



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FOTOVOLTAİK PANEL TESTLERİ İÇİN IŞIK SPEKTRUMU KONTROLLÜ SOLAR SİMÜLATÖR TASARIMI

VEDAT ESEN

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Bülent ORAL

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

İSTANBUL, 2020



MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES



LIGHT SPECTRUM CONTROLLED SOLAR SIMULATOR DESIGN FOR PHOTOVOLTAIC PANEL TESTS

VEDAT ESEN

Ph.D. THESIS

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Supervisor

Prof. Dr. Bülent ORAL

Thesis CO- Supervisor

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

İSTANBUL, 2020

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde desteğini sınırsız sunan, sabırlı, hassas ve nazik yaklaşımıyla beni motive eden, bilgi ve birikimini benimle her zaman paylaşan, bakış açımı genişleten tavsiyeleriyle sürekli yanımda olan, yüksek lisans sürecinde de beraber çalışma onuruna eriştiğim ve yaşamım boyunca minnettar kalacağım danışman hocam Sayın, Prof. Dr. Bülent ORAL’a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında sabrı, nezaketi ve geniş hoşgörüsü ile yanımda olup desteğini esirgemeyen, motive ve teşviğiyle sorunları aşmamda her daim katkısını sunan, bilgi ve birikimini benimle sınırsız paylaşarak bana vizyonumu genişletme şansını veren, her zaman şükranla anacağım danışman hocam Sayın, Prof. Dr. Şafak SAĞLAM’a sonsuz teşekkür ederim.

Uygulama noktasında her desteğe ihtiyacım olduğunda beni geri çevirmeyen mesai arkadaşım Aytek GÜCÜYENER’e teşekkür ederim.

Uygulama çalışmaları sürecinde çözüm odaklı bakış açısı ve pratik yaklaşımıyla her zaman desteğini sunan ve emek veren eski öğrencim ve arkadaşım Yasin CENGİZ’e çok teşekkür ederim.

Çalışmam süresince ellerinden geldiğince destek sunan İstanbul Arel Üniversitesi akademik ve idari personeldeki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez süresince desteklerini esirgemeyip motive edici yaklaşımlarıyla hep yanımda olan annem Hazal ESEN ve babam Ali ESEN’e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan, varlığıyla zor zamanlarımı kolaylaştırıp güzelleştiren, özellikle tasarım konusunda verdiği fikirlerle bakış açımı zenginleştiren değerli eşim Özge CEYLAN ESEN’e sonsuz teşekkür ederim.

Varlığıyla mutluluğuma mutluluk katan, küçük bir gülümsemesiyle beni daha çok çalışmam konusunda motive eden canım kızım Bilge’ye çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	viii
YENİLİK BEYANI	x
SEMBOLLER.....	xii
KISALTMALAR.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
TABLO LİSTESİ.....	xx
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Önem	2
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Güneş Enerjisi	6
2.2. Güneş Işınımı ve Spektral Özellikleri	7
2.3. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Fotovoltaik Endüstrisi.	10
2.4. Fotovoltaik Paneller	14
2.4.1. Kristal silisyum (c-si) fotovoltaik hücreler	15
2.4.2. İnce film fotovoltaik hücreler	16
2.4.3. Grup III-V bileşik fotovoltaik hücreler.....	18
2.4.4. Çok eklemlı (tandem) fotovoltaik hücreler.....	18
2.4.5. Organik ve polimer fotovoltaik hücreler.....	18
2.4.6. Fotovoltaik panellerin çalışma ilkesi ve yapısı.....	19
2.4.7. Fotovoltaik panellerin performans karakteristikleri.....	20
2.4.7.1. Akım- gerilim (I-V) karakteristiğı	20
2.4.7.2. Spektral cevap	22

2.4.7.3. Fotovoltaik hücre uyumsuzluğu.....	24
2.4.8. Fotovoltaik cihazların performansını etkileyen faktörler	26
2.4.8.1. I-V karakteristiğinin ışıınım ve sıcaklık ile değişmesi.....	26
2.4.8.2. Spektral ve geliş açısı etkileri	27
2.5. Fotovoltaik Cihaz Testleri Standartları	28
2.6. Fotovoltaik Cihazlar İçin Solar Simülatörlerin Sınıflandırılması	30
2.7. Solar Simülatörlerde Kullanılan Işık Kaynakları	32
2.7.1. Karbon ark, yüksek basınçlı sodyum buharlı ve argon ark lambası	33
2.7.2. Kuvars tungsten halojen lamba.....	34
2.7.3. Civa buharlı xenon lamba	35
2.7.4. Xenon ark ve flaş lambası.....	35
2.7.5. Metal halide ark lambası.....	37
2.7.6. LED ışık kaynağı	38
2.7.7. Süper continuum lazer	41
2.7.8. Çoklu ışık kaynaklı solar simülatör	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
3.1. Materyal	44
3.1.1. Işık yayan diyotlar.....	44
3.1.1.1. Soğuk beyaz LED	44
3.1.1.2. Sıcak beyaz LED.....	44
3.1.1.3. Mavi LED	45
3.1.1.4. Kırmızı LED	46
3.1.1.5. 850 nm kızılötesi LED	47
3.1.1.6. 940 nm kızılötesi LED	48
3.1.2. LED sürücüleri.....	50
3.1.2.1. Power LED sürücüsü	50
3.1.2.2. COB LED sürücüsü	51

3.1.3.	Kontrol elemanı (mikrokontrolör)	51
3.1.4.	Spektroradyometre ve yazılımı	52
3.1.5.	Diğer bileşenler	53
3.2.	Yöntem	53
3.2.1.	Yapılan çalışmalar	55
3.2.1.1.	LED'lerin dalga boyu değişimlerinin araştırılması	55
3.2.1.2.	Solar simülatör ilk prototipi	64
3.2.1.3.	Solar simülatör ikinci prototipi	69
4.	TEZ ÇALIŞMASI.....	84
4.1.	Solar Simülatör Tasarım ve Ürün Geliştirme Aşamaları	84
4.1.1.	LED baskı devresinin oluşturulması	84
4.1.2.	LED'lerin PCB'ye montajı	88
4.1.3.	Soğutucuların montajı ve bakır boru yerleşimi.....	89
4.1.4.	PCB'lerin soğutucu üzerine montajı.....	90
4.1.5.	PCB'lerin soketlerinin montajı	92
4.1.6.	Power LED sürücü baskı devresinin oluşturulması	93
4.1.7.	Sistem gövdesinin oluşturulması	96
4.1.8.	Sistem bağlantılarının gerçekleştirilmesi	98
4.1.9.	Fan kabini oluşturulması ve fanların montajı	101
4.1.10.	Aktif soğutucu sistemi ve bağlantısı	102
4.1.11.	Sistem gövdesinin kapatılması	104
4.1.12.	Solar simülatör çalışma prensibi	106
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	108
5.1.	Solar Simülatör Performans Kriterleri Testleri	108
5.1.1.	Spektral eşleşme (spectral match).....	108
5.1.2.	Uzamsal uyumsuzluk (spatial non-uniformity)	112
5.1.3.	Zamansal istikrarsızlık (temporal instability)	120

5.1.3.1. Uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi.....	121
5.1.3.2. Kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi.....	122
5.2. Fotovoltaik Panel Testi ve Analizi.....	123
5.3. Yapılan Prototiplerle Karşılaştırılması.....	127
5.4. Çalışmanın Literatürdeki Yeri.....	129
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	132
KAYNAKLAR	135
EKLER.....	152
ÖZGEÇMİŞ	162



ÖZET

FOTOVOLTAİK PANEL TESTLERİ İÇİN IŞIK SPEKTRUMU KONTROLLÜ SOLAR SİMÜLATÖR TASARIMI

Bu tez çalışması fotovoltaik panellerin standart test koşullarında test edilmesini sağlayan, ışık spektrumu kontrol edilebilir, LED ışık kaynaklı, AAA sınıfı bir solar simülatör tasarımı ve geliştirilmesine dayanmaktadır. Literatürdeki uygulamalar incelenerek, bu çalışmalardan farklı olarak, hücre değil panel bazında test yapılmasını sağlayan bir solar simülatör tasarlanmıştır. Aynı zamanda bu solar simülatör özgün bir tasarıma ve aktif soğutma sistemine, kullanıcı açısından da ergonomik bir yapıya sahip olarak geliştirilmiştir.

Birinci bölümde tez çalışmasına giriş yapılmış konunun önemi yenilenebilir enerji kaynakları arasında kullanımı her geçen gün artan ve yaygınlaşan fotovoltaik paneller açısından vurgulanmış ve tezin amacı belirtilmiştir.

İkinci bölümde ise güneş enerjisi, güneşin spektral özellikleri, Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve fotovoltaik endüstrisi konularına yer verildikten sonra fotovoltaik panellere detaylı bir bakış yapılmıştır. Ayrıca, bu bölümde fotovoltaik panel testleri ile ayrıntılı bilgilerden bahsedilmiş ve bununla bağlantılı olarak solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynakları ile ilgili literatür taraması detaylandırılmıştır.

Üçüncü bölümde çalışmanın materyalleri ve yöntemi anlatılmıştır. Aynı zamanda LED ışık kaynağının spektral özellikleri ile ilgili deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Böylece tezin ana konusu olan panel bazlı solar simülatörün geliştirilme basamaklarında yer alan hücre bazlı iki ayrı prototip çalışmasının detayları ve test sonuçları açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde spektrum kontrollü solar simülatörün geliştirme aşamaları ifade edilerek her aşamanın detayı görsellerle desteklenmiştir.

Beşinci bölüm bulgular ve tartışmaya ayrılmış, solar simülatör performans kriterleri testlerinin sonuçları ve analizlerine yer verilmiştir. Yapılan performans kriterleri testlerinin sonuçları önceki prototip çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmış ve

analizler detaylı olarak açıklanmıştır. Tüm testler bittikten sonra piyasada kullanılan ve solar simülatörün aydınlatma alanına uygun boyutlardaki bir fotovoltaiik panel testi gerçekleştirilmiş ve I-V grafiğı elde edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar test edilen fotovoltaiik panelin teknik broşüründeki verileriyle karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar bölümünde tez çalışmasında elde edilen kazanımlar belirtilmiştir. Aynı zamanda bu tez çalışmasının ilerideki çalışmalarda nasıl bir fayda sağlayabileceğı ve tasarlanıp uygulaması yapılan simülatörün nasıl geliştirilebileceğı konusundaki öneriler maddeler halinde sunulmuştur.



ABSTRACT

LIGHT SPECTRUM CONTROLLED SOLAR SIMULATOR DESIGN FOR PHOTOVOLTAIC PANEL TESTS

This thesis is based on the design and development of a light spectrum controllable, LED light source, class AAA solar simulator that allows photovoltaic panels to be tested under standard test conditions. After examining the applications in the literature, unlike these studies, a solar simulator was designed to enable panel based tests not only cells. Also, this solar simulator has been developed with a unique design and active cooling system and an ergonomic structure with regard to user.

In the first section, the thesis study has been introduced, the importance of the subject has been emphasized in terms of photovoltaic panels, which their usage are increasing day by day and has become widespread among renewable energy sources, and the purpose of the thesis has been specified.

In the second section, solar energy, the spectral properties of the sun, solar energy potential in Turkey and photovoltaic industry issues have been examined and a detailed overview of photovoltaic panels has been made. In the same section, detailed information about photovoltaic panel tests is mentioned and in connection with this, a literature review of light sources used in solar simulators is detailed.

In the third section, the materials and methods of the study has been explained. After these topics, experimental studies on the spectral properties of the LED light source have been discussed. The details and test results of two cell-based prototypes were explained in the development steps of the panel-based solar simulator, which is the main subject of the thesis.

In the fourth section, the development stages of the spectrum controlled solar simulator have been explained step by step, the details of each phase are supported with visuals.

The fifth section is devoted to findings and discussion, and the results and analysis of solar simulator performance criteria tests are included. The results of the performance criteria tests performed have been interpreted in comparison with the previous prototype studies and the analysis has been explained in detail. After all the tests were completed, a photovoltaic panel test, which is used in the market and suitable for the lighting area of the solar simulator, was performed and I-V graphic was obtained. All the results obtained

from panel tests were compared with the data in the technical brochure of the tested photovoltaic panel.

The results obtained in the thesis study are stated in the conclusion section. Also, the benefits that this thesis study can provide in future studies and suggestions on how to develop the designed and applied simulator are presented as items.



YENİLİK BEYANI

FOTOVOLTAİK PANEL TESTLERİ İÇİN IŞIK SPEKTRUMU KONTROLLÜ SOLAR SİMÜLATÖR TASARIMI

Fotovoltaik panellerin kullanımlarının her geçen gün yaygınlaşması bu sistemlerin ana elemanı olan fotovoltaik panellere ihtiyacı da artırmakta ve bu panellerin testinin standart test koşulları altında solar simülatörlerle yapılmasını zorunluluk haline getirmektedir. Ülkemizde bu testlerin yapılmasında yerli solar simülatör açısından dışa bağımlılık söz konusudur. Yapılan bu tez çalışmasının yenilikçi yönlerinden en önemlisi fotovoltaik panel bazlı yerli bir solar simülatör tasarımı geliştirilip, üretimin yapılmasıdır. Bu tez çalışması ile hem ticari ürünlerde dış ülkelere mamul ürün alımı minimuma indirilmiş olacak hem de akademik birimlerin yenilenebilir enerji laboratuvarlarında fotovoltaik panellerin testleri daha yaygın olarak yapılmaya başlanacaktır.

Tez çalışmasının bilimsel anlamda yenilikçi yönü ise, LED ışık kaynağı kullanılan ve fotovoltaik panel testlerini gerçekleştiren bir solar simülatörün ASTM 927-10 standartında belirtilen üç performans kriterinde de A sınıfını yakalamasıdır. Böylece tez çalışması sonunda ortaya çıkan solar simülatör, ışık spektrumu kontrolü yapılabilen AAA sınıfı bir solar simülatördür.

Tez çalışmasının diğer yenilikçi yönleri tasarımı ve fiziksel yapısıdır. Tamamen özgün bir yaklaşım ile düşünülp geliştirilmiş ve olabilecek en ergonomik yapı oluşturulmuştur. Solar simülatörün yapısı incelendiğinde LED'lerin seçimi, dizilimi, LED kartlarının ve sürücü kartlarının dizaynı aynı zamanda piyasada kullanılan paneller bazında test yapılmasına imkân veren gövde yapısı ve aydınlatma alanı çalışmanın özgün taraflarındandır. Yapılan solar simülatörde ışık kaynağı olarak LED kullanılması ve güneş spektrumunu yalnızca 6 farklı dalga boyundaki LED ile simüle edebilmesi ekonomik anlamda solar simülatöre yeni bir yaklaşım getirmiştir. Fan ile yapılan soğutmaya, aydınlatma alanının geniş olması sebebiyle ek olarak günümüze kadar yapılan çalışmalarda rastlanmayan aktif soğutma sisteminin oluşturulması bu tez çalışmasının diğer yenilikçi ve önemli bir yönüdür.

Tasarımı yapılan ve geliştirilen bu solar simülatör gelecekte yapılabilecek akademik çalışmalarda, yenilenebilir enerji laboratuvarlarındaki araştırmalarda kullanılabilecek

şekilde dizayn edilmiştir. Sürücü ve LED kartlarının modüler olması aydınlatma alanının ihtiyaç halinde kolaylıkla artırılıp piyasadaki daha büyük panellerin testinin yapılmasına imkân verecektir.

Yapılan bu tez çalışmasının dünya ve Türkiye literatürüne önemli bir katkı sağlayacak, özgün bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

Temmuz 2020 Prof. Dr. Bülent ORAL Prof. Dr. Şafak SAĞLAM Vedat ESEN



SEMBOLLER

λ	: Dalga boyu
a-si	: Amorf Silisyum
c	: Işık Hızı
c-si	: Kristal Silisyum
CdTe	: Kadmiyum Tellür
CIS	: Bakır İndiyum Diselenid
g	: Elektron Yüğü
Ga	: Galyum
GaAs	: Galyum Arsenit
h	: Planck Sabiti
In	: İndiyum
k	: Boltzman Sabiti
n	: İdealite Faktörü
T	: Birleşme Sıcaklığı

KISALTMALAR

AM	: Air Mass (Hava Kütlesi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
COB	: Chip on Board
D	: Direct (Doğrudan)
EQE	: External Quantum Efficiency (Dış Kuantum Verimliliği)
ERDA	: Energy Research and Development Administration (Enerji Araştırma ve Geliştirme Yönetimi)
eV	: Elektronvolt
EVA	: Etilen Vinil Asetat
exp	: Eksponansiyel
FF	: Fill Factor (Dolgu Faktörü)
G	: Global
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
I-V	: Akım – Gerilim
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
I_L	: Fotoakım
I_{MPP}	: Maksimum Güç Noktasındaki Akım
I_o	: Doygunluk Akımı
IQE	: Internal Quantum Efficiency (İç Kuantum Verimliliği)
IRENA	: International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
JISC	: Japanese Industrial Standards Committee (Japon Endüstriyel Standartlar Komitesi)
K	: Kelvin
Kg	: Kilogram
kWh	: Kilo Watt Saat
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
m²	: Metrekare

Med-TSO	: Mediterranean Transmission System Operators (Akdeniz İletim Sistemi İşleticileri Birliği)
MW	: Mega Watt
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
nm	: Nanometre
PV	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
QE	: Quantum Efficiency (Kuantum Verimi)
R_s	: Seri Direnç
R_{sh}	: Şönt Direnç
SORCE	: Solar Radiation and Climate Experiment (Güneş Radyasyonu ve İklim Deneyi)
SR	: Spectral Responce (Spektral Cevap)
UV	: Ultraviyole
V_{MPP}	: Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim
V_{OC}	: Açık Devre Gerilimi
W	: Watt
W_p	: Watt-Peak

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Güneş'in yapısı ve katmanları	7
Şekil 2.2 Güneş ışığı dalga boyları	8
Şekil 2.3 Atmosfer ve yüzey tarafından ayrılmış Güneş ışıınımı bileşenleri	9
Şekil 2.4 a) AM 1.5 spektral koşullarının şeması b) AM 1.5'e kıyasla diğer gerçekçi atmosferik ve hava kütle koşullarına örnekler	10
Şekil 2.5 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası	11
Şekil 2.6 Aylık ortalama günlük güneşlenme süresi verisinin 1985-2018 aylık ortalama değerlerinin 2017 ve 2018 aylık değerlerle karşılaştırılması	11
Şekil 2.7 Türkiye güneş enerjisi kurulu güç kapasitesi	12
Şekil 2.8 Türkiye fotovoltaik tipi-alan-üretilebilecek enerji (kWh-Yıl)	13
Şekil 2.9 Türkiye fotovoltaik elektrik çıkışı haritası	14
Şekil 2.10 Fotovoltaik hücre, panel ve dizi tasarımları	15
Şekil 2.11 Polikristal ve monokristal fotovoltaik hücreler	16
Şekil 2.12 İnce film fotovoltaik hücre	17
Şekil 2.13 Fotovoltaik hücre temel yapısı; (a) temel fotovoltaik hücre, (b) iç katman eklenmiş fotovoltaik hücre.....	19
Şekil 2.14 Fotovoltaik panelin fiziksel yapısı.....	20
Şekil 2.15 Fotovoltaik hücrenin I-V karakteristiği	21
Şekil 2.16 Fotovoltaik hücreyi temsil eden bir eşdeğer devre	22
Şekil 2.17 Farklı malzemelerden üretilmiş fotovoltaik hücrelerin spektral cevapları..	23
Şekil 2.18 Fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel bağlanması.....	24
Şekil 2.19 Fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel blok birleşimleri	24
Şekil 2.20 İki uyumsuz paralel hücrenin I-V karakteristiği.....	25
Şekil 2.21 İki uyumsuz seri hücrenin I-V karakteristiği.....	25
Şekil 2.22 Sabit ışıınım altında sıcaklığın I-V karakteristiğine etkisi	26
Şekil 2.23 Sabit sıcaklıkta ışıınının I-V karakteristiğine etkisi	27
Şekil 2.24 AM 1.5G spektrumu.....	28
Şekil 2.25 Solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynakları	32
Şekil 2.26 Solar simülatör ışık kaynaklarının kullanılmaya başladığı yıllar	33
Şekil 2.27 (a) Halojen lamba ışık kaynaklı solar simülatör, (b) Halojen lamba örneği	34
Şekil 2.28 (a) Xenon ark solar simülatör, (b) Xenon ark lambasının şematik gösterimi	

.....	36
Şekil 2.29 10 kW Xenon lamba örneği.....	37
Şekil 2.30 (a) Metal halide ışık kaynaklı solar simülatör örneği, (b) Metal halide lamba	38
Şekil 2.31 LED solar simülatör örneği çizimi	38
Şekil 2.32 LED solar simülatör örneği	39
Şekil 2.33 Çoklu ışık kaynaklı solar simülatör örneği.....	42
Şekil 3.1 Soğuk ve sıcak beyaz COB LED ölçüleri	45
Şekil 3.2 Mavi LED dalga boyu teknik broşür bilgisi	45
Şekil 3.3 Mavi LED fiziksel görünüm.....	46
Şekil 3.4 Kırmızı LED dalga boyu teknik broşür bilgisi	46
Şekil 3.5 Kırmızı LED fiziksel görünüm.....	47
Şekil 3.6 Mavi ve Kırmızı LED ölçüleri ve lehim bacakları.....	47
Şekil 3.7 850 nm kızılötesi LED dalga boyu teknik broşür bilgisi.....	48
Şekil 3.8 850 nm kızılötesi LED fiziksel görünüm	48
Şekil 3.9 940 nm kızılötesi LED dalga boyu teknik broşür bilgisi.....	49
Şekil 3.10 940 nm kızılötesi LED fiziksel görünüm	49
Şekil 3.11 850 nm ve 940 nm kızılötesi LED ölçüleri ve polariteleri	49
Şekil 3.12 İlk çalışmalarda test edilen sürücüler ve devre kartı	50
Şekil 3.13 (a) Power LED sürücüsü, (b) COB LED sürücüsü.....	51
Şekil 3.14 (a) Arduino Uno R3 mikroişlemci, (b) PCA 9685 sürücü kartı	52
Şekil 3.15 (a) SR-500 Spektoradyometre fiziksel yapısı, (b) DARWin yazılımı ekran görüntüsü.....	53
Şekil 3.16 Solar simulatör tasarımı süreç diyagramı	54
Şekil 3.17 LED'lerin karakutu içine yerleşimi	56
Şekil 3.18 Dalga boyu ölçümü test düzeneği.....	56
Şekil 3.19 Mavi LED dalga boyunun ilk ölçümü	57
Şekil 3.20 Mavi LED dalga boyunun ilk ve 2 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması	57
Şekil 3.21 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü	58
Şekil 3.22 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ve 2 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması.....	58
Şekil 3.23 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü.....	59
Şekil 3.24 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ve 2 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması.....	59

Şekil 3.25 Mavi LED dalga boyunun ilk ölçümü	60
Şekil 3.26 Mavi LED dalga boyunun ilk ve 48 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması	60
Şekil 3.27 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü	61
Şekil 3.28 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ve 48 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması.....	61
Şekil 3.29 Şekil 3.32 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü	62
Şekil 3.30 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ve 48 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması.....	62
Şekil 3.31 İlk prototip solar simülatör ana bileşenleri	64
Şekil 3.32 LED'lerin alüminyum soğutucu üzerine yerleşimi	65
Şekil 3.33 İçi ayna ile kaplanmış karakutu	66
Şekil 3.34 Spektral eşleşme test düzeneği	67
Şekil 3.35 İlk prototip solar simülatörün dalga boyu ölçüm sonuç grafiği	68
Şekil 3.36 İlk prototip solar simülatör tasarımına ait IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 spektral eşleşme raporu.....	69
Şekil 3.37 Soğuk beyaz (cool white) ve sıcak beyaz (warm white) LED'lerin dalga boyları	71
Şekil 3.38 İkinci prototip solar simülatör ana bileşenleri	72
Şekil 3.39 LED'lerin alüminyum soğutucu üzerindeki dizilimi.....	73
Şekil 3.40 Spektral eşleşme ölçümü test düzeneği	74
Şekil 3.41 Solar simülatör dalga boyu ölçüm sonuçları (yazılım ekran görüntüsü).....	74
Şekil 3.42 İkinci prototip solar simülatör spektral eşleşme değerleri ekran görüntüsü	75
Şekil 3.43 İkinci prototip solar simülatörün spektral eşleşme grafiği	76
Şekil 3.44 Uzamsal uyumsuzluk test düzeneği.....	77
Şekil 3.45 150 mm'den uzamsal uyumsuzluk için ışıma (W/m^2) ölçümü	78
Şekil 3.46 200 mm'den uzamsal uyumsuzluk için ışıma şiddeti (W/m^2) ölçümü	80
Şekil 3.47 İkinci prototip uzun vadeli istikrarsızlık testi grafiği	81
Şekil 3.48 İkinci prototip kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları.....	82
Şekil 4.1 LED devre şeması.....	86
Şekil 4.2 PCB katmanlarını gösteren kart detayı.....	87
Şekil 4.3 Baskı devre kartının ön ve arka tarafının fiziksel yapısı	87
Şekil 4.4 Power LED montajı.....	88
Şekil 4.5 LED montajı tamamlanmış PCB	88

Şekil 4.6 Bakır boruların döşenmesi.....	89
Şekil 4.7 Bakır boru döşenmiş soğutucu	90
Şekil 4.8 PCB’lerin soğutucu üzerine montajı	91
Şekil 4.9 Soketlerin montajı	92
Şekil 4.10 Power LED sürücü kartı çizimi	93
Şekil 4.11 Sürücü devresinin kağıda aktarılmış hali	94
Şekil 4.12 Sürücü devresinin bakır plakete aktarılmış hali	94
Şekil 4.13 Sürücü kartlarının kimyasal işlemleri.....	95
Şekil 4.14 (a) Sürücü kartlarının delinmesi, (b) Sürücü kartlarının lehimlenmesi, (c) Sürücülerin karta montajı	96
Şekil 4.15 Sigma profil kesiti ve ölçüleri	96
Şekil 4.16 (a) Solar simülatör ana gövdesi, (b) Solar simülatör tek kat kart yerleştirilmiş ana gövdesi.....	97
Şekil 4.17 Kablo uçlarına dişi konnektör takılması.....	98
Şekil 4.18 PCB ve sürücülerin kablo bağlantıları.....	99
Şekil 4.19 İlk kat sürücü enerji bağlantılarının bitirilmesi	100
Şekil 4.20 İkinci sürücü katının yerleştirilmesi	100
Şekil 4.21 (a) Power sürücü kartlarının tümünün bağlantılarının bitişi, b) COB LED sürücülerinin yerleştirilmesi.....	101
Şekil 4.22 Fanların montajı.....	102
Şekil 4.23 (a) Fan kabının görünümü, (b) Fanların kabine montajı	102
Şekil 4.24 Aktif soğutma sistemi bileşenleri	103
Şekil 4.25 (a) Aktif soğutma sisteminin solar simülatöre kaynak bağlantısı işlemi, (b) Kompresörün vakumlanması işlemi, (c) Sisteme R134a gazının verilmesi	104
Şekil 4.26 (a) Pleksilerin kesilmesi, (b) Pleksilerin alüminyum profillere takılması, (c) Ön kapağın hazırlanması, (d) Solar simülatör gövdesinin tamamen kapatılmış hali ..	105
Şekil 4.27 Solar simülatör çalışma prensibi	107
Şekil 5.1 Spektral eşleşme test düzeneği	109
Şekil 5.2 Spektral eşleşme testinin dalga boyu grafiği (ekran görüntüsü)	110
Şekil 5.3 AM 1.5 G spektrumu ve solar simülatör spektrumu karşılaştırması	110
Şekil 5.4 Solar simülatör AM 1.5 G spektrumu gerekli yüzdeleri ve solar simülatörün sağladığı yüzdeler (ekran görüntüsü).....	110
Şekil 5.5 Spektral eşleşme raporu ekran görüntüsü.....	111
Şekil 5.6 Aydınlatma alanının 64 hücreye bölünmesi	113

Şekil 5.7 Aynasız yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü yüzey ağ grafiği.....	115
Şekil 5.8 Aynasız yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü hücre bazında ışıınım şiddeti grafiği.....	115
Şekil 5.9 Uzamsal uyumsuzluk aynalı ölçüm düzeneği	116
Şekil 5.10 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü yüzey ağ grafiği	118
Şekil 5.11 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü hücre bazında ışıınım şiddeti grafiği	119
Şekil 5.12 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü hücre bazında ışıınım şiddeti üç boyutlu grafiği	119
Şekil 5.13 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü alan bazında ışıınım şiddeti grafiği	120
Şekil 5.14 Uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi grafiği	121
Şekil 5.15 Kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi grafiği.....	122
Şekil 5.16 Fotovoltaik panelin solar simülatördeki konumu	123
Şekil 5.17 Fotovoltaik panel test düzeneği	124
Şekil 5.18 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin akım-gerilim karakteristiği	125
Şekil 5.19 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin teknik broşüründe verilen akım-gerilim karakteristiği	125
Şekil 5.20 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin akım-gerilim karakteristiği analizi.....	126
Şekil 5.21 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin güç-gerilim eğrisi	127

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Solar simülatör performans sınıflandırması	30
Tablo 2.2 Toplam ışıma yüzdeleri	31
Tablo 2.3 Solar simülatör ışık kaynaklarının karşılaştırılması	43
Tablo 3.1 İkinci prototip solar simülatörde kullanılan LED'lerin özellikleri.....	70
Tablo 3.2 İkinci prototip solar simülatör spektral eşleşme performansının sınıflandırılması.....	75
Tablo 3.3 150 mm mesafeden ölçülen 64 hücrede ışıyım (W/m^2) değerleri	78
Tablo 3.4 200 mm mesafeden ölçülen 64 hücrede ışıyım şiddeti (W/m^2) değerleri .	79
Tablo 3.5 İkinci prototip solar simülatör uzamsal uyumsuzluk performansının sınıflandırılması.....	80
Tablo 3.6 İkinci prototip uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları	81
Tablo 3.7 İkinci prototip kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları.....	82
Tablo 5.1 Solar simülatör spektral eşleşme performansının sayısal değerleri.....	111
Tablo 5.2 64 Hücrede ayna olmadan yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçüm sonuçları	114
Tablo 5.3 Ayna kullanılmadan yapılan ölçüm için uzamsal uyumsuzluk sonucu...	116
Tablo 5.4 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçüm sonuçları	117
Tablo 5.5 Ayna kullanılarak yapılan ölçüm için uzamsal uyumsuzluk sonucu	118
Tablo 5.6 Uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları	121
Tablo 5.7 Kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları.....	122
Tablo 5.8 Ölçümü yapılan fotovoltaik panelin etiket değerleri ve açıklaması	124

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Enerji, ülkelerin sosyal gelişimi ve ekonomik kalkınmasında en önemli etkidir ve enerji olmadan modern toplumdan söz edilemez [1]. Günümüzde ülkelerin gelişmişliği kişi başına tüketilen enerji miktarı ile ölçülmektedir [2]. Ekonomik kalkınma ve gelişen teknoloji ile birlikte insanların enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün daha da artmaktadır. Bu durum, sera gazı etkisi nedeniyle küresel ısınmaya yol açan ve giderek tükenmekte olan fosil yakıtlar yerine dünyada temel bileşen haline gelmiş olan yenilenebilir enerji kaynaklarının ortaya çıkmasına neden olmuştur [3]. 1970'lerdeki enerji krizinden bu yana özel kuruluşlar ve kamu kurumları, fosil yakıtların neden olduğu sorunları aşmak için yenilenebilir enerji çalışmalarına hız ve destek vermiş, bunun sonucunda son yıllarda bu konuyla ilgili uygulamalar hız kazanmıştır [4].

Yenilenebilir enerji kaynakları, çevrenin korunmasına katkı sağlamasının yanı sıra enerjide dışa bağımlılığı azaltması, kolay erişilebilirlik ve kullanılabilirlik özelliklerinden dolayı tüm ülkeler tarafından benimsenmiştir [5]. Yenilenebilir enerji kaynaklarına bakıldığında, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, su gücü, biyolojik yakıt enerjisi ve dalga gücü gibi kaynaklar görülmektedir. Ancak, yıllar içerisinde yapılan çalışmalar rüzgâr ve güneş enerjisinin elektrik enerjisine doğrudan dönüşümünün daha pratik ve kolay olduğunu göstermektedir [6]. Güneş enerjisi, ısıtma, konutların ve ticari binaların aydınlatması, endüstriyel ısıtma ve soğutma uygulamaları için direkt olarak kullanılır. Aynı zamanda güneş enerjisi fotovoltaik güneş hücreleri kullanılarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür [7]. Çevre dostu olması, potansiyelinin yüksek olması, kullanımının diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kolay olması, güneş enerjisinin dünyada ve ülkemizde daha hızlı yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Kurulum maliyetlerinin yüksekliği, veriminin ve kapasite faktörünün düşük olması gibi ekonomik ve teknik zorlukları her geçen gün aşıldıkça güneş enerjisi tüm dünyada daha cazip hale gelmektedir [8].

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik cihazların kullanımının artmasıyla birlikte, bu cihazların güvenilirliğini sağlamak için performanslarını test etmek önem kazanmaktadır. Bu testlerde fotovoltaik cihazların I-V (akım – gerilim) eğrisi, kısa devre akımı (I_{SC}), açık devre gerilimi (V_{OC}) ve maksimum güç (P_{MAX}) gibi karakteristik değerleri gerçek atmosferik koşullar altında belirlenmelidir [9–12]. Ancak, güneş

ışınımının yoğunluğu ve spektral dağılımı, coğrafi konum, yılın saati, yılın günü, iklim koşulları, atmosferin bileşimi, irtifa ve hava koşullarındaki değişme gibi faktörler gerçek atmosferik koşullar altında test yapmayı imkânsız hale getirmektedir [13]. Böylelikle gelecekteki enerji standartları da göz önüne alındığında gerçek gün ışığına yakın spektrum değerlerinin elde edileceği solar simülatörlerin kullanılması bir zorunluluk olmaktadır. Solar simülatörler güneş ışığına benzer yoğunlukta spektral ve optik kompozisyon sağlayan, temel amacı fotovoltaiik cihazların testini laboratuvar koşullarında kontrollü bir şekilde yapmak olan cihazlardır [14–18]. Bu nedenle solar simülatörler I-V karakterizasyonunun ayrılmaz bir parçasıdır. Bunun nedeni, I-V ölçümünün, gerçek gün ışığına ve isteğe bağlı olarak fotovoltaiik paneli aydınlatmak için değiştirilebilecek koşullara karşılık gelen kalibre edilmiş bir kaynak gerektirmesidir.

Solar simülatörler genellikle ışık ve güç kaynağı, gereksinimleri karşılamak için ışın yönlerini değiştiren herhangi bir optik ve filtre, simülatörü çalıştırmak için gerekli kontrol elemanları olmak üzere üç ana bileşenden oluşurlar [19]. Solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak xenon ark lamba, kuvars tungsten halojen lamba, metal halide lamba, mercury xenon lamba, yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba, argon ark lamba, karbon ark lamba, LED (Light Emitting Diode) ve süper continuum lazer kullanılmaktadır [20, 21].

1.2. Amaç ve Önem

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesinin pratik olduğu güneş enerjisinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Dünyada olduğu gibi güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu ülkemizde de bu alanda yapılan çalışmalar hızlanmış, güneş enerjisi ile elektrik üretiminin altyapısı hazırlanmış durumdadır. Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı'na göre, 2023 yılına kadar birincil enerji talebinin yaklaşık iki katına çıkacağı belirtilmektedir. Bu durum, yerli ve yenilenebilir kaynaklara duyulan ihtiyacı daha da artıracaktır. Türkiye'nin 64. Hükümet programına göre, yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları hızlı bir şekilde harekete geçirilecektir. Dışa bağımlılığın yüksek olduğu yenilenebilir enerji alanında yapılacak çalışmalar desteklenecektir. 2023 yılına kadar güneş enerjisinden elde edilecek elektrik kullanımının 5000 MW olarak öngörülmesi Türkiye'de yerli üretim güneş enerjisi sistemlerinin son derece gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. Yasal düzenlemelerin 2013 yılında tamamlanmasıyla birlikte güneş enerjisinden elektrik elde etmek amacıyla fotovoltaiik sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaya

başlamıştır. Bu durum fotovoltaik cihazların verimli bir şekilde çalışması için gerekli olan testlerin de yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Günümüzde solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak LED'ler kullanılmaktadır. Gelişen son teknoloji ile birlikte LED'lerin düşük enerji sarfıyatı, düşük maliyet ve uzun ömür gibi avantajlarının yanında dalga boyunun da 940 nm'ye kadar yükselmesi LED'leri halojen ve xenon lambalara göre daha tercih edilir hale getirmektedir [37].

Yabancı ülkelerde LED ışık kaynaklı, spektrumu ayarlanabilen solar simülatör uygulamaları ve üretimleri olmasına rağmen ülkemizde bu anlamda yerli bir üretim yapılmamıştır. Türkiye güneş enerjisine dönük çalışmalarını ve fotovoltaik sistemlerin kullanımını yoğunlaştırmasına rağmen fotovoltaik panellerin test edilmesinde hala dışa bağımlıdır. Bu çalışmada fotovoltaik panellerin testlerinde dışa bağımlılığı sonlandırmak ve yenilenebilir enerji kaynakları hedefleri çerçevesinde ülke ekonomisine katma değer sağlamak için LED ışık kaynaklı ve spektrum kontrollü AAA sınıfı ve aktif soğutmalı bir solar simülatör tasarlanmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümü konu ile ilgili genel bilgiler ve literatür taramasına ayrılmıştır. Güneşin fiziksel yapısı ve güneş enerjisi hakkında detaylı bilgiler verilmiş güneş ışıınımı ve güneşin spektral özellikleri açıklanmıştır. Sonrasında ülkemizdeki güneş enerjisi potansiyeli ve bu konudaki endüstriyel durum incelenmiştir. Fotovoltaik panellerin tüm çeşitleri ifade edilerek, çalışma ilkesi belirtilmiş, fotovoltaik panellerin performans karakterleri, performansını etkileyen faktörler sırasıyla verilmiştir. Fotovoltaik panel testlerinde kullanılan solar simülatörlerle ilgili IEC 60904-9 (International Electrotechnical Commission) ve ASTM E927-10 (American Society for Testing and Materials) standartları ve bu standartların belirtilen kriterleri ve sınıflandırmaları ile ilgili detaylar yine bu bölümde verilmiştir. İkinci bölümün son kısmında spektrum kontrollü bir solar simülatörün ana bileşeni olan ışık kaynakları ve solar simülatör uygulamaları ile ilgili literatür taraması sunulmuştur.

Çalışmanın üçüncü bölümünde materyal ve yöntem konuları açıklanmıştır. Materyal başlığında solar simülatör tasarımı ve geliştirilmesinde kullanılan tüm bileşenler sırasıyla ele alınmış, özellikleri görsellerle desteklenip ifade edilmiştir. Yöntemin ilk kısmında tez çalışmasındaki solar simülatörde tercih edilmiş ışık kaynağı LED'in karakteristik davranışlarını anlamak ve analiz edebilmek için deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Yöntem

başlığı altında hücre bazında dizayn edilmiş iki adet solar simülatör prototip birinci ve ikinci çalışma olmak üzere sunulmuştur. Birinci prototipte elde edilen sonuçlara göre ikinci prototipte gerekli iyileştirmeler yapılmış ve istenilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümü tez uygulamasını içermektedir. Üçüncü bölümde ikinci prototipten elde edilen olumlu sonuçlar ışığında gerekli geliştirmeler ve tasarımlar yapıp, panel bazında test yapabilen daha geniş aydınlatma alanlı AAA sınıfı solar simülatör üretilmiştir.

Tez uygulaması bölümünde ilk adım olan LED seçiminden başlayıp, solar simülatörün son aşamasına kadar olan uygulama adımları adım adım sunulmuştur. Solar simülatör oluşturulduktan sonraki aşamada sistemin çalışma prensibi açıklanmıştır.

Beşinci bölüm olan bulgular ve tartışma kısmında solar simülatör performans kriterleri testlerine geçilmiştir. Her testin sonucu daha önce yapılan birinci ve ikinci prototip çalışmaları ile karşılıklı analiz edilmiş ve sonuçlar ortaya konulmuştur. Her üç performans kriterinde A sınıfı elde edilen solar simülatör için fotovoltaiik panel testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar testi yapılan panelin teknik broşüründeki verileriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu bölümün sonunda sonuçlar literatürdeki çalışmalar ve standartlar kapsamında tartışılarak, değerlendirilmiştir.

Son bölümde ise varılan tüm sonuçlar adım adım sıralanmış, yapılan tez çalışmasının Türkiye ve dünya literatürüne katkısı vurgulanmıştır. Bu tez çalışmasının geliştirilebilir yönleri belirtilerek, gelecekteki çalışmalara nasıl bir yön vereceği detaylandırılmıştır.

Çalışmanın öne çıkan adımları şöyle sıralanabilir;

- Konu ile ilgili tüm literatür taranmış, akademik ve ticari çalışmalar analiz edilmiştir.
- Seçilen ışık kaynağının dalga boyu (spektrum) analizi yapılmıştır.
- Piyasadaki fotovoltaiik panel ölçülerine uygun fiziksel yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle hücre bazında değil panel bazında fotovoltaiik cihazların testi amaçlanmıştır.
- Işık kaynağının uygun ışık akısını sağlayan dalga boyu LED kombinasyonu ile elde edilmiştir.
- Kullanılan ışık kaynağının farklı dalga boylarında çalıştırılabilmesi için uygun sürücü devreleri tasarlanmıştır.

- Kullanılan LED'lerin çeşitliliği ve sayısından dolayı oluşacak ısınma için fan soğutmasına ek olarak aktif soğutma sistemi yapılmıştır.
- ASTM E927-10 standartına göre spektrum kontrollü AAA sınıfı solar simülatör üretilmiştir.
- AM 1,5G spektrumuna uygun değerler altında fotovoltaiik cihazların I-V karakteristiklerindeki ölçümlerinin yapılarak fotovoltaiik panellerin verimliliği test edilmiştir.
- Yapılan çalışmanın akademik literatüre katkısı ve ileride yapılacak çalışmalara etkisi ve yararları sıralanmıştır.



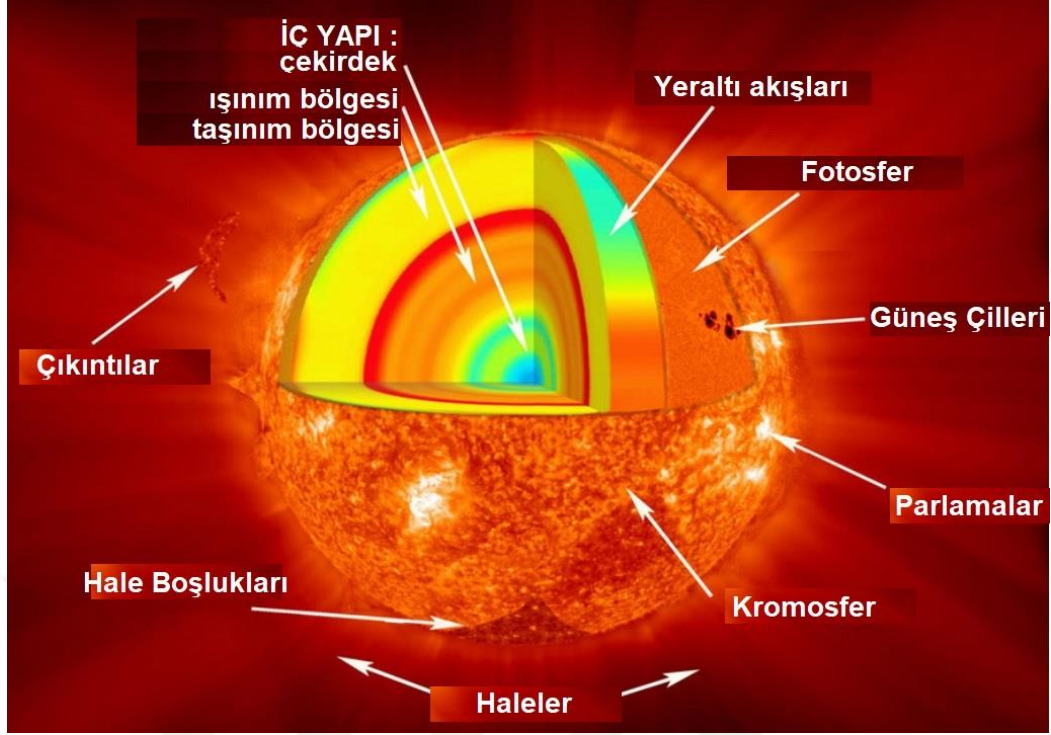
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Güneş Enerjisi

Dünyanın temel enerji kaynağı olan güneş hiçbir atığa neden olmayan temiz bir kaynaktır. Samanyolu galaksisine dağılmış, aralarında güneşten daha büyük milyarlarca yıldız olmasına rağmen güneş sistemimizin tek yıldızı güneştir. Güneşten dünyaya yayılan yıllık toplam enerji 1.5 katrilyon MW/saat'tir. Bu değer, dünyada insanların 1 yılda tükettiği enerjinin tam 28,000 katına eşdeğerdir [22]. Güneşin yarıçapı dünyanın 109 katı olan 695,508 km'dir. Dünyadan ortalama uzaklığı ise 149,600,000 km'dir. Güneşin kütlesi 2×10^{30} kg'dır. Bu ağırlık dünya kütlesinin 330,000 katına denk gelmektedir [23].

Güneş, hidrojeni helyuma dönüştüren nükleer füzyon reaksiyonları nedeniyle yüzey sıcaklığı yaklaşık 5800 K derece olan, çekirdekte ise 20 milyon K derecenin üzerine çıkan sıcak bir gaz küresidir. Atom sayısı bakımından % 91 hidrojen ve % 8.9 helyumdan meydana gelmiştir. Kütle olarak da güneş yaklaşık % 70.6 hidrojen ve % 27.4 helyumdur. İç çekirdekten gelen radyasyon, güneş yüzeyine daha yakın bir hidrojen atomu tabakası tarafından güçlü bir şekilde emildiği için görünmez [23, 24].

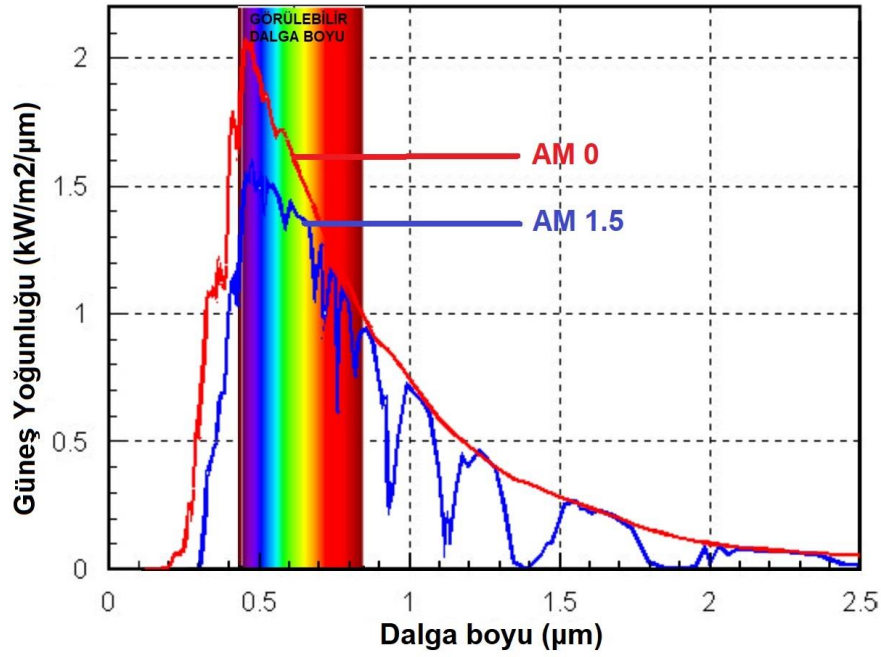
Güneş fiziksel yapı olarak üç ana bölgeye ayrılmaktadır. Bu bölgeler iç kısım, güneş atmosferi ve iç kısım ile atmosfer arasında kalan görünür yüzeyidir. Güneş'in iç kısmında da çekirdek, ısıtım bölgesi ve taşınım bölgesi olmak üzere üç ana bölüm vardır. Çekirdek güneşin gücünü sağlayan nükleer füzyon reaksiyonlarının gerçekleştiği en sıcak bölgedir ve merkezdedir. Dışa doğru bir sonraki ısıtım bölgesi gelir. Güneş enerjisinin üçüncü ve son bölgesi, taşınım bölgesi olarak adlandırılır. Bu katmandaki ısı, kıvrımlı konveksiyon yoluyla yukarı doğru hareket eder. Güneş'in içi ile Güneş atmosferi arasındaki sınıra fotosfer denilmektedir. Güneş atmosferinin alt bölgesine ise kromosfer adı verilir. Sıcaklıkların keskin bir şekilde yükseldiği ince bir geçiş bölgesi, kromosferi yukarıdaki büyük koronadan ayırır. Güneş atmosferinin en üst kısmına korona denir ve bu kısım Güneş'in yüzeyinden (fotosfer) daha sıcaktır. Üst korona kademeli olarak güneş rüzgârına dönüşür, güneş sistemimizden dışarıya doğru hareket eden bir plazma akışı yıldızlararası uzaya doğru hareket eder. Güneş rüzgârı, bir anlamda, Güneş'in tüm gezegenleri içine alan atmosferinin bir uzantısıdır [25]. Şekil 2.1'de Güneş'in katmanları ve atmosferi gösterilmiştir[26].



Şekil 2.1 Güneş'in yapısı ve katmanları[26]

2.2. Güneş Işınımı ve Spektral Özellikleri

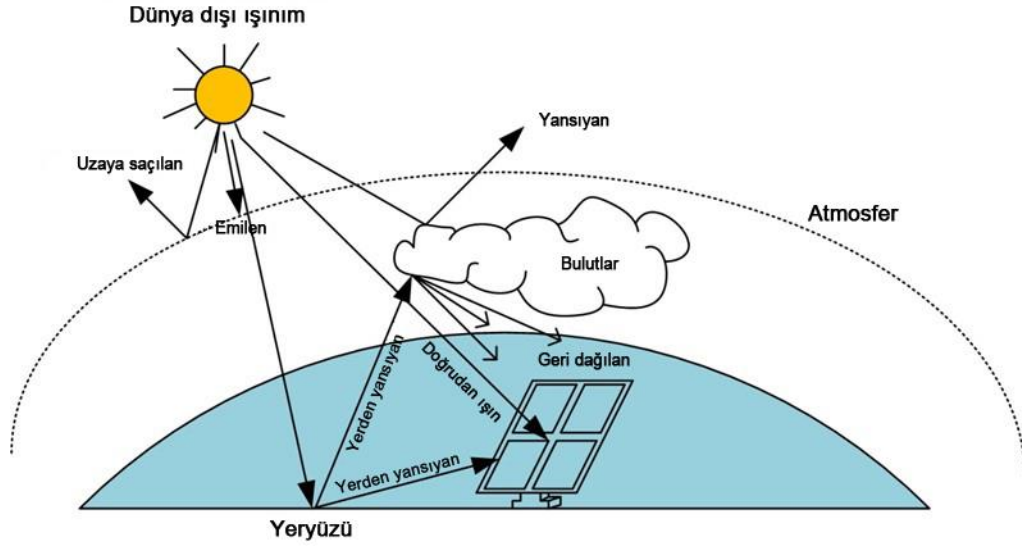
Güneş ışıınımı (W/m^2) X ışınlarından radyo dalgalarına kadar uzanan spektrumda, Güneş tarafından aydınlatma nedeniyle bir nesnede ortaya çıkan güç yoğunluğudur [27, 28]. Güneş'ten yayılan toplam ışıınım tek bir dalga boyundan değil, birçok dalga boyundan oluşur ve bu nedenle insan gözünde beyaz veya sarı görünür. Bu farklı dalga boyları, bir prizmadan geçen ışık veya gökkuşağı durumunda su damlacıkları görülebilir. Farklı dalga boyları farklı renkler olarak ortaya çıkar, ancak bazılarının insan gözüyle "görünmez" olması nedeniyle tüm dalga boyları görülemez [27]. Güneş ışıınımı enerjisinin % 99'u, 150 ila 400 nm dalga boyundadır ve güneş spektrumunun ultraviyole, görünür ve kızılötesi bölgelerini içerir. Bulutsuz günlerde dünya yüzeyine ulaşan güneş ışıınımının yaklaşık % 40'ı, 400 ila 700 nm dalga boyu aralığında görünür radyasyondur. % 51'i 700 ile 4000 nm arasında kızılötesi radyasyondur [29]. Şekil 2.2'de Güneş ışığının dalga boyları görülmektedir [27].



Şekil 2.2 Güneş ışığı dalga boyları[27]

Güneş ışınları, atmosferde yansıma, kırılma ve saçınma uğrar. Bu ışınım genellikle 300 ila 4000 nm dalga boyunda olup güneş teknolojisi uygulamalarında kullanılır. Güneş ışınımı astronomik faktörlere ve hava şartlarına göre farklılık gösterir [30]. NASA'nın Güneş Radyasyonu ve İklim Deneyi'ne (SORCE) göre, Güneş'ten Dünya'nın atmosferine kadar olan toplam Güneş enerjisinin yıllık ortalama değeri $1360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ 'dir [31]. Bu değer Güneş'in Dünya'dan uzaklaşıp yaklaşmasına göre değiştiği için yapılacak ölçüm ve test gibi uygulamalarda 1365 W/m^2 olarak standartlaştırılmıştır.

Güneş ışınları çok uzun bir mesafeden dünyanın yüzeyine ulaşır. Bu nedenle, Güneş ışınımının modellenmesinde Dünya atmosferi, yüzeyi ve Dünya'daki çeşitli nesneler gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Yansıtılmayan veya saçılmayan ve doğrudan Güneş diskinden yüzeye ulaşan radyasyona direkt ışınım denir. Güneş ışınları Dünya'nın atmosferine girdiğinde, olay enerjisinin bir kısmı genellikle aerosol olarak adlandırılan hava molekülleri, bulutlar ve parçacık maddeler tarafından saçılması veya emilmesi ile giderilir. Bu durumdan sonra yeryüzüne ulaşan ışınlar dağınık ışınım denir. Işınlardan bir kısmı zeminden reddedildikten sonra bir panele ulaşabilir ve buna zeminden yansıyan ışınım denir [32]. Şekil 2.3 Güneş ışığının radyasyona giren yüzeylerdeki çeşitli bileşenlerini göstermektedir.

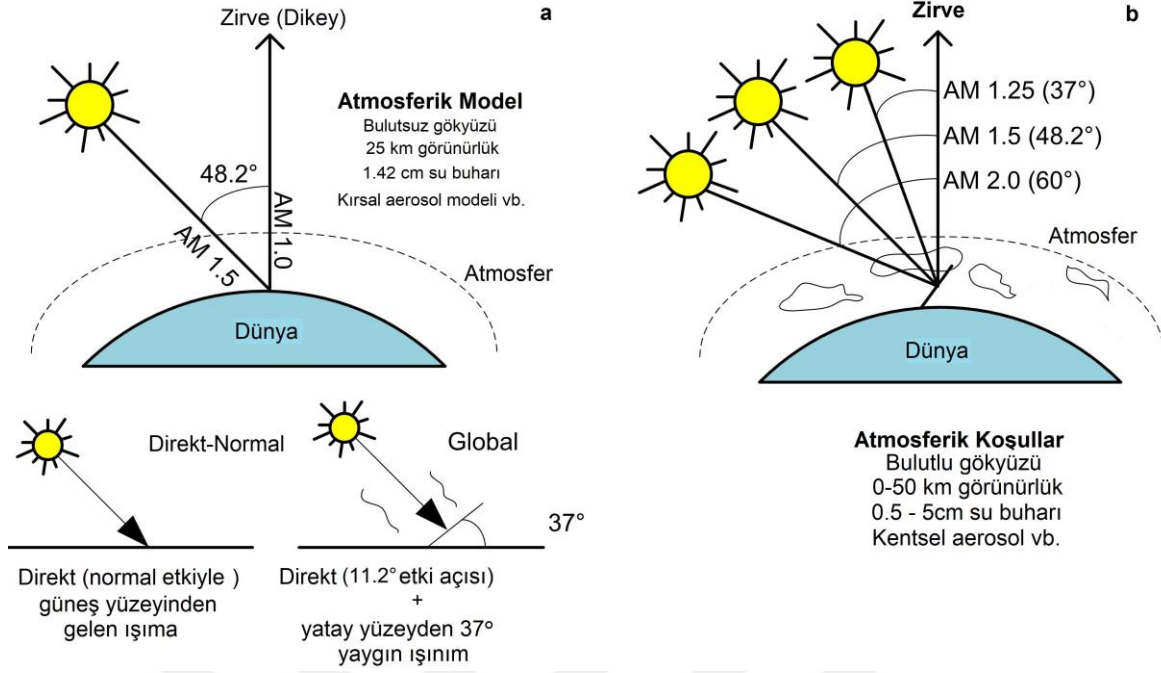


Şekil 2.3 Atmosfer ve yüzey tarafından ayrılmış Güneş ışıını bileşenleri

Güneş ışıınlarının atmosfer içinde az yol alması, bulut ve toz partikülleri gibi engellere takılmaması, Güneş'in sahip olduğu enerjinin büyük bir kısmını yeryüzüne ulaştırmasını sağlar. Yeryüzüne ulaşan bu büyüklük Air Mass (Hava Kütlesi) olarak adlandırılıp AM kısaltması ile gösterilir. Air Mass Denklem 2.1 ile belirlenmektedir.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.1)$$

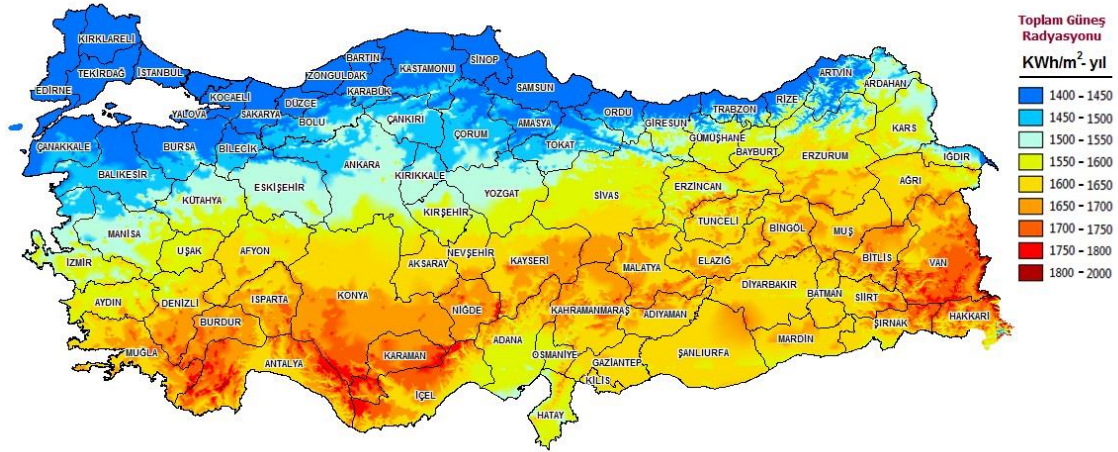
Denklemdeki θ zenit açısı olarak tanımlanmıştır. Güneş ışıınlarının yeryüzüne ulaştığı açıyı belirtmektedir. Bu denkleme göre Güneş yeryüzüne dik ulaştığında zenit açısı 0 olacağından $AM=1.0$ olacaktır. Zenit açısı arttıkça AM değeri de artacaktır. Böylece düşeyden 48.2° de $AM=1.5$ 60° de ise $AM=2.0$ olacaktır [33]. Bu AM değeriinin detayları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



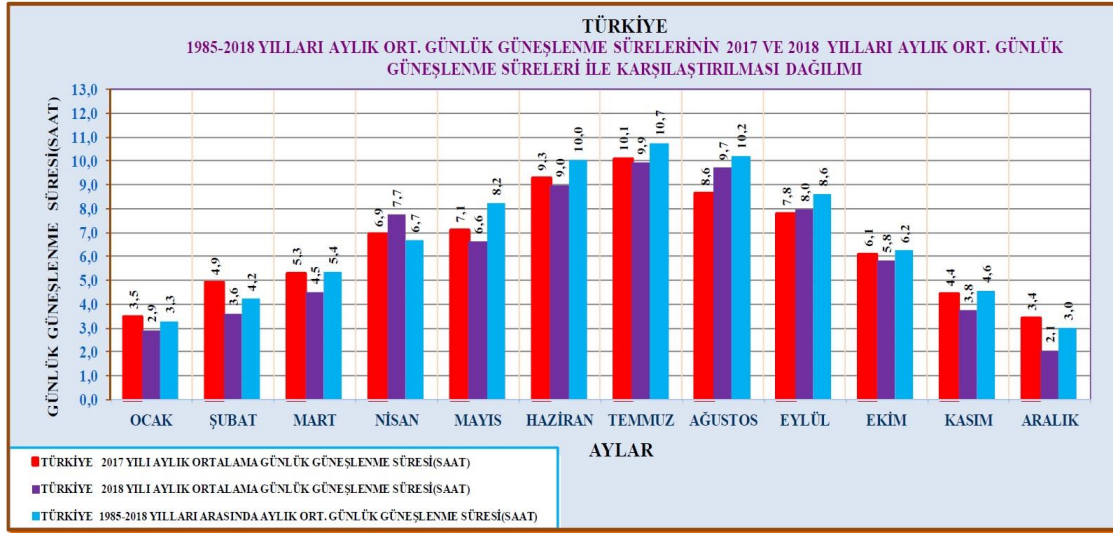
Şekil 2.4 a) AM 1.5 spektral koşullarının şeması b) AM 1.5'e kıyasla diğer gerçekçi atmosferik ve hava kütle koşullarına örnekler[19]

2.3. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Fotovoltaik Endüstrisi.

36- 42° kuzey enlemleri ile 26- 45° doğu boylamları arasında bulunan Türkiye, coğrafi olarak kuzey yarımkürede yer alır [22]. Avrupa’da 6. büyük ekonomi olan ve ayrıca dünyanın en hızlı büyüyen pazarlarından biri olan ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle diğer ülkelerin çoğundan daha fazla güneş enerjisi potansiyeline sahiptir [21, 22]. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’nce hazırlanan, Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2,737 saat (günlük toplam 7.5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1,527 kWh/m² yıl (günlük toplam 4.2 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir [36]. Şekil 2.5’te Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli görülmektedir [37]. Şekil 2.6’da ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nce yayımlanan resmi istatistiklere göre Türkiye’nin ay bazında son 33 yılın günlük ortalama güneşlenme süreleri 2017 ve 2018 değerleriyle karşılaştırılarak verilmiştir [38].



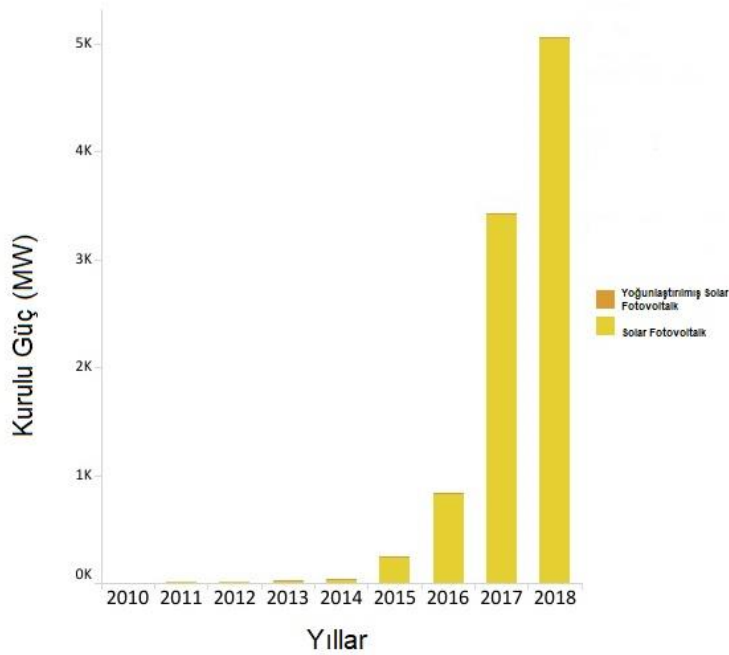
Şekil 2.5 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası[37]



Şekil 2.6 Aylık ortalama günlük güneşlenme süresi verisinin 1985-2018 aylık ortalama değerlerinin 2017 ve 2018 aylık değerlerle karşılaştırılması[38]

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Aralık 2014'te hazırladığı Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı'na göre, 2023 yılına kadar birincil enerji talebinde yaklaşık % 90'lık bir artış meydana gelecektir. Bu durumda, yerli ve yenilenebilir kaynaklara duyulan ihtiyaç ve enerji verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması Türkiye için birinci derecede önem arz etmektedir. Enerji konusunda dışa bağımlılıktan kaynaklanan risklerin önlenmesi ve sürdürülebilir bir enerji modelinin geliştirilebilmesi için ülkemizde temel olarak yenilenebilir enerjiye dayalı alternatif çözümlerin teşvik edilmesi konusunda adımlar atmaktadır.

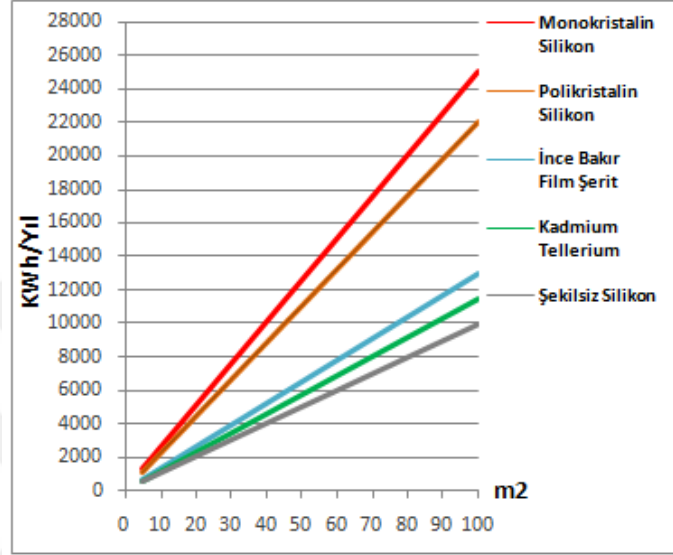
Türkiye geleceğe dönük olarak yenilenebilir enerjinin önemli rol oynadığı yenilikçi bir enerji politikası yürütmektedir [39]. 64. Hükümet programında yer alan hedeflere göre, hızla gelişmekte olan ülkemizin mevcut enerji kaynakları yeterli olmadığından bu alandaki arz güvenliğinin sağlanabilmesi için yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları harekete geçirilecektir. Ülkemizde dışa bağımlılığın yüksek olduğu bu alanda yapılacak çalışmalar, yerli ürün ve teknolojiler geliştirilmesine yönelik araştırma programları desteklenerek teşvik edilecektir [40]. Türkiye'nin tüm bu hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynakları içinde güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve 2023 yılına kadar güneş enerjisinden elde edilecek elektrik kullanımının 5,000 MW olarak öngörülmesi [39] Türkiye'de yerli üretim güneş enerjisi sistemlerinin son derece gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 2.7'de ise International Renewable Energy Agency (IRENA) istatistiklerine göre kurulu güç bazında 5,000 MW hedefine 2018 yılında ulaşıldığı görülmektedir [41].



Şekil 2.7 Türkiye güneş enerjisi kurulu güç kapasitesi[41]

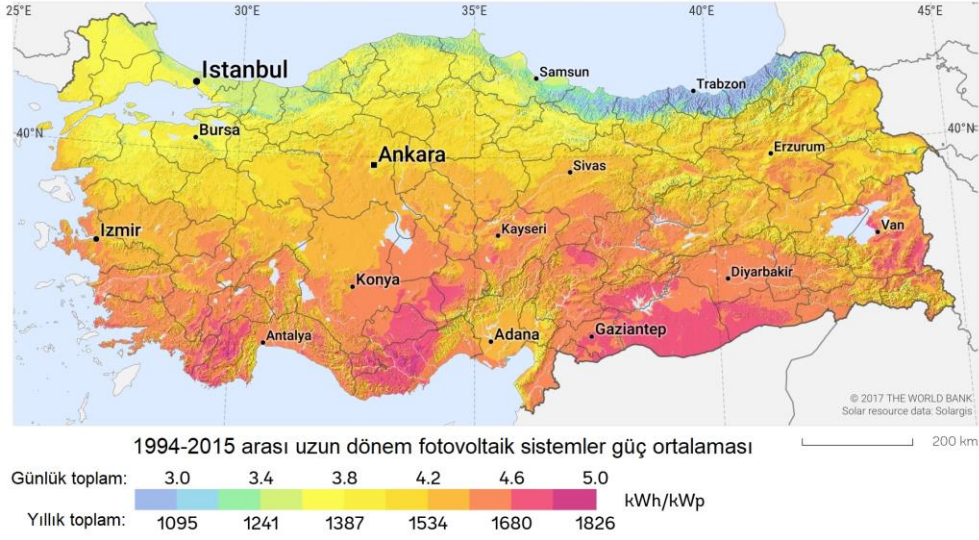
Dünya çapında fotovoltaik endüstrisi istihdamı 2018 yaklaşık 3.6 milyon kişiye ulaşmıştır. Genel olarak Asya kıtası yaklaşık 3 milyon kişi ile bu istihdamın %85'ine ev sahipliği yapmaktadır. Bu değer, Türkiye de Asya kıtasına dâhil edilerek belirlenmiştir. Asya'yı % 6.4 ile Kuzey Amerika, % 3.9 Afrika ve %3.2 ile Avrupa takip etmektedir. Hedefler doğrultusunda yapılan çalışmalar ile ülkemiz fotovoltaik endüstrisi istihdamında Çin, Japonya, ABD, Bangladeş, Hindistan ve Malezya'nın ardından dünyada 6. sıradadır [42].

Güneş enerjisinden elektrik elde etmek amacıyla fotovoltaik sistemlerin kullanımının yaygınlaşması için gerekli olan 5346 sayılı yenilenebilir enerji kaynakları kanunu, 29/12/2010 yılında revize edilmiş ve 2013’de mevzuat çalışmaları da tamamlanmıştır. [43]. Şekil 2.8’de ülkemizdeki fotovoltaik panel tipleri-alan ve üretilebilecek enerji kWh-Yıl olarak gösterilmiştir [37].



Şekil 2.8 Türkiye fotovoltaik tipi-alan-üretilebilecek enerji (kWh-Yıl)[37]

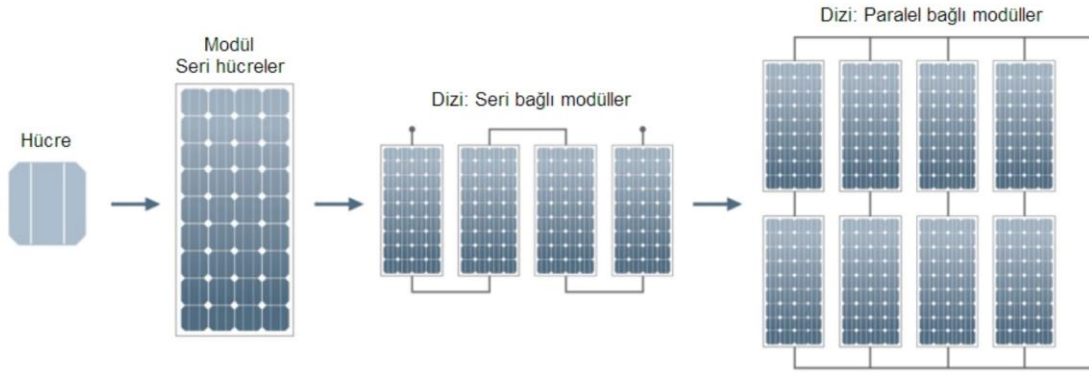
Ayrıca, 19.04.2012 tarihinde Akdeniz Bölgesi'nde arz güvenliği ve sürdürülebilir enerji temini, iletim sistemlerinin geliştirilmesi ve iletim sistemi işleticileri arasında gerekli işbirliği ve koordinasyonun sağlanması amacıyla. İtalya’da ülkemizin de katılımı ile kısa adı Med-TSO olan Akdeniz İletim Sistemi İşleticileri Birliği kurulmuştur [22]. Son yıllarda fotovoltaik sistemlerde maliyetlerin düşmesi ve verimliliğin artması ile ülkemizde de kullanım yaygınlaşmaktadır. Şekil 2.9’da ise Türkiye’deki 1994-2015 yılları arası fotovoltaikten elektrik üretimi yoğunluk haritası verilmiştir [44].



Şekil 2.9 Türkiye fotovoltaiik elektrik çıkışı haritası[44]

2.4. Fotovoltaiik Paneller

Güneş radyasyonunun yararlarından biri elektrik üretimidir. Güneş ışınımı yoluyla elektrik üretimi genellikle fotovoltaiik paneller tarafından sağlanır. Fotovoltaiik paneller, az bakım gerektiren, hareketli parçaları olmayan, dayanıklı ve basit tasarımlı lineer olmayan enerji kaynaklarıdır [12]. İlk fotovoltaiik paneller 1839 yılında Becquerel tarafından araştırılmıştır [45]. 1954'te ise Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Bell Telephone Laboratories'de icat edilmiştir. Günümüzde fotovoltaiik sistemler, en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji teknolojilerinden biridir ve gelecekteki küresel elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaya hazırdır. Fotovoltaiik sistemleri ticari ölçekte elektrik sağlamak için birleştirilebilir veya kişisel kullanım için daha küçük yapılandırmalar için düzenlenebilir. Paneller hücrelerin birleştirilmesiyle, diziler panellerin birleştirilmesiyle oluşur. Güneş santralleri ise dizilerin biraraya gelmesiyle oluşturulurlar. Şekil 2.10'da fotovoltaiik hücre, panel ve dizi tasarımları gösterilmiştir [45].



Şekil 2.10 Fotovoltaik hücre, panel ve dizi tasarımları[45]

Küçük şebekelere güç sağlamak için fotovoltaik panel kullanımı, özellikle mükemmel güneş enerjisi kaynaklarına sahip, gelişmekte olan ülkelerde, enerji iletim hatlarının yakınında yaşamayan insanlara elektrik erişimi sağlamak için mükemmel bir yol olmaktadır. Fotovoltaik paneller üretmenin maliyeti son on yılda çarpıcı bir şekilde düşmüştür, bu da onları yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çoğu zaman en ucuz elektrik formu haline getirmiştir. Fotovoltaik paneller yaklaşık 30 yıllık bir ömre sahiptir ve imalatta kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak çeşitli formlarda üretilir [41]. Fotovoltaik hücreler tıpkı transistör ve doğrultucu diyotlar gibi yarı iletken maddelerden üretilirler. Bu yarı iletkenlerin başında kristal silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi malzemeler gelir [46].

2.4.1. Kristal silisyum (c-si) fotovoltaik hücreler

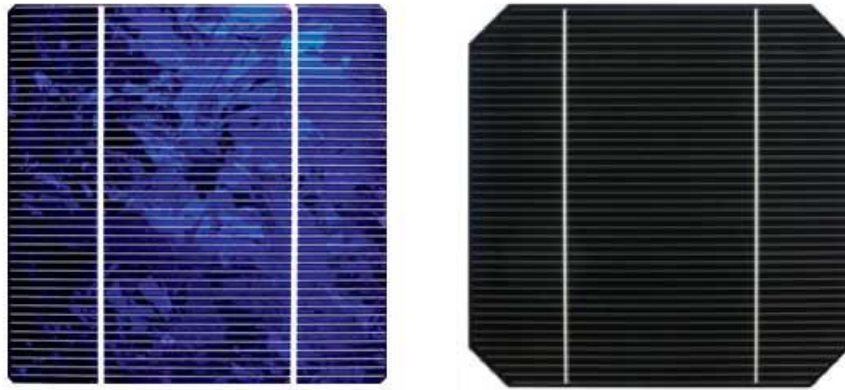
Fotovoltaik hücrelerin üretiminde tercih edilen ana malzeme silisyumdur. Silisyumun ham maddesi ise silikat, yani kumdur. Yarı iletken silisyum maddesi, performansı esnasında kararlı bir yapı sergilemekte, fiziksel, elektriksel ve soğurma özelliklerini uzun bir süre korumaktadır. Bu avantajlarından dolayı silisyum maddesi ile ilgili çalışmalar hız kazanıp çeşitlendirilmiş ve farklı üretim teknolojileri geliştirilmiştir. Değişik metotlarla üretilen silisyum hücreler en çok tercih edilen hücre tipleridir. Monokristal, polikristal ve ribbon silisyum kristal olmak üzere 3 çeşidi bulunmaktadır.

Monokristal silisyum (mono-c-si) malzeme ile üretilen fotovoltaik hücreler en yüksek verime sahiptirler. Silisyum malzemesinin karakteristik özelliklerinin madde içinde her bölgede eşit olması bu malzemeyi fotovoltaik hücreler için en uygun malzeme haline getirmiştir. Monokristal silisyum üretimi oldukça masraflı ve zordur. Renkleri siyah koyu

kahverengi tonlarındadır ve görünüşleri homojendir. Verimlilik oranları %24-30 bandında olmasına rağmen bu oran seri üretilen modüllerde %16'ya kadar inebilmektedir.

Polikristal hücrelerin (multi-c-si) üretimi monokristal hücrelere göre daha kolaydır ve maliyeti düşüktür. Fakat, monokristal hücreler kadar verimli değildir. Bunun nedeni polikristal madde içinde bulunan yolların bölgelere göre fiziksel ve elektriksel değişiklikler göstermesidir. Heterojen bir yapıya sahip olan polikristal hücrenin rengi gri-mavi tonlardadır. Laboratuvar çalışmalarında verimi %18'e kadar çıkabilirken seri üretimlerde %13-14 oranlarına düşmektedir [47]. Şekil 2.11'de polikristal ve monokristal fotovoltaik hücre örnekleri görülmektedir [48].

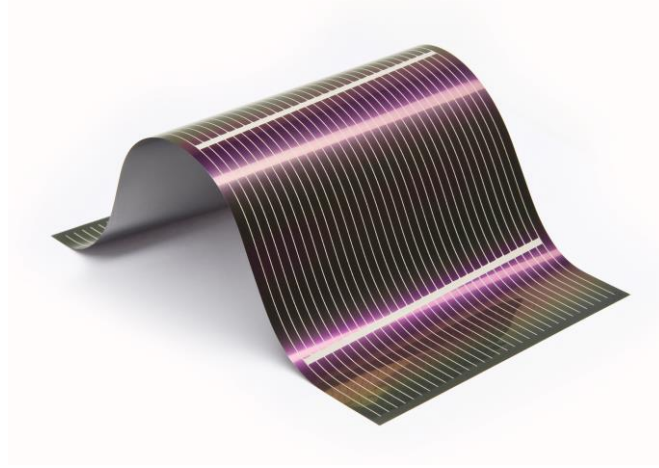
Ribbon silisyum PV hücreler ise monokristal hücre üretimindeki bazı malzeme kayıplarından dolayı üretilmişlerdir. Şekillendirilmiş şerit yöntemiyle üretilen bu hücreler kayıpların azalmasını sağlamaktadır. Verimlilikleri %14.8 civarındadır [49].



Şekil 2.11 Polikristal ve monokristal fotovoltaik hücreler[48]

2.4.2. İnce film fotovoltaik hücreler

Fotovoltaik hücre üretiminde kullanılan malzemeyi ve işçiliği azaltarak, teknolojiyi de hızlandırıp basit hale getirerek maliyetlerin düşürülmesi, yarı iletken malzemelerin geniş yüzeylerde ince film kaplanarak kullanılmasını hızlandırmıştır. İnce film teknolojisi ile hücrelerin aralıkları geniş tutulabilmekte ve hücreler daha ucuza mal edilebilmektedir. Verimliliği %18'e çıkabilen bu hücrelerle ilgili, kullanılan malzeme karakteristiğinin uzun dönemdeki kararsız yapısından dolayı çalışmalar derinleştirilememiştir. Amorf silisyum, kadmiyum tellür ve bakır indiyum-diselenid ince film fotovoltaik hücrelerde kullanılan başlıca malzemelerdir. Şekil 2.12'de ince film fotovoltaik hücre örneği görülmektedir [50].



Şekil 2.12 İnce film fotovoltaiik hücre[50]

Amorf silisyum fotovoltaiik hücrelerindeki (a-si) malzemenin soğurma katsayısı çok yüksektir ve rengi kırmızımsı kahverengidir. İlk olarak 1981 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Laboratuvar çalışmalarında verimi %15'lere kadar çıkmıştır. Ancak gerçek güneşiğına maruz kaldığında bu değeri koruyamamıştır. Verimle ilgili bu problemine karşın amorf silisyum hücreler küçük ölçekli enerji üretimlerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Kadmiyum tellür (CdTe) ince film fotovoltaiik hücreleri kadmiyum elementinden ve tellür elementinden yapılmaktadır. Soğurma özelliğı yüksek olan bu hücrelerin verimi uzun vadede kararsızdır.

Bakır indiyum diselenid (CIS) hücreler bakır, indiyum ve selenyumdan üretilmektedir. Verimliliğı de %18'lere ulaşmasına karşın 20 yıldan sonra %10'a düşmektedir [51].

İnce film hücreler teknolojik gelişmeler için büyük potansiyle sahiptir. CIS ince film tekonolojileri güneş enerjisi endüstrisine her geçen gün daha fazla yatırım yapmaktadır. Son yapılan çalışmalarda, indiyum (In) için galyum (Ga) kullanılarak, bakır indiyum galyum diselenid pv hücre üretilmiş, CIS pv hücrelerde 1.04 elektron volt (eV) olan bant aralıının yaklaşık 1.68 eV'ye yükseltilebileceğı bulunmuştur [52].

2.4.3. Grup III-V bileşik fotovoltatik hücreler

Bu hücrelerde kullanılan soğurma özelliği çok yüksek bileşik yarı iletken periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grubundan elementlerin bir araya gelmesiyle oluşturulmaktadır. Galyum arsenit (GaAs) kullanılarak üretilen fotovoltatik hücreler bu gruptaki hücrelere en iyi örnektir. %24 gibi yüksek bir verimle çalışan hücreler oldukça pahalıdır ve bu yüzden sadece uzay ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır [51].

2.4.4. Çok eklemli (tandem) fotovoltatik hücreler

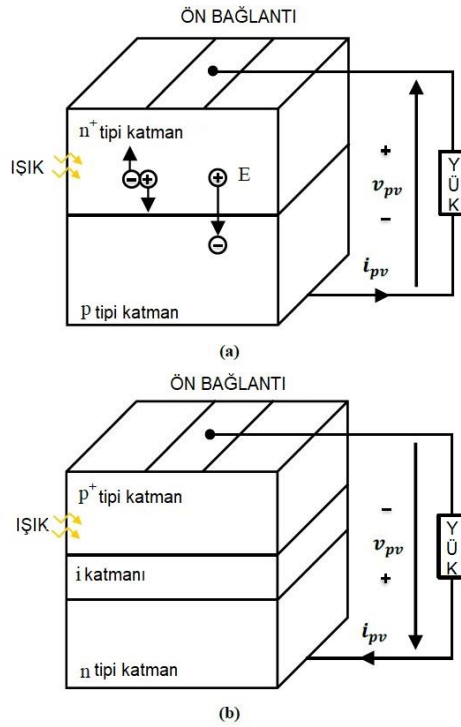
Fotovoltatik hücrelerde kullanılan malzemelerin her biri güneş ışığının farklı spektrumlarını soğurmaktadır. Güneş ışınımından tam anlamıyla yararlanmak için farklı malzemeler üst üste getirilerek çok eklemli (tandem) hücreler üretilmiştir [53]. Bu hücrelerde üst katmandaki malzeme güneş spektrumundan maksimum enerjiyi soğurmaktadır. Bu malzemenin soğuramadığı spektrumdaki ışınımı ise bir alttaki malzeme yakalamaktadır. Bu hücrelerde malzeme olarak galyum arsenid, amorf silisyum, bakır indiyum diselenid ve galyum indiyum fosfat tercih edilmektedir [47].

2.4.5. Organik ve polimer fotovoltatik hücreler

Organik olmayan fotovoltatik hücrelerin üretim teknolojileri sürekli gelişmesine rağmen maliyetleri yüksektir. Bu nedenle alternatif olarak daha düşük maliyete sahip ince film organik ve polimer hücre üretimi için çalışmalar yapılmıştır. Fakat, bu hücrelerin verimlerinin %2.5'u henüz geçememiş olması inorganik hücrelerin yerine tercih edilmelerini imkânsız hale getirmektedir. Üretiminde karbon salınımının az olması, modüllerin hafif ve esnek olması, ucuz mal edilmesi gibi olumlu özelliklerinden dolayı teknoloji ilerledikçe günümüzde yaygın kullanılan hücrelere alternatif olması beklenmektedir [51].

2.4.6. Fotovoltaik panellerin çalışma ilkesi ve yapısı

Bir fotovoltaik hücre temel olarak fotonlar olarak bilinen ışık parçacıklarının enerjisini emen ve doğrudan elektrik gücüne dönüştüren bir p-n yarı iletken bağlantıdır. Dalga boyunun bir faktörü olan fotonun enerjisi, p-n bağlantı bandı boşluğunun enerjisinden daha büyükse, PV hücresi foton enerjisini emer ve bir elektron, valans bandında işgal edilmiş bir düşük enerji seviyesinden iletim bandındaki boş bir yüksek enerji seviyesine kadar uyarılır. Elektronlar, p tipi malzemeden fotovoltaik hücresinin n tipi malzemesine yük boyunca akar. Bir anti-yansıtıcı kaplama tabakası hücre yoluyla iletilen ışık miktarını ve dolayısıyla, ışık emilimi kalitesini artırmak için fotovoltaik hücre yüzeyine eklenir. Taşıyıcı malzemenin ömrünü uzatmak ve dolayısıyla optik olarak üretilen elektron deliği çiftlerini arttırmak için içsel bir katman eklenir. Şekil 2.13'te fotovoltaik hücrelerin temel yapısı gösterilmektedir [54].



Şekil 2.13 Fotovoltaik hücre temel yapısı; (a) temel fotovoltaik hücre, (b) iç katman eklenmiş fotovoltaik hücre[54]

Bir fotovoltaik paneli oluşturmak için üretilen fotovoltaik hücreler 36, 60 veya 72'li gruplar şeklinde birbirine bağlanır. Altına ve üzerine etilen vinil asetat (EVA) gelecek şekilde yerleştirilir. Oluşturulan katmanın ön yüzüne yüksek şeffaflıkta cam ve arka tarafına ise oldukça dayanıklı, polimer esaslı bir tabaka konur. Tüm katmanlar biraraya getirildiğinde bütünlüğü korumaya yarayan bir koza oluşturmak için ısıtılır. Daha sonra, yapısal stabilite

ve uzun süreli koruma için, çevresine su geçirmez bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış sert alüminyum çerçeveler yerleştirilir. Son olarak, güneş panelinin arkasına elektriksel bağlantıyı kolaylaştıran bir konnektör içeren bağlantı kutusu eklenir. Bu aşamadan sonra fotovoltaik panel test edilmeye hazırdır [55]. Şekil 2.14’te bir fotovoltaik panelin katmanları gösterilmiştir [56].



Şekil 2.14 Fotovoltaik panelin fiziksel yapısı[56]

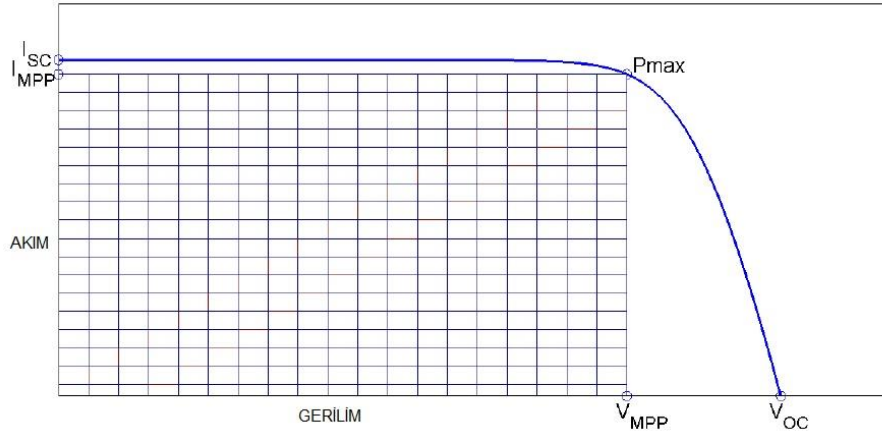
2.4.7. Fotovoltaik panellerin performans karakteristikleri

Fotovoltaik panellerin performans ölçümü, güç üretimi ve maliyet açısından verimlerini belirlemek için çok önemlidir. Fotovoltaik tesislerin sayısı dünya genelinde sürekli olarak artmaktadır. Bu yüzden, doğru güç derecesi ve enerji verimi tahmin ölçümleri için fotovoltaik modüllerin yüksek kalitede karakterizasyonu çok önemlidir. Çünkü modüllerin karakterizasyonu kesin değilse ve kalitesi vaat edilen değerlere erişmiyorsa, öngörülen sistem performansını etkileyecektir. Yanlış derecelendirme, kapsamlı olabilecek yatırım kayıplarına neden olacaktır. Bu nedenle, kesin karakterizasyon esastır. Karşılaştırma nedenlerinden dolayı uluslararası performans göstergelerinin kullanılması gerekir.

2.4.7.1. Akım- gerilim (I-V) karakteristiği

Akım - gerilim (I-V) karakteristiği bir fotovoltaik panelin en önemli deneysel ölçümüdür. Genellikle bu ölçümü gerçekleştirmek için aydınlatılmış bir fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi kullanılarak akım - gerilim karakterize edilir [57].

Tipik bir I-V karakteristiği Şekil 2.15’te gösterilmiştir [58]. Burada maksimum güç, taralı alana eşittir.



Şekil 2.15 Fotovoltaik hücrenin I-V karakteristiği[58]

I-V eğrisi sadece hücre dizileri ve sistem simülasyonu için değil, aynı zamanda fotovoltaik hücrenin iç fiziksel mekanizmalarını anlamak için bir analiz aracı olarak da yararlıdır. Belirli bir ışınım, sıcaklık, spektrum ve görölme açısı altında bir fotovoltaik hücrenin enerji üretimini tahmin etmeye yardımcı olan parametreler şunlardır:

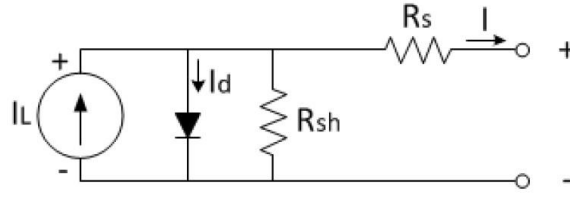
- Sıfır gerilimde maksimum akım olan Kısa Devre Akımı (I_{sc}).
- Sıfır akımda maksimum gerilim olan Açık Devre Voltajı (V_{oc}).
- En yüksek değeri veren I-V eğrisindeki nokta olan Maksimum Güç Noktası. Maksimum güç noktasındaki (V_{MPP}) voltaj ve maksimum güç noktasındaki (I_{MPP}) akım, maksimum güce eşit bir alana sahip bir dikdörtgen oluşturur.
- Cihazın kalitesinin bir ölçüsü olan ve Denklem 2.2 ile bulunan Dolgu Faktörü (Fill Factor) Denklem 2.2’de “FF”olarak kısaltılmıştır.

$$FF = \frac{V_{MPP}I_{MPP}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (2.2)$$

- Dönüşüm Verimliliği, üretilen maksimum gücün, belirli bir sıcaklıkta alınan toplam ışınım E_e 'ye oranıdır. E_e , W / m^2 cinsinden ölçülür ve dolayısıyla güneş hücresinin m^2 cinsinden alanı, Denklem 2.3'te gözlendiği gibi dikkate alınmalıdır.

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{AE_e} = \frac{V_{MPP}I_{MPP}}{P_{gelen}} \quad (2.3)$$

Bir fotovoltaik hücre, bir diyot modeli ile temsil edilebilir. Fotovoltaik hücreyi oluşturan bir diyot modelinin elektrik şeması Şekil 2.16’da görülebilir [58].



Şekil 2.16 Fotovoltaik hücreyi temsil eden bir eşdeğer devre[58]

I-V özellikleri genelleştirilmiş Shockley denklemi (Denklem 2.4) ile ifade edilebilir [57].

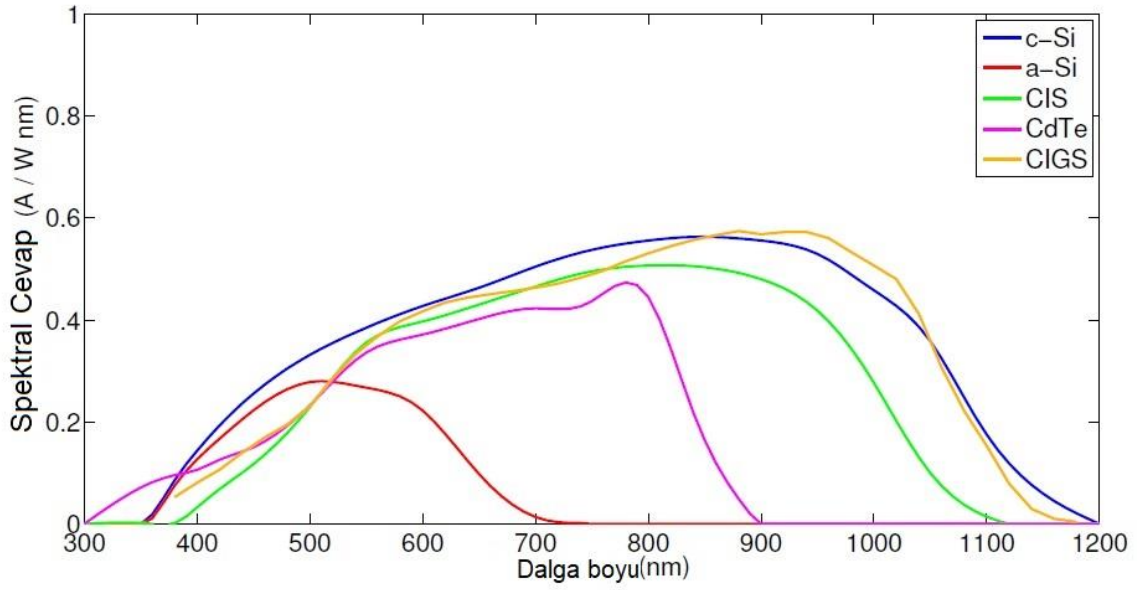
$$I = I_L - I_d = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Bu denklemde I_L fotoakım, I_o doygunluk akımı, n idealite faktörü, q elektronik yük, k Boltzmann sabiti, T birleşme sıcaklığı, R_s seri direnç ve R_{sh} şönt dirençtir.

Farklı çalışma koşulları, fotovoltaik hücrenin farklı performans göstermesine neden olur. Bu nedenle, bir fotovoltaik hücrenin performans verileri göz önüne alındığında, bu parametrelerin altında ölçüldüğü koşullar da bilinmelidir. Bununla birlikte, enerji verimliliğini simüle etmek için farklı koşullar altında bir fotovoltaik hücrenin performansının da belirlenmesi gerekmektedir. Verimlilik, farklı alanlarda farklı performans gösteren bir fotovoltaik hücrenin ortaya çıkmasıyla sonuçlanan ısıtım ve sıcaklığa göre değişir. Bu nedenle, bir fotovoltaik cihazın enerji verimi tahmini, belirli test koşulları altında güce karşılık gelen bir sayıdan daha önemlidir [58].

2.4.7.2. Spektral cevap

Bir fotovoltaik cihazın spektral cevabı (SR), üretilen akımın üzerine gelen güç olayına oranıdır ve Watt başına Amper olarak ifade edilir. Dalga boyuna bağlıdır ve ideal olarak onunla birlikte artar. Gerçekte, fotovoltaik hücrelerin spektral tepkisi sadece ara dalga boylarında yüksektir. Örneğin, kristal silisyum (c-si) fotovoltaik hücreler için bu dalga boyu aralığı 300-1100 nm'dir. Kısa ve uzun dalga boylarında, fotonlar birleşim yerinden uzağa çekildiğinden ve taşıyıcılar verimli bir şekilde toplanamadığından veya fotonlar hiç absorbe edilmediğinden spektrum çok düşük veya sıfırdır [59]. Spektral cevap her fotovoltaik hücrenin üretim malzemesinin benzersiz bir özelliğidir ve bir hücrenin performansı hakkında değerli bilgiler vermektedir. Farklı fotovoltaik hücrelerin spektral cevaplarının grafiği Şekil 2.17'de gösterilmiştir [58].



Şekil 2.17 Farklı malzemelerden üretilmiş fotovoltaiik hücrelerin spektral cevapları[58]

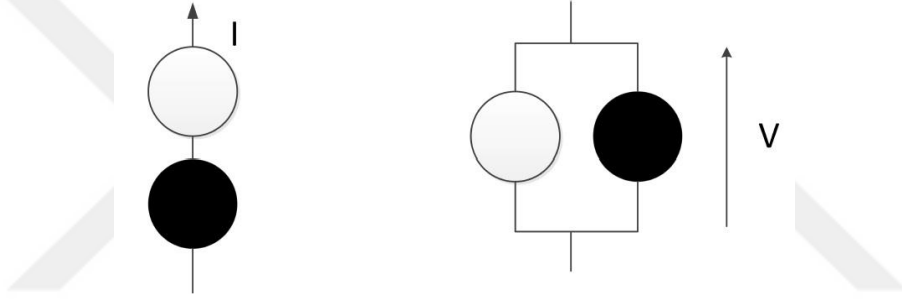
Bir fotovoltaiik hücrenin, çeşitli dalga boylarındaki fotonları elektriğe dönüştürme yeteneğini ifade etmenin bir başka kalite tanımı, bir fotovoltaiik hücrenin kuantum verimidir (Quantum Efficiency (QE)). Kuantum verimi, uyarılan elektron sayısının belirli bir dalga boyunda meydana gelen foton sayısına oranıdır. Kuantum verimi, harici (EQE) veya dâhili kuantum verimi (IQE) olarak ifade edilebilir. İkisi arasındaki fark, dış kuantum verimliliğinin, hücrenin üst yüzeyinden yansıtılan ışığı da dikkate almasıdır [59] . Spektral cevabı ve kuantum verimliliğini bağlayan formül Denklem 2.5’te verilmiştir.

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (2.5)$$

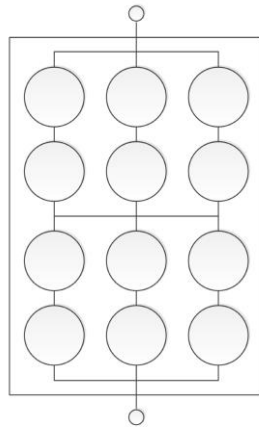
Bu denklemde q elektronik yük, λ dalga boyu, h Planck sabiti ve c ışık hızıdır. Solar simülatörlerin spektral uyumsuzluk faktörü hesaplamasında güneş cihazlarının spektral tepkisi gerekir.

2.4.7.3. Fotovoltaik hücre uyumsuzluğu

Elektrik devrelerinde seri ve paralel olmak üzere iki çeşit bağlantı vardır. Seri bağlantıda akım, devre boyunca aynıdır ve devre gerilimi devrenin elemanları üzerine düşen gerilimlerin toplamıdır. Paralel bağlantıda ise akım, devre elemanlarının akımının toplamıdır ve gerilim devre boyunca aynıdır. Bir fotovoltaik hücre güç bakımından düşük watt değerlerine sahip çok küçük bir ünedir. Verimli ve ekonomik olarak tanımlanabilecek yeterli akım ve gerilimi üretmez. Bu nedenle, birçok hücre bir dizi olarak adlandırılan, gerilimi artırmak için seri olarak birbirine bağlanır. Bu seri gruplar da akımı artırmak için paralel bağlanır. Birbirine bağlanacak tüm hücreler ideal olarak aynı olmalı, aynı akım ve gerilimi üretmelidir. Fotovoltaik hücrelerdeki seri ve paralel bağlantılar Şekil 2.18’de ve bunların birleşimleri Şekil 2.19’da sırasıyla gösterilmektedir[58].

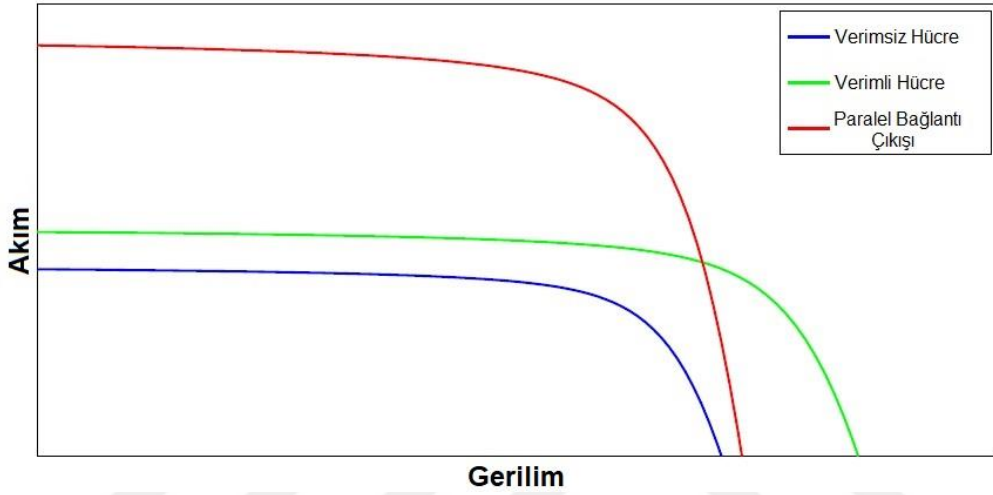


Şekil 2.18 Fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel bağlanması[58]

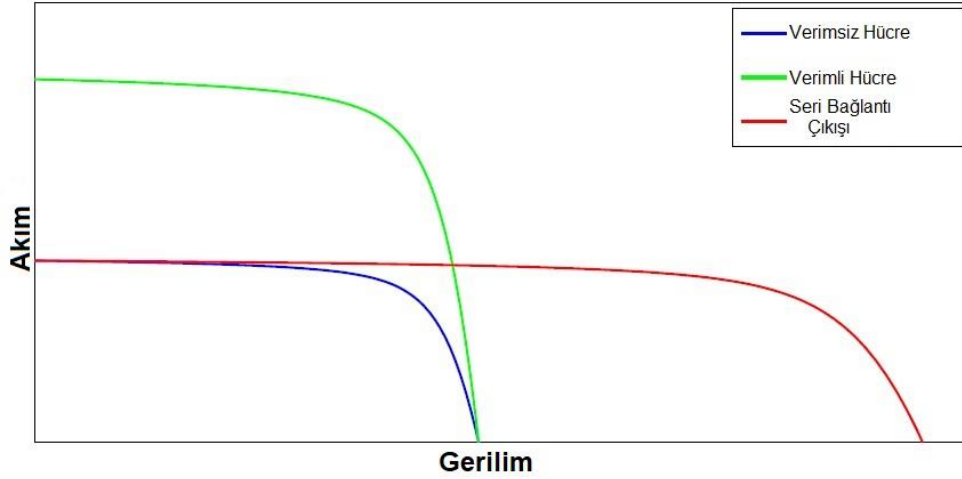


Şekil 2.19 Fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel blok birleşimleri[58]

Ancak, bu her zaman gerçekte böyle değildir. Fotovoltaik hücreler genellikle üretim kusurları, bozulma veya gölgelenme gibi çeşitli nedenlerden dolayı farklı özellikler gösterir. İki uyumsuz hücre paralel olarak bağlanırsa, gerilim en düşük değere sahip hücrenin gerilimine eşit olacaktır. İki uyumsuz hücre seri olarak bağlanırsa, akım hücrenin akımına en düşük değere eşittir. Paralel bağlanmış uyuşmayan hücrelerin akıma etkisi ve seri bağlanmış uyuşmayan hücrelerin gerilime etkisi sırasıyla Şekil 2.20 ve 2.21’de sırasıyla gösterilmektedir[58].



Şekil 2.20 İki uyumsuz paralel hücrenin I-V karakteristiği[58]



Şekil 2.21 İki uyumsuz seri hücrenin I-V karakteristiği[58]

Benzer bir davranış, daha düşük güç çıkışlarına neden olan modüllerde de gözlenebilir [59]. Bir solar simülatör kullanarak I-V karakteristiklerini ölçerken, tüm hücrelerin aynı ışıınımı alması ve ölçüm hatasından dolayı uyumsuzluk olmaması için oldukça düzgün bir ışık dağılımı sağlanmalıdır.

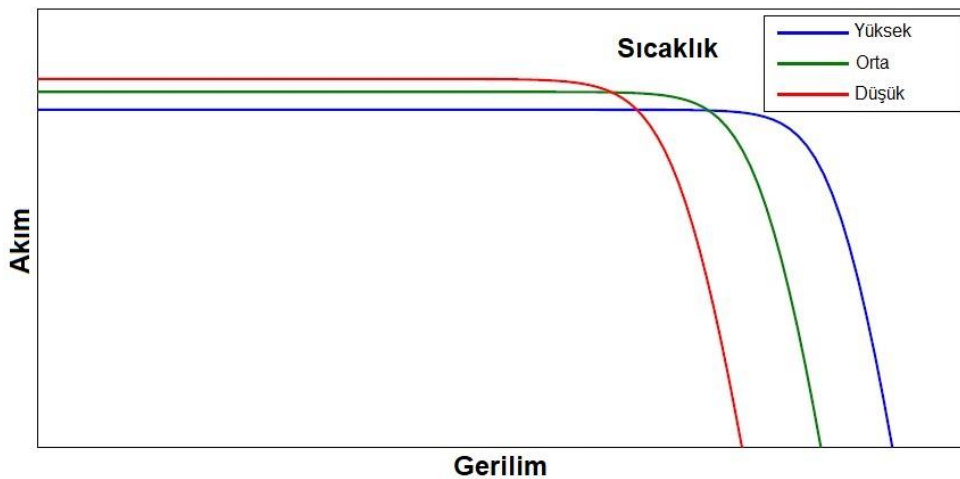
2.4.8. Fotovoltaik cihazların performansını etkileyen faktörler

Fotovoltaik cihazların performansı, seri direnç, şönt direnci ve doygunluk akımı gibi iç parametrelerden ve dış parametreleri olan ışıınım ve sıcaklıktan etkilenebilir. İç parametreler malzeme ve özellikleri ile ilgilidir, dış parametreler ise ışıınım, sıcaklık, spektrum ve ışığın geliş açısı gibi iklim koşullarına bağlıdır.

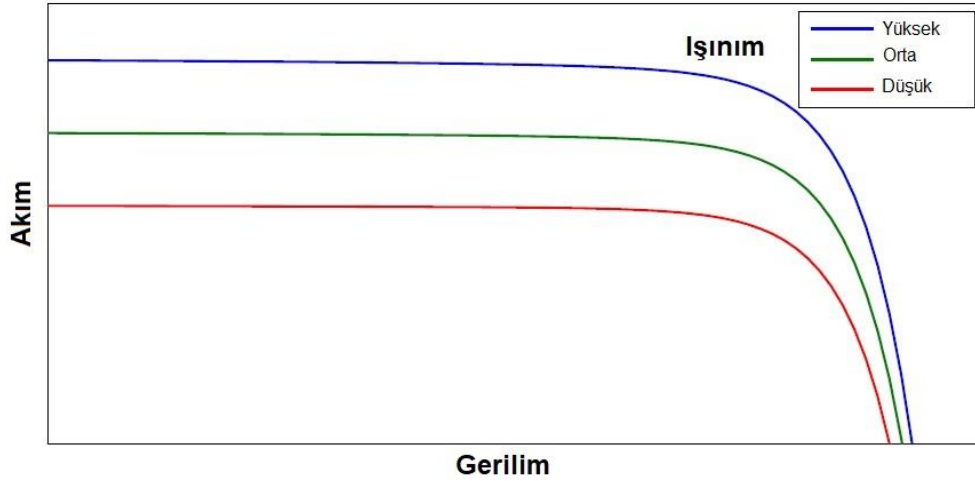
2.4.8.1. I-V karakteristiğinin ışıınım ve sıcaklık ile değişmesi

Sıcaklıktaki meydana gelecek bir artış, malzemenin bant boşluğu enerjisini azaltır ve bu da fotoakımı arttırır. Aynı zamanda açık devre gerilimin azalmasına neden olan karanlık akım artar. V_{OC} düşüş oranı, I_{SC} artış oranından daha hızlıdır. Sonuç olarak, hücreden üretilen güç, verimi ile birlikte azalır.

Öte yandan ışıınımdaki bir artış, hem I_{SC} hem de V_{OC} 'nin artmasına neden olur. Bu nedenle, hücreden üretilen güç, sıcaklığın sabit kalması koşuluyla daha verimli hale gelir. Sıcaklık bir soğutma sistemi tarafından kontrol edilmedikçe, istenmeyen etkilere neden olur. Bu nedenle, verim kazanmak ve kaybetmemek için ışıınım ve sıcaklık artışı arasındaki dengeyi korumak önemlidir. Sıcaklığın ve ışıınının I-V eğrisi üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te gösterilmiştir [58].



Şekil 2.22 Sabit ışıınım altında sıcaklığın I-V karakteristiğine etkisi[58]



Şekil 2.23 Sabit sıcaklıkta ışınımın I-V karakteristiğine etkisi[58]

2.4.8.2. Spektral ve geliş açısı etkileri

Güneş spektrumu ve ışığın geliş açısı fotovoltaiik hücrelerin performansını önemli ölçüde etkiler. Dünya yüzeyine ulaşan ve fotovoltaiik cihazlar tarafından alınan spektral ışınım asla sabit değildir ve güneşin gökyüzündeki konumu, iklim koşulları ve kollektörün yönelimi ile değişir. Bu nedenle fotovoltaiik cihazın güç çıkışını arttırmada birkaç saniyede bir düzenli olarak değişebilir. Güneşin gökyüzündeki konumu, yılın saatine, günün saatine, yerin enlem ve boylamına bağlıdır. Güneş ışığının atmosferin içinden geçtiği ve dünya yüzeyine ulaşmak için geçeceği yol, ışınım miktarındaki zayıflamayı belirler. Bölüm başında belirtilen Hava Kütlesi (Air Mass (AM)), bu yolu belirlemek için kullanılan en iyi tanımdır.

Spektrum sadece hava kütlesi ile değişmez. Ayrıca, çevresel koşullara da bağlıdır. Açıklık faktörü, gökyüzünün belirli bir zamanda ne kadar net olduğunu belirlemek için kullanılır ve gökyüzündeki bulut örtüsünü, nem ve kirlilikten dolayı havadaki parçacıkları dikkate alır. Gökyüzü ne kadar net olursa, fotovoltaiik paneller tarafından daha fazla enerji üretilebilir. Açık gökyüzü koşullarında kırmızı dalga boyu zengindir ve daha yüksek yoğunluklar gösterirken bulutlu koşullarda mavi dalga boyu zengindir, doğrudan güneş ışığı altında daha düşük yoğunluklara ve daha fazla farklılığa sahiptir.

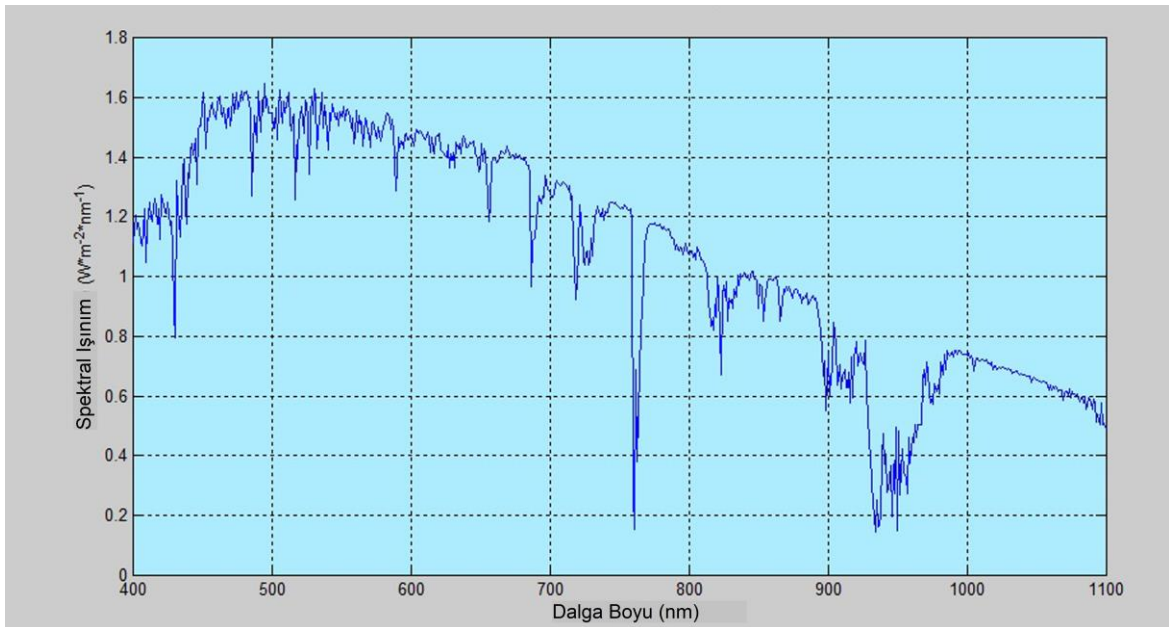
Fotovoltaiik panel tarafından alınan spektrumu etkileyen bir diğer faktör, panelin konumlandırılmasına bağlı olan ışığın geliş açısıdır. Paneller, spesifik bir yerde veya güneşi sürekli izleyen bir izleyiciye monte edilebilir. Paneller sabit ise, kuzey yarımkürede güneye bakan ve yerin enlemine bağlı bir eğim açısına sahip olan optimum konum seçilmelidir. Bu optimum pozisyon garanti olmasına rağmen güneşi tam olarak göremeyen bir cihaz için,

cihaz tarafından görülen spektrum ve ışıınım, güneşin pozisyonundaki kayma nedeniyle sürekli olarak değişir. Bir izleyici kullanılıyorsa, panel her zaman doğrudan güneşe baktığından enerji toplama optimum olur. Bununla birlikte, spektrum hala çevresel şartlarla değişecektir [58].

Bütün bu farklı iklim koşulları bir solar simülatör tarafından simüle edilebilir. Çeşitli AM için değişken spektrumları, netlik faktörleri ve ışığın geliş açıları simülatörün ışık kaynağını ya da ışık kaynağının özelliklerini ve gücünü değiştirerek oluşturulabilir. Ayrıca, fotovoltaik cihazların pozisyonu ışık kaynağının pozisyonuna göre değiştirilerek ışığın geliş açısı etkileri incelenebilir.

2.5. Fotovoltaik Cihaz Testleri Standartları

Fotovoltaik cihazların karasal uygulamaları için test standartları, ERDA ve NASA tarafından desteklenen iki atölye faaliyeti sırasındaki bir dizi çalışma neticesinde ortaya konulmuştur. 1975 ve 1977 yılında yapılan çalışmalardan sonra yayınlanan nihai raporda solar simülatörlerin ayrıntılı açıklamaları da dâhil olmak üzere karasal fotovoltaik ölçüm prosedürlerinin standartları oluşturulmuştur [21, 60]. Bu raporda, standart yoğunluk 1000 W/m^2 seçilirken, AM 1,5 spektral bileşen olarak seçilmiştir ve her ikisi de günümüzde ticari solar simülatörlerde kullanılmaktadır [14]. AM 1.5 G spektral bileşen Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.24 AM 1.5G spektrumu

Solar simülatörler ağırlıklı olarak doğal güneş ışığını, uzay ışıması ve karasal ışıma olarak iki kategoride simule ederler [61]. Karasal fotovoltaik testler için solar simülasyon standardı olan ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standardı [62], solar simülatörlerin performansını spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık olarak üç kriterde değerlendirmek için kabul edilmiştir [63, 64]. Dünya üzerine düşen güneş ışınlarının miktarı ve tipi enlem, boylam, günün saati ve yılın zamanı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir [61]. Uygulamada fotovoltaik cihaz testleri için hava kütlesi AM 0 (güneşin uzaydaki ışıması) AM 1 D (Direct), AM 1 G (Global) AM 1,5 D, AM 1,5 G, AM 2D ve AM 2G olarak standardize edilmiştir [65, 66]. Solar simülatör uygulamalarında referans alınan uluslararası standartlar aşağıda belirtilmiştir:

- IEC 60904-9 Solar Simülatör Performans Gereksinimleri (Solar Simulator Performance Requirements) [62]
- ASTM G173-03 Referans Güneş Spektral Işınmaları için Standart Tablolar: Doğrudan Normal ve 37 ° Eğimli Yüzeyde Yarımküresel. (Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface) [40].
- ASTM E927-10 Fotovoltaik Testlerde Güneş Simülasyonu için Standart Şartname (Standard specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing) [14].
- ASTM E948-16 Simüle Edilmiş Güneş Işığı Altında Referans Hücreleri Kullanarak Fotovoltaik Hücrelerin Elektriksel Performansı için Standart Test Yöntemi (Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using Reference Cells Under Simulated Sunlight) [67].
- ASTM E973-16 Bir Fotovoltaik Cihaz ile Bir Fotovoltaik Referans Hücresi arasındaki Spektral Uyuşmazlık Parametresinin Belirlenmesi için Standart Test Yöntemi (Standard Test Method for Determination of the Spectral Mismatch Parameter between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell) [43].
- JISC 8912 Kristal Güneş Pilleri ve Modülleri için Solar Simülatörler (Solar simulators for crystalline solar cells and modules) [68].

Yapılan akademik ve ticari çalışmalarda solar simülatörler ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 solar spektrum standartlarına göre tasarlanmıştır. Bu standartlara ulaşmak için genellikle çeşitli ışık kaynakları seçilmiş, kullanım amacı ve solar simülatörün tipine göre farklı ışık kaynakları kullanılmıştır.

2.6. Fotovoltaik Cihazlar İçin Solar Simülatörlerin Sınıflandırılması

ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarına göre solar simülatörlerin simülasyon performansları A sınıfı, B sınıfı ve C sınıfı olmak üzere üç sınıfta tanımlanmıştır [69]. Kriterleri en yüksek olan sınıf A iken en düşük olan ise C sınıfıdır. Bu sınıflandırmalarda spektral eşleşme (spectral match), uzamsal uyumsuzluk (spatial non-uniformity) ve zamansal istikrarsızlık (temporal instability) olmak üzere üç ana kriter belirtilmiştir [15]. Bu üç performans kriterinde de A sınıfında olan solar simülatörler AAA sınıfı olarak nitelendirilmektedirler. Bu kriterler Tablo 2.1’de gösterilmiştir[18].

Tablo 2.1 Solar simülatör performans sınıflandırması[18]

PERFORMANS KRİTERLERİ	STANDARTLAR	
	ASTM	IEC
<i>Spektral Eşleşme</i>		
A Sınıfı	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25
B Sınıfı	0.6 - 1.4	0.6 - 1.4
C Sınıfı	0.4 - 2.0	0.4 - 2.0
<i>Uzamsal Uyumsuzluk</i>		
A Sınıfı	≤ 3%	≤ 2%
B Sınıfı	≤ 5%	≤ 5%
C Sınıfı	≤ 10%	≤ 10%
<i>Zamansal İstikrarsızlık</i>		
A Sınıfı	≤ 2%	≤ 2%
B Sınıfı	≤ 5%	≤ 5%
C Sınıfı	≤ 10%	≤ 10%

Kriterlerden biri olan spektral eşlemeyi belirlemek için 400 nm - 1100 nm spektrum bölgesi altı dalga boyu bandına bölünmüştür. Bu bantların her biri, toplam entegre ışımanın belirli bir yüzdesini içerir. Spektral Eşleşme, ilgili dalga boyu aralığı boyunca düşen ışığın gerçek yüzdesinin gerekli ışıma yüzdesine oranı olarak hesaplanır (Denklem 2.6).

$$SM = \frac{\text{Aralıktaki gerçek ışıma yüzdesi}}{\text{Aralıktaki gerekli ışıma yüzdesi}} \quad (2.6)$$

$$\text{Aralıktaki gerçek ışıma yüzdesi} = \frac{\int_{\lambda_n}^{\lambda_{n+1}} S(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1100} S(\lambda) d\lambda} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'deki $S(\lambda)$ ışık kaynağının spektral ışımasıdır. Spektral ışıma, ışığın dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dağılımıdır. λ_n ilgili dalga boyu aralığının başlangıç noktasını, λ_{n+1} ise bitiş noktasını ifade eder. Spektral eşleşmenin solar simülatörde kullanılan ışık kaynağı ile doğrudan ilgili olduğu açıktır. Kaynağın spektral ışıması, AM1.5G referans spektral ışımasıyla eşleşiyorsa, spektrum mükemmel şekilde eşleştirilecektir. Beklenen spektral ışımayı simüle etme yeteneği, bir solar simülatörün tasarımına büyük ölçüde yardımcı olacaktır.

Tablo 2.2'de dalga boyu aralıkları için farklı AM faktörleri için solar simülatörlerde gereken ışıma yüzdeleri verilmiştir [70].

Tablo 2.2 Toplam ışıma yüzdeleri[70]

TOPLAM IŞIMA YÜZDELERİ			
DALGA BOYU (nm)	AM1.5D	AM1.5G	AM0
300 - 400	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	8.0%
400 - 500	16.9%	18.4%	16.4%
500 - 600	19.7%	19.9%	16.3%
600 - 700	18.5%	18.4%	13.9%
700 - 800	15.2%	14.9%	11.2%
800 - 900	12.9%	12.5%	9.0%
900 - 1100	16.8%	15.9%	13.1%
1100 -1400	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	12.2%

Uzamsal uyumsuzluk (SNU=Spatial Non Uniformity), belirli noktalarda, özellikle geniş yüzey alanlarına sahip simülatörlerde, hücre performans testlerini ve tekrarlama ihtiyacını etkileyen ışığın yoğunlaşması nedeniyle sağlanması en zor performans kriteridir. SNU, Denklem 2.8 ile hesaplanır. Bu denklemde E_{max} , ışığın en yoğun olduğu noktanın değerini, E_{min} ise ışığın en düşük olduğu noktanın değerini ifade eder.

$$SNU = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times \% 100 \quad (2.8)$$

Üçüncü ve son performans kriteri ise zamansal istikrarsızlıktır. Bu test ölçüme direkt etki etmeyecektir ancak ışığın zamanla değişimini belirlemek için kullanılır. IEC 60904-9 standartına göre bu test kısa ve uzun vadeli olmak üzere iki aşamada yapılmalıdır. Bu performans kriterini belirlemek için yine Denklem 2.8 kullanılır ancak bu testte ışık tek bir noktadan belirli zaman aralıklarında ölçülür. En yoğun ve en düşük ışık noktaya göre değil zaman göre belirlenir.

2.7. Solar Simülatörlerde Kullanılan Işık Kaynakları

Güneş ışığını ve şiddetini simüle etmek amacıyla uygun bir ışık kaynağı seçimi, güneş simülatörü tasarımında en önemli kısımdır ve ışık kaynakları spektral nitelikleri, aydınlatma düzeni, kolimasyonu, ışık akısı kararlılığı ve ışık menzili gibi özellikleri dikkate alınarak seçilmektedir [71]. Solar simülatör uygulamalarında güneş ışığını IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarına uygun simüle etmek için farklı ışık kaynakları kullanılmaktadır. Solar simülatörlerin ışık kaynaklarını sınıflandırdığımızda Şekil 2.25'deki gibi oldukları görülmektedir.



Şekil 2.25 Solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynakları

En yaygın olarak kısa ark veya uzun ark xenon lambalar ışık kaynağı olarak kullanılırken, metal halide ark lambaları, karbon ark lambaları ve kuvars tungsten halojen lambalar da bazı simülatör tasarımlarında ışık kaynağı olarak seçilmiştir [21]. Günümüzde geleneksel ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında düşük maliyet, daha kompakt olma, daha az güç tüketimi gibi avantajları nedeniyle, yapılan araştırma ve çalışmalarda ışık kaynağı olarak LED (Light Emitting Diode) kullanılmaya başlamıştır [72]. Şekil 2.26’da ışık kaynaklarının hangi yıllarda kullanılmaya başladığı gösterilmiştir.



Şekil 2.26 Solar simülatör ışık kaynaklarının kullanılmaya başlandığı yıllar

2.7.1. Karbon ark, yüksek basınçlı sodyum buharlı ve argon ark lambası

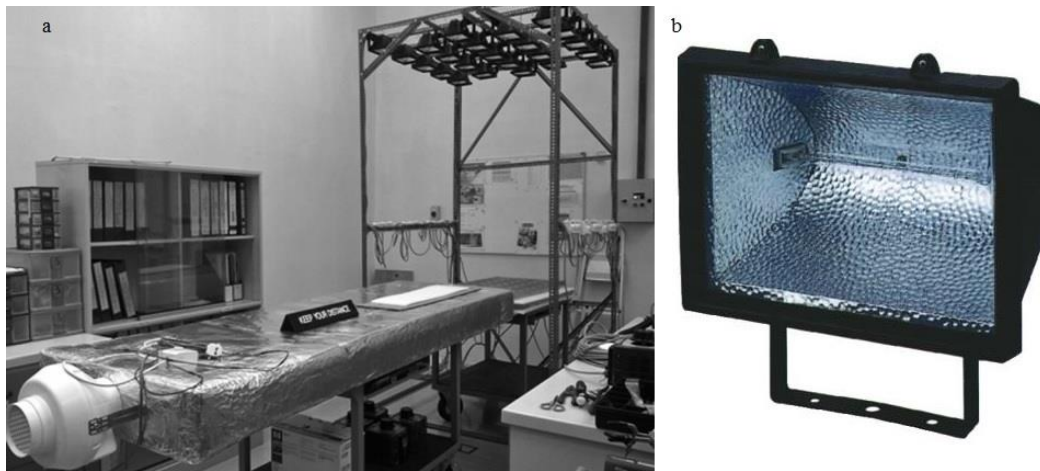
Karbon ark lambası spektral yapısının AM0 ile uyuşmasından dolayı karasal fotovoltaik panel testlerinden çok uzay güneş simülatörlerinde ve multi-junction solar hücre optimizasyonunda ışık kaynağı olarak kullanılmıştır [73]. Bununla birlikte doğal güneş ışığı spektrumu ile çok az eşleşmektedir ve dalga boyu açısından 320 nm ve 339 nm arası haricinde Xenon lambalardan daha zayıftır [68, 74]. Diğer dezavantajlarına bakıldığında ise kısa işlem süresi, işlem sırasında kararsızlık ve karbon arkı yayan çok fazla mavi radyasyon gösterilebilir [20]. Uzay güneş simülatörlerinde daha çok kullanıldığından NASA’nın yaptığı ilk uzay simülatörü çalışmalarında ışık kaynağı olarak Karbon ark lambalara rastlanılmaktadır[75–78].

1965 yılında Loudon ve Schmidt tarafından geliştirilen [79] yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar yüksek verimlilik, uzun ömür ve geniş spektral aralığı nedeniyle (250-2500 nm) solar simülatör tasarımlarında ve uygulamalarında ışık kaynağı olarak kullanılmıştır [61, 67, 80].

Yapılan ilk solar simülatör çalışmalarında karbon ark lambaların yanısıra argon ark lambaları da kullanılmıştır [81]. 6500 K renk sıcaklığında bir emisyon spektrumu oluşturan argon ark lambalar 275- 1525 nm spektral aralığına sahiptir. Zürih’te 2003 yılında Hirsch vd. gerçekleştirdikleri 75 kW High-Flux Solar Simülatör çalışmasında ışık kaynağı olarak yüksek basınçlı (7atm) kapalı bir argon ark lambası kullanmışlardır [82]. Genelde ark lambaları görülebilir dalga boyunda, kızılötesi ve ultraviyole dalga boyu bölgelerinde ek güç sağlayan, fakat gelişmiş optik filtreler ile AM 0 ve AM 1.5 standartlarında gerçek güneş ışınımına en yakın çıkışları verebilen kaynaklardır [83].

2.7.2. Kuvars tungsten halojen lamba

Halojen lambalar solar simülatör uygulamalarında yüksek ışık şiddeti, ucuzluğu, kullanışlılığı ve doğal güneş ışığına yakın spektral aralığı nedeniyle tercih edilmektedir [84, 85]. Kongtragool vd. [86] güneş enerjisini kullanan dört pistonlu diferansiyel Stirling motoru çalışmasında, solar simülatörde halogen lamba kullanmışlardır. Landrock vd. [87] yüksek maliyetli solar simülatörlere alternatif olarak tasarladıkları solar simülatörün ışık kaynağını 6 adet 50 W halojen lamba ile sağlamışlardır. Aksoy vd. [88] Stirling motorun termal performansı ile ilgili çalışmalarını, ışık kaynağı halojen lamba olan solar simülatör ile gerçekleştirmişlerdir. Literatür incelendiğinde Jackson vd. [89], Kamprachum [90] ve King vd. [91] çalışmalarında yine halojen lambaların ışık kaynağı olarak kullanıldığı dikkat çekmektedir. Şekil 2.27’de Hussain vd. [92] 2011’de yaptıkları halojen lamba ışık kaynaklı solar simülatör (a) ve bir halojen lamba örneği [48] (b) görülmektedir.



Şekil 2.27 (a) Halojen lamba ışık kaynaklı solar simülatör, (b) Halojen lamba örneği[48]

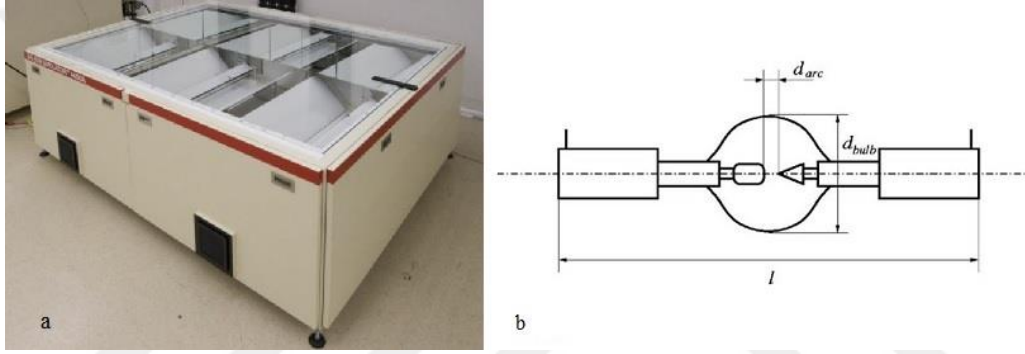
2.7.3. Civa buharlı xenon lamba

Mercury-Xenon (Hg-Xe) lambalar, civa buharlı lambaların UV spektrumunu ile xenon lambaların IR spektrumunu biraraya getiren ışık kaynaklarıdır [56]. Bu kombinasyondan dolayı mercury xenon lambalarda hem xenon arc hem de yüksek basınçlı civa lambası özellikleri elde edilir. Mercury Xenon lambalar, keskin ve daha yoğun UV spektrumunu 400 nm'den daha kısa dalga boylarında verebilen iyi bir ultraviyole ışık kaynaklarıdır [93]. Mercury Xenon lambalar ilk solar simülatör tasarımlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Günümüzde bazı spesifik çalışmalarda [94] ışık kaynağı olarak kullanılsa da yaygın olarak daha sonraki solar simülatör tasarımlarında yerini xenon ark lambalara bırakmıştır [21].

2.7.4. Xenon ark ve flaş lambası

Xenon ark lambası yüksek ışık yoğunluğu ve spektrumunun güneş ışıyla neredeyse eşleşebilmesi gibi avantajları nedeniyle konvansiyonel solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak sıkça kullanılmaktadır [66, 95–98]. Xenon ark lambalarının yüksek güç tüketimi, kapsamlı bakıma ihtiyaç duyması ve kısa ömürlü olması gibi özellikleri de dezavantajlarıdır [99, 100]. Solar simülatörde Xenon ark lambasının ilk kullanımının 1961 yılında Tenney Engineering Inc. Firması tarafından yapıldığı bilinmektedir [65]. Genellikle kendi dengeli spektral özelliklerinden dolayı ultraviyolede görülebilir banda kadar çok iyi bir süreklilik sağlarlar. Fakat, 800 ile 1000 nm arasında cam filtreler ile filtrelenebilecek çok güçlü salınımları vardır. Xenon lambaların diğer bir avantajı da güçte oluşan farklılıkların spektral dengede ciddi bir kaymaya sebep olmamasıdır. Bu da güç kaynağı stabilitesi ihtiyacını azaltır [20, 21, 101]. Ayrıca, yüksek basınçlı kısa Xenon ark lamabaları diğer ışık kaynaklarına göre daha parlak, noktasal kaynaklardır [102]. Ito vd. 2004 yılında yaptıkları hassas boyalı güneş pilleri için solar simülatör kalibrasyonu çalışmasında Xenon ark lambayı uygun bir filtre ile birlikte kullanmışlardır [103]. Petrasch vd. [83] yaptıkları 50 kW, Li vd. [104, 105] 42 kWe solar simülatör çalışmalarında Xenon ark lambasını elipsoidal reflektörler ile kullanmışlardır. Yapılan bazı deneysel çalışmalarda ışık kaynağı Xenon ark lamba olan ticari Spectrolab X-25 solar simülatörün yaygın olarak kullanıldığı da göze çarpmaktadır [106–111]. Pravettoni vd. [110, 112] yaptıkları, yoğunlaştırıcı fotovoltaiik hücrelerin kapalı ve açık alandaki testlerinde ve geniş alan darbeleri solar simülatör ile yüksek yoğunluklu darbeleri solar simülatör karakterizasyonu çalışmalarında, ışık kaynağı xenon ark lamba olan Global Photovoltaic Specialists Inc. firmasının solar simülatörlerini (GPS ve GPS-U) kullanmışlardır. Sarwar vd. [101] çalışmalarında ticari olarak mevcut bulunan sinema projektörlerindeki 'Xenoluxe ampul'ü kullanarak, 7 kW'lık yüksek ışık akılı solar

simülatör gerçekleştirmiştir. Yüksek ısılı solar termal gereksinimi için termokimyasal ve yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemlerde akı eşleşme metodunu kullanmışlardır. Paraskeva vd. [113] multi-junction InGaP/InGaAs/Ge fotovoltaik hücrelerin yüksek ışıma altında parlaklık emisyonu çalışmalarında, Languy vd. [114] solar concentratorlarda yüksek yoğunluk elde edebilmek için imal ettikleri akromatik fresnel çifti çalışmalarında, Hu vd. [115] Reflection type single long-pulse solar simülatörün kapasite etkisini analiz ettikleri çalışmalarında, Guo vd. [116] 54 kW solar simülatör için basitleştirilmiş kaynak modelinde, Xenon ark lambasını ışık kaynağı olarak kullanmışlardır. Şekil 2.28’de xenon ark lamba kullanılan ticari bir solar simülatör (a) ve bir xenon ark lambasının şematik gösterimi (b) görülmektedir [17, 83].



Şekil 2.28 (a) Xenon ark solar simülatör, (b) Xenon ark lambasının şematik gösterimi [17,83]

Solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak zaman zaman Xenon ark lambaları yerine Xenon flaş lambaları da tercih edilmiştir [117]. Alıcının ışıma seviyesi standart olarak 800-1000 W/m² seviyelerinde ayarlanabilir. Ticari xenon flaş lambası ve generatörü farklı gerilimlerde tetiklemeye izin verir. Daha yüksek tetikleme gerilimi daha yüksek tepe güç değeri demektir. Çoklu flaşlı sistemlerde ısınım gecikmesi güç seviyesi ayarlamakta kullanılır [118]. Xenon flaş lambası alıcıyı aydınlatmak için tetiklendiğinde ve her farklı gerilim değerinde flaş darbesi ürettiğinde farklı bir çift I-V karakteristiğinin kaydedilmesini sağlar [119]. Dominguez vd. yüksek yoğunluklu fotovoltaik modüllerinin kapalı geniş alandaki karakterizasyonu için tasarladığı solar simülatörde [119] ve yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemler için tasarladığı solar simülatör [118] çalışmalarında, Keogh vd. [120] solar hücrelerin I-V eğrisi karakteristiğini elde etmek için yaptığı flaş testlerde, Grzesiak vd. [121] “Innovative system for energy collection and management integrated within a photovoltaic module” çalışmalarında, Osterwald vd. [98] multijunction PV hücrelerin

verimlilik ölçümlerinin hata düzeltme prosedürü ve hata nedenleri [122] ile ilgili çalışmasında xenon flaş lambalarını kullanmışlardır. Şekil 2.29’da [123] 10 kW’lık xenon lamba örneği sunulmuştur.



Şekil 2.29 10 kW Xenon lamba örneği[123]

2.7.5. Metal halide ark lambası

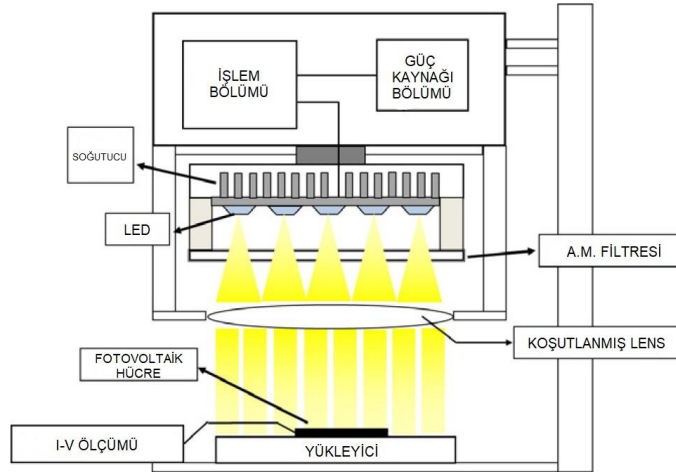
Endüstriyel aydınlatmada oldukça sık kullanılan metal halide lambalar solar simülatorlerde de xenon lambaların yüksek güç tüketimi, elektronik sürücülerinin maliyeti ve kısa ömürlü olması nedeniyle özellikle de fiyat avantajı açısından ışık kaynağı olarak seçilmektedir [72, 124, 125]. Cood vd. [125] yaptığı düşük maliyetli ve yüksek ışık akısı solar simülator tasarımı çalışmasında yedi adet 1500 W’lık metal halide lamba kullanmıştır ve 800-1000 nm arasında karasal güneş ışığının %5’ine tekabül eden bir ışınım elde etmiştir. Gevorgyan vd. [126] organik fotovoltaiik panellerin doğru karakterizasyonu için yaptığı çalışmada ışık kaynağı olarak metal halide lamba seçilen Atlas 1200 Solar simülatorü kullanmıştır. Zacharopoulos vd. [127] 5258mm x 2617mm x 2810mm (yükseklik x genişlik x derinlik) ölçülerindeki solar simülator tasarımı çalışmasında 35 adet (7 x 5) Osram HMP 575 W metal halide lambayı ışık kaynağı olarak seçmiştir. Meng vd. [61] dinamik ışınımlı solar simülatorün dinamik ağ tabanlı analizi çalışmasında 188 adet metal halide lambanın kullanıldığı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Pernpeintner vd. [128], in Kim vd. [129], Bigaila vd. [130], Guarino vd. [131], Chen vd. [132], Schiavon vd. [133], Paul vd. [134], Sabahi vd. [135] ve Yang vd. [136] yayımladıkları çalışmalarda ışık kaynağı olarak metal halide lamba kullanmışlardır. Şekil 2.30’da 35 metal halide lambadan oluşan alüminyum kutu içine yerleştirilmiş solar simülator (a) ve Osram firmasına ait HMP 575 W metal halide lamba (b) görülmektedir. [127].



Şekil 2.30 (a) Metal halide ışık kaynaklı solar simülatör örneği, (b) Metal halide lamba [127]

2.7.6. LED ışık kaynağı

Günümüzde geleneksel ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında düşük maliyet, daha kompakt olma, daha az güç tüketimi gibi avantajları nedeniyle, solar simülatör konusunda yapılan araştırma ve çalışmalarda ışık kaynağı olarak LED (Light Emitting Diode) kullanılmaya başlamıştır [100, 137]. Şekil 2.31’de [100] bir LED solar simülatör örneği görülmektedir.



Şekil 2.31 LED solar simülatör örneği çizimi[100]

LED'lerin solar simülatörde ışık kaynağı olarak kullanılmasına ilk kez 2003 yılında Kohraku vd. çalışmasında rastlanmaktadır. Kohraku vd. [138] LED solar simülatör simülasyonu ile fotovoltaiik hücrelerde yeni ölçüm metodları üzerine çalışmalar yapmışlar, farklı ve çoklu LED'ler kullanarak spektral tepkilerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Kohraku vd. [139] yaptıkları diğer bir çalışmada 4 renkli LED kullanarak tasarladığı solar simülatöründe fotovoltaiik hücrelerin ölçümlelerini yapmış, AM 1,5 spektrumu altında güneş hücrelelerinin I-V karakteristikleindeki ölçümlelerin dikkat çekici olduğunu ve LED simülatörlelerin geliştirilip gelecekte kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Bliss vd. [140] fotovoltaiik panellerin karakteristik ölçümlelerinde ışık kaynağı olarak LED kullanmanın avantajlarını araştırmış, LED'lerin AM 1,5 standartlarına uygun spektral değlelerinin mikro saniyeler seviyesinde hızlı kontrol edilebildiğini, düşük maliyeti, uzun ömrü ve kalibrasyon kolaylığıyla gelecekte solar simülatörlelerde kullanılacak ışık kaynakları arasında güçlü bir aday olduğunu belirtmişlerdir. Tsuno vd. [141] solar simülatörde LED'lerin yetenekleleri üzerinden yeni bir yaklaşımda bulunmuşlar ve LED'lerin konvansiyonel ışık kaynaklarına göre, daha verimli, daha parlak bir ışık kaynağı olduğunu, uzun ömür ve her geöen gün düşen maliyeti açısından kullanılabilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Bliss vd. [142] değışken spektrumlu ve flaş hızı ile LED tabanlı fotovoltaiik ölçüm sistemi üzerine çalışmışlar ve LED simülatörlelerin sabit durumda da çoklu flaş testlelerinde esnek kontroller yapabildiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmadaki LED solar simülatör Şekil 2.32'de [142] gösterilmiştir.



Şekil 2.32 LED solar simülatör örneğı[142]

Jang vd. [100] LED solar simülatörlerin fotovoltaik hücre karakterizasyonu için geçerli olduklarını ortaya koymuşlar ve LED solar simülatörün termal optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Krebs vd. [143] geometrik şekillerinin ayarlanabildiği lambalarla kendini kalibre eden bir LED tabanlı solar simülatör uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Kolberg vd. [117] genişletilmiş ultraviyole ve kızılötesi spektral değerlerin LED solar simülatörde AM 1,5 standartlarıyla eşleştirme çalışması yapmışlardır. Meng vd. [61] büyük ölçekli LED solar simülatörde ışıınım karakteristiği ve optimizasyonu üzerine çalışmışlar ve altıgen tasarımı ışık kaynağı yerleşiminde daha sağlıklı sonuçlar elde etmişlerdir. Kolberg vd. [144] önceki çalışmalarını geliştirerek solar simülatörde LED etkisini artırmışlar, gerçek gün ışığı değerlerine yakın ölçümler yapmışlardır. Güneşin AM 1,5 G spektrum değerleri ile uyuşan ölçümleri ortaya koymuşlardır. Bu çalışma ile LED tabanlı solar simülatörlerin spektral değerlerinin ayarlanıp güneş spektrum değerlerinin %100'e yakın olarak elde etmişlerdir. Plyta vd. [145] LED solar simülatörün potansiyelini inceleyerek LED ışık kaynağının ilk olarak güçlü bir şekilde optik ışık toplama verimliliğine sahip olduğu ve kolimasyonu en üst seviyeye çıkardığını, ikinci olarak ise LED'lerin dalga boylarının A sınıfı bir simülatör için uygun ve ışığın homojen dağılımın gayet iyi seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Linden vd. [146] spektrumu ayarlanabilir, imalatı kolaylaştıran ve modüler tasarıma dayalı bir LED solar simülatör geliştirmişlerdir. Bu simülatörde isteğe bağlı olarak tek hücreli veya çok hücreli fotovoltaik cihaz kullanmışlardır. Geliştirdikleri simülatörün, aydınlatma bütünlüğü ve spektral özellikleri ile A+ performansına sahip olduğunu göstermişlerdir. Novičkovas vd. [72] AAA sınıfı, 5 cm'lik bir test alanı için, ışık kaynağı sadece 19 adet yüksek güçlü kompakt LED'den oluşan bir solar simülatör tasarlamışlardır. Luka vd. [147] dış kuantum verimliliği (EQE) yöntemini LED solar simülatörde uygulamış ve standart ölçümlere göre yeterli bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir. Yarım saniye ölçme süresi, bütünsel tarama ve ek olarak EQE ölçüm cihazına gerek kalmadan doğrudan ölçüm yapılabilmesi bakımından avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Watjanatepin, 2017 yılında yaptığı çalışmada altı farklı dalga boyunda, yüksek güç LED'lerine sahip bir solar simülatör tasarlamıştır ve uygun sayıda LED kullanımıyla orta büyüklükteki bir fotovoltaik cihaz üzerinde uygun bir test yapılabileceğini belirtmiştir[148].

2.7.7. Süper continuum lazer

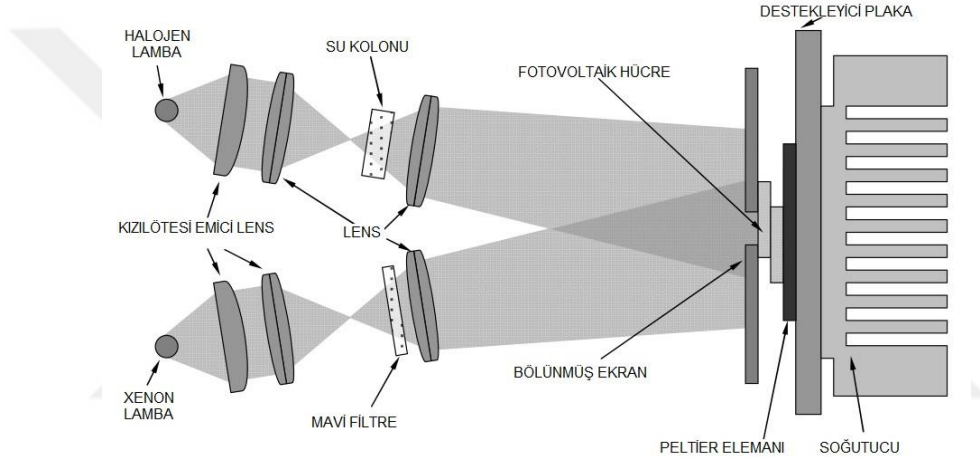
Günümüzde solar simülatörlerin ışık kaynakları tipik olarak xenon ark lambalar ve LED'lerdir. Bununla beraber lambalar ve LED'lerin büyük ve sabit ışıma tayfına sahip oldukları için verimli spektral bölgeye odaklanması zorlukları, bu ışık kaynaklarının verimli şekilde ölçme sistemlerine spektral olarak uyarlanması güçleştirmektedir [149].

Örneğin, LED'ler süper continuum lazerlere göre daha geniş açılı bir alana ışıma gerçekleştirebilirler. Fakat, güneş spektrumunun UV ve IR dalga boylarında yetersiz kalmaktadırlar [150]. Bu yüzden, son zamanlarda yüksek güçlü süper continuum lazerlerin görünür spekturumdan infrarede kadar olan bölgede ışık kaynağı olarak kullanılması ticari ürün olarak görülebilmektedir [151]. Yüksek güçlü süper continuum lazerler göreceli olarak, fotovoltaik ölçümlerde yaygın olarak kullanılmak üzere gelişmeye müsait potansiyele sahiptirler [149]. Son yıllarda süper continuum lazerin ışık kaynağı olarak kullanıldığı küçük bölgeler için yapılan solar simülatör çalışmalarında [149–154] sonuçların umut verici olduğu ve bu teknolojinin daha da geliştirilebileceği öngörülmektedir.

2.7.8. Çoklu ışık kaynaklı solar simülatör

Fotovoltaik panel testleri için yüksek kaliteli solar simülatörlere olan talebin artması hücre verimliliği ölçümlerinin yüksek doğruluk altında yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır [69]. Tek ışık kaynağı ile yapılan solar simülatör uygulamalarında bazı dezavantajlar meydana gelebilmektedir. Örneğin, ark lambaları güçlü ve geniş bir spektrumla çalışmalarına rağmen çok eklemli güneş hücrelerindeki ışık kutuplaşmasını ve hava kütlesi değişimlerinin modellenmesinde spektral olarak sorunlara sahiptirler [154]. Lazerlere göre daha geniş bir spektruma sahip olan LED'lerin güneş spektrumunu daha iyi sağlayabilmeleri için kendi içinde dalga boyuna göre gruplandırılmış diziler şeklinde yapılandırılmalıdırlar [150]. Lambalar ve LED'ler geniş sabit açılara sahip oldukları için spektral olarak optikler kullanılarak yoğunlaştırılmaları zordur [154]. Bu tür dezavantajlardan dolayı tek solar simülatörde farklı ışık kaynaklarının kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır [97][155]. Hoffman Elektronik tarafından 1960'ların başında Xenon Ark lambası ile UV spektrumunu AM 0 için karşılayan tungsten lambası ile de IR spektrumunu karşılayan çift ışık kaynaklı bir solar simülatör dizayn edilmiştir [156]. Namin vd. [157] 2012 yılında yaptıkları çalışmada Tungsten halojen lamba ile LED'i birleştirmişlerdir. İki adet 3x3 halojen lambayı fotovoltaik hücre üzerine sağdan ve soldan 26 derece eğimle, mavi LED dizisini ise 65 cm yukarıdan dik bir şekilde fotovoltaik hücre üzerine konumlandırmışlardır. Kim vd. [15]

yaptıkları düşük maliyetli solar simülatör tasarımında görünür dalga boyları için LED, UV ve IR dalga boyları için ise halojen lamba kullanmıştır. Guvench vd. [158] geniş alanlı fotovoltaik hücre I-V karakteristiği ölçümündeki solar simülatör tasarımında kuvars halojen lamba ve metal halide lamba kombinasyonundan yararlanmıştır. Georgescu vd. [69] dye - sensitized fotovoltaik hücre testi için tasarladıkları küçük alanlı A sınıfı solar simülatörde güçlü düşük dalga boyunu elde etmek için xenon discharge lamba, IR dalga boyunu elde etmek için de tungsten halojen lamba kullanmışlardır. Bu kombinasyon ile yaptıkları çalışmada için iyi bir spektral eşleşme elde ettiklerini belirtmişlerdir. Şekil 2.33'de bu çalışmanın örneği görülmektedir [69].



Şekil 2.33 Çoklu ışık kaynaklı solar simülatör örneği[69]

Günümüze kadar solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynaklarının hepsinin belirli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Tüm literatüre bakıldığında konvansiyonel ışık kaynakları arasında Xenon ve Halojen lambaların kullanımın öne çıktığı, günümüze yaklaştıkça LED ışık kaynağının tercihe dildiği görülmektedir. Tüm ışık kaynaklarını tercih süreci için karşılaştırmalı olarak Tablo 2.3 avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemektedir.

Tablo 2.3 Solar simülatör ışık kaynaklarının karşılaştırılması

İŞİK KAYNAĞI	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
KARBON ARK LAMBASI	-AM 0 ile uyumluluk -Erken dönem uzay solar simülatörleri için uygunluk	-Sınırlı dalga boyu -Kararsızlık -Kısa ömür
YÜKSEK BASINÇLI SODYUM BUHARLI LAMBA	-Yüksek verim -Uzun ömür -Geniş spektrum	-Yüksek maliyet -Güç regülasyonu için yardımcı elektroniklerin maliyeti
ARGON ARK LAMBASI	-Geniş spektrum	-Optik filtreye ihtiyaç duyması
KUVARS TUNGSTEN HALOJEN LAMBA	-Yüksek ışık yoğunluğu -Düşük maliyet -Spektral aralığının gerçek günışığı değerlerine yakınlığı	-Isınma sorunu
CİVA BUHARLI XENON LAMBA	-Geniş spektrum -Keskin ve yoğun UV spektrumu	-Yüksek güç tüketimi -Bakım gerekliliği -Kısa ömür
XENON ARK LAMBASI	-Yüksek çıkış gücü -Kararlılık -Spektral aralığının gerçek günışığı değerlerine yakınlığı	-Yüksek güç tüketimi -Bakım gerekliliği -Kısa ömür
XENON FLAŞ LAMBASI	-Kısa sürede konsantre olma -Isınmama -Kararlılık	-Optik filtreye ihtiyaç duyması -Yüksek maliyet
METAL HALIDE LAMBA	-Düşük maliyet -Yüksek ışık yoğunluğu	-Yüksek güç tüketimi -Kısa ömür -Yardımcı elektronik elemanların maliyeti
LED	-Düşük maliyet -Düşük güç tüketimi	-Sınırlı spektral aralık (350-1100 nm)
SÜPER CONTINUUM LAZER	-Yüksek güç -Geniş bant aralığı	-Sınırlı spektrum

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde tez çalışmasının fiziksel yapısında bulunan ana bileşenler, performans kriterlerinin sınıfını belirlemek için kullanılan ölçü aletleri ve yazılım programı hakkında bilgi verilmiştir.

Bu tez çalışması Marmara Üniversitesi tarafından FEN-E-120514-0149 No'lu proje kapsamında desteklenmiş ve Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yenilenebilir Enerji laboratuvarında çalışma imkanı bulunmuş, laboratuvar ekipmanlarından faydalanılmıştır.

3.1.1. Işık yayan diyotlar

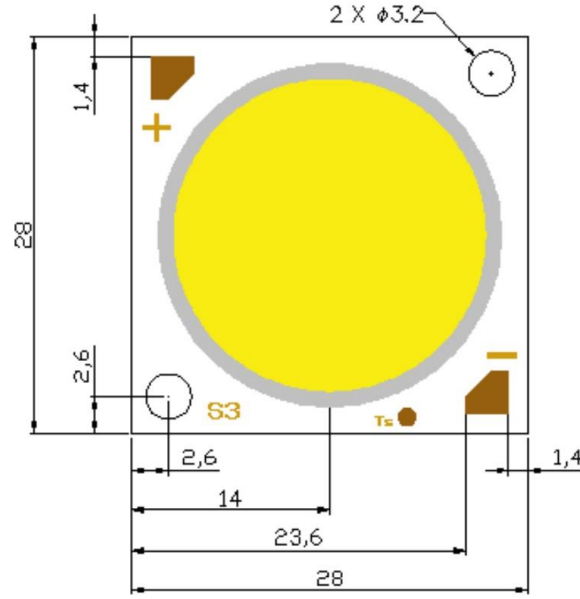
ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarında ışık yayan diyot (LED) solar simulatörler için simüle edilecek güneş ışığı spektrumu aralığı 400 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığı olarak belirlenmiştir. Konu ile ilgili gerekli literatür taraması yapıp, akademik ve ticari çalışmalar incelendiğinde güneş ışığını simüle etmek için en verimli olacak LED'ler optimum 6 farklı dalga boyu oluşturacak şekilde seçilmiştir. Bu dalga boylarını oluşturan LED renkleri, soğuk beyaz, sıcak beyaz, mavi, kırmızı, 850 nm kızılötesi ve 940 nm kızılötesi olarak belirlenmiştir. Seçim yapılırken kararlı çalışma, malzeme kalitesi, LED firmalarının teknik broşürlerinde belirtilen tepe dalga boyu değerine gerçek anlamda sahip olma, kısa devre ve ters polarizasyona karşı dayanma süresi gibi özellikler dikkate alınmıştır. Süreç sonunda power LED'lerde Osram markasının Oslon serisi, COB LED'lerde ise Seoul markasının ZC serisi tercih edilmiştir.

3.1.1.1. Soğuk beyaz LED

Güneş ışığı spektrumun 400 nm ile 800 nm arasındaki değerini simüle etmek için kullanılan soğuk beyaz LED literatürde renk sıcaklığı olan Kelvin ile tanımlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan soğuk beyaz LED Seoul markasının ZC 25 serisi 5000 Kelvin'dir.

3.1.1.2. Sıcak beyaz LED

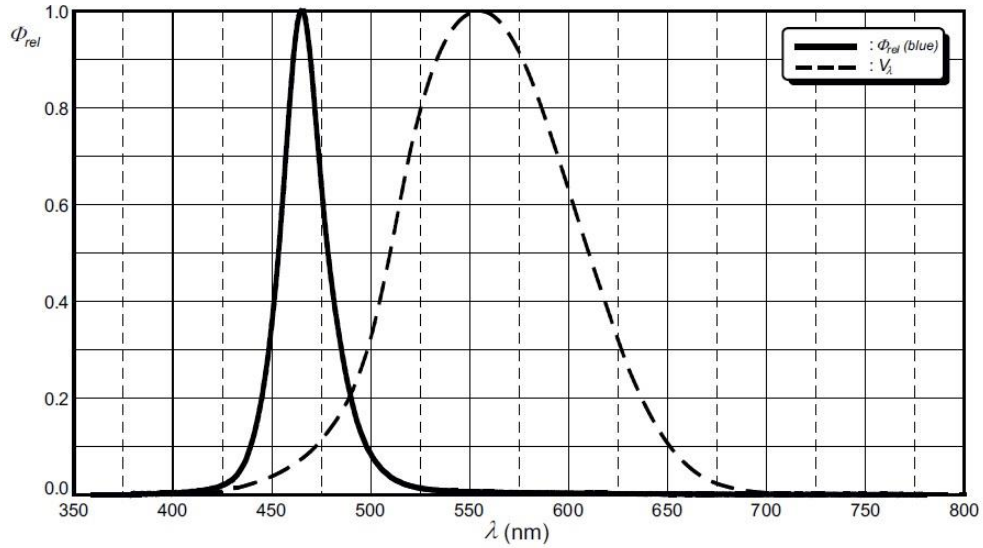
Güneş ışığı spektrumun 400 nm ile 800 nm arasındaki değerini soğuk beyaz LED ile birlikte simüle etmek için kullanılan sıcak beyaz Seoul markasının ZC 25 serisi 3000 Kelvin'dir. Şekil 3.1'de ise soğuk ve sıcak beyaz COB ledlerin ölçüleri verilmiştir.



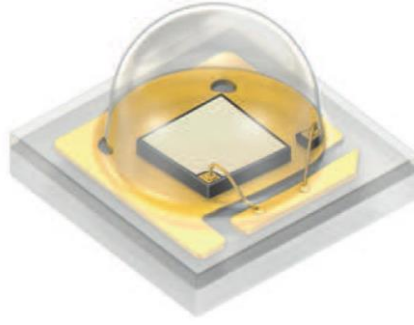
Şekil 3.1 Soğuk ve sıcak beyaz COB LED ölçüleri

3.1.1.3. Mavi LED

Güneş ışığı spektrumun 400 nm ile 500 nm arasındaki değerini soğuk beyaz LED ile birlikte simule etmesi için baskın dalga boyu değeri 470 nm olan Osram Oslon LB CP7P mavi LED kullanılmıştır. Şekil 3.2’de, kullanılan mavi LED’in dalga boyu eğrisi görülmektedir. Diğer Şekil 3.3’te ise LED’in fiziksel yapısı görülmektedir.



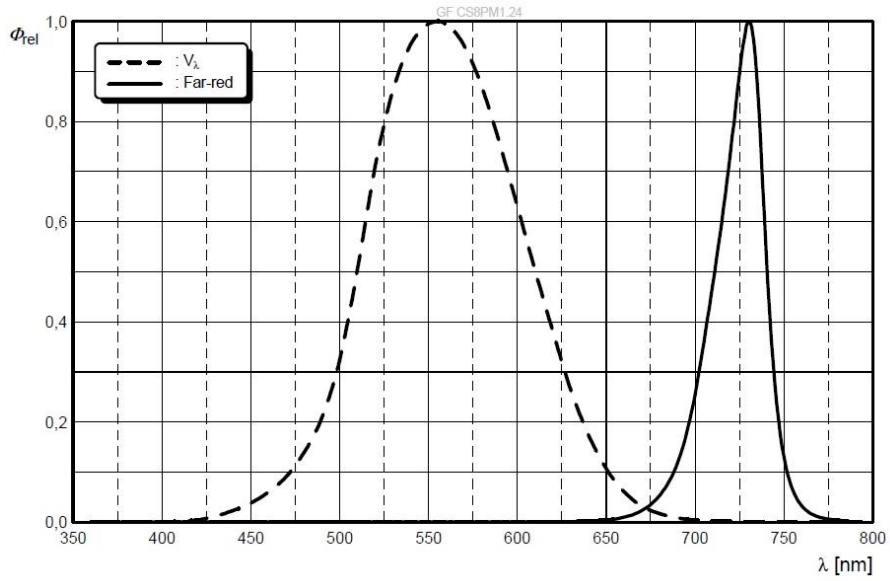
Şekil 3.2 Mavi LED dalga boyu teknik broşür bilgisi



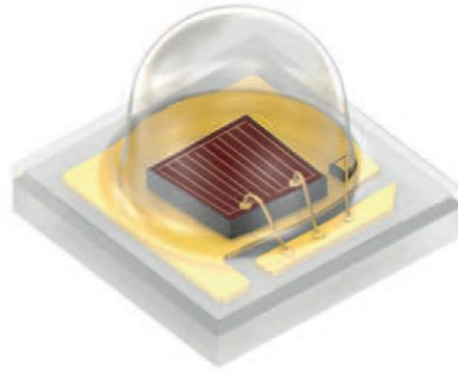
Şekil 3.3 Mavi LED fiziksel görünüm

3.1.1.4. Kırmızı LED

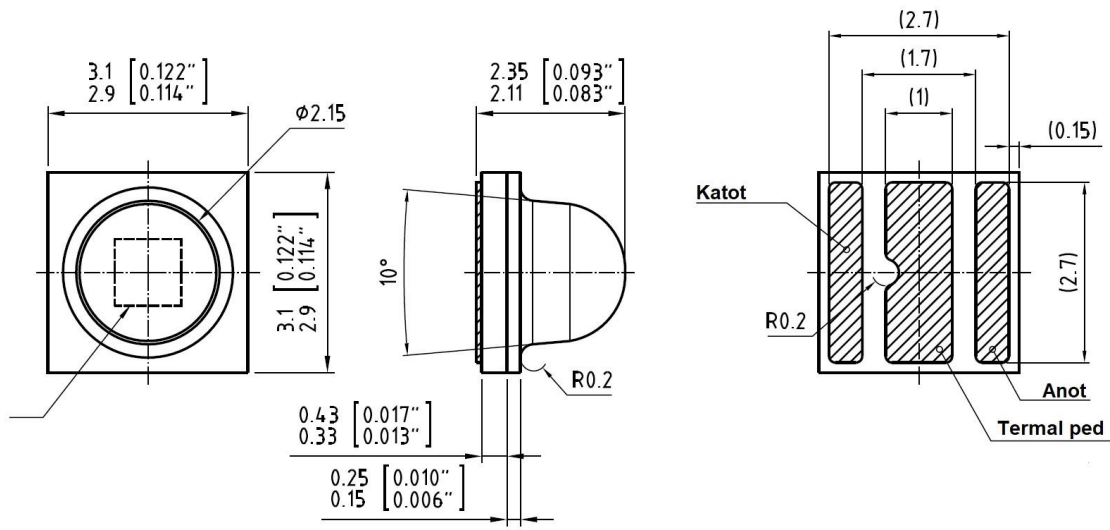
Güneş ışığı spektrumunun 650 nm ile 800 nm arasındaki dalga boyunu simule etmek için baskın dalga boyu değeri 730 nm olan Osram Oslon GF CS8PM1.24 kırmızı LED kullanılmıştır. Kırmızı LED'in dalga boyu eğrisi Şekil 3.4'te görülmektedir. Şekil 3.5'te ise kırmızı LED'in fiziksel yapısı görülmektedir. Kırmızı ve mavi her iki LED'in de PCB karta lehimlenmek üzere 3 bacağı bulunmaktadır. Bu bacaklar anot, katot ve soğutma bacağı olarak kullanılan orta kısımdaki termal peddir. Şekil 3.6'da kırmızı ve mavi ledlerin bacakları ve boyutları verilmiştir.



Şekil 3.4 Kırmızı LED dalga boyu teknik broşür bilgisi



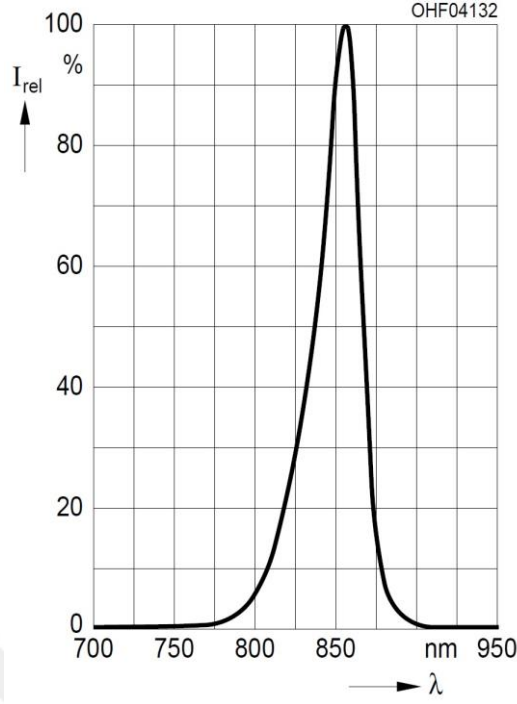
Şekil 3.5 Kırmızı LED fiziksel görünüm



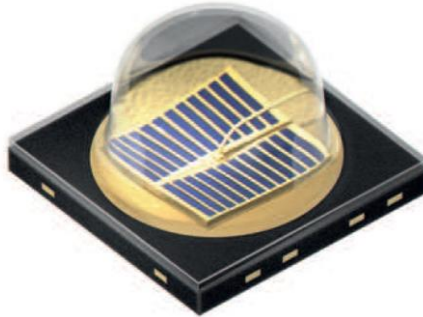
Şekil 3.6 Mavi ve Kırmızı LED ölçüleri ve lehim bacakları

3.1.1.5. 850 nm kızılötesi LED

Güneş ışığı spektrumunun 750 nm ile 950 nm arasındaki dalga boyunu simule etmek için baskın dalga boyu değeri 850 nm olan Osram Oslon SFH 4715S infrared LED kullanılmıştır. Kızılötesi LED'in dalga boyu eğrisi Şekil 3.7'de görülmektedir. Şekil 3.8'de ise kızılötesi LED'in fiziksel yapısı görülmektedir.



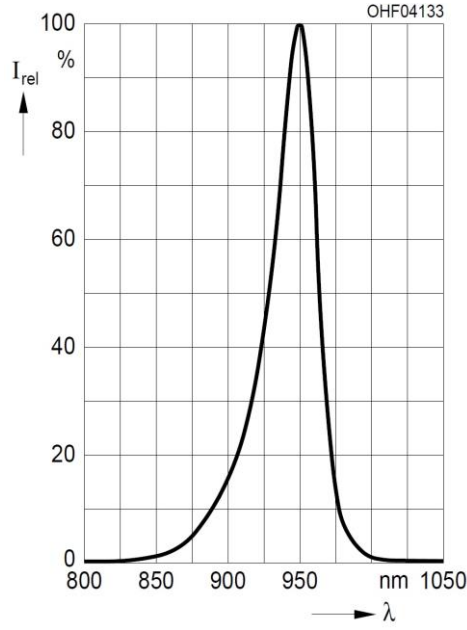
Şekil 3.7 850 nm kızılötesi LED dalga boyu teknik broşür bilgisi



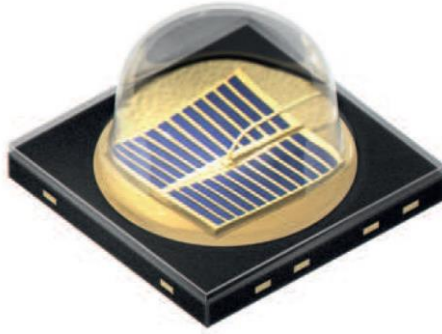
Şekil 3.8 850 nm kızılötesi LED fiziksel görünüm

3.1.1.6. 940 nm kızılötesi LED

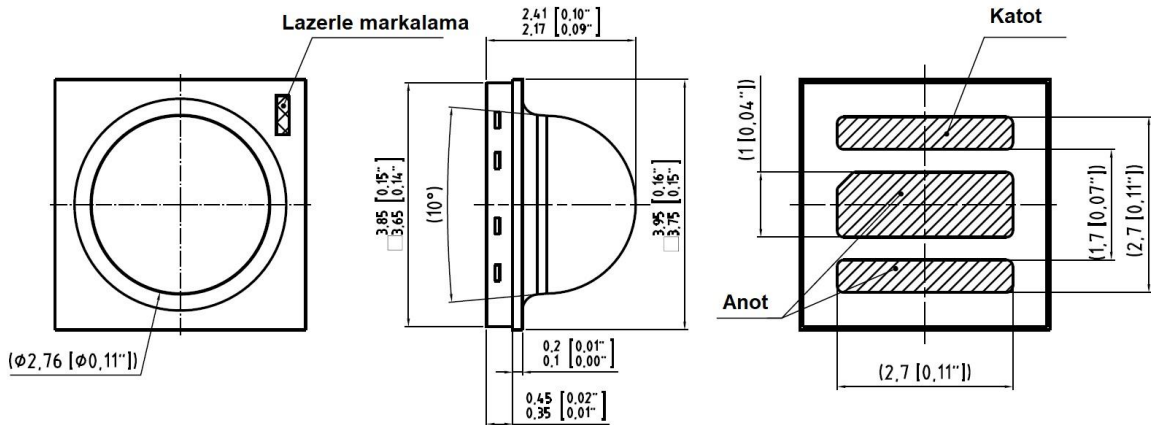
Güneş ışığı spektrumunun 800 nm ile 1100 nm arasındaki dalga boyunu simule etmek için baskın dalga boyu değeri 940 nm olan Osram Oslon SFH 4725S kızılötesi LED kullanılmıştır. 940 nm kızılötesi LED'in dalga boyu eğrisi Şekil 3.9'da görülmektedir. Şekil 3.10'da ise kızılötesi LED'in fiziksel yapısı verilmiştir. Kızılötesi LED'lerin her ikisinde de mavi ve kırmızı LED'lerden farklı olarak soğutma bacağı bulunmamaktadır. Bu LED'lerde orta bacak anottur. Diğer kalan iki bacak ise yine anot ve katottur. Kızılötesi LED'lerin boyutları ve bacakları Şekil 3.11'de belirtilmiştir.



Şekil 3.9 940 nm kızılötesi LED dalga boyu teknik broşür bilgisi



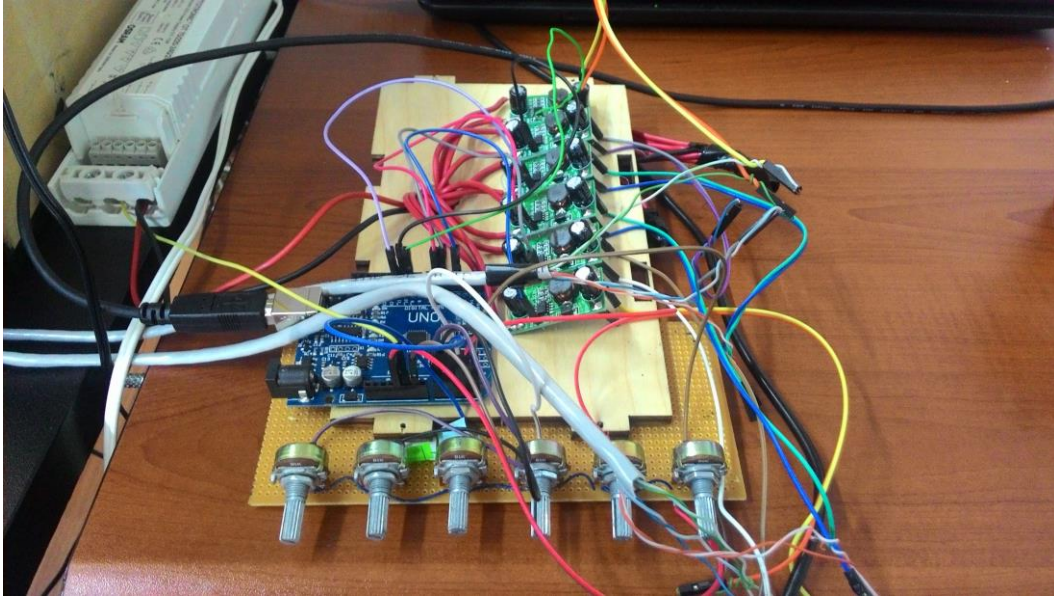
Şekil 3.10 940 nm kızılötesi LED fiziksel görünüm



Şekil 3.11 850 nm ve 940 nm kızılötesi LED ölçüleri ve polariteleri

3.1.2. LED sürücüleri

ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarına göre her dalga boyunun farklı oranlarda karşılanması gerektiği için aynı dalga boyuna sahip her LED'in hepsinin aynı anda ışık şiddetlerinin çok hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontroller sırasında LED'in ışımasında titreme ve geç cevap verme gibi durumlar ortaya çıkmamalıdır. Bu konudaki literatür ve piyasa araştırmaları yapıldıktan sonra çeşitli markaların çeşitli sürücüleri incelenmiş ve test edilmiştir. Örneğin, yapılan ilk testlerde kullanılan ve Şekil 3.12'de görülen sürücüler dalga boyu değişimlerinde LED ışımasında titreşime neden olduğundan yapılan sonraki çalışmalarda tercih edilmemiştir.



Şekil 3.12 İlk çalışmalarda test edilen sürücüler ve devre kartı

Yapılan tüm testlerden sonra gerilim ve akım değerlerinin esnekliği, sisteme uygunluğu, kararlı çalışma, koruma ve uzun ömür gibi özellikleri göz önüne alınarak Mean Well marka LED sürücüleri kullanılmıştır. Power LED'ler için LDD 1000L serisi, COB LED'ler için ise LDH 45B serisi tercih edilmiştir.

3.1.2.1. Power LED sürücüsü

Mavi, kırmızı ve kızılötesi power LED'leri sürebilmek ve dijital olarak ışık şiddetini kontrol edebilmek için kullanılan bu sürücüler Mean Well markasının LDD 1000L modelidir. Bu sürücüler 6-36 VDC giriş gerilimine, 2-30 VDC çıkış gerilimine sahiptir. Çıkış akımı ise 1000 mA'dır. Boyutları ise uzunluk 31.8 mm, genişlik 20.3 mm, derinlik 12.2 mm'dir. Bu değerler sistemdeki power LED'ler için idealdir. Kablolu ve soketli çeşitleri de bulunan sürücünün sistem için baskı devresi tasarlandığından PCB modeli tercih edilmiştir.

3.1.2.2. COB LED sürücüsü

Soğuk ve sıcak beyaz COB LED'leri sürebilmek ve dijital olarak ışık şiddetini kontrol edebilmek için kullanılan bu sürücüler Mean Well markasının LDH 45B 1050 modelidir. Bu sürücüler 18-32 VDC giriş gerilimine, 21-43 VDC çıkış gerilimine sahiptir. Çıkış akımı ise 1050 mA'dır. Boyutları ise power LED sürücülerine göre hayli fazladır. Uzunluğu 75 mm, genişliği 53 mm, derinliği ise 22.7 mm'dir. Bu değerler sistemdeki power LED'ler için idealdir. Şekil 3.13'te power LED sürücünün PCB modelinin ve COB LED sürücüsünün fiziksel yapısı gösterilmiştir.



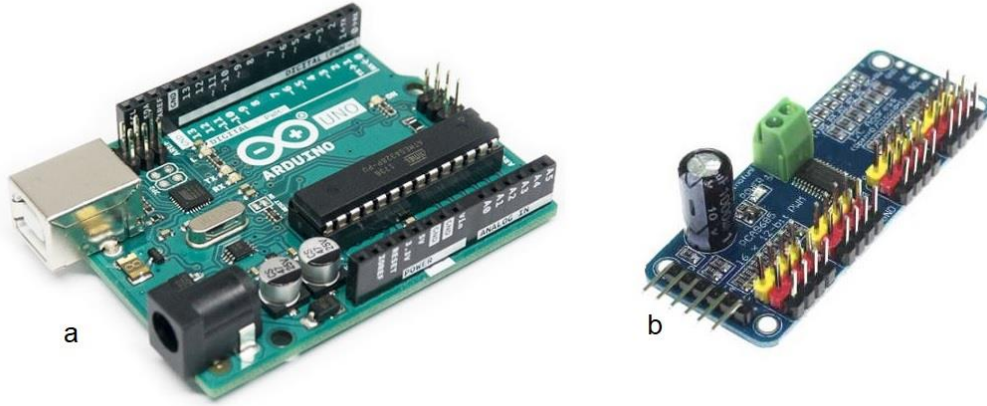
Şekil 3.13 (a) Power LED sürücüsü, (b) COB LED sürücüsü

3.1.3. Kontrol elemanı (mikrokontrolör)

Solar simülatörün spektrum kontrolü LED'lerin ışık şiddetinin hassas bir şekilde değiştirilebilmesine bağlıdır. Bu nedenle LED'leri süren sürücüler dijital dalga genişlik modülasyonu (PWM) sinyali ile dim edilmelidir. Dijital PWM sinyali bu çalışmada Şekil 3.14-a'da görülen Arduino Uno R3 mikro işlemci ile sağlanmıştır.

3.1.4. PWM çoklayıcı

Solar simülatörün spektrum kontrolünü yapabilmek için sistemde bulunan aynı dalga boyuna sahip bütün LED'lerin ışık şiddetlerinin aynı anda değiştirilmesi gerekmektedir. Mevcut mikroişlemcinin PWM pinleri bunun için yeterli olmadığından mikroişlemcinin bir pininden elde edilen 1 tane PWM sinyalini 8'e çıkarabilen, şekil 3.14-b'de görülen PCA 9685 sürücü kartı kullanılmıştır.

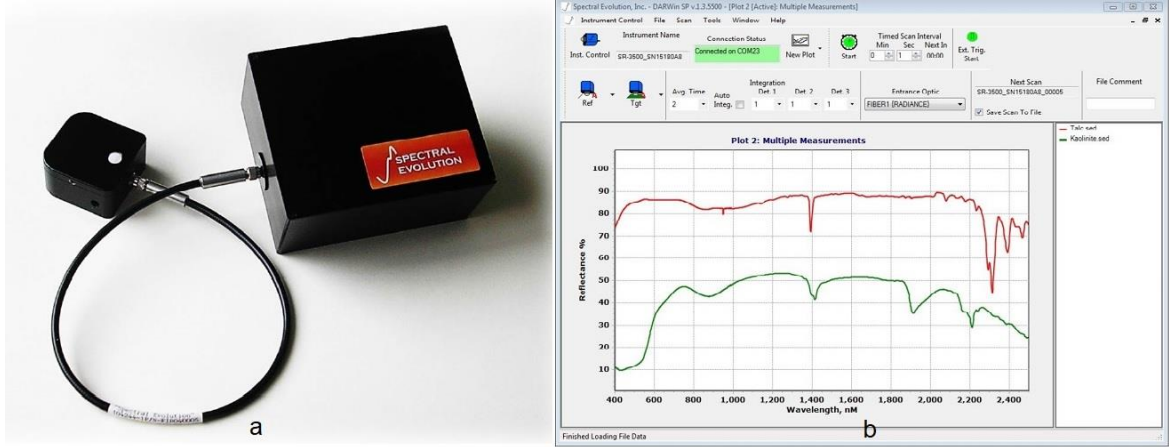


Şekil 3.14 (a) Arduino Uno R3 mikroişlemci, (b) PCA 9685 sürücü kartı

3.1.4. Spektrometre ve yazılımı

ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarına göre LED ışık kaynaklı solar simülasyonlarda dalga boyu aralığı 400 nm ile 1100 nm arasında olması gerektiğinden kızılötesi spektrumun da ölçülebilmesi çok önemlidir. Bu nedenle sistemdeki kızılötesi spektrumunu ölçebilmek için spektrometre kullanılmıştır. Spectral Evolution firmasına ait SR 500 spektrometre 320 nm ile 1100 nm aralığındaki dalga boyu aralığını ölçebildiğinden bu çalışmada kullanılmıştır.

Spektrometre spektral veri toplar ve orana dayalı ölçümler (yansıtma, geçirgenlik, absorbans, vb.) için kullanılabilecek çıktılar üretirken, kalibre edilmiş SR-500 aynı zamanda mutlak spektral ışınım birimleri de üretebilir. Enerji, spektrometreye harici bir aydınlatma kaynağından foreoptik ve entegre fiber optik kablo yoluyla girer. Spektrometre, 512 elemanlı bir dizi detektörü ile 320–1100 nm aralığında çalışan bir dağıtıcı PDA sistemidir. Fiziksel yapısı bir OEM sisteminin içine monte edilmek üzere tasarlanmıştır. Sistem arabirim, ana bilgisayarla iletişim için DC giriş gücü ve USB bağlantısından oluşur. Spektrometrenin fiziksel görünümü Şekil 3.15'a'da verilmiştir. SR-500 spektrometrenin ölçüm sonuçları ürünle birlikte gelen “DARWin” yazılımı ile analiz edilmektedir (Şekil 3.15-b). Bu yazılım ile karşılaştırmalı sonuçlar elde edilebilmekte ve solar simülasyonun spektral eşleşme değerinin hangi sınıfa ait olduğu kolayca görülebilmektedir.



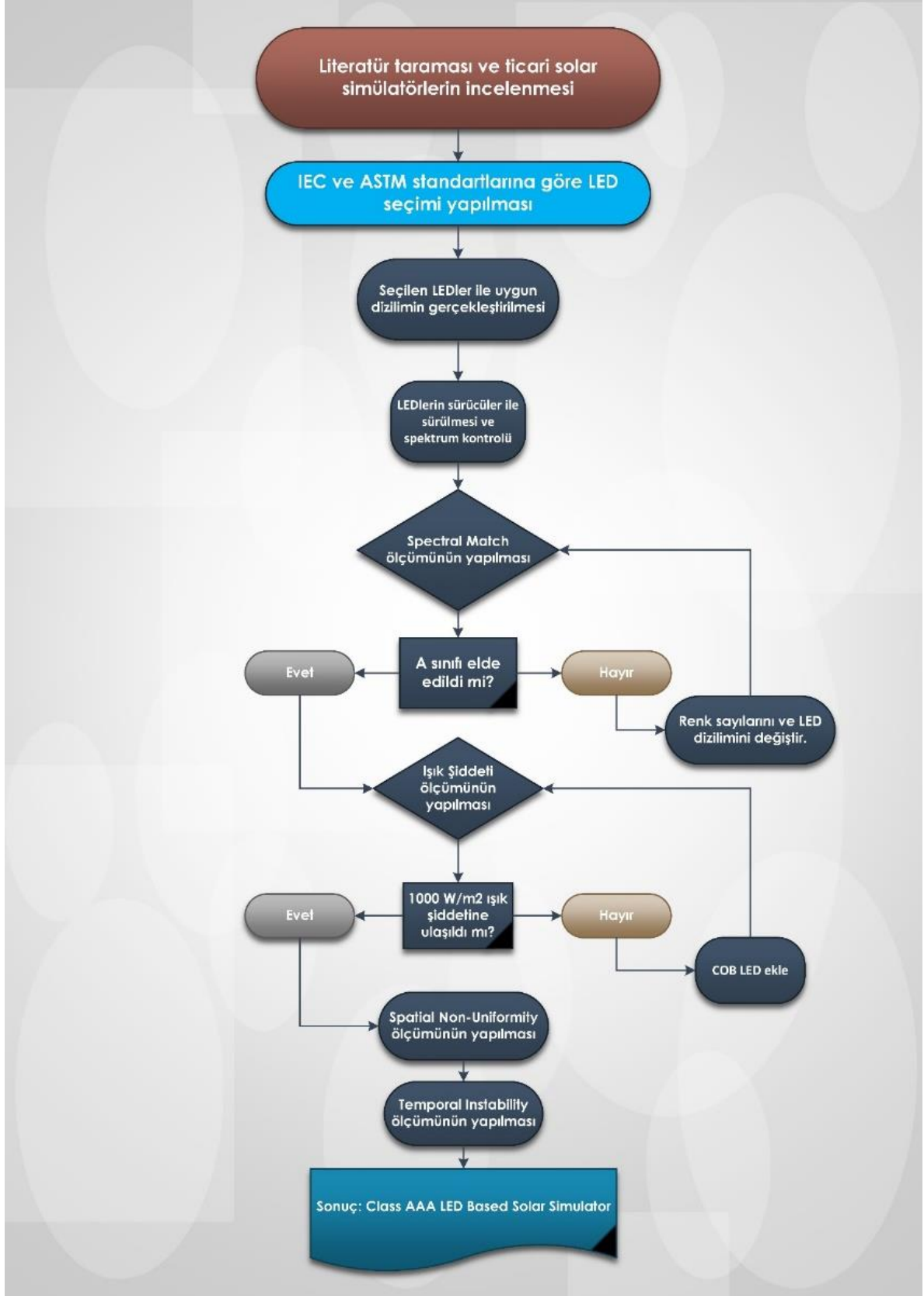
Şekil 3.15 (a) SR-500 Spektrometre fiziksel yapısı, (b) DARWin yazılımı ekran görüntüsü

3.1.5. Diğer bileşenler

Sistem için gerekli LED, LED sürücüsü, mikroişlemci, PWM çoklayıcı sürücü kartı, spektrometre ve yazılım birbirine entegre edildikten sonra ek bileşenler kullanılmıştır. Bu bileşenler, ışık şiddetini belirlemek için kullanılan luxmetre, alüminyum soğutucu, aktif soğutmayı gerçekleştirmek için soğutucu motor ve bakır boru sistemi, soğutucu fanlar, güç kaynakları ve tüm sistemi kompakt hale getirecek olan alüminyum gövde sistemidir.

3.2. Yöntem

Konu ile ilgili literatür taraması ticari solar simülasyonların araştırılmasıyla paralel şekilde gerçekleştirilmiştir. Akademik ve ticari tüm çalışmalar araştırıldıktan sonra ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarında belirtilen dalga boyu oranlarının ve ışık şiddetinin elde edilebileceği LED'ler ve sayıları belirlenmiştir. Seçilen LED'lerle gerçekleştirilen bir dizi ölçüm sonrasında tüm performans kriterlerinin sağlanacağı gerekli iyileştirmeler yapılmış ve prototip çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Prototip çalışmalarında elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, tez çalışmasına başlanmıştır. Çalışmanın süreci Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Solar simülatör tasarımı süreç diyagramı

3.2.1. Yapılan çalışmalar

3.2.1.1. LED'lerin dalga boyu değişimlerinin araştırılması

Bu çalışmada çalışma süreleri, LED'lerin ışık kaynağı olarak kullanıldığı (sokak aydınlatması, yansıtım cihazı, güneş simülatörü vb.) farklı uygulamaların kullanım koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda Osram LB CP7P mavi LUW CR7P 6500 K ve LCW CQAR 3000 K beyaz LED'ler kullanılmıştır. LED'ler soğutuculu siyah bir kutuya yerleştirilmiş ve LED'lerin dalga boyları Spectral Evolution SR 500 spektoradyometre ile ölçülmüştür. Ölçümler kısa ve uzun süreli olmak üzere iki ayrı zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, LED'lerin sıcaklığı da önemli olduğu için kara kutunun sıcaklığı aynı zaman aralıklarında ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde LED'lerin sıcaklığındaki artış nedeniyle kapalı kara kutunun sıcaklığı da artmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılarak, sıcaklıktan kaynaklanan dalga boyu değişiklikleri analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

LED'lerin dominant dalga boylarındaki sıcaklık değişimini incelemek için kullanılan ölçümler, aydınlatmada kullanılan yüksek parlaklıkta mavi, sıcak beyaz ve soğuk beyaz LED'lerle yapılmıştır. Bu amaçla Osram LB CP7P mavi, LCW CQAR 3000 K ve LUW CR7P 6500 K beyaz LED'ler tercih edilmiştir. Sıcaklıktaki artışı hızlandırmak için her LED'den 4'er adet kullanılmıştır. Kara kutu üzerine monte edilen PCB üzerindeki LED'ler, her kesiti 30 cm olan küp şeklindeki bir kutuya yerleştirilmiştir (Şekil 3.17). LED'lerin PWM kontrolü için bir mikroişlemci sürücü devresi kullanılmış ve LED'ler maksimum yük akımlarında çalıştırılmıştır. Fiber optik ölçüm cihazı kullanılarak kara kutunun üzerindeki merkezi noktadan dalga boyu ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde Spektral Evulation SR 500 spektoradyometre ve DARwin yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3.18). Kısa süreli ölçümlerde, LED'lerin dalga boyları 2 saat boyunca 5 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Uzun süreli ölçümler, 48 saat boyunca 15 dakikalık aralıklarla yapılmıştır. LED'lerin jonksiyon sıcaklığı, soğutucudan kara kutunun iç sıcaklığına geçtiğinden, bu sıcaklık aynı zaman aralıklarında ölçülmüştür. Ölçümün başında, kara kutunun sıcaklığı yaklaşık 25 ° C ayarlanmıştır. İlk önce 2 saatlik ölçümler yapılmıştır. Mavi LED'ler, sıcak beyaz LED'ler ve soğuk beyaz LED'ler ayrı ayrı çalıştırılmış ve verileri ölçülmüştür. Ardından, ikinci olarak 48 saatlik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümleri elde etmedeki tüm sistem, gücün kesilmemesi için UPS tarafından desteklenmiştir.

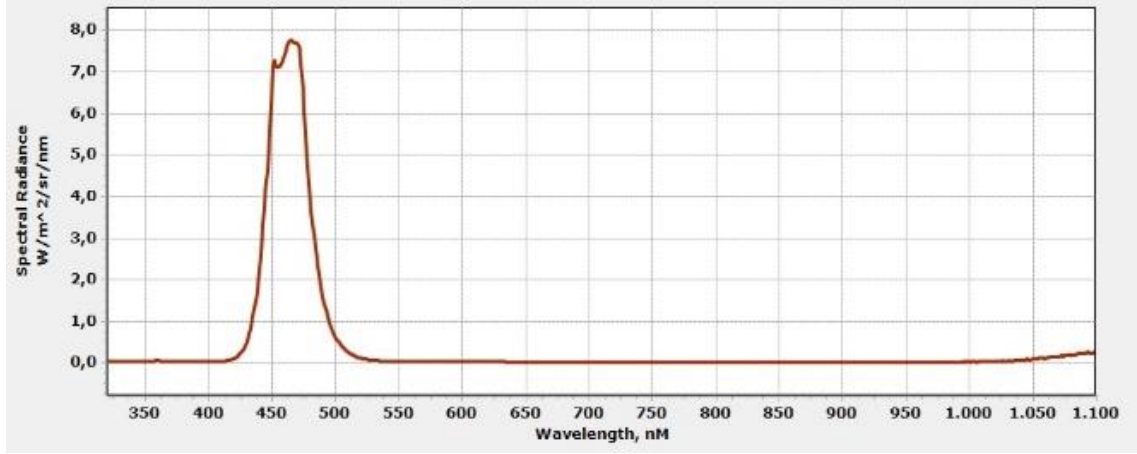


Şekil 3.17 LED'lerin karakutu içine yerleşimi

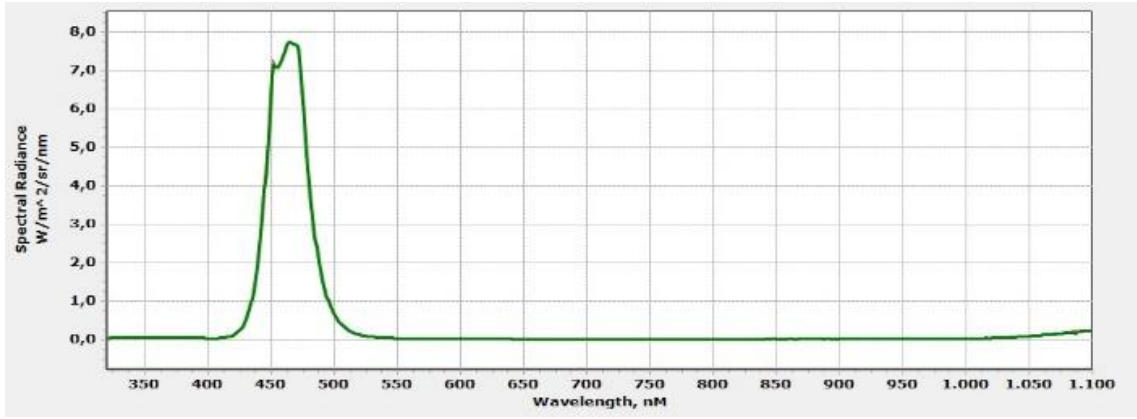


Şekil 3.18 Dalga boyu ölçümü test düzeneği

İlk kısa süreli ölçüm mavi LED ile yapılmıştır. 2 saatlik ölçümün başında 25.96°C 'lik bir ortam sıcaklığının olduğu ölçülmüştür. Bu ölçümde, Şekil 3.19'da görülen sonuç elde edilmiştir. Mavi dalga boyu, üretici teknik broşüründe belirtildiği gibi 470 nm 'de ölçülmüştür. 4 mavi LED'in ışımasının yaklaşık $8\text{ W} / \text{m}^2 / \text{sr} / \text{nm}$ olduğu gözlemlenmiştir. İki saat sonraki ölçümde, ortam sıcaklığının 30.84°C 'ye yükseldiği gözlenmiştir. Şekil 3.20'de ilk ve son ölçülen değerler birlikte verilmiştir.

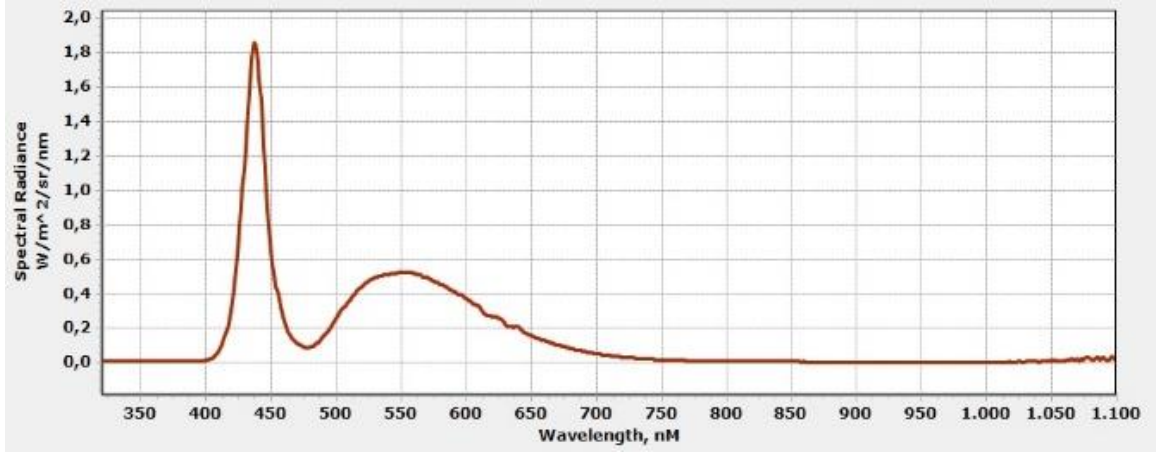


Şekil 3.19 Mavi LED dalga boyunun ilk ölçümü

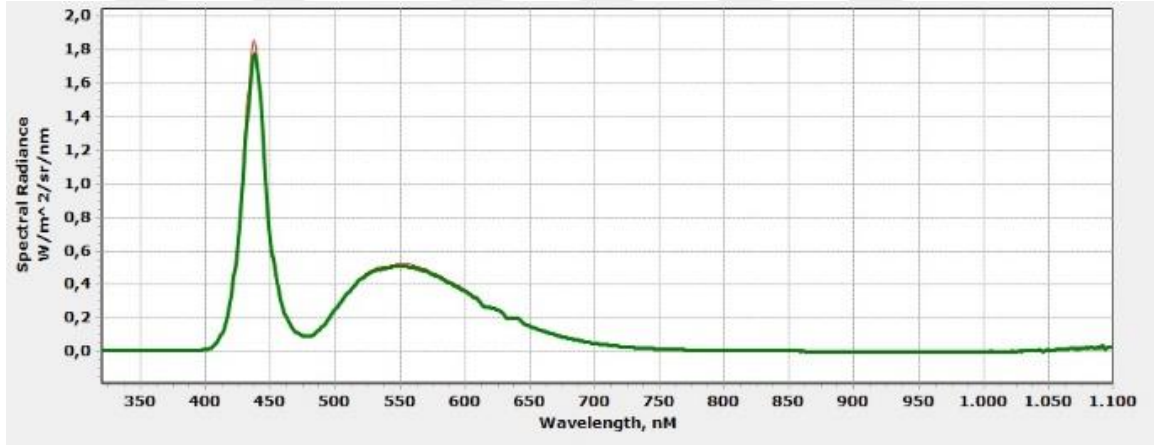


Şekil 3.20 Mavi LED dalga boyunun ilk ve 2 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması

İkinci kısa süreli ölçüm, sıcak beyaz olarak tanımlanan 3000 K LED ile yapılmıştır. 26.46 ° C'lik bir ortam sıcaklığı ile başlamış ve teknik broşür bilgisine karşılık gelen bir dalga boyu elde edilmiştir. Ölçüm sonucu elde edilen dalga boyu değeri, Şekil 3.21 'de verilmiştir. 3000 K LED, 2 saatlik ölçümün sonunda 31.53 ° C'lik bir ortam sıcaklığına ulaşmış ve dalga boyu Şekil 3.22'de gösterildiği ölçülmüştür. Burada, küçük de olsa ısınım şiddetinin azaldığı görülmektedir.

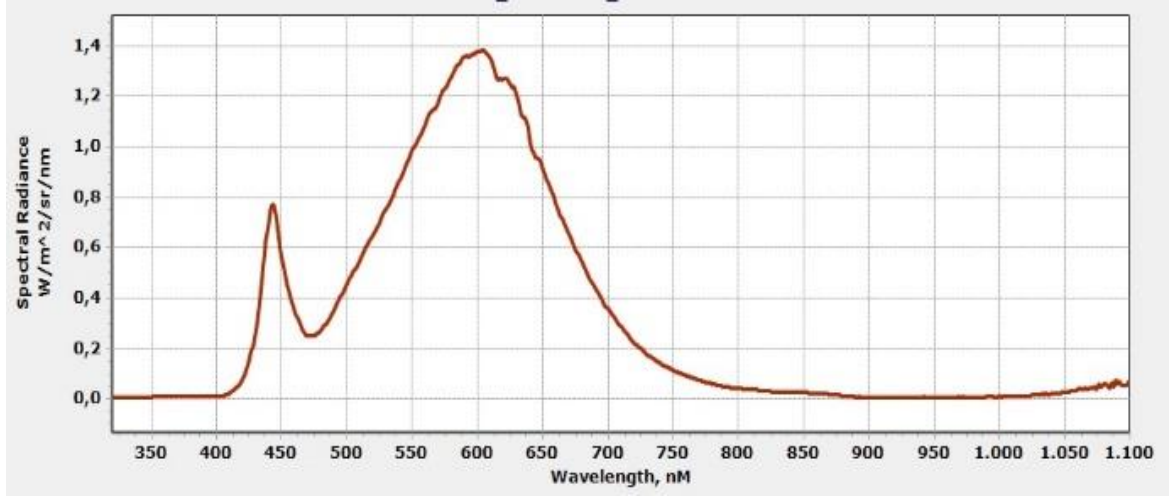


Şekil 3.21 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü

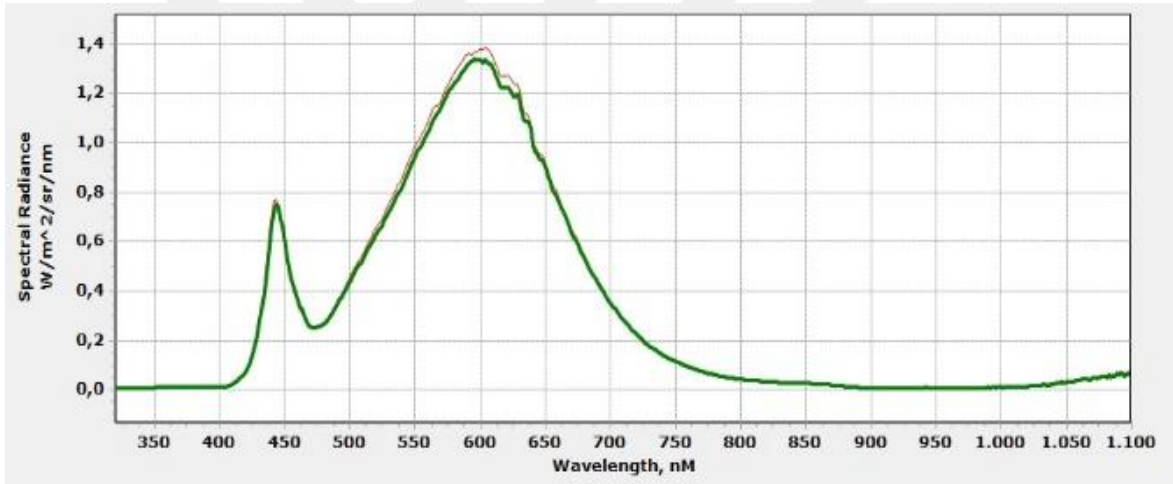


Şekil 3.22 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ve 2 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması

Kısa süreli ölçümlerde son olarak 6500 K soğuk beyaz LED'in ölçümleri yapılmıştır. 2 saatlik ölçümde 25.29 ° C'de başlayan sıcaklığın 31.58 ° C ile bittiği görülmüştür. 6500 K soğuk beyaz LED'in ölçülen ilk dalga boyu Şekil 3.23'te ve son ölçülen dalga boyu Şekil 3.24'te gösterilmiştir.

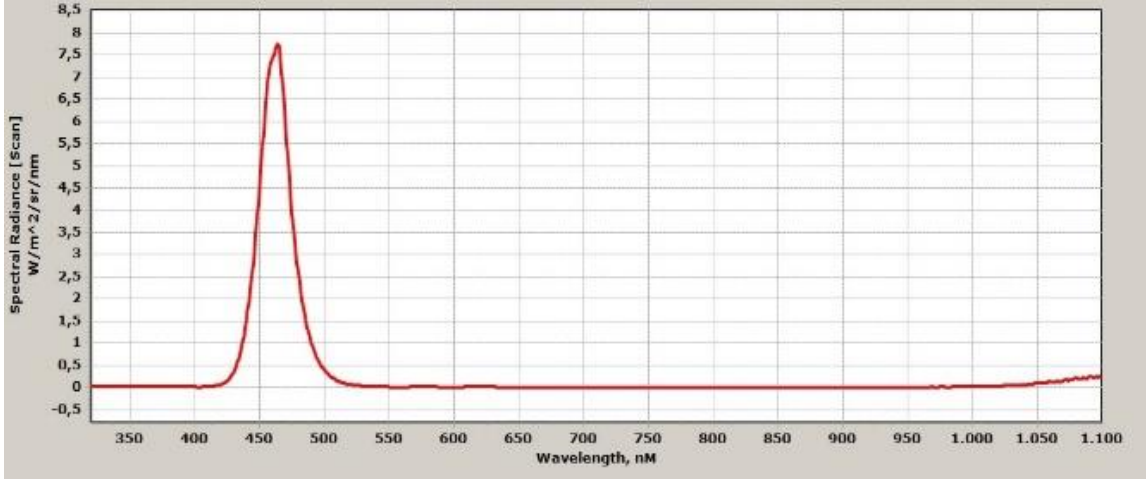


Şekil 3.23 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü

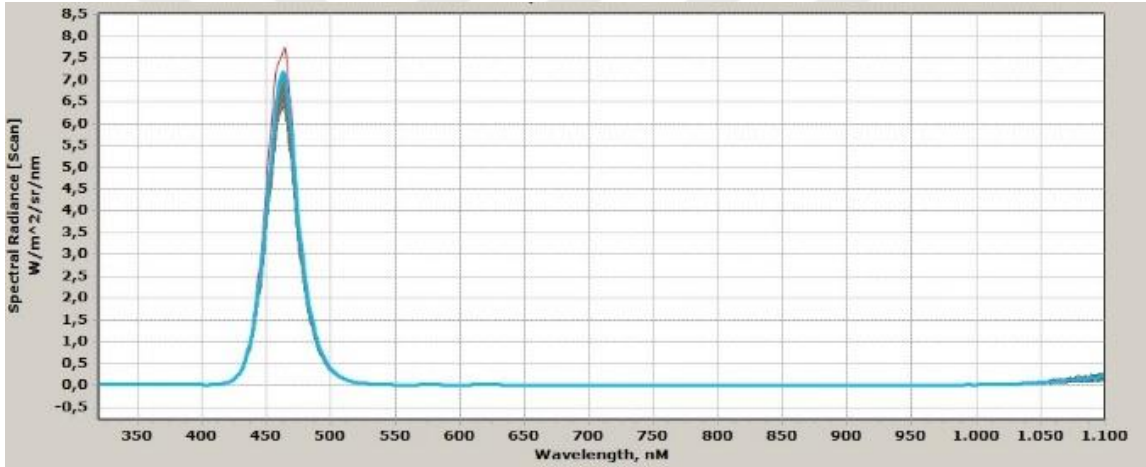


Şekil 3.24 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ve 2 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması

Kısa süreli ölçümler tamamlandıktan sonra, aynı işlem 48 saatlik ölçümler için aynı sırada tekrarlanmıştır. Ölçüm işlemi sırasında herhangi bir kesinti olmasını önlemek için, ölçüm verilerinin alındığı bilgisayarın güç seçenekleri 48 saat boyunca açık kalmaya ayarlanmış ve sistem UPS ile çalıştırılmıştır. Ölçümler, sıcaklığın 25.71°C olduğu ve ilk ölçüm sonucunun Şekil 3.25'teki gibi olduğu mavi LED ile başladı. 48 saat sonra ölçülen sıcaklık 32.9°C 'dır ve dalga boyu Şekil 3.26'da gösterildiği gibi ölçülmüştür. Sıcaklık arttıkça, ışınım şiddetinin çok az da olsa azaldığı görülebilir.

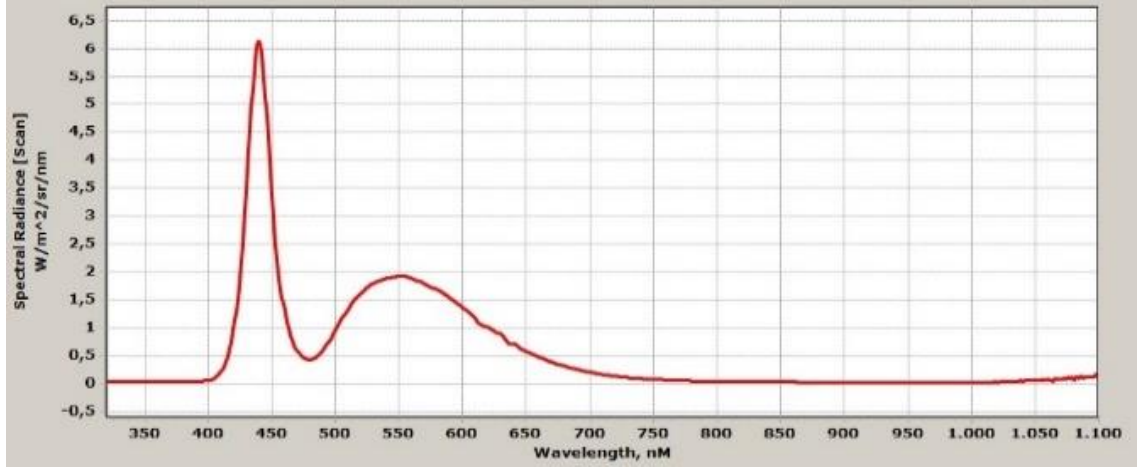


Şekil 3.25 Mavi LED dalga boyunun ilk ölçümü

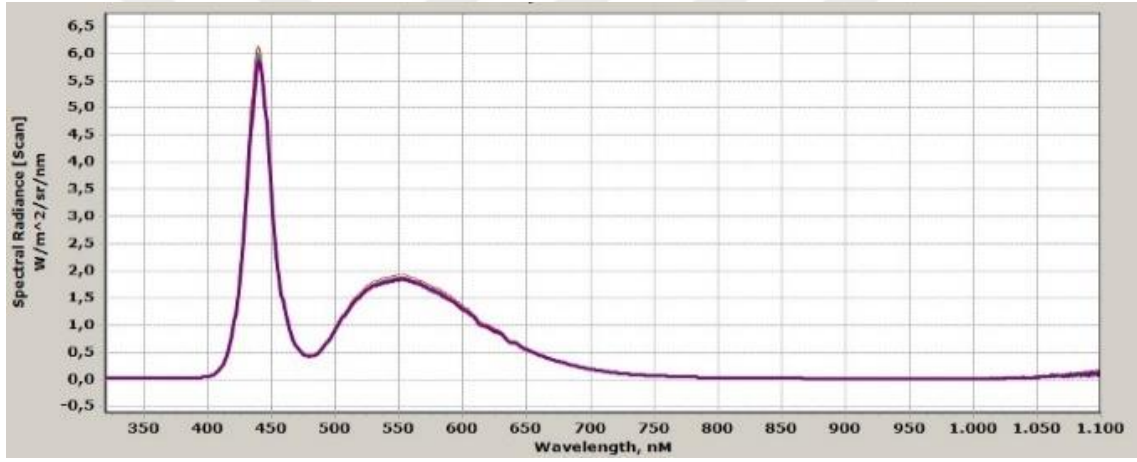


Şekil 3.26 Mavi LED dalga boyunun ilk ve 48 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması

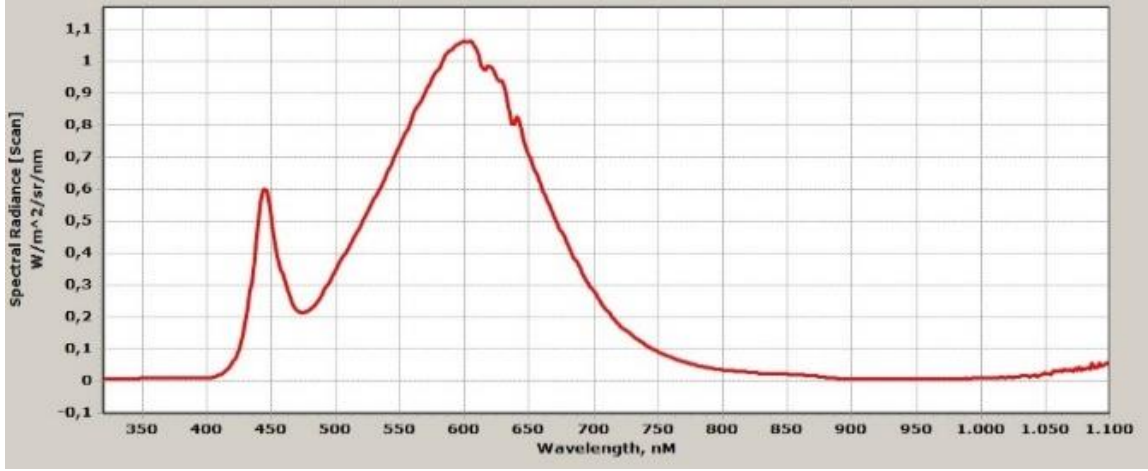
3000 K LED üzerindeki ölçüm 25.9 ° C'de başlamış ve 33.55 ° C'de sona ermiştir. Bu ölçümde elde edilen ilk ve son eğriler, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 'de gösterilmiştir. 6500 K LED üzerindeki ölçüm 25.6 ° C'de başlamış ve 32.8 ° C'de sona ermiştir. Bu ölçümde elde edilen ilk ve son eğriler, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30 'da gösterilmiştir.



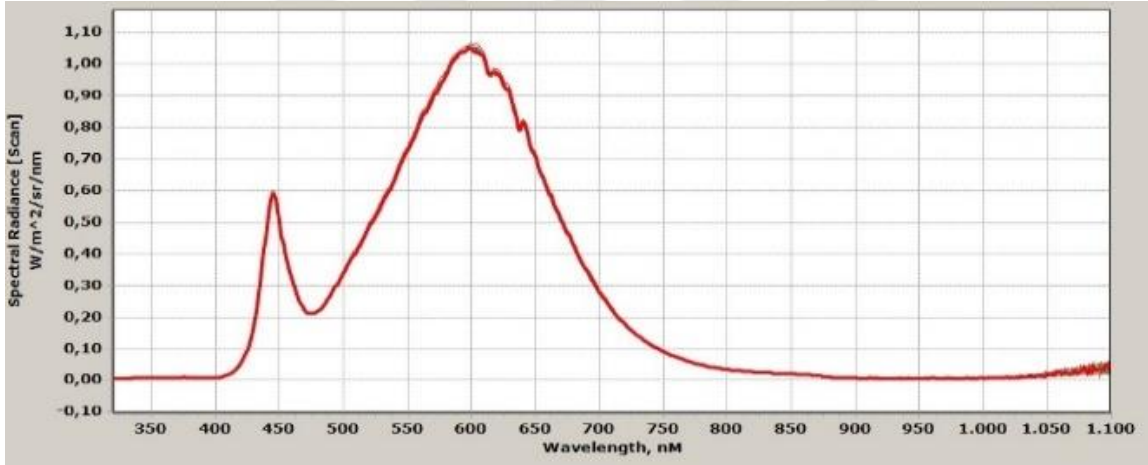
Şekil 3.27 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü



Şekil 3.28 3000 K sıcak beyaz LED dalga boyunun ilk ve 48 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması



Şekil 3.29 Şekil 3.32 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ölçümü



Şekil 3.30 6500 K soğuk beyaz LED dalga boyunun ilk ve 48 saat sonraki ölçümlerinin kıyaslaması

LED'ler sadece günlük yaşamda ışık kaynağı olarak kullanılmaz, günümüzde çeşitli uygulamalarda da yaygın olarak kullanılır. Aydınlatmada kullanılan ışık kaynaklarının renk ve renk sıcaklıklarının ekonomik ömürleri boyunca değişmeden kalması istenmektedir. Yarı iletken devre elemanlarına sahip LED'ler ışık kaynağı olarak tercih edildiğinde, sıcaklık ve parlaklıktaki değişiklikler incelenmelidir. Bunun nedeni, LED'lerin çalışması sırasında jonksiyon sıcaklığındaki artışın, karakteristik değerlerde bir değişikliğe neden olmasıdır. Bu değişikliklerin ışık yansıması aynı zamanda aydınlatmanın özelliklerini de görsel olarak etkiler.

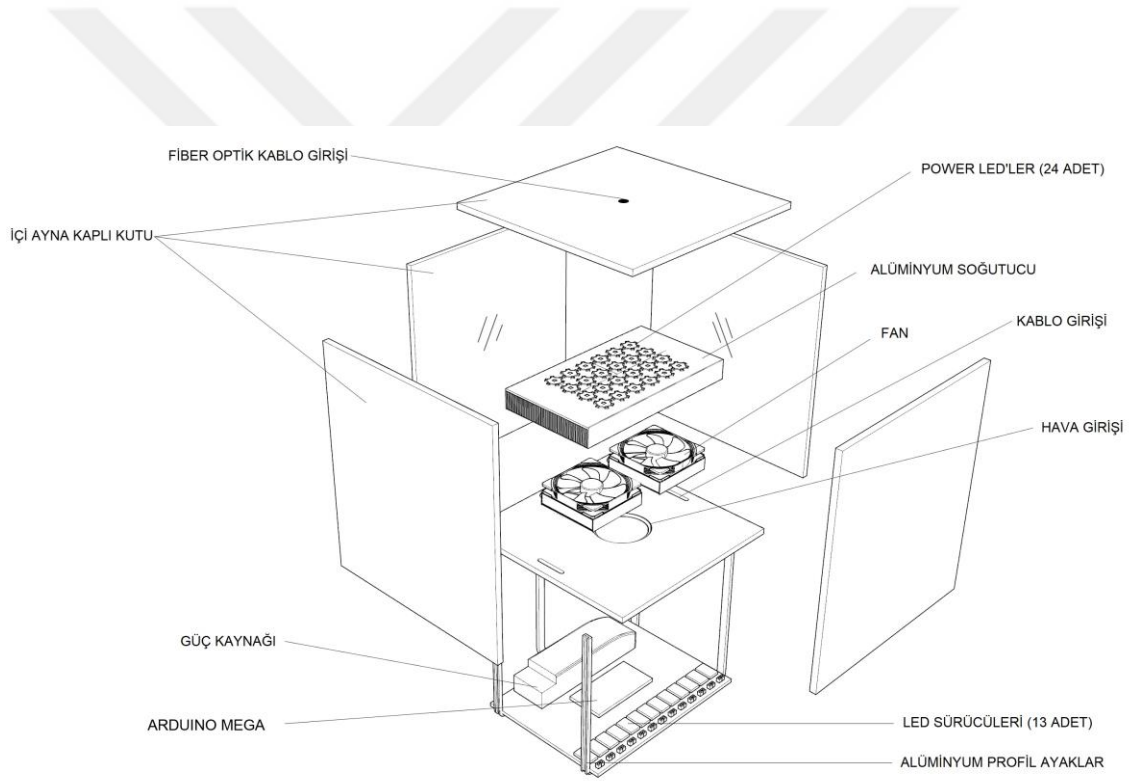
Çalışmanın bu bölümünde, aydınlatmada yaygın olarak kullanılan LED'lerin tepe dalga boylarındaki sıcaklık artışının neden olabileceği değişiklikler araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çalışmanın başında yapılan ilk ölçümlerde, üreticinin her LED için verdiği veri sayfasının dalga boyunda spektrum elde edilmiştir.
- LED'lerin jonksiyon sıcaklığındaki artışın ışık şiddetinde bir azalmaya yol açtığı bilinmektedir. Bu nedenle, çalışmada, LED'lerin jonksiyon sıcaklığı yerine sıcaklığın soğutucudan aktarıldığı iç ortam ortamının sıcaklığı ölçülerek tepe dalga boyunun değişimi incelenmiştir.
- Kısa süreli ölçümler, ortam sıcaklığı yaklaşık 4-5 ° C arttıkça dalga boyunda bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, soğutucudan dolayı jonksiyon sıcaklığının etkin bir şekilde düşük kalması nedeniyle ışıyım yoğunluğunda sadece küçük bir değişiklik tespit edilmiştir.
- Uzun süreli ölçümler, yaklaşık 6-7 ° C ortam sıcaklığındaki artışlara bağlı olarak dalga boyunda önemli bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Işıyım şiddetinde 0.1 ila 0.3 W / m² / sr / nm düşüş gözlenmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler, 2 saatlik ve 48 saatlik kesintisiz çalışma süresi boyunca LED'lerin tepe dalga boyu değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Bu nedenle, aydınlatma ve dalga boyu stabilitesinin özellikle önemli olduğu güneş simülatörleri gibi çeşitli uygulamalarda ışık kaynağı olarak LED'ler tercih edilebilir.

3.2.1.2. Solar simülatör ilk prototipi

İlk protoipte hücre bazlı solar simülatör tasarımı hedeflenmiştir. İlk tasarımın ana bileşenleri 30x30x30 cm boyutlarında, iç duvarları ayna ile kaplanmış ve lazer kesim tekniği ile üretilmiş bir adet ahşap kutu, alüminyum soğutucu, iki adet soğutucu fan, 75 W güç kaynağı, 13 adet LED sürücü, LED sürücüleri kontrol edebilmek için bir adet Arduino Mega 2560, dört adet 5500 K Osram Oslon serisi soğuk beyaz LED, dört adet 4000 K sıcak beyaz LED, dört adet 470 nm mavi LED, dört adet 740 nm kırmızı LED, dört adet 850 nm infrared LED, dört adet 940 nm infrared LED ve alüminyum profil ayaklardır. Bu malzemeler kullanılarak solar simülatör tasarımı yapılmış ve bu tasarıma uygun olarak simülatör geliştirilmiştir. Solar simülatörün tüm bileşenleri Şekil 3.31’de ayrıntılı olarak verilmiştir.



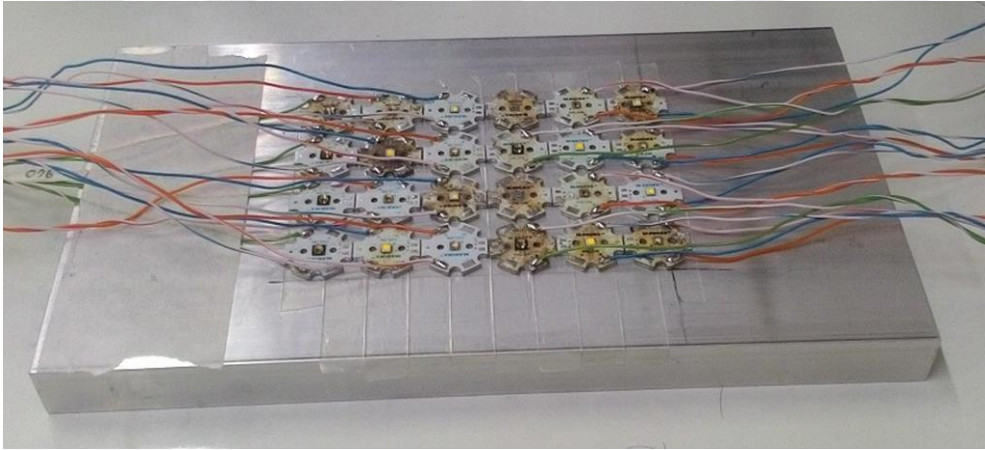
Şekil 3.31 İlk prototip solar simülatör ana bileşenleri

İlk prototipte kullanılan LED'lerin özellikleri şu şekildedir:

- Cool white LED: 5500 K, 1W, 80°, IF= 350 mA, VF=2.95V
- Warm white LED: 4000 K, 1W, 120°, IF=700 mA, VF=2.95V
- Blue LED: 470 nm, 1W, 80°, IF= 350 mA, VF=3.20V
- Red LED: 740 nm, 1W, 80°, IF= 350 mA, VF=1.85V
- IR LED: 850 nm, 3.4W, 90°, IF= 1A, VF=2.9V
- IR LED: 940 nm, 3.4W, 90°, IF= 1A, VF=2.75V

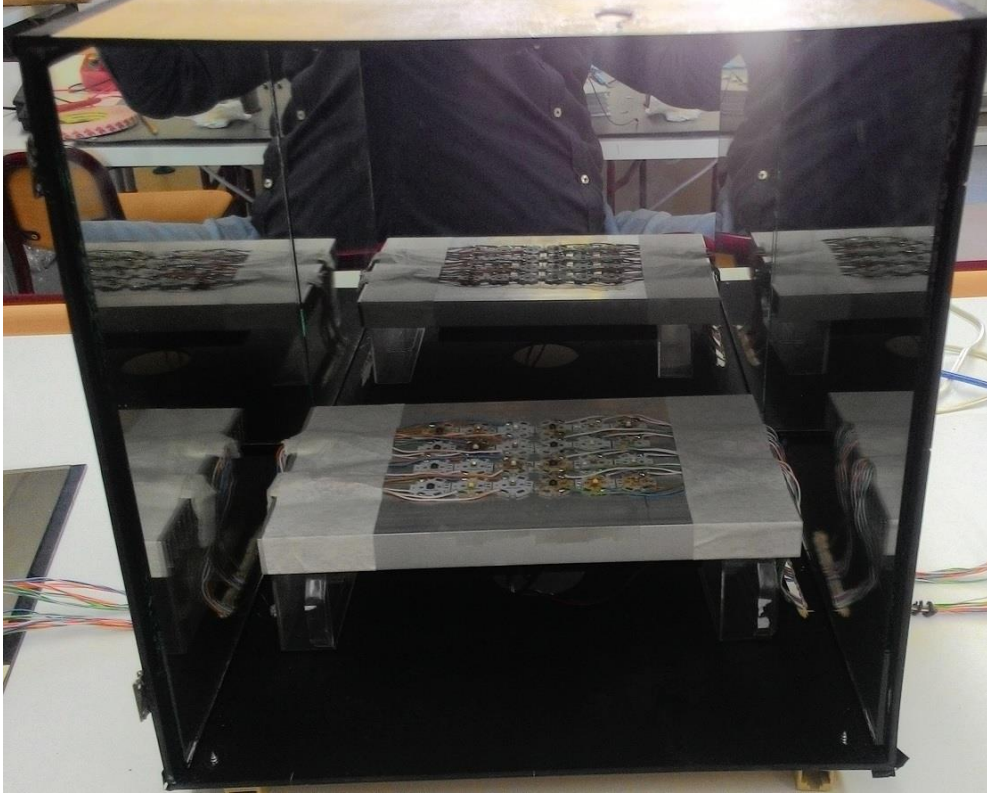
Kullanılan LED sürücüleri 1000mA ve 1500 mA dim edilebilir özellikteki Mean Well LDD serisidir. LED'lerin monte edildiği tekli yıldız PCB ise 19 mm çapında ve 1.6 mm yüksekliğindedir.

6 farklı dalga boyundaki toplam 24 LED ilk olarak tekli yıldız PCB'ler üzerine yüksek hassasiyet ile monte edilmiştir. Daha sonra LED'ler simetrik bir şekilde alüminyum soğutucu üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 LED'lerin alüminyum soğutucu üzerine yerleşimi

Montaj işlemi için ısı iletimi yüksek ve aynı zamanda yalıtkan özellikteki termal bant kullanılmıştır. Alüminyum soğutucunun altına iki adet soğutucu fan ilave edilerek ana kutunun içine yerleştirilmiştir. LED'ler, soğutucu ve fanların birlikte yerleştirildiği kutunun iç kısmının dört tarafı daha sağlıklı dalga boyu ölçümü yapabilmek için ayna ile kaplanmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33 İçi ayna ile kaplanmış karakutu

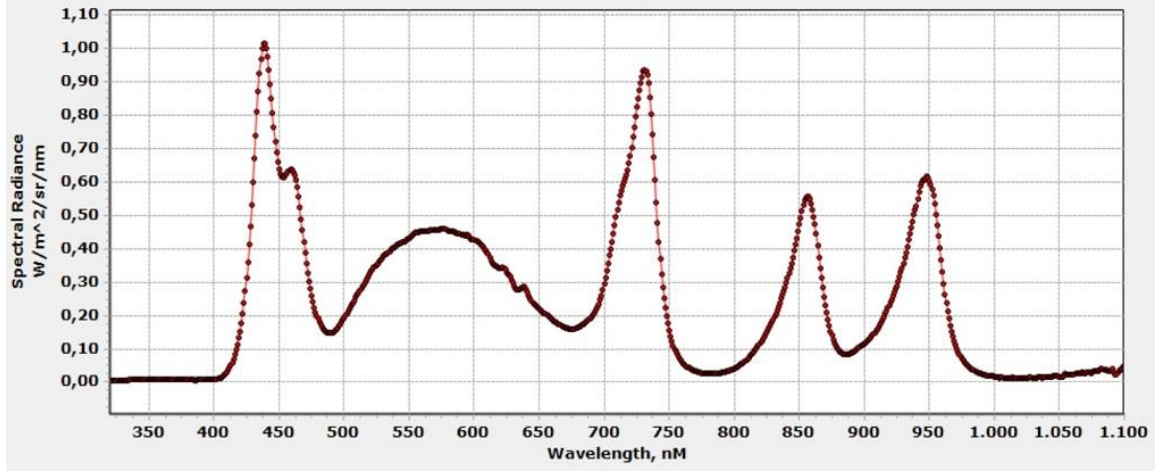
Kullanılan LED'lerin güçleri ve çektikleri akımlar gözönüne alınarak uygun LED sürücüler seçilmiştir. LED sürücüler Arduino Mega 2560 mikrokontrolör ve bir yazılım ile kontrol edilerek istenilen spektrum değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir. Mikrokontrolör, LED sürücüler ve güç kaynağı birlikte tek bir güç ve kontrol devresi oluşturmak üzere bir kart tasarımı yapıp ana kutunun alt kısmına yerleştirilmiştir.

Sistem bileşenleri bir araya getirildikten sonra spectral eşleşme testine geçilmiştir. Önceki bölümlerde belirtildiği testin IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarına göre yapılması gerekmektedir. Bu yüzden, buna uygun olarak Spectral Evulation SR-500 Spektrometre ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Spektrometreye bağlanan fiberoptik kablunun diğer ucu, içinde LED'lerin bulunduğu ana kutunun tavan merkezinin dış kısmından LED'leri 90 derece dik açıyla görecektir. Test düzeneği solar simülatör, SR-500 Spektrometre, fiberoptik kablo, dizüstü bilgisayar ve DARWin SP yazılımından oluşmaktadır (Şekil 3.34).



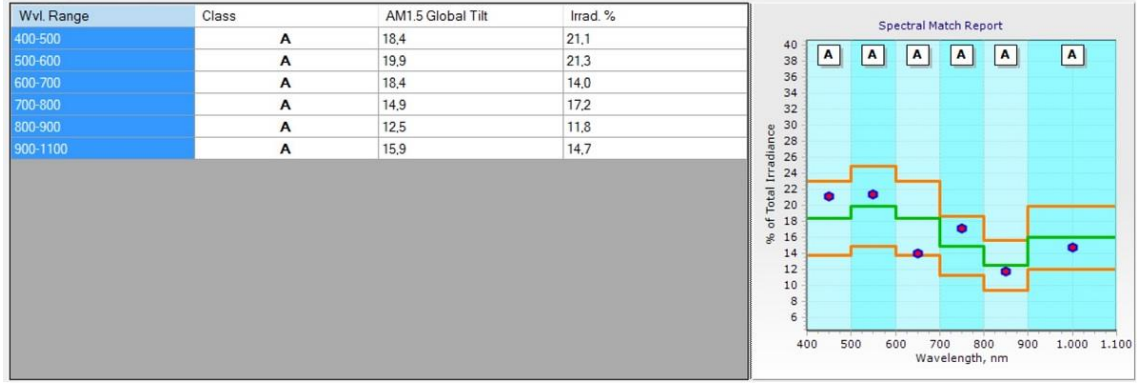
Şekil 3.34 Spektral eşleşme test düzeneği

Yapılan ölçümler sonucunda LED'lerin sürücü devresi ile uygun şekilde sürülmesinin ardından Şekil 3.35'teki grafik ve değerler elde edilmiştir. Ölçümlere göre her LED'in kendi karakteristik dalga boyuna sahip oldukları görülmüştür. 400-700 nm arasındaki dalga boyu sıcak soğuk beyaz LED ve mavi LED ile elde edilmiştir. 700-1100 nm arası dalga boyu ise kırmızı, 850 ve 940 nm kızılötesi LED'ler ile elde edilmiştir.



Şekil 3.35 İlk prototip solar simülatörün dalga boyu ölçüm sonuç grafiği

Tasarımı yapılan ve geliştirilen ilk prototip solar simülatörün spektral eşleşmesinin spektrometre ile ölçülüp hesaplanan AM 1.5 G karşılaştırılması ise Şekil 3.36'da verilmiştir. Elde edilen rapora göre 400-500 nm dalga boyu aralığı toplam ışınımın %21,1'ine denk gelmektedir. Bu dalga boyu aralığı için Denklem 1 ile elde edilen spektral eşleşme değeri 1,146'dır. Bu da Tablo 1'de verilen değerlerde A sınıfını ifade etmektedir. 500-600 nm dalga boyu aralığı için spektral eşleşme 1.07, 600-700 nm için 0.76, 700-800 nm için 1.154, 800-900 nm için 0.944 ve 900-1100 nm için 0.924'tür. Böylelikle tüm dalga boyu aralıklarının elde edilen değerlerinin A sınıfını ifade ettiği görülmektedir. 600-700 nm dalga boyu aralığına baktığımızda spektral eşleşme değerinin sınırda olduğu görülmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda sıcak beyaz ve kırmızı LED sayıları ve kombinasyonlarında uygun değişiklikler yapılarak bu değerin daha normal bir aralığa çekilmesi mümkündür. Şekil 3.36'nın sağ tarafındaki grafikte ise sarı çizgiler A sınıfı aralıklarını, noktalar ise ölçülen solar simülatör değerlerinin aralığın neresinde olduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan LED'ler ile yalnızca ortalama 350 W/m² ışık şiddetine ulaşılabildiğinden diğer iki performans kriteri olan uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık ölçümleri ve hesaplamaları yapılmamıştır.



Şekil 3.36 İlk prototip solar simülatör tasarımına ait IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 spektral eşleşme raporu

Bu çalışmada, 6 farklı dalga boyunda (Soğuk beyaz, sıcak beyaz, 470 nm mavi, 740 nm kırmızı, 850 ve 940 nm kızılötesi) LED kullanılarak tasarlanıp geliştirilen solar simülatörün IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarına göre üç performans kriterinden biri olan Spektral eşleşme için A sınıfını sağladığı ortaya konulmuştur. Böylelikle fotovoltaiik panel testlerinde kullanmak üzere tasarlanan solar simülatörlerde daha fazla ve farklı dalga boylarında LED kullanılmadan A sınıfı spektral eşleşmeye ulaşılabilceği görülmüştür. Aynı zamanda bu çalışma LED'lerin solar simülatörler için çok uygun ve yüksek verimli bir ışık kaynağı olduğunu da ortaya koymaktadır. Solar simülatörün fotovoltaiik panel testlerinde kullanılması için gereken diğer performans kriterleri uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık ölçümleri ise gerekli iyileştirmelerden sonra gelecekteki çalışmalarda gerçekleştirilecektir.

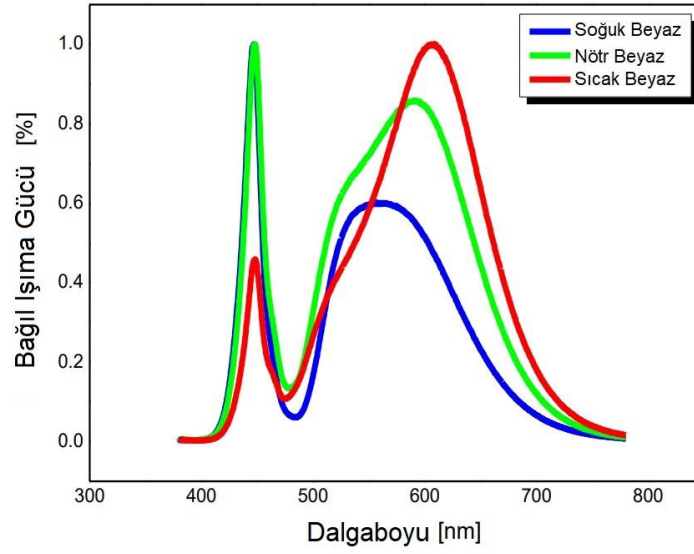
3.2.1.3. Solar simülatör ikinci prototipi

Çalışmanın ikinci prototip aşamasında 6 farklı dalga boyundaki LED'ler ile IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında belirtilen AAA sınıfı düşük maliyetli bir solar simülatör üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; 12 adet power LED, 4 adet COB (chip on board) LED bir soğutucu üzerine yerleştirilmiş ve içi ayna ile kaplı bir kutu içinde dalga boyu ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler spektoradyometre aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda 6 farklı dalga boyuna sahip LED ile 1000 W/m^2 ışınlm şiddetine ulaşılmış, IEC ve ASTM standartlarında belirtilen solar simülatör gerekliliklerinden olan spektral eşleşme (spectral match), uzamsal uyumsuzluk (spatial non-uniformity) ve zamansal istikrarsızlık (temporal instability) A sınıfı düzeyinde elde edilmiştir.

Solar simülatör uygulamasına geçilmeden önce konu ile ilgili literatür taranmış ve piyasada farklı ışık kaynakları kullanılarak üretilen ticari solar simülatörler incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda IEC ve ASTM standartlarında belirtilen performans kriterlerine göre LED'ler belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda en uygun LED dizilimi gerçekleştirilmiştir. İlk prototipte seçilen power LED'ler ile spektral eşleşme kriteri A sınıfında elde edilmiştir. Bununla birlikte ışık şiddeti 350 W/m² seviyesinde kalmıştır. 1000 W/m² değerine ulaşmak için soğuk ve sıcak beyaz LEDler yerine COB LED'ler kullanılmıştır. LED'lerin dalga boyu ve tip bilgileri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Soğuk beyaz ve sıcak beyaz LED'lerin dalga boyu bilgisi Şekil 3.37'de gösterilmiştir. Şekilde görülen nötr beyaz LED çalışmasında kullanılmamıştır.

Tablo 3.1 İkinci prototip solar simülatörde kullanılan LED'lerin özellikleri

LED	DALGA BOYU-PİK MERKEZİ	LED ETİKET BİLGİSİ
Mavi	465-470 nm	OSRAM OSRON LB CP7P
Kırmızı	730-721 nm	OSRAM OSRON GF CS8PM1.24
Kızılötesi 1	860-850 nm	OSRAM OSRON SFH 4715S
Kızılötesi 2	950-940 nm	OSRAM OSRON SFH 4725S
Soğuk Beyaz	Şekil 1'de gösterilmiştir.	SEOUL SDW04F1CJ2C2E-V0
Sıcak Beyaz	Şekil 1'de gösterilmiştir.	SEOUL SDW84F1CJ1G10E-V0

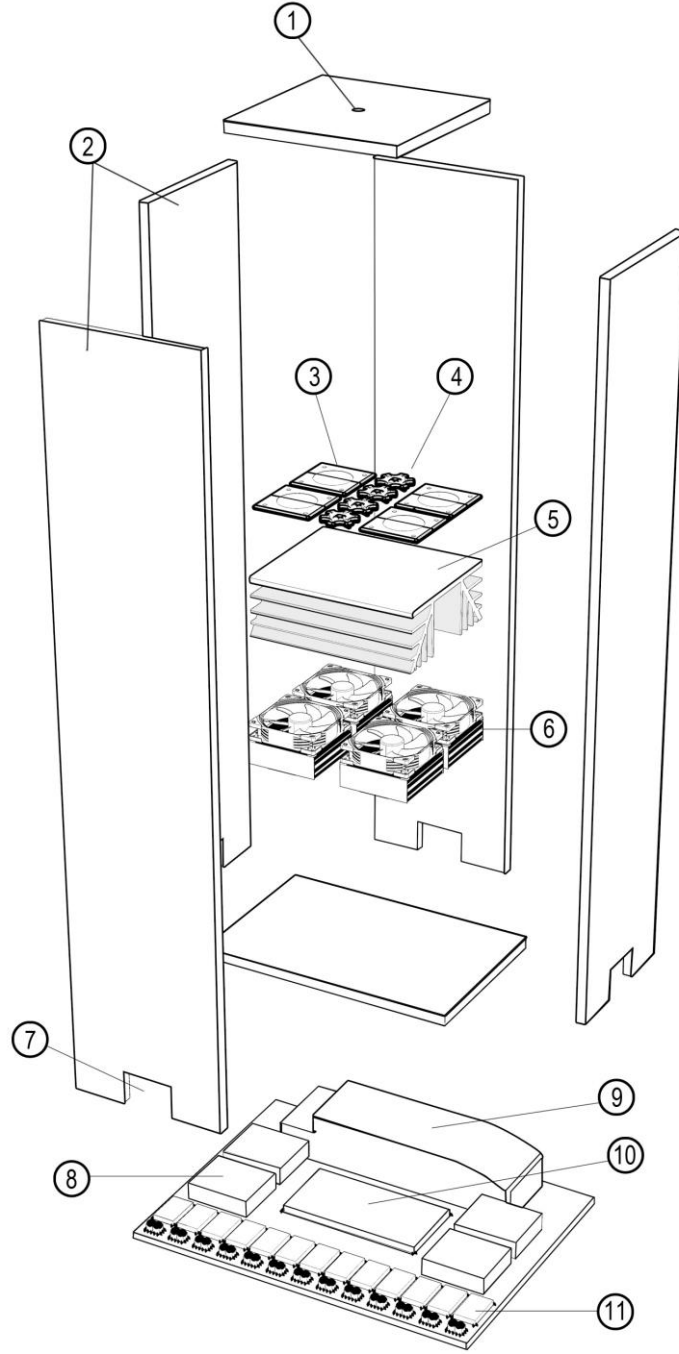


Şekil 3.37 Soğuk beyaz (cool white) ve sıcak beyaz (warm white) LED’lerin dalga boyları

6 farklı dalga boyunda power ve COB LED’ler ile oluşturulan kombinasyonlar ile IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında bir AAA sınıfı solar simülatör üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ultraviyole (UV) ve kızıl ötesi (IR) dalga boylarını da ölçebilecek bir spektrometre vasıtasıyla, ayna kaplı bir kutuda LED’lerin dalga boyları ölçülmüştür. Çalışmanın sonunda, IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standardında belirtilen spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık A Sınıfında elde edilmiştir. Bu çalışma için tasarlanan solar simülatörün ana bileşenleri şunlardır:

- İçi ayna ile kaplı bir kutu,
- Bir alüminyum soğutucu
- Soğutma fanları,
- Güç kaynağı,
- LED sürücüler
- Arduino Mega 2560,
- 5500 K soğuk beyaz COB LED’ler,
- 3000 K sıcak beyaz COB LED’ler,
- 470 nm mavi LED’ler,
- 721 nm kırmızı LED’ler,
- 850 nm kızılötesi LED’ler,
- 940 nm kızılötesi LED’ler.

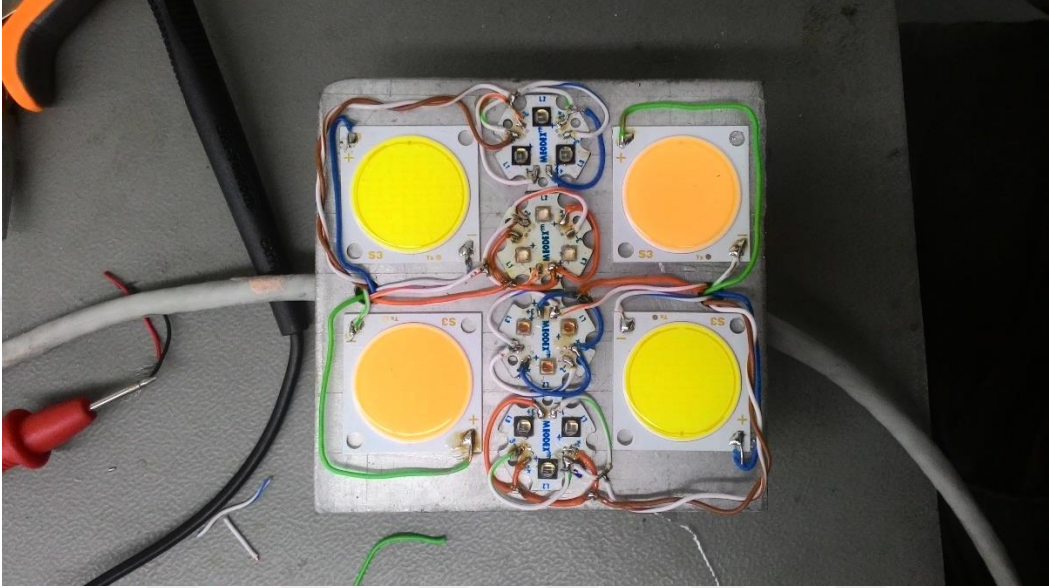
Şekil 3.38’de solar simülatörün tüm bileşenleri detaylandırılmaktadır.



- 1- FİBER OPTİK KABLO DELİĞİ, 2- AYNA KAPLI KUTU,
3- COB LED'LER, 4- POWER LED'LER,
5- ALÜMİNYUM SOĞUTUCU, 6- SOĞUTUCU FANLAR,
7- KABLO VE HAVA DELİĞİ, 8- COB LED SÜRÜCÜLERİ,
9- GÜÇ KAYNAĞI, 10- ARDUINO MEGA MİKROİŞLEMÇİ,
11- POWER LED SÜRÜCÜLERİ

Şekil 3.38 İkinci prototip solar simülatör ana bileşenleri

Altı farklı dalga boyunda toplam 12 power LED başlangıçta üçlü yıldız PCB'lere monte edilmiştir. COB LED'ler ise doğrudan alüminyum soğutucuya monte edilmişlerdir. Daha sonra tüm LED'ler simetrik olarak alüminyum soğutucuya yerleştirilmiştir (Şekil 3.39). Montaj işlemi için ısı transferi yüksek çift taraflı yalıtım bandı kullanılmıştır.

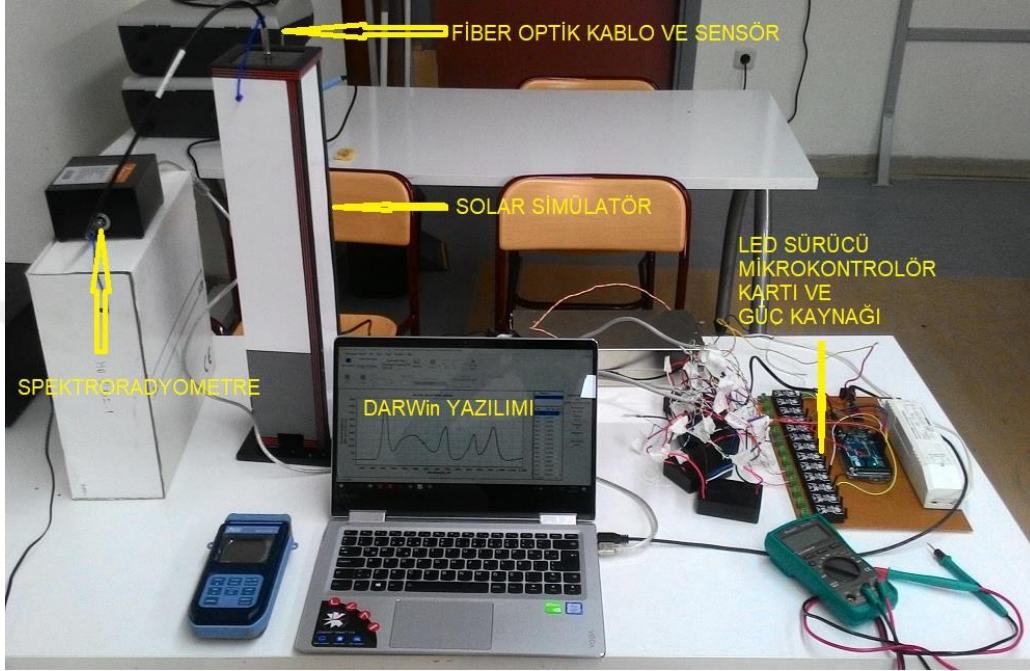


Şekil 3.39 LED'lerin alüminyum soğutucu üzerindeki dizilimi

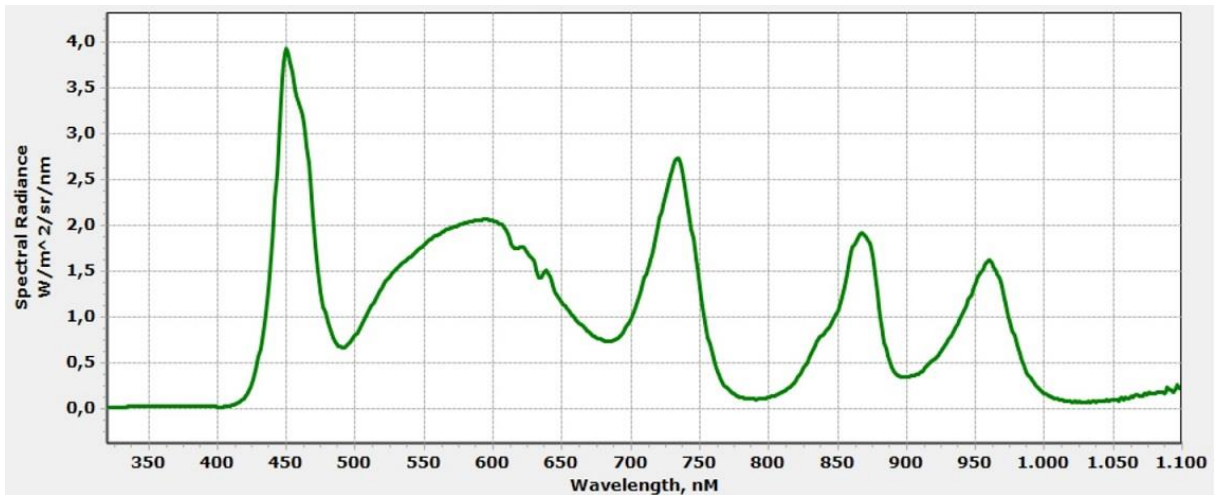
Alüminyum soğutucunun alt tarafına dört soğutucu fan eklenmiş ve ana kutunun içine yerleştirilmiştir. LED'ler, alüminyum soğutucu ve fanlar bir araya getirilmiş, kutunun iç tarafı daha sağlıklı dalga boyu ölçümü için bir ayna ile kapatılmıştır. Kullanılan LED'lerin gücü ve akımları dikkate alınarak uygun LED sürücüler seçilmiştir. LED sürücüler bir Arduino Mega 2560 mikrokontrolör ve yazılımı ile düzenlenmiştir, böylece istenen spektral değerlere ulaşılabilme imkânı olacaktır. Mikrokontrolör, LED sürücüler ve güç kaynağı birlikte ana kutunun alt kısmında tek bir güç ve kontrol devresi oluşturulmuştur.

Sistem bileşenleri birleştirildikten sonra, spektral eşleşme test edilmiştir. Bu testteki ölçümler Spectral Evolution SR-500 spektrometre ile yapılmıştır. Spektrometreye bağlanan fiber optik kablo aydınlatma alanı kutusu üzerindeki merkez noktaya 90 ° dik açıyla sabitlenmiştir. Spektral eşleşme test düzeneği, solar simülatör, bir SR-500 Spektrometre, bir fiber optik kablo ve DARWin SP yazılımını çalıştıran bir dizüstü bilgisayardan oluşturulmuştur (Şekil 3.40).

Ölçümlere göre, her bir LED'in kendine özgü dalga boyu vardır. Sıcak ve soğuk beyaz COB LED'ler ve mavi LED'ler ile 400-700 nm arasında dalga boyları elde edilmiştir. 700-850 nm dalga boyu kırmızı, 850 ile 1100 nm arası dalga boyu ise kızılötesi LED'ler ile elde edilmiştir.



Şekil 3.40 Spektral eşleşme ölçümü test düzeneği

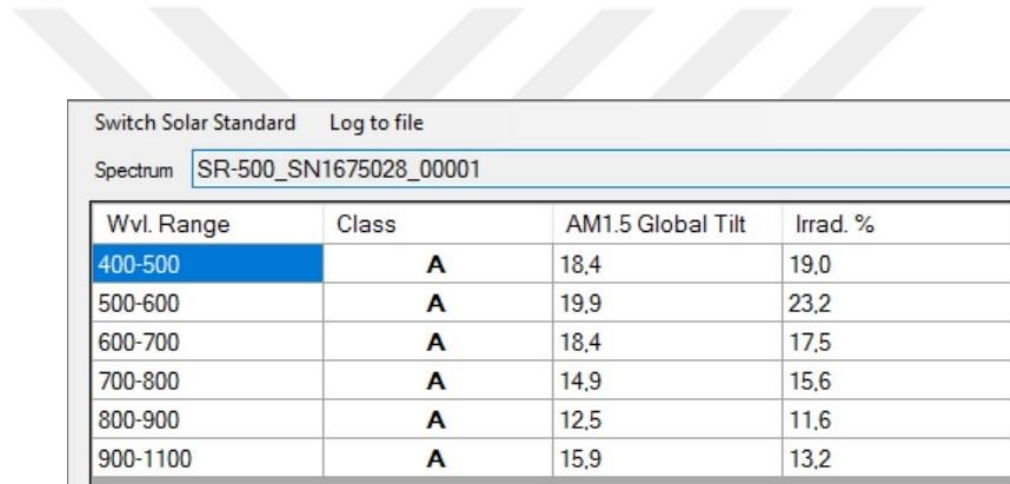


Şekil 3.41 Solar simülatör dalga boyu ölçüm sonuçları (yazılım ekran görüntüsü)

Spektroradyometre ile ölçülen (Şekil 3.41) ve hesaplanan AM 1.5 G spektral eşleşmenin karşılaştırması, Şekil 3.42'de verilmiştir. Bu nedenle, tüm dalga boyu aralıkları için elde edilen değerler Tablo 3.2' ye göre A sınıfını ifade etmektedir.

Tablo 3.2 İkinci prototip solar simülatör spektral eşleşme performansının sınıflandırılması

Spektral Eşleşme	ASTM	IEC	İkinci prototip solar simülatörde ölçülen değerler					
			400-500 nm	500-600 nm	600-700 nm	700-800 nm	800-900 nm	900-1100 nm
A Sınıfı	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25	1.03	1.16	0.95	1.04	0.92	0.83

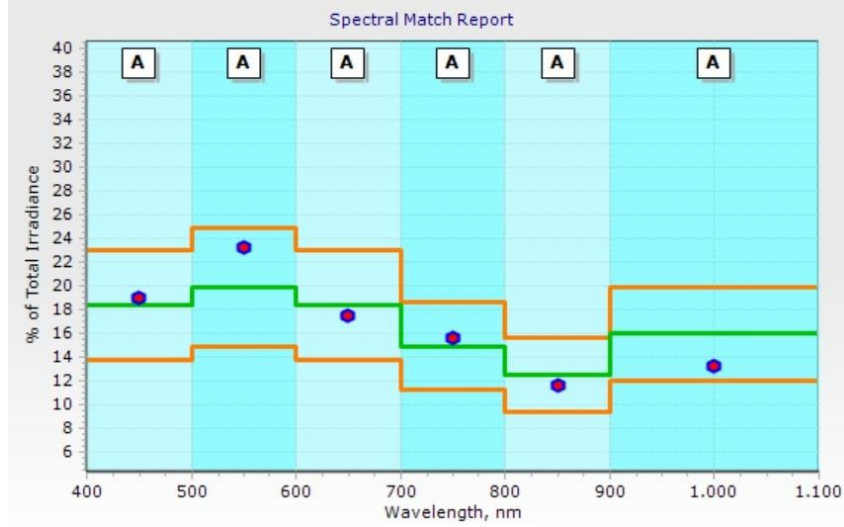


The screenshot shows the 'Switch Solar Standard' software interface. At the top, there are buttons for 'Switch Solar Standard' and 'Log to file'. Below them, the 'Spectrum' field is set to 'SR-500_SN1675028_00001'. The main part of the interface is a table with the following data:

Wvl. Range	Class	AM1.5 Global Tilt	Irrad. %
400-500	A	18,4	19,0
500-600	A	19,9	23,2
600-700	A	18,4	17,5
700-800	A	14,9	15,6
800-900	A	12,5	11,6
900-1100	A	15,9	13,2

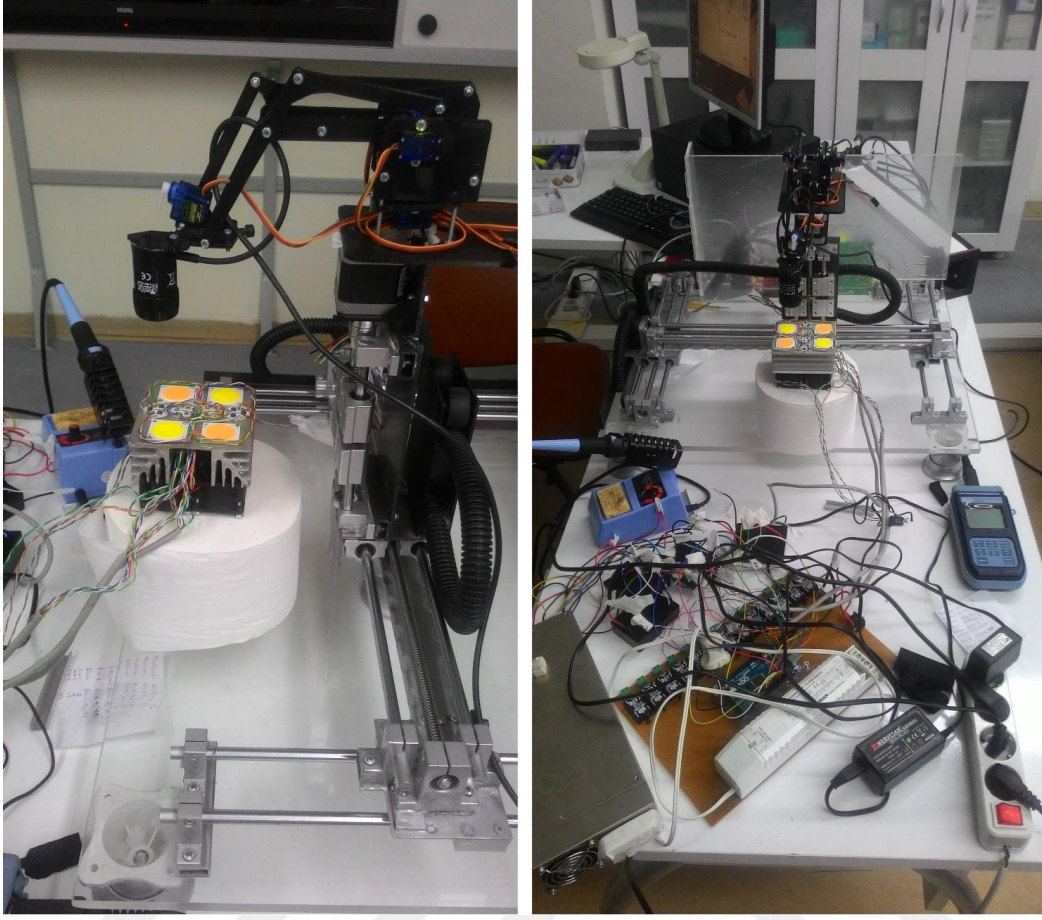
Şekil 3.42 İkinci prototip solar simülatör spektral eşleşme değerleri ekran görüntüsü

Şekil 3.43' te, turuncu çizgiler A Sınıfı aralığını göstermektedir ve noktalar ölçülen solar simülatör değerlerinin aralığını göstermektedir. 900-1100 nm dalga boyu aralığındaki spektral eşleşme değerinin A sınıfına rağmen sınırda olduğu tespit edilmiştir. Ancak gelecekteki çalışmalarda, kırmızı LED'lerin sayısında ve kombinasyonlarında uygun değişiklikler yaparak daha normal bir aralık elde etmek mümkün olacaktır.



Şekil 3.43 İkinci prototip solar simülatörün spektral eşleşme grafiği

IEC 60904-9 standartlarına göre PV modüllerini test etmek için geniş alanlı bir güneş simülatörünün test yüzeyindeki uzamsal uyumsuzluk, test odası veya test aparatının içindeki yansıma koşullarına bağlıdır. Bu nedenle genelleme yapılamaz ve her sistem için uzamsal uyumsuzluk değerlendirilmez. Belirlenen test alanı en az 64 eşit boyutta (alana göre) test pozisyonuna bölünmelidir. Maksimum homojenlik dedektör boyutu, 64'e bölünen belirlenmiş test alanının minimum değeri olacaktır. Dedektör ölçümlerinin kapsadığı alan, belirlenen test alanının % 100'ü olmalıdır. Ölçüm pozisyonları belirlenmiş test alanı üzerine eşit olarak dağıtılmalıdır. Bu uygulamada IEC 60904-9 standartlarında belirtilen koşullara göre test düzeneği oluşturulmuş ve test alanı 64 eşit parçaya bölünmüştür. Bunu sağlayabilmek için ölçü aleti tasarlanmış bir X-Y koordinatlı robot kola monte edilmiştir. Ölçüm aralıkları bilgisayar yazılımı aracılığıyla belirlenmiştir. Ölçüm kapalı kutu içinde yapılmasına rağmen Şekil 3.44'te görsellik açısından yüzey alanı açık şekilde gösterilmiştir.

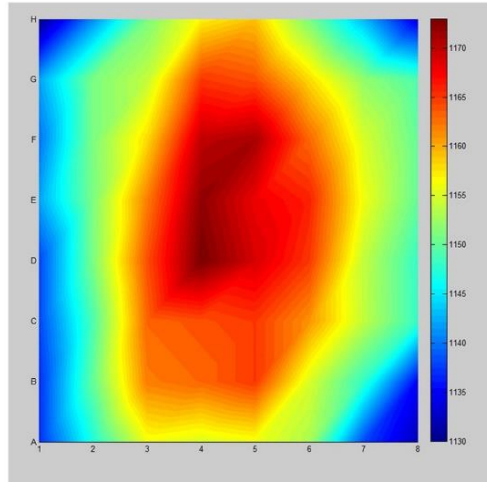
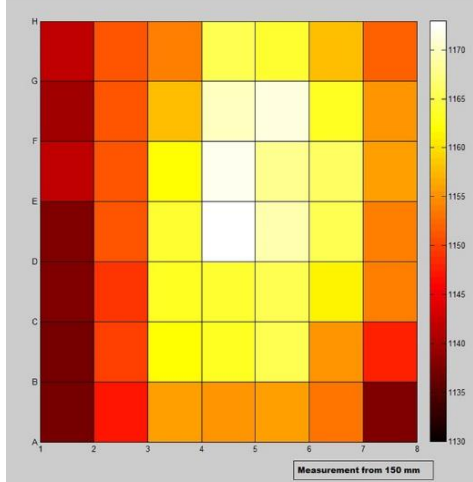
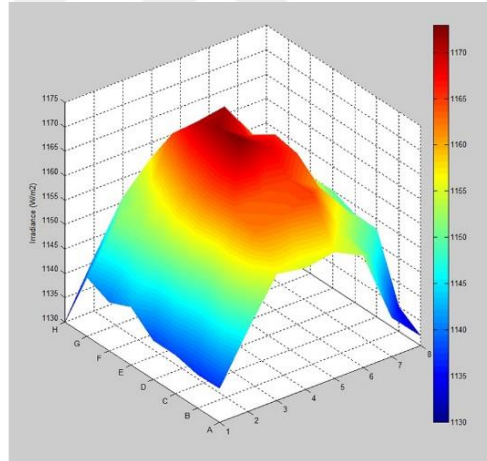
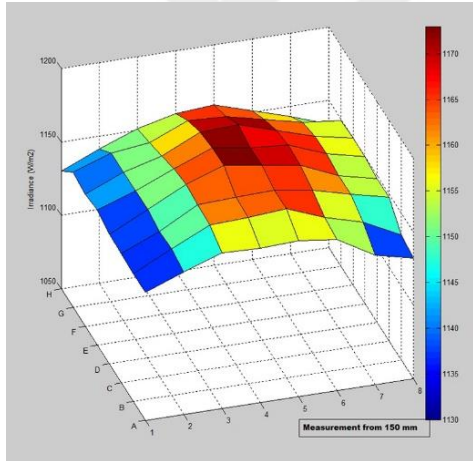


Şekil 3.44 Uzamsal uyumsuzluk test düzeneği

Bu test homojenite ve ışınlım şiddeti farklarını görebilmek için iki ayrı mesafede yapılmıştır. İlk ölçümde ölçüm alanı ve ölçü aleti arası mesafe 150 mm, ikinci ölçümde ise 200 mm olarak belirlenmiştir. 150 mm'den yapılan ölçümde maksimum ışınlım değeri 64 eşit alandan D4 hücresinde 1173 W/m^2 olarak görülmüştür. Minimum ışınlım değeri ise A8 hücresinde 1130 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Detaylı değerler Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Şekil 3.45'te 150 mm ile ölçülen uyumsuzluk (non- uniformity) yüzey grafikleri görülmektedir.

Tablo 3.3 150 mm mesafeden ölçülen 64 hücrede ışıınım (W/m^2) değerleri

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1137	1147	1156	1155	1156	1153	1138	1132
2	1137	1150	1162	1163	1165	1155	1148	1135
3	1138	1149	1163	1164	1165	1161	1154	1148
4	1138	1151	1164	1173	1169	1165	1154	1148
5	1142	1151	1162	1172	1168	1166	1156	1150
6	1140	1151	1158	1170	1171	1163	1155	1150
7	1142	1151	1154	1165	1164	1158	1152	1149
8	1130	1141	1151	1157	1159	1151	1143	1134



Şekil 3.45 150 mm'den uzamsal uyumsuzluk için ışıma (W/m^2) ölçümü

200 mm mesafeden yapılan ölçümde ise maksimum ışıınım değeri yine D4 hücresinde 1027 W/m², minimum ışıınım değeri A8 hücresinde 995 W/m²'dir. Tüm hücrelerdeki ışıınım şiddetleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

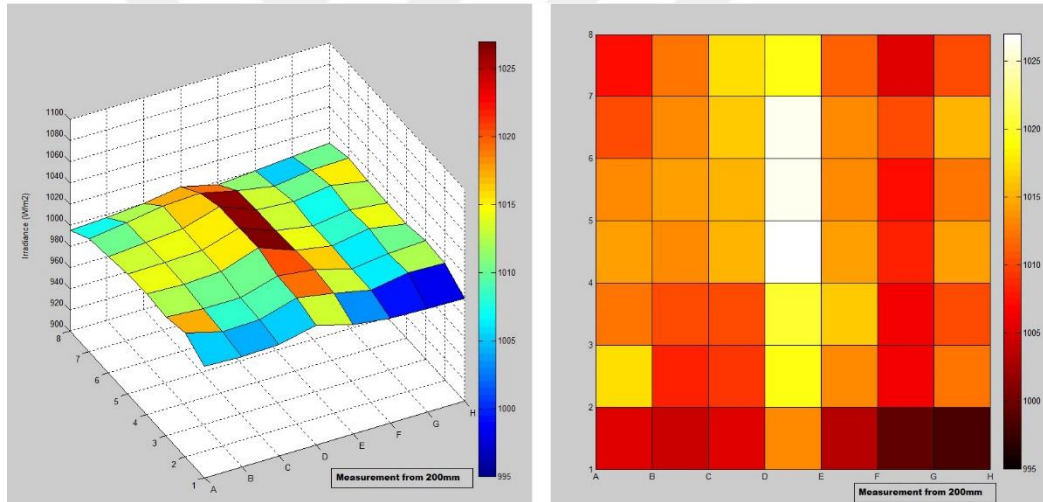
Tablo 3.4 200 mm mesafeden ölçülen 64 hücrede ışıınım şiddeti (W/m²) değerleri

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1005	1004	1005	1013	1003	999	998	997
2	1017	1008	1009	1019	1013	1006	1012	1011
3	1012	1010	1010	1020	1016	1006	1010	1012
4	1014	1013	1015	1027	1014	1008	1014	1008
5	1013	1014	1015	1026	1013	1007	1012	1008
6	1010	1016	1016	1026	1013	1010	1015	1009
7	1007	1012	1017	1019	1011	1005	1010	1011
8	995	997	1000	1005	997	1000	1003	1005

Şekil 3.46'da 200 mm'den ölçülen uzamsal uyumsuzluk (spatial non- uniformity) yüzey grafikleri görülmektedir. 150 mm'den yapılan ölçümlerde ışıınım şiddetinin 200 mm'ye göre daha fazla olduğu, buna karşın homojenitenin 200 mm'de yapılan ölçümlere kıyasla küçük de olsa daha başarısız olduğu görülmüştür. 150 mm'den yapılan ölçümde uyumsuzluk değeri Denklem 2.8 ile hesaplanarak %1.867 bulunmuştur ve Tablo 3.5'e göre A sınıfı değerini vermektedir. 200 mm'den yapılan ölçümlerde ışıık şiddetinin daha az olduğu, buna karşın homojenitenin 150 mm'den yapılan ölçümlere kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür. 200 mm'den yapılan ölçümde uzamsal uyumsuzluk değeri %1.582 dir ve Tablo 3.5'e göre A sınıfı değerini vermektedir.

Tablo 3.5 İkinci prototip solar simülatör uzamsal uyumsuzluk performansının sınıflandırılması

Uzamsal Uyumsuzluk	ASTM	IEC	Mesafe	Hesaplanan Uzamsal Uyumsuzluk	Ölçülen minimum ışıma	Ölçülen maksimum ışıma
A sınıfı	$\leq 3\%$	$\leq 2\%$	150 mm	%1.867	1130 W/m ²	1173 W/m ²
			200 mm	%1.582	995 W/m ²	1027 W/m ²



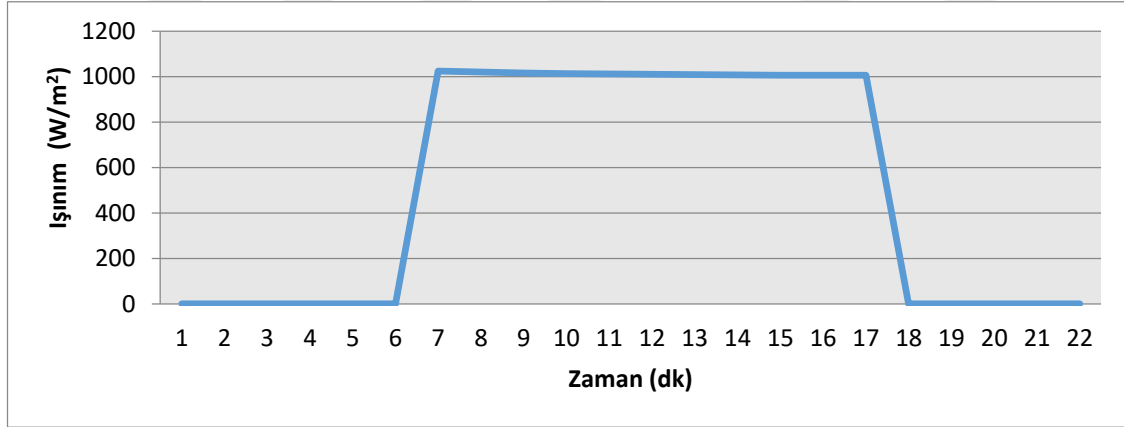
Şekil 3.46 200 mm'den uzamsal uyumsuzluk için ışıma şiddeti (W/m²) ölçümü

Solar simülatör performans kriterlerinin üçüncüsü de zamansal istikrarsızlıktır. Bu kriterin hesaplanmasında yine Denklem 2.8'deki formül kullanılır. Fakat, buradaki E_{max} ve E_{min} değerleri belirli zaman aralıkları boyunca tek noktada ölçülür. IEC 60904-9 standartlarına göre hem uzun vadeli zamansal istikrarsızlık hem de kısa vadeli zamansal istikrarsızlık değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu çalışmada her iki değerlendirme de yapılmıştır.

Bu çalışmada ilk olarak uzun vadeli test yöntemi kullanılmıştır. 10 dakika boyunca solar simülör kesintisiz olarak çalıştırılmıştır. Çalışma süresince ilk dakikadan itibaren her dakika başı ışı nım şiddeti ölçülmüştür. İlk anda ölçülen ışı nım değ erinin 1024 W/m^2 , 10. dakikada ölçülen ışı nım değ erinin ise 1006 W/m^2 oldu ğ u görülmüştür. Bu değ erlere göre uzun vadeli zamansal istikrarsızlık değ eri %0,91 olarak hesaplanmıştır. Bu değ er Tablo 3.6'ya göre A sınıfına denk düş mektedir. Ölçüm sonuçlarının grafi ğ i Ş ekil 3.47'de verilmiştir.

Tablo 3.6 İkinci prototip uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları

Zamansal İstikrarsızlık	ASTM	IEC	Hesaplanan Zamansal İstikrarsızlık	Ölçülen minimum ışı nım	Ölçülen minimum ışı nım
A sınıfı	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$	%0,91	1006 W/m^2	1024 W/m^2

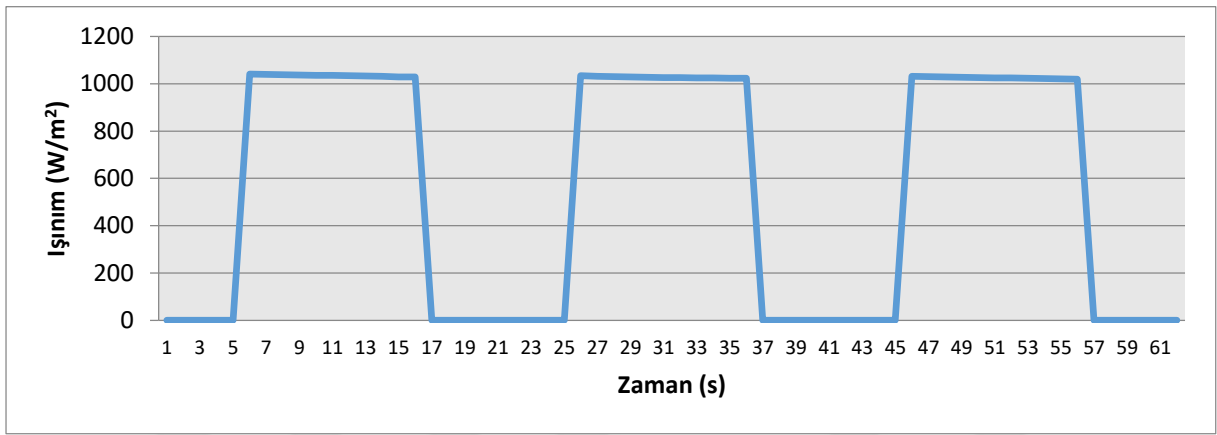


Ş ekil 3.47 İkinci prototip uzun vadeli istikrarsızlık testi grafi ğ i

Uzun vadeli ölçümden sonra kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testine geçilmiştir. Bu testte solar simülör 10 s'lik pulse (darbe) ile çalıştırılmıştır. Ölçülen değ erler Tablo 7'de gösterilmiştir. Bu ölçümlere göre bulunan kısa vadeli istikrarsızlık değ erleri % 0.58, %0.58 ve % 0.59 olmuştur. Bulunan bu değ erler Tablo 3.7'deki değ erlere göre A sınıfıdır. Ölçüm sonuçlarının grafi ğ i Ş ekil 3.48'de verilmiştir.

Tablo 3.7 İkinci prototip kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları

Zamansal İstikrarsızlık	ASTM	IEC	Darbe	Hesaplanan Zamansal İstikrarsızlık	Ölçülen Minimum Işıma	Ölçülen Maksimum Işıma
A sınıfı	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$	1	% 0.58	1028 W/m ²	1040 W/m ²
			2	% 0.58	1022 W/m ²	1034 W/m ²
			3	% 0.59	1020 W/m ²	1031 W/m ²



Şekil 3.48 İkinci prototip kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları

Bu bölümde verimli ve düşük maliyetli bir AAA sınıfı solar simülatör tasarlanması amaçlanmıştır. Solar simülatörlerde kullanılan tüm ışık kaynakları incelendikten sonra en uygun ışık kaynağının LED olduğu görülmüştür. Düşük maliyet, uzun ömür, düşük enerji tüketimi, kompaktlık ve ayarlanabilir spektrum gibi özelliklerinden dolayı ışık kaynağı olarak LED kullanılmıştır. Yukarıda sayılan özelliklerinden dolayı LED'ler geleneksel ışık kaynaklarına göre oldukça avantajlıdır. Ayrıca, LED'ler çeşitli mikrodenetleyiciler yardımıyla sürülebildikleri için spektrumları kontrol edilebilmektedir. IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında bir solar simülatörde olması gereken performans kriterleri açıkça belirtilmiştir. Fotovoltaik panel testleri 1000 W/ m² ışık şiddetine sahip bir solar simülatör ile 25 °C'de yapılmalıdır. Testi gerçekleştirecek olan solar simülatörün spektral eşleşme (Spectral Match), Uzamsal uyumsuzluk (Spatial Non-uniformity) ve Zamansal İstikrarsızlık (Temporal Instability) kriterlerindeki performansa göre sınıfı belirlenmelidir. (A,B ya da C) Bu bölümde geliştirilen ikinci prototip solar simülatör üç kriteri de A sınıfı

düzeyinde sağlamış ve AAA sınıfı sıfatını almıştır. Işık kaynağı olarak LED kullanılmasının bir avantajı da çok farklı renkte LED'e ihtiyaç duymadan sadece 6 farklı dalga boyu ile performans kriterlerinin sağlanmış olmasıdır. Soğuk ve sıcak beyaz dalga boyu için COB LED'ler, mavi (470 nm), kırmızı (721 nm) ve infrared (850 ve 940 nm) dalgaboyları için ise power LED'ler tercih edilmiştir. Spektrometre ile elde edilen spektral eşleşme değerleri şöyledir: 400-500 nm için 1.03, 500-600 nm için 1.16, 600-700 nm için 0.95, 700-800 nm için 1.04, 800-900 nm için 0.92 ve 900-1100 nm için 0.83. Böylece fotovoltaik cihaz testi için tasarlanan solar simülatörler, altı dalga boyundaki LED'leri kullanarak A sınıfı spektral eşleşmeyi sağlayabilir. Diğer iki kriterden biri olan uzamsal uyumsuzluk, geliştirilen bu solar simülatörde A sınıfı düzeyindedir. 150 mm'den yapılan ölçümlerde % 1,867 200 mm'de yapılan ölçümlerde % 1,582 uzamsal uyumsuzluk değerleri elde edilmiştir. %2 ve daha düşük değerler bu kriterde A sınıfıdır. Son kriter olan zamansal istikrarsızlık IEC 60904-9 standartlarına göre uzun ve kısa vadeli olmak üzere iki şekilde ölçülmüştür. Bu testte elde edilen değerlerin de yine %2'den küçük olduğu, dolayısıyla A sınıfına denk geldiği görülmektedir.

Yapılan ikinci prototip uygulama ile;

- LED'lerin fotovoltaik panel testlerinde kullanılmak üzere tasarlanan solar simülatörler için uygun ve verimli bir ışık kaynağı olduğu,
- LED'lerin solar simülatör üretiminde maliyeti düşürdüğü,
- LED'ler ile solar simülatörlerde spektrum kontrolünün kolaylıkla yapılabildiği,
- LED'lerin düşük enerji tüketimi, ısınma probleminin olmaması ve uzun ömrü ile solar simülatörlerde tercih edilebileceğini,
- LED'ler ile yapılan solar simülatörlerde IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında belirtilen 1000 W/m² ışık şiddetinin elde edilebildiği,
- LED'ler ile yapılan solar simülatörlerde IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında belirtilen üç performans kriteri spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık'ın A sınıfı düzeyinde elde edilebildiği ortaya konulmuştur.

Yapılan tüm bu deneysel çalışmalar ve prototiplerden elde edilen olumlu sonuçlardan sonra dördüncü bölümde LED ışık kaynağı dizilimi simetrik olarak çoğaltılıp, yeni sayıya uygun LED ve sürücü kartı geliştirilerek ve uygun fiziksel gövde oluşturularak, solar simülatör panel bazlı teste uygun hale getirilmiştir.

4. TEZ ÇALIŞMASI

Bu bölümde tez çalışmasının ana konusu olan fotovoltaik panel testlerini gerçekleştirmek için tasarlanan spektrum kontrollü, aktif soğutmalı AAA sınıfı solar simülatör aşamaları ve oluşumu sunulmuştur.

Solar simülatörün tasarlanmasına başlamadan önce yapılan prototip çalışmalarının test sonuçları irdelenmiş, fotovoltaik hücre boyutunda elde edilen kazanımların fotovoltaik panel bazında da elde edilebilmesi için yaklaşım geliştirilip, fiziksel yapı oluşturulmuş performans kriterleri için ölçümler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Solar Simülatör Tasarım ve Ürün Geliştirme Aşamaları

Solar simülatörün tasarımına geçilirken ilk adım, panel bazlı test gerçekleştirilebilecek bir aydınlatma alanı oluşturmak olmuştur. Bunun için LED sayıları ikinci prototip çalışmasına göre orantılı olarak artırılmış ve yerleşimleri simetrik olarak dağıtılmıştır. Gerekli çizimler yapıp modüler bir LED baskı devresi meydana getirilmiş, LED'ler hassas ve uzun bir çalışma sonrası kartlara monte edilmiştir. Bu modüler kartlar tez çalışmasının özgün bileşenlerinden biridir. Daha sonra bu adımı aktif soğutma sistemi boruları döşenmiş olan alüminyum soğutuculara kartların sabitlenmesi takip etmiştir. LED'lerin beslemesi için kartlar üzerinde bulunan giriş noktalarına soketler takıldıktan sonra LED'ler için en uygun LED sürücü sayısı belirlenip sürücü devre kartları oluşturulmuştur. Bu devre kartları da yeni bir tasarım olup özgün bir çalışmadır. Alüminyum sigma profiller ile meydana getirilen sistem gövdesinde tüm bileşenler biraraya getirildikten sonra tez çalışmasının bir başka özgün tarafı olan aktif soğutma sistemi solar simülatöre entegre edilip, sistem gövdesi kapatılmış ve solar simülatör performans kriterleri testine hazır hale gelmiştir. Aşağıda tasarım ve ürün geliştirmenin tüm aşamaları detaylı olarak verilmiştir.

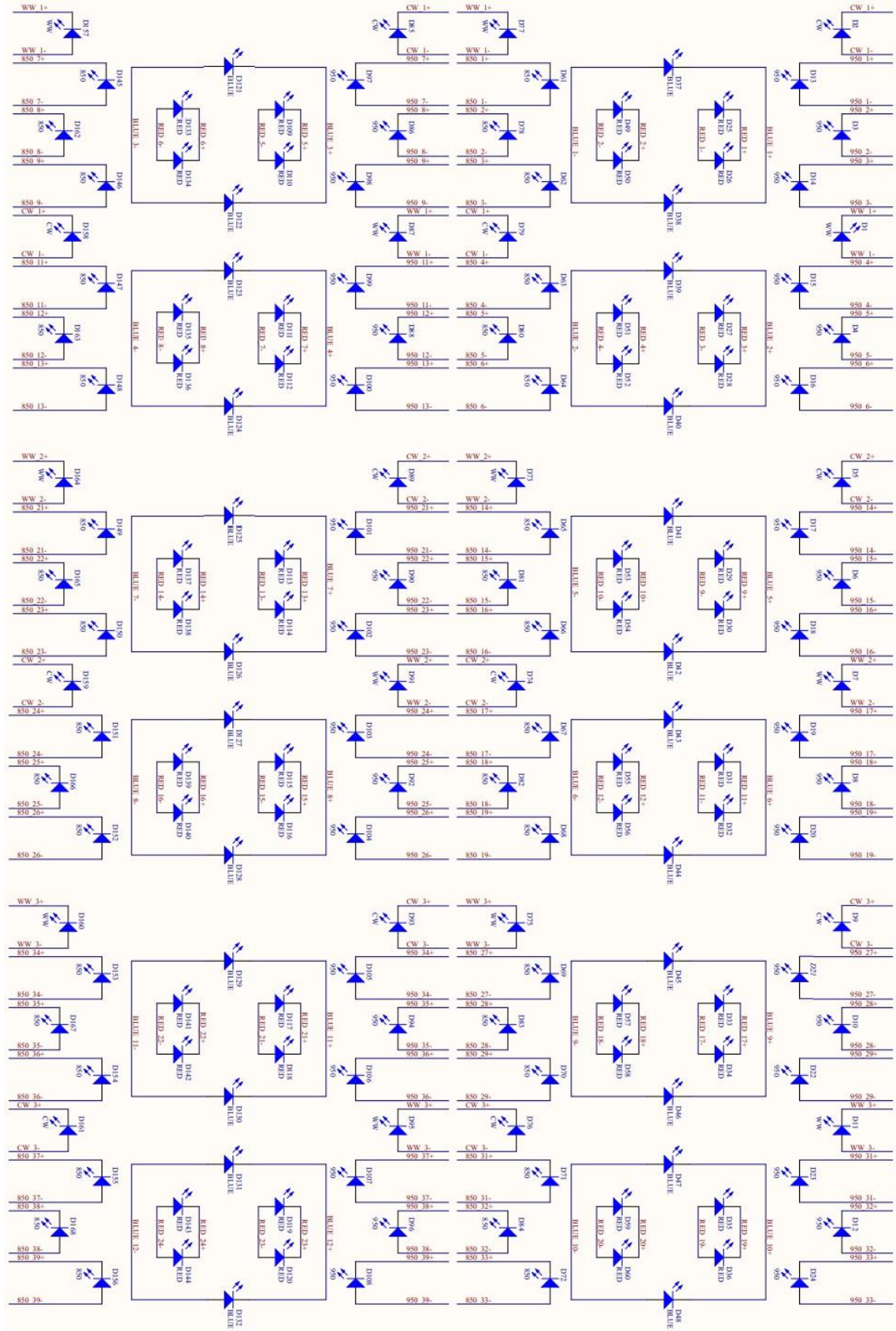
4.1.1. LED baskı devresinin oluşturulması

Son prototipte elde edilen sonuçlar başarılı olduğundan prototipteki LED dizilimi simetrik bir şekilde artırılarak alanı genişletilmiştir. Son çalışmadan farklı olarak, kırmızı LED sayısı iki katına çıkarılmış, mavi LED sayısı ile yarıya düşürülmüştür. Bunun sebebi, hücre bazında solar simülatörün performans sonuçlarında A sınıfı değerinin, kırmızı LED'ler tam güçte, mavi LED'ler ise yarı güçte sürülürken elde edilmiş olmasıdır. Bu iyileştirme yapıldıktan sonra yeni yerleşim düzenine göre baskı devre kartı tasarlanmıştır. Devre şeması

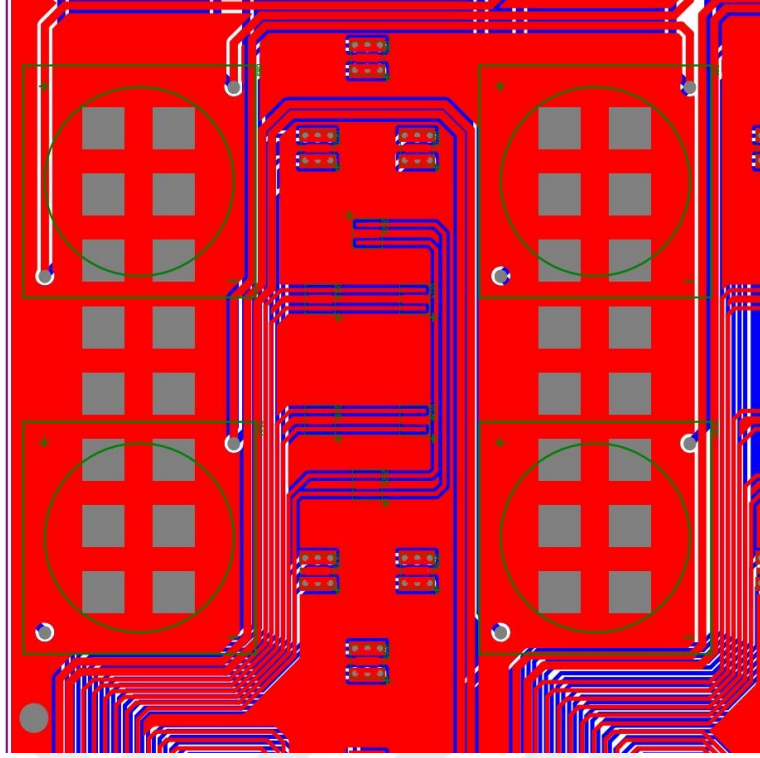
oluşturulurken kıızılötesi LED'ler tek, kırmızı ve mavi LED'ler ikili, soğuk ve sıcak beyaz LED'ler dörüü olarak paralel beslenmesi gözönünde bulundurulmuştur (şekil 4.1).

Altium Designer programı ile hazırlanan baskı devre şeması devrenin kompleks yapısından dolayı çift taraflı PCB'ye basılmıştır (şekil 4.2). şekilde kırmızı yollar ve mavi yollar ayrı katmanları sembolize etmektedir. Kartın iki katmanı arasına ise LED'lerin termal ped ayaklarına denk gelecek şekilde soğutucu bir tabaka yerleştirilmiştir. Kolay çalışmayı sağlamak ve modüler bir tasarım için kartlar 11 x 55 cm'lik ölçüler halinde üretilip biraraya getirilmiştir (şekil 4.3). Her bir karttaki LED'lerin enerji uçları kartın kenarlarına soket takılacak şekilde konumlandırılmıştır.

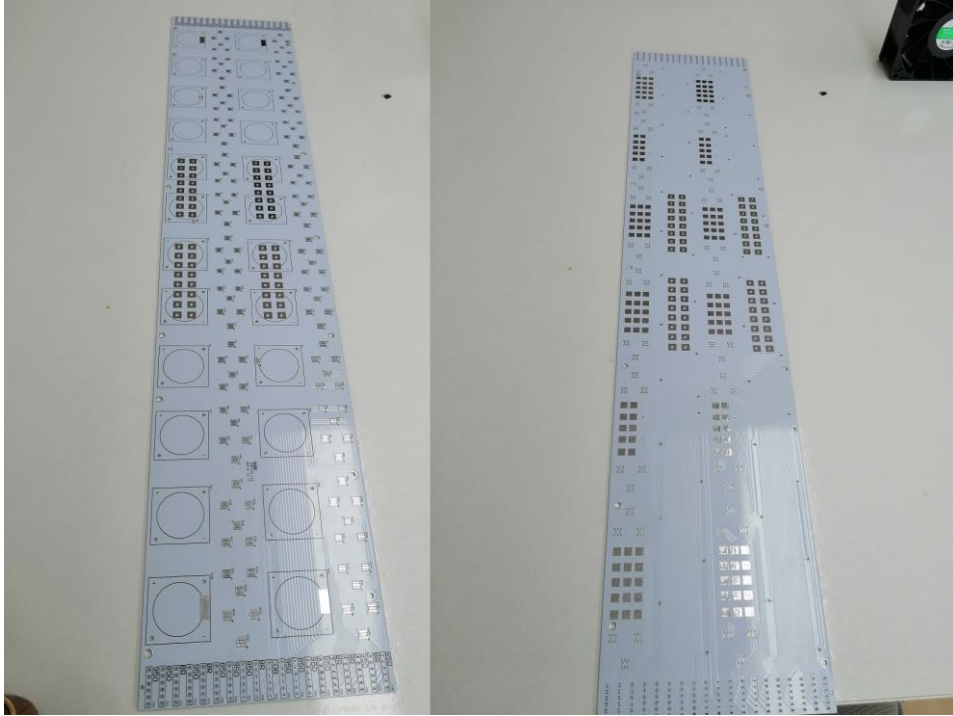




Şekil 4.1 LED devre şeması



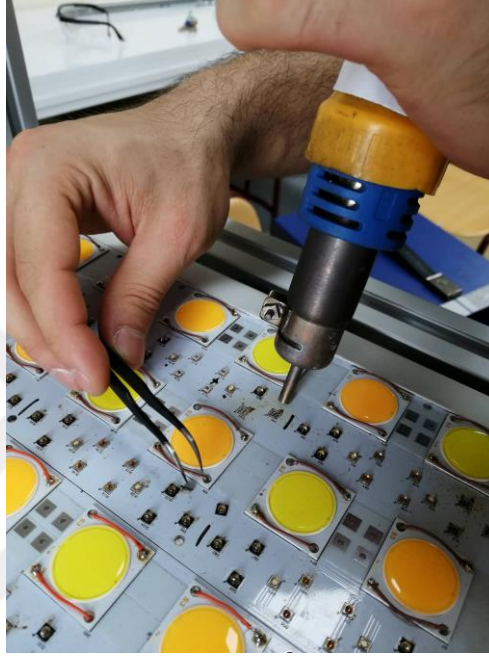
Şekil 4.2 PCB katmanlarını gösteren kart detayı



Şekil 4.3 Baskı devre kartının ön ve arka tarafının fiziksel yapısı

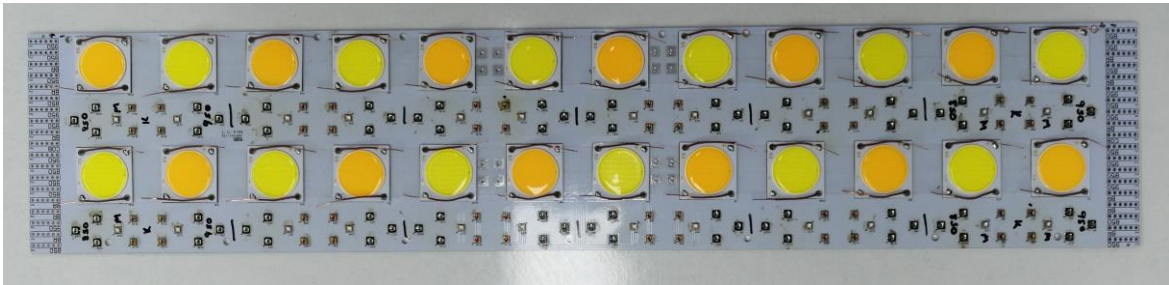
4.1.2. LED'lerin PCB'ye montajı

Baskı devre kartının üretimi gerçekleştirildikten sonra her bir karta 12 adet soğuk beyaz, 12 adet sıcak beyaz 36 adet 940 nm, 36 adet 850 nm, 24 adet kırmızı ve 12 adet mavi LED montajı yapılmıştır. Power LED'lerin ölçüleri çok küçük olduğundan montajı büyüteç altında sıcak hava üfleyen lehim tabancası ile özenle gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te power LED montajına dair örnek bir görüntü verilmiştir.



Şekil 4.4 Power LED montajı

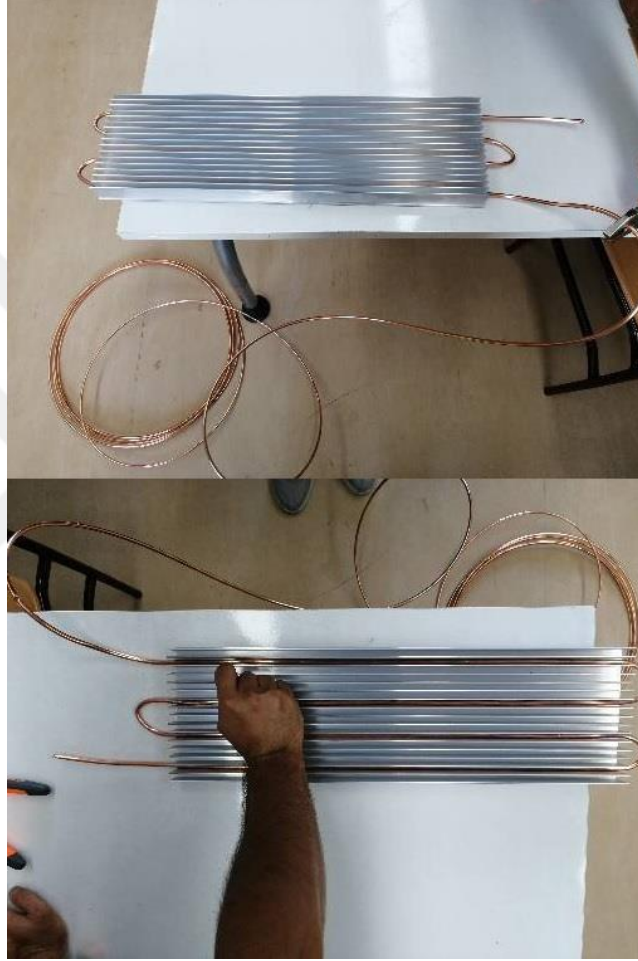
COB ledlerin montajı ise PCB üzerine kaplanan termal bantlar aracılığı ile yapılmıştır. COB LED'lerin enerji uçları üst köşelerinde olduğundan ve tabanları tamamen soğutucu yüzey olduğundan bu yöntem tercih edilmiştir. Şekil 4.5'te LED montajı tamamlanmış bir PCB kartı görülmektedir.



Şekil 4.5 LED montajı tamamlanmış PCB

4.1.3. Soğutucuların montajı ve bakır boru yerleşimi

Alüminyum soğutucuların ticari üretim ölçüleri tek parça olmasına izin vermediğinden 19 x 55 cm ölçülerinde 3 parça olarak tasarlanmıştır. Soğutuculara ek olarak soğutucu fanlar konulmasına rağmen daha güçlü ve kontrollü soğutma yapabilmek için düzeneğe aktif soğutma sistemi entegre edilmiştir. Bu yüzden, bu aşamada alüminyum soğutucular bir araya getirildikten sonra alt kanallarının arasına bakır boru döşenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Bakır boruların döşenmesi

Bakır döşeme işlemi bittikten sonra borular fiziki yapıya göre tekrar kesilip, kaynak yapıp gerekli eklemeler sağlandıktan sonra son halini almıştır (Şekil 4.7) Bu bakır boruların uçları tüm fiziksel yapı oluşturulduktan sonra aktif soğutma sistemine kaynak yapıp bağlanmıştır.



Şekil 4.7 Bakır boru döşenmiş soğutucu

4.1.4. PCB’lerin soğutucu üzerine montajı

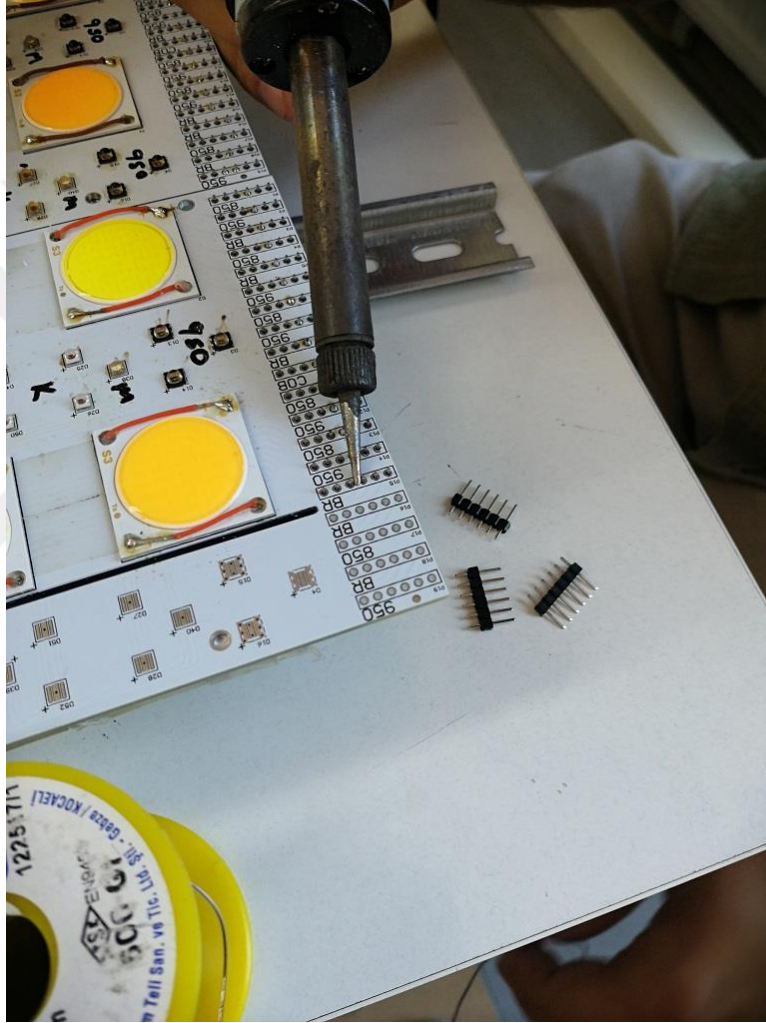
LED montajı biten 6 adet PCB, aralarında boşluk kalmayacak şekilde alüminyum soğutucular üzerine yerleştirilip monte edilmiştir. Montaj için yüksek kaliteli termal bant kullanılmıştır. Bu montaj gerçekleştirilirken PCB’lerdeki soket uçlarının boşta kalmasına dikkat edilmiştir. Süreç Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 PCB'lerin soğutucu üzerine montajı

4.1.5. PCB'lerin soketlerinin montajı

LED PCB'lerinin montaj aşaması geçildikten sonra LED enerji soketlerinin montajı yapılmıştır. Bu kısımda 2,54 mm tunik erkek konnektör kullanılmıştır. Bunun sebebi PCB tasarımı yapılırken üretimin bu soketlere göre gerçekleştirilmiş olmasıdır. Soketler karta 6'şarlı kesilip lehimlenerek monte edilmiştir (Şekil 4.9).

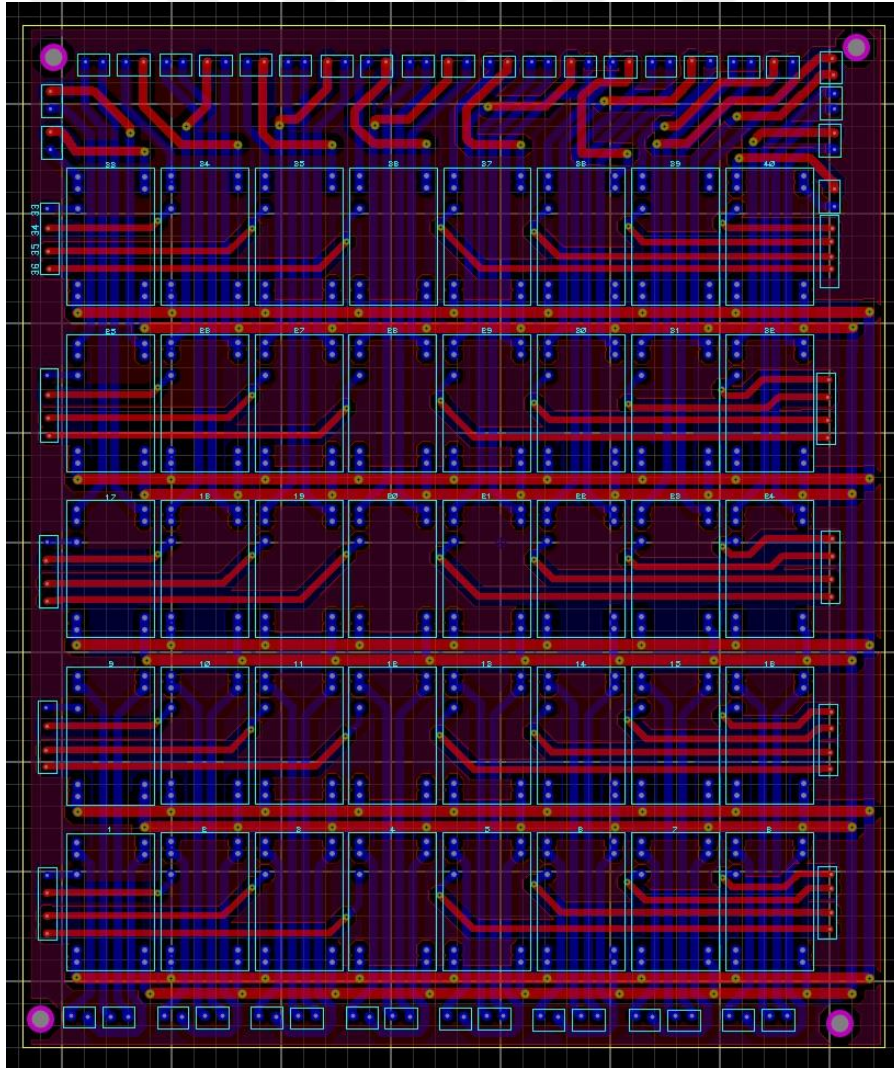


Şekil 4.9 Soketlerin montajı

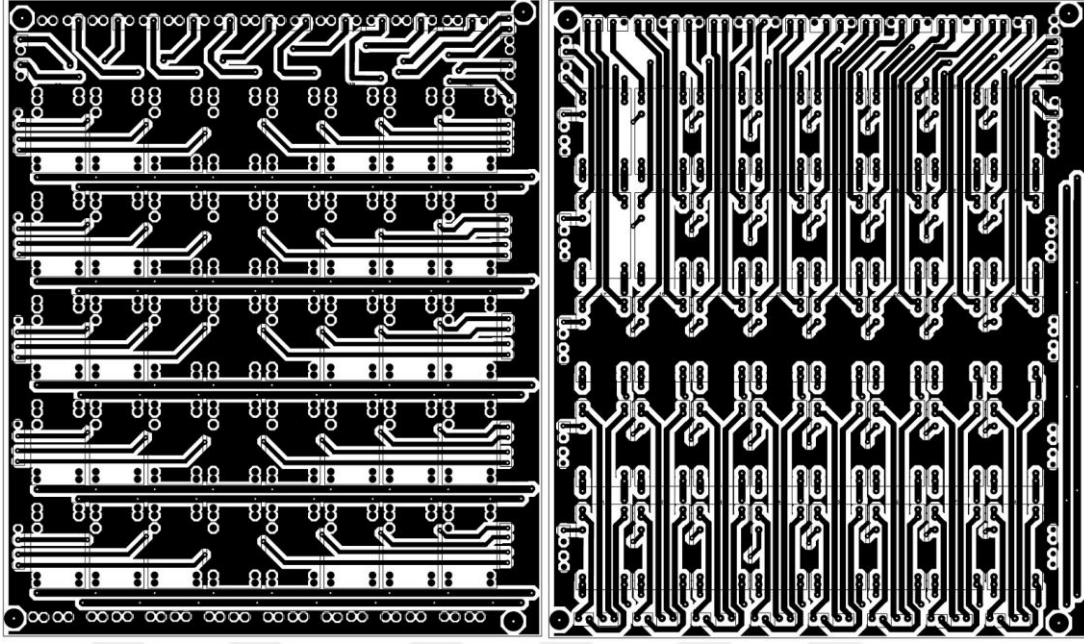
4.1.6. Power LED sürücü baskı devresinin oluşturulması

Power LED sürücü baskı devresi tasarlanırken piyasadaki kartların ölçüleri gözönüne alınarak her bir kartta 40 adet sürücü olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Tasarım yapılırken sürücülerin devresinden dolayı çift katmanlı bakır plakette tercih edilmiştir. Sürücülerin bacak aralıkları ve kendi boylarının ölçümü yapıldıktan sonra Proteus programı ile çizimi yapılmıştır (Şekil 4.10). Çizim yapılırken fiziksel yapıda kolay bağlantı yapabilmek için sürücülerin PWM uçları kartın sağına ve soluna, enerji çıkış uçları ise kartın alt ve üstüne çıkarıldı. Yüksek akım çektiğinden dolayı sürücülerin giriş uçları diğer yollara kıyasla daha kalın hale getirildi. Çizimde mavi ve kırmızı yollar ayrı katmanları göstermektedir.

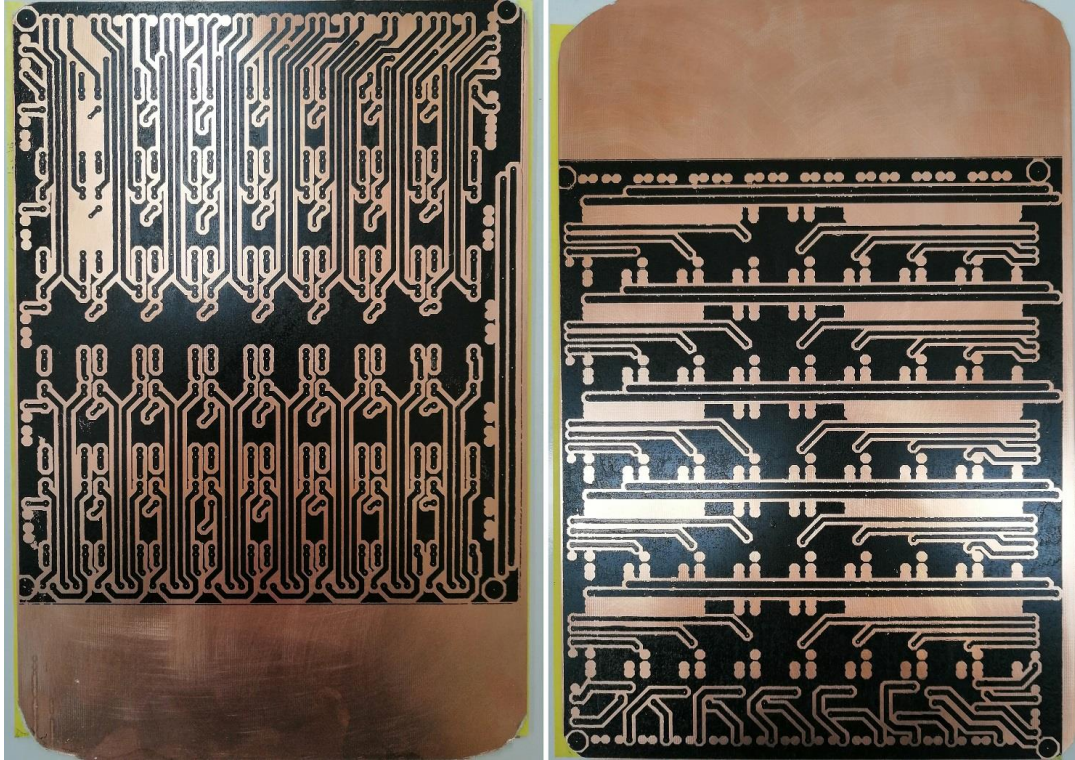
Kartın programda çizimi bittikten sonra her iki katmanının da çıktısı şeffaf asetat kağıdına alınarak devre çizimi bakır plakete ısı yoluyla transfer edilmiştir (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12).



Şekil 4.10 Power LED sürücü kartı çizimi



Şekil 4.11 Sürücü devresinin kağıda aktarılmış hali



Şekil 4.12 Sürücü devresinin bakır plakete aktarılmış hali

Devre çiziminin transfer edildiği bakır plakeler kimyasal işlemlerden geçirilerek devre elde edilmiştir. Temizlenen plakelerin bakır yolları kalay solüsyonu ile kaplanarak iletkenlikleri artırılmıştır (Şekil 4.13). Daha sonra mini matkap ile delinen plakelerin katman arası lehimlemeleri yapılmıştır. Bu işlem sonrasında power LED'lerin sürücüleri yerlerine yerleştirilip lehimleri yapılmış ve soketler lehimlenmiştir (Şekil 4.14).



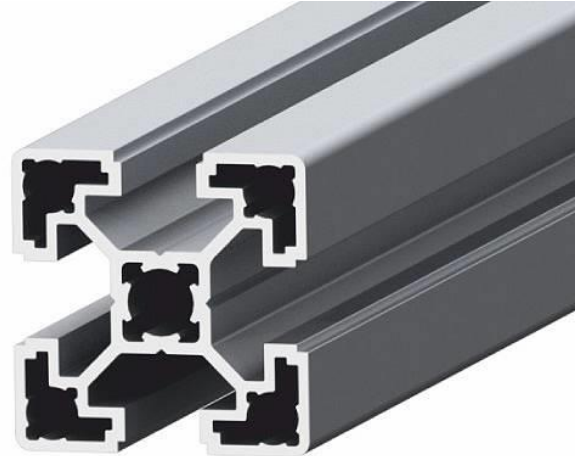
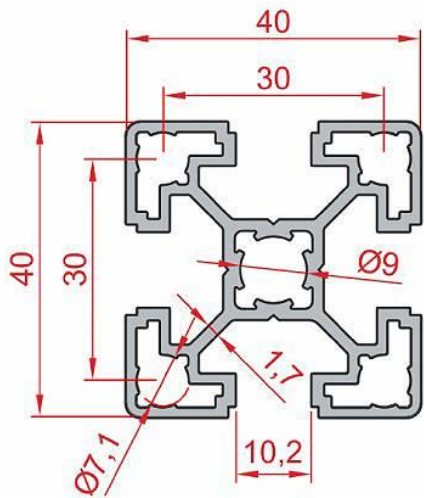
Şekil 4.13 Sürücü kartlarının kimyasal işlemleri



Şekil 4.14 (a) Sürücü kartlarının delinmesi, (b) Sürücü kartlarının lehimlenmesi, (c) Sürücülerin karta montajı

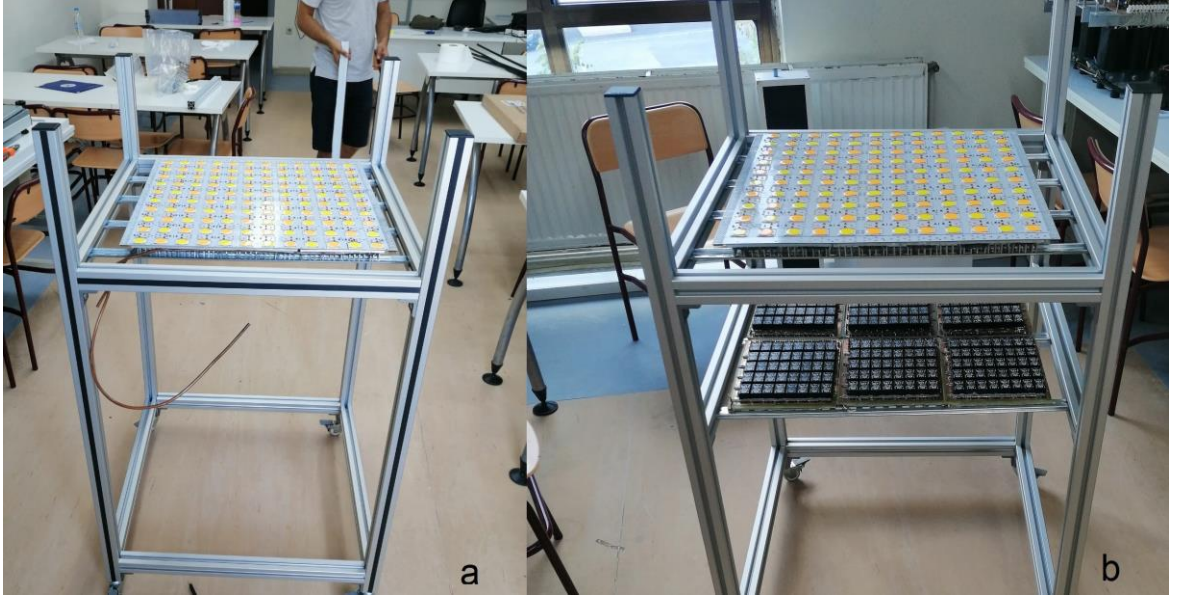
4.1.7. Sistem gövdesinin oluşturulması

Solar simülatörün ana gövdesini oluşturan ve tüm bileşenleri içinde barındıracak olan yapı, sağlamlığı, hafifliği ve kolay şekil verilebilmesi gibi özellikleri göz önüne alınarak modüler sisteme elverişli olan alüminyum sigma profilden üretilmiştir. Günümüzde yaygın olarak tercih edilen alüminyum sigma profiller, makine imalatında, endüstriyel otomasyon sistemlerinde ve raf sistemleri gibi birçok değişik alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada sistem için optimum düzeyde olan 40 x 40 mm hafif sigma alüminyum kullanılmıştır. Şekil 4.15'te kullanılan sigma profilin kesit örneği ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 4.15 Sigma profil kesiti ve ölçüleri

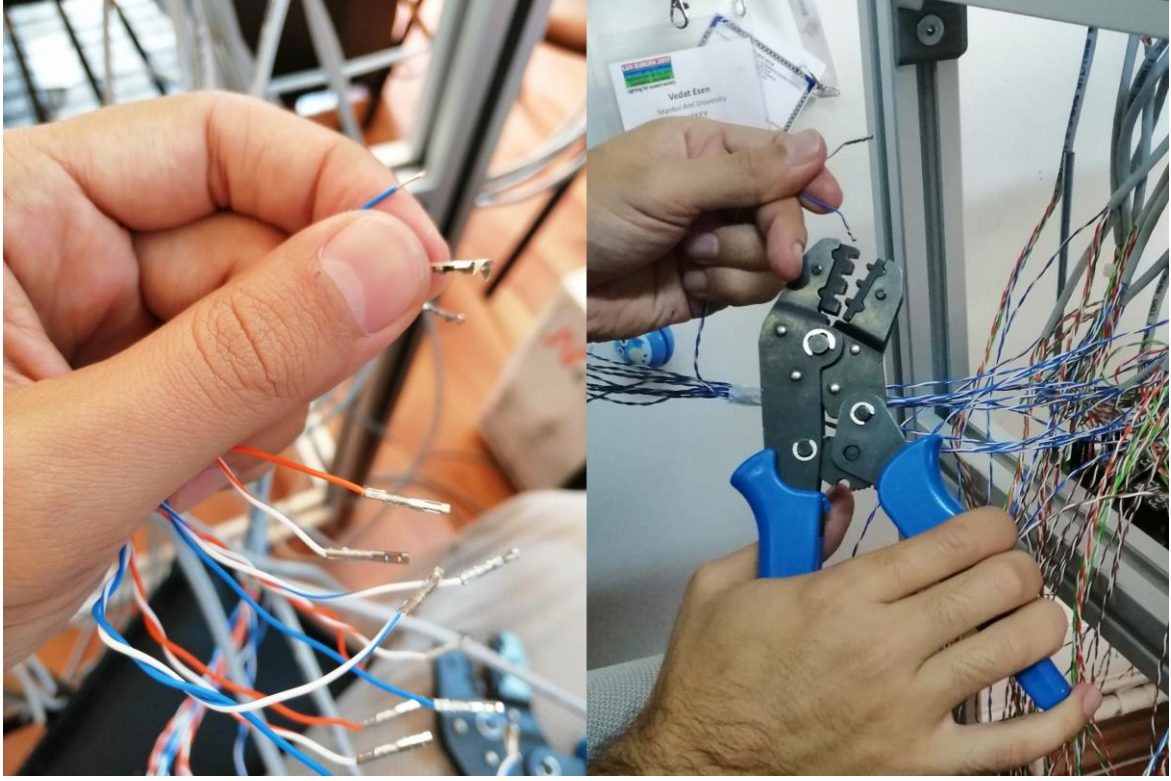
Sistem gövdesi oluşturulurken, soğutucu üzerine yerleştirilmiş LED kartları, power LED sürücü kartları, COB LED sürücüleri, fanlar ve fan kabini, güç kaynakları, bağlantı ve güç kabloları, aktif soğutma sistemi ve bu bileşenlerin konumlandırılması planlanarak boyutlar kararlaştırılmıştır. İlk etapta soğutucu üzerine monte edilmiş LED kartlarını taşıyacak gövde oluşturulmuş daha sonra diğer bileşenlerin sayısı ağırlığı ve konumuna göre sisteme raflar eklenerek modifiye edilmiştir. Gövdenin altına kolay taşınması için kilitli tekerlek sistemi yapılmıştır. 115 x 73 x 73 cm ölçülerinde üretilen gövdenin LED'lerin konumlandırılmış hali Şekil 4.16-a'da gösterilmiştir. Solar simülatör ana gövdesi oluşturulduktan ve LED'ler yerleştirildikten sonra power LED sürücü kartları için raf oluşturulmuş ve her katta 6 kart olmak üzere iki katlı yerleştirilmiştir (Şekil 4.16-b). Kartlar yerleştirildikten sonra çalışma kolaylığı için bağlantılara geçilmiş, ilk katın bağlantıları bittikten sonra ikinci kat yerleştirilmiştir.



Şekil 4.16 (a) Solar simülatör ana gövdesi, (b) Solar simülatör tek kat kart yerleştirilmiş ana gövdesi

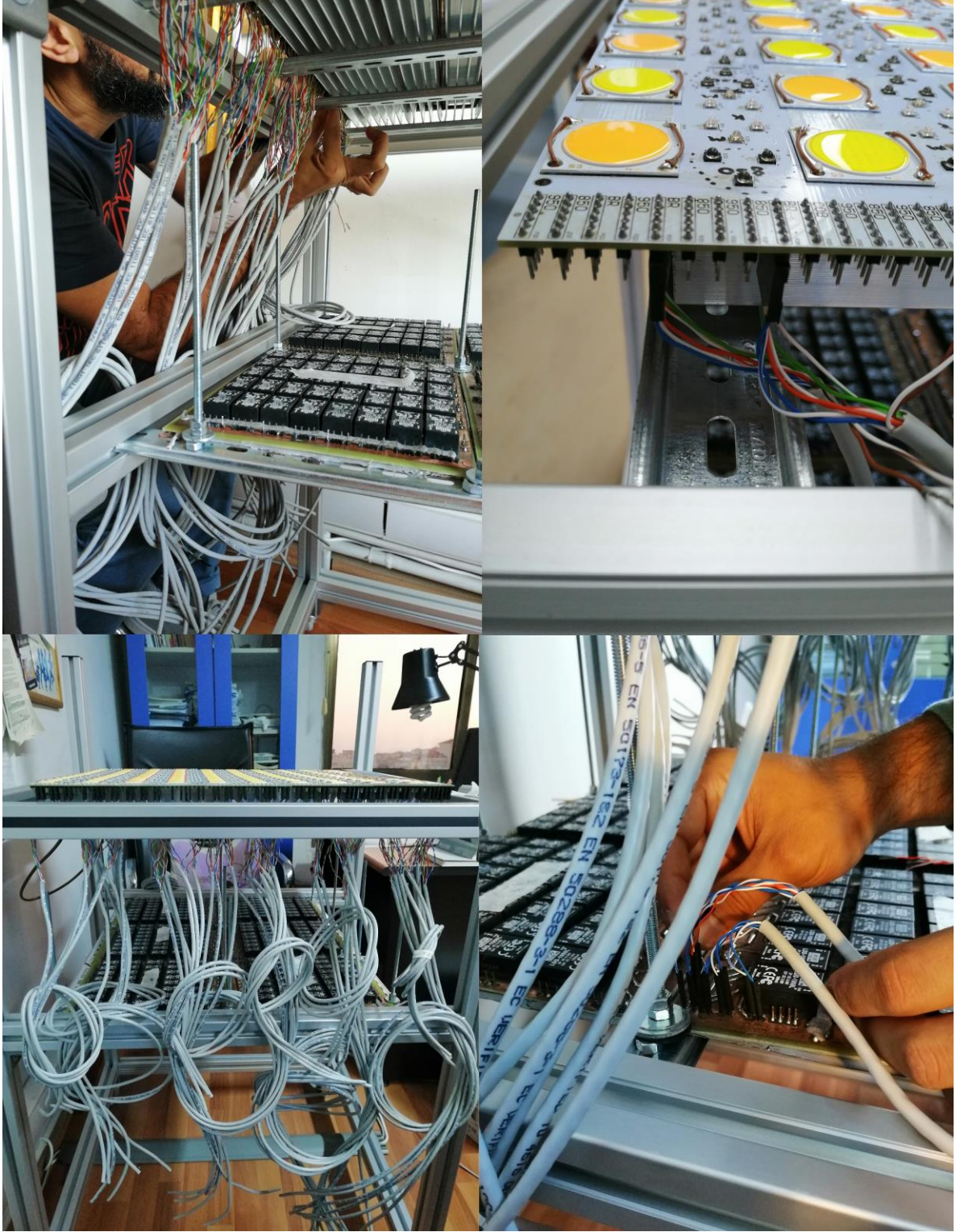
4.1.8. Sistem bağlantılarının gerçekleştirilmesi

Kartlar yerleştirildikten sonra PCB’lerde bulunan soketler ile sürücüler arasındaki enerji ve PWM kabloları bağlantıları yapılmıştır. PCB’lere daha önce monte edilen 2.54 mm erkek konnektörlere rahat bağlantı yapabilmek için her bağlantı kablosu ucuna dişi konnektör pens ile tutturulmuş ve bağlantılar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.17).



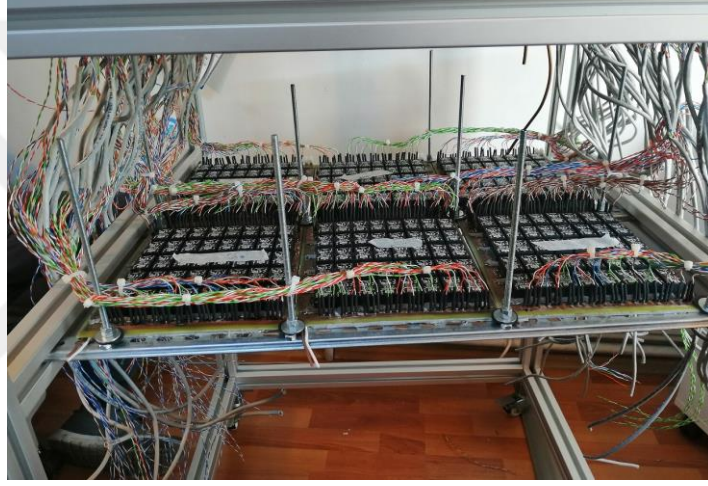
Şekil 4.17 Kablo uçlarına dişi konnektör takılması

Yapılacak bağlantılarda sağlamlık ve yüksek akım taşıyabilme kapasitesinden dolayı CAT 6 data sinyal kablosu kullanılmıştır. Dişi konnektör takma işlemi bittikten sonra gerekli işaretlemeler yapılarak kabloları izolasyon için 6’lı plastik kılıflar giydirilerek PCB ve sürücüler arasındaki bağlantılar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 PCB ve sürücülerin kablo bağlantıları

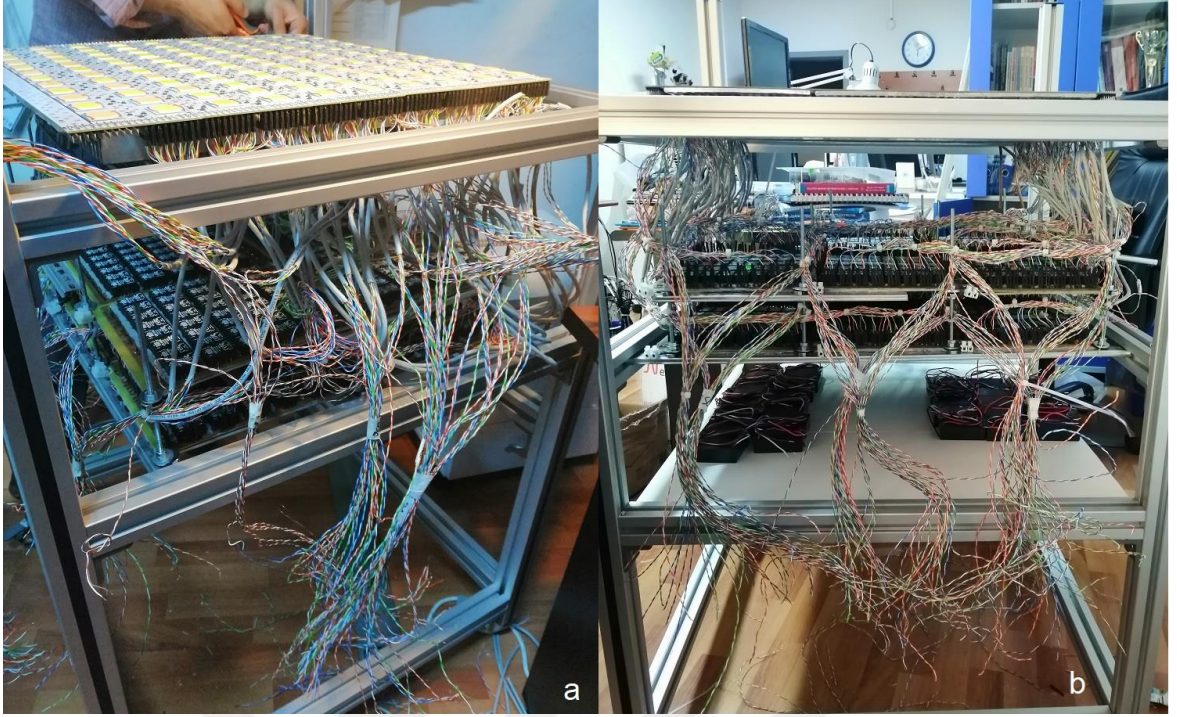
Birinci katın PCB ve sürücü tarafı bağlantıları bittikten sonra (Şekil 4.19) ilk sürücü katı üstüne otomat rayları, cıvata ve somun kullanılarak ikinci kat için alan oluşturulmuş ve sürücü kartları yerleştirilmiştir (Şekil 4.20). İkinci katın da bağlantıları ve işaretlemeleri aynı düzenle yapıldıktan sonra (Şekil 4.21-a) COB LED'lerin sürücü katına geçilmiştir. COB LED'lerin sürücülerinin boyutu daha büyük olduğundan ve herhangi bir karta monte edilmediğinden direkt kablo bağlantısı ile kullanılmaktadır. Bu yüzden, bu sürücüler için ayrı bir kat oluşturulmuş ve katın tabanı için hafif ve sürücüler taşıyacak sağlamlıkta PVC kullanılmıştır. Toplamda 30 adet LDH 45 B 1050 sürücü bu kata konulmuş ve bağlantıları yapılmıştır (Şekil 4.21-b).



Şekil 4.19 İlk kat sürücü enerji bağlantılarının bitirilmesi



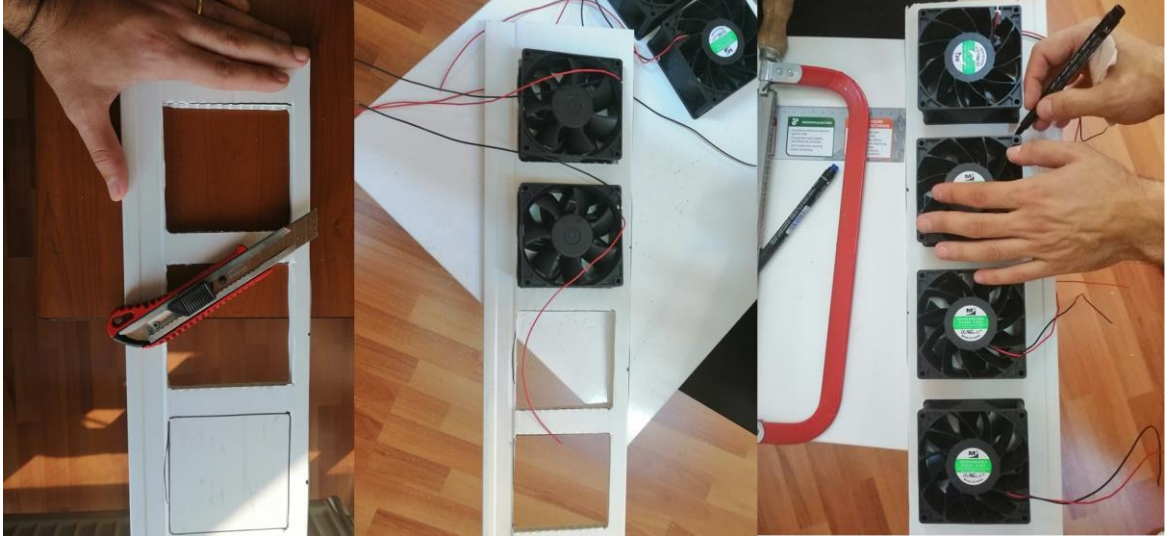
Şekil 4.20 İkinci sürücü katının yerleştirilmesi



Şekil 4.21 (a) Power sürücü kartlarının tümünün bağlantılarının bitişi, b) COB LED sürücülerinin yerleştirilmesi

4.1.9. Fan kabininin oluşturulması ve fanların montajı

LED'lerin ve sürücülerin yerleşimi ve bağlantılarının bitirilmesinin ardından LED PCB'lerinin monte edilmiş olduğu aktif soğutma sistemine sahip alüminyum soğutucuların her iki tarafına 3'er adet Hengtai marka 9.2 x 9.2 x 3.8 cm ölçülerinde yüksek devirli soğutucu fanlar eklenmiştir. Bunun sebebi, oluşabilecek yüksek bir ısı durumunda maliyetleri yüksek olan LED'lerin kaybını önlemektir. Soğutucu kanalları içerisinde hava akımı oluşturabilmek için bir taraftaki fanlar içeriye doğru yönlendirilmiş diğer taraftakiler ise dışarı yönlendirilmiştir. Fanların montajı direkt soğutucuya yapılmamıştır. Öncelikle soğutucu altına bakır borularda buzlanmadan dolayı oluşabilecek su damlacıklarını dışarıya aktarabilecek PVC malzemeden bir kabin yapılmış, fanlar ise bu kabinin her iki tarafına konumlandırılmıştır (Şekil 4.22, Şekil 4.23).



Şekil 4.22 Fanların montajı



Şekil 4.23 (a) Fan kabininin görünümü, (b) Fanların kabine montajı

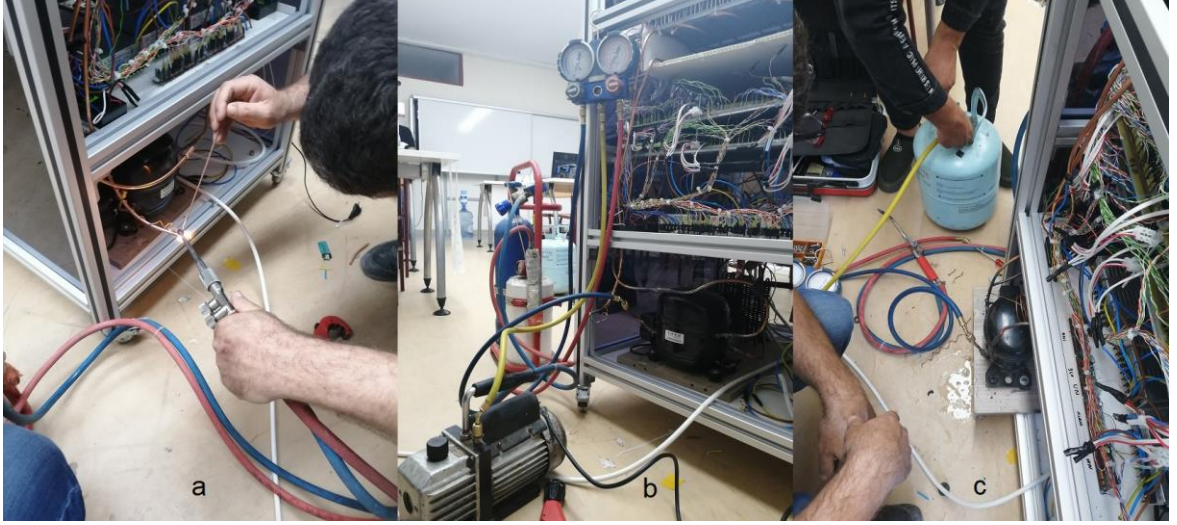
4.1.10. Aktif soğutucu sistemi ve bağlantısı

Solar simülatörde LED'lerin monte edildiği soğutucuların kanalları arasına Bölüm 4.1.3'te anlatıldığı gibi bakır borular yerleştirilmiştir. Bu işlemin amacı alüminyum soğutucunun sıcaklığını düşürmek için kullanılan fanların yetersiz gelmesi durumunda aktif bir soğutma sisteminin devreye girmesidir. Fanlar kabine monte edildikten sonra aktif soğutma sistemi bakır borulara bağlanmıştır. Aktif soğutmayı yapacak olan sistem soğutma sistemlerinde yaygın kullanılan ve R 134a freon gazı ile çalışan Huayi marka B25H kompresör, dryer, soğutma fanı ve kondenserden oluşmaktadır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Aktif soğutma sistemi bileşenleri

Bu sistem solar simülatörün en alt katında biraraya getirilip soğutucu kanallarına daha önceden monte edilen bakır borulara bağlanmıştır (Şekil 4.25-a). Bağlantı oksijen tüpü aracılığıyla kaynak yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bağlantı yapıldıktan sonra kompresörün sağlıklı çalışması için vakumlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.25-b). Vakumlama işleminin ardından sisteme gaz verilmiş ve testi yapılmıştır (Şekil 4.25-c). Kompresörde kullanılacak en uygun gaz Freon R134a olduğundan tercih edilmiştir. Son olarak solar simülatör elektronik devre kısmı ile soğutma sistemini birbirinden izole etmek için bakır borular yalıtılmıştır. Soğutma işleminin kumandası soğutma yapılacak bölgeye yerleştirilen dijital bir termostata bağlı termokupl ile sağlanmıştır. Böylelikle aktif soğutma sistemi sistem sıcaklığı arttığında devreye girecek, yeterli soğuma sağlandıktan sonra devreden çıkacaktır. Bu sayede hem gereksiz güç tüketimi olmayacak hem de bakır borular nemlenmesi en aza indirgenecektir.



Şekil 4.25 (a) Aktif soğutma sisteminin solar simülatöre kaynak bağlantısı işlemi, (b) Kompresörün vakumlanması işlemi, (c) Sisteme R134a gazının verilmesi

4.1.11. Sistem gövdesinin kapatılması

Solar simülatörün fiziksel tüm işlemleri bitirildikten sonra sistem gövdesinin kapatılması işlemine geçilmiştir. Bu işlem için gövdeyi oluşturan sigma alüminyum profil ile uyumlu 3 mm'lik pleksiglas malzemesi kullanılmıştır. Sistem içindeki detayların incelenebilmesi aynı zamanda estetik ve endüstriyel görünümü sağlamak amacıyla renk olarak şeffah siyah tercih edilmiştir. Pleksiglas malzeme gövdedeki köşebent detayları için kesme işleminden geçirildikten sonra sigma profil kanallarına oturtularak sisteme monte edilmiştir (Şekil 4.26-a, Şekil 4.26-b). Sistemin ön tarafına ana sigorta, pako şalter ve dijital termostat konumlandırılmıştır (Şekil 4.26-c, Şekil 4.26-d).



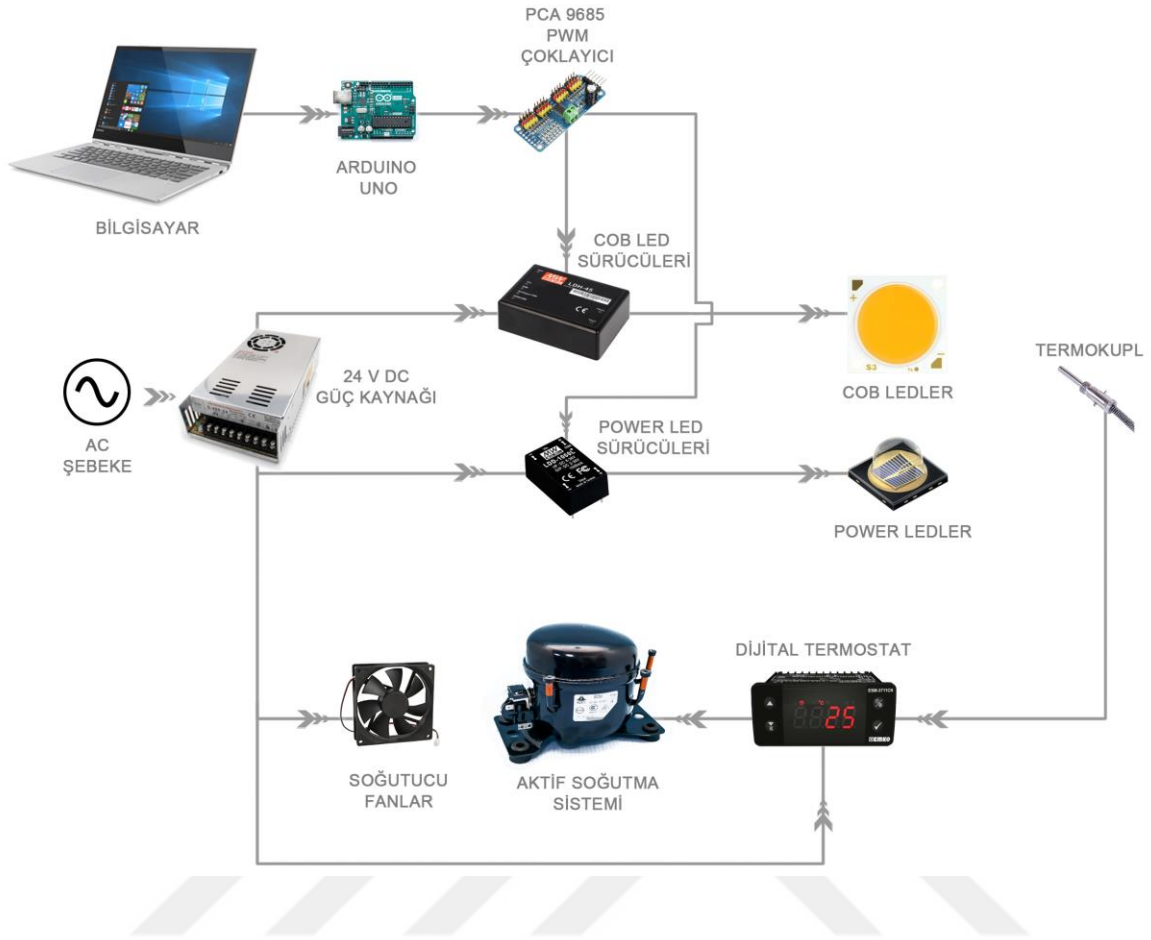
Şekil 4.26 (a) Pleksilerin kesilmesi, (b) Pleksilerin alüminyum profillere takılması, (c) Ön kapağın hazırlanması, (d) Solar simülatör gövdesinin tamamen kapatılmış hali

4.1.12. Solar simülatör çalışma prensibi

Işık kaynağı olarak LED kullanılan spektrum kontrollü solar simülatörde 60 adet sıcak beyaz COB LED, 60 adet soğuk beyaz COB LED, 108 adet mavi power LED, 216 adet kırmızı power LED, 162 adet 850 nm kızılötesi LED, 162 adet 940 nm kızılötesi power LED olmak üzere toplam 768 adet LED bulunmaktadır. COB LED'leri sürmek için 30 adet LDH 45, power LED'leri sürmek için 486 adet LDD 1000 L olmak üzere toplam 516 adet LED sürücüsü vardır. 1 adet COB LED sürücüsü 4 ayrı COB LED'i kontrol etmektedir. 1 adet power LED sürücüsü 1 adet kızılötesi LED'i kontrol ederken 2 adet mavi power LED'e 1 adet, 2 adet kırmızı power LED'e yine 1 adet power LED sürücüsü düşmektedir. Bu sürücülerini beslemek üzere 6 adet 24 V-14.6 A, 1 adet 24 V-27 A güç kaynağı kullanılmıştır. Aydınlatma alanını soğutmak üzere 4 adet itici, 4 adet çekici fanı ise ayrı bir güç kaynağı beslemektedir. Fanlara ek olarak aktif soğutma sistemi de çalışma döngüsünün önemli parçalarındandır. Aktif soğutma sistemi solar simülatörün ön yüzüne konumlandırılan dijital bir termostat ile otomatik olarak kontrol edilmektedir. Soğutulan alana yerleştirilen bir termokupl ile termostata komut iletilmektedir. Termostat soğutma alanında buzlanmayı ve sonrasında nemlenme ve damlamayı önlemek için aktif soğutma sisteminin çalışmasını belirli bir soğukluktan sonra kesmektedir.

LED'lerin spektrum kontrolü bilgisayar yazılımı üzerinden Arduino mikrokontrolör ile gerçekleştirilmiştir. Gerektiği takdirde yazılım ile her zaman spektrum değerleri değiştirilip ışık spektrumu kontrol edilebilecektir. Arduino üzerindeki program, solar simülatörün tüm performans kriterleri için A sınıfını verecek şekilde yazılmıştır ve değişiklik yapılması son derece basittir. Kodlamayı içeren ekran görüntüsü eklerde verilmiştir.

Bu yazılımda spektrum kontrolü yapılırken her renk ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Örneğin, mavi LED'lerin spektrumu kontrol edilecekse girilen değişiklik değeri her mavi LED için uygulanmaktadır. Bu kontrolü yapabilmek için mikroişlemcinin PWM çıkışları yeterli olmadığından PWM çoklayıcı olarak 8 Adet PCA 9586 kartı kullanılmıştır. Solar simülatörün çalışma sistemi grafiksel olarak Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Solar simülatör çalışma prensibi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında tasarlanıp geliştirilen solar simülatörün IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında sınıflandırılmasını sağlamak için performans kriterleri testleri gerçekleştirilmiştir. Üç aşamada yapılan bu testler spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık testleridir. Testler yapılırken elde edilen sonuçlara göre gerekli düzenlemeler yapılmış ve solar simülatörün her performans kriterinde en üst düzey olan A sınıfı elde edilmiştir.

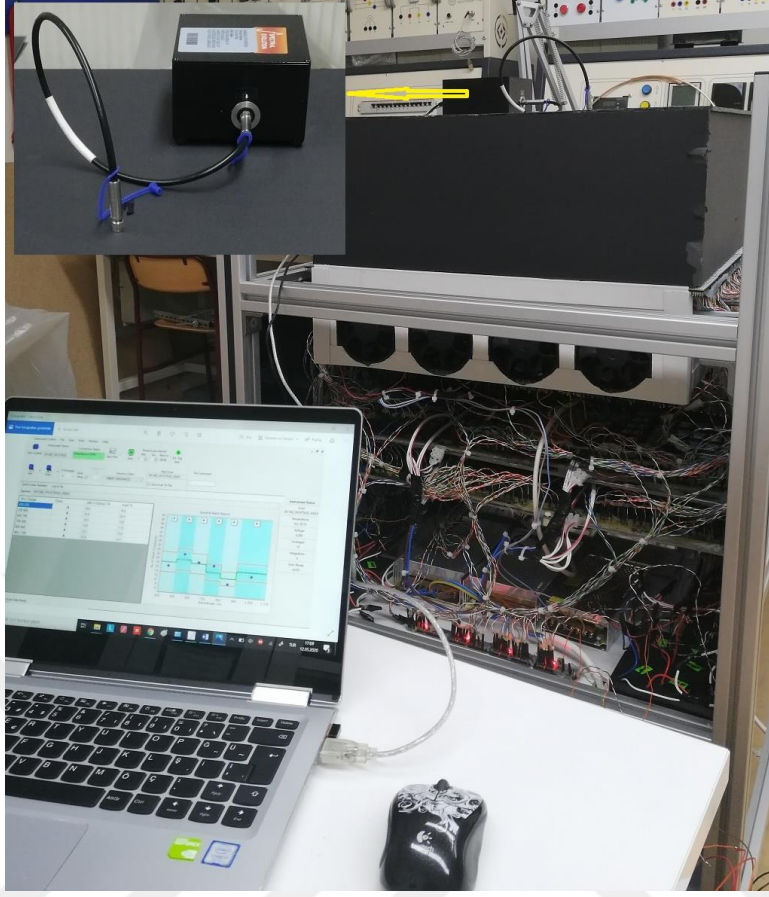
Bu bölümde performans kriter testleri bittikten sonra piyasada yaygın olarak kullanılan ve solar simülatörün aydınlatma alanına uygun ölçülerdeki 20 Wp gücünde bir polikristal fotovoltaiik panelin testi gerçekleştirilmiştir. Test sonrasında elde edilen verilerle ilgili bilgiler verilmiş, sonuçları irdelenmiştir.

5.1. Solar Simülatör Performans Kriterleri Testleri

Solar simülatörün tüm elektriksel ve fiziksel yapısı oluşturulduktan sonra IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarına göre üç performans kriteri olan spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık testlerine geçildi. Tüm bu testler yapılmadan önce standart test koşulları olan 1000 W/m^2 ışınım şiddeti yazılım aracılığıyla, 25°C ise aktif soğutucu sistemi ve fanlarla sağlanmaktadır.

5.1.1. Spektral eşleşme (spectral match)

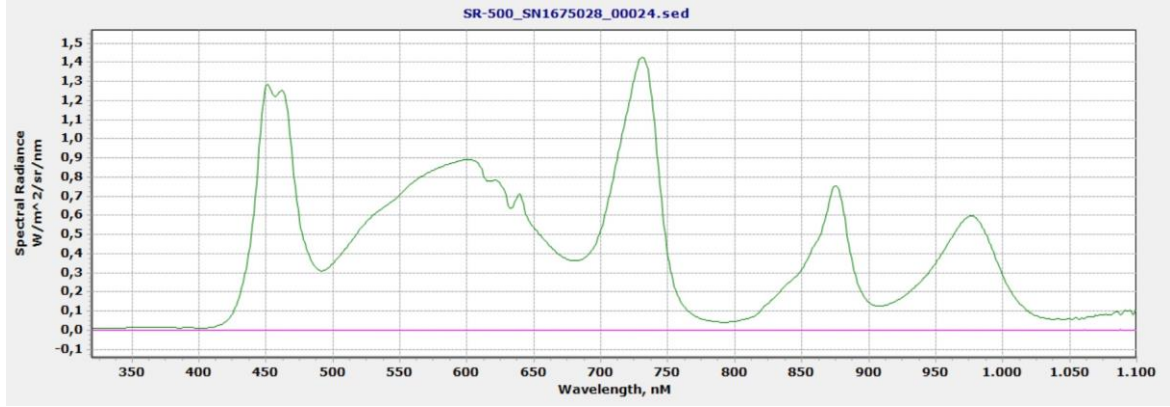
Ölçümler daha önce yapılan prototiplerde olduğu gibi yine Spectral Evolution SR-500 Spektrometre ile yapılmıştır. Spektrometreye bağlanan fiber optik kablo solar simülatör üzerine konumlandırılan kutu üzerinde merkez bir noktaya sabitlenerek ölçümler yapılmıştır. Ölçümün sağlıklı olabilmesi için fiberoptik kablo ucundaki sensör 90° 'lik açı ile sabitlenmiştir. Detaylı olarak Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Test kurulumu, solar simülatör, SR-500 Spektrometre, fiber optik kablo ucuna bağlı bir sensör ve DARWin SP yazılımını çalıştıran bir dizüstü bilgisayardan oluşturulmuştur (Şekil 5.1).



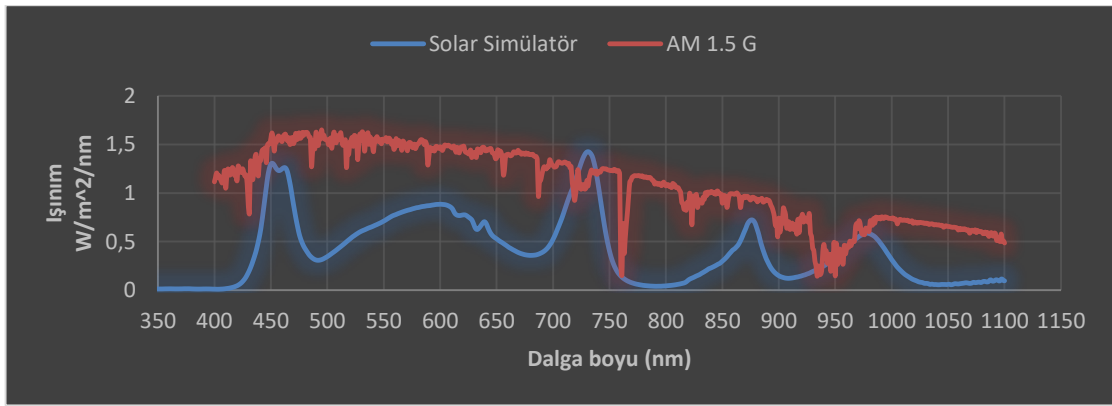
Şekil 5.1 Spektral eşleşme test düzeneği

Spektral eşleşme testi solar simülatörde kullanılan LED'lerin dalga boyu ile ilgili olduğundan test esnasında her bir LED'in ışık şiddeti yazılımdaki kodlar ile değiştirilerek A sınıfı elde edilmeye çalışılmıştır. Spektral eşleşmede sağlanması gereken 400-700 nm arasındaki dalga boyları, sıcak ve soğuk beyaz COB LED'ler ve mavi LED'ler ile elde edilmiştir. 700-850 nm dalga boyunu kırmızı LED'ler, 850 ve 1100 nm arasını ise kızılötesi LED'ler sağlamıştır.

Spektroradyometre ile ölçülen dalgaboyları A sınıfına ulaşana kadar değiştirilmiş ve A sınıfını veren dalga boyu grafiği elde edilmiştir. Grafiğin DARWin SP yazılımına ait ekran görüntüsü Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.3'te ise solar simülatörün dalga boyu grafiği ile AM 1.5 G spektrumu karşılaştırılmalı verilmiştir. Kırmızı çizginin altında kalan alan, AM 1.5 G spektrumunun tanımladığı alandır. Mavi çizginin altındaki alan ise solar simülatöre ait olan spektrum alanıdır. Bu alan standartlarda belirtilen yüzde oranları ile AM 1.5 G spektrum alanını A sınıfı değerleri ile simule edebilmektedir.



Şekil 5.2 Spektral eşleşme testinin dalga boyu grafiği (ekran görüntüsü)



Şekil 5.3 AM 1.5 G spektrumu ve solar simülatör spektrumu karşılaştırması

Spektral eşleşmede A sınıfının elde edilmesi solar simülatörün AM 1.5 G spektrumundaki dalga boylarını belli bir yüzdede vermesine bağlıdır. Bu yüzdelerin sayısal değerleri ve solar simülatörün sağladığı yüzdelere ise Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Switch Solar Standard		Log to file	
Spectrum		SR-500_SN1675028_00024	
Wvl. Range	Class	AM1.5 Global Tilt	Irrad. %
400-500	A	18,4	16,6
500-600	A	19,9	22,4
600-700	A	18,4	19,0
700-800	A	14,9	17,9
800-900	A	12,5	10,0
900-1100	A	15,9	14,1

Şekil 5.4 Solar simülatör AM 1.5 G spektrumu gerekli yüzdeleri ve solar simülatörün sağladığı yüzdelere (ekran görüntüsü)

Solar simülatörün Şekil 5.4'te belirtilen her bir dalga boyu aralığındaki ışı nım yüzdeleri olması gereken AM 1.5 G yüzdelere bölündüğünde 0.75 ile 1.25 aralığında değ er bulunduğ unda spektral eşleş me kriterinde A sınıfı bir solar simülatör olmaktadır. Yüzdelerin birbirine bölünmesi ile elde edilen değ erler Tablo 5.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu nedenle, tüm dalga boyu aralıkları için elde edilen değ erler Tablo 5.1'e göre A sınıfını ifade etmektedir. Bu değ erlerin sınırlara ne kadar yakın olduğ u ise Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Solar simülatör spektral eşleş me performansının sayısal değ erleri

Spektral Eşleş me	ASTM	IEC	SOLAR SİMULATÖR'de ölçülen değ erler					
			400-500 nm	500-600 nm	600-700 nm	700-800 nm	800-900 nm	900-1100 nm
A Sınıfı	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25	0.90	1.12	1.03	1.20	0.8	0.88



Şekil 5.5 Spektral eşleş me raporu ekran görüntüsü

Şekil 5.5'te, turuncu çizgilerin arasında kalan alan A sınıfına denk gelmektedir. Lacivert kırmızı noktalar ise ölçülen solar simülatör değ erleridir. 800-900 nm dalga boyu aralığındaki spektral eşleş me değ erinin A sınıfı olmasına rağmen sınırda olduğ u görülmektedir.

Yapılan spektral eşleş me testlerinin sonuçları birinci prototip ve ikinci prototip solar simülatörlerin spektral eşleş me test sonuçları ile karşılaştırıldığında kayda değ er bir farklılık göze çarpmamaktadır. Bu sonuç, protoiplerden sonra bu çalışmada LED'lerin yerleri ve diziliminin değ iş tirilmemesine bağ lanabilir. Çünkü spektral eşleş mede en önemli iki

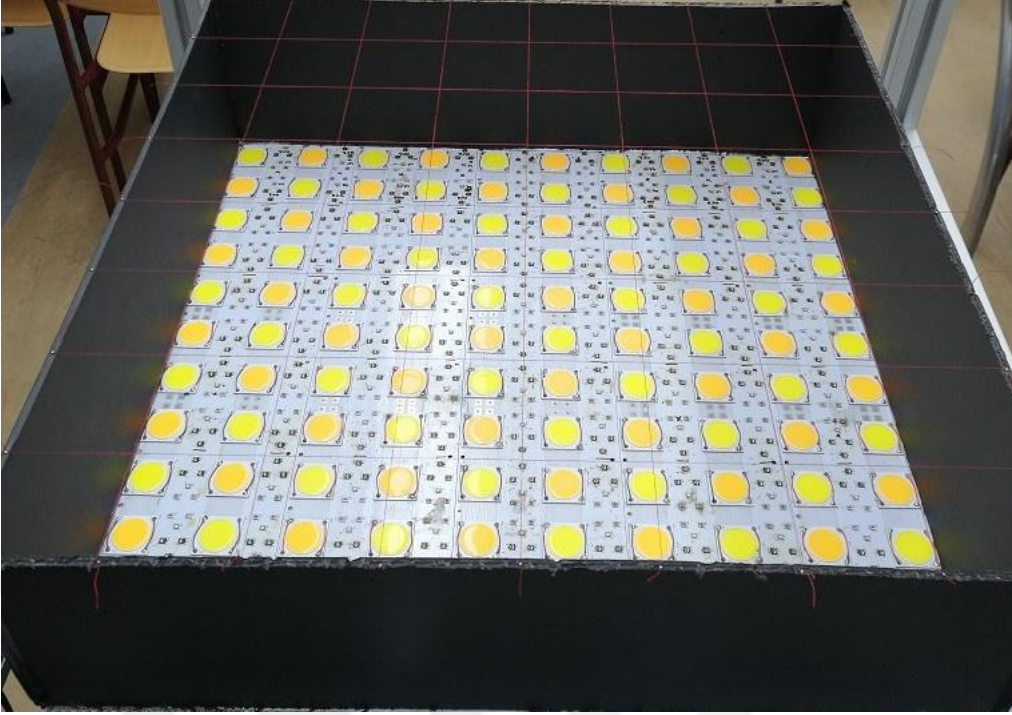
büyükölük dalga boyu ve ışınlm şiddetidir. Yer ve dizilimin sabit kalması bu büyükölüklerin de sabit kalmasını sağlayacaktır. Sadece ilk iki çalışmadan farklı olarak kırmızı LED sayısı artırıldığından 700-800 nm arası dalga boyu aralığını kontrol etmek daha kolay gerçekleşmiştir. Bu kolaylık kırmızı LED sayısının artırılmasının ürünü iyileştirme bakımından doğru bir seçim olduğunu göstermektedir.

5.1.2. Uzamsal uyumsuzluk (spatial non-uniformity)

Spektal eşleşme kriteri için yapılan testten sonra diğeri bir performans kriteri olan uzamsal uyumsuzluk ölçümüne geçilmiştir. Bu testin yapılmasındaki amaç, solar simölätörün aydınlatma alanındaki en yüksek ışık şiddeti ile en düşük ışık şiddetinin olduğu bölgeyi belirlemek ve bu iki bölgedeki ışık şiddetinin Denklem 2.8'e göre sonucunu elde edip bu performans kriterinde A sınıfını yakalamaktır. Bu testin konusu ışık şiddeti olduğundan yazılım ile ışık şiddetini değıştirmek spektral eşleşmeyi bozmaktadır. Bunun yerine fiziksel koşulları uygun hale getirmek daha doğru olmaktadır. Bu koşullar genellikle LED sayısını ve tipini değıştirmek, LED dizilim kombinasyonları oluşturmak ya da ölçüm yapılan aydınlatma alanının kenarlarına ayna yerleştirmek olabilmektedir.

IEC 60904-9 standartına göre solar simölätör uzamsal uyumsuzluk testinde her ölçülecek hücrenin alanı 400 cm²'yi geçmediğı müddetçe 64 eşit parçaya bölünmelidir. Solar simölätördeki aydınlatma alanı 52x52 cm olduğundan alan 64 eşit parçaya bölündüğünde her kenarı 6.5 cm olan kare hücreler elde edilmektedir. Bu hücrelerin alanı da 42.25 cm² olduğu için ölçüm yapılırken 64 eşit hücre oluşturulması standarda uygundur.

Teste geçmeden önce Spektral eşleşme testinin de yapıldığı kara kutu kullanılmıştır. Fakat, dedektörün rahat hareketi için üst kapağı kaldırılmıştır. Aydınlatma alanının hücre ölçüleri belirlenip renkli bir ip yardımı ile bölümlendirilmiştir (Şekil 5.6).



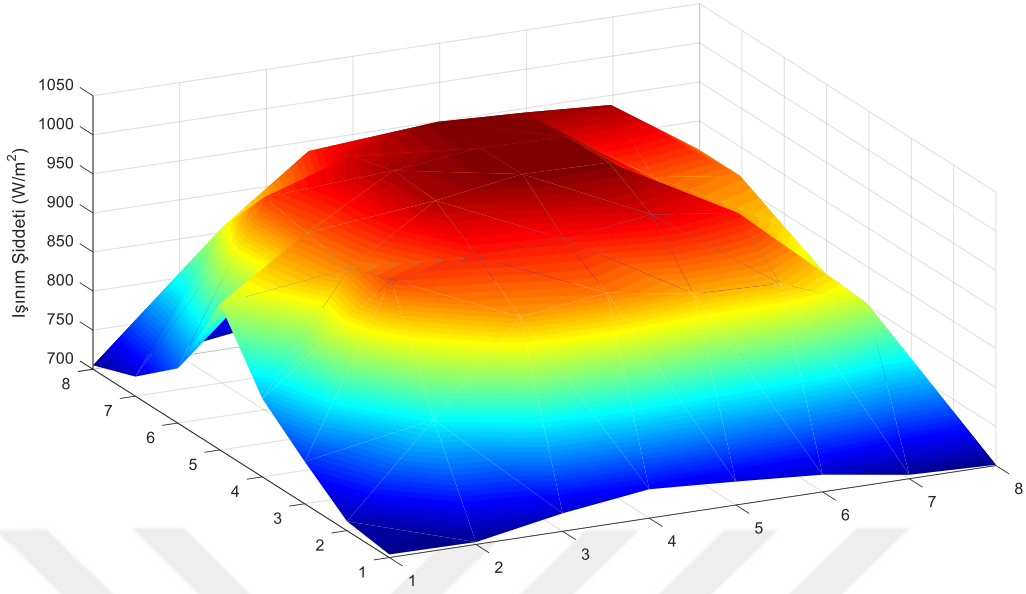
Şekil 5.6 Aydınlatma alanının 64 hücreye bölünmesi

Hücreler elde edildikten sonra X-Y-Z koordinatında hareket eden manuel bir kolun ucuna fotometrenin dedektörü monte edilip her hücre W/m^2 cinsinden tek tek ölçülmüştür. Ölçümün bu aşamasında aydınlatma alanının kenarlarına ayna yerleştirilmemiştir. Yapılan ikinci prototipte alan çok küçük ve LED sayısı sınırlı olduğundan $1000 W/m^2$ değerine ancak ayna yardımıyla ulaşılmıştır. Ancak bu aşamada aydınlatma alanı ve LED sayısı çok daha fazla olduğundan ışıyım şiddetinin çok fazla olacağı öngörüsüyle ayna kullanılmamıştır. Yapılan ölçümlerden sonra elde edilen sonuçlar Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

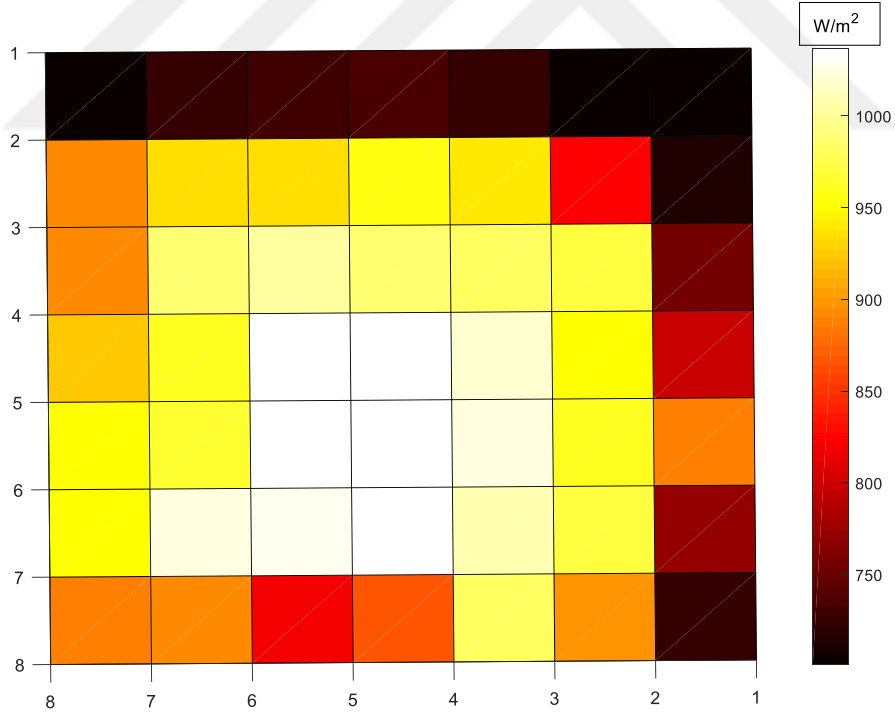
Tablo 5.2 64 Hücrede ayna olmadan yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçüm sonuçları

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	704	703	723	737	730	722	705	701
2	712	825	940	954	936	932	890	708
3	754	970	982	988	1003	988	895	715
4	800	950	1020	1037	1035	961	922	720
5	887	961	1024	1036	1034	965	950	757
6	770	972	1008	1035	1030	1023	950	765
7	725	899	980	867	821	892	889	710
8	705	710	725	739	752	726	709	702

Ayna kullanılmadan yapılan bu ölçümlerde D4 hücresinde maksimum ışıınım (1037 W/m^2) ölçülürken H1 hücresinde minimum ışıınım (701 W/m^2) ölçülmüştür. Tüm hücrelerdeki ışıınım şiddetleri Tablo 5.2’ de verilmiştir. Tablo 5.2 ye ve ölçümlerden edilen Şekil 5.7’deki yüzey ağ grafiğine göre ışıık homojen dağılıyor gibi görünmesine rağmen kenar hücrelerde ışıınım şiddeti çok fazla düştüğünden Denklem 2.8’e göre sonuç %19.33 olmaktadır. Işığın kenar hücrelerde keskin düşüşü Şekil 5.8’de de açıkça görülmektedir. Bu sonuç ise solar simülatörü herhangi bir sınıfa dahil edememektedir.



Şekil 5.7 Aynasız yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü yüzey ağ grafiği



Şekil 5.8 Aynasız yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü hücre bazında ışınlm şiddeti grafiği

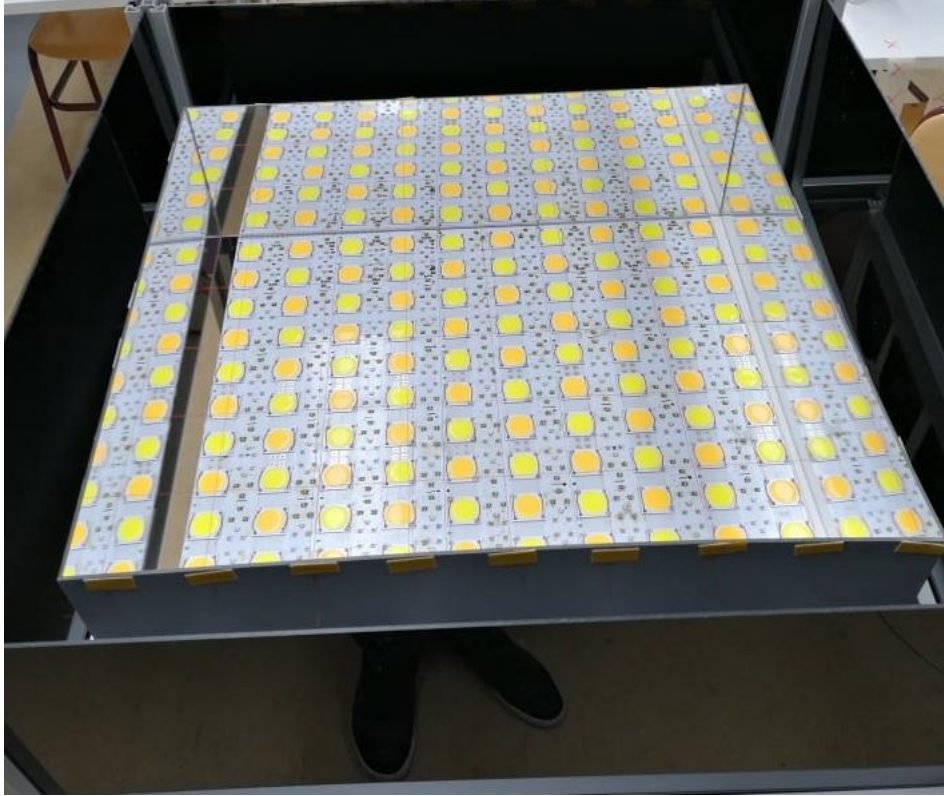
Tablo 5.3'te standartlara göre A sınıfı için olması gereken değerler ve bulunan değer birlikte verilmiştir.

Tablo 5.3 Ayna kullanılmadan yapılan ölçüm için uzamsal uyumsuzluk sonucu

ASTM A sınıfı	IEC A sınıfı	Hesaplanan Uzamsal Uyumsuzluk	Ölçülen minimum ışıma	Ölçülen maksimum ışıma
$\leq 3\%$	$\leq 2\%$	%19.33	1037 W/m ²	701 W/m ²

Ayna kullanılmadan yapılan ölçümlerden istenilen sonuç elde edilmediğinden ölçüm yapılan kutu yeniden tasarlanmış ve ayna pleksi malzemesinden oluşturulmuştur (Şekil 5.9).

Ayna kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar Tablo 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.9 Uzamsal uyumsuzluk aynalı ölçüm düzeneği

Tablo 5.4 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçüm sonuçları

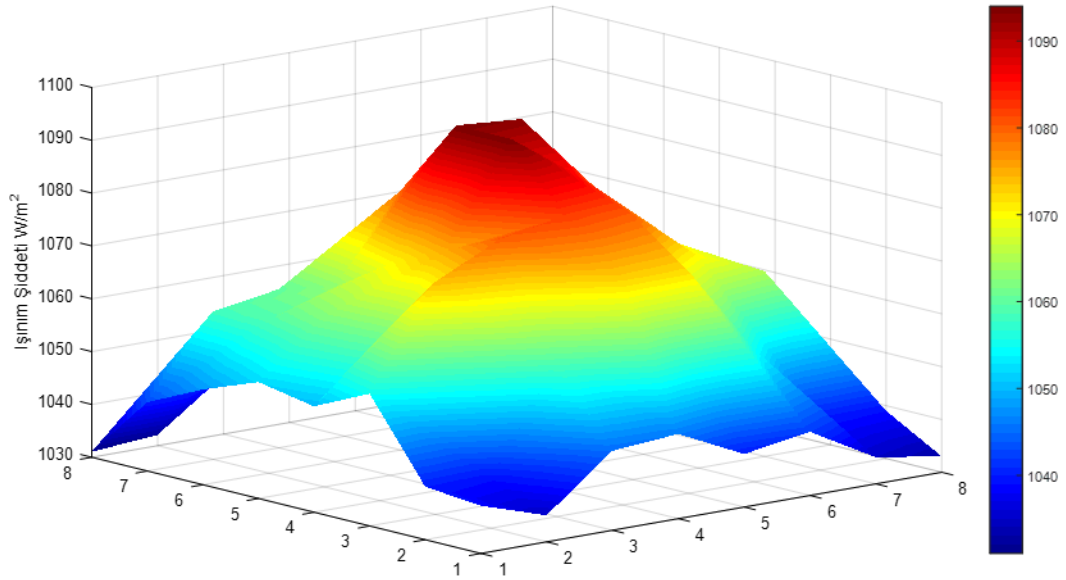
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1039	1035	1045	1046	1040	1042	1035	1033
2	1040	1039	1059	1073	1072	1055	1040	1039
3	1055	1074	1080	1082	1080	1070	1065	1045
4	1050	1061	1075	1094	1085	1072	1060	1035
5	1052	1062	1070	1094	1093	1069	1059	1035
6	1048	1059	1063	1079	1081	1067	1068	1038
7	1043	1058	1060	1066	1059	1040	1040	1042
8	1031	1032	1041	1049	1035	1038	1045	1039

Tablo 5.4 incelendiğinde maksimum ışıınım şiddeti olan 1094 W/m²'nin D4 ve D5 hücrelerinde ölçüldüğü görülmektedir. A8 hücresinde ise en düşük ışıınım şiddeti olan 1031 W/m² elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak Denklem 2.8'den solar simülatörün uzamsal uyumsuzluk değeri %2.96 bulunmaktadır. Bu değer IEC 60904-9 standartlarına göre B sınıfına denk gelse de ASTM E927-10 standartlarına göre A sınıfı olmaktadır. IEC ve ASTM standartları uzamsal uyumsuzluk A sınıfı değerleri ile solar simülatör uzamsal uyumsuzluk değeri Tablo 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.10'da ölçülen alanın yüzey ağ grafiği verilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de ölçülen değerlerin ve ışıınım şiddetinin hücrelere göre dağılımı, Şekil 5.13'te ise ölçüm alanının bütünündeki ışıınım dağılımı gösterilmiştir.

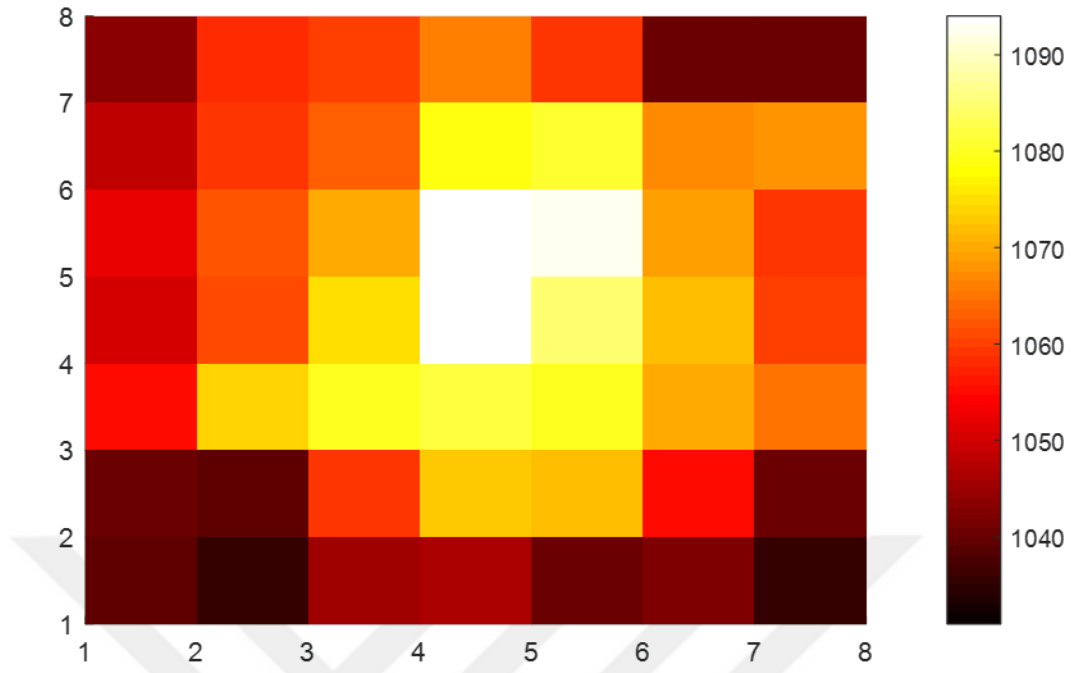
Elde edilen tüm sonuçlar solar simülatörün aydınlatma alanının kenarlarında ayna kullanımının ne kadar önemli ve doğru bir seçim olduğunu göstermektedir. Ayna kullanılmadan gerçekleştirilen uzamsal uyumsuzluk testinde solar simülatör C sınıfına dahi ulaşamazken ayna kullanıldıktan sonra ASTM E927-10 standartına göre A sınıfına ulaşmıştır. IEC 60904-9 standartına göre B sınıfında kalması ise aydınlatma alanının büyüdükçe bu performans kriterinde A sınıfına ulaşmanın daha da zor hale geldiğini açıklamaktadır. İkinci prototip sonuçlarına bakıldığında da değerler % 2'nin altındayken solar simülatörde performans düşerek Tablo 5.5'te de görüldüğü gibi %2.96 olmuştur.

Tablo 5.5 Ayna kullanılarak yapılan ölçüm için uzamsal uyumsuzluk sonucu

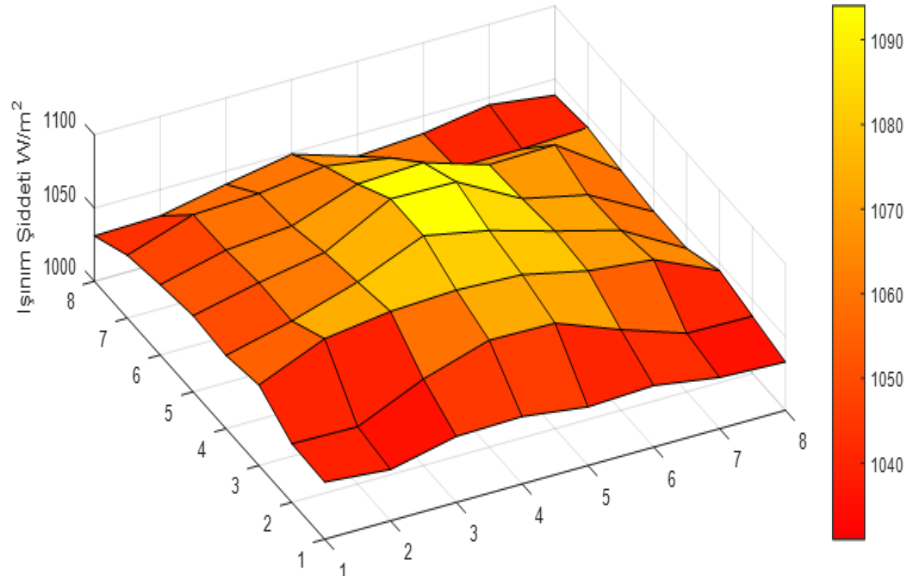
ASTM A sınıfı	IEC A sınıfı	Hesaplanan Uzamsal Uyumsuzluk	Ölçülen minimum ışıma	Ölçülen maksimum ışıma
$\leq 3\%$	$\leq 2\%$	%2.96	1094 W/m ²	1031 W/m ²



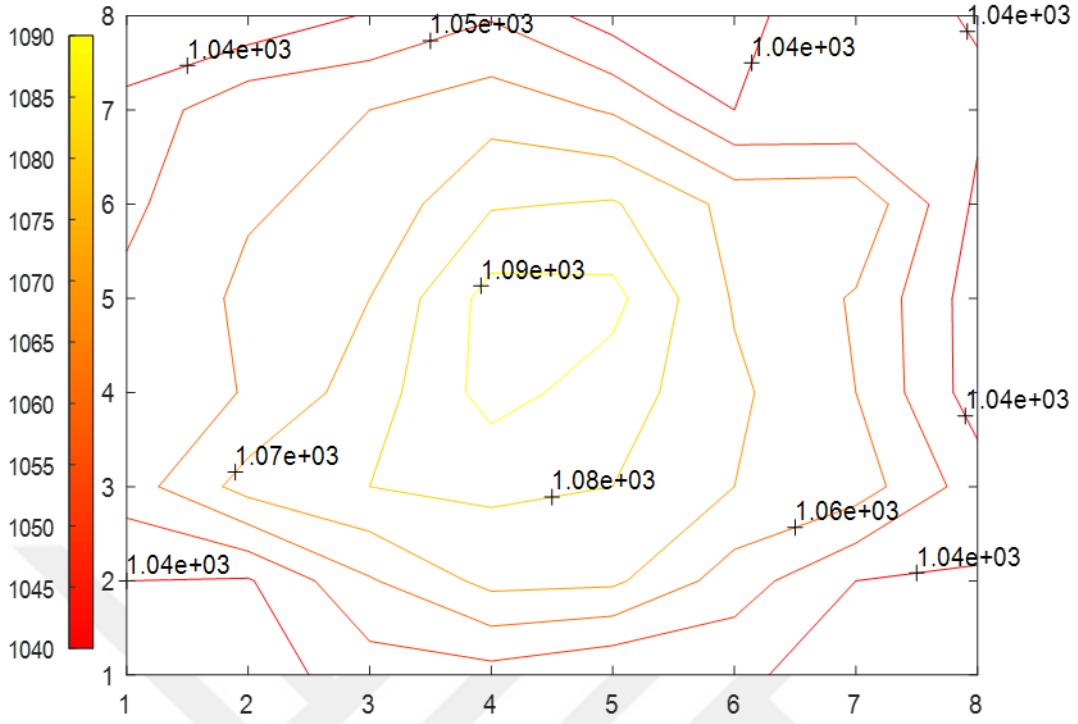
Şekil 5.10 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü yüzey ağ grafiği



Şekil 5.11 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü hücre bazında ışıınım şiddeti grafiği



Şekil 5.12 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü hücre bazında ışıınım şiddeti üç boyutlu grafiği



Şekil 5.13 Ayna kullanılarak yapılan uzamsal uyumsuzluk ölçümü alan bazında ışınım şiddeti grafiği

5.1.3. Zamansal istikrarsızlık (temporal instability)

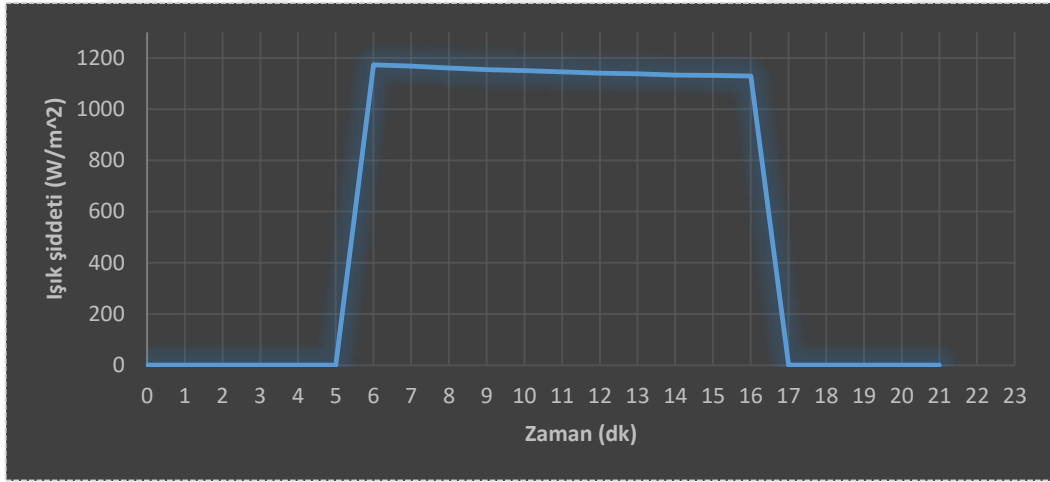
Spektral eşleşme ve uzamsal uyumsuzluk testlerinin ardından üçüncü performans kriteri olan zamansal istikrarsızlık testine geçilmiştir. Bu testin amacı solar simülatörün birbirlerine göre kısa ve uzun olan belirli zaman aralıklarında ışık şiddetindeki istikrarsızlığın hangi sınıfta olduğunu belirlemektir. Bu aşamada istikrarsızlık performansını etkileyen en önemli faktör, kullanılan LED’lerin kalitesine bağlı olarak oluşan kararlı çalışma karakteristiğidir. Bunun yanında LED’ler için doğru sürücüler kullanma ve doğru soğutma gibi faktörler de istikrarsızlığı önemli ölçüde etkilemektedir. Zamansal istikrarsızlık kriterinin sınıfı belirlenirken Denklem 2.8 kullanılmaktadır. Buna göre Denklem 2.8’deki E_{max} ve E_{min} değerleri belirli zaman aralıkları boyunca tek noktada ölçülmüştür. IEC 60904-9 standartında bu test yapılırken hem uzun vadeli zamansal istikrarsızlık hem de kısa vadeli zamansal istikrarsızlık ölçümünün yapılması belirtilmiştir. Solar simülatörün zamansal istikrarsızlık testi bu doğrultuda yapılmıştır.

5.1.3.1. Uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi

Zamansal istikrarsızlık testinde ilk olarak uzun vadeli ölçüm yapılmıştır. 10 dakikalık zaman boyunca solar simülatör kesintisiz olarak çalıştırılmıştır. Çalışma süresince ilk dakikadan itibaren her dakika başı ışık şiddeti ölçülmüştür. İlk anda ölçülen ışı nım değ erinin 1172 W/m², 10. dakikada ölçülen ışı nım değ erinin ise 1129 W/m² oldu ğ u gör ülmüştür. Bu değ erlere göre Denklem 2.8 ile hesaplanan uzun vadeli zamansal istikrarsızlık değ eri % 1.86 olarak hesaplanmıştır. Bu değ er Tablo 5.6'ya göre A sınıfını vermektedir. Ölçüm sonuçlarının grafi ğ i Ş ekil 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.6 Uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları

Zamansal İstikrarsızlık	ASTM	IEC	Hesaplanan Zamansal İstikrarsızlık	Ölçülen minimum ışı nım	Ölçülen minimum ışı nım
A sınıfı	≤ 2%	≤ 2%	%1,86	1172 W/m ²	1129 W/m ²



Ş ekil 5.14 Uzun vadeli zamansal istikrarsızlık testi grafi ğ i

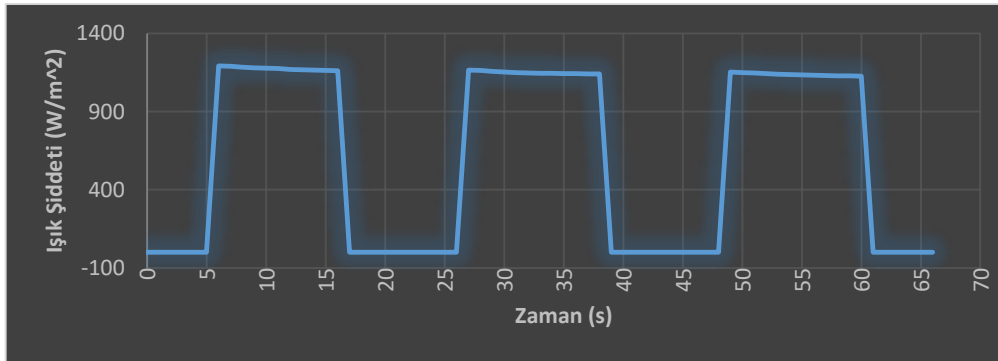
5.1.3.2. Kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi

Zamansal istikrarsızlık testinin ikinci aşamasında kısa vadeli ölçüme geçilmiştir. Bu ölçümde solar simülatör 10 s'lik üç pulse (darbe) ile çalıştırılmıştır. Her bir pulse arasında da solar simülatör 10 saniye kapatılmıştır. Her bir çalışmada ilk saniyedeki ve 10. saniyedeki ışık şiddeti değerleri ölçülüp kaydedilmiştir. Birinci çalışmada ilk değer 1193 W/m², son değer 1161.5 W/m² ölçülmüştür. İkinci çalışmada ilk değer 1166.6 W/m², son değer 1141.5 W/m² ölçülmüştür. Üçüncü ve son çalışmada ise ilk değer 1152.9 W/m², son değer ise 1127.4 W/m² ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler Tablo 5.7'de gösterilmiştir. Bu ölçümlere göre bulunan kısa vadeli zamansal istikrarsızlık değerleri % 1.337, %1.087 ve % 1.118 olmuştur. Bulunan bu değerler Tablo 5.7'teki değerlere göre A sınıfıdır. Ölçüm sonuçlarının grafiği Şekil 5.15'te verilmiştir.

Bu değerlerin ikinci prototip solar simülatör değerleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık iki katına çıktığı fakat yine de A sınıfı değerleri içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre aydınlatma alanı büyüdükçe istikrarsızlığın artıyor olması net olarak anlaşılmaktadır.

Tablo 5.7 Kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi sonuçları

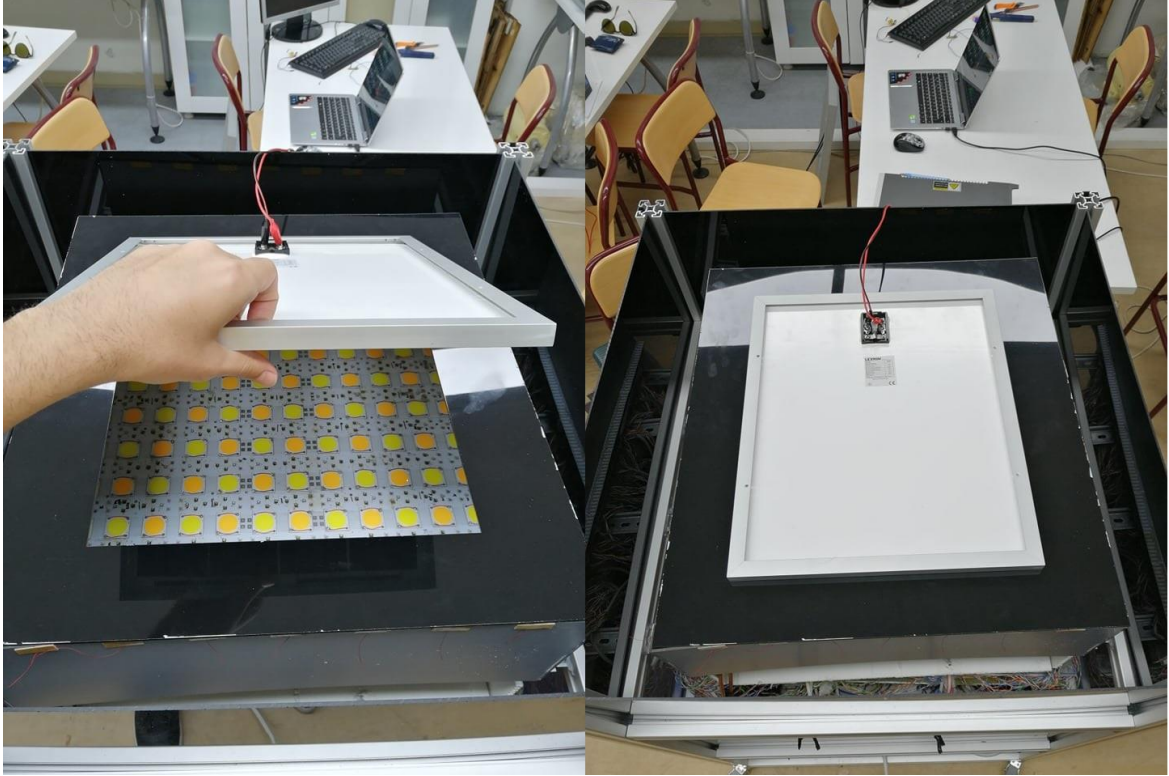
Zamansal İstikrarsızlık	ASTM	IEC	Darbe	Hesaplanan Zamansal İstikrarsızlık	Ölçülen Minimum Işıma	Ölçülen Maksimum Işıma
A sınıfı	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$	1	% 1.337	1161.5 W/m ²	1193 W/m ²
			2	% 1.087	1141.5 W/m ²	1166.6 W/m ²
			3	% 1.118	1127.4 W/m ²	1152.9 W/m ²



Şekil 5.15 Kısa vadeli zamansal istikrarsızlık testi grafiği

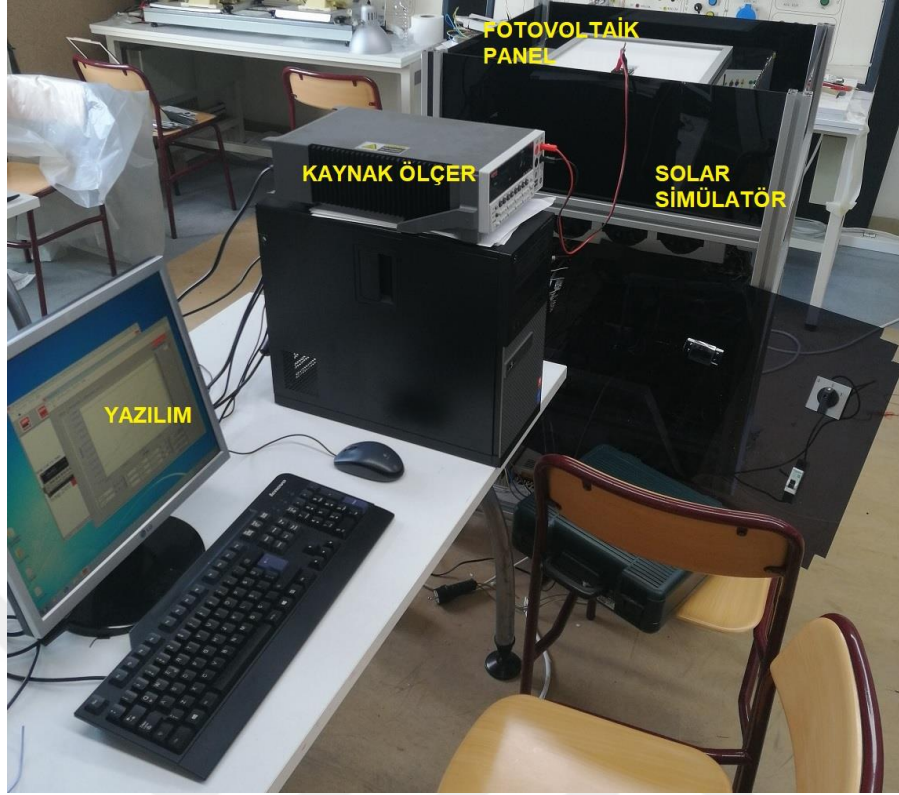
5.2. Fotovoltaik Panel Testi ve Analizi

Solar simülatörün her üç performans kriteri ölçölüp analiz edildikten sonra fotovoltaik panel test aşamasına geçilmiştir. Test için solar simülatörün aydınlatma alanına uygun 43x36x2 cm boyutlarında piyasada yaygın kullanılan 20 Wp'lik polikristal bir fotovoltaik panel tercih edilmiştir. Testin yapılp I-V karakteristiğini elde edebilmek için panel solar simülatöre merkez noktadan yerleştirilmiştir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Fotovoltaik panelin solar simülatördeki konumu

Ölçüm Keithly S 2400 serisi kaynak ölçer ile yapılmış ve sonuçlar masaüstü bir bilgisayarda bulunan Kickstart yazılımı ile analiz edilmiştir. Şekil 5.17'de fotovoltaik panel test düzeneği görölmektedir. Ölçümü yapılan fotovoltaik polikristal panelin elektriksel özellikleri ise Tablo 5.8'deki gibidir.

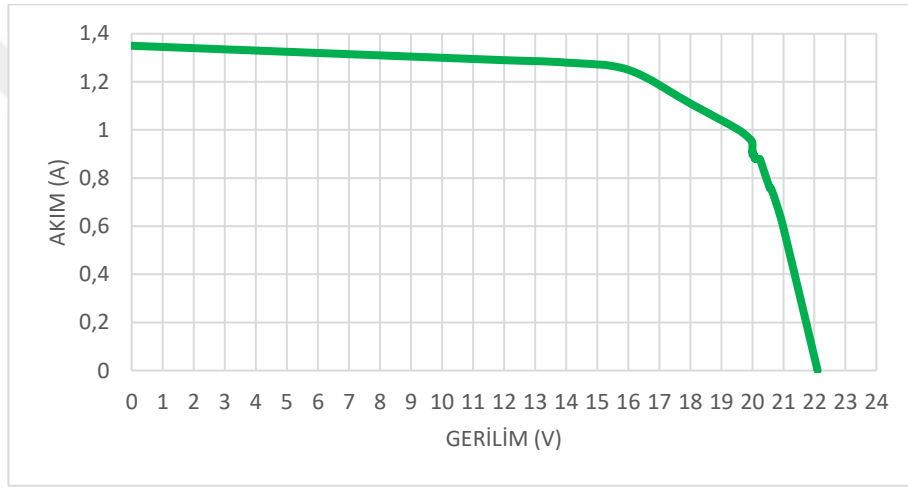


Şekil 5.17 Fotovoltaik panel test düzeneği

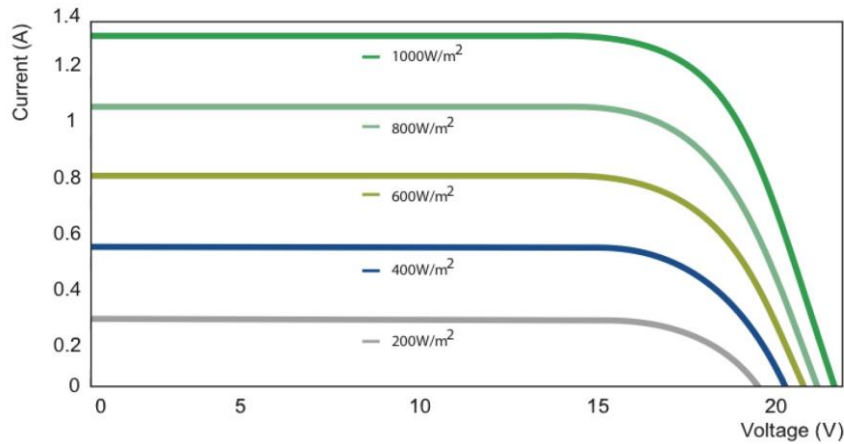
Tablo 5.8 Ölçümü yapılan fotovoltaik panelin etiket değerleri ve açıklaması

Maksimum Güç Değeri (Pmax)	20 Wp
Güç Toleransı	+%5
Açık Devre Gerilimi (Voc)	22.10 V
Maksimum Güç Noktası Gerilimi (Vmp)	18 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	1.35 A
Maksimum Güç Noktası Akımı (Imp)	1.11 A
Hücre sayısı	36
<i>*Tüm değerler AM 1.5 G ve 1000 W/m² test koşulu içindir.</i>	

Şekil 5.17'deki test düzeneği ile yapılan ölçümlerden elde edilen I-V eğrisi Şekil 5.18'de verilmiştir. Elde edilen akım-gerilim eğrisi, panelin teknik broşüründe verilen ve Şekil 5.19'da gösterilen akım gerilim eğrisi ile örtüşmektedir. Solar simülatörle yapılan test standart test koşullarından olan 1000 W/m^2 ışınım şiddeti altında yapıldığından Şekil 5.19'daki grafikte ilgili eğri ile kıyaslanmalıdır. Elde edilen grafikteki küçük oynamalar teorikteki akım- gerilim eğrilerinden farklı olarak uygulamada ortaya çıkan ve yaygın görülen farklılıklardır [159]. Test sonucu elde ettiğimiz grafikte 1.35 V'luk kısa devre geriliminden başlayarak akım doğrusal olarak azalmakta ve 18 V olan maksimum güç gerilimi noktasından itibaren panelin açık devre gerilimi olan 22.1 V'ta sıfır olacak hızla düşmektedir.



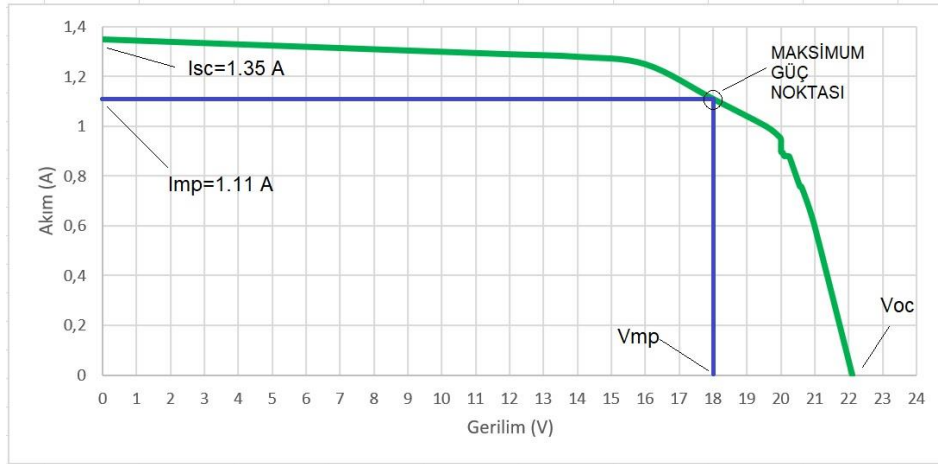
Şekil 5.18 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin akım-gerilim karakteristiği



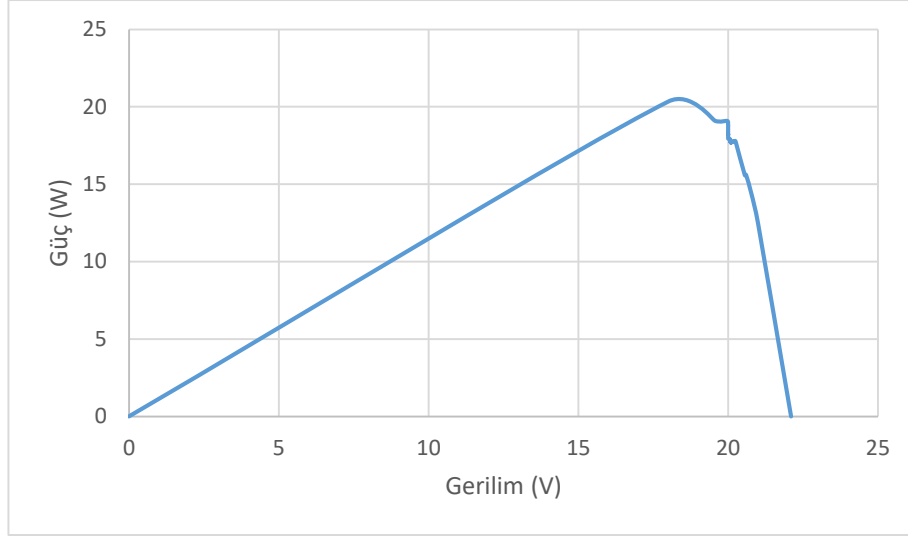
Şekil 5.19 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin teknik broşüründe verilen akım-gerilim karakteristiği

Test sonunda elde edilen akım gerilim karakteristiği incelendiğinde maksimum güç noktasının tolerans değeri skalasında olduğu görülmektedir. Şekil 5.20'deki analiz incelendiğinde maksimum güç gerilimi noktasına denk gelen maksimum akım değerinin etiket değerinde olduğu gibi 1.11 A olduğu anlaşılmaktadır. Bu değerlerle elde edilen maksimum güç 19.98 Wp olduğundan firmanın etiketinde belirttiği değerle % 5'lik tolerans da gözönüne alındığında uyum göstermektedir. Şekil 5.21'de ise ölçümü yapılan panelin güç-gerilim eğrisi gösterilmiştir. Bu bilgi panelin teknik broşüründe olmasa da birçok panel üreticisi teknik broşürlerinde bu eğriye de yer vermektedir.

Solar simülatörün spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık testlerinde A sınıfına ulaşp AAA sınıfı ile tanımlanması sağlandıktan sonra yapılan fotovoltaik panel testinde de başarılı sonuç verdiği akım gerilim eğrisi grafiklerinin örtüşmesiyle açıkça görülmektedir.



Şekil 5.20 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaik panelin akım-gerilim karakteristiği analizi



Şekil 5.21 Solar simülatör ile testi gerçekleştirilen fotovoltaiik panelin güç-gerilim eğrisi

5.3. Yapılan Prototiplerle Karşılaştırılması

Daha önce yapılan birinci prototipte sadece 6 farklı dalga boyuna sahip power LED’ler ile ışık kaynağı oluşturulmuş ve spektral eşleşme kriterinde A sınıfı yakalanmıştır. Ancak birinci prototipte standart test koşulu olan 1000 W/m^2 ışınlm şiddetine ulaşamadığından diğer iki performans kriteri olan uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık testi gerçekleştirilememiştir. Bu çalışma çok sayıda LED kullanmadan, yalnızca 6 farklı dalga boyuna sahip power LED ile solar simülatörde spektral eşleşmede A sınıfına ulaşılabilceğini ve solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak LED kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Yapılan ikinci prototipte ise birinci prototipe göre iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve ışınlm şiddetinin spektral eşleşmeyi bozmadan nasıl artırılacağı konusu üzerinde yoğunlaşmıştır. Gerçekleştirilen bir dizi test ve araştırma sonucunda soğuk beyaz ve sıcak beyaz LED’lerde revizyona gidilmiştir. Bu renklerdeki power LED’ler yerine COB LED’ler kullanılmıştır. Yapılan bu değişiklikten sonra birinci prototipte elde edilen 350 W/m^2 ışınlm şiddeti 700 W/m^2 ’nin üzerine çıkmıştır. Sonrasında aydınlatma alanı çevresi ayna ile kaplanmış ve ölçümler yeniden gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda ışınlm şiddetinin çok rahat bir şekilde 1000 W/m^2 ve üzerine ulaştığı görülmüştür. Bu değere ulaştıktan sonra performans kriterleri de test edilmiş ve her üç performans kriterinde A sınıfı elde edebilecek iyileştirmeler yapılmıştır. Mevcut LED dizilimi ve sayısında 700-800 nm arası dalga boyunda A sınıfını yakalamak için kırmızı LED tam güçte, mavi LED’in ise yarı güçte

sürüldüğü tespit edilmiştir. Bu yüzden, panel bazlı solar simülatörde kırmızı LED sayısının artırılıp mavi LED sayısının azaltılmasına karar verilmiştir. Oluşturulan bu ikinci prototipteki bilgiler ve deneyim ışığında tez çalışması asıl konusu olan panel bazlı geniş aydınlatma alanlı solar simülatörün tasarımı ve geliştirilmesine başlanmıştır.

İkinci prototip'ten elde edilen verilerden sonra aydınlatma alanının genişletileceği solar simülatör çalışmasına başlanmıştır. İlk olarak kırmızı ve mavi LED'lerin sayısı güncellendikten sonra LED devre kartı tasarımına geçilmiş, yapılan çalışmada çözüm için iki katlı pcb kartında karar kılınmıştır. Bir dizi araştırma ve çizim çalışması sonrasında kart için en ideal model belirlenmiş ve modüler yapıda kartlar geliştirilmiştir. Modüler kartların sayısı aydınlatma alanını büyütmek için artırılabilme imkanına sahiptir. Bu çalışmada 6 adet kart kullanılmıştır. LED sürücüler için de devre kartı tasarlanıp geliştirildikten sonra aktif soğutma sistemi için gerekli bakır borular LED kartlarının konumlandırılacağı alüminyum soğutucuların kanalları arasına yerleştirilmiştir. Bir kompresör, bir fan ve kondenserden oluşan aktif soğutma sistemi ayrı bir yerde tasarlanıp geliştirilmiş, sonrasında sigma alüminyum profilden imal edilen sistem gövdesine entegre edilmiştir.

Performans kriterleri testinde ikinci prototipten de öngörülebildiği gibi spektral eşleşme A sınıfına çok rahat ulaşmıştır. Bu aşamada kırmızı ve mavi LED'lerin sayısının değiştirilmesi, ilgili LED'in dalga boyunda A sınıfını yakalamayı oldukça kolaylaştırdığı için doğru bir adım olmuştur. Uzamsal uyumsuzluk testinde ikinci prototipte deneyimlenmiş olsa da geniş alanlı aydınlatmada sonuçları analiz edebilmek adına iki türlü test yapılmıştır. İlk test, aydınlatma alanının kenarlarına ayna konulmadan yapılmış bu testlerde kenar bölgelerde ışıyım şiddetinin çok fazla düştüğü gözlemlenmiştir. Bu istenmeyen sonuç uzamsal uyumsuzluk kriterinde solar simülatörü herhangi bir sınıfa dahil edememiştir. İkinci testte ise aydınlatma alanı kenarlarına ayna yerleştirilmiş, yapılan ölçümlerde uzamsal uyumsuzluk kriterinin ASTM E927-10 standartına göre A sınıfı, IEC 60904-9 standartına göre B sınıfına tekabül ettiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlara bakarak solar simülatörlerde gerek 1000 W/m^2 ışıyım şiddetine ulaşmak gerekse uzamsal uyumsuzluk kriterinde A sınıfını yakalamak için aynanın bir gereklilik olduğu saptanmıştır.

Zamansal istikrarsızlık kısa ve uzun vadeli testlerinde de A sınıfının yakalandığı ancak ikinci prototipteki sonuçlara göre performansının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre aydınlatma alanının genişledikçe ve LED sayısı arttıkça zamansal istikrarsızlık kriterinde A sınıfını yakalamamanın daha zor olduğu anlaşılmaktadır.

5.4. Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Literatürde 2003 yılında Kohraku vd.[138] ile başlayan ve günümüze kadar devam eden LED ışık kaynaklı solar simülatör çalışmalarında öne çıkanlar incelendiğinde çok farklı LED kombinasyonları, LED sayıları ve çeşitli sayılardaki dalga boyları ile AAA sınıfının elde edilmesinin amaçlandığı anlaşılmaktadır.

Tsuno vd.[141] 2008 yılında geliştirdikleri 33,5 x 33,5 cm aydınlatma alanına sahip LED solar simülatörde sadece kırmızı, mavi ve infraredlerden oluşan toplam 2304 adet LED kullanmışlar ancak bu çalışmada güneşin spektrum değerlerine ulaşamamışlardır.

Namin vd.[137] 2013 yılında dört adet tek renkli, bir adet çok renkli LED kullandıkları solar simülatörde uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık değerlerinin B sınıfında kaldığını belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasında geliştirilen solar simülatör Tsuno vd'nin ürünüyle karşılaştırıldığında 52 x 52 cm (yaklaşık iki katı) geniş aydınlatma alanında yalnızca 768 adet LED kullanılmış ve spektral eşleşme ile birlikte uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık kriterlerinde A sınıfına ulaşılmıştır.

Bliss vd[142]'nin 2009'da geliştirdikleri LED solar simülatörde 8 farklı dalga boyunda LED kullanılmış ancak kızılötesi dalga boyu elde etmek için halojen lamba kullanmak zorunda kalmışlardır. Halojen lambaların da dahil olduğu ışıyım şiddeti 1000 W/m² değerini aşsa da LED solar simülatörlerin dalga boyu aralığı olan 400-1100 nm arasında ışıyım şiddeti 685 W/m² olmuştur. Çalışmada paylaşılan görselde solar simülatörün fiziksel yapısına ek olarak solar simülatörden iki kat büyük LED kontrol ünitesinin olduğu anlaşılmaktadır. Spektral eşleşmenin B sınıfında elde dildiği çalışmada 22 x 22 cm aydınlatma alanında uzamsal uyumsuzluk C sınıfı, zamansal istikrarsızlık ise B sınıfı sonucunu vermiştir.

Bu tez çalışmasında ise Bliss vd'nin çalışmasına kıyasla 6 farklı dalga boyunda ve LED dışında başka bir ışık kaynağı kullanılmadan 1000 W/m² ışıyım değerine ulaşılmış ve her üç performans kriterinde de daha büyük aydınlatma alanına rağmen A sınıfı elde edilmiştir. Aynı zamanda Bliss vd'nin çalışmalarının aksine solar simülatör aydınlatma alanı ve LED kontrol ünitesi aynı yapı içerisinde konumlandırılıp ergonomik ve yekpare bir yapı oluşturulmuştur.

Jang ve Shin'in [100] 2010 yılında geliştirdikleri LED solar simülatörde 22 x 55 cm'lik aydınlatma alanında spot LED'ler kullanılmış ve ancak 900 W/m² ışıyım şiddetine ulaşmışlardır. Kullandıkları LED türünden dolayı alüminyum soğutucunun yüzey sıcaklığı

67 °C'ye kadar çıkmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan fanlar ve aktif soğutma sistemi ile soğutucu yüzeyinin sıcaklığı otomatik olarak kontrol edilmekte ve istenmeyen sıcaklık yükselişi önlenmektedir.

Bazzi vd. [70] 2012'de bu tez çalışmasında olduğu gibi 6 farklı dalga boyunda LED ile 15 x 15 cm aydınlatma alanına sahip bir solar simülatör geliştirmiş ve spektral eşleşmede A sınıfını yakalamasına rağmen uzamsal uyumsuzluk kriterinde C sınıfında kalmıştır.

Hamadani vd. [160] 2013 yılında tasarladığı solar simülatörde 25 x 50 cm 'lik aydınlatma alanına sahip solar simülatörde ışık kaynağı olarak 34 farklı dalga boyunda LED kullanmış ancak spektral eşleşme A sınıfını yakalayamamıştır. Yine aynı çalışmada uzamsal uyumsuzluk değeri de %10 'un altında olmasına rağmen herhangi bir sınıfa dahil olamamıştır.

Krebs vd. [143] 2011 yılında tasarladığı LED solar simülatörde 2.5 x 5 cm aydınlatma alanında spektral eşleşmeyi ancak 8 farklı dalga boyundaki LED ile yakalamıştır.

Linden vd. [146] 2014 yılında geliştirdiği solar simülatörde 5 x 5 cm'lik dört adet aydınlatma yüzeyi kullanmış ve her yüzeyde 100 adet olmak üzere toplam 400 adet LED ile çalışmıştır. Linden AAA sınıfı bir solar simülatör elde etmiş ancak bunu 23 farklı dalga boyundaki LED ile gerçekleştirmiştir.

Hem Hamadani'nin hem Linden'in hem de Krebs'in çalışmasına kıyasla bu tez çalışmasında tüm performans kriterlerinde A sınıfı 6 farklı dalga boyundaki LED ile sağlanmıştır. Bu sonuç solar simülatörün hem ürün bulmada kolaylık hem de maliyet açısından çok avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Stuckelberger vd. [161]'nin 11 farklı dalga boyundaki LED ile 18 x 18 cm aydınlatma alanına sahip tasarladıkları solar simülatörde AAA sınıfı sonuç elde etmiş ancak spektral eşleşme için 400 ile 750 nm arası için değerlendirme yaptıklarını belirtmişlerdir.

2015 yılında Novickovas vd. [72] 6 farklı dalga boyundaki LED ile tasarladıkları solar simülatörde 5 cm çaplı alanda AAA sınıfını yakalarken aydınlatma alanı 6 cm'ye çıkarıldığında uzamsal uyumsuzluğun C sınıfına düştüğünü bildirmişlerdir.

Günümüze yaklaşıldığında 2017 yılında Watjanatepin [148] ve 2018 yılında Al-Ahmad [162] LED solar simülatörler geliştirmişlerdir. Watjanatepin, bu tez çalışmasındaki solar simülatöre benzer olarak 6 farklı dalga boyunda LED kullanıp soğuk ve sıcak beyaz renkleri

COB LED ile sağlamış ancak 32.5 x 28 cm aydınlatma alanında uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık kriterlerinde A sınıfına ulaşmasına rağmen spektral eşleşmede B sınıfında kalmıştır. Al-Ahmad ise altıgen şekilde 6 farklı dalga boyunda LED ile tasarladığı solar simülatörde 20 cm² aydınlatma alanı için AAA sınıfını yakalarken alan 36 cm²'ye çıktığında uzamsal uyumsuzluk B sınıfına, 65 cm²'ye çıktığında ise C sınıfına inmiştir.

Literatürdeki çalışmalara genel olarak bakıldığında AAA sınıfını yakalayan solar simülatörlerin bu tez çalışmasının aksine çok farklı dalga boylarına sahip ve dolayısıyla daha fazla sayıda LED ile gerçekleştirildiği görülmektedir. 6 farklı dalga boyunda LED kullanılarak AAA sınıfını yakalayan çalışmalarda ise bu değer ancak küçük aydınlatma alanlarında sağlanabilmiştir. Bu tez çalışmasında geliştirilen solar simülatörün AAA sınıfını sadece 6 farklı dalga boyundaki LED ile ve 52 x 52 cm gibi büyük bir aydınlatma alanında başarması çalışmayı diğerlerinden farklı kılmaktadır.

Literatürdeki çalışmaların ölçümlerinin hepsinde hücre bazlı ölçümler yapıldığı ve fotovoltaiik hücrelerin I-V eğrisinin çıkarıldığı gözlenmektedir. Bu tez çalışmasında ise diğerlerinden farklı olarak fotovoltaiik hücre yerine fotovoltaiik panelin ölçümü yapıp I-V eğrisi çıkarılmıştır. Bu anlamda da bu çalışma benzersiz olmaktadır.

Bu tezdeki solar simülatörün LED devre kartı, LED sürücüsü devre kartı ve fan soğutmasına ek olarak yapılan aktif soğutma sistemi bu çalışmanın literatürde benzerine rastlanmayan bir başka önemli ve özgün tarafıdır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ışık spektrumu kontrollü, aktif soğutmalı, panel bazında fotovoltaiik cihaz testi gerçekleştirebilen ASTM E927-10 standartına göre AAA sınıfı solar simülatör tasarlanmış ve geliştirilmiştir.

Solar simülatörlerde kullanılan tüm ışık kaynakları incelendikten sonra en uygun ışık kaynağının LED olduğu görülmüştür. Düşük maliyet, uzun ömür, düşük enerji tüketimi, kompaktlık ve ayarlanabilir spektrum gibi özelliklerinden dolayı bu çalışmada ışık kaynağı olarak LED kullanılmıştır. Yukarıda sayılan özelliklerinden dolayı LED'ler geleneksel ışık kaynaklarına göre oldukça avantajlıdır. Ayrıca, LED'ler çeşitli mikrodnetleyiciler yardımıyla sürülebildikleri için spektrumları kontrol edilebilmektedir. Işık kaynağı olarak LED kullanılmasının bir avantajı da çok farklı renkte LED'e ihtiyaç duymadan sadece 6 farklı dalga boyu ile performans kriterlerinin sağlanmış olmasıdır. Soğuk ve sıcak beyaz dalga boyu için COB LED'ler, mavi (470 nm), kırmızı (721 nm) ve infrared (850 ve 940 nm) dalgaboyları için ise power LED'ler tercih edilmiştir.

Bu çalışmada ışık kaynağı olarak LED'lerin tercih edilmesiyle;

- LED'lerin fotovoltaiik panel testlerinde kullanılmak üzere tasarlanan solar simülatörler için uygun ve verimli bir ışık kaynağı olduğu,
- LED'lerin solar simülatör üretiminde maliyeti düşürdüğü,
- LED'ler ile solar simülatörlerde spektrum kontrolünün kolaylıkla yapılabildiği,
- LED'lerin düşük enerji tüketimi, fotovoltaiik paneller üzerinde olumsuz ısı etkisi oluşturmaması ve uzun ömrü ile solar simülatörlerde tercih edilebileceğini,
- LED'ler ile yapılan solar simülatörlerde IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarında belirtilen 1000 W/m² ışık şiddetinin elde edilebildiği,
- LED'ler ile yapılan solar simülatörlerde ASTM E927-10 standartlarında belirtilen üç performans kriteri spektral eşleşme, uzamsal uyumsuzluk ve zamansal istikrarsızlık'ın A sınıfı düzeyinde elde edilebildiği, dolayısıyla LED ışık kaynağı ile AAA sınıfı solar simülatör geliştirilebileceği,

ortaya konulmuştur.

Çalışmada LED'lerin dizilimi için PCB baskı devresi tasarlanıp geliştirilmiştir. Devre üzerindeki LED'lerin sayısından dolayı PCB kart iki katlı olarak tasarlanmıştır. Devre yolları haricinde kalan bölgeler boş bırakılıp alüminyum soğutucuya temas edecek şekilde

geliştirilmiştir. Kartların sağ ve solunda tüm LED'lerin besleme çıkışları konumlandırılıp standart soket boyutuna uygun tasarımı yapılmıştır. Kartlar aydınlatma alanını tamamen kaplayan bir bütün halinde değil, sayısının artırılıp azaltılabilmesine ve aydınlatma alanının istenilen boyuta getirilebilmesine izin verecek şekilde geliştirilmiştir. LED sürücülerini devre kartı ise sürücülerin boyutları gözönünde bulundurularak her bir kartta 40 adet sürücü olacak şekilde tasarlanmıştır. Her kart bir modül gibi düşünüldüğünde aydınlatma alanının değişimine uyum sağlayacak durumdadır. LED ve sürücü kartları ile ortaya çıkan sonuçlar şöyle sıralanabilir.

- LED ve sürücülerinin kart tasarımı ile özgün bir çalışma elde edilmiş, daha önceki çalışmalarda rastlanmayan bir tasarım ortaya çıkmıştır.
- LED devre kartlarında modüler yapı tercih edildiğinden, testi yapılacak fotovoltaiik panelin boyutuna göre aydınlatma alanının genişlemesine veya daralmasına imkân sunulmuştur.
- Her bir LED'in besleme uçları kartların sağ ve sol kısımlarına standart soketlere uyumlu olarak çıkarıldığından boyut değişimlerinde gerek görülmeyen LED'lerin kullanılmaması kolaylaştırılmıştır.
- LED sürücü kartlarının yerleşimi kat kat yapıldığından olası bir arıza durumunda rahatça yerinden çıkarılıp değiştirilebilmektedir.

Bu tez çalışmasının yine özgün yönlerinden biri olan aktif soğutma sistemi solar simülatöre entegre edilmiştir. Günümüze kadar yapılan solar simülatör çalışmalarında sadece fan ile soğutma yoluna gidilmiştir. Bu çözüm hücre bazında solar simülatörler için yeterli olabilmektedir. Ancak çalışmamızda panel bazlı test yapılabilecek aydınlatma alanı bulunduğundan standart test koşulu olan 25 °C'yi sağlayabilmek için fan soğutmasına ek olarak bir kompresör bir kondenser ve bir fandan oluşan aktif soğutma sistemi Freon R 134 gazı ile çalıştırılıp aydınlatma alanı soğutulmuştur. Aydınlatma alanına konan bir termokupl, dijital termostat ile haberleştirilip aktif soğutma sistemi otomatik kontrol edilmiştir.

Aktif soğutma sistemin solar simülatöre entegre edilmesiyle;

- Daha önceki solar simülatör çalışmalarının soğutma sisteminde kullanılmayan özgün bir sistem oluşturulmuştur.
- Panel bazlı fotovoltaiik cihaz testini gerçekleştiren AAA sınıfı solar simülatörde geniş aydınlatma alanının ısı kontrolü kolay bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

- Solar simülatörün fanların yeterli gelmeyeceği, ısının yüksek olduğu ortamlarda da rahatlıkla çalışabilmesi sağlanmıştır.

Solar simülatörün gövdesinin sigma profilden oluşturulması;

- Fiziksel yapısının uzun ömürlü ve sağlam olmasını,
- Ağırlığının ise minimumda kalmasını sağlamıştır.

Cihazın fiziksel boyutlarının ergonomik tasarlanması;

- Testleri gerçekleştirecek kişinin sağlıklı bir şekilde ölçüm yapmasına,
- Test sırasında kişinin fiziksel duruşunu bozmasını engelleyerek sırt ve kas ağrılarının en aza indirilmesini
- Cihazın kolaylıkla taşınmasını sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında ASTM E927-10 standarına göre AAA sınıfı, ışık spektrumu kontrollü ve aktif soğutma sistemli bir solar simülatör geliştirilmiş, piyasada kullanılan 20 Wp'lık bir polikristal panelin testi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Böylelikle fotovoltaiik cihaz testlerinin gerçekleşmesinde dış ülkelere bağımlılık minimuma indirilebilir ve bu çalışma gelecekte yapılacak yerli üretimlere esin kaynağı olabilecektir.

Bu çalışma sürecinde üretilen akademik çalışmalar ile literatüre katkılar sunulmuş ve gelecekteki çalışmalara öncülük etmesi hedeflenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, LED ve malzeme teknolojisi geliştikçe daha farklı çalışmalar yapılabilir.

Yapılacak çalışmalarda;

- Daha yüksek güçlü LED'ler ile daha az sayıda LED kullanılarak solar simülatörler üretilebilmesi,
- COB LED'ler yerine cevap verme zamanı daha hızlı olan LED'ler kullanılıp fotovoltaiik panel testlerinde flaş test yapılmasına olanak veren solar simülatörlerin geliştirilmesi,
- Yeni sürücü teknolojileri geliştirilerek LED'lerin spektrum kontrolleri daha kolay ve daha az sayıda sürücü ile yapılabilmesi
- Solar simülatörlere özel, aynı anda farklı dalga boylarında ışık üretebilen LED'ler veya LED setleri üretilebilmesi,
- Bu çalışmadaki kartların sayısı artırılarak daha yüksek güçteki panellerin testlerinin gerçekleştirilebilmesi

mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Tükenmez M., Demireli E. (2012) Renewable Energy Policy in Turkey with the New Legal Regulations. *Renewable Energy*, 39, 1–9.
- [2] Çapik M., Yılmaz A.O., Çavuşoğlu İ. (2012) Present Situation and Potential Role of Renewable Energy in Turkey. *Renewable Energy*, 46, 1–13.
- [3] Öcal O., Aslan A. (2013) Renewable Energy Consumption Economic Growth Nexus in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 494–499.
- [4] Liao C-H., Ou H-H., Lo S-L., Chiueh P-T., Yu Y-H. (2011) A Challenging Approach for Renewable Energy Market Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 787–793.
- [5] Gök S.G., Kavasoğlu R. (2013). The renewable energy policy of Turkey. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 13-17 May. 2013, Istanbul, Turkey
- [6] Twidell J, Weir T (2015) Renewable energy resources. 3rd Edition, Routledge, London.
- [7] Barış K., Küçükali S. (2012) Availability of Renewable Energy Sources in Turkey: Current Situation, Potential, Government Policies and The EU Perspective. *Energy Policy*, 42, 377–391.
- [8] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi., (2009). Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi, EKC Form Ofset, Ankara
- [9] Li DHW., Cheung GHW., Lam JC. (2005) Analysis of the Operational Performance and Efficiency Characteristic for Photovoltaic System in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 46, 1107–1118.
- [10] Gxasheka AR., van Dyk EE., Meyer EL. (2005) Evaluation of Performance Parameters of PV Modules Deployed Outdoors. *Renewable Energy*, 30, 611–620.
- [11] Adamo F., Attivissimo F., Nisio A Di., Spadavecchia M. (2011) Characterization and Testing of a Tool for Photovoltaic Panel Modeling. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60, 1613–1622.

- [12] Parida B., Iniyan S., Goic R. (2011). A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1625–1636 .
- [13] Guechi A., Chegaar M. (2007) Effects of Diffuse Spectral Illumination on Microcrystalline Solar Cells. *J Electron Devices*, 5, 116–121.
- [14] Standard, A. S. T. M. (2010) E927-10, Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing, ASTM International.
- [15] Kim KA., Dostart N., Huynh J., Krein PT. (2014) Low-Cost Solar Simulator Design for Multi-Junction Solar Cells in Space Applications. *Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 28 Feb.-1 March 2014, Champaign, IL, USA.
- [16] Dong X., Sun Z., Nathan GJ., Ashman PJ., Gu D. (2015) Time-Resolved Spectra of Solar Simulators Employing Metal Halide and Xenon Arc Lamps. *Solar Energy*, 115, 613–620.
- [17] Serreze HB., Burns JE., Stein M., Chandrasekhar N. (2012) A New Generation of Compact Solar Simulators. *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 3-8 June 2012, Austin, TX, USA.
- [18] Grandi G., Ienina A. (2013) Analysis and Realization of A Low-Cost Hybrid LED-Halogen Solar Simulator. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 20-23 Oct. 2013, Madrid, Spain.
- [19] Esen V., Sağlam Ş., Oral B. (2017) Light Sources of Solar Simulators for Photovoltaic Devices: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, 1240–1250.
- [20] Bickler D. (1962) The Simulation of Solar Radiation. *Solar Energy*, 6, 64–68.
- [21] Wang W., Laumert B. (2014) Simulate A ‘Sun’ for Solar Research: A Literature Review of Solar Simulator Technology. *Department of Energy Technology*, 1-34. <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A756274&dswid=-338> (25.06.2018)
- [22] Canka K.F. (2015) Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Engineer & The Machinery Magazine*, 671, 28-40.

- [23] Hanasoge S.M., Duvall T.L., Sreenivasan K.R. (2012) From the Cover: Anomalously Weak Solar Convection. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (30), 11928-11932.
- [24] National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/> (15.02.2018).
- [25] University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). <https://scied.ucar.edu/sun-regions> (15.02.2018).
- [26] Solar & Heliospheric Observatory (SOHO). <https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/eit006.html> (23.01.2018).
- [27] PV Education. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/the-sun> (16.01.2018).
- [28] Gueymard C.A., Myers D.R. (2008) *Solar Radiation Measurement: Progress in Radiometry for Improved Modeling, Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*, Editor: Viorel Badescu, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [29] Bhatia S.C. (2014) *Advanced Renewable Energy Systems (Part 1 and 2)*. Woodhead Publishing, New Delhi, India.
- [30] Şahin A.D., Şen Z. (2008) *Solar Irradiation Estimation Methods from Sunshine and Cloud Cover Data, Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances*, Editor: Viorel Badescu, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [31] Duffie J.A, Beckman W.A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [32] Harrouni S. (2008) *Fractal Classification of Typical Meteorological Days from Global Solar Irradiance: Application to Five Sites of Different Climates, Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Editor: Viorel Badescu, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [33] Riordan C., Hulstron R. (1990) What is An Air Mass 1.5 Spectrum?(Solar Cell Performance Calculations). *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, 21-25 May 1990, Kissimmee, FL, USA.

- [34] Erdogdu E. (2007) Regulatory Reform in Turkish Energy İndustry: An Analysis. Energy Policy 35, 984–993.
- [35] Irmak E., Ayaz M.S., Gök S.G., Şahin A.B. (2014) A Survey on Public Awareness Towards Renewable Energy in Turkey. International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 19-22 Oct. 2014, Milwaukee, WI, USA.
- [36] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> (06.01.2018).
- [37] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/> (06.01.2018).
- [38] T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-statistik.aspx?m=ANKARA> (06.01.2018).
- [39] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2014). Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı. Ankara.
- [40] T.C. Başbakanlık (2015). 64. Hükümet Programı.
- [41] International Renewable Energy Agency (IRENA). <https://www.irena.org/solar> (02.01.2018).
- [42] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). Renewable Energy and Jobs Annual Review. <https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019> (10.10.2019).
- [43] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Enerji-Verimliligi> (02.01.2018).
- [44] The World Bank Group. <https://globalsolaratlas.info/downloads/turkey> (05.03.2019)
- [45] Öztürk H.H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri. 18-21 Ekim, İzmir.

- [46] Kantaroğlu F. (2010). Fotovoltaik Sistemler. Türk Tesisat Mühendisleri Derneği (TTMD), 8, 28-34.
- [47] Sayın S., Koç İ. (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi. 26, 89–106.
- [48] Solar Quotes. <https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline/> (05.01.2019).
- [49] Goetzberger A., Luther J., Willeke G. (2002). Solar cells: past, present, future. Solar Energy Materials and Solar Cells, 74, 1–11.
- [50] İnvento Türkiye. <http://solar.inventoturkiye.com/a-si-thin-film-solar-panel-a-si-ince-film-gunes-paneli/> (11.12.2019).
- [51] Oktik Ş. (2001). Güneş Elektrik Dönüşümleri: Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri. Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara.
- [52] DS New Energy. <http://tr.dsisolar.com/solar-cell/cigs/cigs-solar-cell.html> (10.12.2019).
- [53] Kazmerski L.L. (1997). Photovoltaics: A Review of Cell and Module Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1(1-2), 71–170.
- [54] Ahmed M. Koran (2013). Photovoltaic Source Simulators for Solar Power Conditioning Systems: Design Optimization, Modeling, and Control, PhD Thesis. Virginia Tech.
- [55] Yinglisolar. <http://www.yinglisolar.com/en/solar-basics> (15.12.2019).
- [56] Ecoprogetti. <https://ecoprogetti.com/the-structure-of-photovoltaic-module/> (15.12.2019).
- [57] Li Y., Huang W., Huang H., Hewitt C., Chen Y., Fang G., Carroll D.L. (2013) Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells. Solar Energy, 90, 51–57.
- [58] Plyta F. (2015) Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD Thesis. Loughborough University.

- [59] Wenham S.R., Green M.A., Watt M.E., Corkish R., Sproul A. (2013) Applied Photovoltaics, 3rd Edition, Routledge, London.
- [60] Brandhorst H, Hickey J, Curtis H, Ralph E (1975) Interim solar cell testing procedures for terrestrial applications <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750022577.pdf> (05.04.2016)
- [61] Meng Q., Wang Y., Zhang L. (2011) Irradiance characteristics and optimization design of a large-scale solar simulator. Solar Energy, 85,1758–1767.
- [62] Standard, I. E. C. (2007) 60904–9. Photovoltaic Devices - Part 9: Solar Simulator Performance Requirements. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- [63] Serreze H.B., Sobhie H.M., Hogan S.J. (2009) Solar Simulators-Beyond Class A. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 7-12 June 2009, Philadelphia, PA, USA.
- [64] Yang C., Wang J., Guo X., Wang Y., Ding Z. (2016) A Multisource Regular Dodecahedron Solar Simulator Structure for Uniform Flux. IEEE Journal of Photovoltaics, 6, 516–521.
- [65] Chawla M.K., Tech P.E. (2006) A Step by Step Guide to Selecting the “Right” Solar Simulator for Your Solar Cell Testing Application. Photo Emission Tech, Inc, USA.
- [66] Riedel N., Pratt L., Edler A., Haas F. (2015) Effects of A Neutral Density Filter in Measuring Low-Light Performance with A Pulsed Light Xe Arc Solar Simulator. IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 14-19 June 2015, New Orleans, LA, USA.
- [67] Muthuraaman B., Will G., Wang H., Moonie P., Bell J. (2013) Increased Charge Transfer of Poly (Ethylene Oxide) Based Electrolyte by Addition of Small Molecule and its Application in Dye-Sensitized Solar Cells. Electrochimica Acta, 87, 526–531.
- [68] Reese M.O., Gevorgyan S.A., Jørgensen M., Bundgaard E., Kurtz S.R., Ginley D.S., Olson D.C., Lloyd M.T. (2011) Consensus Stability Testing Protocols for Organic Photovoltaic Materials and Devices. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95, 1253–1267.

- [69] Georgescu A., Damache G., Gîrțu M.A. (2008) Class A small Area Solar Simulator for Dye-Sensitized Solar Cell Testing. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 10, 3003–3007.
- [70] Bazzi A.M., Klein Z., Sweeney M., Kroeger K.P., Shenoy P.S., Krein P.T. (2012) Solid-State Solar Simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48, 1195–1202 .
- [71] Krusi P., Schmid R. (1983) The CSI 1000 W Lamp as A Source for Solar Radiation Simulation. *Solar Energy*, 30, 455–462.
- [72] Novickovas A., Baguckis A., Mekys A., Tamosiunas V. (2015) Compact Light-Emitting Diode-Based AAA Class Solar Simulator: Design and Application Peculiarities. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5, 1137–1142 .
- [73] Xu J., Woodyard J.R. (2000) Investigation of Carbon Arc Source as An AM0 Solar Simulator for Use in Characterizing Multijunction Solar Cells. *Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 15-22 Sept. 2000, Anchorage, AK, USA.
- [74] Kockott D., Schoenlein A. (2012) To What Extent Does the Radiation of A Solar Simulator Meet A “Reference Sun”? A Quantitative Approach. *Polymer Testing*, 31, 710–715.
- [75] Curtis H.B. (1965) Measurement of Hemispherical Total Emittance and Normal Solar Absorptance of Selected Materials in the Temperature Range 280 Deg To 600 Deg K, *Scientific and Technical Aerospace Reports*, 4(8), NASA, Office of Scientific and Technical Information, Minnesota University.
- [76] Bowman R.L., Jack J.R., Mirtich M.J. (1969) Performance of N/P Silicon and Cadmium Sulfide Solar Cells as Affected by Hypervelocity Particle Impact, *U.S. Government Research & Development Reports*, 69(7-12), U.S. Government Printing Office, Michigan State University.
- [77] Mirtich M. (1975) The Effects of Exposure to LN2 Temperatures and 2.5 Suns Solar Radiation on 30-cm Ion Thruster Performance. *11th Electric Propulsion Conference*, 19 - 21 March 1975, New Orleans, LA, USA.

- [78] Fussell W.B., Triolo J.J., Henninger J.H. (1963) A Dynamic Thermal Vacuum Technique for Measuring the Solar Absorptance and Thermal Emittance of Spacecraft Coatings. National Aeronautics and Space Administration.
- [79] Van Vliet J., De Groot J.J. (1981) High-Pressure Sodium Discharge Lamps. IEEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews), 128, 415–441.
- [80] Li Y., Liu S., Shukla A. (2016) Experimental Analysis on Use of Thermal Conductivity Enhancers (Tces) for Solar Chimney Applications with Energy Storage Layer. Energy and Buildings, 116, 35–44.
- [81] Decker A.J., Pollack J.L. (1972) A 400 Kilowatt Argon Arc Lamp For Solar Simulation, NASA Technical Note, (8031-8040), National Aeronautics and Space Administration
- [82] Choi S., Scotti S., Song K., Ries H. (1997) Transpiring cooling of a scram-jet engine combustion chamber. 32nd Thermophysics Conference, 23-25 June 1997, Atlanta, GA, USA.
- [83] Petrasch J., Coray P., Meier A., Brack M., Häberling P., Wuillemin D., Steinfeld A. (2006) A Novel 50kW 11,000 suns High-Flux Solar Simulator Based on an Array of Xenon Arc Lamps. Journal of Solar Energy Engineering, 129, 405–411.
- [84] Roberts T., Mosbrucker G., Petersen J., Osman M. (2014) Flexible Solar Simulator for Renewable Energy instruction Laboratory. IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), 24-26 July 2014, Portland, OR, USA.
- [85] Irwan Y.M., Leow W.Z., Irwanto M., Fareq M., Amelia A.R., Gomesh N., Safwati I. (2015) Indoor Test Performance of PV Panel through Water Cooling Method. Energy Procedia, 79, 604–611.
- [86] Kongtragool B., Wongwiset S. (2008) A Four Power-Piston Low-Temperature Differential Stirling Engine Using Simulated Solar Energy as A Heat Source. Solar Energy, 82, 493–500.

- [87] Landrock C., Omrane B., Aristizabal J., Kaminska B., Menon C. (2011) An Improved Light Source Using Filtered Tungsten Lamps as An Affordable Solar Simulator for Testing of Photovoltaic Cells. IEEE 17th International Mixed-Signals, Sensors and Systems Test Workshop, 16-18 May 2011, Santa Barbara, CA, USA.
- [88] Aksoy F., Karabulut H., Çınar C., Solmaz H., Özgören YÖ., Uyumaz A. (2015) Thermal Performance of A Stirling Engine Powered by A Solar Simulator. Applied Thermal Engineering, 86, 161–167.
- [89] Jackson A., Pitcher D., Gerritsen H.J. (1991) A Portable Alt-Azimuth Solar Simulator for Evaluation of Daylighting Devices. Review of Scientific Instruments, 62, 821–824.
- [90] Kamprachum S., Thainoi S., Kanjanachuchai S., Panyakeow S. (2003) Multi-stacked InAs/GaAs Quantum Dot Structures and Their Photovoltaic Characteristics. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 11-18 May 2003, Osaka, Japan.
- [91] King D.L., Hansen B.R., Moore J.M., Aiken D.J. (2000) New Methods for Measuring Performance of Monolithic Multi-Junction Solar Cells. Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 15-22 Sept. 2000, Anchorage, AK, USA.
- [92] Hussain F, Othman M.Y.H, Yatim B., Ruslan H., Sopian K., Anuar Z., Khairuddin S. (2011) Fabrication and Irradiance Mapping of a Low Cost Solar Simulator for Indoor Testing of Solar Collector. Journal of Solar Energy Engineering, 133, 44502–44504
- [93] Shankar R., Shim W.J., An J.G., Yim U.H. (2015) A Practical Review on Photooxidation of Crude Oil: Laboratory Lamp Setup and Factors Affecting It. Water Research, 68, 304–315.
- [94] Alxneit I. (2011) Measuring Temperatures in A High Concentration Solar Simulator Demonstration of the Principle. Solar Energy, 85, 516–522.

- [95] Bari D., Wrachien N., Tagliaferro R., Brown T.M., Reale A., Di Carlo A., Meneghesso G., Cester A. (2012) Reliability Study of Dye-Sensitized Solar Cells by Means of Solar Simulator and White LED. *Microelectronics Reliability*, 52, 2495–2499.
- [96] Wang W., Aichmayer L., Laumert B., Fransson T. (2014) Design and Validation of a Low-cost High-flux Solar Simulator using Fresnel Lens Concentrators. *Energy Procedia*, 49, 2221–2230.
- [97] Sopori B.L., Marshall C. (1991) Design of A Fiber Optic Based Solar Simulator (for Solar Cell Testing). The Conference Record of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 7-11 Oct. 1991, Las Vegas, NV, USA.
- [98] Osterwald C.R, Wanlass M.W., Moriarty T., Steiner MA., Emery KA. (2014) Empirical Procedure to Correct Concentrator Cell Efficiency Measurement Errors Caused by Unfiltered Xenon Flash Solar Simulators. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 8-13 June 2014, Denver, CO, USA.
- [99] Grandi G., Ienina A., Bardhi M. (2014) Effective Low-Cost Hybrid LED-Halogen Solar Simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50, 3055–3064.
- [100] Jang S.H, Shin M.W. (2010) Fabrication and Thermal Optimization of LED Solar Cell Simulator. *Current Applied Physics*, 10, 537–539.
- [101] Sarwar J., Georgakis G., LaChance R., Ozalp N. (2014) Description and Characterization of an Adjustable Flux Solar Simulator for Solar Thermal, Thermochemical and Photovoltaic Applications. *Solar Energy*, 100, 179–194.
- [102] Matson R.J, Emery K.A, Bird R.E. (1984) Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation and Solar Cell Short-Circuit Current Calibration: A Review. *Solar Cells*, 11, 105–145.
- [103] Ito S., Matsui H., Okada K., Kusano S., Kitamura T., Wada Y., Yanagida S. (2004) Calibration of Solar Simulator for Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82, 421–429.
- [104] Li J., Gonzalez-Aguilar J., Pérez-Rábago C., Zeaiter H., Romero M. (2014) Optical Analysis of a Hexagonal 42kWe High-flux Solar Simulator. *Energy Procedia* 57, 590–596.

- [105] Li J., Gonzalez-Aguilar J., Romero M. (2015) Line-concentrating Flux Analysis of 42kWe High-flux Solar Simulator. *Energy Procedia*, 69,132–137.
- [106] Emery K.A. (1986) Solar Simulators and I–V Measurement Methods. *Solar Cells*, 18, 251–260.
- [107] Kilmer L.C. (1994) The Design of A More Accurate, Higher Fidelity Dual Source Air Mass Zero Solar Simulator. *IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, 5-9 Dec. 1994, Waikoloa, HI, USA.
- [108] Field H. (1997) Solar Cell Spectral Response Measurement Errors Related to Spectral Band Width and Chopped Light Waveform. *Conference Record of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 29 Sept.-3 Oct. 1997, Anaheim, CA, USA.
- [109] Nocerino J.C, Liu S.H (2010) Solar Simulator Air Mass Zero Calibration Method. *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 20-25 June 2010, Honolulu, HI, USA.
- [110] Pravettoni M., Galleano R., Aitasalo T., Kenny R.P., Dunlop E.D., Barnham K.W.J. (2010) From An Existing Large Area Pulsed Solar Simulator to A High Intensity Pulsed Solar Simulator: Characterization, Standard Classification and First Results at ESTI. *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 20-25 June 2010, Honolulu, HI, USA.
- [111] Snyder D.B, Wolford D.A. (2012) A Newton-Raphson Method Approach to Adjusting Multi-Source Solar Simulators. *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 3-8 June 2012, Austin, TX, USA.
- [112] Pravettoni M., Norton M., Aitasalo T., Galleano R., Georghiou G., Kenny R.P., Barnham K.W.J. (2010) Electrical Characterization of Concentrator PV Cells: A Comparison Between Outdoor Testing Under Direct Solar Radiation and indoor Measurements on A High Intensity Solar Simulator. *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 20-25 June 2010, Honolulu, HI, USA.
- [113] Paraskeva V., Norton M., Hadjipanayi M., Pravettoni M., Georghiou G.E. (2015) Luminescent Emission of Multi-Junction InGaP/InGaAs/Ge PV Cells Under High Intensity Irradiation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 134, 175–184.

- [114] Languy F., Lenaerts C., Loicq J., Thibert T., Habraken S. (2013) Performance of Solar Concentrator Made of An Achromatic Fresnel Doublet Measured with A Continuous Solar Simulator and Comparison with A Singlet. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 109, 70–76.
- [115] Hu B., Li B., Zhao R., Yang T. (2011) Reflection-type Single Long-Pulse Solar Simulator for High-Efficiency Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Review of Scientific Instruments* 82, 65104.
- [116] Guo K., Luo Z., Xiao G., Zhang Y., Ni M. (2013) Simplified Source Model for A 54kW Solar Simulator. *International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*, 19-21 Aug. 2013, Chengdu, China.
- [117] Kolberg D., Schubert F., Lontke N., Zwigart A., Spinner D.M. (2011) Development of Tunable Close Match LED Solar Simulator with Extended Spectral Range to UV and IR. *Energy Procedia*, 8, 100–105.
- [118] Dominguez C., Anton I., Sala G. (2008) Solar Simulator for Indoor Characterization of Large Area High-Concentration PV Modules. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 11-16 May 2008, San Diego, CA, USA.
- [119] Domínguez C., Antón I., Sala G. (2008) Solar Simulator for Concentrator Photovoltaic Systems. *Optics Express*, 16, 14894–14901.
- [120] Keogh W.M., Blakers A.W., Cuevas A. (2004) Constant Voltage I–V Curve Flash Tester for Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 81, 183–196.
- [121] Grzesiak W., Mackow P., Maj T., Polak A., Klugmann-Radziemska E., Zawora S., Drabczyk K., Gulkowski S., Grzesiak P. (2016) Innovative System for Energy Collection and Management Integrated within A Photovoltaic Module. *Solar Energy*, 132, 442–452.
- [122] Osterwald C.R., Wanlass M.W., Moriarty T., Steiner M.A., Emery K.A. (2014) Concentrator Cell Efficiency Measurement Errors Caused by Unfiltered Xenon Flash Solar Simulators. *AIP Conference Proceedings*, 1616(1), 149-153.
- [123] Thomas N., Beck T., Chakraborty S., Gerber M., Graf S., Piazza D., Roethlisberger G. (2011) A Wide-Beam Continuous Solar Simulator for Simulating the Solar Flux at the Orbit of Mercury. *Measurement Science and Technology*, 22, 65903.

- [124] Ekman B.M., Brooks G., Akbar Rhamdhani M. (2015) Development of High Flux Solar Simulators for Solar Thermal Research. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141, 436–446.
- [125] Codd D.S., Carlson A., Rees J., Slocum A.H. (2010) A Low Cost High Flux Solar Simulator. *Solar Energy*, 84, 2202–2212.
- [126] Gevorgyan S.A, Eggert Carlé J., Søndergaard R., Trofod Larsen-Olsen T., Jørgensen M., Krebs F.C. (2013) Accurate Characterization of OPVs: Device Masking and Different Solar Simulators. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 110, 24–35.
- [127] Zacharopoulos A., Mondol J.D., Smyth M., Hyde T., O’Brien V. (2009) State of the Art Solar Simulator with Flexible Mounting. *Proceedings of the International Solar Energy Society, Solar World Congress*, 11-14 Oct. 2009, Johannesburg, South Africa.
- [128] Pernpeintner J., Happich C., Lüpfer E., Schiricke B., Lichtenthäler N., Weinhausen J. (2015) Linear Focus Solar Simulator Test Bench for Non-destructive Optical Efficiency Testing of Parabolic Trough Receivers. *Energy Procedia*, 69, 518–522.
- [129] in Kim S., Kissick J., Spence S., Boyle C. (2016) Design, Analysis and Performance of A Polymer–Carbon Nanotubes Based Economic Solar Collector. *Solar Energy*, 134, 251–263.
- [130] Bigaila E., Rounis E., Luk P., Athienitis A. (2015) A Study of a BIPV/T Collector Prototype for Building Façade Applications. *Energy Procedia*, 78,1931–1936.
- [131] Guarino F, Dermardiros V, Chen Y, Rao J, Athienitis A, Cellura M, Mistretta M (2015) PCM Thermal Energy Storage in Buildings: Experimental Study and Applications. *Energy Procedia*, 70, 219–228.
- [132] Chen F., Wittkopf S.K., Khai Ng P., Du H. (2012) Solar Heat Gain Coefficient Measurement of Semi-Transparent Photovoltaic Modules with Indoor Calorimetric Hot Box and Solar Simulator. *Energy and Buildings*, 53,74–84.
- [133] Schiavon S., Webster T., Dickerhoff D., Bauman F. (2014) Stratification Prediction Model for Perimeter Zone UFAD Diffusers Based On Laboratory Testing With Solar Simulator. *Energy and Buildings*, 82, 786–794.

- [134] Paul D.I, Smyth M., Zacharopoulos A., Mondol J. (2013) The Design, Fabrication and Indoor Experimental Characterisation of An Isolated Cell Photovoltaic Module. *Solar Energy*, 88, 1–12.
- [135] Sabahi H., Tofigh A.A., Kakhki I.M., Bungypoor-Fard H. (2016) Design, Construction and Performance Test of An Efficient Large-Scale Solar Simulator for Investigation of Solar Thermal Collectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 15, 35–41.
- [136] Yang T., Athienitis A.K. (2014) A Study of Design Options for A Building Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPV/T) System with Glazed Air Collector and Multiple Inlets. *Solar Energy*, 104, 82–92.
- [137] Namin A., Jivacate C., Chenvidhya D., Kirtikara K., Thongpron J. (2013) Determination of Solar Cell Electrical Parameters and Resistances Using Color and White LED-Based Solar Simulators with High Amplitude Pulse Input Voltages. *Renewable Energy*, 54, 131–137.
- [138] Kohraku S., Kurokawa K. (2003) New Methods for Solar Cells Measurement by LED Solar Simulator. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion.
- [139] Kohraku S., Kurokawa K. (2006) A Fundamental Experiment for Discrete-Wavelength LED Solar Simulator. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 3364–3370.
- [140] Bliss M., Betts T.R., Gottschalg R. (2008) Advantages in Using Leds as the Main Light Source in Solar Simulators for Measuring PV Device Characteristics, *SPIE Proceedings, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems*, 7048(07).
- [141] Tsuno Y., Kamisako K., Kurokawa K. (2008) New generation of PV module rating by LED solar simulator - A novel approach and its capabilities. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 11-16 May 2008, San Diego, CA, USA.
- [142] Bliss M., Betts T.R, Gottschalg R. (2009) An LED-Based Photovoltaic Measurement System with Variable Spectrum and Flash Speed. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, 825–830.

- [143] Krebs F.C., Sylvester-Hvid K.O., Jørgensen M. (2011) A Self-Calibrating LED-Based Solar Test Platform. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19, 97–112.
- [144] Kolberg D., Schubert F., Klameth K., Spinner D.M. (2012) Homogeneity and Lifetime Performance of a Tunable Close Match LED Solar Simulator. *Energy Procedia*, 27, 306–311.
- [145] Plyta F., Betts T.R., Gottschalg R. (2013) Potential for LED Solar Simulators. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 16-21 June 2013, Tampa, FL, USA.
- [146] Linden K.J., Neal W.R., Serreze H.B. (2014) Adjustable Spectrum LED Solar Simulator. *Proc. SPIE 9003, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII*, 900317.
- [147] Luka T., Eiternick S., Turek M. (2015) Rapid Testing of External Quantum Efficiency using LED Solar Simulators. *Energy Procedia*, 77, 113–118 .
- [148] Watjenatepin N. (2017) Design construct and evaluation of six-spectral LEDs-based solar simulator based on IEC 60904–9. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 923-931.
- [149] Dennis T. (2014) An Arbitrarily Programmable Solar Simulator Based on A Liquid Crystal Spatial Light Modulator. *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 8-13 June 2014, Denver, CO, USA.
- [150] Hamadani B.H, Roller J., Dougherty B., Yoon H.W. (2013) Fast and Reliable Spectral Response Measurements of PV Cells Using Light Emitting Diodes. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 16-21 June 2013, Tampa, FL, USA
- [151] Dudley J.M., Genty G., Coen S. (2006) Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber. *Reviews of Modern Physics*, 78, 1135–1184.
- [152] Dennis T., Schlager J.B., Yuan H-C., Wang Q., Friedman D. (2012) A Novel Solar Simulator Based on A Super-Continuum Laser. *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 3-8 June 2012, Austin, TX, USA.

- [153] Dennis T., Schlager J.B., Bertness K.A. (2014) A Novel Solar Simulator Based on A Supercontinuum Laser for Solar Cell Device and Materials Characterization. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4, 1119–1127.
- [154] Dennis T., Fisher B., Meitl M., Wilson J. (2015) A High-Concentration Programmable Solar Simulator for Testing Multi-Junction Concentrator Photovoltaics. *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 14-19 June 2015, New Orleans, LA, USA.
- [155] Bennett M., Podlesny R. (1990) Two Source Simulator for Improved Solar Simulation. *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, 21-25 May 1990, Kissimmee, FL, USA.
- [156] Bickler D.B. (1962) The Calibration of a Solar Simulator. *Proceedings of the ASME Solar Energy Applications Committee Winter Annual Meeting*.
- [157] Namin A., Jivacate C., Chenvidhya D., Kirtikara K., Thongpron J. (2012) Construction of Tungsten Halogen, Pulsed LED, and Combined Tungsten Halogen-LED Solar Simulators for Solar Cell-Characterization and Electrical Parameters Determination. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 1-9.
- [158] Guvench M.G, Gurcan C., Durgin K., MacDonald D. (2004) Solar simulator and IV measurement system for large area solar cell testing. 9, 1, <http://eelinux.ee.usm.maine.edu/courses/ele402/Guvench-ASEE04Pfs.pdf> (06.05.2016).
- [159] Khatib T., Elmenreich W., Mohamed A. (2017) Simplified I-V Characteristic Tester for Photovoltaic Modules Using A DC-DC Boost Converter. *Sustainability*, 9(4),657.
- [160] Hamadani B.H, Chua K., Roller J., Bennahmias M.J., Campbell B., Yoon H.W., Dougherty B. (2013) Towards Realization of A Large-Area Light-Emitting Diode-Based Solar Simulator. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21,779–789.
- [161] Stuckelberger M., Perruche B., Bonnet-Eymard M., Riesen Y., Despeisse M., Haug F., Ballif C. (2014) Class AAA LED-Based Solar Simulator for Steady-State Measurements and Light Soaking. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4,1282–1287.

- [162]** Al-Ahmad A.Y., Holdsworth J., Vaughan B., Sharafutdinova G., Zhou X., Belcher WJ., Dastoor P.C. (2019) Modular LED Arrays for Large Area Solar Simulation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27,179–189.



EKLER

EK1. Arduino spektrum kontrolü yazılım kodu

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

typedef enum _arel_color_code_t
{
    RED,
    BLUE,
    NM850,
    NM950,
    CW,
    WW
} arel_color_code_t;

//red
Adafruit_PWMServoDriver red_board = Adafruit_PWMServoDriver(0x58);
//blue
Adafruit_PWMServoDriver blue_board = Adafruit_PWMServoDriver(0x48);
//850
Adafruit_PWMServoDriver nm850_board_1 = Adafruit_PWMServoDriver(0x50);
Adafruit_PWMServoDriver nm850_board_2 = Adafruit_PWMServoDriver(0x40);
//950
Adafruit_PWMServoDriver nm950_board_1 = Adafruit_PWMServoDriver(0x60);
Adafruit_PWMServoDriver nm950_board_2 = Adafruit_PWMServoDriver(0x68);
//CW
Adafruit_PWMServoDriver cw_board = Adafruit_PWMServoDriver(0x70);
//WW
Adafruit_PWMServoDriver ww_board = Adafruit_PWMServoDriver(0x78);

//red
void setPwm(arel_color_code_t color_type, int pwm)
{
    pwm = map(pwm, 0, 255, 0, 4095);

    if (color_type == RED)
    {
        for (int i = 0; i < 16; i++)
        {
            red_board.setPin(i, pwm);
        }
    }
}
```

```

else if (color_type == BLUE)
{
    for (int i = 0; i < 16; i++)
    {
        blue_board.setPin(i, pwm);
    }
}
else if (color_type == NM850)
{
    for (int i = 0; i < 16; i++)
    {
        nm850_board_1.setPin(i, pwm);
        nm850_board_2.setPin(i, pwm);
    }
}
else if (color_type == NM950)
{
    for (int i = 0; i < 16; i++)
    {
        nm950_board_1.setPin(i, pwm);
        nm950_board_2.setPin(i, pwm);
    }
}
else if (color_type == CW)
{
    for (int i = 0; i < 16; i++)
    {
        cw_board.setPin(i, pwm);
    }
}
else
{
    for (int i = 0; i < 16; i++)
    {
        ww_board.setPin(i, pwm);
    }
}

```

```

void setup()
{

    Wire.begin();
    Wire.setClock(400000);

    red_board.begin();
    red_board.setPWMFreq(400);

    blue_board.begin();
    blue_board.setPWMFreq(400);

    nm850_board_1.begin();
    nm850_board_1.setPWMFreq(400);
    nm850_board_2.begin();
    nm850_board_2.setPWMFreq(400);

    nm950_board_1.begin();
    nm950_board_1.setPWMFreq(400);
    nm950_board_2.begin();
    nm950_board_2.setPWMFreq(400);

    cw_board.begin();
    cw_board.setPWMFreq(1000);

    ww_board.begin();
    ww_board.setPWMFreq(1000);

    delay(20);
}

void loop()
{
    delay(1000) ;
    setPwm(RED, 50);
    setPwm(BLUE, 50);
    setPwm(NM850, 120);
    setPwm(NM950, 120);
    setPwm(CW, 80);
    setPwm(WW, 80);
}

```



Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review



Vedat Esen^{a,*}, Şafak Sağlam^b, Bülent Oral^b

^a Istanbul Arel University, Vocational School, Department of Electricity, Kemalpaşa Mahallesi, Halkalı Caddesi No: 101 Sefaköy, Küçükçekmece, 34295 İstanbul, Turkey

^b Marmara University, Faculty of the Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, Göztepe Kampüsü Kadıköy, 34722 İstanbul, Turkey

ARTICLE INFO

Keywords:
Solar simulator
Photovoltaic devices
Light sources
Spectrum
Wavelength

ABSTRACT

As solar power usage is increasing nowadays, performance tests have become one of the most important topics in order to guarantee the security of photovoltaic tools. For photovoltaic panels to become efficient, there is need for health testing of all materials and technologies used in the production of the panels in electrical and optical aspects. Thus, when future energy standards are considered, it is imperative to use solar simulators that obtain near real sunlight spectrum values. The most important components of solar simulators used in photovoltaic panel tests are light sources. In this study, solar simulators were classified based on the light sources they use, and their history and technological development were investigated in line with the literature. Within the scope of this study, carbon arc lamps, sodium vapor lamps, argon arc lamps, quartz-tungsten halogen lamps, mercury xenon lamps, xenon arc, xenon flash lamps, metal halide lamps, LED and super continuum laser light sources were investigated. Additionally, to compare spectral deficiency among these light sources and solar simulators, multiple light sourced solar simulators were also covered under a separate title.

1. Introduction

Photovoltaic devices are non-linear energy sources with durable and simple designs that require little maintenance and convert solar radiation directly into electrical energy. It is very important that the characteristic values of photovoltaic devices such as current-voltage (I-V) curve, short circuit current (I_{SC}), open circuit voltage (V_{OC}) and maximum power (P_{MAX}) are determined under real atmospheric conditions [1–4]. In order to evaluate their performances, photovoltaic devices are rated under the so-called Standard Test Conditions (STC), corresponding to an irradiance of 1000 W/m^2 , an AM (air mass) 1.5 spectrum and a device temperature of 25°C [5]. I-V measurement is carried out under natural sunlight in the outdoor environment or in a closed laboratory environment with the help of a solar simulator [6]. The first option; is not preferable due to factors such as the intensity and the spectral distribution of solar radiation, geographical location, time, day of the year, climate conditions, composition of atmosphere, variation in altitude and weather conditions [7]. Instead, the second option is preferred for reasons such as simplicity, reproducibility and reliability [6]. For this reason, solar simulators are an integral part of current-voltage (I-V) characterization. This is because the I-V measurement requires a calibrated source that corresponds to real daylight and conditions that can be changed on demand to illuminate a photovoltaic panel [8,9]. Solar simulators are tools that provide spectral and optical composition similar to sunlight intensity. The fundamental aim of

these tools is to test solar cells and photovoltaic panels under controlled laboratory conditions [10–14]. In today's world, as the usage of renewable energy resources has been increasing it is important for both photovoltaic tool producers and consumers that tests are conducted, due to photovoltaic tools having low efficiency [15]. A solar simulator mainly consists of three parts; light and power sources, an optical filter to change beam properties in order to fulfill requirements, and control elements to operate the simulator [1,16]. Carbon arc lamps, sodium vapor lamps, argon arc lamps, quartz-tungsten halogen lamps, mercury xenon lamps, xenon arc, xenon flash lamps, metal halide lamps, LED and super continuum laser light sources are investigated within the scope of the present study [11,17–22]. Xenon arc lamps are the most commonly used light sources among conventional solar simulators [22–24]. Since there are intensity and spectral component differences between natural sunlight and artificial light, xenon arc lamps are modified using filters to obtain the natural sunlight spectrum [25]. Test standards for the terrestrial application of photovoltaic panels have been presented in the research conducted by ERDA and NASA. A report published after the studies conducted in 1975 and 1977, provided a detailed explanation of solar simulators as well as the standard procedures for terrestrial photovoltaic measurement [26–28]. In this report, intensity was selected as 1000 W/m^2 , AM 1.5 spectral component and 25°C ambient temperature was chosen as a STC, however, in today's commercial solar simulators both of these are used as the ASTM (American Society for Testing and Materials)

* Corresponding author.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.062>

Available online 29 March 2017
1364-0321/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Spectrum Measurement of Variable Irradiance Controlled LED-Based Solar Simulator

Vedat Esen^{*†}, Şafak Sağlam^{**}, Bülent Oral^{**}, Özge Ceylan Esen^{***}

^{*} Department of Electricity, Vocational School, İstanbul Arel University, Sefakoy Campus, 34295, İstanbul, Turkey

^{**} Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Technology, Marmara University, Göztepe Campus, 34722, İstanbul, Turkey

^{***} Department of Industrial Design, Faculty of Architecture, Mimar Sinan Fine Arts University, Fındıklı Campus, 34427, İstanbul, Turkey

(vedatesen@arel.edu.tr, ssaglam@marmara.edu.tr, borali@marmara.edu.tr, ozgecey@yahoo.com.tr)

[†] Corresponding Author; Vedat Esen, İstanbul Arel University, Sefakoy Campus, 34295, İstanbul, Turkey,

Tel: +90 212 540 9696, Fax: +90 212 540 9797, vedatesen@arel.edu.tr

Received: 23.12.2019 Accepted: 03.02.2020

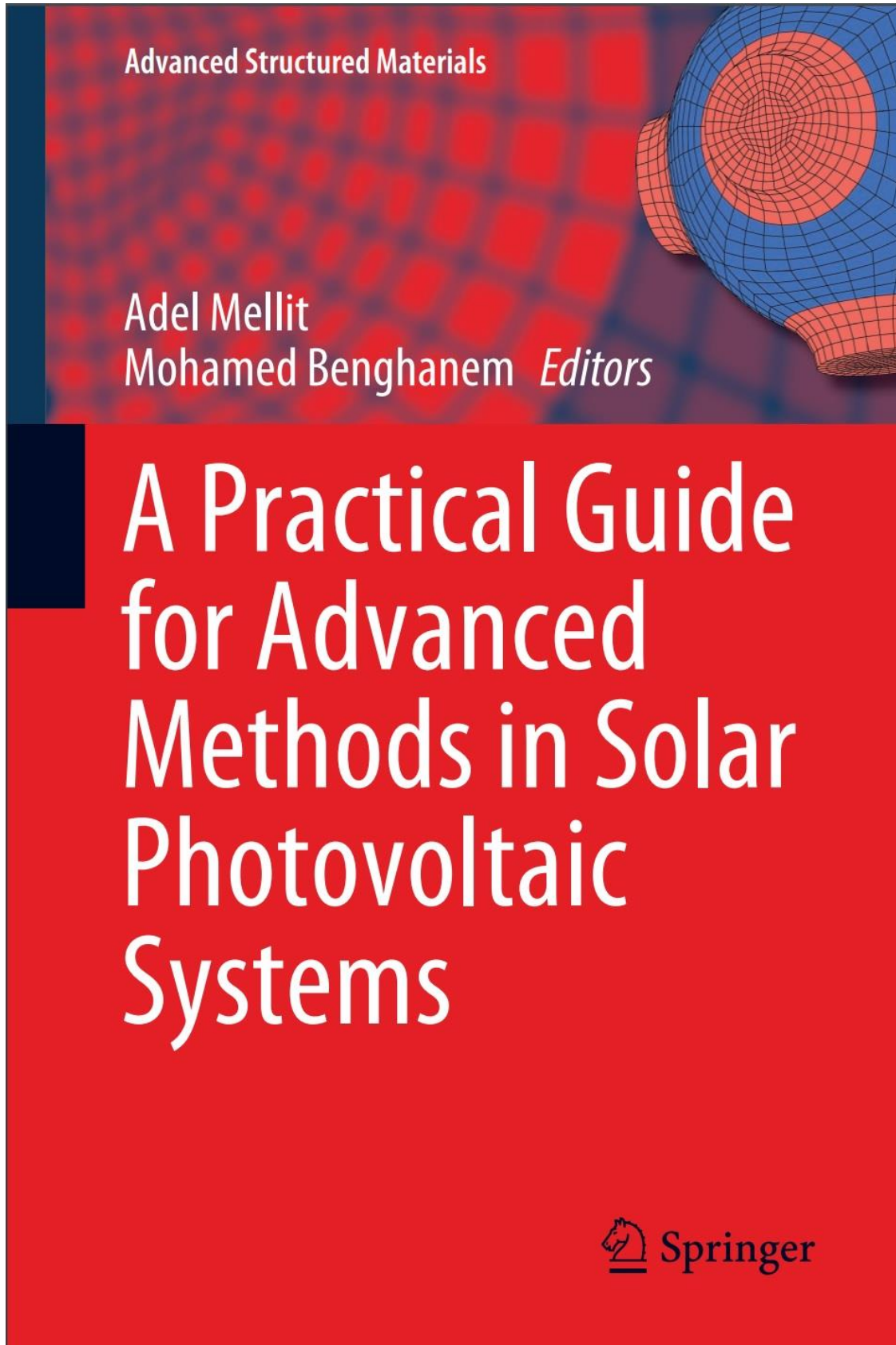
Abstract- Efficiency of photovoltaic devices are based on testing all equipment and systems used to produce devices in a healthy way, from electrical and optical points of view. Considering that photovoltaic devices which enable the generation of electric energy from solar energy as a renewable energy source are widely used solar simulators should be utilized to provide actual daylight spectrum distributions. The most considerable component of solar simulators in photovoltaic device research is the light sources they use. Due to their advantages over conventional light sources, such as compactness, low power consumption, and low cost, research and studies on solar simulators use LEDs took place as their illumination source. In this study, it is aimed to produce a low-cost Class A solar simulator with using six different type power LEDs, as specified in the IEC 60904-9 and ASTM E927-05 standards. At the end of the study with 24 power LEDs with six different wavelengths, the spectral match which is one of the three performance criteria of the solar simulator was obtained as Class A. This study shows that LED-based solar simulators provide great savings in terms of energy consumption as well as a huge advantage in cost, compared to the widely used xenon arc lamp solar simulators.

Keywords Solar energy; light emitting diodes; photovoltaic effects; simulation; spectroradiometers.

1. Introduction

The use of solar energy as a renewable energy source and of related photovoltaic systems is increasing day by day. Thus, to ensure the reliability of solar cells, testing their performance becomes the most important issue [1]. With rapidly developing technologies and studies, the transformation of photovoltaic solar cells into increasingly complex structures leads to difficulties in obtaining the current voltage (I-V) characteristics of solar panels. Therefore, the use of solar simulators, which have evolved in recent years, is inevitable to calibrate and test photovoltaic devices [2, 3]. The efficiency of photovoltaic devices depends on the electrical and optical testing of all equipment and systems used to produce cells [4]. Thus, considering the

world's energy consumption, solar simulators that obtain the actual daylight irradiance are a necessity [5]. Photovoltaic panels convert solar energy to electric energy without frequent maintenance and have robust and uncomplicated designs that perform direct conversion. The most important characteristic parameters of photovoltaic devices, such as maximum power (P_{MAX}), the current voltage (I-V) curve, open circuit voltage (V_{OC}) and short circuit current (I_{SC}) are built under real atmospheric circumstances [6-9]. Solar simulators ensure optical and spectral ranges with a similar intensity to sunlight, and they are capable of testing basic-purpose solar cells and photovoltaic devices in a controlled manner, under standard conditions: 1.5 G air mass (AM 1.5 G) spectrum, 1000 W/m² solar irradiance, and 25 °C cell temperature [10-17]. The standards for energy applications of



Contents

Part I SOLAR CELLS: Theory, Modeling and Simulation

1	Solar Irradiation Fundamentals and Solar Simulators	3
	V. Esen, Ş. Sağlam, and B. Oral	
1.1	Solar Radiation	3
1.2	Solar Simulators	5
1.2.1	Solar Simulator Standards	7
1.2.2	Solar Simulator Classes for Photovoltaic Devices	7
1.3	Light Sources of Solar Simulators for Photovoltaic Devices ...	9
1.3.1	LED (Light Emitting Diode)	10
1.3.2	Supercontinuum Laser	11
1.4	LED-Based Solar Simulator	11
1.4.1	LED-Based Solar Simulator Development Project	12
1.4.2	Main Components of LED Solar Simulator	13
1.5	System Test Results and Discussion	16
1.5.1	Spectral Match	16
1.5.2	Spatial Non-uniformity	17
1.5.3	Temporal Instability	22
1.6	Conclusion	23
	References	25
2	Performance of Solar Cells Using Thermoelectric Module in Hot Sites	29
	M. Benganem and A. Almohammed	
2.1	Introduction	29
2.2	Temperature Data Base	30
2.3	Thermoelectric Effect	31
2.4	Modeling of Solar Cell	33
2.5	Hybrid System Solar Cell/Thermoelectric Module (SC/TEM)	34

Chapter 1

Solar Irradiation Fundamentals and Solar Simulators



V. Esen, Ş. Sağlam, and B. Oral

Abstract This chapter is prepared for introduction to solar radiation and solar simulators, which are widely used photovoltaic researches. In this study, the fundamentals of solar radiation and the components of solar radiation in the atmosphere are briefly expressed. Besides, solar simulators used in PV tests are emphasized, classification of solar simulators, international standards and light sources are explained in detail. Also, as a case study, it is designed LED-based solar simulator.

Keywords Solar irradiation · Solar simulator · Light emitting diodes · Photovoltaic · Spectroradiometers

1.1 Solar Radiation

Solar radiation can be defined as electromagnetic radiation emitted by the Sun in the spectrum ranging from X-rays to radio waves [1]. 99% of the energy of solar radiation is at the wavelength of 150–400 nm and includes the ultraviolet, visible and infrared regions of the solar spectrum. About 40% of the solar radiation reaching the earth's surface in the cloudless days is visible radiation in the wavelength range of 400–700 nm. 51% is infrared radiation between 700 and 4000 nm [2]. The Sun's rays are distributed by clouds and airborne particles, reflected and broken. This radiation is usually used in solar technology applications from 300 to 4000 nm wavelength. Solar radiation differs according to astronomical factors and weather conditions [3]. According to NASA's Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE), the annual average value of Total Solar Irradiance (TSI) from the Sun to the Earth's atmosphere is $1360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$ [4]. Figure 1.1 shows the distribution of direct solar radiation in the world according to Global Solar Atlas data [5].

V. Esen · Ş. Sağlam (✉) · B. Oral
İstanbul, Turkey
e-mail: ssaglam@marmara.edu.tr

© The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2020
A. Mellit and M. Benghanem (eds.), *A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems*, Advanced Structured Materials 128, https://doi.org/10.1007/978-3-030-43473-1_1

Investigation of Wavelength Changes of the LEDs Used for Illumination

Vedat ESEN
Vocational School, Department of Electricity
Istanbul Arel University
Istanbul, Turkey
vedatesen@arel.edu.tr

Şafak SAĞLAM
Bülent ORAL
Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering
Marmara University
Istanbul, Turkey
boral@marmara.edu.tr, ssaglam@marmara.edu.tr

Abstract— In this study, the analyses of the wavelengths of the light emitted by the LEDs that are used as a light source for illumination were made. For this purpose, the LEDs were placed in a black box together with the coolers, and the wavelength of the light emitted by the LEDs was measured by means of a radio spectrometer. The measurement was carried out in two separate time periods: short-term measurements and long-term measurements. In the short-term measurements, the measurements were started with the light emitting from the LEDs and repeated in 5 minute intervals for 2 hours. In the long-term measurements, the measurements were made with 15 minute intervals for 48 hours. Due to its importance the temperature of the LEDs was also measured at the same time intervals, from the central point on the roof of the black box. By comparing the obtained measurement results, the changes in wavelength were analyzed and interpreted.

Index Terms— black box measurement, cooler temperature, irradiation, LED, wavelength

INTRODUCTION

With the improvements made in recent years Light Emitting Diodes (LEDs) have started to replace traditional light sources in many applications due to their various advantages such as high productivity, reliability, long lifetimes, variable colors and low power consumption [1]-[4]. Foremost among these applications are the back lights of mobile phones and LCD screens, interior and exterior automotive lightings including headlights, big signals and screens and signaling applications [5]. Moreover, it has been proven that LED performance is a successful solution for street lights [6]. It is understood that LEDs will introduce completely new functions to lighting systems and thus, increase the ways of using lights to a greater extent [4]. Especially in new generation lighting systems, high brightness or high power LEDs that can provide a visible light spectrum at a low costs and also save energy become the first choice [7], [8]. These high power LEDs ensure a higher level of light discharge than traditional indicator LEDs. Although these LEDs provide high performance levels in terms of productivity and long lifetimes, compared to other lighting technics, they lead to many technological problems. Generally, most of the electrical power of the LEDs is converted to heat, which significantly reduces the brightness of the LEDs. However, there are studies in which LEDs characteristically change the peak wavelengths with increasing temperature. In some of these studies [10], [3], the peak wavelength is observed with an increase in temperature, whereas in others it is stated that it is negligible [11].

In this study, the working times were determined by considering the usage conditions of different applications where LEDs are used as light sources (street lighting, projection devices, solar simulators, etc.). Within this scope, Osram LB CP7P blue LUW CR7P 6500 K and LCW CQAR 3000 K white LEDs were used. Ever since they were first developed, high brightness blue LEDs and white LEDs have been used increasingly in the field of lighting [12]. The LEDs were placed in a black box with coolers and the wavelengths of the LEDs were measured with the Spectral Evolution SR 500 radiospectrometer. Measurements were carried out in two periods: short-term measurements and long-term measurements. For short-term measurements, the wavelengths of the LEDs were measured at 5 minute intervals for 2 hours. Long-term measurements were made at intervals of 15 minutes for 48 hours. In addition, since the temperature of the LEDs is also important, the temperature of the black box was measured within the same time slots. Due to the increase in the temperature of the LEDs in the measurements made, the temperature of the black box, which is a closed volume, also increased. By comparing the obtained measurement results, the wavelength changes due to temperature were analyzed and interpreted.



LOW COST LED BASED SOLAR SIMULATOR WITH VARIABLE SPECTRUM CONTROLLER

Vedat Esen

Istanbul Arel University, Istanbul, Turkey, vedatesen@arel.edu.tr

Şafak Sağlam

Marmara University, Istanbul, Turkey, ssaglam@marmara.edu.tr

Bülent Oral

Marmara University, Istanbul, Turkey, boral@marmara.edu.tr

Özge Ceylan Esen

Istanbul Arel University, Istanbul, Turkey ozgeceylan@arel.edu.tr

Cite this paper as: Esen, V, Sağlam, S, Oral, B, Esen, CÖ. Low Cost LED Based Solar Simulator with Variable Spectrum Controller. 6th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 25-27 June 2018, Istanbul, Turkey

Abstract: Efforts to improve the efficiency of photovoltaic panels are based on testing all materials and technologies used in the production of panels in a healthy way from an electrical and optical point of view. Considering that photovoltaic panels, which enable the generation of electric energy from solar energy as a renewable energy source in the future, are widely used, it is a necessity to use solar simulators to obtain real daylight spectrum values. The most important main component of solar simulators used in photovoltaic panel tests is the light sources they use. Due to its advantages such as low cost, compactness and low power consumption compared to conventional light sources, LED has been used as a light source in researches and studies on solar simulator. In this study, it is aimed to produce a class A low-cost solar simulator with 6 different wavelength power LEDs as specified in IEC 60904-9 and ASTM E927-05 standards. For this, 24 power LEDs selected according to wave length were placed on a cooler and wavelength measurements were made in a box with mirror inside. Measurements were carried out via spectroradiometer. At the end of the study, 24 power LEDs with 6 different wavelengths were obtained at the class A level of spectral matching of the solar simulator requirements specified in IEC 60904-9 and ASTM E927-05 standard.

Keywords: Solar simulator, LED, Photovoltaic devices, Spectrum, Wavelength

© 2018 Published by ECRES

Nomenclature	
LED	Light Emitting Diode
IEC	International Electrotechnical Commission
ASTM	Amerikan Society for Testing and Materials
AM	Air Mass
PCB	Printed Circuit Board

1. INTRODUCTION

Solar simulators are devices that provide a spectral and optical composition with a similar intensity to the sunlight, and are capable of testing the basic purpose solar cells and photovoltaic panels in a controlled manner under laboratory conditions [1-5]. Today, as the use of renewable energy sources is increasing, testing for the low yields of photovoltaic panels is of great importance both for photovoltaic panel manufacturers and buyers [6]. Test standards for terrestrial

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Vedat ESEN
Doğum Yeri ve Tarihi: Eminönü, 1982
e-mail: vesen82@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Lise: 1999, Bayrampaşa İnönü Endüstri Meslek Lisesi
Lisans: 2009, Marmara Üni., Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Öğretmenliği
Lisans: 2019, Yıldız Teknik Üni., Elk- Elek. Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
Yüksek Lisans: 2011, Marmara Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi

BİLİMSEL ESERLER

SCI indexli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. ESEN VEDAT, SAĞLAM ŞAFAK, ORAL BÜLENT (2017). Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77(C), 1240-1250., doi: 10.1016/j.rser.2017.03.062 (Yayın No: 3462645) **(BU TEZDEN ÜRETİLMİŞTİR)**
2. ESEN VEDAT, ORAL BÜLENT (2016). Natural gas reserve production ratio in Russia Iran Qatar and Turkmenistan A political and economic perspective. Energy Policy, 93, 101-109., doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.037 (Yayın No: 2587469)
3. ESEN VEDAT, ORAL BÜLENT, AKINCI TAHİR ÇETİN (2015). The determination of short circuits and grounding faults in electric power systems using time frequency analysis. Journal of Energy in Southern Africa, 26(2), 123-132. (Yayın No: 1522025)

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. ESEN VEDAT, SAĞLAM ŞAFAK, ORAL BÜLENT, CEYLAN ESEN ÖZGE (2020). Spectrum Measurement of Variable Irradiance Controlled LED-Based Solar Simulator. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 10(1), 109-116. (Yayın No: 6177596) **(BU TEZDEN ÜRETİLMİŞTİR)**
2. ESEN VEDAT, VARBAK NEŞE SEÇİL, SAĞLAM ŞAFAK, ORAL BÜLENT (2017). The Training of Renewable Energy Systems: Undergraduate Studies. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 5(1), 26-29., doi: 10.17694/bajece.293144 (Yayın No: 3444929)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. ESEN VEDAT, SAĞLAM ŞAFAK, ORAL BÜLENT, CEYLAN ESEN ÖZGE (2018). Low Cost Led Based Solar Simulator with Variable Spectrum Controller. 6. European Conference on Renewable Energy Systems, 1(1), 967-972. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4302958) **(BU TEZDEN ÜRETİLMİŞTİR)**
2. ESEN VEDAT, SAĞLAM ŞAFAK, ORAL BÜLENT (2017). Investigation of Wavelength Changes of theLEDs Used for Illumination. Lux Europa 2017, 299-303. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3587181) **(BU TEZDEN ÜRETİLMİŞTİR)**
3. ESEN VEDAT, AKINCI TAHİR ÇETİN, SENULİS AUDRİS, GUSEİNOVIENE ELEONORA (2013). Current Situation and Future of Natural Gas in Turkey. International Conference on Technics, Technologies and Education ICTTE 2013, 1, 431-435. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:263005)

Yazılan ulusal/uluslararası kitaplardaki bölümler:

1. A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems, Bölüm adı:(Solar Irradiation Fundamentals and Solar Simulators) (2020)., ESEN VEDAT, SAĞLAM ŞAFAK, ORAL BÜLENT, Springer, Cham, Editör: Mellit Adel, Benghanem Mohamed, Basım sayısı:1, Sayfa Sayısı 282, ISBN:1869-8433, İngilizce (Bilimsel Kitap), (Yayın No: 6251088) **(BU TEZDEN ÜRETİLMİŞTİR)**

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. AYTEK GÜCÜYENER, ENGİN YİĞİT, VEDAT ESEN (2012). Elektrik Teknikerliği Eğitiminin Piyasa Şartlarına Hazırlanması Üzerine Bir Çalışma. Nevşehir Üniversitesi Ulusal Meslek Yüksekokulları Çalıştay ve Öğrenci Sempozyumu (UMÇÖS-2012), 1, 547-554. (Tam Metin Bildiri) (Yayın No:262852)
2. ENGİN YİĞİT, VEDAT ESEN, AYTEK GÜCÜYENER (2012). Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Elektronik Bölümü Öğrencilerinin Bölüm Derslerindeki Başarı Düzeylerinin Mezun Oldukları Liselere Göre Değerlendirilmesi. Nevşehir Üniversitesi Ulusal Meslek Yüksekokulları Çalıştay ve Öğrenci Sempozyumu (UMÇÖS-2012), 1, 236-241. (Tam Metin Bildiri) (Yayın No:262794)

Sertifika

1. Erasmus Ders Verme Hareketliliği, 2014 yılında “Erasmus Ders Verme Hareketliliği” kapsamında elektronik bölümünde ders verilmiştir., Siauliai State College-Litvanya, Sertifika, 24.03.2014 -28.03.2014 (Uluslararası)