T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN ATMOSFERDE NORMAL ŞARTLAR ALTINDA OKSİTLENMEYE BAĞLI VERİMLİLİK ANALİZİ VE HÜCRE ALICISI GELİŞTİRİLMESİ

Nihan DEMİRTAŞ TAYLAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2020

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN ATMOSFERDE NORMAL ŞARTLAR ALTINDA OKSİTLENMEYE BAĞLI VERİMLİLİK ANALİZİ VE HÜCRE ALICISI GELİŞTİRİLMESİ

Nihan DEMİRTAŞ TAYLAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2020

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN ATMOSFERDE NORMAL ŞARTLAR ALTINDA OKSİTLENMEYE BAĞLI VERİMLİLİK ANALİZİ VE HÜCRE ALICISI GELİŞTİRİLMESİ

Nihan DEMİRTAŞ TAYLAN

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 01/10/2020 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Melike Behiye YÜCEL (Danışman)

Prof. Dr. Orhan BAYRAK

Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU

ÖZET

YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN ATMOSFERDE NORMAL ŞARTLAR ALTINDA OKSİTLENMEYE BAĞLI VERİMLİLİK ANALİZİ VE HÜCRE ALICISI GELİŞTİRİLMESİ

Nihan DEMİRTAŞ TAYLAN

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Melike Behiye YÜCEL

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Yunus ÖZEN

Ekim 2020; 61 sayfa

Bu çalışmada, $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücreleri kullanılarak yoğunlaştırıcı fotovoltaik (CPV) panel geliştirilmiştir. CPV panel, her birinin yüzey çapı 2 mm olan 144 adet hücreden ve her bir hücre için birer adet Polydimetilsiloksan (PDMS) polimeriyle oluşturulan Fresnel merceklerden oluşmaktadır. Hücreler, panele alıcılar sayesinde monte edilmiştir. 9 adet hücre 1 alıcı üzerine yerleştirilmiştir. Toplam 16 adet hücre alıcısı bulunmaktadır. Mercekler, güneş ışınlarını hücre üzerine yoğunlaştırdığı için hücre yüzeyinde yüksek sıcaklıklara neden olur. Sıcaklık, güneş hücrelerinin çalışma performansını düşüren bir etkendir. Hücre alıcılarının diğer bir özelliği de hücrelere gelen ısıyı alt katmanlara iletmektir. Bu sayede hücreler verimli çalışabilirler. Bu etkiyi araştırmak ve analiz etmek amacıyla oluşturulan deney düzeneği, bir adet alıcı, bu alıcının üzerine yerleştirilmiş 9 adet hücre ve 9 adet mercekten oluşmaktadır. Solar simulatör ile 1 Güneş altında sıcaklık ölçümleri alındığında, alıcının, hücre yüzeyine düşen ısıyı alt katmanlara ilettiği ve sıcaklığı düşürdüğü gözlenmiştir. Fotovoltaik bir sistemin en değerli malzemesi Güneş hücreleri olsa da, hücrelerin verimli çalışması için kullanılan alıcıların önemi açıktır. Bu sebeple CPV panel tasarımı kadar alıcı tasarımı da geliştirilmeye açıktır. İletkenliği artırıcı malzemeler alıcıları daha da kullanışlı hale getirebilir. Bu amaçla, alıcı yüzeyi, farklı iletken malzemeler ile kaplanmıştır. Malzeme seçimi yapılırken oksitlenme de düşünülmelidir. Olağan atmosfer koşullarında, metal malzemelerin yüzeyinde zamanla oluşabilecek bir oksit tabaka, malzemenin ısı ve elektriksel iletkenliğini bozar. Bu durumda fotovoltaik sistemin verimi düşer. Bu nedenle kullanılan kaplama malzemelerinin ve metal parçaların hem havada oksitlenmeye dirençli hem de pahalı olmayan malzemelerden seçilmesi önem kazanmaktadır. Kullanılan metal malzemeler genellikle Au, Ag, Ni'dir. Geliştirilen CPV panelin solar simulatörle ve Güneş altındaki ölçümleri verimlilikte, dört yıllık bir sürede % 0.1 civarında, ihmal edilebilir bir kayıp olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, Ni'in kaplama malzemesi olarak kullanılması, düşük maliyette yüksek verimlilik elde etme yönünden avantajlıdır.

Enerji ihtiyacının önemi ve gelişen teknoloji, Güneş hücrelerinin geliştirilmesi çalışmalarını da hızlandırmaktadır. Bu tez çalışmasında gösterildiği gibi, tasarlanan CPV panel, verimlilikteki üstünlüğü ile oldukça ümit vericidir. Ayrıca, standart Si Güneş hücreleri ile oluşturulan panellere göre daha az yer kaplar. Bu avantajları, CPV panellerin geliştirilmesinin önemini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Fotovoltaik, Fotovoltaik panel, Fresnel mercek, Güneş hücresi, Güneş enerjisi, Hücre alıcısı, Oksidasyon, Yarıiletken, Yoğunlaştırıcı fotovoltaik, Üç eklemli güneş hücresi

JÜRİ: Doç. Dr. Melike Behiye YÜCEL

Prof. Dr. Orhan BAYRAK

Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU

ABSTRACT

EFFICIENCY ANALYSIS DEPENDING ON OXIDATION UNDER NORMAL ATMOSPHERIC CONDITIONS AND CELL RECEIVER DEVELOPMENT FOR CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULES

Nihan DEMİRTAŞ TAYLAN

MSc Thesis in Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Melike Behiye YÜCEL

Second Supervisor: Lec. Dr. Yunus ÖZEN

October 2020; 61 pages

In this study, a concentrator photovoltaic (CPV) panel has been developed by using $GaInP/GaAs/Ge$ triple junction solar cells. The CPV panel consists of 144 cells, each with a surface diameter of 2 mm, and Fresnel lenses formed with one Polydimethylsiloxane (PDMS) polymer for each cell. Receivers are used to mount cells to the panel. 9 cells have been placed on 1 receiver. In the system, there are 16 cell receiver in total. Lenses cause high temperatures on the cell surface in consequence of the Sun's rays are concentrated on the cell. Temperature is a factor that reduces the working performance of solar cells. Another feature of cell receivers is to transmit the heat coming to the cells to the lower layers. So, cells can work more efficiently. The experimental setup to investigate this effect consists of a receiver and also 9 cells and 9 lenses placed on this receiver. When temperature measurements are made with a solar simulator and under 1 Sun, it has been observed that the receiver transmits the heat falling on the cell surface to the lower layers and it reduces the temperature of the cell. Although solar cells are the most valuable material of a photovoltaic system, the importance of the receivers used for the efficient operation of the cells is obvious; therefore the receivers designs are suitable for improvement as much as CVP panel designs. Materials that increase the conductivity can make receivers even more useful. For this purpose, the receiver surface has been covered with different conductive materials in this study. Oxidation should also be considered to determine the materials. Under the usual atmospheric conditions, Under the usual atmospheric conditions, an oxide film formed over time on the surface of metal materials decays the thermal and electrical conductivity of the material. In this case, the efficiency of the photovoltaic system decreases. For this reason, it is important that the coating materials and metal parts used should be selected for both air oxidation resistant and inexpensive materials. Metal materials used are generally Au, Ag, Ni. Measurements have been made by solar simulator and under the Sun have shown a negligible loss in efficiency, around 0.1 % over a four-years period. As a result, using Ni as a coating material is advantageous in terms of obtaining high efficiency at low cost.

The importance of energy need and developing technology accelerate the researches of solar cells. As shown in this thesis, the designed CPV panel is highly promising because of its superiority in efficiency. It also takes up less space than panels

created with standard Si solar cells. These advantages demonstrate the importance of development of CPV panels.

KEYWORDS: Cell receiver, Concentrator photovoltaic, Fresnel lens, Oxidation, Semiconductor, Solar cell, Solar energy, Photovoltaic, Photovoltaic module, Triple junction solar cells

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Melike Behiye YÜCEL

Prof. Dr. Orhan BAYRAK

Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU

ÖNSÖZ

Hayatım boyunca kendime yeni bilgi ve beceriler katmaktan her zaman mutlu oldum. Kendimi geliştirmeye ve her gün yeni şeyler öğrenmeye devam etmekteyim. Sanırım bu duygu her daim devam edecek…

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik lisans bölümünden mezun olduğumda, kendimi fizikçi olarak çalışabileceğim bir firmada hayal ettim. CW Enerji ile tanıştığım gün; duygu, beyin ve kalben bu hayalimi gerçekleştireceğime inandım. CW Enerji, 2010 yılında kurulmuş fotovoltaik enerji üretim sektöründe faaliyet gösteren üretim ve hizmet firmasıdır. ARGE biriminde, araştırma ve geliştirme uzmanı olarak başladığım görevimde şirketin tüm birimlerinden sorumlu, yönetim kurulu temsilcisi görevimde çalışmaya devam etmekteyim. Ben, öncelikli olarak bu firmanın kurucusu ve Yönetim Kurulu Başkanı olan Sayın T. Tarık SARVAN'a Güneş enerji sektörüne girmeme, bu alanda kendimi geliştirmeme, birçok TÜBİTAK projesinde bulunmama olanak sağladığı ve tezimi de bu alanda yazmama destek verdiği için en içten duygularla teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, tüm bu süreçler de beraber çalıştığım çalışma arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Çalışmalarımda bilgi birikimiyle her zaman yol gösteren, her türlü yardımı benden esirgemeyen ve çalışmalarımı güneş enerjisi alanında yapmama imkan veren tez danışmanı değerli hocam, Sayın Doç. Dr. Melike Behiye YÜCEL'e teşekkür ederim.

Tez çalışmama destek veren ve deneyleri Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapmama olanak sağlayan değerli hocam ikinci danışmanım Sayın Öğr. Gör. Dr. Yunus ÖZEN'e teşekkür ederim. Ayrıca her daim bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e de teşekkür ederim.

Bu tezi yazarken, biricik oğlum Demirhan dünyaya geldi. Tez yazım sürecini de oğlumla beraber tamamladım. Oğlum Demirhan'ın da annesi gibi koşullar ne olursa olsun bilime ve öğrenmeye her daim istekli olmasını temenni ediyorum.

Yıllardır beni okutan, maddi ve manevi hiçbir desteği benden esirgemeyen canım anneme, babama, kardeşlerime ve her zaman her konuda bana destek olan eşim Kağan TAYLAN'a da çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....i
ABSTRACT..... iiii
ÖNSÖZ.....v
AKADEMİK BEYAN ixiii
SİMGELER VE KISALTMALAR ixix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI.....3
2.1. Güneş Işınımı 3
2.2. Yarı iletken Eklemler 5
2.3. Güneş Hücreleri ……... 6
2.3.1. Basit güneş hücre yapısının fiziği ……..…….....….. 6
2.3.2. Sıcaklığın etkisi ……..…..……. 7
2.3.3. Işınımın etkisi ……..…….…..…. 9
2.4. Yoğunlaştırıcı Güneş Hücreleri …….……..11
2.4.1. III-V grubu güneş hücreleri ……..……..…….…….. 11
2.4.2. Yoğunlaştırıcı sistemler ……..…….….. 13
3. MATERYAL VE METOT …… 16
3.1. Güneş Hücre Örnek Yapısı.....16
3.2. Spektral Duyarlılık Ölçümü 16
3.3. Yoğunlaştırıcı Modül ve Yapısı 19
3.4. Termal Analiz ……. 23
3.5. Akım–Voltaj Ölçümü …….…….…… 25
3.6. Işınım Miktarı Ölçümü …….…… 27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 29
4.1. Güneş Hücrelerinin Spektral Duyarlılık Spektrumu ……..……. 29
4.2. Termal Analiz Sonuçları ……..…….. 29
4.3. Yoğunlaştırıcı Modülün Akım-Voltaj Karakteristiği …….…… 36
5. SONUÇLAR 42
6. KAYNAKLAR 44

ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Modüller için Atmosferde Normal Şartlar Altında Oksitlenmeye Bağlı Verimlilik Analizi ve Hücre Alıcısı Geliştirilmesi" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

01/10/2020

Nihan DEMİRTAŞ TAYLAN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a : Örgü sabiti

Å : Angstrom

Ag : Gümüş

Al : Alüminyum

$AlGaAs$: Alüminyum galyum arsenit

$AlAs$: Alüminyum arsenit

AlN : Alüminyum nitrit

AlP : Alüminyum fosfit

$AlSb$: Alüminyum antimonid

As : Arsenik

Atm : Atmosfer

Au : Altın

Bi : Bizmut

°C : Celsius-Santigrat

CO_2 : Karbondioksit

$CdTe$: Kadmiyum tellür

Cu : Bakır

e^- : Elektron

E_g : Yasak enerji aralığı

E_F : Fermi enerji seviyesi

eV : Elektronvolt

Ga : Galyum

$GaAs$: Galyum arsenit

$GaAsBi$: Galyum arsenit bizmut

$GaInP$: Galyum indiyum fosfit

GaN : Galyum nitrit

Ge : Germanyum

h : Deşik

H_2O : Su

Hz : Hertz

I : Akım

In : İndiyum

$InAs$: İndiyum arsenit

InP : İndiyum fosfit

$InSb$: İndiyum antimonid

K : Kelvin

m^2 : Metrekare

mm : Milimetre

Ni : Nikel

nm : Nanometre

O : Oksijen

P : Fosfor

S : Kükürt

Sb : Antimon

Si : Silisyum

T : Sıcaklık

Ti : Titanyum

V : Volt

W : Watt

Tezde ondalık ayraç olarak nokta kullanılmaktadır. Örnek: $1.42\ eV$

Kısaltmalar

AM	: Hava kütlesi (Air mass)
AM0	: Hava kütle sıfır
AM1	: Hava kütle 1
AM1,5	: Hava kütle 1,5
CIGS	: Bakır indiyum galyum selenit
CPV	: Yoğunlaştırıcı fotovoltaik
FV	: Fotovoltaik
IR	: Kızılötesi
I-V	: Akım-voltaj
mA	: Miliamper
ms	: Milisaniye
PDMS	: Polydimetilsiloksan
P-V	: Güç-voltaj
UV	: Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. AM0 ve AM1.5 standartlarında güneş spektrumu ve kara cisim ışıma spektrumunun karşılaştırılması. Güneş ışınlarının dünya atmosferine girdiğinde spektrumun hangi bölgelerinde ve hangi moleküller tarafından soğurulduğunu gösteren soğurma bölgeleri (Kitai 2011) 3

Şekil 2.2. Dünya yüzeyine gelen güneş ışınlarının atmosferde ve yüzeyde soğurulma ve yansıma oranları ile yeryüzünde tutulabilen miktarı (T.C.Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2020) 4

Şekil 2.3. Basit bir p-n ekleminin oluşumu (Liu 2014) 5

Şekil 2.4. Basit güneş hücre yapısı ve ışık altında çalışma prensibinin şematik gösterimi 7

Şekil 2.5. Sabit bir güneş spektrumu altında farklı sıcaklıklarda güneş hücresinin akım-voltaj karakteristiğinin değişimi 8

Şekil 2.6. Yoğunlaştırılmış güneş altında güneş hücresinin sabit sıcaklıkta akım-voltaj karakteristiğinin değişimi 10

Şekil 2.7. Yoğunlaştırılmış güneş altında sabit sıcaklıkta güneş hücresinin verimliliğinin artışı 10

Şekil 2.8. III-V grubuna dayalı bazı alaşım yarıiletkenlerin bant aralıklarının kristal örgü sabitlerine bağlı olarak davranışları (ŞİT, 2014) 11

Şekil 2.9. $GaInP/GaAs/Ge$ çok eklemli güneş hücresinin şematik yapısı ve güneş spektrumunun hangi bölgelerini soğurduğunu gösteren spektral dağılımı 13

Şekil 2.10. Basit yoğunlaştırıcı sistem ve güneş hücresi (Özen, 2015) 14

Şekil 2.11. Çeşitli yoğunlaştırıcı sistemler, a) Parabolik yoğunlaştırıcı; b) Fresnel yoğunlaştırıcı; c) Parabolik çanak yoğunlaştırıcı; d) Güneş kulesi– burada geniş alana yayılmış düz aynalar aracılığıyla güneş ışını sadece kulenin tepesine gelecek şekilde organize edilerek yoğunlaştırılmaktadır 14

Şekil 3.1. Spektral ölçüm sisteminin görünümü 17

Şekil 3.2. Spektral ölçüm için kullanılan sistemin uyarıcı halojen lamba kutusu ve monokromatörün iç optik yapısı (Ioffe, 2010) 18

Şekil 3.3. Spektral ölçüm için kullanılan sistemin monokromatik ışık altında örnek yerleşimi ve optik düzeni (Ioffe, 2010) 19

Şekil 3.4. Yoğunlaştırıcı modül içerisinde güneş hücresi ve alıcı tasarımının şematik olarak gösterimi 20

Şekil 3.5. a) Yoğunlaştırıcı güneş panelinin iç yapısı ve hücreler arası bağlantı tasarımı; b) Yoğunlaştırıcı güneş panelinin mercek sistemi üzerinden ışınların izlediği yol 20

Şekil 3.6. Üretilen hücre alıcıları (a) taban Cu plaka; (b) Au kaplama; (c) Ag kaplama; (d) Ni kaplama 21

Şekil 3.7. Alıcı tasarımı 22

Şekil 3.8. Al plakaya monte edilen hücre alıcısı 22

Şekil 3.9. a) Alüminyum tabana yerleştirilen 16 adet alıcı; b) Yoğunlaştırıcı güneş paneli 23

Şekil 3.10. Yoğunlaştırıcı panel içerisinde yer alan alıcı blokların termal analizinde kullanılan SolidWorks program ara yüzü ve analiz sonuçlarının verildiği ana ekran görüntüsü 24

Şekil 3.11. Extect Instruments marka Multi Master TM 570A True RMS multimetre 25

Şekil 3.12. $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi için akım-voltaj ölçüm sistemi, (a) genel dış görünümü; (b) 10ms gibi kısa sürede flaş ışık vermek için kullanılan Xenon lamba kutusunun iç görünümü 26

Şekil 3.13. Yoğunlaştırıcı güneş panelinin FV karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan düzeneğin genel dış görünümü 27

Şekil 3.14. Markası Kipp&Zonen modeli CM-6B olan piranometre 28

Şekil 3.15. Piranometre için Kipp&Zonen markalı veri kaydedici 28

Şekil 4.1. $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin spektral duyarlılık spektrumu 29

Şekil 4.2. Alıcı üzerine dizilmiş olan 9 adet güneş hücresinin yaydığı ısının alıcı tarafından soğurulduğunu gösteren termal analiz sonucu 30

Şekil 4.3. Alıcı üzerine dizilmiş olan 9 adet güneş hücresinin yaydığı ısının, dış kasadan yalıtkan ile korunmuş olan alıcı tarafından iyi soğurulmadığını gösteren termal analiz sonucu 30

Şekil 4.4. Güneş altındaki sıcaklık 31

Şekil 4.5. Fresnel merceğin odak uzaklığındaki yoğunlaştırma sıcaklığı 32

Şekil 4.6. Fresnel mercek ile optik ekseni çakışık olan ikincil optik düzeneğin yoğunlaştırma sıcaklığı 33

Şekil 4.7. Al plaka olmadığı durumda hücre yüzeyindeki sıcaklık 34

Şekil 4.8. Al plakalı hücre yüzeyindeki sıcaklık 34

Şekil 4.9. Al plakalı hücre alıcı sistemin, hücre yakınlarında üst Cu yüzeyin sıcaklığı 35

Şekil 4.10. Alıcı sistemin altındaki Cu yüzey ile Al plakanın birleştiği ara-yüzeyin sıcaklığı 35

Şekil 4.11. $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin tek güneş altında akım-voltaj ve güç-voltaj grafiği 37

Şekil 4.12. 10 Ekim 2019 – 13 Şubat 2020 tarihler arasında güneş ışınımın birim alana düşen gücünün değişimi 38

Şekil 4.13. 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi içeren yoğunlaştırıcı panelin güneş sayısına göre verimliliğinin değişimi 39

Şekil 4.14. 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi içeren yoğunlaştırıcı panelin güneş sayısına göre maksimum güç değerinin değişimi 39

Şekil 4.15. 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi içeren yoğunlaştırıcı panelin 2019 Eylül ve 2020 Şubat ayları arasında ölçülmüş a) verimlilik; b) maksimum güç değerlerinin zamana göre dağılımı 40

Şekil 4.16. Yoğunlaştırıcı güneş panelinin zamana bağlı olarak verimliliğinin değişimi 41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Alıcı blokları oluşturan her bir katman malzeme için termal analiz simülasyonunda kullanılan parametreler (*Alüminyum paslanma (oksitlenme) sınıfı (Corrosivity category) C1 ve C2'dir) (ALUMECO 2020) 24

Çizelge 3.2. Kullanılan malzemelerin termal iletkenlik değerleri (Özen 2015) 25

Çizelge 3.3. Solar simülatörlerin sınıflandırılması 26

Çizelge 4.1. Sıcaklık değerleri 36

1. GİRİŞ

Hızla artan dünya nüfusu ve teknolojide yaşanan gelişmeler insanların enerji tüketimine olan ihtiyaçlarını arttırmıştır. Geleneksel enerji kaynaklarını oluşturan fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar ve fosil yakıt kaynaklarının dünya üzerinde giderek azalması insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Enerji, günlük yaşantımızın vazgeçilmez ihtiyaçlarındandır ve kullanımı günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren bir ölçü olarak kabul edilmektedir. Enerji üretim ve tüketimi çok olan ülkelerin ekonomik olarak da gelişmişlik gösterdikleri bilinmektedir.

Dünyada tüketilen enerjinin %90'ına yakını fosil yakıtlardan üretilmektedir. Yapılan tahminlere göre fosil yakıtlar yakın zamanda, örneğin kömür yaklaşık 200 yıl, petrol ise 30 yılda tükenecektir (Özen 2015). Fosil yakıtların yakılması ile ortaya çıkan gazlar sera etkisi oluşturmakta ve bu durum dünyamız için olumsuz sonuçlara neden olan küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Bu zararları engellemek için temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir.

Güneş, Dünya'da kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici sonsuz bir enerji kaynağıdır ve sürdürülebilir enerji teknolojileri açısından geleceğin temel enerji üretim bileşenidir. Diğer geleneksel enerji kaynaklarının (fosil yakıtlar) ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, su, biyoenerji gibi) oluşum kaynağı da güneştir. Güneş enerjisinden faydalanmanın önemi gün geçtikçe daha iyi anlaşılmaktadır. 1970'lerden sonra güneş enerjisinden yararlanma çalışmaları hız kazanmıştır. Son 10 yılda rüzgar enerjisi kullanımı %25 artarken güneş enerjisi kullanımı ise %300 oranında artmıştır (IRENA 2019).

Günümüzde, enerji teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler sayesinde güneş enerjisinden faydalanma çalışmaları da geniş bir araştırma ve uygulama alanı bulmuştur. Güneş enerjisi, temiz ve güvenilir olmasının yanı sıra tehlikesiz ve sorunsuz olması, çevre sorunlarına neden olmaması, tükenme olasılığı olmaması gibi sebeplerden dolayı elektrik enerjisi elde etmek için oldukça uygundur. Güneş ya da bir ışık kaynağından elektrik enerjisi elde etme teknolojisine "fotovoltaik (FV) teknolojisi" denilir ve bu alanda yapılan çalışmalar da genellikle "FV" olarak adlandırılır. Bu teknoloji ile güneşten elektrik enerjisi elde etmek için güneş hücre yapıları ya da hücrelerin bir araya gelerek oluşturdukları güneş hücre modülleri kullanılır. Bu modül sistemleri de bir araya gelerek "güneş enerji santrallerini (FV santraller)" oluşturur. FV santraller hem enerji maliyetini düşürdüğü hem de kısa sürede elde edilip daha verimli kullanılabildiği için yaygın olarak kullanılmakta ve sürekli olarak geliştirilmektedir.

Güneş hücreleri ile elektrik üretmek için yoğunlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı olmayan iki FV sistem kullanılmaktadır. Yoğunlaştırıcı olmayan (normal ya da standart) FV sistemler, güneş enerjisini hiç ara eleman olmadan doğrudan üzerine geldiği gibi elektrik enerjisine dönüştürür. Günümüzde ticari olarak pazar payı en yüksek olan Silisyum (Si) tabanlı FV sistemler, yoğunlaştırıcı olmayan sistemler içinde yer almaktadır. Uygulamada, büyük alanlı Si güneş panellerinde aynalar kullanılarak, panel üzerine gelen güneş ışınım miktarını dolayısıyla da verimi arttırmaya yönelik çalışmalar da mevcuttur (Julajaturasirarath vd. 2012). Ancak bu tür büyük alanlı aynalarla oluşan sistemlerin maliyeti standart Si güneş panel sistemine göre yüksektir. Yoğunlaştırıcı FV sistemlerinde ise, güneş hücresine gelen ışığın miktarı odaklayıcı merceklerle

arttırılmaktadır. Güneş ışınlarının küçük bir alana odaklanması durumunda sıcaklık yüksek derecelere çıkmaktadır. Böyle bir yoğunlaştırıcı sistemde Si güneş hücreleri kullanılmamaktadır. Çünkü Si güneş hücrelerinin verimliliği sıcaklık altında çok hızlı düşmektedir. Bu nedenle III-V grubu yarıiletkenlerden oluşan yani $GaInP/GaAs/Ge$ güneş hücreleri kullanılmaktadır. III-V grubu yarıiletkenlerden oluşan güneş hücrelerinin performansı yüksek sıcaklıkta Si güneş hücrelerine göre çok daha iyidir (Erol ve Balkan 2015). Ayrıca yoğunlaştırıcı FV sistemlerinde kullanılan güneş hücrelerinin boyutları küçültülebilmekte; milimetrik ölçeklere indirgenebilmektedir. Çünkü merceklerin yüzey alanına göre güneş ışınlarını odaklayacağı alan noktasal denecek kadar küçüktür. Bu avantajlarından dolayı yoğunlaştırıcı güneş hücrelerinin performans ve maliyet oranları standart Si güneş hücreleriyle karşılaştırılabilir miktarlardadır.

FV sistemler, normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Sistem genellikle toz, kir ve atmosferik şartlardan etkilenmeyecek şekilde kaplanıyorsa da atmosferdeki gazlar, sistemi oluşturan metal ve metal alaşımlarının oksidasyonuna neden olur. Oksidasyon terimi oksit, nitrit ve sülfür vb. oluşumların tümüne verilen isimdir. Atmosferle etkileşen metallerin yüzeylerinde, atmosfer içindeki gazlarla reaksiyon sonucunda kir filmleri de denilen oksit filmler oluşur. Bu nedenle, normal hava koşulları standartlarında (1 atm basınç, 25^{o}C hava sıcaklığı ve nem oranı bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilir.) kullanılan bu sistemlerin üzerinde zamanla kendiliğinden oluşan doğal oksit yüzey filmlerinin sistemin verimliliği üzerine etkisinin araştırılması da önemlidir.

Bu tez çalışmasında, daha küçük alandan daha yüksek enerji verimi elde edebilmek için, küçük alana sahip güneş hücrelerinin üzerine güneş ışınlarını odaklayan optik bir sistem tasarlanarak bir yoğunlaştırıcı FV sistem oluşturulmuştur. Bu amaçla, AzurSpace Solar Power GMBH tarafından üretilen Galyum Indiyum Fosfat/Galyum Arsenit/Germanyum ($GaInP/GaAs/Ge$) üç eklemli ve çapı $2mm$ olan güneş hücreleri kullanılarak yoğunlaştırıcı bir güneş paneli geliştirilmiştir. Yoğunlaştırıcı güneş paneli, 144 adet hücreden ve her bir hücre için birer adet Polydimetilsiloksan (PDMS) polimeriyle oluşturulan Fresnel merceklerden oluşmaktadır. Yoğunlaştırıcı FV sistemlerde, özellikle alıcıda, normal hava koşullarında zamanla oluşan bir oksidasyon, sistemin verimliliğini etkiler. FV sistemlerin güneş panellerinde ve bağlantı metallerinde oluşabilecek böyle bir oksidasyonun verimliliğe etkisi, bu tez çalışmasında oluşturulan ve daha önceden farklı kaplamalarla oluşturulmuş olan FV sistemlerin elektriksel performansı ölçülerek araştırılmıştır.

Tez çalışmasının akışı: Kaynak taramasının yapıldığı Bölüm 2, yarı iletken eklemler, güneş hücre fiziği, III-V grubu yarı iletken alaşımlar ve bunların önemi, yoğunlaştırıcı sistemlerin optik yapısı ve FV uygulamadaki yeri ile ilgili bilgileri içermektedir. Bölüm 3'de çalışmada kullanılan hücre-panel sistemlerinin deneysel ve simülasyon analizleri için kullanılan yöntemler açıklanmaktadır. Bölüm 4'de, bu tez kapsamında elde edilen simülasyon ve deneysel analiz sonuçları ve bunların yorumları verilmiştir. Sonuçların özetlenmesi ve gelecek çalışmalar için öneri ve planlardan bahsedilmesi ise Bölüm 5'de yapılmıştır.

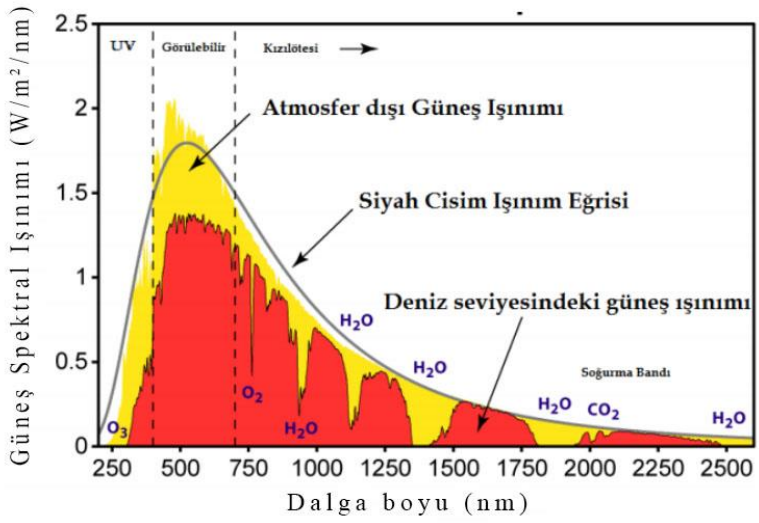
2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölümde ilk olarak güneş enerjisi, güneş spektrumu ve standartlarından bahsedilmiştir. Daha sonra güneş hücrelerinin temel fiziği ve yoğunlaştırıcı sistemlerin fiziği anlatılmıştır.

2.1. Güneş Işınımı

Güneş dünyamız için tükenmez, hayata can veren enerji kaynağıdır. Güneş ile Dünya arasındaki uzaklık Dünya ve Güneş'in geometrik ölçülerinden çok daha büyük olduğu için Güneş'i bir noktasal ışık kaynağı olarak düşünebiliriz. Güneş'in üzerindeki termonükleer reaksiyonlar sonucunda yaydığı ışınım bir kara cisim ışıması karakteristiğidir. Kara cisim ışıması kısaca bir cismin sıcaklığına göre yaydığı elektromanyetik dalga spektrumudur. Belirli bir sıcaklığı olan her cisim kara cisim ışıması yayar.

Güneş ışınları, yeryüzüne gelme açısına bağlı olarak farklı isimler alır. Bu ışınların atmosferden geçip yeryüzüne ulaşana kadar aldığı yolu anlatmak için "Hava Kütlesi (Air-Mass: AM)" kavramı kullanılır. Atmosfer dışındaki Güneş ışığının spektral dağılımı "AM0"dır ve birim yüzeye düşen güneş enerjisi 1367 W/m^2 değerine sahiptir. "AM1" deniz seviyesinde Güneş'in yeryüzüne en dik bulunduğu açıdır. "AM1.5" ise Güneş ışınlarının atmosferden geçip yeryüzüne ulaşıncaya kadar enerjisinin %30'unu kaybetmesi sonucunu (ortalama 1000 W/m^2) simgeler (Güçlü 2009; Özen 2015).

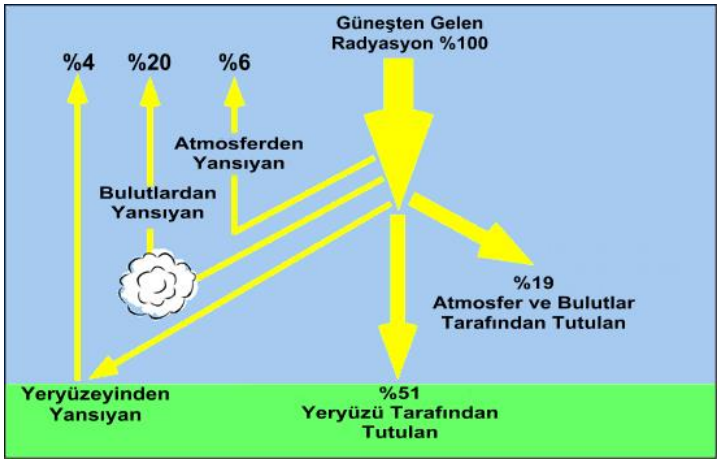


Şekil 2.1. AM0 ve AM1.5 standartlarında güneş spektrumu ve kara cisim ışıma spektrumunun karşılaştırılması. Güneş ışınlarının dünya atmosferine girdiğinde spektrumun hangi bölgelerinde ve hangi moleküller tarafından soğurulduğunu gösteren soğurma bölgeleri (Kitai 2011)

Güneşin kara cisim ışıma spektrumu yaklaşık $6000\ K$ sıcaklığındaki bir cismin yaydığı ışınıma eşdeğerdir. Şekil 2.1'de, $6000\ K$ sıcaklığında bir kara (siyah) cisim ışıma spektrumu, atmosferimiz dışındaki güneş ışıması ve yeryüzünde deniz seviyesindeki ışıma karşılaştırılmalı olarak verilmiştir; görüldüğü gibi gerçek güneş spektrumu

kuramsal olarak hesaplanan kara cisim ışıma spektrumuna uyum sağlamaktadır. Güneş ışınları Dünya'ya yaklaşık 8 dakika gibi bir sürede gelmektedir. Bu süre zarfında uzayda birçok engel ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle atmosfer dışındaki spektruma bakıldığında yüksek enerjideki fotonlarda çok küçük miktarlarda soğurulmalar, başka bir deyişle Dünya atmosferine ulaşamama gibi durum söz konusudur. Yani Güneş ile Dünya arasında uzayda süzülen mikro parçacıklar ya da göktaşlarının etrafındaki farklı gazlardan oluşan ortamlarda güneş ışınları saçılmalara uğrarken soğurulmalara da maruz kalmaktadır. Güneş ışınları Dünya atmosferine girdiğinde ilk olarak ozon tabakasında daha sonra havadaki su, oksijen ve karbondioksit molekülleri tarafından soğurulmalara uğrayarak kayıplar vermektedir (Erol ve Balkan 2015; Kınacı 2013). Şekil 2.1'de kırmızı alan ile gösterilen spektrum bunu açıkça göstermektedir (Kitai 2011).

Güneş ışınları atmosferde hareket ederken, soğurulmanın yanında, yeryüzüne ulaşana kadar birçok saçılma, yansıma ve yansıyarak tekrar yeryüzüne yönlendirilme gibi engeller ile de karşılaşmaktadır. Bu tür engellerden sonra yeryüzüne güneş enerjisinin sadece %51 gibi bir miktarı ulaşabilmektedir; T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2020) verilerine göre, Güneş ışınlarında, dünya yüzeyine gelene kadar nerelerde ve ne kadar kayıp olduğu oranları ve yeryüzüne ulaşan enerji miktarı Şekil 2.2'de gösterilmektedir; Güneş enerjisinin %26'sı atmosferden ve bulutlardan geri yansımakta, %19 gibi bir miktarı atmosferdeki moleküller tarafından soğurularak kaybolmakta ve moleküller tarafından soğurulan enerji atmosferin ısınmasına neden olmaktadır. Atmosferde asılı hareket halinde olan mikro parçacıklar, su damlacıkları ya da moleküller tarafından saçılmaya uğrayan Güneş ışınlarının %6'sı atmosferde dağılmaktadır ve yer yüzeyine ulaşamamaktadır. Yer yüzeyine ulaşan ışınların %4'ü ise topraktan geri yansımaktadır ve sonuçta geriye sadece %51'lik bir miktar enerji kullanılabilir olarak, farklı uygulamalarla ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

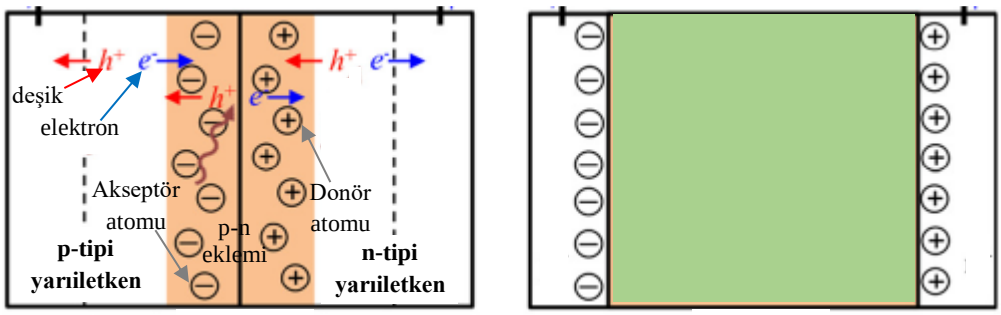


Şekil 2.2. Dünya yüzeyine gelen güneş ışınlarının atmosferde ve yüzeyde soğurulma ve yansıma oranları ile yeryüzünde tutulabilen miktarı (T.C.Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2020)

2.2. Yarı iletken Eklemler

Malzemelerin iletkenliklerine dayalı sınıflandırma 18. yüzyıla dayanmaktadır; iletken, yarı iletken ve yalıtkan olmak üzere üçe ayrılır. Malzemelerin elektriksel

iletkenliği "yasak bant aralığı" olarak bilinen "değerlik (valans) bandı (0 K sıcaklığında elektronlarla dolu olan bant) ile iletkenlik bandı (0 K sıcaklığında valans bandının hemen üzerindeki ilk boş seviye) arasındaki enerji aralığı" ile belirlidir; malzeme içerisinde bir elektronun atomundan koparak serbest hale gelebilmesi için gereken enerjiyi temsil etmektedir (Erol ve Balkan 2015).Yasak bant aralığı yok ise malzeme iletken, yaklaşık 0.1-4.0 eV aralığında ise yarı iletken ve yaklaşık 9 eV ise yalıtkan olarak adlandırılır. Doğada yarı iletken ler saf yarı iletkenler ve katkılı yarı iletkenler olmak üzere ikiye ayrılır. Bant aralıkları katkılama yapıldığında değişir. Saf yarıiletkenlerde, elektrik iletimini gerçekleştiren taşıyıcılar olarak elektron ve hole (deşik) sayısı birbirine eşittir. Katkılı yarıiletkenler ise n-tipi (iletim elektronlar tarafından gerçekleştirilir) ve p-tipi (iletim deşikler tarafından gerçekleştirilir) olmak üzere ikiye ayrılır. n-tipi yarı iletken içerisinde elektron veren atomlara donör atomu denir ve n-tipi yarıiletkenin katkılama miktarı bu atomların miktarı ile belirtilir. Yarı iletken kristal yapısına eklenen ve valans elektronu bir eksik olan atoma akseptör atomu denir ve p-tipi yarıiletkenin katkılama oranını bu akseptör atomların miktarı belirlemektedir (Erol ve Balkan 2015). Malzemeye katkılanan atomlara bağlı olarak malzemenin yasak bant aralıkları değiştirilebilir yani yarıiletkenin iletkenliği kontrol edilebilir; bu özellik teknolojide çok önemlidir çünkü çalışma frekansı biliniyorsa buna göre malzeme seçimi yapılabilmektedir.



Şekil 2.3. Basit bir p-n ekleminin oluşumu (Liu 2014)

Güneş hücreleri p-n eklemli aygıtlara dayanmaktadır. Şekil 2.3'te basit bir p-n ekleminin oluşumu verilmiştir (Liu 2014): p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler bir araya getirildiğinde başlangıçta p-tipi yarı iletken artı yüklü, n-tipi yarı iletken ise eksi yüklü olacaktır. Ancak çok kısa bir zaman sonrasında p-n tipi yarıiletkenleri sınırında (p-n eklemi) elektronlar (e^-) sağa doğru akarken dönor atomları sabit kalacak yani pozitif iyonların sayısı artacak, deşikler (h) de sola doğru akarken negatif yüklü akseptör atomların sayısı artacaktır (Şekil 2.3. (a)). Bu esnada p-n eklemi bölgesinde çok kuvvetli iç elektrik alan oluşacak ve yönü n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene doğru olacaktır. Belirli bir süre sonrasında, iç elektrik alanı şiddeti bu akışı durduracak boyuta geldiğinde, p-n eklemi dengeye gelmiş olur (Şekil 2.3.(b)). Bu dengeye "p-n eklemin termal denge durumda olması" denir. Oda sıcaklığında tüm p-n ekleme dayalı aygıtlar termal dengededir ve p-n ekleminde kuvvetli bir iç elektrik alan vardır. Bu alandan dolayı oluşan potansiyele kontakt potansiyeli (Built–in Voltage) denir ve yarıiletkenin yasak bant aralığına, p-tipi ve n-tipi bölgelerin katkılama oranlarına ve ortamın sıcaklığına bağlıdır (Erol ve Balkan 2015; Kasap 2001).

Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) elementleri doğal yarıiletkenlerdir. Bu yarıiletkenler IV grubu elementlerdir ve bant aralıkları sırasıyla $0.67eV$ ve $1.1eV$ olarak

belirlenmiştir. Elektronları valans bandından iletkenlik bandına çıkaran enerji elektriksel, ısısal (termal) veya optik olarak verilebilir; optik olarak bant aralığı değerinin belirlenmesi en yaygın kullanılan yöntemdir. Yasak bant aralığı enerjisine eşit ve yüksek enerjideki fotonlar bu yapı içerisinde serbest elektron oluşturmaya yeterli olacaktır. Serbest elektronların sayısının artması yapının iletkenliğini arttırdığından, yarı iletken malzemeler en çok tercih edilen malzemelerdir. Yarıiletkenlerin optik karakteristiği, yarıiletkenin bant aralığının doğrudan mı yoksa dolaylı mı olduğu konusunda bilgi vermektedir. Doğrudan ya da direkt bant aralıklı yarıiletkende, elektronlar valans bandından optik olarak uyarıldığında doğrudan iletkenlik bandı enerji seviyesine çıkarak serbest hale gelmektedir. Dolaylı ya da indirekt bant aralıklı yarıiletkende ise elektronların serbest kalabilmeleri için sadece optik olarak uyarılma yetmez ayrıca termal olarak da uyarılması gerekir. Termal uyarılmada yapı içerisinde elektronun momentumu değişir ve verdiği enerji çok küçüktür; ancak optik uyarılma sonucunda elektron gereken enerjiyi alabilmektedir. Fakat optik uyarılma elektrona momentum kazandırmaz. Bu nedenle indirekt bant aralıklı yarıiletkende elektronun serbest hale gelebilmesi için enerji gereksinimi yanı sıra momentumunda da değişim olması gerekir. Bu tür nedenlerden dolayı Ge ve Si tabanlı aygıtlarda çok fazla ısınmalar söz konusudur. Termal ısınma elektronların yapı içerisindeki hareketliliğini kısıtlamaktadır. Bu kısıtlama Si ve Ge tabanlı güneş hücrelerinde verimlilik kayıplarına yol açmaktadır.

Yarıiletken teknolojisinde, yarıiletkenler, doğal olmayan ve II-IV, III-V ve IV-VI grubu elementlerinin bileşimlerinden elde edilebilmektedir. Üretim teknolojisi yüksek olmasına rağmen bu yarıiletkenlere dayalı güneş hücreleri Si tabanlı güneş hücrelerinden daha yüksek verimliliğe sahiptir (Erol ve Balkan 2015; Özen 2015). Özellikle de III-V grubu yarıiletkenlere dayalı güneş hücreleri günümüzde verimlilik rekorunu elinde bulundurmaktadır (Green vd. 2019). Bu tez çalışması kapsamında incelenen $GaInP/GaAs/Ge$ (bant aralıkları: $1.9eV/1.42eV/0.67eV$) üç eklemli güneş hücresi, III-V grubu yarıiletkenler sınıfındadır ve yoğunlaştırılmış güneş hücre uygulamalarında birinci tercih yapılardır. III-V grubu yarıiletkenler direkt bant aralıklı yarıiletkenlerdendir ve yarı iletken içerisindeki elementlerin bileşim oranları ayarlanarak bant aralıkları ve kristal örgü sabitleri değiştirilebilmektedir.

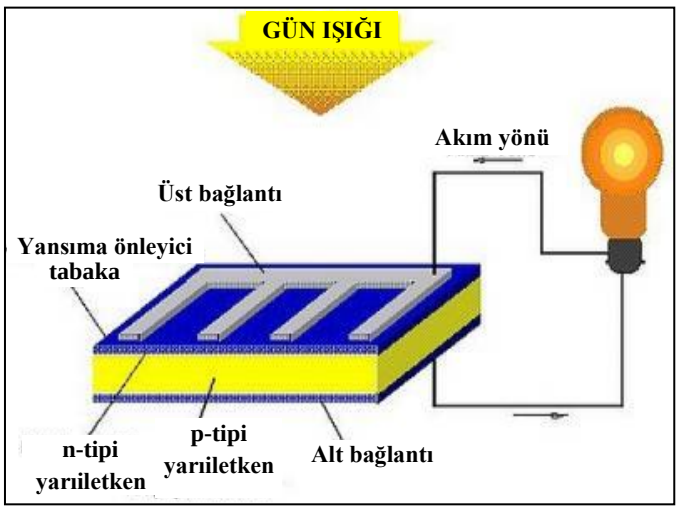
2.3. Güneş Hücreleri

Hücreler, bir FV sistemin en pahalı parçasıdır. Güneş enerjisini kullanılabilir hale getiren ve elektrik enerjisine çeviren de bu hücrelerdir. Güneş hücreleri hiçbir hareketli parça gerektirmeden, çevreyi kirletmeden ve sessiz bir şekilde güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine çevirerek temiz bir enerji kaynağı sağlamaktadır.

2.3.1. Basit güneş hücre yapısının fiziği

Yarıiletken malzemelerin güneş hücresi olarak kullanılabilmeleri için p–tipi ve n–tipi yarıiletkenden oluşan iki katmanın üst üste büyütülmeleriyle oluşan bir eklemli yapı elde etmek gerekir. Basit bir güneş hücre yapısı Şekil 2.4'de verilmektedir. Yarı iletken malzemenin güneş hücresi olarak çalışması için eklem bölgesinde FV olayın sağlanması gerekir. Güneş hücrelerinin yapımında kullanılan yarı iletken malzemelerin yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, güneş hücresinde elektron–deşik çiftleri üreterek fotoakımı oluştururlar: p-n eklemi, gelen ışınımın şiddetiyle orantılı bir

akım üretir ve dolayısıyla bir akım kaynağı olarak davranır (Erol ve Balkan 2015; Kasap 2001).



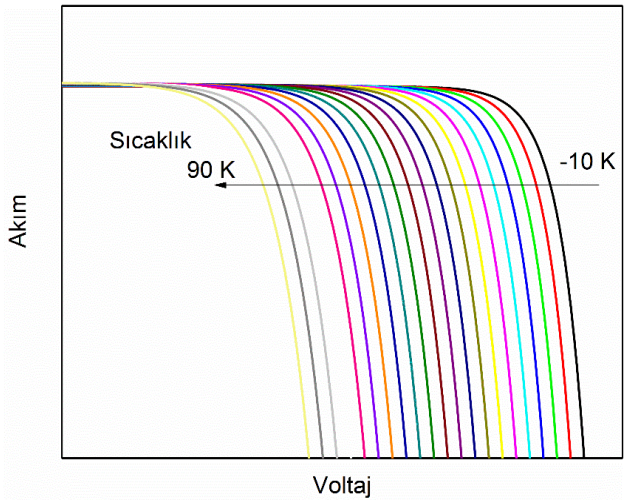
Şekil 2.4. Basit güneş hücre yapısı ve ışık altında çalışma prensibinin şematik gösterimi

Gelen Güneş ışığının soğrulmasını maksimuma çıkarma veya yüksek ışık-tuzaklama etkisi, güneş hücresinin verimliliğini başarmada önemli bir konudur. Güneş ışığının soğrulması veya ışık-tuzaklama etkisini başarmak için çok eklemli Güneş hücreleri (Geisz vd. 2007; Kirk 2010; Lin 2010; Schropp vd. 2009; Shahrjerdi vd. 2012), çoklu kuantum kuyulu güneş hücreleri (Mahala vd. 2018) ve yüksek soğurma katsayılı materyal güneş hücreleri gibi pek çok yeni tasarlanmış Güneş hücreleri literatürde vardır (Hwang 2018).

Günümüzde, Si–tabanlı FV üretimi yaygın olmakla birlikte, farklı birçok Güneş hücresi türleri de üretilmektedir. Bu yeni hücre tipleri, potansiyel uygulamalara çeşitlilik getirmiş ve aynı zamanda güneşten elektrik elde etme maliyetinin düşürülmesine alternatifler sunmuştur. Bu alternatif güneş hücreleri hidrojenlendirilmiş amorf Si, Kadmiyum Tellürit (Cadmium Telluride, $CdTe$), Bakır Indiyum Galyum Selenit (Copper Indium Gallium Selenide, $CIGS$) hücreleri ve verimlilikleri %41 kadar yüksek olan yoğunlaştırılmış hücreleri kapsamaktadır. III–V grubu malzemeler kullanılarak elde edilen hücrelerden oldukça yüksek verim elde edilmesi, bu konuda yapılan araştırmaları arttırmıştır (Green 2009; Green vd. 2020, 2019; Singh vd. 1981).

2.3.2. Sıcaklığın etkisi

Güneş hücrelerinde sıcaklık önemli etkenlerden biridir. Herhangi bir ortamda çalışan güneş hücresinin sıcaklığı ne kadar düşükse o kadar verimli olur. Çünkü sıcaklık yarı iletken kristal içerisindeki atomların titreşimini arttıracaktır. Sıcaklığın yüksek olması serbest taşıyıcıların kristal içerisindeki hareketini zorlaştırmaktadır. Bu durum da doğrudan güneş hücresinin performansına etki edecektir. Kısa devre akımı ve açık devre voltajı güneş hücresinin performansını belirleyen en etkili iki parametredir. Bir güneş hücresinin farklı çalışma sıcaklıklarında akım-voltaj değişimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir; sıcaklığın artmasıyla güneş hücresinin açık devre voltajı doğrusal olarak azalmaktadır. Ancak kısa devre akımı sıcaklığın yükselmesi ile artmaktadır (Hovel 1975).



Şekil 2.5. Sabit bir güneş spektrumu altında farklı sıcaklıklarda güneş hücresinin akım-voltaj karakteristiğinin değişimi

Güneş hücresinin açık devre voltajını p-n eklemde oluşan sanki-Fermi seviyelerinin farkı belirlemektedir. Sanki-Fermi seviyesi, bir yarı iletken termal denge durumundan çıktığında oluşmaktadır. Yarı iletken termal dengedeyken elektrik yük açısından nötr durumundadır. Bu durumda eğer yarı iletken katkılanmamış ise yarıiletkenin Fermi seviyesi bant aralığının ortasında yer alır. Termal dengede nötr olan n-tipi yarıiletkende Fermi seviyesi iletkenlik bandına yakın iken p-tipi yarıiletkende valans bandına yakındır. Ancak yarı iletken herhangi bir dış uyarıma maruz kalırsa nötrlük bozulacaktır ve yük taşıyıcıların sayısı değişecektir. Bu durumda Fermi seviyesi ikiye bölünür; böyle bir durumdaki Fermi seviyesine sanki-Fermi seviyesi denir.

Sanki-Fermi seviyesi üzerine ışık düşen yarıiletkende oluşan foto taşıyıcıların miktarına göre değişmektedir. p-tipi bölgedeki sanki-Fermi seviyesi ile n-tipi bölgede oluşan sanki-Fermi seviyesinin farkı güneş hücresinin açık devre voltajını vermektedir. Sıcaklık arttıkça p-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar olan deşikler artmaya başlayacaktır. Böylece azınlık taşıyıcı olan elektronların oluşturduğu sanki-Fermi seviyesi azalacaktır. Aynı şekilde n-tipi bölgede çoğunluk taşıyıcı elektronlar artarken deşiklerin sanki-Fermi seviyesi düşer ve iki sanki-Fermi seviyeleri arasındaki fark da azalır yani güneş hücresinin açık devre voltajı küçülecektir. Bu nedenledir ki bant aralığı yüksek olan yarıiletkenden yapılan güneş hücrelerinin açık devre voltajı, bant aralığı küçük olan güneş hücrelerine nazaran daha yüksektir.

Güneş hücresinin kısa devre akımı aslında yarıiletkende oluşan fotoakımdır. Fotoakım ise p-n eklemin her bir bölgesinde oluşan foto taşıyıcıların miktarıdır. Sıcaklığın artması p-tipi bölgede çoğunluk deşiklerin sayısını arttırırken azınlık elektronların da sayısını bir miktar arttırmaktadır. Aynı şekilde n-tipi bölgesinde de azınlık deşiklerin miktarı artar. Böylece sıcaklığın artmasıyla güneş hücresinin kısa devre akımında da artış meydana gelir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi güneş hücresinin akım değerinde artış çok az olarak sergilenmiştir. Sıcaklığın etkisiyle güneş hücresinin açık devre voltajındaki azalma ile kısa devre akımındaki artış eşit olmadığı için verimliliğinde ciddi düşüş görülür. Bu nedenle güneş hücresinin soğutulması alanında geniş çapta araştırmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasının amaçlarından biri de güneş hücresini,

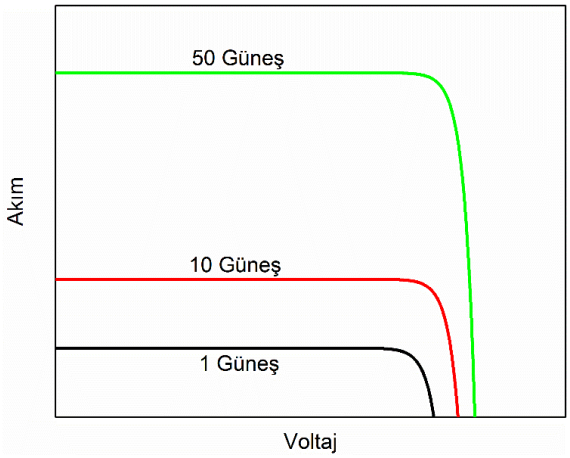
yoğunlaştırılmış güneş altında çok ısınmasını engellemek amacıyla farklı metal levhalarla soğutmadır.

2.3.3. Işınımın etkisi

Güneş hücreleri, Güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Bu nedenle güneş hücresinin üzerine gelen ışın miktarı çok önemli bir parametredir. Güneş hücreleri, üzerine gelen ışınlardaki bir foton başına üretilen bir elektron-deşik çifti ile karakterize edilmektedir. Güneş hücresine gelen foton miktarı ne kadar fazla ise o kadar elektron-deşik çifti üretilir. Dolayısıyla güneş hücresinden elde edilen akım miktarı ışın miktarıyla doğru orantılı olarak üretilir.

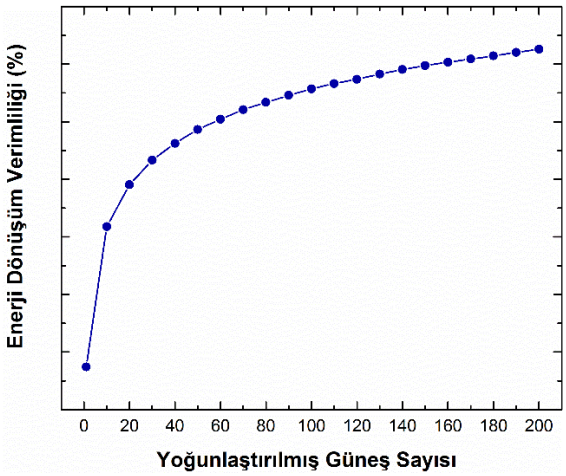
Işınımın güneş hücresindeki etkisinin kristal yapıdaki olaylara benzeterek incelenmesi: Yukarıda da bahsettiğimiz gibi bir yarı iletken ışığa maruz kaldığında yarı iletken kristalinde serbest taşıyıcılar oluşur. Bu serbest taşıyıcılar yarıiletkenin Fermi seviyesini değiştirir. Fermi seviyesi genel olarak bir malzemede elektronlar ile işgal edilmiş en üst seviyesini temsil etmektedir. Metaller serbest elektron açısından çok zengin olduğu için bütün enerji seviyeleri elektronlar ile doludur. Bu nedenle de Fermi seviyesi metallerde en üst seviyede yer alır, ancak yarıiletkenlerde Fermi seviyesi yarıiletkenin bant aralığının ortasında yer almaktadır. Eğer yarı iletken n-tipi katkılı ise Fermi seviyesi yarıiletkenin iletkenlik bandına yakınlaşır. Bu da bu yarı iletken elektron açısından zengin olduğunu gösterir. p-tipi yarı iletken de ise Fermi seviyesi yarıiletkenin valans bandına yakınlaşır. Eğe n-tipi yarı iletken ışığa maruz kalırsa yarıiletkende azınlık deşik sayısı artmaya başlar ve Fermi seviyesi ikiye bölünür. Bunlara sanki-Fermi seviyesi denir. p-tipi yarıiletkende de aynı durum söz konusu olmaktadır. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi güneş hücresinin açık devre voltajı p-n eklemde oluşan sanki-Fermi seviyelerin farkıdır. Güneş ışınımı artmaya başlarsa daha fazla elektron ve deşik üretimi gerçekleşir bu da Fermi seviyelerinin konumlarının değişmesine neden olmaktadır.

Şekil 2.6'da FV hücrenin 1 güneş (1000 W/m^2), 10 güneş (10x1000 W/m^2) ve 50 güneş (50x1000 W/m^2) değerinde, ışıma altında güneş hücresinin akım-voltaj karakteristiğinin değişimi verilmiştir; ışın miktarının artması doğrudan güneş hücresinin dış devre akımını arttırmaktadır. Ayrıca bir önceki paragrafta da bahsedildiği gibi ışınım miktarı Fermi seviyelerini de etkilediğinden güneş hücresinin açık devre voltajı değerinde de artış görülmektedir.



Şekil 2.6. Yoğunlaştırılmış güneş altında güneş hücresinin sabit sıcaklıkta akım-voltaj karakteristiğinin değişimi

Işınımın artması güneş hücresinde doğrusal olarak akımı arttırsa da voltaj değeri akım kadar artış göstermemektedir. Bu nedenle de ışınım miktarına göre güneş hücresinin verimliliği doğrusal olarak artmamaktadır. Şekil 2.7'de verilen grafikte tipik bir güneş hücresinin verimliliğinin 1'den 200 güneşe kadar olan ışınım miktarına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.7. Yoğunlaştırılmış güneş altında sabit sıcaklıkta güneş hücresinin verimliliğinin artışı

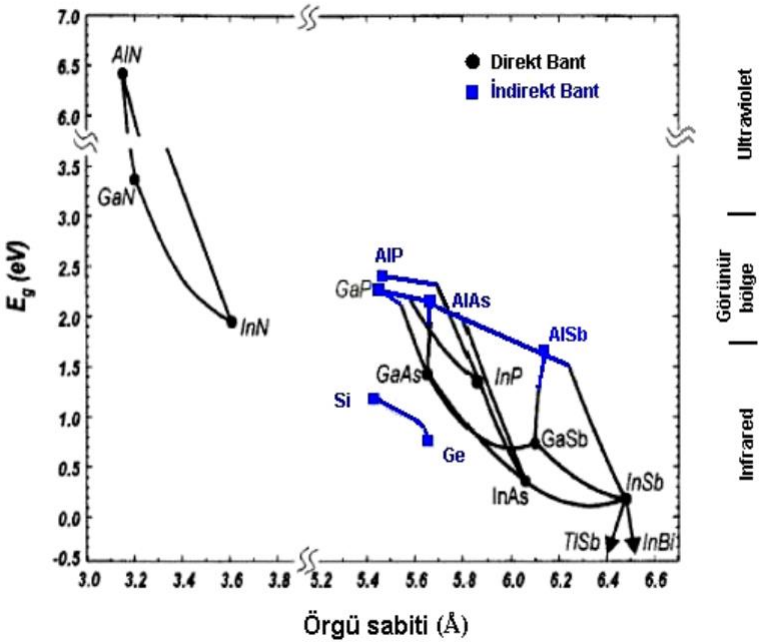
Güneş hücresinin verimliliğinin yoğunlaştırılmış güneş sayısına göre doğrusal artmaması, yoğunlaştırıcı güneş hücre sistemi tasarlanırken dikkat edilmesi gereken bazı parametrelerin çok daha iyi ayarlanabilmesini sağlamaktadır. Örnek olarak: 100 Güneşte elde edilen verimlilik değeri ile 300 Güneşteki verimlilik değeri arasında dikkate değer bir artış yok ise hücreyi daha fazla ısıtmaya gerek kalmamaktadır. Çünkü güneş sayısı arttıkça hücre daha fazla ısınacaktır ve güneş sayısından kazanılan verimlilik ısınmadan dolayı kaybedilecektir. Bu durum da tasarım yapılırken optimum değerin bulunmasını gerektirir.

2.4. Yoğunlaştırıcı Güneş Hücreleri

Bu bölümde önce III-V grubu yarıiletkenler ve bunlara dayalı güneş hücrelerinin avantajları ve dezavantajları gibi konulara yer verildikten sonra yoğunlaştırıcı sistemlerin çeşitleri ve özelliklerine değinilmiştir.

2.4.1. III-V grubu güneş hücreleri

III ve V grubu elementlerinin bir araya gelmesiyle yapay olarak oluşturulan III-V grubu yarıiletkenleri günümüzün elektronik ve optoelektronik aygıt teknolojilerinde en az Si kadar yer edinmiştir. Çünkü III-V grubu yarıiletkenleri elektriksel ve optik özellik olarak doğal yarıiletkenlerde olmayan esnekliğe sahiptir. Genel olarak III grubundan bir element ile V grubundan bir element ikili bileşim yarıiletkeni oluşturmaktadır. Bu ikili bileşim yarıiletkeni kendine özgü yapısal, elektriksel ve optik özelliklere göre indirekt veya direkt bant aralıklı olabilmektedir. III-V grubu ikili bileşim yarıiletkenleri de kendi aralarında belirli oranlarda alaşım oluşturduklarında hem yapısal hem de elektro-optik özelliklerini değiştirmektedir. Bazı III-V grubu yarıiletkenleri örneğin; $GaAs$, InP, $InAs$ v.b. gibi yarı iletken teknolojisi Si teknolojisi kadar eskiye dayanmaktadır.



Şekil 2.8. III-V grubuna dayalı bazı alaşım yarıiletkenlerin bant aralıklarının kristal örgü sabitlerine bağlı olarak davranışları (Şit 2014)

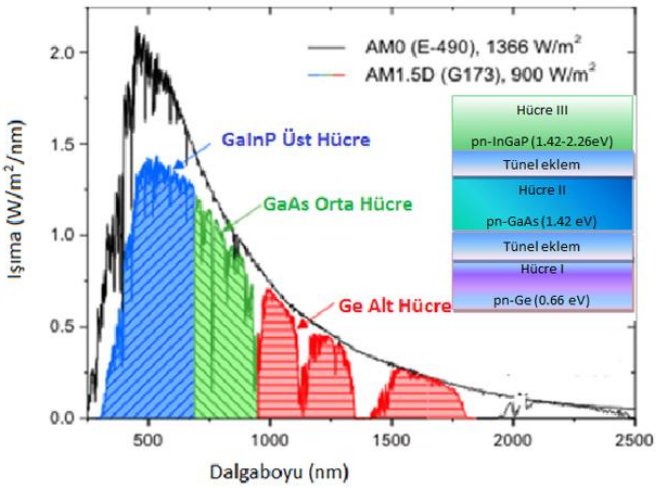
Şekil 2.8'de III-V grubu yarıiletkenler ve alaşımlarının bant aralığının örgü sabitine bağlı değişimleri verilmiştir. III-V grubu yarıiletkenlerde nitrat tabanlı bileşimler hem yapısal hem de elektro-optik özellik olarak tamamen ayrılmaktadır. Çünkü nitratlı yarıiletkenlerin bant aralığı çok yüksek ve kristal örgü sabitleri de çok kısadır. Örgü sabitinin kısa olması yarıiletkendeki atomlar arası bağ kuvvetinin güçlü olmasına yol açmaktadır. Bu nedenle nitrat tabanlı yarı iletken teknolojisi diğer yarı iletken teknolojilerinden tamamen ayrılmaktadır. Çünkü standart yarı iletken aygıt yapımında

kullanılan şekillendirme yöntemleri nitrat tabanlı yarıiletkenlerde olumsuz sonuçlar vermektedir. Ancak buna rağmen nitrat tabanlı yarıiletkenler 1990'larda yapılan çalışmalar sonucunda yarı iletken uygulama teknolojisinde devrim niteliğinde etki yaratmıştır. Nitrat tabanlı yarı iletken aygıtının fabrikasyon süreçlerinin geliştirilmesi sonucunda mavi ışık kaynağı olan mavi LED yapılabilmiştir. Daha önceki yıllarda kırmızı ve yeşil LED'ler üretilmekle birlikte yarıiletkenlere dayalı mavi ışık kaynağı üzerinde çalışmalar yapılmaktaydı. Beyaz ışık üç temel renkten oluştuğu için mavi ışığın yeri çok önemliydi. Günümüzde televizyon, kamera, UV sensör ve yine birçok aygıtların boyutlarının nitratlı yarıiletkenler sayesinde küçülmesi veya incelmesi sayesinde enerji tüketimleri yüksek oranda düşmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında incelenen $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresindeki $GaInP$ ve $GaAs$ yarıiletkenleri de III-V grubu yarıiletkenleridir ve kristal örgü sabitleri Ge ile uyumludur. Ge, IV grup elementidir ve bant aralığı indirekt olmasına rağmen III-V grubu teknolojisinde bant aralığının küçük ve örgü sabitinin uyumlu olmasından dolayı taşıyıcı alttaş olarak kullanılması yanında üçüncü eklem olarak da kullanılmaktadır. Ancak Ge indirekt bant aralıklı olmasından dolayı ışığı soğurma katsayısı düşüktür ve azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) oranları yüksektir. Bu nedenle Ge tabanlı güneş hücrelerinde verimlilik düşük olur. Günümüzde yapılan çalışmalarda Ge'un yerini alabilecek bant aralığı Ge kadar düşük ancak direkt olan yarıiletkenler araştırılmaktadır. Bunlardan en iyi aday V grup elementi olan Bi tabanlı yarıiletkendir. Bu yarı iletken $GaAs$ içerisine az miktarda Bi atomlarının katılmasıyla elde edilir ve $GaAsBi$ olarak gösterilir. $GaAsBi$ alaşımı 0.7 eV direkt bant aralığına sahiptir ve kristal örgü sabiti $GaAs$ ile uyumludur (Erol ve Balkan 2015; Kınacı 2013; Muhammetgulyyev vd. 2019a, 2019b)

Üç eklemli hücrelerden elde edilen verimlilik değerleri oldukça ilgi çekicidir. Günümüzde bu hücrelerin verimliliğinin arttırılması ile ilgili çalışmalar hala güncelliğini korumakta ve devam etmektedir.

III-V grubu güneş hücreleri doğası gereği doğrudan ve elementlerin bileşimleri sonucunda niteliği değişmiş yasak enerji aralığından dolayı güneş spektrumu boyunca güçlü bir soğurma gösterir. Bir güneş hücresinin dönüşüm verimliliği gelen güneş ışığının yoğunluğuna bağlıdır. Bu yüzden III-V grubu güneş hücrelerinden, Si temelli güneş hücrelerine göre daha fazla verim elde edilebilir. Örneğin, Şekil 2.9'da verildiği gibi, $GaInP$ üçlü alaşımı güneş spektrumunun görünür bölgesini soğurması nedeniyle yüksek verimli güneş hücreleri için en uygun malzemelerden biridir. Özellikle $GaAs$ alttaş üzerine örgü uyumlu büyütülen $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ yapısı teknolojik olarak büyük öneme sahiptir. Günümüzde üretilen üç eklemli yapılar da; $GaInP$ (1.9 eV), $GaAs$ (1.4 eV) ve Ge (0.7 eV) kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. $GaInP/GaAs/Ge$ çok eklemli güneş hücresinin şematik yapısı ve güneş spektrumunun hangi bölgelerini soğurduğunu gösteren spektral dağılımı

Üç eklemli hücrenin oluşturulmasında ilk adım örgü sabiti uyumu ve uygun bant aralığının belirlenmesidir. Örgü uyumunun $\%\,0.01$ değerlerinde olması tercih edilmelidir. Bu ise üçlü alaşımlarda, alaşım oranının değiştirilmesi ile elde edilebilir. Burada alaşım oranının bant enerjisine etki edeceğini de dikkate almak gerekir.

Çok eklemli güneş hücreleri seri bağlı katmanlardan oluştuğundan güneş hücresinde akım, üstten alta doğru yönelecektir. Bu nedenle akım üreten seri sistemlerde her bir eklemde oluşan akım aynı değerde olmalıdır. Çok eklemli FV hücrede üretilen akım, en düşük akımı üreten tabaka tarafından sınırlanır. Akım kayıplarını azaltmak ve maksimum verime ulaşabilmek için her bir hücre aynı akımı üretmelidir. Akım, her bir katmanda soğurulan foton sayısı ile orantılıdır (Özen 2015).

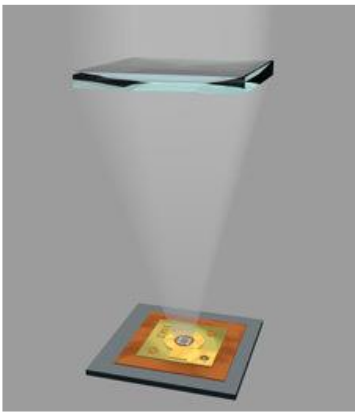
2.4.2. Yoğunlaştırıcı sistemler

Güneş enerjisi doğrudan ışın ve yoğunlaştırılmış ışın olarak iki şekilde elde edilir. Optik yoğunlaştırıcı üniteler: Gelen ışığı, kullanılan sisteme göre 2-1000 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcılı araçlardan oluşmaktadır. Mercekli yoğunlaştırıcı hücrelerde yoğunlaştırma alanı,

$$Yoğunlaştırma\ alanı\ = \frac{Mercek\ Alanı}{Hücre\ Alanı}$$

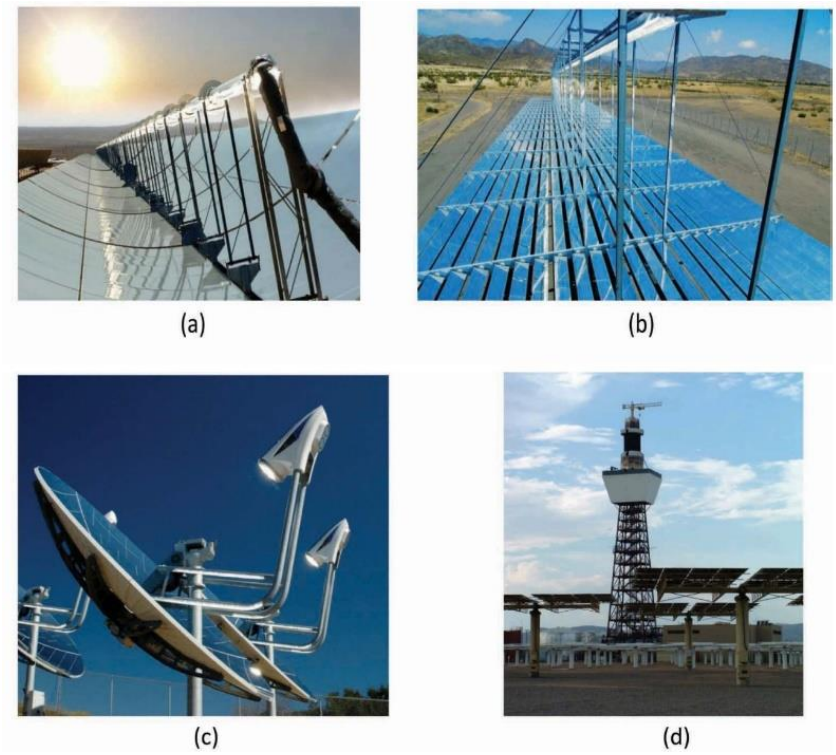
ile hesaplanır. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için plastik lensler ve cam aynalar gibi ucuz materyaller kullanılır. Basit yoğunlaştırıcı bir sistem ve güneş hücresi Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Özen 2015). Güneş güç teknolojilerinde, Şekil 2.11' de de gösterildiği gibi, 4 yoğunlaştırıcı çeşidi vardır:

- Parabolik oluk kollektörler (toplayıcılar)
- Lineer Fresnel reflektör (yansıtıcı) sistemler
- Parabolik çanak sistemler
- Güç kuleleri ya da merkezi receiver (alıcı) sistemler.



Şekil 2.10. Basit yoğunlaştırıcı sistem ve güneş hücresi (Özen 2015)

Yoğunlaştırma sistem tercihi genellikle enerji tüketimine, enerjinin nasıl kullanılacağına ve nerede kullanılacağına göre değişir. Örneğin, Fresnel mercekler hafif ve düşük maliyetlidir.



Şekil 2.11. Çeşitli yoğunlaştırıcı sistemler, **a)** Parabolik yoğunlaştırıcı; **b)** Fresnel yoğunlaştırıcı; **c)** Parabolik çanak yoğunlaştırıcı; **d)** Güneş kulesi – burada geniş alana yayılmış düz aynalar aracılığıyla güneş ışını sadece kulenin tepesine gelecek şekilde organize edilerek yoğunlaştırılmaktadır

Yoğunlaştırma sistemindeki kusurlu yansıma, gelen güneş ışığının genellikle $\%\,6-12$ oranında kaybına sebep olur. Bu durum kullanılan aynanın veya merceğin çeşidine ve temizliğine bağlıdır. Gümüş ile kaplı düşük demir oranlı camdan yapılmış temiz bir ayna $\%90-94$ 'lük yansıtma sağlar. Toplam akım analizlerinde kullanılan

optik etkinlik (n_{Opt}) bütün kayıpları içerir ve $n_{Opt} = 0.85$ temsili değeri olarak tahmin edilir (French vd. 2011; Steiner vd. 2016).

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin genel yapısı ile ilgili bilgi verildikten sonra karakterizasyon yöntemlerinden ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Deneysel karakterizasyon yöntemlerinden spektral duyarlılık ölçüm sistemi, güneş hücresinin, güneş spektrumunun hangi bölgelerini soğurduğunu yani hangi elektromanyetik dalgalara duyarlı olduğunun bilgisini almak için kullanılmaktadır. Hücre ile ilgili analizlerden sonra yoğunlaştırıcı güneş panelinin tasarımı ve analizi anlatılmıştır. Bölümün son kısmında hem güneş hücresinin hem de yoğunlaştırıcı güneş panelinin FV performansını belirlemek için akım-voltaj ölçüm düzenekleri verilmiştir.

3.1. Güneş Hücre Örnek Yapısı

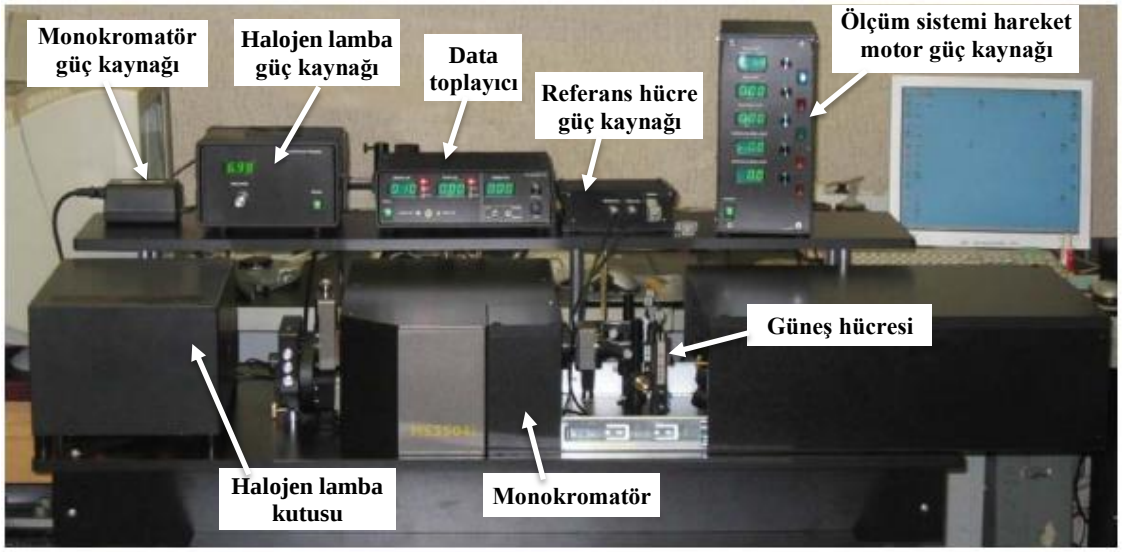
Bu çalışmada kullanılan güneş hücreleri, III-V grubu yarıiletkenlere dayalı çok eklemli güneş hücreleridir. Genel yapısı $GaAs$ tabanlı olan bu hücreler iki eklemli ve üç eklemli olarak tasarlanmaktadır. İki eklemli olan güneş hücreleri $GaAs$ alttaş üzerine büyütülürken üç eklemli olan güneş hücre yapıları Ge alttaş üzerine büyütülmektedir. Ge yarıiletkeni 1.65 eV civarında enerji bant aralığına sahiptir. Bu özelliği sayesinde, çok eklemli hücrede alt hücre olarak kullanılan Ge, kızılötesi ışığın daha fazla kısmının hücre içerisinde fotoakıma dönüşmesini sağlamaktadır. Çok eklemli güneş hücrelerinde her bir hücrenin yapıya yerleşiminde, E_g yasak bant aralığının, üst hücreden alta doğru azalan sırada olmasına dikkat edilmelidir. Örneğin üç eklemli bir hücre yapısında bant aralığı sıralaması $E_g(\text{üst}) > E_g(orta) > E_g(alt)$ şeklinde olmalıdır. Dar bir yasak bant aralığına sahip yarı iletken önce kendisiyle uyumlu yarı iletken alttaş üzerine büyütülür ve sonrasında üzerine daha geniş yasak bant aralığına sahip yarı iletken büyütülerek iki eklemli güneş hücre yapısı elde edilir. Bu tür aygıt büyütme teknolojisinin gerekçesi, yüksek enerjideki fotonlar en üstteki büyük bant aralığına sahip yarı iletken tarafından soğurularak elektrik enerjisine dönüştürülürken, üst eklemde soğurulmayan fotonlar bir alt eklemde soğurularak elektrik enerjisine katkıda bulunurlar. Bu nedenle çok eklemli güneş hücreleri günümüzün güneş hücre teknolojisinde yüksek verimliliğe sahip hücreler konumundadır. Çok eklemli güneş hücreleri günümüzde altı eklemliye kadar çıkmıştır ve % 47.1 gibi en yüksek verimliliği elinde bulundurmaktadır (Geisz vd. 2018; Green vd. 2020).

3.2. Spektral Duyarlılık Ölçümü

Güneş hücrelerinde spektral duyarlılık (Spectral Response–SR) spektrumu güneş hücrelerinin karakteristik özelliği için önemli yere sahiptir. Güneş hücrelerin SR spektrumları güneş hücrelerinin elektromanyetik spektrumun hangi kısmına duyarlı olduğunu ve duyarlı olduğu bölgedeki fotonları hangi oranda elektrik enerjisine çevirdiğini göstermektedir. Si güneş hücrelerinin SR spektrumu, hücrelerin, Güneş ışınlarının yüksek enerjideki ultraviyole (UV) bölgesine az duyarlı ve düşük enerjideki infrared (IR) bölgesine duyarsız olduğunu göstermektedir. Si veya $GaAs$ gibi yarıiletkenden oluşan homoeklem veya farklı yarıiletkenden oluşan heteroeklem güneş hücrelerinin SR spektrumu, tek-renk (monokromatik) ışığın güneş hücresinin üzerine geldiğinde uçlarında oluşan fotoakım değerlerinin ölçülmesiyle belirlenir. Bu ölçüm sonucunda güneş hücresine ait tek bir spektrum ortaya çıkar ve güneş hücresini oluşturan

yarıiletkenlerin soğurma karakteristiklerine göre spektrum şekillenir. Örneğin: $GaAs$ p-n homoeklem güneş hücresinin SR'nda sadece $GaAs$'a ait spektrum görülürken $AlGaAs/GaAs$ p-n heteroeklem güneş hücresinde $GaAs$'ten farklı olarak $AlGaAs$ için de bir farklı karakteristik görülür.

Tek eklemli güneş hücreleri için kullanılan spektral ölçüm yöntemi, çok eklemli güneş hücrelerinin elektromanyetik duyarlılık aralığını belirlemede yeterli değildir. Çünkü çok eklemli güneş hücrelerinde her bir eklem seri olarak bağlanır. Bilindiği üzere seri bağlamada akım dengesi önemlidir. Çok eklemli güneş hücresi yapımında, monokromatik ışıkla yapılan ölçümler, her dalga boyunda, seri bağlı eklemlerde farklı büyüklükte akım elde edilebileceğini göstermektedir; bu nedenle her bir eklemin duyarlılığı ölçülürken diğer eklemlerin de aynı değerde akım üretmesi sağlanmalıdır. Bu yüzden standart SR ölçüm sistemine yüksek güçte ve stabil şiddette ışık verebilen monokromatik ışık kaynakları dahil edilmelidir. Çok eklemli güneş hücresinin hangi ekleminin spektrumu karakterize ediliyorsa, diğer eklemleri de eklenilen ışık kaynaklarıyla aydınlatılır. Böylece seri bağlı eklemler arasında akım dengesi sağlanmış olur. Bu yönteme "ışık beslemeli spektral ölçüm tekniği" denilmektedir. Örnek olarak, $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin $GaInP$ eklemi karakterize ediliyorsa kırmızı ve IR ışık kaynaklarıyla $GaAs$ ve Ge eklemlerinde fotoakım oluşturulması sağlanır. Üç eklemli güneş hücresinde kırmızı ve IR LED'lerin oluşturduğu fotoakım sayesinde $GaInP$ üzerine düşen monokromatik ışık ile SR ölçülmüş olur. Kırmızı ışığın enerjisi $GaInP$ yarıiletkenin yasak bant aralığından küçük olduğu için sadece $GaAs$ eklemde soğurulacaktır. Aynı şekilde IR ışığı da sadece Ge eklemde soğurulacaktır.



Şekil 3.1. Spektral ölçüm sisteminin genel görünümü

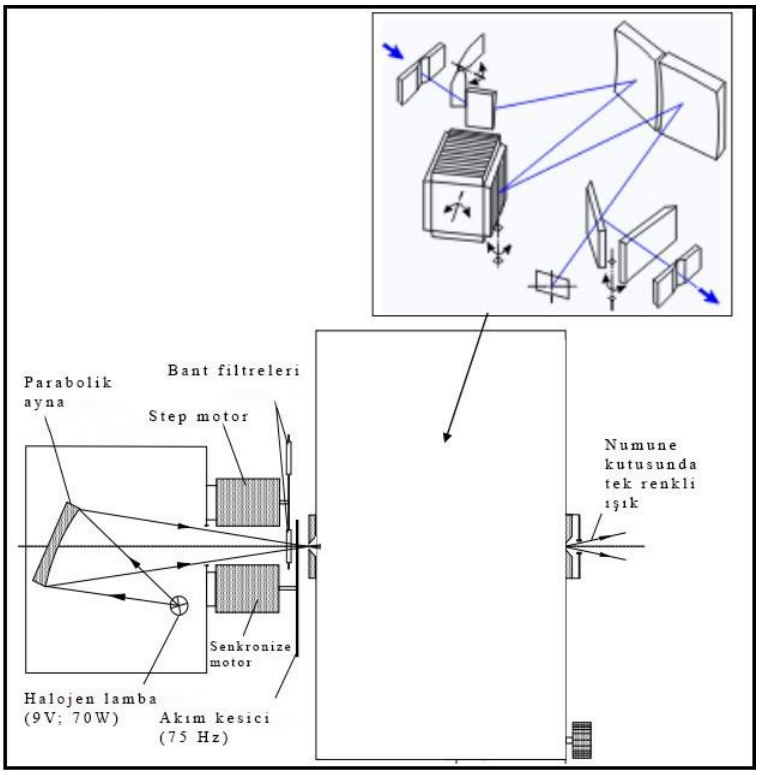
Şekil 3.1'de bu tez çalışmasında kullanılan spektral ölçüm sisteminin deney düzeneği gösterilmektedir. Bu sistem, ışık kaynağı olarak halojen lamba, monokromatör, referans hücre veya detektör, ölçüm ve kayıt sistemlerinden oluşmaktadır.

Monokromatik ışık, halojen lambadan çıkan spektrumun monokromatörde dalga boylarına göre ayrılmasıyla oluşturulur. Monokromatik olmayan ışığı dalga boylarına

ayırma işlemi kırınım ağı yardımıyla gerçekleşir. Kullanılan kırınım ağı elektromanyetik spektrumun her bir aralığı için farklıdır. Şekil 3.1'deki sistemde kullanılan monokromatör aşağıda sıralandığı gibi 3 adet kırınım ağına sahiptir:

1. Dalgaboyu 350 – 540 nm aralığı için – 1200 oyuk/mm
2. Dalgaboyu 400 – 1200 nm aralığı için – 1200 oyuk/mm
3. Dalgaboyu 1135 – 3400 nm aralığı için – 400 oyuk/mm

Kırınım ağları genel kullanım alanlarında geçirgenliğe ve yansıtıcılığa bağlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Geçirgenliğe dayalı çalışan kırınım ağında ışık çok dar yarıktan geçerek difraksiyona uğramaktadır. Yansıtıcılığa dayalı çalışan kırınım ağında ise ışık birbirine çok yakın oluşturulmuş oyuklardan yansıyarak difraksiyona uğrar.

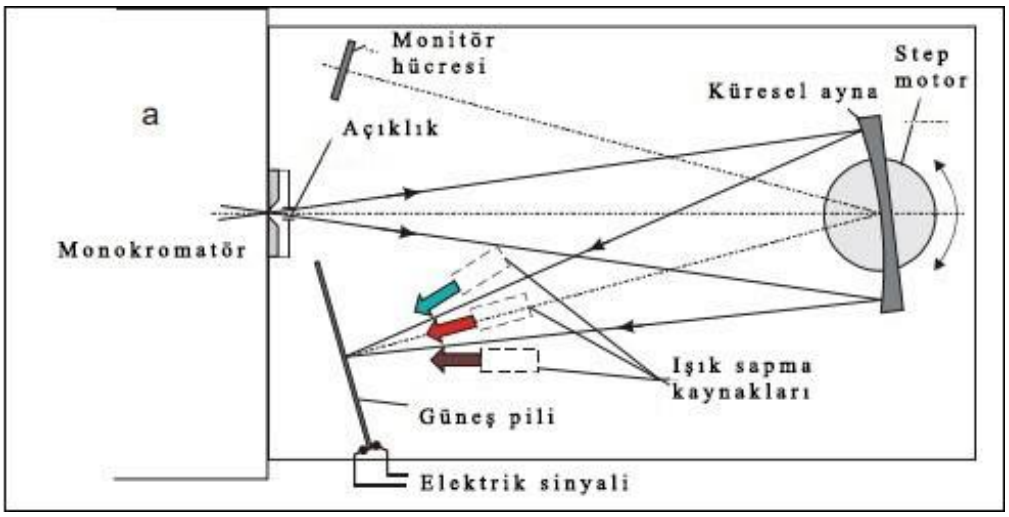


Şekil 3.2. Spektral ölçüm için kullanılan sistemin halojen lamba kutusu ve monokromatörün iç optik yapısı (Ioffe 2010)

Monokromatörde kırınım ağları dalga boyuna göre otomatik olarak ayarlanmaktadır. Şekil 3.2'de ışık kaynağı ve monokromatör sisteminin şematik olarak görünümü verilmiştir. Beyaz ışık kaynağı 9V voltajda çalışan maksimum 70W gücüne sahip halojen lambadır. Bu lambadan çıkan ışık parabolik ayna aracılığı ile monokromatörün girişine odaklanır. Monokromatörün önüne 75Hz frekansta ışığı modüle etmek için ışın kesici konmuştur. Işın kesiciden önce optik filtreler yer almaktadır. Bu filtreler yukarıda bahsedilen kırınım ağlarının aralığına eşit gelecek elektromanyetik dalgaları geçirmektedir. Halojen lamba, ışın kesici ve optik filtre motorları tek akım kaynağından beslenmektedir.

Şekil 3.3'te gösterilen düzenekte, monokromatörden çıkan monokromatik ışığın parabolik ayna yardımı ile önce örneğin daha sonra referans hücrenin (monitör hücre) üstüne odaklanması gösterilmektedir. Güneş hücre (güneş pili) örneğinin tutucusunun

hemen yanında yüksek güçte mavi, kırmızı ve kızılötesi LED'ler konumlandırılmıştır. Bu LED'ler, her bir ışık türü için güneş hücresinin tepkisini ölçmek amacıyla kullanılan ışık kaynaklarıdır.

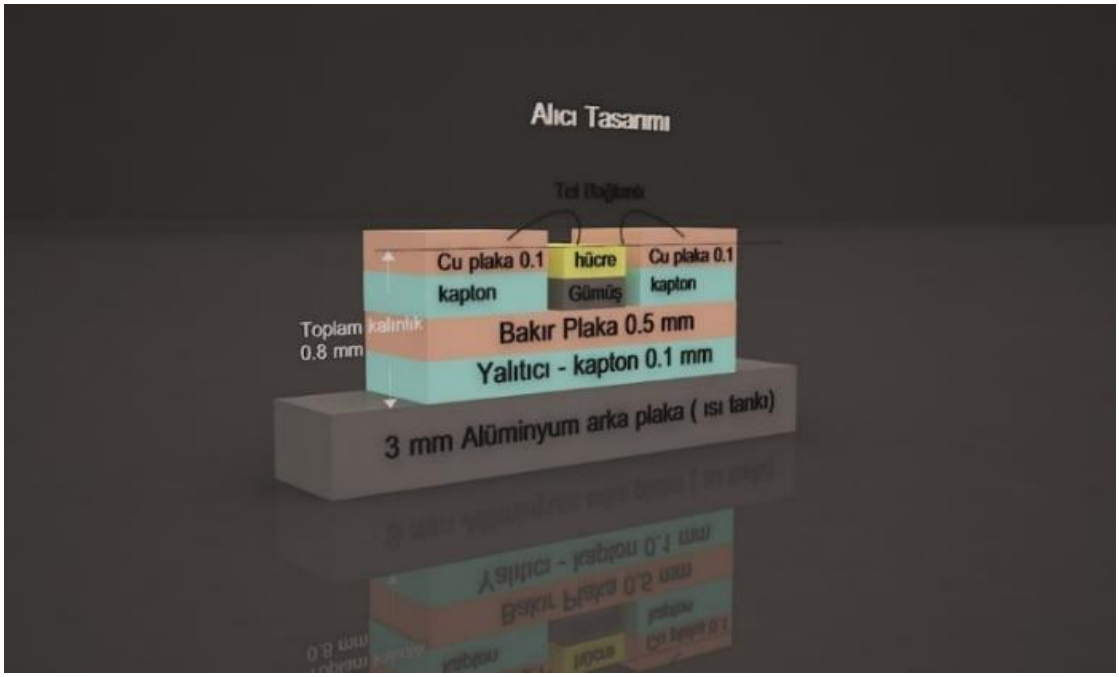


Şekil 3.3. Spektral ölçüm için kullanılan sistemin monokromatik ışık altında örnek yerleşimi ve optik düzeni (Ioffe 2010)

Monokromatik ışık önce güneş hücresinin üzerine düşürülür ve uçlarındaki akım ölçülür, daha sonra monokromatik ışık referans hücrenin üzerine düşürülür ve uçlarındaki akım değeri ölçülür ve bu değerler birbirine oranlanarak ilgili dalga boyu için güneş hücresinin SR oranı belirlenir. Bu sistemde tek eklemli veya çok eklemli güneş hücrelerinin de spektral ölçümleri gerçekleştirilebilir.

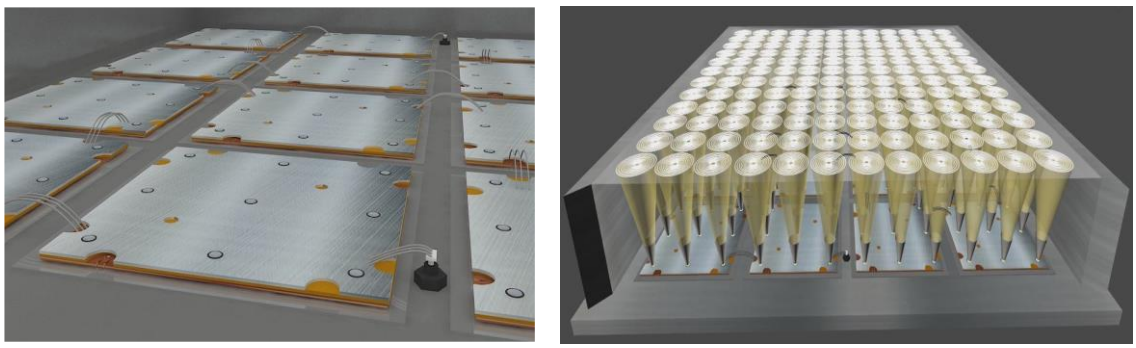
3.3. Yoğunlaştırıcı Modül ve Yapısı

Yoğunlaştırıcı güneş paneli $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi, alüminyum ve bakır alıcılar, Fresnel lens ve alüminyum kasadan oluşmaktadır. Şekil 3.4'te tek bir güneş hücresi için yoğunlaştırıcı sistemin tasarımsal yapısı verilmiştir.



Şekil 3.4. Yoğunlaştırıcı modül içerisinde güneş hücresi ve alıcı tasarımının şematik olarak gösterimi

Bu tez çalışmasında, 144 adet hücre kullanılarak yoğunlaştırıcı güneş paneli geliştirilmiştir. Hücrelerin üst katmanı, yüzeyden olan yansımaları önlemek amacıyla, TiO_x/AlO_x ince filmleri ile kaplıdır. Bu panelde 16 adet alıcı ve her bir alıcıda 9 adet güneş hücresi yer almaktadır. Şekil 3.5'te güneş paneli (a) bağlantı ve (b) mercek sistemi gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.5. a) Yoğunlaştırıcı güneş panelinin içyapısı ve hücreler arası bağlantı tasarımı; **b)** Yoğunlaştırıcı güneş panelinin mercek sistemi üzerinden ışınların izlediği yol

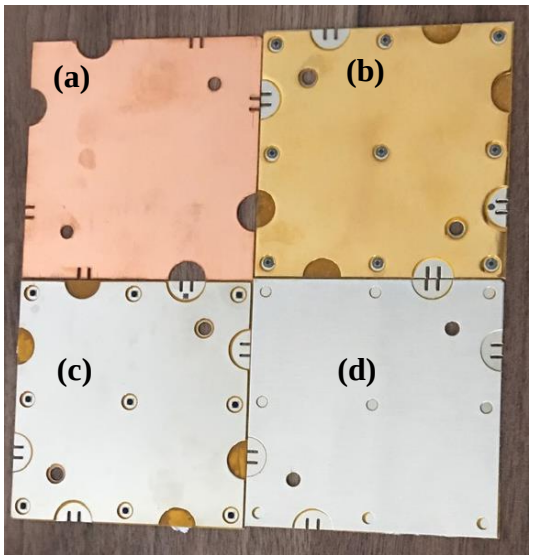
Hücrelerin birbirine seri ya da paralel bağlandığı ve yoğunlaştırıcı FV (concentrated photo voltaic-CPV) panele yerleştirildiği elemana "hücre alıcısı" denir. Hücre alıcısı, ısı iletkenliği yüksek yalıtkan bir malzeme ile birbirine birleştirilmiş iki iletken plakadan oluşmaktadır ve CPV panelde elektrik üretimini sağlayan hücrelerin birbirine bağlanarak panele monte edildiği en önemli sistem elemanıdır.

Yoğunlaştırıcı sistemlerde hücre üzerine gelen ışınların yarattığı sıcaklık, soğutma yardımı olmadığı durumda, sadece ışınım ve ısı yayınım boyunca harcanır. Güneş hücrelerinin çalışabilmesi için maksimum sıcaklık 80°C'dir. Hücrelerin verimli çalışabilmesi için ortam sıcaklığı ve hücre sıcaklığı arasındaki farkın 40°C'den fazla olmaması gerekir. Birbirlerine seri bağlı olan hücrelerin tüm eklemleri ile arasında büyük bir sıcaklık farkı olmaması gerekmektedir (Feuermann ve Gordon 2001; Mathur vd. 1984; Özen 2015).

Alıcının, CPV panel içerisindeki en önemli malzeme olan hücrelerin yerleştirildiği bir parça olması nedeniyle ortamın koşullarına da uygun olması gerekmektedir. Ortam koşullarından zamanla etkilenmeyecek malzemelerden seçilmesi gerekir. Malzeme yüzeyinin oksitlenmemesi ve sıcaklıkla genleşmemesi gerekir. Bu şartları sağlayabilmesi için şunlara dikkat etmek gerekir:

- Termal genleşme katsayıları birbirine yakın malzemeler seçilmelidir.
- Birbirlerine bağlanacak olan malzemelerin bağlantıları uyumlu olacak şekilde iyi seçilmelidir.
- Oksit tabaka içerisinde ani bir soğutmada oluşabilecek gerilme nedeniyle bağlantı kayıplarının oluşmamasına dikkat edilmelidir.
- Alıcı üzerinde bulunan parçalarda yüksek sıcaklıklara çıkılması durumunda birbirine yapıştırılan malzemelerin ayrılmamasına ve malzemelerin birbirine kaynak olmamasına dikkat edilmelidir.

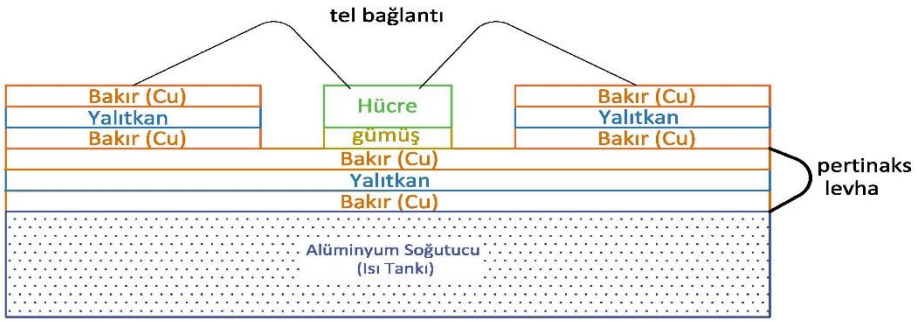
Alıcı sistem, Bakır (Cu) ve Alüminyum (Al) levhalardan üretilmektedir. Bu malzemelerin atmosferik ortamda kolay oksitlenebileceği ve bunun ise panel veriminin azalmasına neden olacağı değerlendirilmektedir. Bu etkiyi analiz etmek amacıyla yüzeyleri Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Nikel (Ni) ile kaplanmış levhalardan alıcılar üretildi. Üretilen alıcıların fotoğrafları Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Üretilen hücre alıcıları **(a)** taban Cu plaka; **(b)** Au kaplama; **(c)** Ag kaplama; **(d)** Ni kaplama

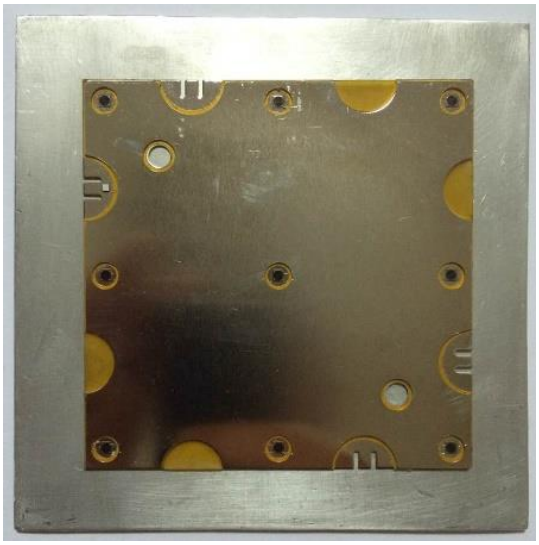
Yüksek yoğunlaştırma altında çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan hücreleri soğutmak için sistemimizde pasif soğutucu olarak Al kullandı. Alıcı aygıt iki tarafı Cu ve

ortası yalıtkan olan Pertinaks malzemesi ile Al soğutucu tablanın birbirine yüksek termal iletim ve düşük direnç özelliği gösteren yapıştırıcıyla bağlanması ile oluşturuldu.



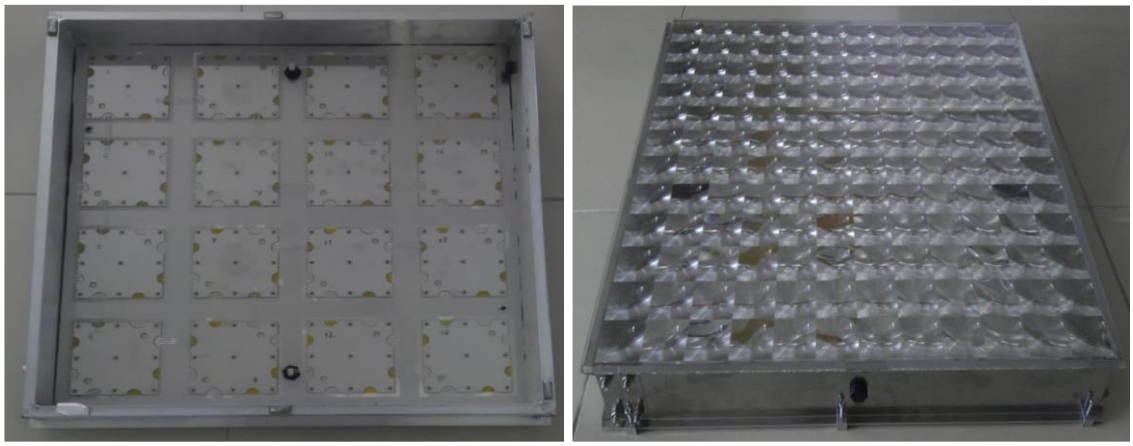
Şekil 3.7. Alıcı tasarımı

Şekil 3.7'de alıcı katmanlarının özellikleri ile bir güneş hücresinin alıcıya ve bu alıcının da soğutucu Al tablaya bağlantısı verilmiştir. Şekil 3.8'de ise bütün bağlantıları tamamlanan alıcının resmi verilmiştir; burada 9 hücre içeren hücre alıcı sistemleri bir araya getirilerek hücre paneli oluşturulmaktadır.



Şekil 3.8. Al plakaya monte edilen hücre alıcısı

Şekil 3.9, bu tez çalışmasında oluşturulan alıcı sistemlerin yerleştirilmesi ile elde edilen güneş panelini göstermektedir. Yoğunlaştırıcı güneş paneli uygulamalarında, güneş ışınlarının izlediği yolu takip ederek güneş hücresinin üzerine hassas bir şekilde yoğunlaştırmak önemlidir. Hassas bir ayarlama yapılamadığı takdirde, lenslerin üzerine gelen ışınların takip ettiği yolun ufak bir açı değişimi, ışının farklı bir konuma odaklamasına neden olur.



(a) (b)

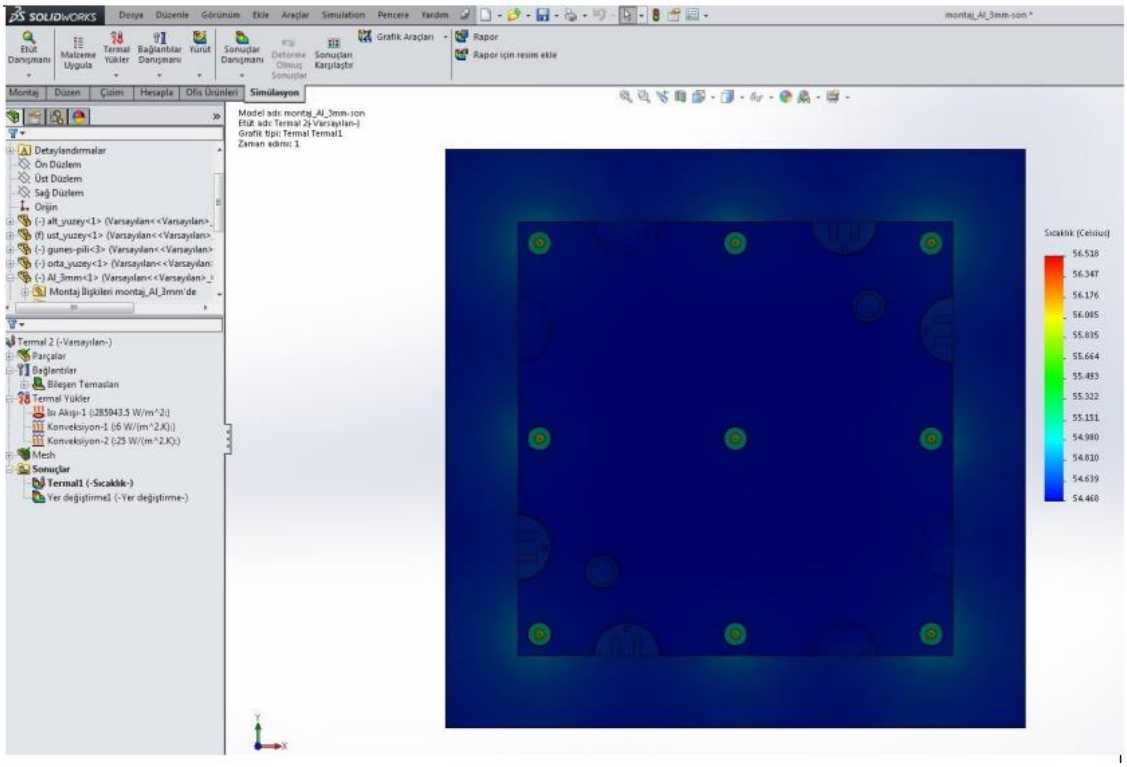
Şekil 3.9. a) Alüminyum tabana yerleştirilen 16 adet alıcı; **b)** Yoğunlaştırıcı güneş paneli

3.4. Termal Analiz

Bu tez çalışmasında da yapıldığı gibi, bilimsel çalışmalarda, gerçek deney düzenekleri hazırlanmadan önce simülasyon programları ile sıcaklık tahminleri oluşturulmaktadır.

Simülasyonu kısaca tanımlamak gerekirse bir öngörüdür. Simülasyon tarih boyunca uzun yıllar hayatımızdadır. Bilgisayarların olmadığı dönemlerde kâğıt üzerine çizilen planların nasıl çalışacağı ve nasıl bir sonuç vereceği sadece bilgi ve tecrübeye bağlı olarak tahmin edilebilmekteydi. Daha sonrasında yapılan deneylerden edinilen bilgi ve tecrübeler kayıt altına alınmaktaydı ve matematiksel modeller oluşturulmaktaydı. Ancak bu modeller oldukça karmaşık olduğundan hesaplar sonucunda bir simülasyonun gerçekleşmesi epey zaman almaktaydı. Ayrıca bu modeller her ne kadar üç boyutlu bir geometriyi kapsıyor olsa da yapılan simülasyonlar basitlik açısından tek boyutlu olarak gerçekleştirilmekteydi. Bilgisayarların gelişmesiyle üç boyutlu ve birden fazla elemanların da bulunduğu bir sistemin nasıl davranacağını gösteren simülasyonlar çok kısa bir sürede çok daha kaliteli ve gerçekçi sonuçlar verebilmektedir.

Günümüzde teknolojinin gereksinimlerini karşılayacak birçok simülasyon programları mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanı ve birçok alana hitap edebileni 1995 yılında satışa sunulan Solid Works yazılımıdır. Solid Works aslında 3-boyutlu (3D) katı modelleme yazılımı olsa da daha sonra eklenen özellikler sayesinde farklı birçok analizi de yapabilmektedir (Kurowski 2019). Solid Works programının termal analiz yaparken kullanılan ara yüzünün genel görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Yoğunlaştırıcı panel içerisinde yer alan alıcı bloklarının termal analizinde kullanılan Solid Works program ara yüzü ve analiz sonuçlarının verildiği ana ekran görüntüsü

Simülasyonda, verilen geometrik şekli oluşturacak malzemelerin, yapılan analiz için gerekli olan parametrelerini programa girmek gerekir. Çizelge 3.1'de termal alıcı katmanlarını oluşturan malzemeler olan, bakır, alüminyum ve yalıtkan kapton'un özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Alıcı blokları oluşturan her bir katman malzeme için termal analiz simulasyonunda kullanılan parametreler (*Alüminyumun paslanma (oksitlenme) sınıfı (Corrosivity category) C1 ve C2'dir) (ALUMECO 2020)

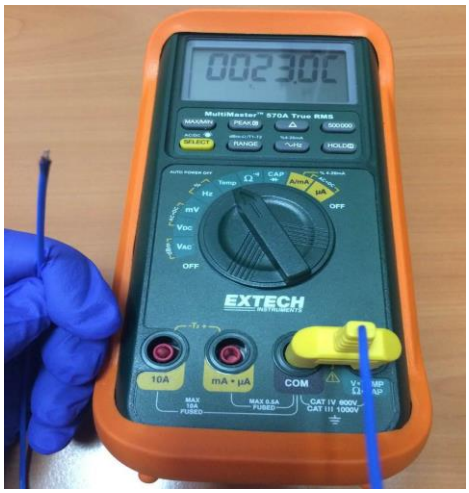
Parametre	**Birim**	**Bakır**	**Kapton**	**Alüminyum***
Elastiklik Modülü	psi	15954151.14	-	1e8
Poisson Oranı	N/m	0.37	-	0.33
Kayma Modülü	psi	5801509.51	-	3916018.92
Yoğunluk	lb/in^3	0.321533	0.051662	0.0975437
Çekme Dayanımı	psi	57199.98	-	11997.91
Akma Dayanımı	psi	37513.43	-	3999.3
Termal Genleşme Katsayısı	$1/^oF$	13333.33333	-	13333.3333
Termal İletkenlik	$Btu/inc.s.^o$	0.00521615	5.35e-6	0.00307619
Özısı	$Btu/lb.^oF$	0.09315	-	0.238846

Alıcı sistemde kullanılan malzemelerin termal iletkenlik uyumu olması gerektiği için kullanılan tüm parçaların termal iletkenliği bilinmelidir. Kullanılan malzemelerin termal iletkenlik değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan malzemelerin termal iletkenlik değerleri (Özen 2015)

Yapı	Malzeme	Termal İletkenlik ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Yapıştırıcı	Ag	430
Pertinaks levha	Cu	401
Soğutucu	Al	237

Deney düzeneği hazırlayarak oluşturulan sıcaklık analizleri, Şekil 3.11'de gösterilen Extech Instruments marka Multi Master TM 570A True RMS multimetre ile ölçülmüştür. Ölçüm alınan laboratuvarın ortam sıcaklığı 23.0 ^{o}C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.11. Extech Instruments marka Multi Master TM 570A True RMS multimetre

Sıcaklık analizlerinde kullanılacak ışık kaynağı olarak spektrumu AM1.5 filtre ile güneş spektrumuna uyumlu hale getirilmiş, 4x4 inç ışıma alanına sahip Newport marka Oriel Sol1A model A sınıfı güneş simülatörü kullanılmıştır. Cihaz 1 Güneş (100 mW/cm²) güneş ışığı verme kapasitesindedir.

3.5. Akım–Voltaj Ölçümü

Güneş hücrelerinin FV performansı, ışık altında akım-voltaj ölçümleri sonucunda belirlenir. Akım-voltaj ölçülmesi deneylerinde kullanılan ışık kaynağı, güneş spektrumuna en yakın spektrumu veren kaynaktır. Genelde Xenon ark lamba kullanılmakla beraber bazı durumlarda halojen lamba ya da LED'ler de kullanılabilmektedir. Güneş spektrumuna yakın olan spektrumda ışık verebilen sisteme "solar simülatör" denmektedir. Dünyada kullanılan ışık kaynaklarının hiçbiri doğal güneş spektrumuna %100 uymamaktadır. Bu nedenle kullanılan ışık kaynaklarının önüne, kaynaktan çıkan ışık spektrumunun belirli bölgelerini aynı güneş spektrumunda olduğu

miktarda soğuracak optik filtreler konmaktadır. Bu şekilde solar simülatörden çıkan ışığın şiddeti ve spektrum aralığı güneş spektrumuna oldukça yakın ayarlanabilmektedir. Solar simülatörler, spektrumlarının güneş spektrumuna olan benzerlik oranlarına göre sınıflandırılmaktadır. A, B ve C olmak üzere üç farklı sınıflandırma mevcuttur. Çizelge 3.3'de solar simülatörlerin sınıflandırmaları verilmiştir; görüldüğü gibi bir solar simülatör, güneş spektrumuna uyumluluğu, simülatörden çıkan ışığın spektrumundaki düzensizliği ve kullanılan ışık kaynağının ışık şiddetindeki kararlılığı dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Bu nedenle simülatör sınıflandırmasında AAA ya da ABA (sırasıyla, uyumluluk-düzensizlik-kararlılık) gibi sınıflandırma gösterimleri yapılır.

Çizelge 3.3. Solar simülatörlerin sınıflandırılması

Sınıflandırma	Spektral uyumluluk (birimsiz)	Spektral düzensizlik (%)	Spektral kararlılık (%)
Sınıf A	0.75 – 1.25	2	2
Sınıf B	0.6 – 1.4	5	5
Sınıf C	0.4 – 2.0	10	10

Bu çalışmada, güneş hücrelerinin akım-voltaj karakteristiğini belirlemek için kullanılan solar simülatör Şekil 3.12'de verilmiştir; ancak bu simülatör küçük alan için tasarlanmıştır. Şekil 3.12(a)'da AAA sınıfına ait atımlı (pulslu) solar simülatörün genel dış görünümü verilmiştir. Şekil 3.12(b)'de ise solar simülatörün kullandığı Xenon ark lamba kutusunun iç görüntüsü yer almaktadır.



(a) (b)

Şekil 3.12. $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi için akım-voltaj ölçüm sistemi, **(a)** genel dış görünümü ; **(b)** $10ms$ gibi kısa sürede flaş ışık vermek için kullanılan Xenon lamba kutusunun iç görünümü

Bu tez çalışmasında, yoğunlaştırıcı güneş paneli 144 adet hücreden oluştuğu için alan büyümektedir. Bu nedenle, akım-voltaj karakteristiğinin belirlenmesi için Şekil 3.13'de verilen solar simülatör düzeneği kullanılmıştır; masanın altında yer alan ışık

kutusundan çıkan ışık, tam karşısında 45^o dereceyle yerleştirilen ayna yardımıyla 90^o derece yukarı doğru yönlendirilerek ölçümlerin yapılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.13. Yoğunlaştırıcı güneş panelinin FV karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan düzeneğin genel dış görünümü

Yoğunlaştırıcı güneş panelinde kullanılan termal alıcıların olası oksitlenmesi güneş panelinin performansına negatif etki edecektir. Termal alıcılar oksitlenirse termal iletkenliği azalacak ve üzerinde oluşan ısının atılmasında olumsuzluk yaratacaktır. Isı atılımının kötü olması güneş hücresinin sıcaklığının artmasına neden olacaktır. Sıcaklığı artan güneş hücresinin açık devre voltajı sıcaklığa bağlı olarak doğrusal azalacaktır. Öte yandan oksitlenme ile artan direnç, toplam panel akımında azalmaya neden olacaktır. Bu nedenle yoğunlaştırıcı güneş panelinin FV çıktı parametrelerindeki (akım, gerilim ve verim) değişimlerin incelenmesiyle, dolaylı olarak, alıcıların oksitlenmesi değerlendirilmiştir.

3.6. Işınım Miktarı Ölçümü

Bu çalışmada, 144 hücreli yoğunlaştırıcı güneş panelinin dış ortamdaki ölçümlerinin performansını değerlendirmek için kritik öneme sahip olan güneş ışınım gücü ölçümleri, piranometre (Pyronometer) kullanılarak yapılmıştır. Piranometre detektör, malzeme olarak piroelektrik (Pyroelectric) özellik gösteren malzemeden oluşmaktadır. Piroelektrik özellik, doğal olarak polarize olmuş malzemelerde ortaya çıkmaktadır. Piroelektrik malzemeler, üzerine düşen ışığın dalga boyuna bağlı olmaksızın duyarlılık gösterebilirler. Yani yarıiletkenlerde olduğu gibi spektrumun belirli bir dalga boyu aralığına bağlı bir duyarlılık göstermezler. Bu nedenle, güneş spektrumunun belirlenmesi gibi birçok optik detektör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında güneş ışınım miktarının ölçülmesinde kullanılan piranometre Şekil 3.14'de gösterilmiştir ve maksimum 300°'lik katı açıya sahip alandan gelen ışınları toplayabilme ve ışınım gücünü ölçebilme özelliğine sahiptir.



Şekil 3.14. Markası Kipp&Zonen modeli CM-6B olan piranometre

Piranometrede oluşan sinyalin değerini gösteren veri kaydedici cihazı Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Veri kaydedici RS32 bağlantısıyla bilgisayara bağlanarak kullandığı ara yüz sayesinde, zamana bağlı olarak, güneş ışınım gücünü kaydedebilmektedir. Bu ölçüm sistemi üretici firma olan Kipp&Zonen tarafından kalibre edilerek sunulmaktadır.



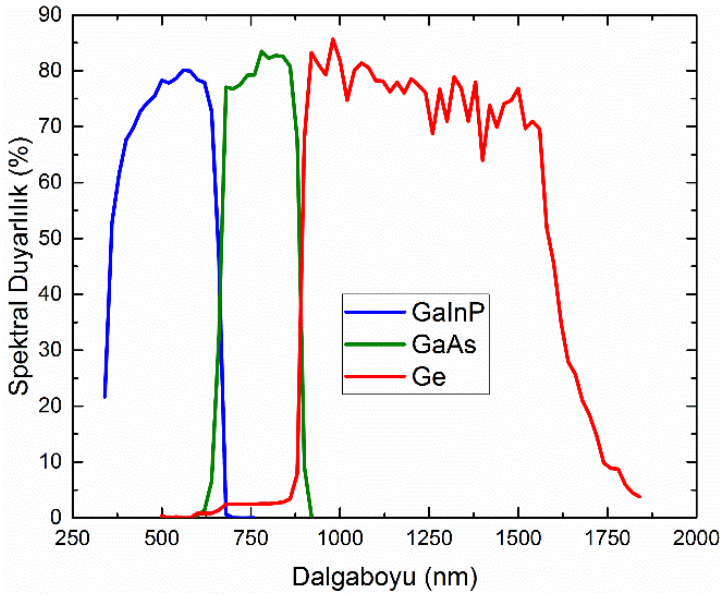
Şekil 3.15. Piranometre için Kipp&Zonen markalı veri kaydedici

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin spektral duyarlılık ve akım-voltaj ölçüm sonuçları verilmiştir. Ayrıca 2019 Eylül ve 2020 Şubat ayları arasında tarihe bağlı olarak yoğunlaştırıcı güneş panelinin verimliliğinin ve güç değerinin değişimi değerlendirilmiştir.

4.1. Güneş Hücrelerinin Spektral Duyarlılık Spektrumu

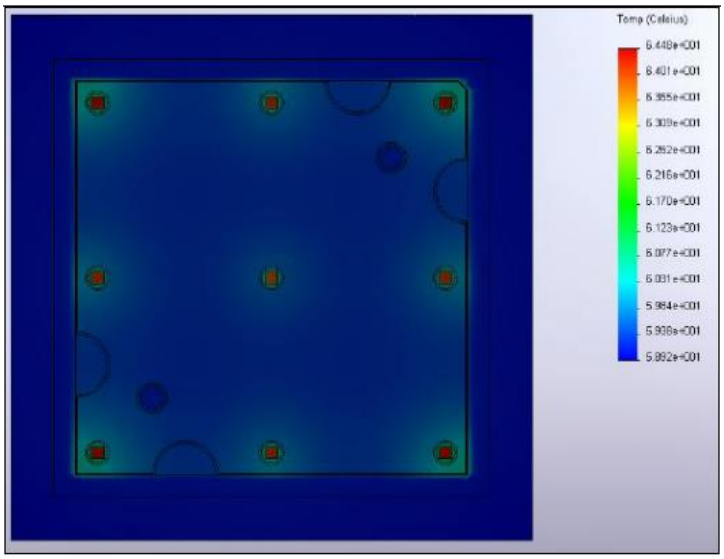
$GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin deneysel olarak ölçülmüş spektral duyarlılık spektrumu Şekil 4.1'de verilmiştir: $GaInP$ yarıiletkeninin bant aralığı yaklaşık $1.91eV$ civarındadır; bu enerjinin dalga boyu yaklaşık $649\,nm$'ye denk gelmektedir. Mavi ile çizilen spektrum $GaInP$ eklemine ait olup bant aralığı spektrumun aniden düşüş gösterdiği dalga boyudur. $GaInP$, $280-640\,nm$ aralığında ortalama % 75 verimlilik ile çalışırken, yeşil ile çizilen $GaAs$, $640-900\,nm$ aralığında ortalama % 80 verimlilikte çalışmaktadır. Güneş spektrumunun $900\,nm$'den büyük dalga boyu kısmında üçüncü eklem olan ve kırmızı ile çizilen Ge eklemi ortalama % 70 verimlilikte çalışarak güneş hücre yapısında akıma büyük katkıda bulunmaktadır.



Şekil 4.1. $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin spektral duyarlılık spektrumu

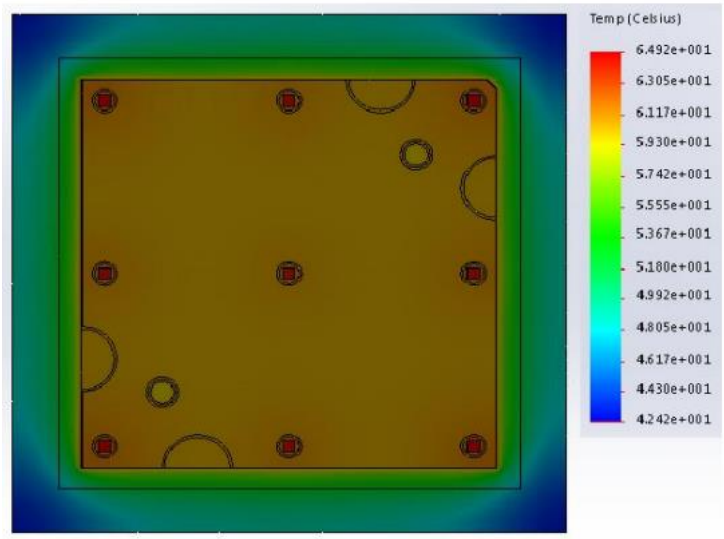
4.2. Termal Analiz Sonuçları

Termal alıcılar üzerine yerleştirilen güneş hücreleri, kendi aralarında alt ve üst iletken metal levhalar sayesinde paralel bağlanarak toplam çıkış akımın yüksek olmasını sağlamaktadırlar. Şekil 4.2'de, termal alıcının hücrede oluşan ısıyı atması sonucunda hücrelerin sıcaklığının düşük olmasını gösteren simülasyon sonucu verilmiştir. Yüksek güneş altında hücreler $64\,°C$'ye kadar ısınmaktadır; bu sıcaklık seviyesi güneş hücrelerinin çalışma sıcaklıkları göz önüne alındığında normal seviye olarak kabul edilebilmektedir.



Şekil 4.2. Alıcı üzerine dizilmiş olan 9 adet güneş hücresinin yaydığı ısının alıcı tarafından soğurulduğunu gösteren termal analiz sonucu

Şekil 4.3'te termal alıcıların, yoğunlaştırıcı güneş panelinin alüminyum dış kasasından yalıtılmış olduğu durum göz önüne alınarak, yüzey sıcaklığının termal alıcı boyunca hücreler arası değişimini göstermektedir; yalıtım katmanın olması ısı akışını engellemektedir. Alıcı levhalar yalıtım malzemesi olduğunda yaklaşık $61 - 62\,°C$ sıcaklığa sahip iken yalıtımın olmadığı ve ısı akışı sağlandığı durumda yaklaşık $59\,°C$'ye düşmektedir.



Şekil 4.3. Alıcı üzerine dizilmiş olan 9 adet güneş hücresinin yaydığı ısının, dış kasadan yalıtkan ile korunmuş olan alıcı tarafından iyi soğurulmadığını gösteren termal analiz sonucu

Yoğunlaştırıcı güneş panelinin dış kasası alüminyum olduğundan paneldeki hücrelerin yarattığı ısı, termal alıcılar aracılığıyla, dış kasa tarafından atılmaktadır.

Termal alıcılardan olan ısı transferinin, aradaki yalıtım malzemesine bağlı olduğu Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'ten açıkça görülmektedir.

Deney düzeneği oluşturularak alınan ölçümler:

- Şekil 4.4' de görüldüğü gibi Güneş simülatörü ile 1 Güneş altındaki sıcaklık değeri 38.0 ^{o}C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Güneş altındaki sıcaklık

- Şekil 4.5'den de görüldüğü gibi, 1 Güneş spektrumu altında, 4cm x 4cm mercek alanına ve 70 mm odak uzaklığına sahip Fresnel merceğin odak uzaklığındaki yoğunlaştırma sıcaklığı 342.9 ^{o}C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.5. Fresnel merceğin odak uzaklığındaki yoğunlaştırma sıcaklığı

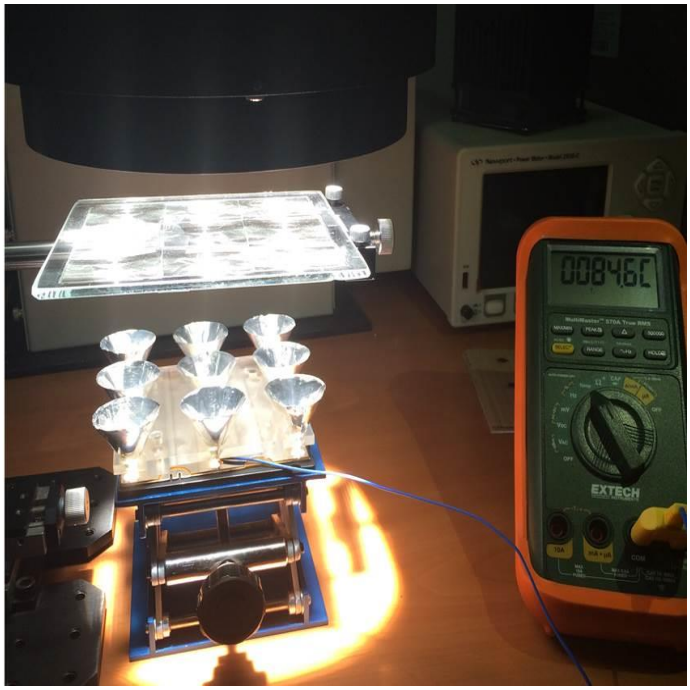
- 1 Güneş spektrumu altında, Fresnel mercek ile optik ekseni çakışık ikincil optikten oluşan düzeneğin yoğunlaştırma sıcaklığı 250.5 ^{o}C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık sensörü, ikincil optiğin konik tabanına yerleştirilmiş ve ölçüm alınmıştır. Bu ölçüm Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Fresnel mercek ile optik ekseni çakışık olan ikincil optik düzeneğin yoğunlaştırma sıcaklığı

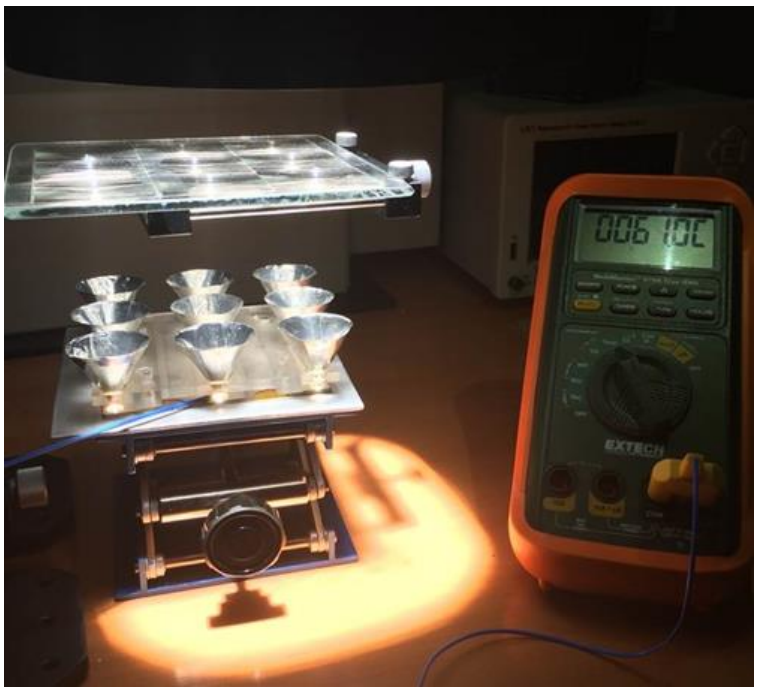
Alıcı sistemin deneysel analizlerinin gerçekleştirilmesi:

- Deney düzeneği, 4cm x 4cm mercek alanına sahip 9 adet Fresnel mercek ve optik ekseni çakışık olan 9 adet ikincil optikten oluşturulmuştur. İkincil optik spotları alıcı üzerinde bulunan hücrelerin üzerine gelecek şekilde ayarlanmıştır. Bu hücrelerin sıcaklığı Al plaka olmadan, Şekil 4.7'de de gösterildiği gibi, 84.6^{o}C olarak ölçülmüştür.



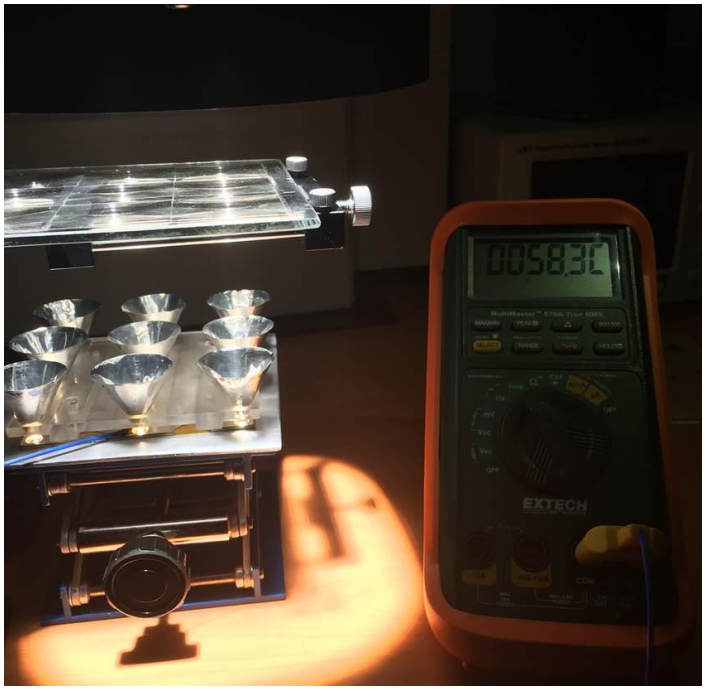
Şekil 4.7. *Al* plaka olmadığı durumda hücre yüzeyindeki sıcaklık

- Isı defi için hücre alıcısının altına *Al* plaka monte edildi. *Al* plakalı hücre alıcısı, Fresnel mercek ve ikincil optikten oluşan düzeneğin altına yerleştirildi ve *Al* plakalı hücre alıcı sisteminde hücrelerin sıcaklığı, Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi, 61^{o}C olarak elde edildi. Bu değer yarı iletken aygıt ömrü açısından yeterlidir.



Şekil 4.8. *Al* plakalı hücre yüzeyindeki sıcaklık

- Al plakalı hücre alıcı sisteminin, hücre yakınlarında üst Cu yüzeyinin sıcaklığı, Şekil 4.9'da görüldüğü gibi 58.3^{o}C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Al plakalı hücre alıcı sistemin, hücre yakınlarında üst Cu yüzeyin sıcaklığı

- Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, alıcı sistemin altındaki Cu yüzey ile Al plakanın birleştiği yüzeyin sıcaklığı 34.2 ℃ olarak ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin tamamı Çizelge 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.10. Alıcı sistemin altındaki Cu yüzey ile Al plakanın birleştiği ara-yüzeyin sıcaklığı

Çizelge 4.1. Sıcaklık değerleri

Sistem	**Sıcaklık (^{o}C)**
Oda sıcaklığı	23.0
1 Güneş altındaki sıcaklık	38.0
Fresnel mercek odak uzaklığındaki yoğunlaştırma sıcaklığı	342.9
Fresnel mercek ile optik ekseni çakışık olan ikincil optik düzeneğin yoğunlaştırma sıcaklığı	
Al plaka olmadan hücre yüzeyindeki sıcaklık	84.6
Al plakalı hücre yüzeyindeki sıcaklık	61.0
Al plakalı hücre alıcı sisteminin, hücre yakınlarında üst Cu yüzeyinde sıcaklığı	58.3
Alıcı sistemin altındaki Cu yüzey ile Al plakanın birleştiği ara-yüzeyin sıcaklığı	34.2

4.3. Yoğunlaştırıcı Modülün Akım-Voltaj Karakteristiği

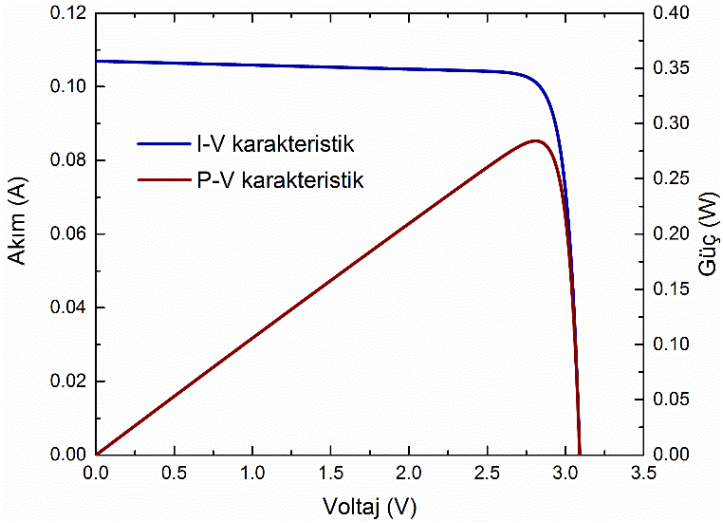
Çok eklemli güneş hücreleri seri bağlı eklemlerden oluştuğundan uçlarındaki voltaj değeri, her bir eklemin oluşturduğu voltaj değerinin toplamı kadardır. Seri bağlı devre sisteminde akım bütün devrede aynı kalmak zorunda olduğundan çok eklemli güneş hücresinin fotoakımı, akım değeri az olan eklemin akımı ile sınırlıdır. Bu nedenle çok eklemli güneş hücreleri, bütün eklemlerin üretecekleri akım değerlerinin birbirine yakın olması gerektiği göz önüne alınarak hassas bir şekilde tasarlanmalıdır.

Şekil 4.11'de bu tez çalışması kapsamında kullanılan güneş hücresinin deneysel akım-voltaj grafiği verilmiştir. Üç eklemli güneş hücresinin akım-voltaj karakteristiği incelendiğinde, açık devre voltajının yaklaşık $3.1V$ ve kısa devre akım değerinin de yaklaşık $110\,mA$ olduğu görülmektedir. Gerçekten de $GaInP$ yarıiletkenin bant aralığının yaklaşık $1.9\,eV$ ve Fermi seviyelerinin farkını bant aralığından çıkardığımızda açık devre voltajı yaklaşık $1.46\,V$, aynı şekilde $GaAs$ yarıiletkenin bant aralığının $1.424\,eV$ (açık devre voltajı yaklaşık 1.12 V) ve Ge'un da bant aralığının $0.67\,eV$ (açık devre voltajı yaklaşık 0.52 V) olduğu göz önüne alınırsa, toplam açık devre voltajı $3.1\,V$ olarak bulunur (Erol ve Balkan 2015):

$$Toplam\ Açık\ Devre\ Voltajı(GaInP + GaAs + Ge) = 1.46 + 1.12 + 0.52 = 3.1V$$

Şekil 4.11'den de görüldüğü gibi, $GaInP/GaAs/Ge$ güneş hücresinin dolum faktörünün $(= üretilen\ maksimum\ teorik\ güç/elde\ edilebilen\ maksimum\ güç)$ $\%\,85$ üzerinde olduğu aşikardır. Genel olarak III-V grubu yarıiletkenlere dayalı güneş hücreleri dolum faktörü, ideal duruma yani $\%\,100$'e en yakın olan güneş hücreleridir. Bu

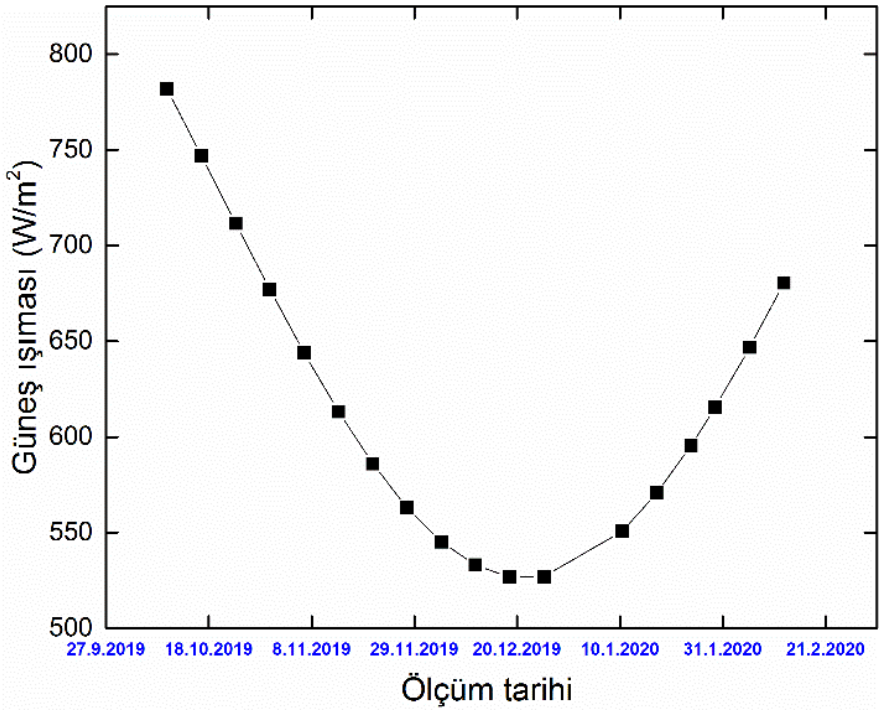
da bant aralığının direkt olması ve kristal yapısının daha kaliteli olmasının ne kadar önem arz ettiğinin göstergesidir.



Şekil 4.11. $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinin tek güneş altında akım-voltaj ve güç-voltaj grafiği

Fotonlar yarı iletken ile etkileştiğinde, soğurulma katsayılarına göre yarıiletkeni oluşturan atomların valans elektronları tarafından soğurulur ve yarıiletkendeki elektronlar serbest hale gelir. Yani fotonlar, yarı iletkende elektron-deşik çifti yaratarak Fermi seviyesinin değişmesine dolayısıyla yarı iletken uçlarında potansiyel farkı oluşmasına neden olurlar. Yarıiletkene gelen fotonların sayısındaki artış yarı iletken içerisinde yaratılan elektron-deşik çiftinin de artmasına neden olmaktadır. Elektron-deşik çiftlerinin sayısındaki artış fotoakımı doğrudan etkilese de voltaj değerini logaritmik olarak etkiler. Çünkü bant aralığı içerisinde yer alan Fermi seviyelerinin pozisyonu taşıyıcı sayısına bağlı olarak logaritmik değişmektedir (Erol ve Balkan 2015). Bu nedenle güneş hücresinin açık devre voltajı da logaritmik değişerek verimliliği etkilemektedir.

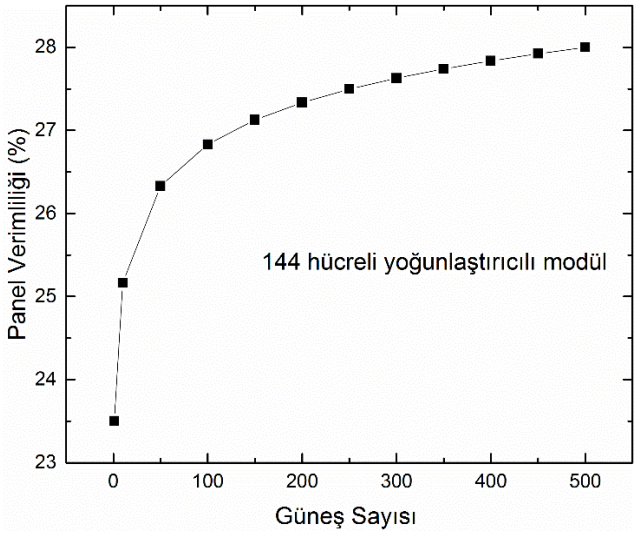
Şekil 4.12'de 10 Ekim 2019 ile 13 Şubat 2020 tarihleri arasında bulutsuz, güneşli ve temiz havalı günlerde öğlen saat 12:00'da alınan ölçümlerin tarihe göre değişimi verilmiştir.



Şekil 4.12. 10 Ekim 2019 – 13 Şubat 2020 tarihler arasında güneş ışınımın birim alana düşen gücünün değişimi

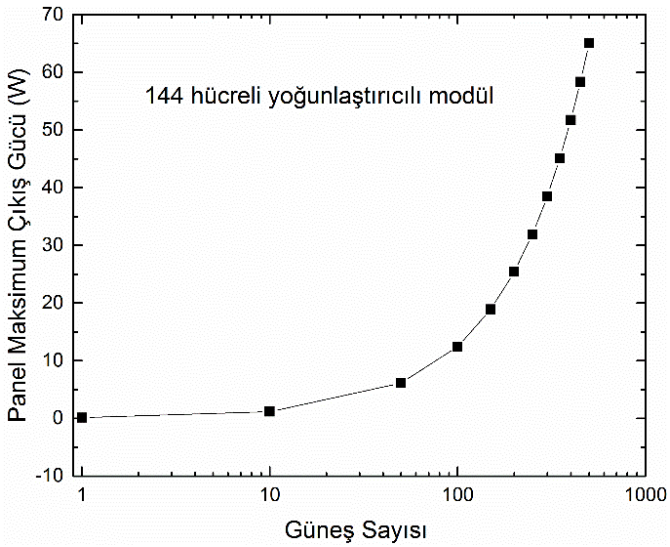
Güneş ışınım miktarı, dünyanın ekseninin 23.27º derecelik açısı nedeniyle 21 Aralık olan en uzun gecenin ertesi gündüzü yani 22 Aralık'ta en düşük değeri almaktadır. Güneş ışınlarının değerine göre yoğunlaştırıcı güneş panelinin verim değerinde pek değişim görülmese de elde edilen güç değerinde önemli değişimler görülmüştür. Çünkü güneş panelinin elektrik güç miktarı üzerine düşen ışığın gücüyle doğru orantılıdır.

Şekil 4.13'de 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresinden oluşan yoğunlaştırıcı panelin güneş sayısına göre verimlilik değişimi verilmiştir. Güneş sayısı 1'den 50'ye yükseldiğinde güneş panelinin verimliliği hızla artmış, daha yüksek güneşlerde verimlilik artışı yavaşlamış ve 500 güneşte %28 değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.13. 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi içeren yoğunlaştırıcı panelin güneş sayısına göre verimliliğinin değişimi

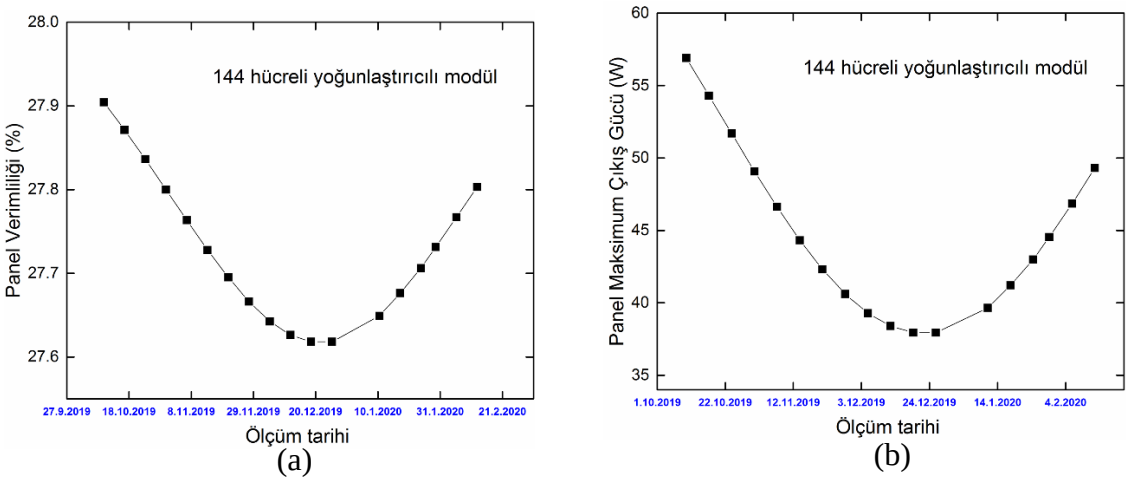
Güneş sayısına göre güneş hücresinden elde edilen maksimum güç değeri doğrusal olarak değişir. Şekil 4.14'te 144 hücreli yoğunlaştırıcı güneş panelinden elde edilen güç değerinin güneş sayısına göre değişimi verilmiştir. Grafiğin yatay ekseni güneş sayısını logaritmik artışlarla gösterdiği için güç değerindeki artış üstel değişmektedir.



Şekil 4.14. 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi içeren yoğunlaştırıcı panelin güneş sayısına göre maksimum güç değerinin değişimi

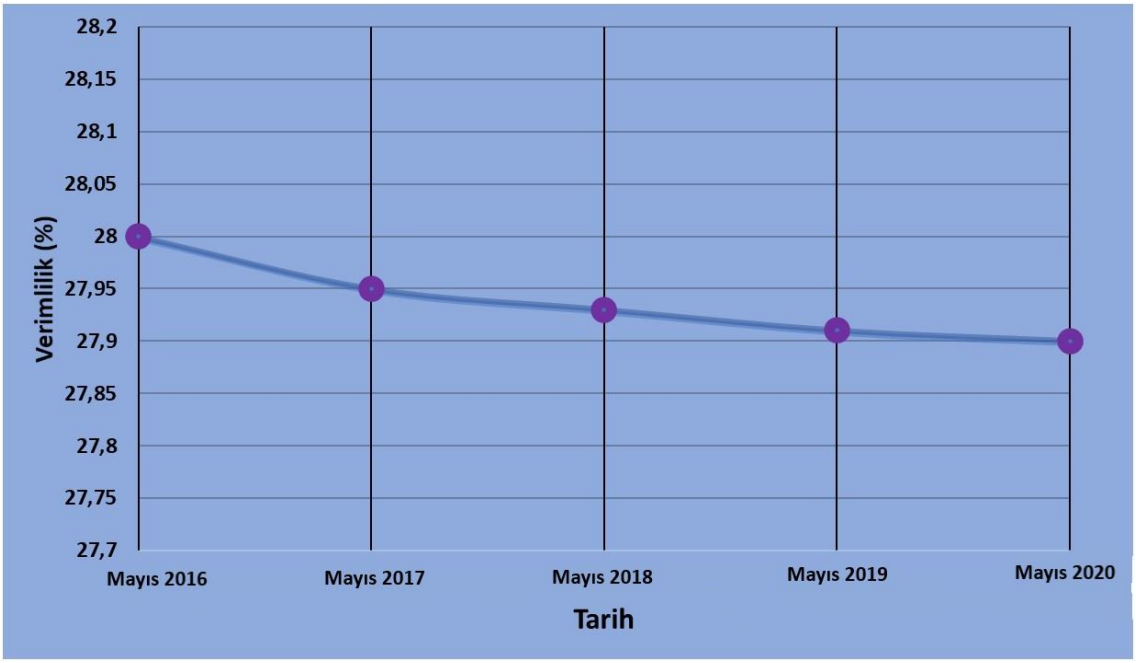
Bu çalışma kapsamında incelenen yoğunlaştırıcı güneş panelinin gerçek ortam şartlarında, normal hava koşullarında, oksitlenmeyi de analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen elektriksel ölçüm sonuçları Şekil 4.15'de verilmiştir. Şekil 4.15 (a) 'da zamana göre verimlilik ve Şekil 4.15 (b)'de de zamana göre güç değerinin değişimi verilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı tarihler arası olan sonbahar ve kış mevsimlerine bağlı olarak, güneş ışınları da değişiklikler göstermektedir. Ancak panelin sıcaklığı ortalama

standart şartları sağlayacak şekilde yaklaşık $25\,°C$ civarında tutulmuştur. Ölçümlerin yapıldığı günlerde temiz, bulutsuz ve güneşli saatler tercih edilmiş ve sonuçta güneş panelinin verimliliğinde % 27.9'dan % 27.6'ya kadar, güç değerinde ise 57 W ile 37 W arasında değişim gözlenmiştir.



Şekil 4.15. 144 adet $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücresi içeren yoğunlaştırıcı panelin 2019 Eylül ve 2020 Şubat ayları arasında ölçülmüş **a)** verimlilik; **b)** maksimum güç değerlerinin zamana göre dağılımı

Yoğunlaştırıcı güneş panelinin ilk ölçümlerinde ortalama verimlilik değeri %28 olarak ölçülmüştür. Ancak Şekil 4.16'da verilen modül verimliliğine bakıldığında Mayıs 2016 tarihinden Mayıs 2020 tarihine kadar en düşük verimliliğinin % 27.9 olarak ölçüldüğü görülmektedir. Verimlilikteki değişimin bu kadar düşük olması, termal alıcılarda oksitlenmenin yok sayılacak kadar az olduğunu göstermektedir. Burada oluşan verim düşüşü genellikle dış ortamlardan (bulutlu hava, güneş ışınlarının geliş açısı, ortam sıcaklığı gibi) kaynaklanmaktadır. Farklı kaplamalarla üretilen hücre alıcılı sistemlerde en kararlı verimliliğe sahip malzemenin, oksitlenme etkisi en az olduğundan, Au kaplama olduğu gözlendi. Bununla birlikte alıcı malzemesi olarak Cu'nun kullanıldığı alıcılardan oluşan panelde de verim kaybının ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlendi. Diğer kaplamalarda oluşan verim düşüşünün de (% 0.1) ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlenmiştir. Diğer malzemelere göre pahalı olan Au'nun kullanılması sadece panel maliyetini artıracak, verimde bir avantaj sağlamayacaktır.



Şekil 4.16. Yoğunlaştırıcı güneş panelinin zamana bağlı olarak verimliliğinin değişimi

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, $GaInP/GaAs/Ge$ üç eklemli güneş hücreleri kullanarak 4 yıl önce oluşturduğumuz CPV panelin, aynı atmosferik koşullarda güç ve verimlilik değerleri periyodik olarak ölçülmüş ve olası bir oksitlenmeye bağlı verimlilik analizleri yapılmıştır.

Termal alıcılar ilk olarak SolidWorks 3D CAD programı ile tasarlandı ve yapılan analizler sonucunda panel yapımında kullanıldı. Yoğunlaştırıcı panelde hücre üzerine odaklanmış yüksek güneş yoğunluğundaki ışık, odaklandığı noktayı çok yüksek sıcaklığa kadar ısıtmaktadır. Tasarlanan ve yapımı gerçekleştirilen yoğunlaştırıcı panelde bu ısı pasif olarak atılmaktadır ve böylece hücrelerin aşırı ısınmadan dolayı fiziksel zarar görmeleri ve sıcaklıktan dolayı verim kayıpları engellenmektedir.

AzurSpace Solar Power GMBH tarafından fabrikasyonu gerçekleştirilen güneş hücrelerinin yapı malzemeleri ve kalitesi spektral duyarlılık deneyleri ile değerlendirildikten sonra panel yapımına başlandı. Akım-voltaj deney düzeneği ile güneş hücrelerinin performansları belirlendi. Panel yapımından sonra yoğunlaştırıcı panel için kullanılan akım-voltaj deney düzeneğinde panelin performansı yoğunlaştırılan güneş sayısına bağlı olarak belirlendi.

Panel yapımında kullanılan ve AzurSpace Solar Power GMBH tarafından sağlanan 144 adet güneş hücresinin yüzeyi yansımayı önleyici ile kaplanmıştır. Kaplama malzemesi olarak, çok eklemli bu türdeki hücrelere uygunluğu bilinen TiO_x/AlO_x ince filmleri kullanılmıştır. Yansıma önleyici oksit kaplama işlemi AzurSpace tarafından sağlanmıştır. Bu oksit tabakası ışığın yüzeyden yansımasını azaltmakta ve ışığın hücre içerisine nüfuz etmesini sağlamaktadır.

Hücre alıcıları Cu levha üzerine Au, Ag ve Ni malzemeleri kaplanarak üretildi. 9 adet FV hücre içeren alıcılardan 16 adedi Al taban üzerine yerleştirildi; böylece yapımı gerçekleştirilen güneş panelinde toplam 144 hücre ve bunlara ışığı yoğunlaştıran 144 mercek vardır. Farklı zaman aralıklarında, farklı kaplamalı (Au, Ag ve Ni kaplamalı) panellerin verimlilikleri ölçülerek karşılaştırıldığında, her bir panelin 4 yıl içinde ortalama % 0.1 civarında, ihmal edilebilir değerde bir verim kaybına uğradığı saptandı. Bu nedenle alıcı levhaların kaplanmasında kullanılacak malzeme için en uygun maliyetli olan seçildi; iletkenliği daha iyi ve oksitlenmeye karşı daha dayanıklı olan Au kaplamak yerine daha az maliyetli olan Ni malzemenin kullanılması yeterli bulundu. Ancak, yoğunlaştırıcı fotovoltaik panelin en önemli elemanlarından biri olan alıcıların geliştirilmeye açık bir AR-GE ürünü olduğu aşikardır.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan ve yapımı gerçekleştirilen panelin toplam çıkış gücü $60\,W$ olarak ölçülmüştür. $50x50\ cm^2$ net yüzey alanına sahip yoğunlaştırıcı güneş panelinin birim alandaki güç değeri yaklaşık $240\,W/m^2$ olarak belirlenmiştir. Günümüzde, yeryüzü FV uygulamaları için kullanılan Si tabanlı güneş hücrelerinden en yüksek verimlisi IBC (Interdigitated Back Contact) güneş panelidir ve birim alandaki güç değeri yaklaşık $221\,W/m^2$ olarak belirlenmiştir (Sunpower 2019). Bu değerler göz önüne alındığında yoğunlaştırıcı güneş panel uygulaması araştırmaya ve ürün geliştirmesine açık olan bir alandır. Alıcı ve odaklayıcı mercek sistemlerinin farklı

geometriler ile tasarlanması ve birim alana daha fazla hücre sığdırılması ile daha fazla güç elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında incelenen panel boyutlarında ve hücre sayısında değişiklik yapmadan, sadece $\%\,28$ verimlilikte hücre yerine $\%\,45$ verimlilikteki bir hücre kullanılarak birim alan başına elde edilen güç değeri $240\ W/m^2$'den $400\ W/m^2$'ye çıkarılabilir. Günümüzde III-V grubu yarıiletkenler kullanılarak oluşturulan güneş hücrelerinde, yoğunlaştırılmış güneş altında verimlilik değeri $\%\,47$'ye ulaşmıştır (Green vd. 2020). Bu nedenle, yeryüzü FV uygulamalarında yoğunlaştırılmış güneş panelleri ayrı bir yere ve öneme sahiptir.

6. KAYNAKLAR

ALUMECO 2020. Aluminium corrosivity categories, https://www.alumeco.com/knowledge-technique/general/aluminium-corrosivity-categories [Son erişim tarihi: 10.09.2020].

Erol, A., Balkan, N. 2015. Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık, 2.Baskı, İstanbul, 347 s.

Feuermann, D., Gordon, J.M., 2001. High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes. *Sol. Energy*, 70: 423–430.

French, R.H., Rodríguez-Parada, J.M., Yang, M.K., Derryberry, R.A., Pfeiffenberger, N.T. 2011. Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 95: 2077–2086.

Geisz, J.F., Kurtz, S., Wanlass, M.W., Ward, J.S., Duda, A., Friedman, D.J., Olson, J.M., McMahon, W.E., Moriarty, T.E., Kiehl, J.T. 2007. High-efficiency GaInPGaAsInGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction. *Appl. Phys. Lett.*, 91: 1–4.

Geisz, J.F., Steiner, M.A., Jain, N., Schulte, K.L., France, R.M., McMahon, W.E., Perl, E.E., Friedman, D.J. 2018. Building a Six-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell. *IEEE J. Photovoltaics*, 8: 626–632.

Green, M.A. 2009. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 17: 183–189.

Green, M.A., Dunlop, E.D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Ho-Baillie, A.W.Y. 2020. Solar cell efficiency tables (Version 55). *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 28: 3–15.

Green, M.A., Hishikawa, Y., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Ho-Baillie, A.W.Y. 2019. Solar cell efficiency tables (Version 53). *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 27: 3–12.

Güçlü, S. 2009. Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampüs Çevre Aydınlatma Elektrik Enerjisinin Güneş Enerjisi ile Sağlanması. Yüksek Lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 72 s.

Hovel, H.J. 1975. Semiconductors and Semimetals. Volume 11: Solar Cells, Academic Press, New York, p. 254.

Hwang, S.T., Hwang, T., Lee, S., Gil, B., Park, B. 2018. Selective rear contact for Ga0.5In0.5P- and GaAs- based solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 182: 348–353.

Ioffe, I. 2010. Installation for Spectral Measurements of Multijunction solar cells (SMMJSC-Installation). St. Petersburg, http://pvlab.ioffe.ru/about/measurements.html [Son erişim tarihi: 12.09.2020].

IRENA (International Renewable Energy Agency) 2019. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2019.pdf, RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2019 [Son erişim tarihi: 10.09.2020].

Julajaturasirarath, S., Jonburom, W., Pornsuwancharoen, N. 2012. The experiment of double solar energy by reflection light method. *Procedia Eng.*, 32: 522–530.

Kasap, S.O. 2001. Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, p. 519.

Kirk, A.P. 2010. Proposal for a high voltage AlGaAs/AlGaAs/GaAs triple junction photovoltaic cell. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94: 2442–2445.

Kınacı, B. 2013. III-V Grubu Güneş Hücre Yapılarının Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 101 s.

Kitai, A. 2011. Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The role of the PN junction. John Wiley & Sons Ltd., United Kingdom, pp. 159-213.

Kurowski, P. 2019. Thermal Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2019 and Flow Simulation 2019. SDC Publications, United States of America, 295 p.

Lin, C.H. 2010. Si/Ge/Si double heterojunction solar cells. *Thin Solid Films*, 518: S255–S258.

Liu, F., Wang, W., Wang, L. and Yang, G. 2014. Ferroelectric-semiconductor photovoltaics: Non-PN junction solar cells. *Applied Physics Letters*, 104(10): 103907.

Mahala, P., Singh, S., Dhanavantri, C. 2018. Design optimization of multi quantum well solar cells. *Optik (Stuttg)*, 166: 61–68.

Mathur, R.K., Mehrotra, D.R., Mittal, S., Dhariwal, S.R. 1984. Thermal non-uniformities in concentrator solar cells. *Sol. Cells*, 11: 175–188.

Muhammetgulyyev, A., Erbas, O.G., Kinaci, B., Donmez, O., Celebi, Y.G., Erol, A. 2019a. Characterization of a GaAs/GaAsBi pin solar cell. *Semicond. Sci. Technol.*, 34: 085001.

Muhammetgulyyev, A., Kinaci, B., Aho, A., Yalcin, Y., Cetinkaya, C., Kuruoglu, F., Guina, M., Erol, A. 2019b. V-groove etched 1-eV-GaInNAs nipi solar cell. *Appl. Phys. A*, 125: 27.

Özen, Y. 2015. III-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi ve Prototip Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Modül Üretimi. Doktora tezi, Gazi Üniverstesi, Ankara, 145 s.

Schropp, R.E.I., Li, H., Franken, R.H.J., Rath, J.K., van der Werf, C.H.M., Schüttauf, J.A., Stolk, R.L. 2009. Nanostructured thin films for multibandgap silicon triple junction solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 93: 1129–1133.

Shahrjerdi, D., Bedell, S.W., Ebert, C., Bayram, C., Hekmatshoar, B., Fogel, K., Lauro, P., Gaynes, M., Gokmen, T., Ott, J.A., Sadana, D.K. 2012. High-efficiency thin-film InGaP/InGaAs/Ge tandem solar cells enabled by controlled spalling technology. *Appl. Phys. Lett.*, 100: 2012–2015.

Singh, R., Green, M.A., Rajkanan, K. 1981. Review of conductor-insulator-semiconductor (CIS) solar cells. *Sol. Cells*, 3: 95–148.

Şit, Z. 2014. AlxGa1-xN/GaN çoklu kuantum kuyularının optiksel özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 42 s.

Steiner, M., Siefer, G., Schmidt, T., Wiesenfarth, M., Dimroth, F., Bett, A.W. 2016. 43%

Sunlight to Electricity Conversion Efficiency Using CPV. *IEEE J. Photovoltaics*, 6: 1020–1024.

Sunpower 2019. SunPower A-Series 400-425 W Residential Module Datasheet, https://us.sunpower.com/sites/default/files/sp-a450-440-430-com-pv4s-gen42-ds-en-ltr-532726.pdf [Son erişim tarihi: 10.09.2020].

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2020. https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=7 [Son erişim tarihi: 10.09.2020].

ÖZGEÇMİŞ



NİHAN DEMİRTAŞ TAYLAN

nihandemirtass@gmail.com

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2015-2020	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Antalya
Ön Lisans 2014-2016	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mobilya ve Dekorasyon Bölümü, Antalya
Pedagojik Formasyon 2011-2012	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi, Fizik Öğretmenliği, Samsun
Lisans 2005-2009	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Eskişehir

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Yönetim Kurulu Temsilcisi 2016-2020	CW ENERJİ Mühendislik Ticaret ve Sanayi AŞ. Antalya
Araştırma Geliştirme Uzmanı 2014-2016	CW ENERJİ Mühendislik Ticaret ve Sanayi AŞ. Antalya
Klinik Araştırma Uzmanı 2009-2011	ALTİS Tıbbi Araştırma, Ankara