'dan, ilk uyarılan elektronik durum olan S_1 'in titreşim seviyelerinden birine uyarılır. Bu titreşim seviyelerinden iç dönüşümlerle ışınımsız olarak bozunur. S_1 durumunun temel seviyesinde bulunan elektron, foton yayınlamaya S_0 'daki temel titreşim seviyelerinden birine düşer [34].



Şekil 2.4: Organik boyalar için Jablonski enerji seviyeleri diyagramı[34]

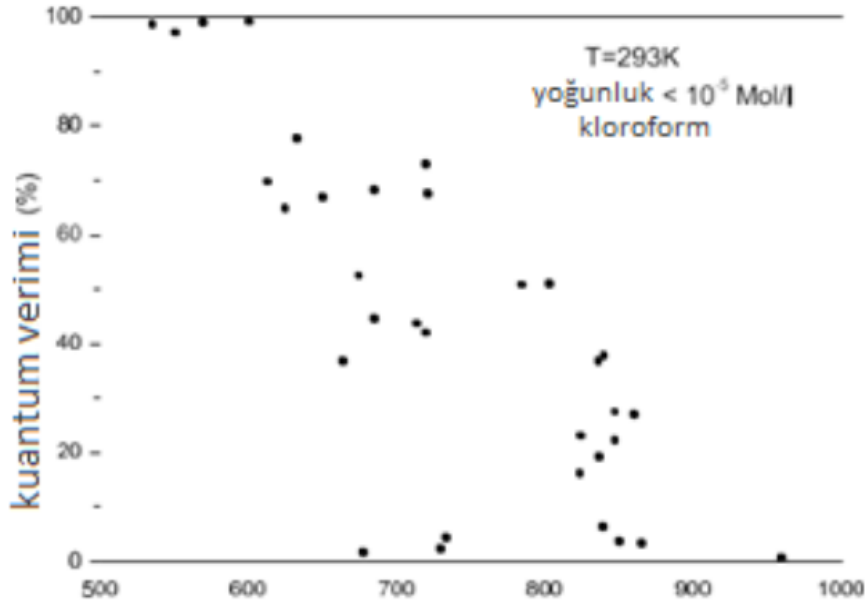
Şekil 2.5, tipik bir organik boyanın (BASF Lumogen F Orange 240) emilim ve salım spektrumlarını göstermektedir. Emilim ve salım işlemlerinin simetrisi nedeniyle, spektrumların pozisyonları da neredeyse simetriktir[34].



Şekil 2.5: Lumogen F Orange 240 boyasının emilim ve salım spektrumu[34]

Organik boyalar, LGY sistemlere lüminesans özelliği eklemenin en basit yolunu sunar. Çünkü bu malzemeler levha formuna getirilecek olan polimetilmetakrilat (PMMA) gibi çeşitli organik polimerlerde kolayca çözülebilirler. İlk LGY araştırmalarında yaygın olarak temin edilebilecek ve iyi tanımlanmış özelliklere sahip Rhodamine 6G, DCM ve Coumarin gibi lazer boyalarda kullanım için geliştirilen boyalar kullanılmıştır [22][24][40][41][42]. Görünür bölgede ışınım yapan lazer boyaların fotostabiliteleri yüksek olmamasına rağmen sahip oldukları yüksek kuantum verimi (Rhodamine 6G için $\eta_{PLQY} = \% 98$ [22]) onları LGY sistemler için ideal kılar.

Lüminesans katkıların LGY sistemler için en önemli katkısının, Güneş'ten gelen ışınımın sahip olduğu spektrumdaki belli dalga boylarını güneş gözesinin daha verimli çalıştığı dalga boylarına kaydırmak olduğu söylenebilir. Organik boyaların salım dalga boyları yükseldikçe kuantum verimlerinde bir düşüş gerçekleşir[41]. Şekil 2.6'da farklı organik boyalar için salım dalga boyu ile kuantum verimi arasındaki ilişki gösterilmiştir.[41] Kuantum verimindeki bu düşüş uzun dalga boylarında ışınım yapmayan bozulma ve ışınımlı geçişlerin azalma olasılıklarına bağlanmıştır. [34]



Şekil 2.6: Organik boyalar için salım dalga boyu ile kuantum verimi arasındaki ilişki[34]

Yüksek kuantum verimine sahip yakın kızılaltı (NIR) dalga boylarında salım yapan boyaların geliştirilmesi zor olsa da, 700-800 nm aralığında salım yapabilecek ve yüksek kuantum verimine sahip olduğu iddia edilen boyalar geliştirilmiştir[43][44][45].

Tüm organik boyaların emilim ve salım spektrumlarında bir örtüşme gözlenmektedir. LGY sistemde kullanılan organik boyaların bu durumundan kaynaklı olarak yeniden emilim olayları gerçekleşir. Oluşan ardışık yeniden emilim işlemi sonucunda, salım gerçekleşmeden oluşacak bozunmaların olasılığı artacak ve sistem için bir verimi etkileyen mekanizmalar olarak çalışmaya başlayacaktır[34].

Organik boyalar genellikle yaklaşık 100 nm'lik bir emilim spektrumuna sahiptir. Bununla birlikte LGY performansını en üst düzeye çıkarmak için ideal durumda dalga boyları 950 nm'den küçük olan daha geniş bir spektrumda dalga boylarının emilmesi gerekmektedir. Sınırlı emilim spektrumlarından dolayı hiçbir boya ile bu tip bir emilim performansı sergilenemez. Emilim spektrumunun aralığının artırılması için yapılan çalışmalarda farklı emilim spektrumlarına sahip boyaların birlikte kullanılmasıyla bu aralığın geliştirilebileceği gösterilmiştir[46].

Fotonlar, art arda daha uzun dalgaboylu boyalar tarafından emilir ve yayılır, böylece emilen herhangi bir fotonun boya zincirinden geçtiği ve ilk dalga boyuna bakılmaksızın

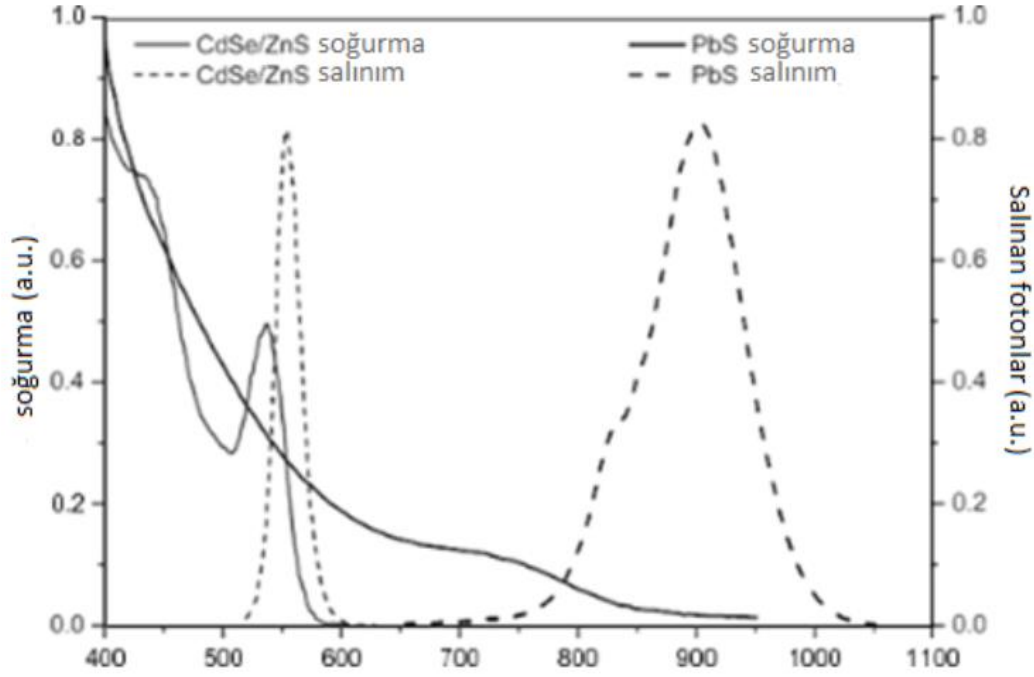
en uzun dalga boylu boya tarafından salındığı basamak etkisi yaratır[35]. Birden fazla organik boya içeren bir LGY için % 4,4'e varan verim değerleri tahmin edilmiştir.[35]

İlk kullanılan organik lazer boyaların fotostabilitesi oldukça düşüktür,[46] bazı boyaların verimi ışık altında yalnızca birkaç hafta sabit kalabilmektedir[42]. En iyisi 1-2 yıl verimini kaybetmeden korumuştur.[34] Fotostabilitenin bu derece kötü olması LGY sistemler için organik boyaların kullanımını oldukça kısıtlar, çünkü güneş enerjisi için kullanılacak cihazların 10-20 yıl boyunca ışıktan etkilenmeden kuantum verimlerini koruması beklenmektedir. Ayrıca yapılan yeni çalışmalarda fotostabilitesi uzun yıllara kadar çıkartılmış boyalar geliştirilmiştir[45]. Bu boyalar LGY Sistemler [47][48][49][50][51][52][53] ve güneşi uygulamaları [54][55][56][57] dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır.

2.5.1.2. Kuantum Noktalar

Kurşun sülfid (PbS) veya kurşun selenit (PbSe) gibi inorganik birleşiklerin nanokristalleri kuantum noktalara örnektir. Bu yapılar 850 nm'den 1900 nm'ye ayarlanabilen geniş emilim spektrumları ve yüksek kuantum verimlerine sahip olabilen yapılardır[58]. Laboratuvarında üretilen kuantum noktaların, kuantum verimleri %80'e ulaşabilmektedir.[59] Fakat ticari kuantum noktaların kuantum verimleri %30-50 ile sınırlıdır[60]. Kuantum noktalar, organik boyalarla kıyaslandığında oldukça yüksek fiyatlarda olduğu görülmektedir. Buna rağmen lumogen boyalara göre düşük fotostabilitelere sahiplerdir [61][62].

Şekil 2.7, 5 nm çaplı kadmiyum selenit / çinko sülfid (CdSe / ZnS) ve 8 nm çaplı PbS kuantum noktalarının emilim ve salım spektrumlarını göstermektedir[34]. PbS kuantum noktalar, 900 nm'nin altındaki tüm dalga boylarını emilim yeteneğine sahiptir, bu da onları LSC kullanımı için ideal hale getirir. Bununla birlikte, geniş emilim aralığına rağmen, emilim ve salım spektrumları arasında büyük bir örtüşme vardır. Nispeten düşük kuantum verimi ile birleştirildiğinde bu büyük yeniden emilim kayıpları verimin düşmesine neden olur. Emilim ve salım spektrumlarının genişlikleri, dolayısıyla spektral örtüşme miktarı, kuantum nokta numunesinde çapların dağılımı ile belirlenir[34]. Daha dar bir boyut dağılımına neden olan kuantum nokta üretim tekniklerindeki gelişmeler, kuantum nokta örneklerinden daha düşük yeniden emilim kayıplarına neden olabilir.



Şekil 2.7: CdSe / ZnS ve PbS kuantum noktalarının emilim ve salım spektrumları[34]

Birçok çalışmada, kuantum noktaları kullanan LGY sistemler üretilmiştir[60][61][63][64][65][66][67][68]. Kuantum noktalar yüksek dalgaboyunda salım yapma fırsatı sağlarken, düşük kuantum verimi ve büyük yeniden emilim kayıpları düşük verimliliklere sebep olmaktadır.

2.5.1.3. Nadir Toprak İyonları

Nadir toprak iyonları, yeniden emilim kayıplarını önemli ölçüde azaltan malzemelerdir. Nadir toprak iyonları, bünyelerinde oluşan Stokes kaymasının diğer malzemelere oranla daha büyük olması nedeniyle umut verici bir LGY katkı maddesidir. Yapılan bir çalışmada, Lumogen Red 305 ve bir europium iyonu ile katkılanmış LGY sistemler karşılaştırılmıştır[69]. Düşük kuantum verimlerine rağmen nadir toprak iyonları için daha yüksek optik verimlilik bildirilmiştir. Bu üstünlük, organik boyalara kıyasla daha büyük Stokes kayması gerçekleşmesi nedeniyle olmuştur[69].

Nadir toprak malzemeleri 1977'de ED2 neodimyum katkılı lazer camı kullanılarak önerilmiştir[70]. Reisfeld ve Kalisky, daha fazla güneş spektrumunun hasadı için uranil (UO_2^{2+}) ve neodim (Nd^{3+}) ve uranil ve homium (Ho^{3+}) katkılı camı tanıtmıştır[71]. Yapılan diğer çalışmalarda Nd^{3+} enerji transferini sağlamak, Nd^{3+} tarafından yeniden

emilim kayıplarını azaltmak ve tek kristal silisyum güneş gözesine uygun salım spektrumunu daha iyi ayarlamak için Yb³⁺ ile bir araya getirilmiştir [72].

2.5.2. Ana Malzeme

LGY sistemlerin levhasının ana malzemesi, içine floroforların katıldığı bir ortam ve yapısal bir destek olarak işlev görür. Malzeme seçimi, floroforun optik özelliklerini etkiler[34].

LGY teknolojisinin önerildiği günden bugüne kadar en yaygın ana malzeme, PMMA, Pleksiglas, Lucite veya basitçe "akrilik" olarak da bilinen polimer polimetilmetakrilatdır [22][24][42][51][64][73]. Bu malzemelerin başlıca avantajları; düşük maliyeti, yüksek optik netliği ve polimerizasyondan önce monomerde kolayca çözülebilmelerinden dolayı floroforlarla katkılama kolaylığıdır[36][74][75]. Aynı zamanda 17 yıla kadar kullanım ömrüne sahip iyi bir fotostabiliteye sahiptir.[46]

Bununla birlikte, PMMA, spektrumun görünür bölgesinde iyi optik şeffaflık sergilemesine rağmen, 700 nm'nin üzerinde emilim tepe noktaları göstermeye başlar. Bu tepe noktalarına molekül içindeki C-H ve C-O bağ titreşimlerinin harmonikleri neden olur[76]. Bu nedenle ana malzemede emisyon dalga boyları > 700 nm olan floroforlar kullanıldığında emilim kayıpları belirgin hale gelir.

İki bileşenli berrak epoksi reçineler, görünür bölgede PMMA'dan % 30 daha düşük emilim verimi sergilemektedir[61]. Bu kesinlikle sıcaklığa duyarlı olabilecek floroforlar için bir avantajdır. Polimeri iyileştirmek için ısı gerektiren PMMA dökümünden farklı olarak, epoksi reçineleri oda sıcaklığında ayarlanabilir. Bununla birlikte, epoksi reçineleri PMMA ile karşılaştırıldığında daha zayıf bir fotostabiliteye sahiptir[34].

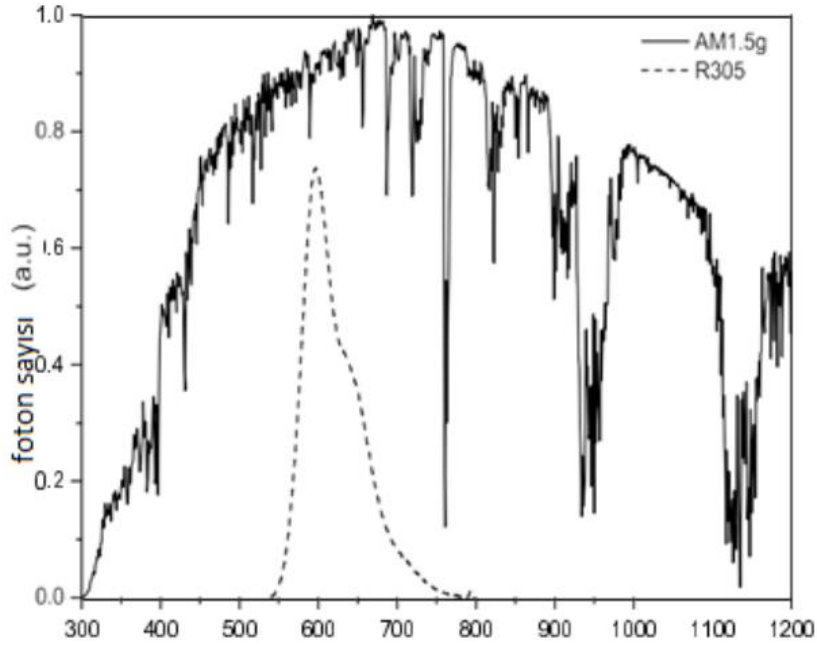
Birçok çalışmada konakçı malzeme olarak bir sıvı kullanılmıştır.[22] Florofor; büyük, ince bir küvet oluşturularak iki plaka arasında tutulmuştur. Bu yöntemde temel motivasyon, kullanılan organik boyaların sınırlı fotostabilitesidir. Sistemde böyle bir boya çözeltisinin kullanılması, lüminesant malzemenin verimi düştüğünde boyayı kolayca değiştirmeyi mümkün kılmasıdır. Bununla birlikte, iyi fotostabilitelere sahip boyaların mevcudiyeti, bunu gereksiz ve pratik olmayan bir yöntem haline getirmektedir.

Yapılan çalışmalarda ana malzeme olarak kullanılan malzemelerden birisi de cam olmuştur[41][77][78]. İnorganik bir malzeme olduğu için, organik polimerlere kıyasla NIR dalgaboylarında (> 700 nm) daha yüksek bir saydamlığa sahiptir ve fotostabilitesi daha iyidir[34]. Bununla birlikte, camın yüksek sıcaklıklarda (genellikle 600°C'den

yüksek sıcaklıklarda) bir eriyikten hazırlanması gerektiğinden, floroforların seçimi, nadir toprak iyonları ve gerekli sıcaklıklara dayanabilen diğer inorganik bileşiklerle sınırlıdır[79][80]. Bu sebepten organik boyalar, nadir toprak iyonları ve kuantum noktaları cam sistemlere dâhil edilemez.

2.5.3. Güneş gözesi

Bir LSC'nin kenarlarından yayılan salımın spektral bant genişliği küçüktür. Tipik olarak organik bir boya için <200 nm ve nadir toprak iyonu için <50 nm civarında bant genişliklerinden bahsedebiliriz[34]. Bu bant genişlikleri, geleneksel bir güneş gözesinin normal olarak yanıt vermek üzere tasarlandığı dalgaboyları aralığından çok daha küçüktür (güneş spektrumunun görünür ve NIR kısmı olan 300-1100 nm aralığı). Şekil 2.8, organik bir boyadan (Rot 305) çıkan emisyonu AM1.5G güneş spektrumuyla karşılaştırmakta ve flüoresans salımının dar bant genişliğini açıkça göstermektedir.



Şekil 2.8: AM1.5g Güneş ile R305 organik boyanın spektrumları[34]

Fotovoltaik panellerde kullanılan güneş gözeleri, farklı dalga boylarında kullanılmak için optimize edilmiştir. Bununla birlikte, LGY'den dar bir spektrumda gelen salım için, gözeler çok daha küçük bir dalgaboyu aralığında optimize edilebilir ve verimlilik artar[34].

Her ne kadar silikon gözeler LSC araştırmalarında yaygın olarak kullanılmış olsa da, galyum arsenik (GaAs'lar) veya galyum indiyum fosfat (GaInP) gibi diğer gözeler daha yüksek verim ile sonuçlanabilir. Örneđin Reinfeld, turuncu yayan bir flüoresan organik boya ile örtölmüş 10x10 cm PMMA tabakasından oluşan bir LSC'ye bağlanan Si ve GaA güneş gözelerinin performansını karşılaştırmıştır[41]. LGY sistemde bir kenara bağlı göze ile güneşe doğrudan bakan benzer bir gözeden gelen kısa devre akımları iki göze tipi için de ölçölmüştür. Bu oran Si gözeleri için 1.7 ve GaAs için 2.98 değerinde çıkmıştır. Bunun nedeni, GaAs'ların Si'den (GaAs: 1.43 eV, Si: 1.11 eV) daha büyük bir bant aralığına sahip olmalarıdır ve bu nedenle GaAs gözelerinde ısı olarak daha az enerji israfı olacaktır. GaAs güneş gözelerinde açık devre voltajı da daha yüksektir (GaAs: ~1 V Si: ~0,6 V), bu da daha yüksek bir güç çıkışı ve verime yol açar. Güneř gözeleri ideal olarak, yarıiletken bant aralığının mümkün olduğu kadar LGY tabakasının salım spektrumları ile eşleştirilmesi esasına göre sečilmelidir.

3. LÜMİNESANT GÜNEŞ YOĞUNLAŞTIRICI SİSTEMİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde LGY sistemlerin optik tasarımının yapılması sırasında tasarım parametrelerinin belirlenmesi, simüle edilecek modellerin oluşturulması ve simülasyonun yapılması ile ilgili süreçler paylaşılacaktır. Simülasyon çıktıları değerlendirilecek ve hedeflenen tasarımın özellikleri tartışılacaktır.

Çalışma boyunca gerçekleştirilecek simülasyonlarda optik tasarım yazılımı olan Zemax yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım sayesinde görüntüleme optiğinden aydınlatmaya kadar her türlü alanda sanal prototipler yaratılıp, analizler yapılabilmektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasında yapılan modelleme ve simülasyon çalışmalarının ilk bölümünü oluşturduğu bir TÜBİTAK projesi de yürütülmektedir. Yapılan çalışmalar TÜBİTAK TEYDEB biriminde, 1512 Girişimcilik Aşamalı Destek Programı tarafından 1 yıl süreli proje olarak hibe almıştır.

LGY sistemler üzerine yapılan bu çalışma sonucunda binaların dış cephelerine uygulanabilecek, düşük maliyetli ve yüksek verimli bir LGY cihazın meydana çıkartılması hedeflenmektedir. Tasarım sonucunda elde edilecek verimler LGY sistemlerin optik verimlerini ifade edecektir. LGY sistemlerde dönüşüm verimi optik verim ile güneş gözesinin veriminin çarpılmasıyla hesaplanır. Bu hedef doğrultusunda tasarım parametrelerinin her birine dair yapılan modelleme-simülasyon çalışmaları 3.1. Tasarım Parametreleri başlığında aktarılmıştır.

3.1. Tasarım Parametreleri

LGY sistemler, binaların dış cephelerinde kullanılmak üzere tasarlanmaktadır. Bu sistemin verimi;

- Ana malzeme olarak kullanılan PMMA optik özelliklerine ve üretim kalitesine
- Tasarımın boyutlarına (en, boy, kalınlık)
- Lüminesant katkı olan organik boya malzemesinin
 - i. Emilim-salım spektrumuna
 - ii. Kuantum verimine
 - iii. LGY’de kullanım yoğunluğuna
- Dalga kılavuzu yaratmak için kullanılan ayna malzemesinin
 - i. Yansıtma verimlerine

- ii. Konumlandırma özelliklerine
 - Güneş gözesinin verimine doğrudan bağlıdır.

Yapılmakta olan bu tez çalışmasında, LGY sistemin optik tasarım verimine doğrudan etkisi olan parametreler incelenecektir.

3.1.1. Ana Malzeme

Literatürde bulunan LGY çalışmalarının büyük bir kısmında ana malzeme için PMMA tercih edilmiştir.

PMMA(akrilik) malzemesinin optik özelliklerini ifade eden değerler vardır. Bu değerler üretim yöntem ve kalitesine göre değişebilmektedir. Modelleme ve simülasyon sırasında kullanılan yazılımda, simülasyon yaparken tanımlanmış olan PMMA kullanılmıştır. Yazılımda tanımlanmış PMMA'nın bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir:

Çizelge 3.1: Yazılımda kullanılan PMMA'nın özellikleri

Kırma indisi	1,49
Abbe sabiti	57,44
Yoğunluk	1,13 g/cm ³

Ana malzeme, hem organik boya molekülleri için konakçı olarak hem boyutlarıyla cihazın yapısal formunu belirleyecek olması sebebiyle LGY cihazlarının verimi için oldukça önemli bir parametredir.

Tasarımın boyut çalışmalarında LGY'nin bina dış cephelerinde kullanılacağı düşünülerek hedef panel alanı, 10x10 cm², 30x30 cm² veya 50x50 cm² olarak düşünülmüştür.

5x5 cm² paneller üzerinden ön tasarımlar gerçekleştirilerek ana malzemenin kalınlığı ile cihazın verimi arasında bir ilişki kurulması planlanmıştır. Bu çalışmada, yalnız akrilik üzerine sabit ışık kaynağından gönderilen fotonların hareketi gözlenmiştir. Çalışma 0,1 cm'den 2 cm'ye kadar devam etmiştir. Çizelge 3.2'de foton sayıları için farklı kalınlıktaki akriliklerin verimleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: LGY’de kalınlık-verim ilişkisi

Kalınlık[cm]	Verim	Kalınlık	Verim
0,1	20,8	0,9	32,6
0,2	24,4	1	33,4
0,3	26,8	1,1	34
0,4	28,1	1,2	34,5
0,5	29,6	1,3	34,6
0,6	30,5	1,4	35,1
0,7	31,6	1,5	35,7
0,8	32,6	2	37,2

5x5 cm² levhalar üzerinde yapılan çalışmanın çıktıları göz önünde bulundurulduğunda, sistemin kalınlaşması, maliyeti ve cihazın ağırlığını arttıracığından diğer boyutların ön tasarımlarında kullanılmak üzere 0,6 cm kalınlık belirlenmiştir.

3.1.2. Organik Boya

LGY sistemleri diğer fotovoltaik uygulamalardan ayırtıran en önemli özelliklerinden bir tanesi sistem içinde önemli bir rol oynayan lüminesant katkıların bulunmasıdır. Bu lüminesant katkıları 2. Bölümde belirtildiği gibi organik boyalar, kuantum noktalar veya nadir toprak iyonları olabilmektedir. Bu çalışmada yapılacak olan simülasyonda organik boya olarak Rhodamine 6G boyası tercih edilmiştir.

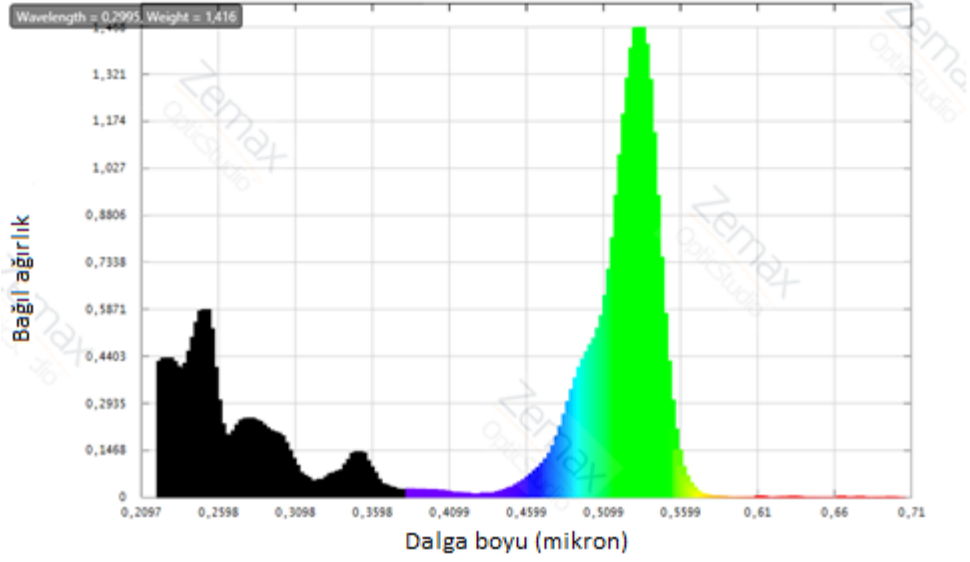
Simülasyon ve modellemenin olması için yazılıma girilen bilgiler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3: Simülasyon yazılımında kullanılan boyanın özellikleri ve Saçılma parametreleri

Boyanın emilim spektrumu	Rhodamine 6G
Boyanın salım spektrumu	Rhodamine 6G
Boyanın kuantum verimi	Rhodamine 6G
Sönüm katsayısı	1×10^5
Uyarılma dalga boyu	0,4
Fosfor yoğunluğu	5×10^{16}
Ortalama serbest yol	0,52308
Partikül indeksi	2,30
Partikül yarıçapı	0,002
Altsınır	0,0001
Partikül yoğunluğu	5×10^{16}

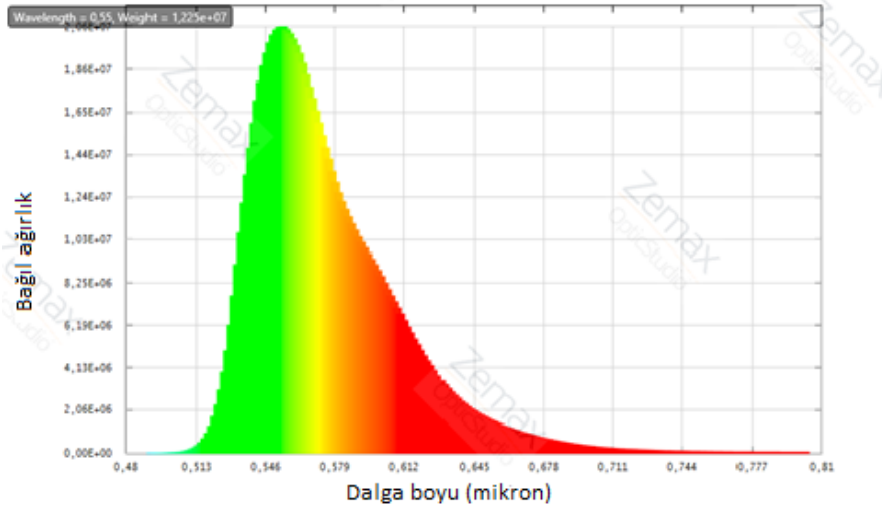
Parametreler incelendiğinde:

- Boyanın emilim spektrumu: Simülasyonda kullanılacak olan Rhodamine 6G adlı organik boyanın emilim spektrumu Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Simülasyonda kullanılan boyanın emilim spektrumu

- Boyanın salım spektrumu: Simülasyonda kullanılacak olan Rhodamine 6G adlı organik boyanın salım spektrumu Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Simülasyonda kullanılan boyanın salım spektrumu

3.1.3. Ayna Konfigürasyonu

LGY sistemlerin temel amaçlarından bir tanesi kullanılan güneş gözesi miktarının azaltılarak maliyetin düşürülmesidir. Bunun için lüminesant katkılar kullanılarak bir dalga kılavuzu yaratılması amaçlanmıştır. Bu dalga kılavuzunun yaratılması için önemli malzemelerden bir tanesi, cihazda kullanılacak aynalardır. Kullanılacak aynaların konfigürasyonu da verimi doğrudan etkileyecektir. Bu sebepten ön tasarımlardan bir tanesi de ayna konfigürasyonu için yapılmıştır. Çizelge 3.4’de farklı ayna tasarımlarının verime katkısı verilmiştir:

Çizelge 3.4: Aynaların yerleştirme şekilleri ile verim arasındaki ilişki

Ayna türü ve yerleşimi	Yoğunlaştırma oranı
Zemax Mirror	30,4
Plaka arka yüzey – yansıtıcı kaplama (1cm)	30,9
PMMA – yansıtıcı kaplama	30,8
Ayna arka yüzey yansıtıcı kaplama (2 cm)	96,5
Ayna arka yüzey yansıtıcı kaplama (1 cm)	120
Ayna arka yüzey yansıtıcı kaplama (0,1 cm)	300
PMMA – 3 tarafı yansıtıcı kaplama	34,4
PMMA – 4 tarafı yansıtıcı kaplama	35,1

Çizelge 3.4 sonuçlarından görüldüğü gibi ayna ile PMMA arasında boşluk bırakıldığında optik verim artmaktadır. Bu sebepten ön tasarım çalışmalarında PMMA-ayna arasında hava boşluğu bırakılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

3.2.Ön Tasarımların Yapılması

Ana malzemenin kalınlığı, boyanın özellikleri ve aynaların yerleşimleriyle ilgili yapılan tasarımların sonuçlarına dayanarak hedeflenen ürüne ulaşmak için ön tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu ön tasarımlarda 5x5 cm

Çizelge 3.5’de simüle edilmesi planlanan tasarımlar gösterilmiştir. Her tasarıma belirlenmiş bir kodlama sistemi ile kod atanmıştır. Tasarımlarda;

- Arka ayna(Arka), panelin arkasında kalan yüzeye yerleştirilecek aynayı
- Karşı ayna(Karşı), panelde güneş gözelerin karşısında kalan yüzeye yerleştirilecek aynayı

- Yan aynalar(Yanlar), panelde güneş gözesinin sağında ve solunda kalan yüzeylerdeki aynayı ifade etmektedir.

Yapılan simülasyonlarda aynanın, panele olan mesafesine göre her tasarım için 3 farklı sonuç elde edilmesi planlanmıştır. Ayna kombinasyonlarına göre belirlenen 36 farklı sistemin 18 tanesi simüle edilmiştir. Simüle edilen tasarımlarda PMMA ile ayna arasında hava boşluğu (sonuç 1’de 2 mm, sonuç 2’de 1 mm) bırakılmıştır. Bu sonuçlar tabloya işlenmiştir.

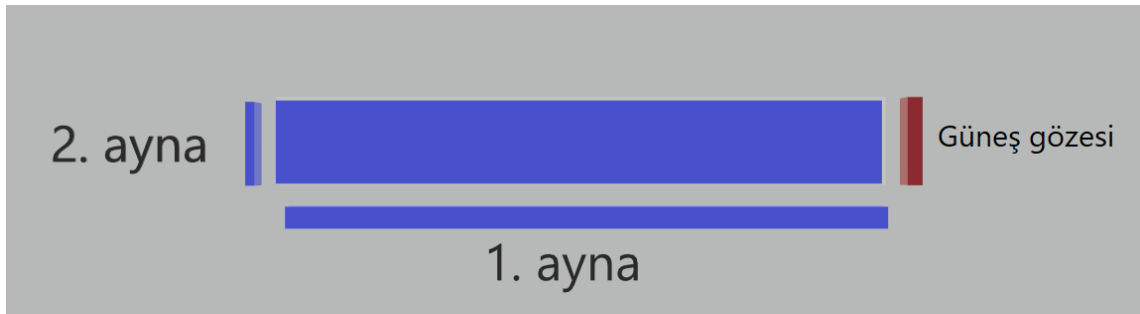
Sonuç-1: Kaynaktan çıkıp dedektör olarak belirlenen aynaya gelen foton sayısı

Sonuç-2: Kaynaktan çıkıp dedektör olarak belirlenen ayna ön yüzeyine gelen foton sayısı

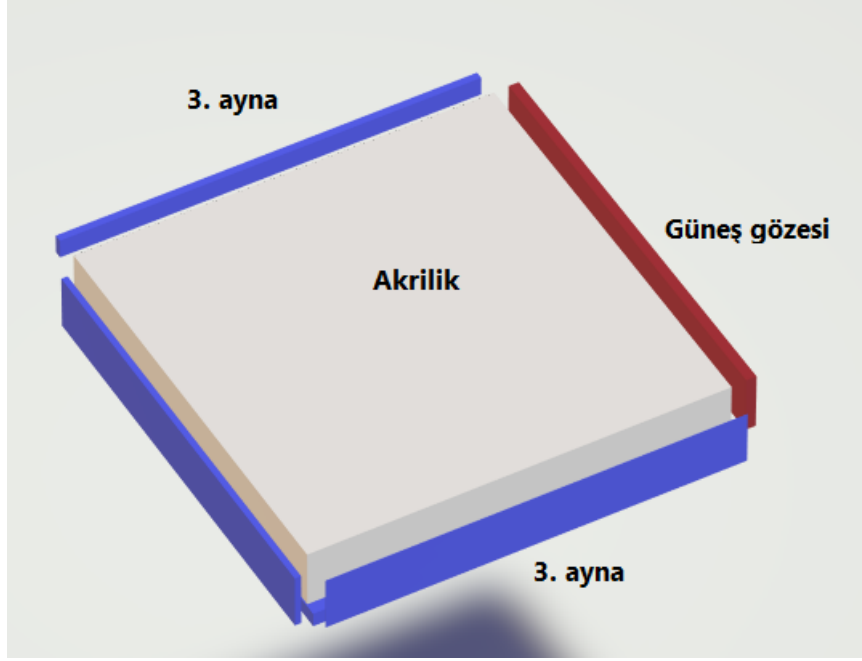
Sonuç-3: Kaynaktan çıkan gücün, detektöre ulaşan güce oranı

Çizelge 3.5’de simüle edilmesi planlanan 36 tasarım bulunmaktadır. Bu tasarımlardan bazıları yukarıda verilen çizelgelerdeki sonuçlara bakılarak, simüle edilmeden elenmiştir. Çizelge 3.4 sonuçlarına göre panel ile ayna arasında boşluk bırakılarak yapılan montajlarda, boşluk bırakılmayan tasarımlara göre verim artmaktadır. Bu sebepten boşluk içermeyen tasarımlar simüle edilmemiştir.

Simülasyon boyunca yapılacak tasarımlarda aynaların yerleşimleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 3.3: 1. ve 2. aynaların yerleşimi



Şekil 3.4: 3. aynaların yerleşimi

Çizelge 3.5: Simülasyon Çıktıları

Kod	Ayna Tasarımı	Sonuç-1 Foton sayısı (Zemax Ayna)	Sonuç-2 Foton sayısı (Ayna ön yüzey kaplama)	Sonuç-3 Güç oranı (W_K/W_D)
S5A3S	Yanlar – Yansıtıcı			
S5A3Sa	Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	247.286	193.239	S1-0,072 S2-0,081
S5A3D	Yanlar – Saçıcı			
S5A3Da	Yanlar - Saçıcı (hava boşluğu)	99.887	334.856	S1-0,071 S2-0,076
S5A23S	Karşı - Yansıtıcı Yanlar – Yansıtıcı			
S5A23Sa	Karşı - Yansıtıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	294.014	191.528	S1-0,081 S2-0,089
S5A23D	Karşı - Saçıcı Yanlar - Saçıcı			
S5A23Da	Karşı - Saçıcı Yanlar - Saçıcı (hava boşluğu)	109.491	379.352	S1-0,079 S2-0,088
S5A1S	Arka – Yansıtıcı			

S5A1Sa	Arka - Yansıtıcı (hava boşluğu)	93.001	30.354	S1-0,073 S2-0,073
S5A1D	Arka – Saçıcı			
S5A1Da	Arka - Saçıcı (hava boşluğu)	164.071	193.340	S1-0,082 S2-0,081
S5A12S	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı			
S5A12Sa	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı (hava boşluğu)	115.914	157.185	S1-0,082 S2-0,082
S5A12D	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı			
S5A12Da	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı (hava boşluğu)	200.691	242.409	S1-0,092 S2-0,097
S5A13S	Arka - Yansıtıcı Yanlar – Yansıtıcı			
S5A13Sa	Arka - Yansıtıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	421.843	203.552	S1-0,083 S2-0,092
S5A13D	Arka - Saçıcı Yanlar - Saçıcı			
S5A13Da	Arka - Saçıcı Yanlar - Saçıcı (hava boşluğu)	326.254	721.981	S1-0,09 S2-0,097
S5A1D3S	Arka - Saçıcı Yanlar – Yansıtıcı			
S5A1D3Sa	Arka - Saçıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	490.388	939.378	S1-0,092 S2-0,098
S5A123S	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı Yanlar – Yansıtıcı			
S5A123Sa	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	436.434	217.292	S1-0,094 S2-0,103
S5A1D23S	Arka - Saçıcı Karşı - Yansıtıcı Yanlar - Yansıtıcı			
S5A1D23S a	Arka - Saçıcı Karşı - Yansıtıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	554.894	625.828	S1-0,104* S2-0,106*
S5A13S2D	Arka - Yansıtıcı Karşı - Saçıcı Yanlar – Yansıtıcı			

S5A13S2D a	Arka - Yansıtıcı Karşı - Saçıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	540.691	540.364	S1-0,094 S2-0,096
S5A12D3S	Arka - Saçıcı Karşı - Saçıcı Yanlar - Yansıtıcı			
S5A12D3S a	Arka - Saçıcı Karşı - Saçıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	572.537	638.102	S1-0,104* S2-
S5A12S3D	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı Yanlar – Saçıcı			
S5A12S3D a	Arka - Yansıtıcı Karşı - Yansıtıcı Yanlar - Saçıcı (hava boşluğu)	259.198	268.538	S1-0,093 S2-0,094
S5A13D2S	Arka - Saçıcı Karşı - Saçıcı Yanlar – Yansıtıcı			
S5A13D2S a	Arka - Saçıcı Karşı - Saçıcı Yanlar - Yansıtıcı (hava boşluğu)	374.107	374.122	S1-0,102* S2-0,103*
S5A123D	Arka - Saçıcı Karşı - Saçıcı Yanlar – Saçıcı			
S5A123Da	Arka - Saçıcı Karşı - Saçıcı Yanlar - Saçıcı (hava boşluğu)	372.403	801.451	S1-0,103* S2-0,112*

Çizelge 3.5’de verilen simülasyon çıktıları sonucunda LGY sistemin tasarımında karara varılacak hususlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- 1- Aynaların özellikleri (saçıcı, yansıtıcı)
- 2- Aynaların kombinasyonu
- 3- Aynaların konumlandırılma özellikleri

Simülasyon sonuçlarının yorumlanması aşağıda maddeler halinde yapılmıştır.

- Yukarıda belirtildiği gibi çıktılar 3 farklı sonuç için incelenmiştir.
 - Sonuç 1: Simülasyon yazılımı tarafından tanımlanmış ayna kullanıldığında çıkan sonuçlar

- Sonuç 2: Simülasyon yazılımı tarafından tanımlanmış aynanın ön yüzünün %99,5 yansıtıcı olacak şekilde kaplanmasından sonraki sonuçlar (yazılımın tanımladığı aynada, aynanın hangi yüzünün yansıtıcı olduğu bilinmediğinden 2mm üstüne bir kalınlık oluşması istenmediği için böyle bir tasarım denenmiştir)
 - Sonuç 3: Sonuç 1’de kullanılan tasarımın güç çıktıları alınmıştır.
- Simülasyonda bir tane dedektör kullanılmıştır. Bu dedektör, güneş gözesinin bulunacağı yüzeyden 1 mm PMMA içine yerleştirilmiştir. Böylece yüzeyden geri yansımaların sonucu etkilememesi sağlanmıştır.
 - Simülasyonlarda 100 bin ışın ve 1 W güç kullanılmıştır. Işınlardan gönderildiği kaynak monokromatik özelliklere sahiptir. Sonuçlar incelendiğinde birçok tasarımda dedektörde 100 binden fazla ışın toplandığı görülmektedir. Ortam değiştiren ışınlar Snell yasası sonucu geçen veya yansıyan olarak 2 farklı ışına bölünerek yoluna devam edebilmekte ve bu sayede ışın sayısı artmaktadır. Ayrıca kullandığımız boya tarafından emilen ve tekrar salınan ışınların da toplam ışın sayısını arttırdığı yorumlanmıştır. Fakat gönderilen güç 1 W olup ışın sayısı artsa dahi sabit kalmaktadır. Bu sebepten sonuçlar açısından daha güvenilir veriler sunmaktadır.
 - Geometrik verim (G_{geo}), güneşin LGY sisteme girdiği ön yüzey alanının (P_A), güneş gözelerinin LGY sistemde yerleştirildiği yan yüzey alanına (H_A) oranı olarak tanımlanır. Geometrik verim ifadesi, geniş bir alana düşen ışınların dalga kılavuzları ile daha küçük bir alana toplanmasını ifade eder. Bu sebeple üründe mümkün olduğundan büyük bir geometrik verim değerine ulaşılmak istenmektedir.
 - Sonuç 1’de ayna PMMA’ya 2 mm mesafe bırakılıp sabitlenirken Sonuç 2 çıktılarında 1mm mesafe bırakılmıştır. 1 mm mesafe bırakıldığında sonuçlar daha iyi çıkmaktadır.
 - Aynaların hepsinin “saçıcı” olduğu veya hepsinin “yansıtıcı” olduğu tasarımların sonuçları karşılaştırıldığında, neredeyse bütün çıktılarda “saçıcı” aynalar ile daha

iyi verimlere ulaşıldığı görülmektedir. Arka yüzeye ayna konumlandırılmayan tasarımlarda “yansıtıcı” ayna kullanılan simülasyon sonuçları daha iyi veya çok yakın sonuçlarda çıkabilmiştir. Bu durumun doğrudan gelen ışık yerine yansıyan ışıkların karşı ve yan aynada daha az etkileşime geçmesinden kaynaklandığı gözlenmiştir.

- Arka ayna için S5A1Sa ve S5A1Da tasarımları incelendiğinde “saçıcı” ayna kullanılan tasarımın güç çıktısı daha iyidir. Arka aynayla beraber farklı yüzeylerde aynaların kullanıldığı tasarımlar incelendiğinde (S5A12Sa- S5A12Da/ S5A13Sa- S5A13Da) yine “saçıcı” ayna kullanılan tasarımlarda güç çıktısının verimi yükselmiştir. Bu sebepten ileri tasarımlarda arka ayna da “saçıcı” ayna tercihi yapılmıştır.
 - Karşı ve yan aynalarda “saçıcı” ayna veya “yansıtıcı” ayna tercihi en az 2 ayna olan tasarımların verimlerine göre değişiklik göstermektedir.
- İleri tasarımlarda kullanılmasına karar verilmiş tasarımların kodları aşağıda bulunmaktadır.
 - S5A1D23Sa
 - S5A12D3Sa
 - S5A13D2Sa
 - S5A123Da

Bu tasarımlar üzerinden, 10x10 cm/30x30 cm/50x50 cm LGY’lerin tasarımları için çalışılacaktır. İleri tasarımlarda her boyutlandırma için kalınlık çalışması ve kullanılacak boyanın yoğunluğuna dair bir çalışma yapılacaktır.

3.3. İleri Tasarımların Yapılması

İleri tasarımlarda her panelin boyutuna göre kalınlığı ve kullanılacak boyanın miktarı modellenip simüle edilecektir.

Kalınlık belirleme: Kalınlık parametresi hacme bağlı olduğu için, tasarımların hepsi için ayrı hesapların yapılmasına gerek kalmayacaktır.

- Aynalar 2 mm boşluk bırakılacak şekilde LGY’ye sabitleneceği kabul edilmiştir.
- Sonuçlar dedektöre ulaşan ışın sayısı ve güç çıktısı üzerinden yorumlanmıştır.

Boyanın miktarı: Panellerde kullanılan boya miktarı, emilecek ışının miktarını belirleyecektir. LGY sistemlerde önemli verimi etkileyen mekanizmalarından bir tanesi yeniden emilim kayıplarıdır. Hacim içinde kullanılacak olan boyanın miktarı optimum miktarda seçilmezse eğer boya miktarı az olduğunda, kırmızıya kayması istenen ışın sayısına ulaşamayacakken; boya miktarı çok olduğunda, emilim ve salım spektrumu örtüşen boya kırmızıya kaydıracağı ışınları tekrar emilmesi verim kaybına sebep olacaktır. Bu sebepten optimum boya miktarı için modelleme yapılması gerekmektedir.

3.3.1. 10x10 cm² Cihazların Simülasyonu

S5A123Da tasarımı için 10x10 cm'lik bir alan oluşturulduktan sonra 0,4 cm'den 4 cm'ye kadar 0,2 cm ekleyerek modellenip, simüle edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6: 10x10 cm² alana sahip LGY sistemin kalınlık-verim ilişkisi

Kalınlık [cm]	Sonuç 1 (Dedekte edilen foton sayısı)	Sonuç 2 (W _K /W _D) (Kaynaktan gönderilen gücün dedektörde toplanan güce oranı)	Geometrik Kazanç (G _{geo} =P _A /H _A)
0,4	221.348	0,08	25,0
0,6	344.840	0,092	16,6
0,8	494.607	0,103	12,5
1,0	666.453	0,111	10,0
1,2	839.346	0,120	8,33*
1,4	1.059.290	0,126	7,14
1,6	1.268.123	0,132	6,25
1,8	1.485.846	0,138	5,55
2,0	1.666.009	0,142	5,0
2,2	1.859.174	0,147	4,54
2,4	2.084.553	0,151	4,16
2,6	2.322.156	0,155	3,84
2,8	2.494.311	0,158	3,57
3,0	2.739.565	0,161	3,33
3,2	2.871.358	0,164	3,12
3,4	3.158.395	0,168	2,94
3,6	3.287.767	0,171	2,77
3,8	3.464.559	0,173	2,63
4,0	3.551.747	0,174	2,50

LGY sistemde kullanılacak boyanın miktarı panelin kütlesine göre belirlenmiştir. Çizelge 3.7’de belirlenen kalınlık değerine göre LGY’nin boyutları belirlenmiş; hacmi ve kütlesi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7: 10x 10 cm² ‘lik LGY sistemin boyutları ve kütlesi

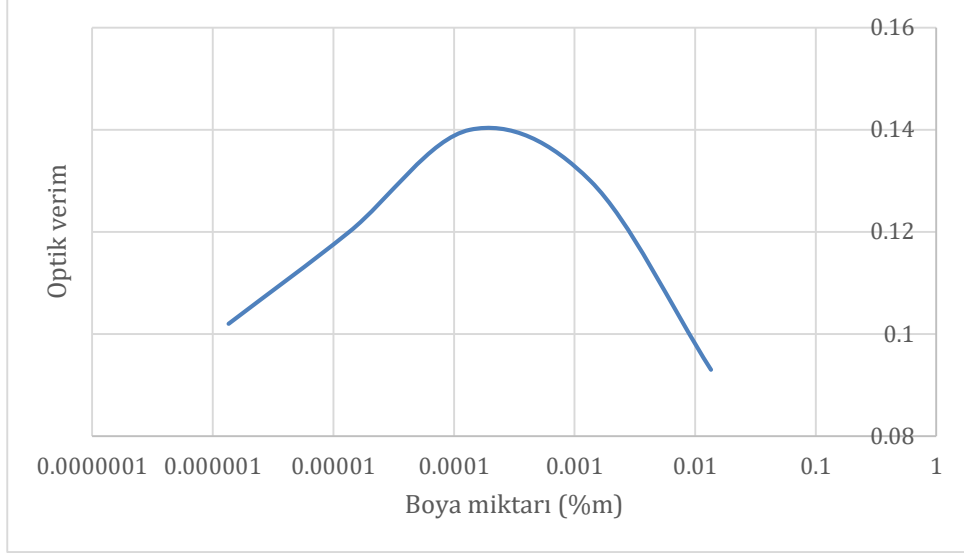
PMMA Yoğunluk	LGY’nin Boyutları	LGY’nin Hacmi	LGY’nin Kütlesi
1,13 g/cm ³	10x10x1,2 cm ³	120 cm ³	135,6 g

Simülasyonda ve üretimde kullanılacak olan Rhodamine 6G boyası için simüle edilecek değerler Çizelge 3.8’de LGY’nin kütlesi üzerinden aşağıda hesaplanmıştır. Kullanılacak boyanın molekül kütlesi 479,01 g’dır.

Çizelge 3.8: Kullanılacak boya miktarı – verim ilişkisi

Kullanılacak boyanın PMMA malzemeye göre kütlece yüzdesi	Sonuç 1 (Dedekte edilen foton sayısı)	Sonuç 2 (WK/WD) (Kaynaktan gönderilen gücün dedektörde toplanan güce oranı)
%0,00001	679.263	0,102
%0,0001	835.425	0,12
%0,001	824.245	0,14*
%0,01	617.864	0,13
%0,1	618.436	0,093
%1	Yazılım bu sayıda foton için hata veriyor.	Yazılım bu sayıda foton için hata veriyor.

Çizelge 3.8’de verilen bilgiler Şekil 3.5’de optik verim ile boya miktarı arasındaki ilişkinin grafiği çizilerek gösterilmiştir. Optik verim, boyanın hem düşük olduğu hem yüksek olduğu noktalarda düşerken bu aralıkta en verimli sonuca ulaşılmıştır.



Şekil 3.5: Optik verim ile boya miktarı arasındaki ilişki – 10x10 cm²

Kullanılması gereken boya miktarı için Çizelge 3.6'da, 1,2 cm kalınlıktaki panel için S5A123Da tasarımı simüle edilmiştir. Beklendiği gibi düşük yoğunlukta ve yüksek yoğunlukta boya kullanıldığında verim düşmektedir. Çizelge 3.8'de en iyi optik verim $1,356 \times 10^{-4}$ g boya kullanıldığında ortaya çıkmıştır. Bu değer akrilik levhanın kütlece %0,001 değerine denk gelmektedir. Yazılım, belli bir foton sayısından sonra hesap zorluğundan dolayı hata vermiştir. Simülasyon çıktısı Ek-1'de paylaşılmıştır.

3.3.2. 30x30 cm² Cihazların Simülasyonu

S5A123Da tasarımı için 30x30 cm'lik bir alan oluşturulduktan sonra 0,4 cm'den 4 cm'ye kadar 0,2 cm ekleyerek modellenip simüle edilmiştir.

Çizelge 3.9: 30x30 cm² alana sahip LGY sistemin kalınlık-verim ilişkisi

Kalınlık [cm]	Sonuç 1 (Dedekte edilen foton sayısı)	Sonuç 2 (W_K/W_D) (Kaynaktan gönderilen gücün dedektörde toplanan güce oranı)	Geometrik Kazanç ($G_{geo}=P_A/H_A$)
0,8	436.104	0,092	37,5
1,0	601.039	0,099	30,0
1,2	772.853	0,105	25,0
1,4	992.502	0,110	21,42
1,6	1.228.914	0,115	18,75
1,8	1.446.970	0,121	16,66
2,0	1.686.968	0,125	15,0*
2,2	1.911.227	0,128	13,63

2,4	2.084.213	0,131	12,5
2,6	2.278.244	0,134	11,53
2,8	2.554.877	0,135	10,71
3,0	2.809.354	0,139	10,0
3,2	2.971.558	0,141	9,375
3,4	3.225.859	0,143	8,82
3,6	3.398.128	0,145	8,33
3,8	3.690.585	0,149	7,89
4,0	3.795.697	0,149	7,50
4,5	4.255.588	0,153	6,66
5,0	4.717.393	0,159	6,0

LGY sistemde kullanılacak boyanın miktarı panelin kütlesine göre belirlenmiştir. Çizelge 3.9’da belirlenen kalınlık değerine göre LGY’nin boyutları belirlenmiş; hacmi ve kütlesi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.10: 30x30 cm² ‘lik LGY sistemin boyutları ve kütlesi

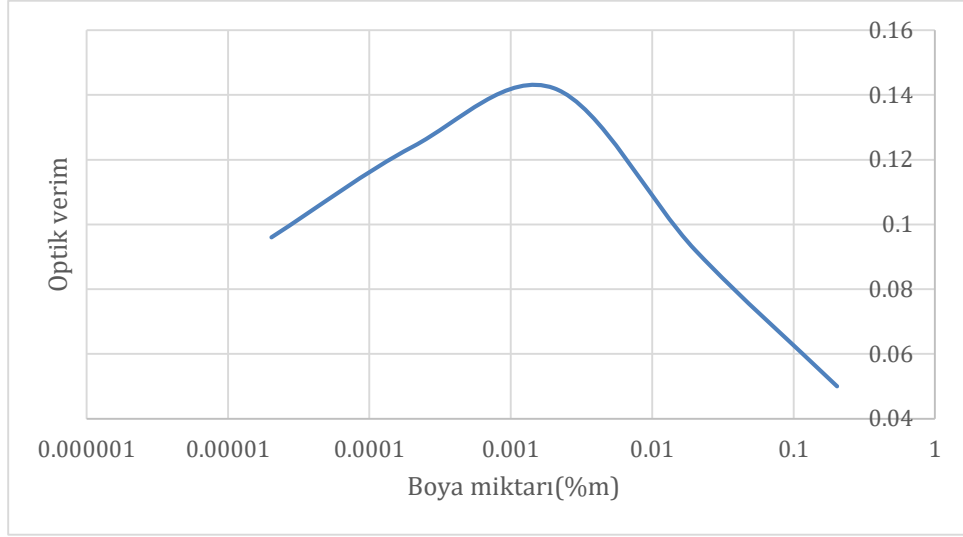
PMMA Yoğunluk	LGY’nin Boyutları	LGY’nin Hacmi	LGY’nin Kütlesi
1,13 g/cm ³	30x30x2 cm ³	200 cm ³	2.034 g

Simülasyonda ve üretimde kullanılacak olan Rhodamine 6G boyası için simüle edilecek değerler Çizelge 3.11’de LGY’nin kütlesi üzerinden aşağıda hesaplanmıştır. Kullanılacak boyanın molekül kütlesi 479,01 g’dır.

Çizelge 3.11: 30x30 cm² ‘lik LGY sistemde kullanılacak boya miktarı – verim ilişkisi

Kullanılacak boyanın PMMA malzemeye göre kütlece yüzdesi	Sonuç 1 (Dedekte edilen foton sayısı)	Sonuç 2 (WK/WD) (Kaynaktan gönderilen gücün dedektörde toplanan güce oranı)
%0,00001	1.238.008	0,096
%0,0001	1.654.686	0,124
%0,001	1.075.154	0,142*
%0,01	548.086	0,0919
%0,1	390.780	0,05
%0,1	Yazılım bu sayıda foton için hata veriyor.	Yazılım bu sayıda foton için hata veriyor.

Çizelge 3.11’de verilen bilgiler Şekil 3.6’de optik verim ile boya miktarı arasındaki ilişkinin grafiği çizilerek gösterilmiştir. Optik verim, boyanın hem düşük olduğu hem yüksek olduğu noktalarda düşerken bu aralıkta en verimli sonuca ulaşılmıştır.



Şekil 3.6: Optik verim ile boya miktarı arasındaki ilişki – 30x30 cm²

Kullanılması gereken boya miktarı için Çizelge 3.9’da 2 cm kalınlıktaki panel için S5A123Da tasarımı simüle edilmiştir. Beklendiği gibi düşük yoğunlukta ve yüksek yoğunlukta boya kullanıldığında verim düşmektedir. Çizelge 3.11’de en iyi optik verim $20,34 \times 10^{-4}$ g boya kullanıldığında ortaya çıkmıştır. Bu değer akrilik levhanın kütlece %0,001 değerine denk gelmektedir. Yazılım belli bir foton sayısından sonra hesap zorluğundan dolayı hata vermiştir. Simülasyon çıktısı aşağıda paylaşılmıştır.

3.3.3. 50x50 cm² Cihazların Simülasyonu

S5A123Da tasarımı için 50x50 cm’lik bir alan oluşturulduktan sonra 0,4 cm’den 4 cm’ye kadar 0,2 cm ekleyerek modellenip, simüle edilmiştir.

Çizelge 3.12: 50x50 cm² alana sahip LGY sistemin kalınlık-verim ilişkisi

Kalınlık [cm]	Sonuç 1 (Dedekte edilen foton sayısı)	Sonuç 2 (W _K /W _D) (Kaynaktan gönderilen gücün dedektörde toplanan güce oranı)	Geometrik Kazanç (G _{geo} =P _A /H _A)
1,0	553.002	0,095	50,0
1,2	736.678	0,102	41,66
1,4	928.790	0,107	35,71
1,6	1.136.645	0,111	31,25
1,8	1.358.777	0,116	27,77
2,0	1.540.127	0,12	25,0*
2,2	1.792.414	0,123	22,72
2,4	1.970.934	0,125	20,83
2,6	2.195.266	0,127	19,23
2,8	2.391.149	0,132	17,85
3,0	2.628.735	0,133	16,66
3,2	2.788.839	0,135	15,62
3,4	2.919.776	0,136	14,7
3,6	3.229.488	0,137	13,88
3,8	3.356.468	0,139	13,15
4,0	3.471.717	0,143	12,5
4,5	3.972.457	0,146	11,11
5,0	4.412.877	0,148	10,0
5,5	4.610.657	0,152	9,09
6,0	4.906.227	0,154	8,33

LGY sistemde kullanılacak boyanın miktarı panelin kütlesine göre belirlenmiştir. Çizelge 3.12' belirlenen kalınlık değerine göre LGY'nin boyutları belirlenmiş; hacmi ve kütlesi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.13: 50x50 cm² 'lik LGY sistemin boyutları ve kütlesi

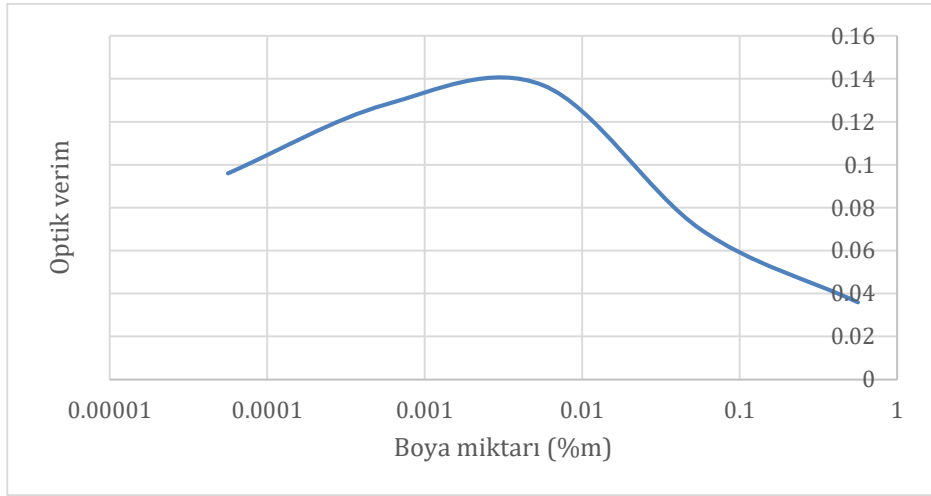
PMMA Yoğunluk	LGY'nin Boyutları	LGY'nin Hacmi	LGY'nin Kütlesi
1,13 g/cm ³	50x50x2 cm ³	5000 cm ³	5650 g

Simülasyonda ve üretimde kullanılacak olan Rhodamine 6G boyası için simüle edilecek değerler Tablo 8'de LGY'nin kütlesi üzerinden aşağıda hesaplanmıştır. Kullanılacak boyanın molekül kütlesi 479,01 g'dır.

Çizelge 3.14: 50x50 cm²'lik LGY sistemde kullanılacak boya miktarı – verim ilişkisi

Kullanılacak boyanın PMMA malzemeye göre kütlece yüzdesi	Sonuç 1 (Dedekte edilen foton sayısı)	Sonuç 2 (WK/WD) (Kaynaktan gönderilen gücün dedektörde toplanan güce oranı)
%0,00001	1.753.807	0,096
%0,0001	2.191.705	0,128
%0,001	1.020.512	0,137*
%0,01	444.455	0,07
%0,1	313.569	0,036
%0,1	Yazılım bu sayıda foton için hata veriyor.	Yazılım bu sayıda foton için hata veriyor.

Çizelge 3.14'de verilen bilgiler Şekil 3.7'de optik verim ile boya miktarı arasındaki ilişkinin grafiği çizilerek gösterilmiştir. Optik verim, boyanın hem düşük olduğu hem yüksek olduğu noktalarda düşerken bu aralıkta en verimli sonuca ulaşılmıştır.



Şekil 3.7: Optik verim ile boya miktarı arasındaki ilişki – 30x30 cm²

Kullanılması gereken boya miktarı için Çizelge 3.14'de 2,8 cm kalınlıktaki panel için S5A123Da tasarımı simüle edilmiştir. Beklendiği gibi düşük yoğunlukta ve yüksek yoğunlukta boya kullanıldığında verim düşmektedir. En iyi optik verim $3,98 \times 10^{-4}$ g boya kullanıldığında ortaya çıkmıştır. Bu değer akrilik levhanın kütlece %0,001 değerine denk

gelmektedir. Yazılım belli bir foton sayısından sonra hesap zorluğundan dolayı hata vermiştir.

Çalışma boyunca yapılan simülasyonların önemli çıktıları Ek-1'de sunulmuştur.

4. SONUÇ

LGY'ların Optik Sistem Tasarımı ve Simülasyonu üzerine gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, şehir merkezlerinde ve binaya entegre olarak kullanılabilen özgün LGY panellerin tasarlanması hedeflenmiştir. Bu süreç boyunca tasarlanacak LGY cihazın bütün malzemeleri üzerine verimlilik analizleri yapılmıştır. Çıkan sonuçlar üzerinden LGY cihazın 3 farklı boyutta prototip modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. Her boyut için en iyi tasarımlar belirlenmiş ve bu tasarımlar Türkiye'de kullanılacak binaya entegre fotovoltaik sistemler için önerilmiştir. Çalışma boyunca elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Levhanın üzerine gelen ışığı iletme miktarı (R), LGY cihazların verimini doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmada PMMA tercih edilmiştir. PMMA'nın kırma indisi 1,49 olarak belirlenmiştir. Kırma indisi daha büyük olan bir malzeme seçilirse malzemenin yansıtma miktarı azalacağı için cihazın optik verimi artacaktır.
- Ana malzeme özelliklerinin verimle ilişkisinin saptanması için yapılan simülasyonda PMMA-foton etkileşimi incelenmiş 5x5 cm² levhalarda kalınlığın verime etkisi gözlenmiştir. LGY cihazların iki farklı verim performansı vardır. Bunlardan birisi kullanılan güneş gözesinin dönüşüm verimi diğeri ise cihazın optik verimidir. Optik verimine dair verilen teorik formülde kalınlık ayrı bir parametre olarak belirtilmemiştir. Fakat cihazın ana malzemesinin kalınlığı verimi etkileyen birçok parametreyi doğrudan etkilemektedir. LGY sistemler fotonla etkileşme geçmesi beklenen lüminesant katkıların olduğu birer dalga kılavuzu olduğu için malzemenin kalınlığı verim parametrelerinin performansını da etkilemektedir. Çünkü kalınlıkla beraber optik yol veya ortalama serbest yol değişecektir.
- LGY cihazlarda kullanılan lüminesant katkıların performansı sistemin optik verimini doğrudan etkilemektedir. Bu malzemeler için tercih edilebilecek seçeneklerde en çok dikkat edilecek özellikler malzemelerin fotostabilitesinin ve kuantum veriminin yüksek olmasıdır. Organik boyalar bu özellikleri sağladığı gibi aynı zamanda PMMA'lar için uygulama kolaylığı vardır. Simülasyonda seçilen Rhodamine 6G boyası yüksek verimli bir organik boyadır. Lüminesant katkıların LGY cihazlardaki en önemli verimi etkileyen mekanizmalar emilim ve salım spektrumlarındaki örtüşmeden kaynaklanmaktadır. Rhodamine 6G için bu

örtüşme incelendiğinde yaklaşık 300 nm'lik bir aralıkta spektrumların örtüştüğü gözlenmektedir. Ama bu aralıklar içinde tepe noktaların arasında farklılık olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılacak spektrumlardaki örtüşmelerin daha az olduğu boyalar mevcuttur fakat simülasyonda kullanılmak üzere emilim ve salım spektrumlarının verilerine erişilememiştir. Boyaların özellikleri incelendiğinde görülmektedir ki daha geniş emilim spektrumuna ve daha dar spektrum örtüşmesine sahip boyaların kullanıldığı LGY cihazların optik verimlerinde iyileşme görülmektedir.

- Snell yasasına göre foton iki farklı ortam arasında nasıl davranacağına karar verirken ortamların kırılma indisleri etkili olmaktadır. Bu sebepten, aynanın PMMA etrafına nasıl konumlandırılacağı önemli bir parametreye dönüşmektedir. Ayna konfigürasyonunda verimi etkileyebilecek farklılıklar aşağıdaki gibidir.
 - Aynaların PMMA ile bitişik veya ayrı konumlandırılması, ışığın dalga kılavuzu içerisinde tutulması için önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Buna dair yapılan simülasyonda en iyi verim değerlerine PMMA ile ayna arasında 0,1 cm boşluk bırakıldığı durumda ulaşılmıştır. Fakat bu hassasiyette bir tasarımın maliyet açısından kabul edilebilir olmayacağı düşünülerek 1 cm ve 2 cm boşlukların bırakıldığı seçenekler ileri tasarımlar için uygun bulunmuştur.
 - Aynı zamanda aynaların doğrusal yansıtıcı (yansıtıcı) veya dağıtıcı (saçıcı) özelliklerde olması da cihazın verimini doğrudan etkilemektedir. Kullanılan lüminesant katkıların bir kuantum verimi olduğu için, birim foton başına gösterebildikleri bir performans vardır. Gelen fotonu doğrudan yansıtan bir ayna aynı bölgeye sürekli olarak bir foton akışı sağlamaktadır. Oysa dağıtıcı bir ayna fotonların cihaz içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Bu durum lüminesant katkıdan alınacak verimi arttırdığı için cihazın verimini de arttırmaktadır.
- LGY cihazlar, temel prensip olarak geniş bir alana düşen fotonları daha dar bir alana toplamak üzerine çalışmaktadır. Böylece kullanılacak güneş gözesi oranı azaltılacak ve maliyet düşürülecektir. Bu sebepten 4 kenar yüzeyi olan bir LGY sistemde bu yüzeylerin hangilerine ayna hangilerine güneş gözesi yerleştirileceği hem cihazın performansını hem de verimini etkileyecek bir parametredir. Yapılan çalışmalarda dağıtıcı aynaların kullanıldığı tasarımlardaki verim artışı gözlenmiştir. Fakat seçilen en iyi 4 tasarımda dağıtıcı aynaların maliyeti

arttıracağı düşünülerek doğrusal yansıtıcı aynaların olduğu tasarımların da olmasına özen gösterilmiştir.

- Üç farklı boyutta prototip tasarımları gerçekleştirilmiştir. Her birine dair çalışmalar incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.
 - 10x10 cm² prototip tasarımı, bina yüzeyleri dışında sokak lambaları, trafik levhaları gibi şehir hayatında olan cihazlar için tasarlanmıştır. Yapılan kalınlık simülasyonunda PMMA'nın kalınlığı arttıkça PMMA maliyetinin, cihazı taşımak için kullanılacak konstrüksiyon malzemelerin fiyatı da artacağı için, geometrik kazanç üzerinden kalınlığın 0,6 cm olmasına karar verilmiştir. Bu kalınlıkta cihazın optik verimi %12,0 olarak hesaplanmıştır. Rhodamine 6G ile yapılan verim hesaplamaları sonucunda $1,356 \times 10^{-4}$ g organik boya cihaza eklendiğinde optik verim değeri %14,0'e çıkmıştır.
 - 30x30 cm² prototip tasarımı bina yüzeyleri için tasarlanmıştır. Yapılan kalınlık simülasyonunda PMMA'nın kalınlığı arttıkça PMMA maliyetinin, cihazı taşımak için kullanılacak konstrüksiyon malzemelerin fiyatı da artacağı için, geometrik kazanç üzerinden kalınlığın 2 cm olmasına karar verilmiştir. Bu kalınlıkta cihazın optik verimi %12,5 olarak hesaplanmıştır. Rhodamine 6G ile yapılan verim hesaplamaları sonucunda $20,34 \times 10^{-4}$ g organik boya cihaza eklendiğinde optik verim değeri %14,2'ye çıkmıştır.
 - 50x50 cm² prototip tasarımı, bina yüzeyleri dışında sokak lambaları, trafik levhaları gibi şehir hayatında olan cihazlar için tasarlanmıştır. Yapılan kalınlık simülasyonunda PMMA'nın kalınlığı arttıkça PMMA maliyetinin, cihazı taşımak için kullanılacak konstrüksiyon malzemelerin fiyatı da artacağı için, geometrik kazanç üzerinden kalınlığın 2 cm olmasına karar verilmiştir. Bu kalınlıkta cihazın optik verimi %12,0 olarak hesaplanmıştır. Rhodamine 6G ile yapılan verim hesaplamaları sonucunda $1,356 \times 10^{-4}$ g organik boya cihaza eklendiğinde optik verim değeri %13,7'ye çıkmıştır.
 - Yapılan modelleme ve simülasyonlarda monokromatik kaynak kullanılmıştır. Güneş ışınımına benzer spektrumda bir kaynak kullanıldığında verim değerlerinin daha yüksek olması beklenmektedir.

Bu sonuçlar ışığında aşağıda sıralanan önerilerde bulunulabilir.

- LGY cihazlarda kullanılan dalga kılavuzunun doğal verimi etkileyen mekanizmaları vardır. Bu verimi etkileyen mekanizmalarına dair yapılacak malzeme araştırmaları optik verimin artırılmasını sağlayacaktır.
 - Ana malzeme olarak kullanılacak malzemenin kırma indisinin artırılması verimi arttıracaktır. Bu sebeple doğrudan PMMA kullanılması yerine farklı malzemelerin karışımlarından elde edilecek yeni ana malzeme araştırmaları yapılabilir.
 - Yeni ana malzeme araştırmaları yerine LGY sistemi kullanılacak lüminesant katkı ve PMMA ile uyumlu hale getirilecek ince film kaplamalar üzerine çalışmalar yapılabilir. Böylece lüminesant katkının emilimyacağı dalga boylarındaki fotonları cihaz yüzeyinden yansıtılması ve kullanılan güneş gözesine uygun dalga boylarındaki fotonların tam iç yansımaya zorlanacağı kaplamalar ile optik verim artırılabilir.
 - Kullanılacak lüminesant katkının salım ve emilim spektrumlarındaki örtüşme en önemli verimi etkileyen mekanizmaları oluşturmaktadır. Dolayısıyla yapılacak bir araştırma ile daha geniş emilim spektrumuna sahip ve spektrum örtüşmesi azaltılmış bir boyanın veya boya karışımının elde edilmesi sağlanabilir.
- LGY cihazların optik verimleri, lüminesant katkılara doğrudan bağlıdır. Bugün elimizde bulunan lüminesant katkılar, genelde kırmızı, sarı, yeşil gibi farklı renklerdedir. Yapılan çalışmalarda günlük hayatta renklerin insanların psikolojisini etkilediği bilinmektedir. Bu durum LGY cihazların binaların cam yüzeylerinde kullanılmasının önüne geçmektedir. Bu sebepten yapılacak çalışmalarda LGY sistemlerde kullanılacak lüminesant katkıların beyaz renkte salım yaparak verime katkı sağlayacağı tasarımların gerçekleştirilmesi LGY cihazların pencerelerde kullanılmasını sağlayacaktır.
- LGY cihazlar yoğun olarak binaya entegre sistemler olarak kullanılacağı için güneş elektrik sistemleri şeklinde kullanılabileceği gibi, uygun tasarımlarla aynı zamanda gün ışığı uygulamalarında da kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. L. Montgomery, *The powers that be : global energy for the twenty-first century and beyond*. University of Chicago Press, 2010.
- [2] J. Gurney, “BP Statistical Review of World Energy,” *J. Policy Anal. Manag.*, vol. 4, no. 2, p. 283, 2019.
- [3] B. U. R. European, C. Foundation, and B. N. E. W. Energy, *Türkiye için Alternatif Elektrik Enerjisi Arz Senaryoları*. 2014.
- [4] “Carbon Dioxide | Vital Signs – Climate Change: Vital Signs of the Planet.” [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>. [Accessed: 20-Feb-2019].
- [5] D. Roberts, R. Pidcock, Y. Chen, S. Connors, and M. Tignor, “Science Editor.”
- [6] “Global Temperature | Vital Signs – Climate Change: Vital Signs of the Planet.” [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. [Accessed: 20-Feb-2019].
- [7] G. S. Report, *REN21 Secretariat, Renewables 2017 global status report*. 2017.
- [8] “Welcome to PVCDROM | PVEducation.” [Online]. Available: <http://pveducation.org/pvcdrom>. [Accessed: 11-Dec-2017].
- [9] “T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı - Güneş.” [Online]. Available: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [10] “Solar resource maps and GIS data for 180+ countries | Solargis.” [Online]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [11] “Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL.” [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. [Accessed: 09-Apr-2019].
- [12] D. Chemisana, “Building integrated concentrating photovoltaics: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 603–611, 2011.
- [13] K. E. Hassan and M. F. El-Refaie, “Theoretical performance of cylindrical parabolic solar concentrators,” *Sol. Energy*, vol. 15, no. 3, pp. 219–244, 1973.

- [14] N. Fraidenraich, C. Tiba, B. B. Brandão, and O. C. Vilela, “Analytic solutions for the geometric and optical properties of stationary compound parabolic concentrators with fully illuminated inverted V receiver,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 2, pp. 132–143, 2008.
- [15] S. Hatwaambo, H. Hakansson, A. Roos, and B. Karlsson, “Mitigating the non-uniform illumination in low concentrating CPCs using structured reflectors,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 11, pp. 2020–2024, 2009.
- [16] D. Jing, H. Liu, X. Zhang, L. Zhao, and L. Guo, “Photocatalytic hydrogen production under direct solar light in a CPC based solar reactor: Reactor design and preliminary results,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 12, pp. 2919–2926, 2009.
- [17] E. Lorenzo, M. Pérez, A. Ezpeleta, and J. Acedo, “Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 10, no. 8, pp. 533–543, 2002.
- [18] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi, “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1800–1818, 2009.
- [19] Richard M. Swanson, “The promise of concentrators,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 93–111, 2000.
- [20] E. Muñoz *et al.*, “CPV standardization: An overview,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 518–523, 2010.
- [21] A. P. Green, “Optical Properties of Luminescent Solar Concentrators,” no. March, 2014.
- [22] J. S. Batchelder, A. H. Zewai, and T. Cole, “Luminescent solar concentrators 1: Theory of operation and techniques for performance evaluation,” *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 18, p. 3090, 1979.
- [23] P. P. C. Verbunt, *Light management in luminescent solar concentrators : aligned organic dyes and organic wavelength selective reflectors*. 2012.
- [24] A. Goetzberger, “Fluorescent solar energy collectors: Operating conditions with diffuse light,” *Appl. Phys.*, vol. 16, no. 4, pp. 399–404, 1978.
- [25] M. Carrascosa, S. Unamuno, and F. Agullo-Lopez, “Monte Carlo simulation of the

- performance of PMMA luminescent solar collectors,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 20, p. 3236, 2009.
- [26] M. J. Fisher, “Optimization and Novel Applications of Luminescent Solar Concentrators by Submitted for the degree of From the Department of Physics,” no. November, 2013.
- [27] N. Aste, L. C. Tagliabue, C. Del Pero, D. Testa, and R. Fusco, “Performance analysis of a large-area luminescent solar concentrator module,” *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 330–337, 2015.
- [28] T. M. de Jong, D. K. G. de Boer, and C. W. M. Bastiaansen, “Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 16, p. 15127, 2011.
- [29] A. Goetzberger, J. C. Goldschmidt, M. Ñ. Peters, and P. Lo, “Solar Energy Materials & Solar Cells Light trapping , a new approach to spectrum splitting,” vol. 92, pp. 1570–1578, 2008.
- [30] P. E. Scott, “United States Patent (19),” no. 19, 1985.
- [31] A. Goetzberger, “F1 I ~ CoLlection,” vol. 4, pp. 3–23, 1980.
- [32] E. Yablonovitch, “Thermodynamics of the fluorescent planar concentrator,” vol. 07036, no. May, pp. 1362–1363, 1980.
- [33] H. Ries, P. S. Institut, H. M. Institut, D.- Berlin, and R. Winston, “Eet,” vol. 1528, no. 1991, pp. 7–14.
- [34] L. R. Wilson, “Luminescent solar concentrators: a study of optical properties, re-absorption and device optimisation,” *Philosophy*, no. May, p. 369, 2010.
- [35] B. S. Richards and K. R. McIntosh, “Ray-Tracing Simulations of Luminescent Solar Concentrators Containing Multiple Luminescent Species,” vol. 62, no. 1, pp. 27–40, 2006.
- [36] N. A. Bakr, A. F. Mansour, and M. Hammam, “Optical and thermal spectroscopic studies of luminescent dye doped poly(methyl methacrylate) as solar concentrator,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 74, no. 14, pp. 3316–3323, 1999.
- [37] W. R. L. Thomas, J. M. Drake, and M. L. Lesiecki, “Light transport in planar luminescent solar concentrators: the role of matrix losses,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no.

- 21, p. 3440, 2009.
- [38] R. W. Olson, R. F. Loring, and M. D. Fayer, "Luminescent solar concentrators and the reabsorption problem," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 17, p. 2934, 2008.
- [39] J. Sansregret, J. M. Drake, W. R. L. Thomas, and M. L. Lesiecki, "Light transport in planar luminescent solar concentrators: the role of DCM self-absorption," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 4, p. 573, 2009.
- [40] M. G. El-Shaarawy, A. F. Mansour, S. M. El-Bashir, M. K. El-Mansy, and M. Hammam, "Electrical conduction and dielectric properties of poly(methyl methacrylate)/perylene solar concentrators," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 88, no. 3, pp. 793–805, 2003.
- [41] R. Reisfeld, M. Eyal, V. Chernyak, and R. Zusman, "Luminescent solar concentrators based on thin films of polymethylmethacrylate on a polymethylmethacrylate support," *Sol. Energy Mater.*, vol. 17, no. 6, pp. 439–455, 1988.
- [42] J. M. Drake, M. L. Lesiecki, J. Sansregret, and W. R. L. Thomas, "Organic dyes in PMMA in a planar luminescent solar collector: a performance evaluation," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 16, p. 2945, 1982.
- [43] F. Holtrup, G. R. J. Muller, H. Quante, S. De Feyter, F. C. De Schryver, and K. Mullen, "Full paper," pp. 0–6, 1997.
- [44] F. Nolde, J. Qu, C. Kohl, N. G. Pschirer, E. Reuther, and K. Müllen, "Synthesis and modification of terrylenediimides as high-performance fluorescent dyes," *Chem. - A Eur. J.*, vol. 11, no. 13, pp. 3959–3967, 2005.
- [45] G. Seybold and G. Wagenblast, "New perylene and violanthrone dyestuffs for fluorescent collectors," *Dye. Pigment.*, vol. 11, no. 4, pp. 303–317, 1989.
- [46] A. M. Hermann, "Luminescent solar concentrators-A review," *Sol. Energy*, vol. 29, no. 4, pp. 323–329, 1982.
- [47] L. H. Slooff, "The luminiscent concentrator: a bright idea for spectrum conversion," *Eupvsec*, no. June, pp. 413–416, 2005.
- [48] L. H. Slooff *et al.*, "the Luminescent Concentrator: Stability Issues," *Polymer (Guildf.)*, vol. 040, no. September, pp. 2–6, 2007.

- [49] L. H. Slooff *et al.*, “The luminescent concentrator illuminated,” *Photonics Sol. Energy Syst.*, vol. 6197, no. June 2014, p. 61970K, 2006.
- [50] J. C. Goldschmidt *et al.*, “Theoretical and experimental analysis of photonic structures for fluorescent concentrators with increased efficiencies,” *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 205, no. 12, pp. 2811–2821, 2008.
- [51] J. C. Goldschmidt *et al.*, “Increasing the efficiency of fluorescent concentrator systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 2, pp. 176–182, 2009.
- [52] M. G. Debije, J. P. Teunissen, M. J. Kastelijm, P. P. C. Verbunt, and C. W. M. Bastiaansen, “The effect of a scattering layer on the edge output of a luminescent solar concentrator,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 8, pp. 1345–1350, 2009.
- [53] M. G. Debije, P. P. C. Verbunt, B. C. Rowan, B. S. Richards, and T. L. Hoeks, “Measured surface loss from luminescent solar concentrator waveguides,” *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 36, p. 6763, 2008.
- [54] P. D. Swift and G. B. Smith, “Color considerations in fluorescent solar concentrator stacks,” *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 25, p. 5112, 2003.
- [55] P. D. Swift, G. B. Smith, and J. B. Franklin, “Light-to-light efficiencies in luminescent solar concentrators,” *Proc. SPIE Conf.*, vol. 3789, no. July, pp. 21–28, 1999.
- [56] A. A. Earp, G. B. Smith, J. Franklin, and P. Swift, “Optimisation of a three-colour luminescent solar concentrator daylighting system,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 84, no. 1–4, pp. 411–426, 2004.
- [57] A. A. Earp, G. B. Smith, P. D. Swift, and J. Franklin, “Maximising the light output of a Luminescent Solar Concentrator,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 655–667, 2004.
- [58] H. Du *et al.*, “Optical Properties of Colloidal PbSe Nanocrystals,” *Nano Lett.*, vol. 2, no. 11, pp. 1321–1324, 2002.
- [59] E. H. Sargent, “Infrared quantum dots,” *Adv. Mater.*, vol. 17, no. 5, pp. 515–522, 2005.
- [60] M. Kennedy, S. J. McCormack, J. Doran, and B. Norton, “Improving the optical efficiency and concentration of a single-plate quantum dot solar concentrator using

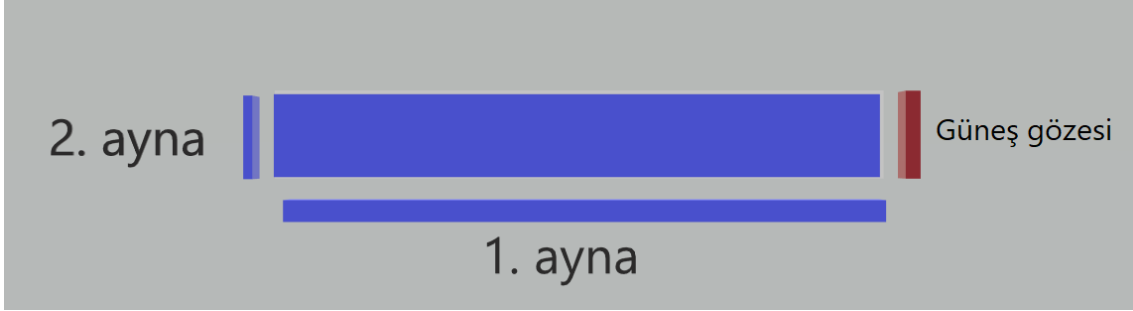
- near infra-red emitting quantum dots,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 978–981, 2009.
- [61] S. J. Gallagher, B. C. Rowan, J. Doran, and B. Norton, “Quantum dot solar concentrator: Device optimisation using spectroscopic techniques,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 4, pp. 540–547, 2007.
- [62] S. J. Gallagher, P. C. Eames, and B. Norton, “Quantum dot solar concentrator behaviour, predicted using a ray trace approach,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 25, no. 1, pp. 47–56, 2004.
- [63] S. J. Gallagher, B. Norton, and P. C. Eames, “Quantum dot solar concentrators: Electrical conversion efficiencies and comparative concentrating factors of fabricated devices,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 813–821, 2007.
- [64] D. J. Farrell, A. J. Chatten, A. Büchtemann, and K. W. J. Barnham, “Fabrication, characterisation & modelling of quantum dot solar concentrator stacks,” *Conf. Rec. 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC-4*, vol. 1, no. 1, pp. 217–220, 2007.
- [65] K. Barnham, J. L. Marques, J. Hassard, and P. O’Brien, “Quantum-dot concentrator and thermodynamic model for the global redshift,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 9, pp. 1197–1199, 2000.
- [66] A. J. Chatten, K. W. J. Barnham, B. F. Buxton, N. J. Ekins-Daukes, and M. A. Malik, “Quantum dot solar concentrators,” *Semiconductors*, vol. 38, no. 8, pp. 909–917, 2004.
- [67] A. Schüler, M. Python, M. V. del Olmo, and E. de Chambrier, “Quantum dot containing nanocomposite thin films for photoluminescent solar concentrators,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 9, pp. 1159–1165, 2007.
- [68] S. M. Reda, “Synthesis and optical properties of CdS quantum dots embedded in silica matrix thin films and their applications as luminescent solar concentrators,” *Acta Mater.*, vol. 56, no. 2, pp. 259–264, 2008.
- [69] L. R. Wilson, B. C. Rowan, N. Robertson, O. Moudam, A. C. Jones, and B. S. Richards, “Characterization and reduction of reabsorption losses in luminescent solar concentrators,” *Appl. Opt.*, vol. 49, no. 9, p. 1651, 2010.
- [70] J. A. Levitt and W. H. Weber, “Materials for luminescent greenhouse solar

- collectors,” *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 10, p. 2684, 1977.
- [71] “reisfeld1980.pdf.” .
- [72] C. Tummeltshammer, “Pathways to a brighter luminescent solar concentrator,” 2016.
- [73] A. Burgers, L. Slooff, A. Büchtemann, and J. Van Roosmalen, “Performance of single layer luminescent concentrators with multiple dyes,” *Conf. Rec. 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC-4*, vol. 1, pp. 198–201, 2007.
- [74] R. Kinderman *et al.*, “I-V Performance and Stability Study of Dyes for Luminescent Plate Concentrators,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 129, no. 3, p. 277, 2007.
- [75] A. F. Mansour, H. M. A. Killa, S. A. El-Wanees, and M. Y. El-Sayed, “Laser dyes doped with poly(ST-Co-MMA) as fluorescent solar collectors and their field performance,” *Polym. Test.*, vol. 24, no. 4, pp. 519–525, 2005.
- [76] J. Ballato, S. H. Foulger, and D. W. Smith, Jr., “Optical properties of perfluorocyclobutyl polymers II Theoretical and experimental attenuation,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 21, no. 5, p. 958, 2004.
- [77] R. Reisfeld, “Spectroscopy and nonradiative phenomena of rare earths in glasses: Future applications,” *Inorganica Chim. Acta*, vol. 95, no. 2, pp. 69–74, 1984.
- [78] R. Reisfeld, “Future technological applications of rare-earth-doped materials,” *J. Less-Common Met.*, vol. 93, no. 2, pp. 243–251, 1983.
- [79] A. Buch, M. Ish-Shalom, R. Reisfeld, A. Kisilev, and E. Greenberg, “Transparent glass ceramics: Preparation, characterization and properties,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 71, no. C, pp. 383–389, 1985.
- [80] W. G. Quirino, M. J. V Bell, S. L. Oliveira, and L. A. O. Nunes, “Effects of non-radiative processes on the infrared luminescence of Yb ³⁺ doped glasses,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 351, no. 24–26, pp. 2042–2046, 2005.

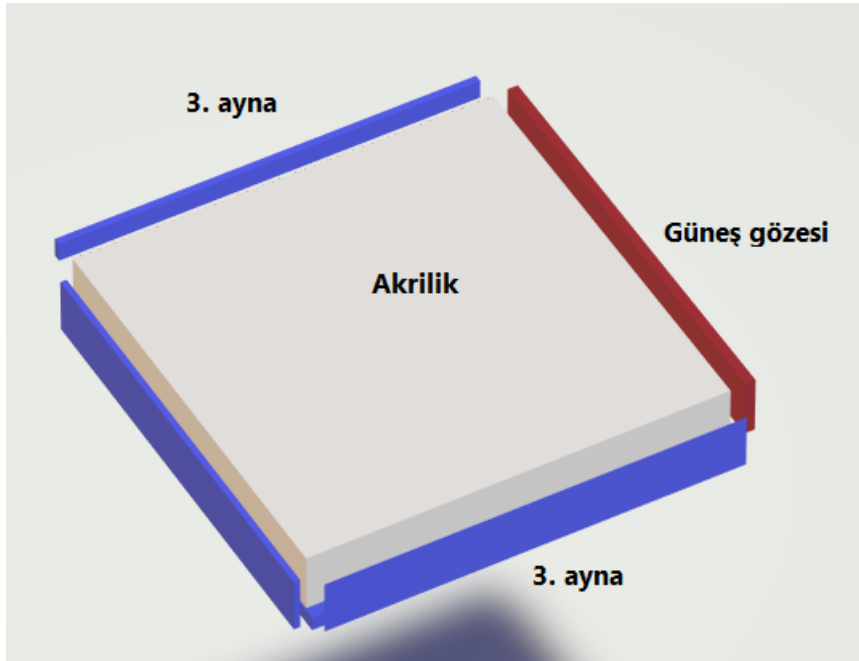
EKLER

EK 1 – Simülasyon çıktıları

Ayna Yerleşimleri



Grafik 1: 1. ve 2. aynanın yerleşimleri

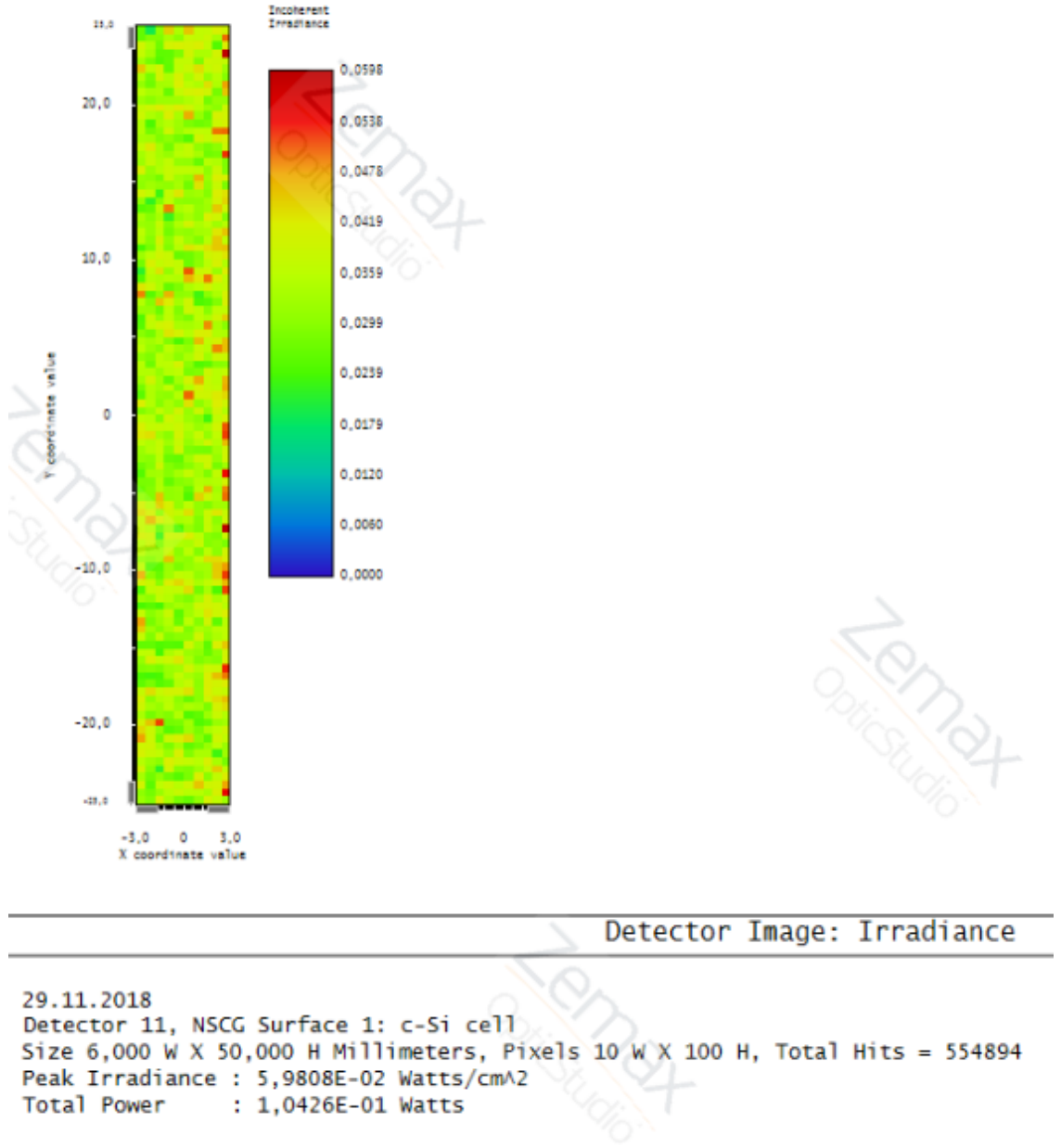


Grafik 2: 3. aynaların ve güneş gözesinin yerleşimleri

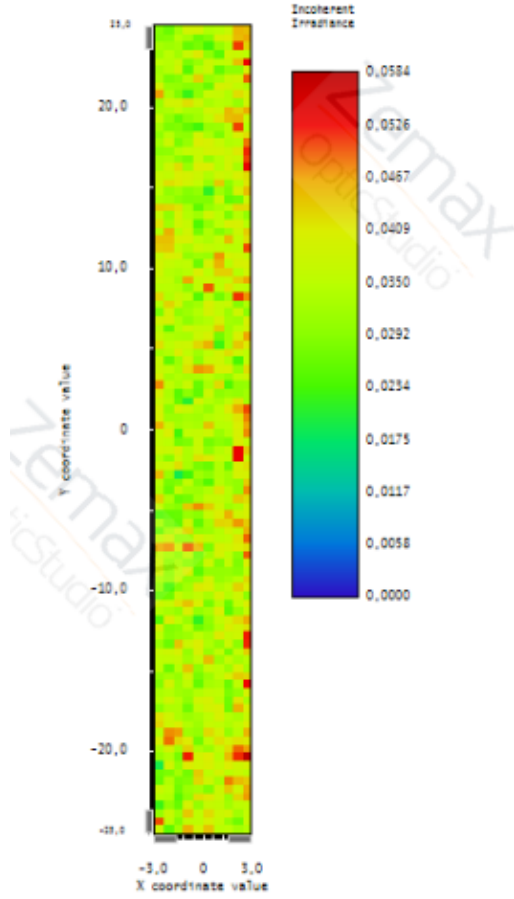
S5A1D23Sa

Boyut: 5x5x0,6 cm³

Aynalar: 1 numaralı ayna yansıtıcı – 2 ve 3 numaralı aynalar saçıcı



Grafik 3: S5A1D23Sa için Sonuç 1



Detector Image: Irradiance

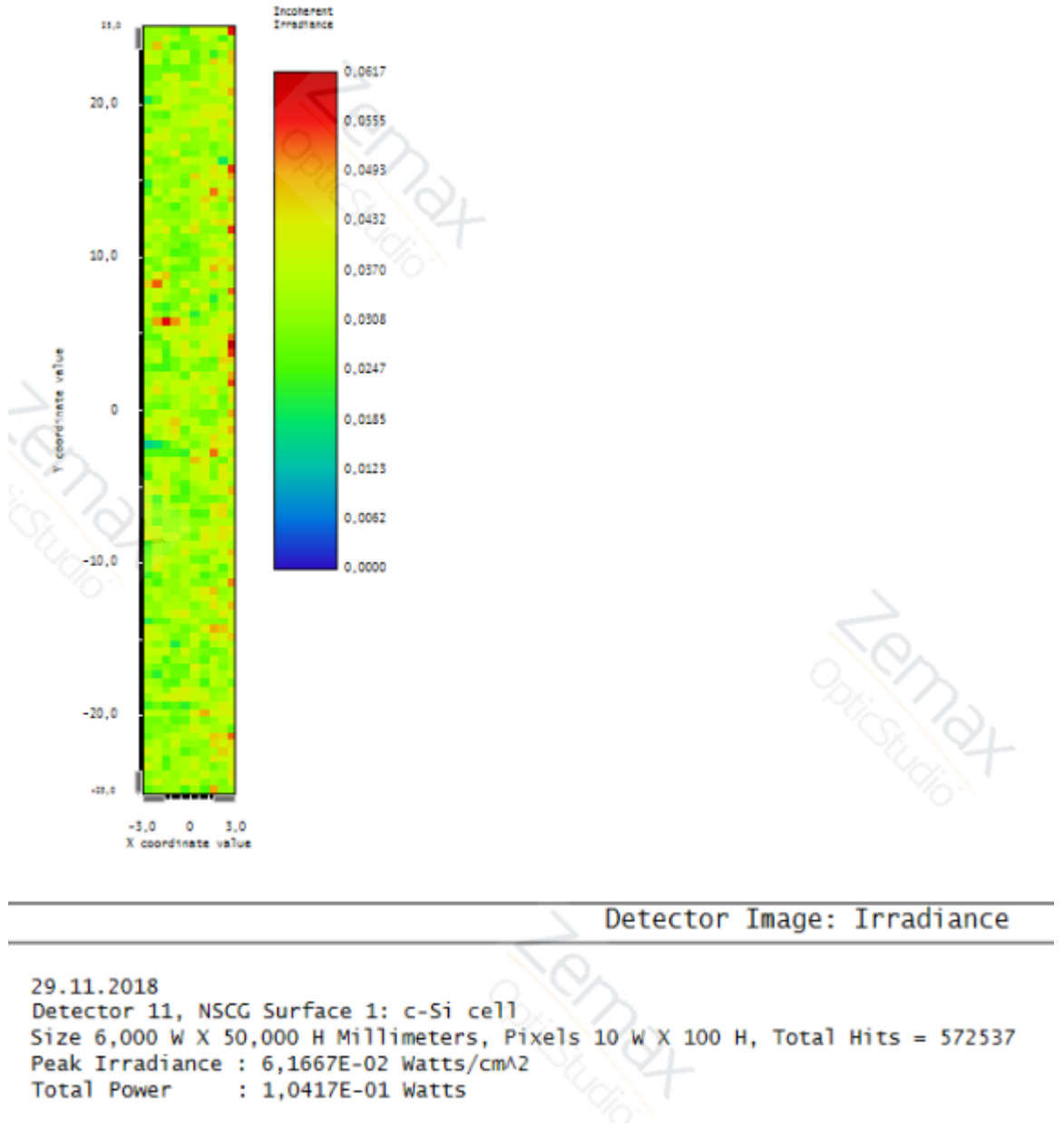
29.11.2018
Detector 11, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 6,000 W X 50,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 625828
Peak Irradiance : 5,8415E-02 Watts/cm²
Total Power : 1,0667E-01 Watts

Grafik 4: S5A1D23Sa için Sonuç 2

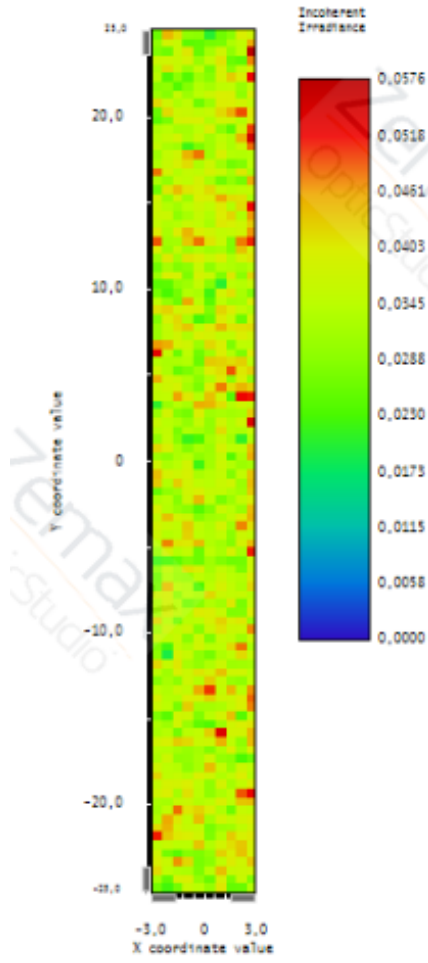
S5A12D3Sa

Boyut: 5x5x0,6 cm³

Aynalar: 1ve 2 numaralı aynalar saçıcı – 3 numaralı ayna yansıtıcı



Grafik 5: S5A12D3Sa için Sonuç 1



Detector Image: Irradiance

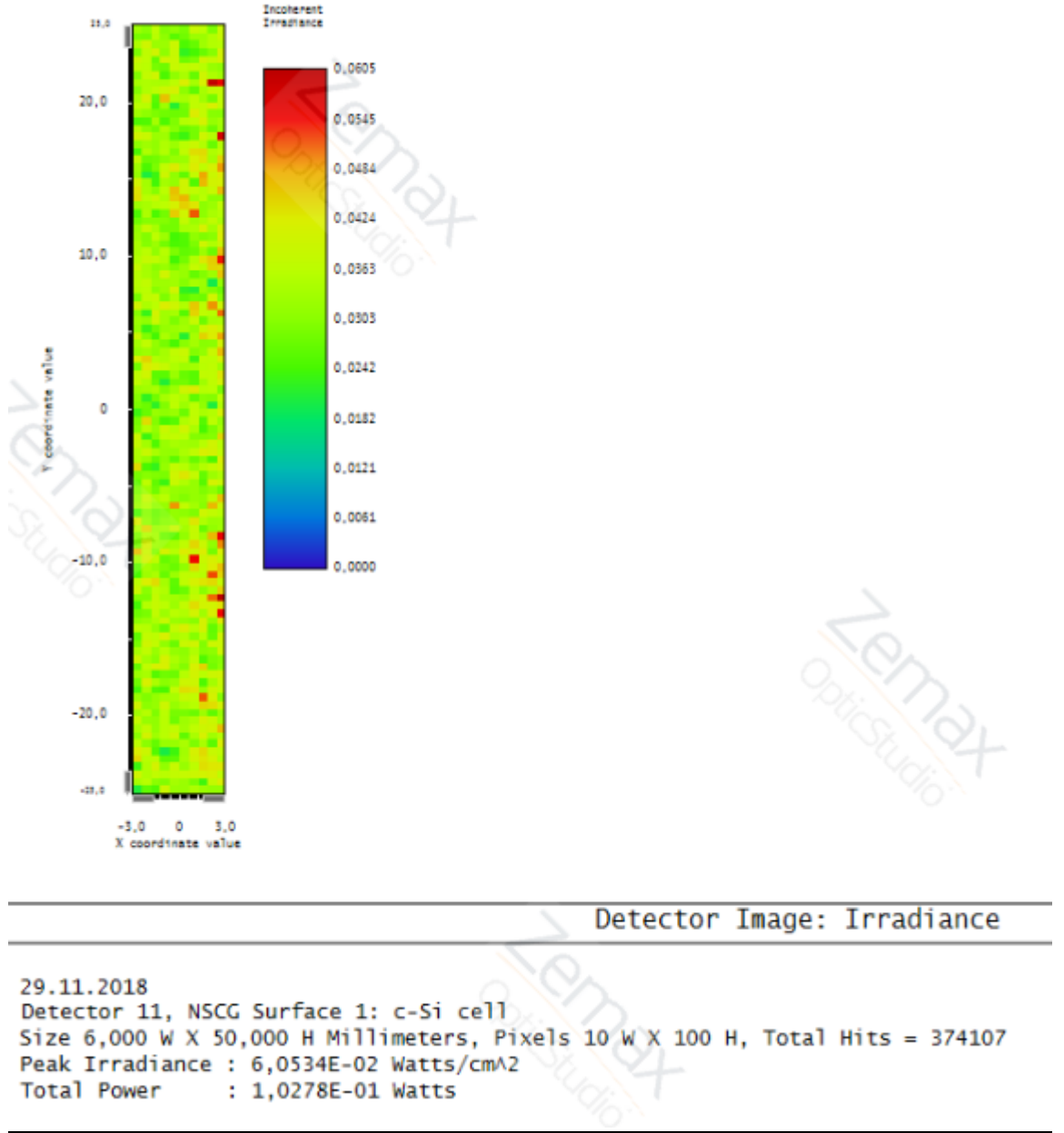
29.11.2018
Detector 11, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 6,000 W X 50,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 638102
Peak Irradiance : 5,7566E-02 Watts/cm²
Total Power : 1,0593E-01 Watts

Grafik 6: S5A12D3Sa için Sonuç 2

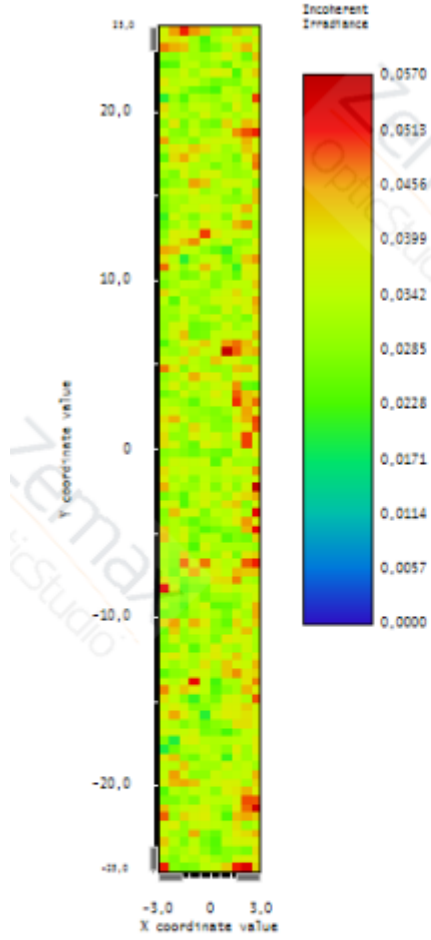
S5A13D2Sa

Boyut: 5x5x0,6 cm³

Aynalar: 1 ve 3 numaralı aynalar saçıcı – 2 numaralı ayna yansıtıcı



Grafik 7: S5A13D2Sa için Sonuç 1



Detector Image: Irradiance

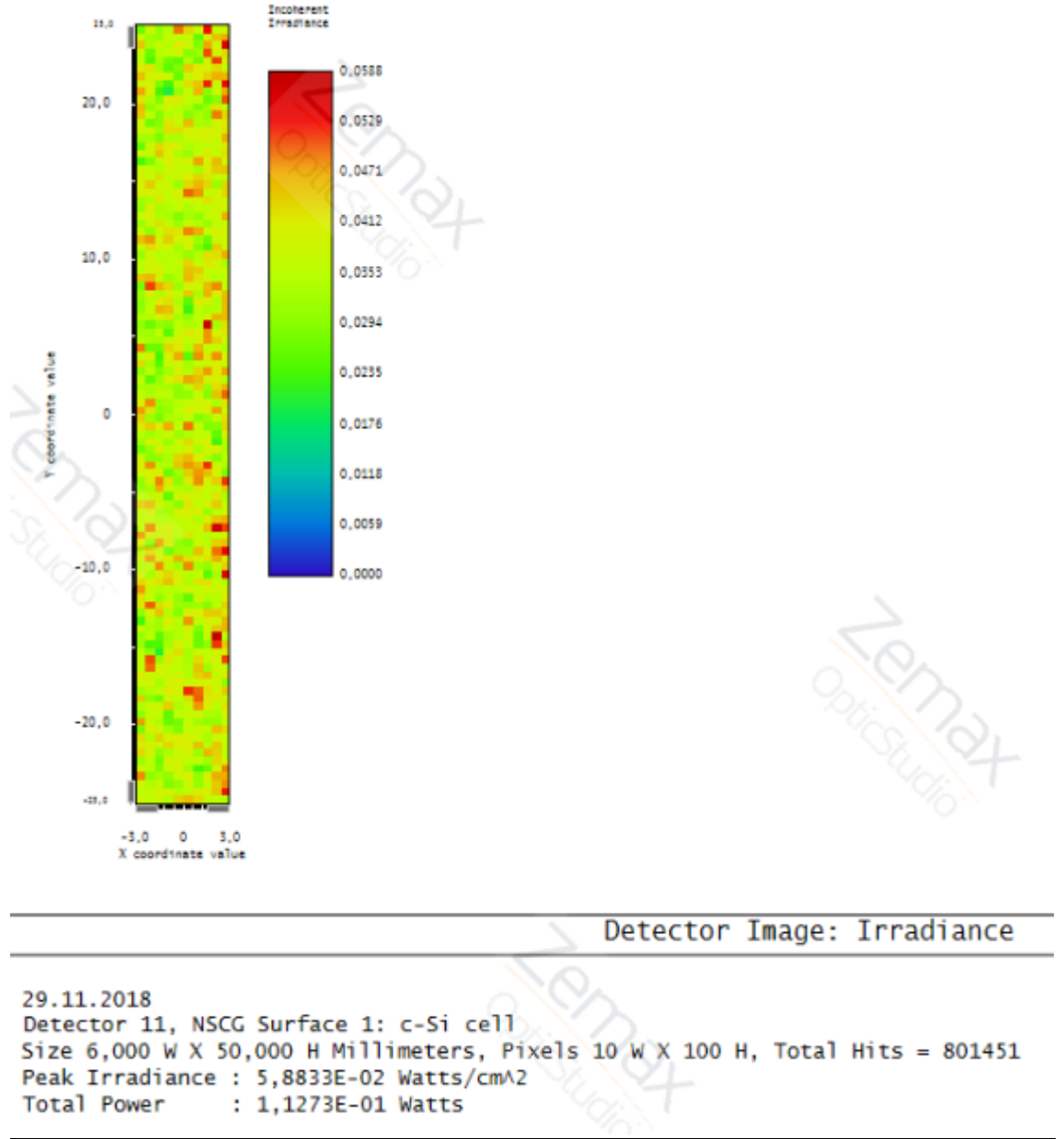
29.11.2018
Detector 11, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 6,000 W X 50,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 374122
Peak Irradiance : 5,6979E-02 Watts/cm²
Total Power : 1,0385E-01 Watts

Grafik 8: S5A13D2Sa için Sonuç 2

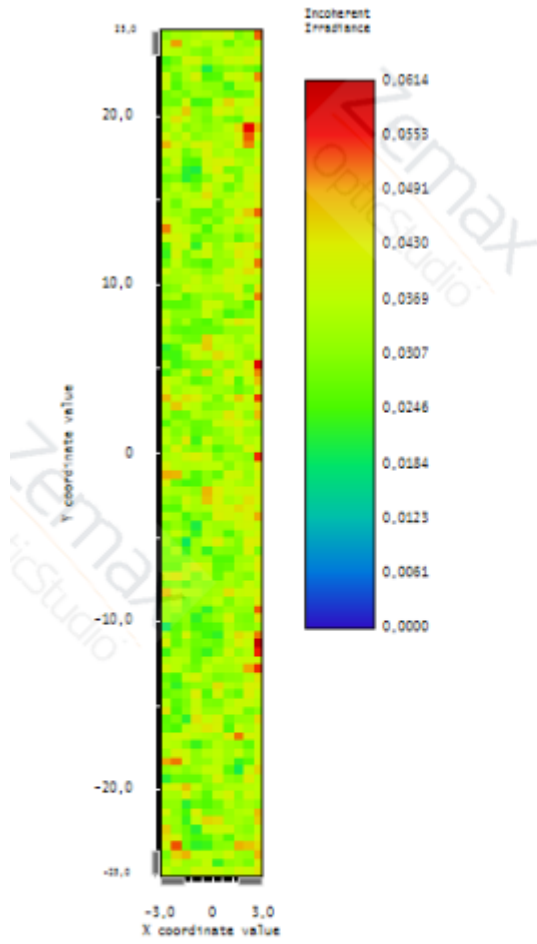
S5A123Da

Boyut: 5x5x0,6 cm³

Aynalar: 1-2-3 numaralı aynaların hepsi saçıcı



Grafik 9: S5A123Da için Sonuç 1



Detector Image: Irradiance

29.11.2018
Detector 11, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 6,000 W X 50,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 372403
Peak Irradiance : 6,1425E-02 Watts/cm²
Total Power : 1,0370E-01 Watts

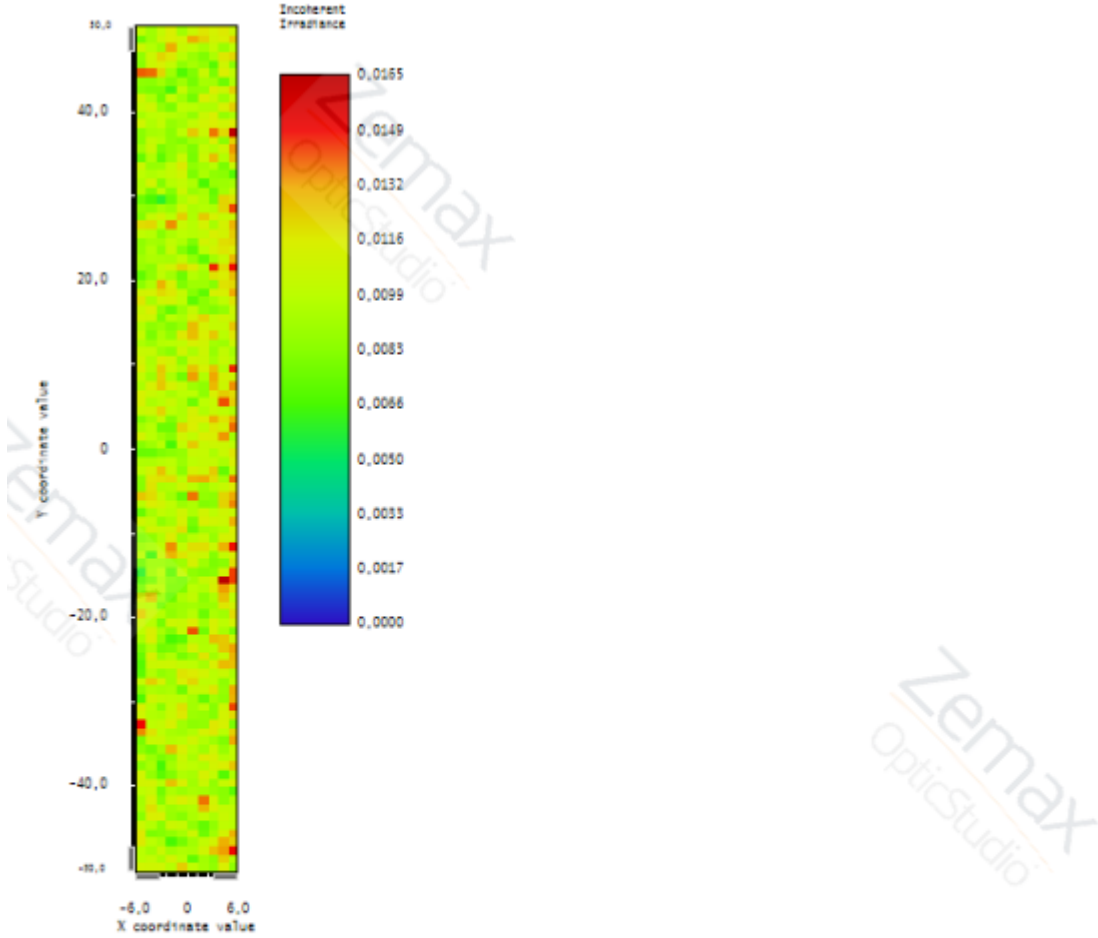
Grafik 10: S5A123Da için Sonuç 2

İleri Tasarımlar – 1 [10x10 cm]

1.2 cm

Boyut: 10x10x1,2 cm³

Aynalar: 1-2-3 numaralı aynaların hepsi saçıcı



Detector Image: Irradiance

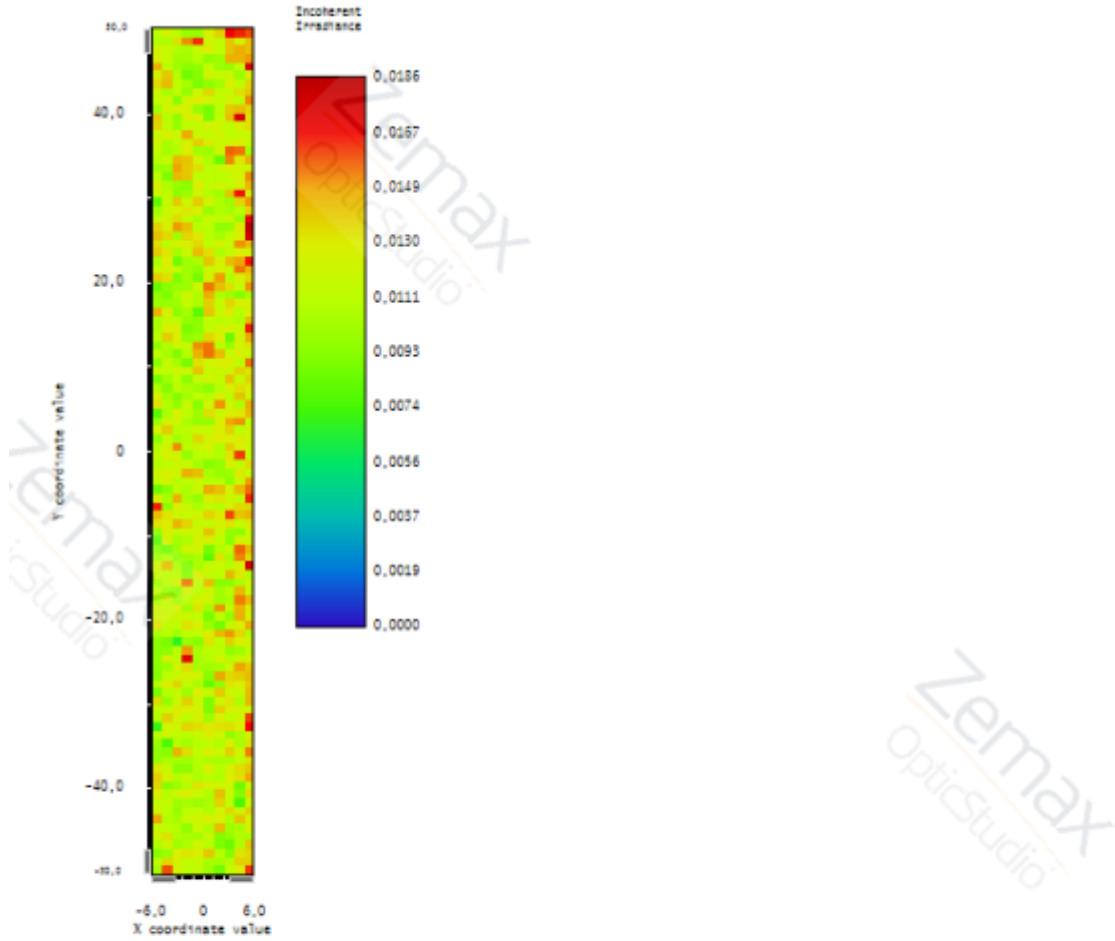
22.12.2018
Detector 7, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 12,000 W X 100,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 855727
Peak Irradiance : 1,6509E-02 Watts/cm²
Total Power : 1,2009E-01 Watts

Grafik 11: 10x10 cm² panelin 1,2 cm kalınlıktaki optik verimi

1,356x10⁻⁴g

Boyut: 10x10x1,2 cm³

Aynalar: 1-2-3 numaralı aynaların hepsi saçıcı



Detector Image: Irradiance

23.12.2018
Detector 7, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 12,000 W X 100,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 824245
Peak Irradiance : 1,8570E-02 Watts/cm²
Total Power : 1,4230E-01 Watts

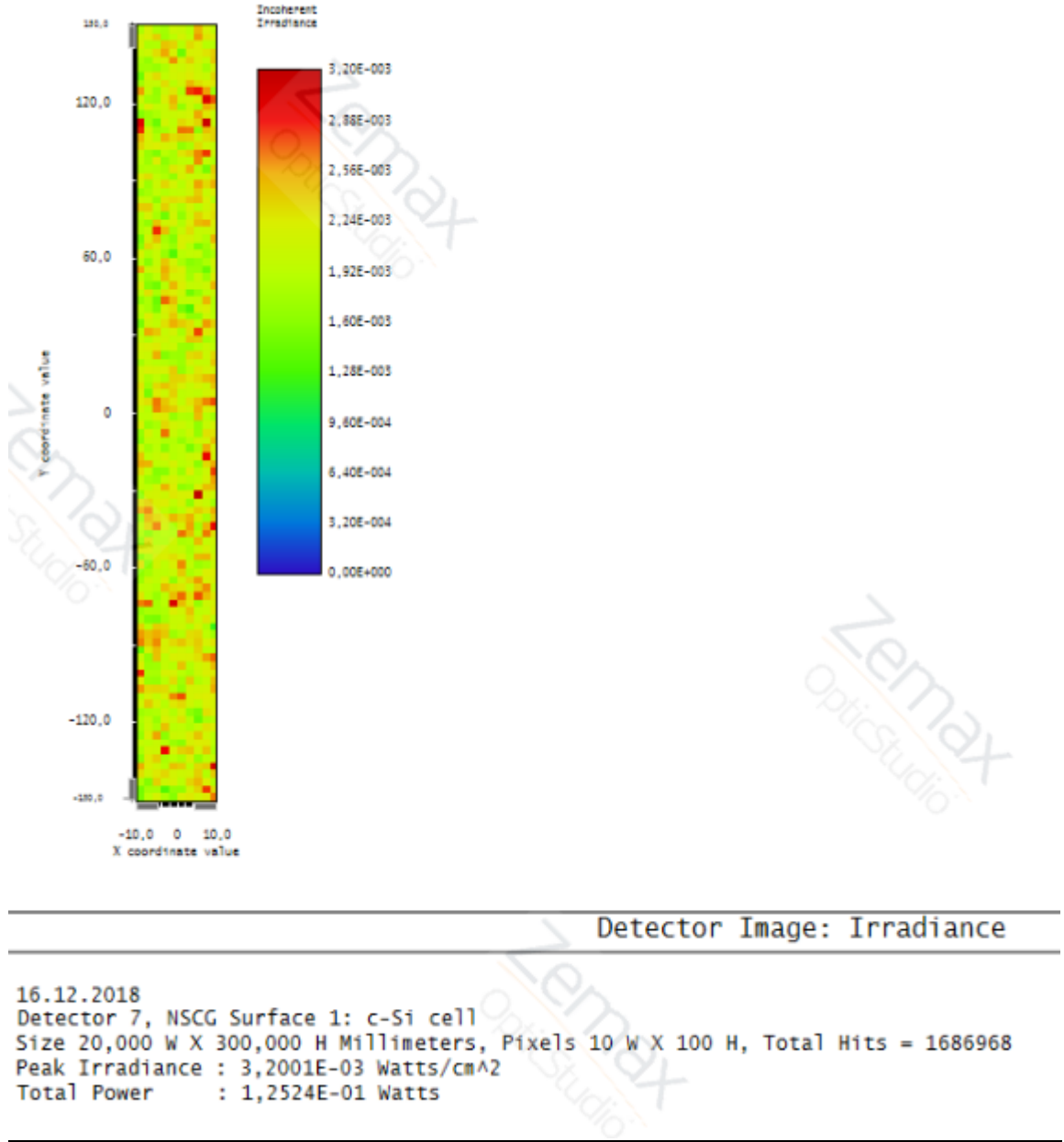
Grafik 12: 10x10 cm² panelin 1,356x10⁻⁴g boya ile optik verimi

İleri Tasarımlar – 2 [30x30 cm]

2 cm

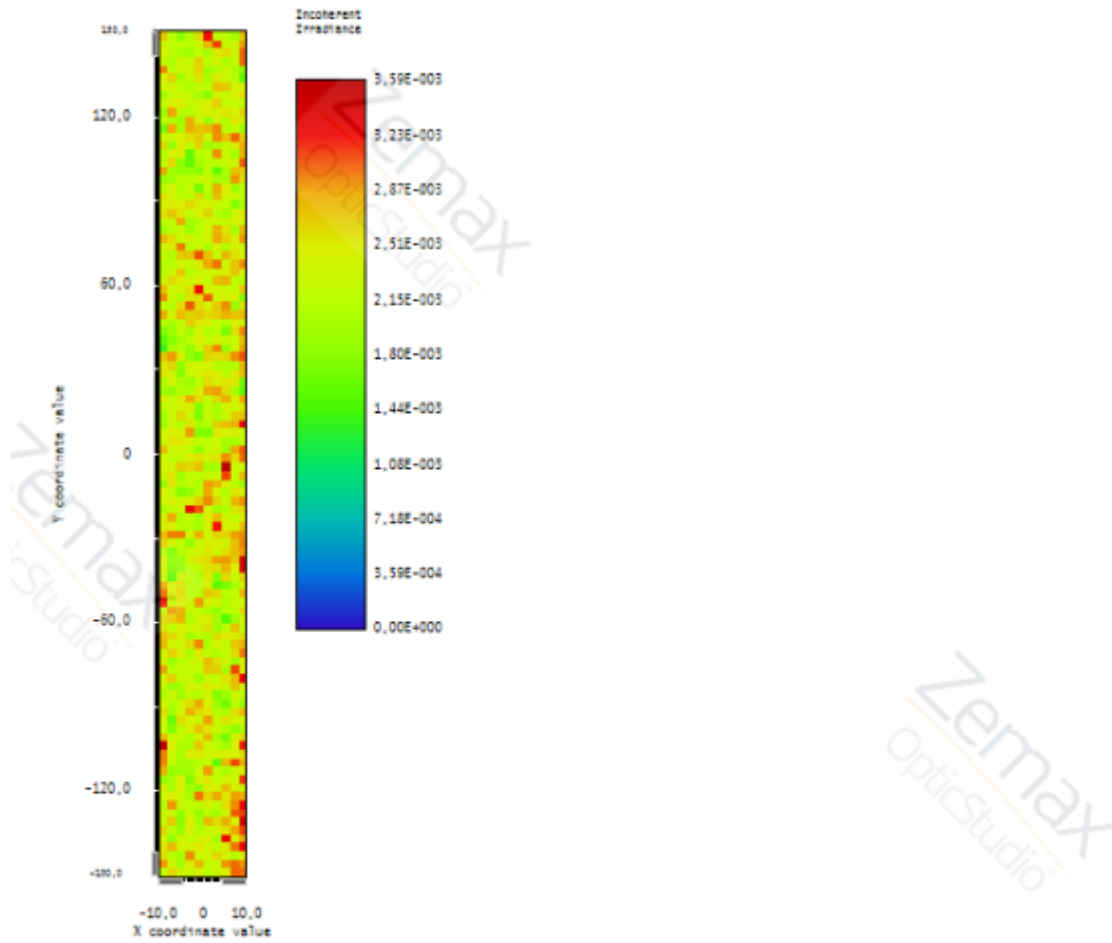
Boyut: 30x30x2 cm³

Aynalar: 1-2-3 numaralı aynaların hepsi saçıcı



Grafik 13: 30x30 cm² panelin 2 cm kalınlıktaki optik verimi

20,34x10⁻⁴g



Detector Image: Irradiance

23.12.2018
Detector 7, NSCG Surface 1: c-Si cell
Size 20,000 W X 300,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 1075154
Peak Irradiance : 3,5912E-03 Watts/cm²
Total Power : 1,4271E-01 Watts

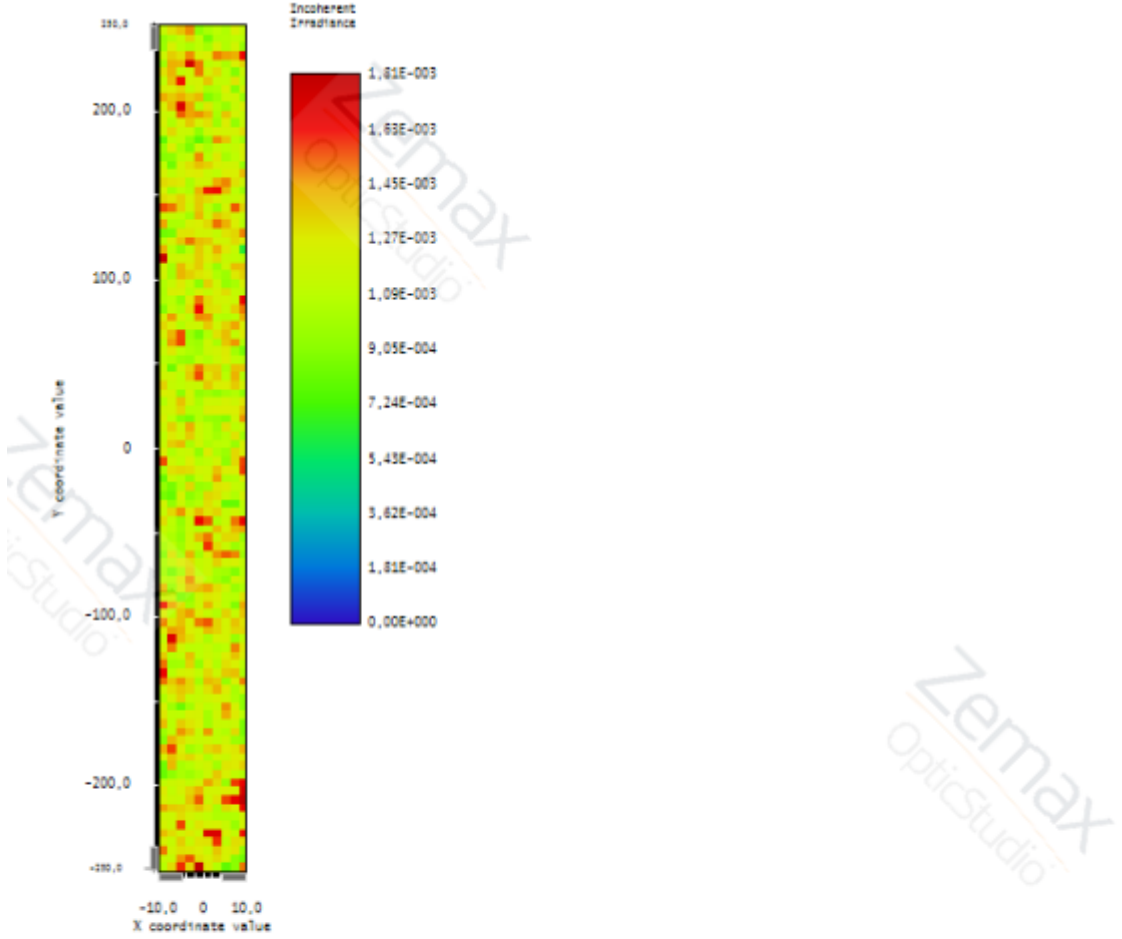
Grafik 14: 30x30 cm² panelin 20,34x10⁻⁴g boya ile optik verimi

İleri Tasarımlar – 3 [50x50 cm]

2 cm

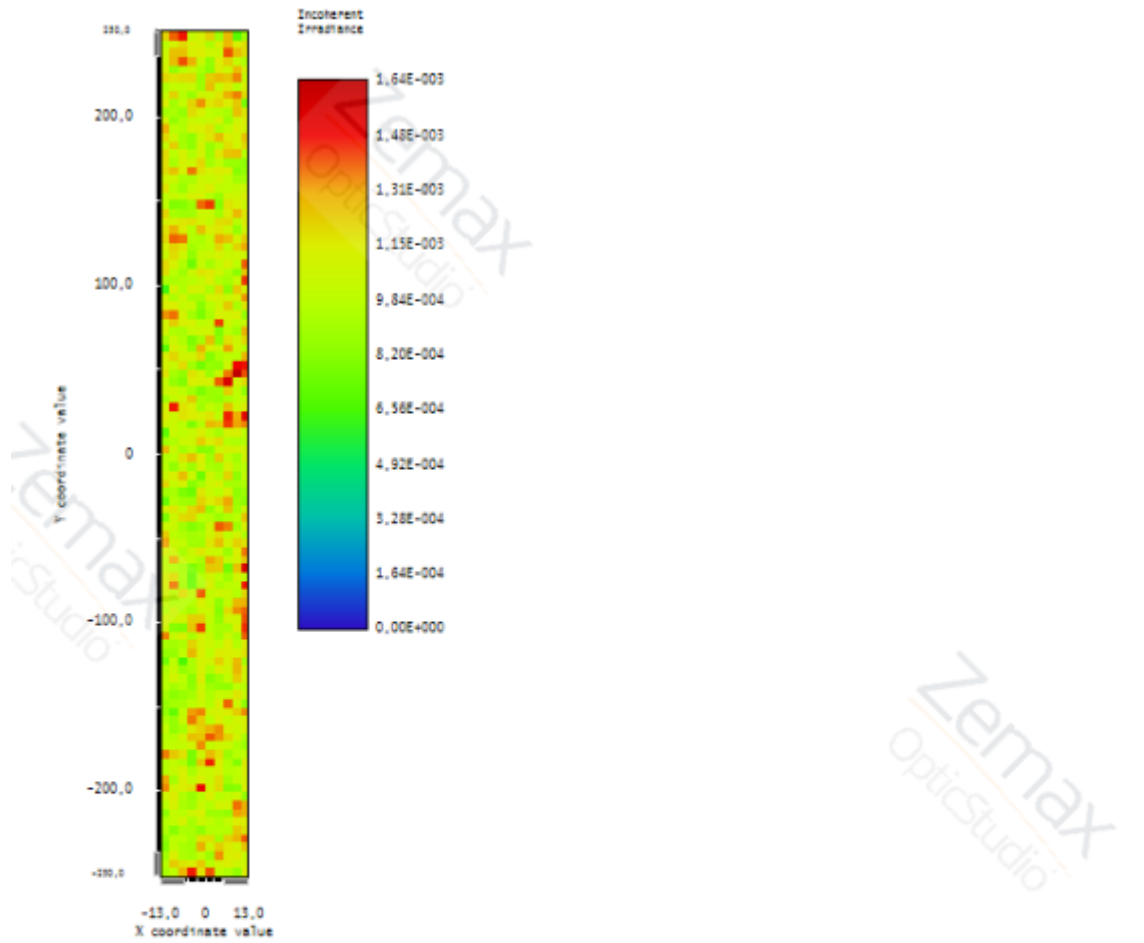
Boyut: 50x50x2 cm³

Aynalar: 1-2-3 numaralı aynaların hepsi saçıcı



Grafik 15: 50x50 cm² panelin 2 cm kalınlıktaki optik verimi

56,50x10⁻⁴g



Detector Image: Irradiance

23.12.2018

Detector 7, NSCG Surface 1: c-Si cell

Size 26,000 W X 500,000 H Millimeters, Pixels 10 W X 100 H, Total Hits = 1020512

Peak Irradiance : 1,6407E-03 Watts/cm²

Total Power : 1,3780E-01 Watts

Grafik 16: 50x50 cm² panelin 56,50x10⁻⁴g boya ile optik verimi



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
TEMİZ VE TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 23/09/2019

Tez Başlığı : ORGANİK BOYA TABANLI DALGA KILAVUZLU LÜMİNESANT GÜNEŞ YOĞUNLAŞTIRICILARIN OPTİK TASARIMLARININ OPTİMİZASYONU VE YENİ BİR OPTİK SİSTEM TASARIMININ ÖNERİLMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 104 sayfalık kısmına ilişkin, 23/09/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça dahil
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Hasan Can Karakuş

Öğrenci No: N14227157

Anabilim Dalı: Temiz ve Tükenmez Enerjiler

Programı: Temiz ve Tükenmez Enerjiler

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

23.09.2019

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Şule Ergün

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hasan Can Karakuş
Doğum yeri : Niğde
Doğum tarihi : 07.07.1989
Medeni hali : Bekar
Yazışma adresi :
Telefon : 05062528771
Elektronik posta adresi : hasancankarakus@gmail.com
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Ankara Üniversitesi - Fizik Mühendisliği
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi – Temiz Tükenmez Enerjiler A.B.D

İş Tecrübesi

2018- Halen Alhazen Mühendislik – Kurucu Ortak