
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FARKLI YARI İLETKEN MALZEMELERLE ÜRETİLMİŞ GÜNEŞ PİLLERİNDE VERİM ANALİZİ

Murat KORUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2016

Murat KORUN tarafından hazırlanan "FARKLI YARI İLETKEN MALZEMELERLE ÜRETİLMİŞ GÜNEŞ PİLLERİNDE VERİM ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüritarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç. Dr.Tuğba Selcen NAVRUZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği AnaBilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Başkan : Prof.Dr. Etem KÖKLÜKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği AnaBilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Üye : Yrd.Doç.Dr. Fikret ARI

Elektrik-Elektronik Mühendisliği AnaBilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

TezSavunmaTarihi: ...../……/……

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat KORUN

14/07/2016

FARKLI YARI İLETKEN MALZEMELERLE ÜRETİLMİŞ GÜNEŞ PİLLERİNDE VERİM ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat KORUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2016

ÖZET

Bu çalışmada tek eklemli güneş pillerinde, hedef verimin bulunmasını sağlayan detaylı denge eşitlikleri ve fotovoltaik yapı parametrelerinin etkilerinin gözlemlenmesine olanak veren sürüklenme-difüzyon eşitlikleri ile modellenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar yedi farklı yarı iletken malzeme (GaAs, Si, Ge, InP, InGaAs, InGaP, InGaAsP) ile elde edilen güneş pilleri için tekrarlanmış ve her bir yapının maksimum verimi sağlayan kalınlık ve katkı konsantrasyonu değerleri tespit edilmiştir. Kullanılan modelin doğruluğunun ispatı için, model literatürdeki yapılara uygulanmış ve literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bilim Kodu	:	90543
Anahtar Kelimeler	:	Güneş Pili, Detaylı Denge Modeli, Drift Difüzyon Modeli, P-n eklem,
Sayfa Adedi	:	83
Danışman	:	Yrd.Doç. Dr.Tuğba Selcen NAVRUZ

EFFICIENCY ANALYSIS IN SOLAR CELLS MADE OF DIFFERENT SEMICONDUCTOR MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Murat KORUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2016

ABSTRACT

In this study, in single-junction solar cells have been modelled by means of diffusion-drift equations which allow to observe effects of detailed balance equations and photovoltaic cell parameters which ensure to find the target efficiency and the obtained results have been compared. Calculations have been repeated for solar cells made from seven different materials (GaAs, Si, Ge, InP, InGaAs, InGaP, InGaAsP) and thickness and additive concentration values that ensure maximum efficiency have been determined. For the confirmation of the model used, results that were implemented to structures in the literature and compatible results with literature have been obtained.

Science Code : 90543

Key Words : Solar cell, Detailed balanced model, drift-diffisuon model, p-n junction

Page Number : 83

Supervisor : Assist. Prof. Dr.Tuğba Selcen NAVRUZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli Hocam Yrd.Doç. Dr.Tuğba Selcen NAVRUZ'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşım Mehmet ÖLMEZ'e, beni bugünlere getiren babam Ökkaş KORUN'a, annem Sultan KORUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1.GİRİŞ 1

2.GÜNEŞİN YAPISI 3

2.1. Güneş Spektrumu 4

2.2. Fotovoltaik Teknolojinin Avantajları ve Dezavantajları 5

2.3. Dünyada ve Türkiye'de Fotovoltaik Sistemlerin Kullanımı ve Gelişmeleri 7

3. FOTOVOLTAİK PİLLER 9

3.1.Fotovoltaik Pillerinin Tarihçesi 9

3.1.1.Birinci nesil güneş pilleri 9

3.1.2.İkinci nesil güneş pilleri 10

3.1.3.Üçüncü nesil güneş pilleri 12

3.1.4.Son nesil güneş pilleri 13

3.2.Fotovoltaik Etki 15

3.3.Fotovoltaik Pil Yapısı ve Eşdeğer Devresi 16

3.4.Güneş Pilinde Verimliliğe Etki Eden Faktörler 20

4. P-N EKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN MODELLENMESİ 25

Sayfa

4.1. P-n Eklem Güneş Pillerinde Detaylı Denge Yaklaşımı 25

4.2. Sürüklenme-Difüzyon Modeli 27

4.3. Kuantum Verimi 32

4.4. Sonlu Elemanlar Metodu 33

5. VERİM SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR 37

5.1. GaAs p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 37

5.2. InP p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 44

5.3. InGaP p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 50

5.4. Silisyum p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 55

5.5. InGaAsP p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 60

5.6. Germanyum p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 65

5.7. InGaAs p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları 68

6.SONUÇ VE ÖNERİLER 75

KAYNAKLAR 77

ÖZGEÇMİŞ 83

ÇİZELGELERİNLİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Güneşle ilgili bazı büyüklükler 3

Çizelge 3.1. Farklı ışıma spektrumları için güneşten gelen ışıma miktarı 19

Çizelge 3.2. Fotovoltaik pilin kısa devre foto akımınave karanlık akımına etki eden faktörler 20

Çizelge 5.1. Si, Ge, GaAs, InP, InGaAs, InGaP, InGaAsP yarı iletkenlerine ait parametreler 37

Çizelge 5.2. GaAs güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 39

Çizelge 5.3. Literatürdeki makale yapısı …… 39

Çizelge 5.4. makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları 40

Çizelge 5.5. GaAs güneş pili maksimum verim çıkış değerleri 42

Çizelge 5.6. InP güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 45

Çizelge 5.7. Literatürdeki makale yapısı 45

Çizelge 5.8. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları 45

Çizelge 5.9. InP güneş pili maksimum verim çıkış değerleri 48

Çizelge 5.10. InGaP güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 50

Çizelge 5.11. Literatürdeki makale yapısı 51

Çizelge 5.12. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları 52

Çizelge 5.13. InGaP güneş pili maksimum verim çıkış değerleri 53

Çizelge 5.14. Si güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 56

Çizelge 5.15. Literatürdeki makale yapısı 57

Çizelge 5.16. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları 57

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.17. Si güneş pili maksimum verim çıkış değerleri 59

Çizelge 5.18. $In_{0.47}Ga_{0.53}As_{0.35}P_{0.65}$ güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 61

Çizelge 5.19. Literatürdeki makale yapısı…… 61

Çizelge 5.20. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları 62

Çizelge 5.21. InGaAsP güneş pili maksimum verim çıkış değerleri..... 64

Çizelge 5.22. Ge güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 65

Çizelge 5.23. Ge güneş pili maksimum verim çıkış değerleri 67

Çizelge 5.24. InGaAs güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi 69

Çizelge 5.25. Literatürdeki makale yapısı…….....69

Çizelge 5.26. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları 70

Çizelge 5.27. InGaAs güneş pili maksimum verim çıkış değeri……72

ŞEKİLLERİNLİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Güneş ışığının dünyaya gelişi 4

Şekil 2.2. Güneş enerjisi spektrumu 5

Şekil 2.3. 2016 yılında dünya çapındaki kurulu gücün ülkelere göre değişimi 7

Şekil 2.4. Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücü (MW – 2016 Şubat sonu)....8

Şekil 3.1. Homoeklem fotovoltaik pilin,(a) aydınlatılmadan önceki hali (b) ışık altındaki hali....16

Şekil 3.2. Tipik bir güneş pilinin yapısı 17

Şekil 3.3. Fotovoltaik pili için eşdeğer elektriksel devre....18

Şekil 3.4. Bir güneş pili için tipik J-V karakteristiği 19

Şekil 3.5. AM0 spektrumu için ideal shockley diyodunun verim-enerji bant genişliği değişimi 21

Şekil 3.6. Çeşitli yarı iletken malzemelerde, soğurma katsayısının enerji ile değişimi....22

Şekil 3.7. Si (a) ve GaAs (b) için elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi....23

Şekil 4.1. Detaylı denge verim-E_G eğrisi 25

Şekil 4.2. (a) n ve p tipi malzemenin birleşmeden önceki hali, (b) n ve p tipi malzemenin birleşerek fermi seviyelerini eşitlediği hali....28

Şekil 4.3. P-n eklem bölge yapısı....29

Şekil 4.4. Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi 34

Şekil 4.5. Bir üçgen eleman ve düğüm noktaları (nodlar) 34

Şekil 4.6. İki noktalı sonlu eleman....36

Şekil 5.1. GaAs güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi....38

Şekil 5.2. GaAs için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen J-V karakteristikleri(a) ARC varken elde edilen J-V karakteristiği, (b) ARC yokken elde edilen J-V karakteristiği ……40

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. GaAs güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi 41

Şekil 5.4. GaAs güneş pili kalınlık verim değişimi…… 41

Şekil 5.5. GaAs güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği.....42

Şekil 5.6 GaAs için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga boyu karakteristikleri, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği [49], (b)Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği……43

Şekil 5.7. GaAs güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği.....43

Şekil 5.8. InP güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi…. 44

Şekil 5.9. InP için literatürde yapılan çalışma sonucu elde edilen J-V karakteristiği...46

Şekil 5.10. InPgüneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi.....47

Şekil 5.11. InP güneş pili kalınlık verim değişimi.....47

Şekil 5.12. InP güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği 48

Şekil 5.13. InP için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga boyu karakteristikleri, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği, (b)Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği… 49

Şekil 5.14. InP güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği……..... 49

Şekil 5.15. InGaP güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi.....50

Şekil 5.16. InGaP için literatürde yapılan çalışma sonucu elde edilen J-V Karakteristiği…… …51

Şekil 5.17. InGaPgüneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi.....52

Şekil 5.18. InGaP güneş pili kalınlık verim değişimi 53

Şekil 5.19. InGaP güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği 53

Şekil 5.20. InGaP için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga boyukarakteristikleri, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği, (b) Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği….54

Şekil 5.21. InGaP güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği.....55

Şekil 5.22. Silisyum güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi.....56

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.23. Silisyum için literatürde yapılan çalışma sonucu elde edilen J-V karakteristikleri…….57

Şekil 5.24. Silisyum güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi.....58

Şekil 5.25. Silisyum güneş pili kalınlık verim değişimi.....59

Şekil 5.26. Silisyum güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği 59

Şekil 5.27. Silisyum güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği.....60

Şekil 5.28. InGaAsP güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi 61

Şekil 5.29. Literatürde yapılan çalışma sonucu elde edilen J-V karekteristikleri…….62

Şekil 5.30. InGaAsPgüneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi.....63

Şekil 5.31. InGaAsP güneş pili kalınlık verim değişimi.....63

Şekil 5.32. InGaAsP güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği 64

Şekil 5.33. InGaAsP güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği 64

Şekil 5.34. Germanyum güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi.....65

Şekil 5.35. Germanyumgüneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi 66

Şekil 5.36. Germanyum güneş pili kalınlık verim değişimi 66

Şekil 5.37. Germanyum güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği.....67

Şekil 5.38. Germanyum güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği.....68

Şekil 5.39. InGaAs güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi 69

Şekil 5.40. InGaAs için literatür çalışma sonucu elde edilen J-V Karakteristiği 70

Şekil 5.41. InGaAs güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi.....71

Şekil 5.42. InGaAs güneş pili kalınlık verim değişimi.....71

Şekil 5.43. InGaAs güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği 72

Şekil 5.44. InGaAs için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga Boyu karakteristikleri,a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği b) Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği…… 73

Şekil 5.45. InGaAs güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği 73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
K	Kelvin
$\boldsymbol{m}$	Hava kütlesi
$\boldsymbol{E_G}$	Yasak Bant aralığı (eV)
$\boldsymbol{E_F}$	Fermi enerji seviyesi
$\boldsymbol{\Delta n}$	Fazlalık elektron yoğunluğu (cm^{-3})
$\boldsymbol{\Delta p}$	Fazlalık boşluk yoğunluğu (cm^{-3})
$\boldsymbol{L_{e/h}}$	Elektron ve boşlukların difüzyon mesafesi (cm)
$\boldsymbol{D_{e/h}}$	Elektron ve boşlukların difüzyon katsayıları (m^2/sn)
$\boldsymbol{\tau_{e/h}}$	Elektron ve boşlukların ömür süreleri
$\boldsymbol{\mu_{e/h}}$	Elektron ve boşlukların mobiliteleri
$\boldsymbol{P_i}$	Güneş pili yüzeyine gelen güç yoğunluğu
$\boldsymbol{P_m}$	Maksimum çalışma güç yoğunluğu
$\boldsymbol{V_{oc}}$	Açık devre gerilimi (volt)
$\boldsymbol{J_{sc}}$	Kısa devre foto akım yoğunluğu (mA/cm^2)
$\boldsymbol{J_o}$	Diyot kaçak akım yoğunluğu (mA/cm^2)
$\boldsymbol{J_e}$	Elektron akım yoğunluğu (mA/cm^2)
$\boldsymbol{J_h}$	Boşluk akım yoğunluğu (mA/cm^2)
$\boldsymbol{R_s}$	Parazitik seri direnç (ohm)
$\boldsymbol{R_{sh}}$	Şönt direnç (ohm)
$\boldsymbol{R_L}$	Yük direnci (ohm)
$\boldsymbol{\eta}$	Verim(%)
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Enerji (eV)
$\boldsymbol{\lambda}$	Dalgaboyu (nm)
$\boldsymbol{p}$	Boşluk yoğunluğu (cm^{-3})
$\boldsymbol{P}$	Güç yoğunluğu (W/m^2)
$\boldsymbol{T}$	Sıcaklık (K)
$\boldsymbol{c}$	Işık hızı (km/s)

Simgeler	**Açıklamalar**
h	Planck sabiti (m^2 kg / s)
X	Işık konsantrasyonu
e	Elektron yükü (1,6x10-19 C)
wb	Pil kalınlığı (μm)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AM0	Atmosferin dışındaki güneş ışıma spektrumu
AM1	Deniz seviyesine dik gelen güneş ışıma spektrumu
AM1,5	Dikeyle 48º açı yaparak gelen ışıma güneş spektrumu
AM2	60º açıyla gelen ışıma güneş spektrumu
C	Karbon
Ca	Kalsiyum
CB	İletkenlik bandı
Cr	Krom
Cz	Czochralski
DBM	Detaylı denge modeli
DDM	Sürüklenme-difüzyon modeli
EQE	Harici kuantum verimi
Fe	Demir
FZ	Floating zone
GW	10^9 Watt
He	Helyum
Ne	Neon
Ni	Nikel
Mg	Magnezyum
MW	10^6 Watt
O	Oksijen
S	Kükürt
Si	Silisyum
VB	Valans bandı

1.GİRİŞ

Fotovoltaik piller, üzerine düşen güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren ve bu süreçte Silisyum, Galyum Arsenit, Germanyum ve benzeri yarı iletkenlerin kullanıldığı düzeneklerdir. Fotovoltaik pillerde akımı, kullanılan yarı iletken malzemenin bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip fotonların oluşturduğu elektron boşluk çiftlerinin hareketi sağlamaktadır. Bu yapıda akımı ve verimi sınırlayan en büyük etkenlerden biri güneş spektrumunun yeteri kadar verimli soğurulamamasıdır. Kullanılan yarı iletkenin bant aralığından daha düşük enerjiye sahip fotonlar soğurulamazken, bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip fotonların enerji fazlalığı termalizasyonla yok olmaktadır. Son yıllarda güneş spektrumunu daha verimli kullanmak üzere çeşitli çalışmalar yapılarak yüksek verimli güneş pili modelleri üretilmiştir. Son nesil fotovoltaik pilleri olarak adlandırılan bu piller, tandem piller, aşağı ve yukarı enerji dönüşümü pilleri, çoklu soğurma piller, termofotovoltaik pilleri ve ara bant yapılı güneş pilleri (ABGP) olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, pratik uygulamalarda en çok yer alan yedi yarı iletken malzeme (Ge, Si, GaAs, InP, InGaAs, InGaP, InGaAsP) kullanılarak elde edilen p-n eklem güneş pilleri; AM1,5 spektrumu altında maksimum verimi sağlayacak şekilde iki farklı yaklaşımla optimize edilmiştir. Çalışmada kullanılan detaylı denge ve sürüklenme-difüzyon yaklaşımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Literatürdeki tek eklemli güneş pili çalışmaları ile karşılaştırmalar yapılarak yapılan çalışmanın literatüre katkısı da incelenmiştir.

Bölüm 3'te ise fotovoltaik etki açıklanarak fotovoltaik pil üzerine yapılan çalışmaların tarihçesi sunulmuş, bir fotovoltaik pilin yapısı, çalışma prensipleri, verime etki eden faktörler açıklanmıştır.

Bölüm 4'te detaylı denge ve drift-difüzyon modellerinin p-n eklemli güneş pili yapısına uygulanışı anlatılmıştır. Pilin çıkış parametreleri olan verim, kısa devre akımı, açık devre voltajı, fill faktör ve harici kuantum verimliliği için gerekli eşitlikler verilmiştir. Son olarak sürüklenme-difüzyon yaklaşımı ile elde edilen diferansiyel denklemlerin çözümü için sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Bölüm 5'te ise Ge, Si, GaAs, InGaAs, InGaAsP, InGaP, InP yarı iletken malzemeleri ile elde edilen güneş pillerinin her bir yarı iletken malzemeye ait gerçek yansıma katsayıları kullanılarak, detaylı denge modeli ile elde edilen verim sonuçları, AM1,5 güneş spektrumu altında sürüklenme-difüzyon modeli ile elde edilen verim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Verim sonuçlarının kalınlık ve katkı kontrasyonlarına bağlı değişimleri incelenerek hangi kontrasyonda ve kalınlıkta verimin yüksek olduğu her bir yarı iletken için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Her bir yarı iletken için maksimum verimi sağlayan kalınlık ve katkı kontrasyonu değerleri kullanılarak (EQE) kuantum verim değişimleri de hesaplanmıştır. Son olarak, yapılan çalışmalardaki sonuçlar incelenmiş ve ileride yapılacak çalışmalara ait öneriler sunulmuştur.

2. GÜNEŞİN YAPISI

Güneş, samanyolu gökadasında bilinen 200 milyar yıldızdan biridir. Güneş, plazma halinde olduğu için kendi eksini etrafında dönerken kademeli olarakkutuplardan ekvatora doğru gidildikçe güneşin dönme hızı artar. Güneş bu dönüşü ile yuvarlak bir biçim kazanmıştır. Güneşe ait bazı büyüklük parametreleri Çizelge2.1'de verilmiştir. Güneşin kendi ekseni etrafında dönme hızı saatte 70 000 km, kendi ekseni etrafında dönme turunu tamamlama süresi ekvatorda 25 gün, kutuplarda ise 35 gündür. Güneşin yüzey sıcaklığı 5500^0C'dir. Güneş ışınları yaklaşık 8,44 dakikada yeryüzüne ulaşır.Bu durumda Güneş Dünya'dan 8 dakika ileridedir. Ayrıca çekim kuvveti dünyanın yer çekimi kuvvetinden 28 daha kat büyüktür. Güneşin yüzeyine ait kütlenin %74'ünü ve hacminin %92'sini hidrojen geri kalan kısımları ise He, Fe, Ni, O, Si, S, Mg, C, Ne, Ca ve Cr gibi elementler oluşturur [1,2].

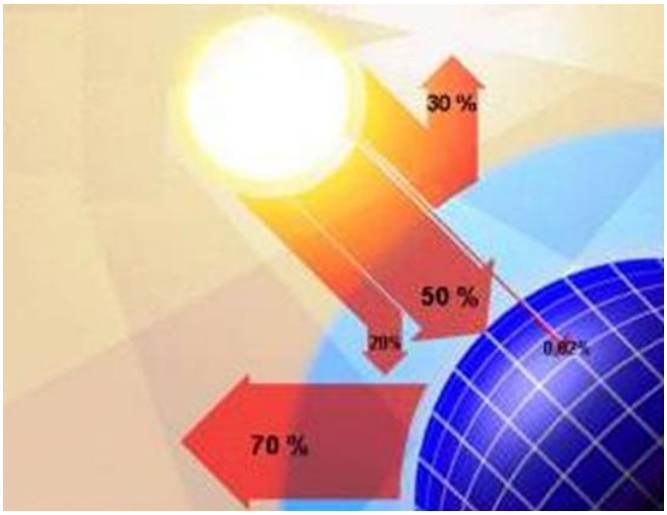
Çizelge 2.1. Güneşle ilgili bazı büyüklükler [4]

Çap	1 391 980 km (109 Dünya Çapı)
Kütle	1989 100x10^{24} kg (333 000 Dünya)
Hacim	1 412 000x10^{12} km^3 (1 304 000 Dünya)
Dünya'dan uzaklık	Minimum 147 100 000 km Ortalama 149 600 000 km Maksimum 152 100 000 km
Merkez Basıncı	2,477x10^{11} bar
Merkez Sıcaklığı	1,571x10^7 K
Merkez Yoğunluğu	1,622x10^6 kg/m^3
Merkez Bileşimi	%35 H, %63 He, %2 C, N, O…
Yaşı	4,57x10^9 yıl

Güneşte bulunan hidrojen gazının füzyon sürecinde helyuma dönüşmesi ile meydana gelen ışıma güneş enerjisidir. Güneş termonükleer santral gibi çeşitli dalga boylarında (62 MW/m^2) enerji oluşturmakta ve güneşin yüzeyinden yayılan enerjinin sadece iki milyarda biri yeryüzüne ulaşmaktadır [4]. Çizelge2.1'de görüldüğü üzere güneşin merkez sıcaklığı 1,571x10^7 K, yaşı ise 4,57x10^9 yıldır. 150 milyon km yol kat ederek dünyaya gelen güneş ışınlarının sağladığı enerji Dünya'da bir yılda kullanılan enerjinin yaklaşık 20000 katıdır. Güneş tahmini olarak 5 milyar yıl sonra sönecektir [3,5].

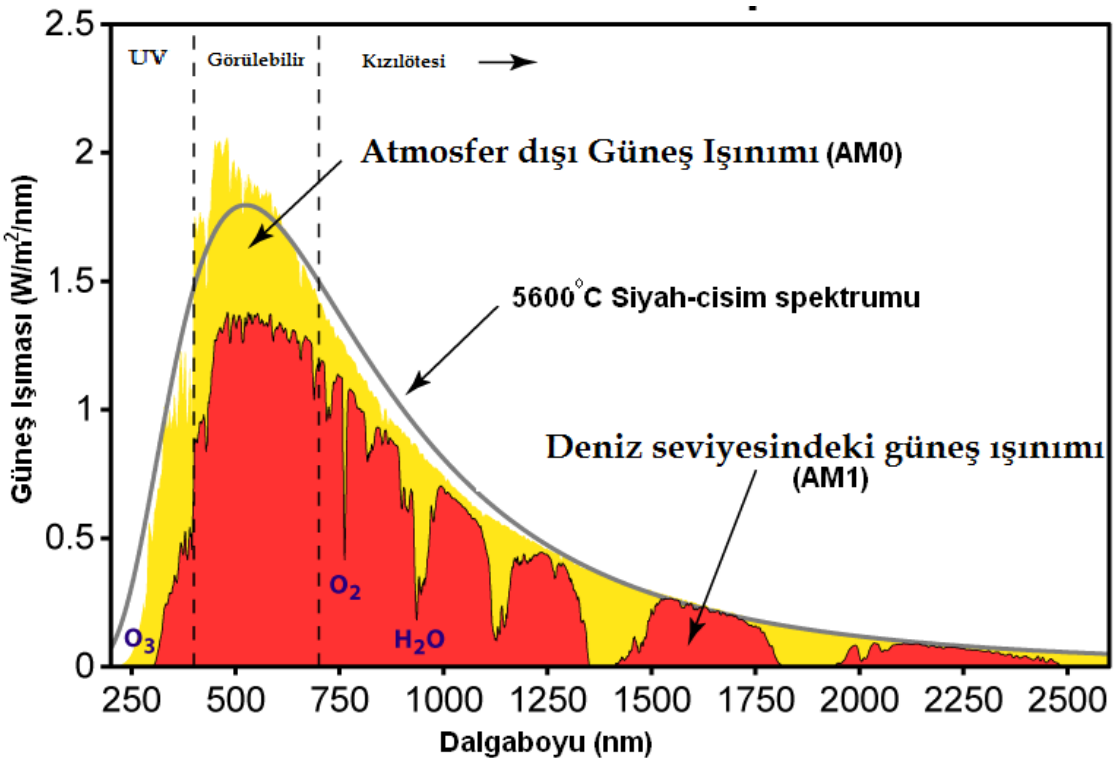
2.1. Güneş Spektrumu

Güneş ışınımının tamamı yer yüzeyine ulaşmaz, Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi dünyanın dış yüzeyine gelen güneş ışığının %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geri yansıtılırken %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Güneşten gelen enerjinin %20'si ise atmosfer ve bulutlarda tutulur. Bu sayede Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün hale gelir. Ayrıca rüzgâr hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ısınma neden olur. Yer yüzeyine gelen güneş ışınımının %1'inden azı ise bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Bitkiler fotosentez sırasında güneş ışığı, karbondioksit ve su kullanarak,oksijen ve şeker üretip yeryüzündeki bitkisel yaşamın kaynağını oluşturur [6].



Şekil 2.1. Güneş ışığının dünyaya gelişi [6]

Güneşten yeryüzüne ulaşan enerji miktarını ifade edebilmek için iki önemli parametre kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi hava kütlesi (air-mass) olarak tanımlanan *m*'dir. Hava kütlesi $m=1/z$ olarak ifade edilir. Burada $z=\cos(\alpha)$ ve α, güneşten gelen ışığın dikeyle yaptığı açıdır. AM0 atmosferin dışındaki durumu, AM1 açık bir günde deniz seviyesine dik gelmeyi, AM1,5 ise ışığın dikeyle 48° açı yaparak gelme durumunu ifade etmektedir. AM1,5 spektrumunda birim yüzeye gelen toplam güçyeryüz uygulamalarında, yaklaşık 100 mW/m^2 dir. Bu değer, güneş pillerinin verimliliğin ölçülmesinde standart test koşulu olarak kullanılmaktadır. Güneş spektrumundaki ikinci önemli parametre ise su buharı miktarı *w*'dur. *w*, dikeyde cm'deki su miktarı olarak tanımlanabilir [3-4,7].



Şekil 2.2. Güneş enerjisi spektrumu [6]

Şekil 2.2.'de 5600 ^{0}C'deki siyah cisim ışıma spektrumu ile atmosfer dışında ve deniz seviyesinde güneş ışınım spektral dağılımları verilmiştir. Güneş enerji spektrumu siyah cisim ışıma spektrumuna çok benzemektedir. Şekil 2.2.'deki AM0, atmosferin dış yüzeyinde ölçülen Güneş enerji spektrumunu göstermektedir. Dünya ekseninin eğimine ve atmosferik şartlara bağlı olarak atmosfere ulaşan ışımanın bir kısmı soğurulmakta ve bir kısmı da yansımaktadır. Şekil 2.2.'de AM1 eğrisinde bu kısımlar görülmektedir. Kızıl ötesi bölgede su ve karbondioksit gibi çoklu atomlardan meydana gelen bir soğrulma söz konusudur. Bu ışığın %75'i güneşten direkt olarak gelirken geri kalanı havadaki moleküllerden, nemden, bulutlardan ve kirlilikten saçılan kısımdır [3,7].

2.2. Fotovoltaik Teknolojinin Avantajları ve Dezavantajları

Güneş enerji teknolojisi, güneş ışığından enerji elde edilmesine dayalı bir teknolojidir. Güneş'in yaydığı ve Dünya'mıza da ulaşan enerji, Güneş'in çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışınların enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında Güneş ışınlarının sağladığı optik güç, aşağı yukarı sabit ve 1370W/m^2 değerindedir; ancak yeryüzünde bu güç 0-1100W/m^2 değerleri arasında farklılık gösterir. Bu enerjinin Dünya'ya gelen küçük

bir bölümü insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Yeryüzüne her yıl düşen güneş ışınım enerji miktarı yeryüzünde bulunan şimdiye kadarki toplam fosil yakıtların yaklaşık 160 katı kadardır [8]. Aynı zamanda dünyaya ulaşan güneş enerjisinde ısınma olarak da yararlanılmaktadır. Bu çalışmada güneş enerjisinin elektriğe dönüştürüldüğü fotovoltaik teknolojinin uygulamaları araştırılmıştır.

Güneş enerjisinden elektrik üretme konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerde çıkan petrol krizinden sonra hız kazanmıştır. Ayrıca fotovoltik sistemlerinde yapılan çalışmalar ve teknolojik ilerlemeler sonucunda maliyet bakımından düşüş göstermiş ve güneş enerjisi çevresel bakımdan temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir [8].

Güneş'ten elektrik enerji elde edilmesinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Temiz, yenilenebilir ve sürekli bir enerji kaynağıdır.
- Güneş enerjisi ile çalışan sistemler kolaylıkla taşınıp kurulabilir.
- Atıkları olmayan, çevre dostu, gerektiğinde enerji ihtiyacına bağlıolarak kolayca değiştirilebilen sistemlerdir.
- Güneş enerjisi sistemlerinde yakıt sorunu yoktur, işletmesi kolaydır, mekanikyıpranma çok azdır ve bu sistemler uzun ömürlüdür.
- Elektrik şebeke hattı bulunmayan ya da şebeke hattının götürülmesinin pahalıolduğu kırsal yörelerde güneş pillerinin kullanımı daha ekonomik olabilmektedir.
- Her ev kendi enerjisini çatısına kurduğu güneş pilleri ile karşılayabilir. Böylece iletim ve enerjiyi taşıma maliyetleri ve kayıpları ortadan kalkar.

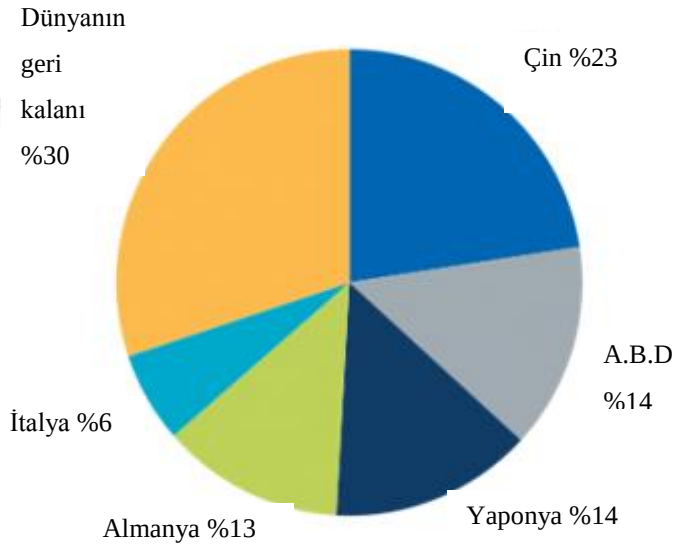
Fotovoltaik sistemlerinin karşılaştığı problemler ise aşağıdaki gibidir;

- Enerji kazanımları kış aylarında düşük seviyede, gece ise hiç yoktur.
- Güneş ışınımından sürekli olarak yararlanabilmek içinsistemin çevresi açık olmalı ve gölge oluşmamalıdır.
- Kesintili bir kaynak olan güneş enerjisinin depolanma imkânları sınırlıdır.
- Güneş ışınlarının dik geldiği en verimli zamanlarda ısı yoğunluğu fazla olduğu için enerji üretimi az olur [10].
- Son yıllarda maliyetteki azalmaya rağmen fosil yakıtlara kıyasla hala pahalıdır.

2.3. Dünyada ve Türkiye'de Fotovoltaik Sistemlerin Kullanımı ve Gelişmeleri

Dünyada güneş enerjine olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Avrupa Güneş Pili (Fotovoltaik) Sanayi Birliği (EPIA) tarafından hazırlanan verilere göre 2015 yılında dünyada güneş pili sayısında büyük oranda artış olmuş ve güneş enerjisinin kurulu gücü 230 GW'a ulaşmıştır [11].

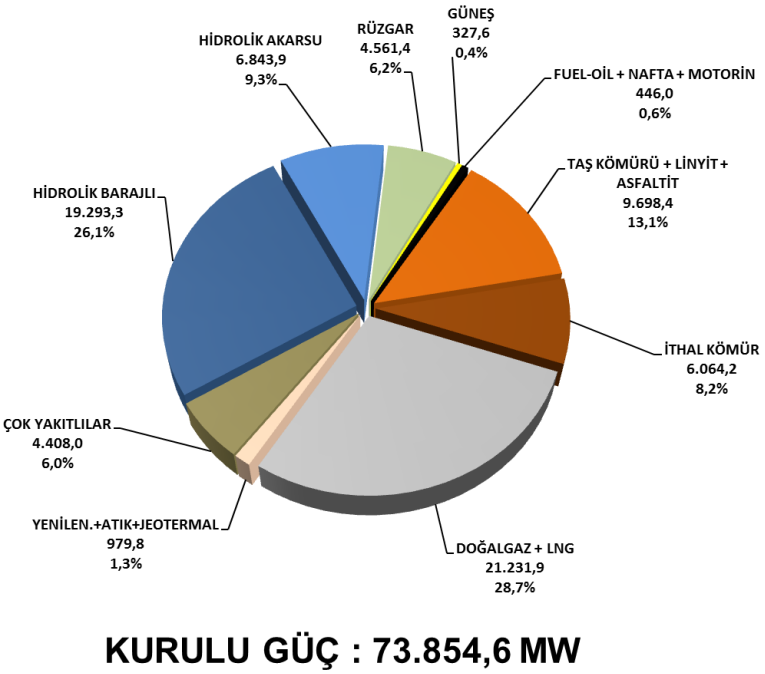
Uzak doğu ülkelerinden Çin ve Japonya, Avrupa'dan İngiltere, Almanya, İtalya ve Fransa ile Amerika Kıtasından da ABD fotovoltaik piyasasının en güçlü ülkeleri durumdadır. Dünyadaki kurulu güçün ülkelere göre dağılımı Şekil 2.3.te sunulmuştur [12].Güneş pili piyasasının %23'üne sahip bulunan Çin, güneş enerjisi kullanımında ilk sırada yer alırken, Çin'i %14 ile Japonya ve ABD takip etmektedir. Dünyadaki kurulu gücün %13'üne sahip Almanya, Avrupa da ilk sıradadır; İtalya ise %6 ikinci sırada yer almaktadır [12].



Şekil 2.3. 2016 yılında Dünya çapındaki kurulu fotovoltaik gücün ülkelere göre dağılımı [12]

Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin kurulu güç dağılımı Şekil2.4.'te görülmektedir [13]. Türkiye'de kurulu toplam elektrik enerjisi gücü 2016 Şubat sonu itibari ile 73856 MW civarındadır. Yenilenebilir enerji ise (Rüzgâr ve Güneş) yaklaşık 5000 MW ile bu da toplam enerjinin %6,6'sını oluşturmaktadır. Yaklaşık 326 MW'lık fotovoltaik güç ise toplam kurulu güçün sadece %0.4 karşılık gelmektedir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile fotovoltaik pillerin ve pil yapımında kullanılan malzemelerin fiyatları azalmaktadır. İlerleyen zamanlarda güneş pilinin daha yaygın olarak kullanılacağı görülmektedir.PV sektörü değer zincirinde birinci sınıf üretim tesislerinde 2015 yılında ise hücre olarak üretilen güneş hücresi fiyatı 0,16$ civarındadır. Bu ivme ile güneş pilinin maliyetinin düşeceği ve kullanım oranının da artacağı tahmin edilmektedir [14].



Şekil 2.4. Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücü (MW – 2016 Şubat sonu) [13]

3. FOTOVOLTAİK PİLLER

Bu bölümde fotovoltaik pillerin tarihçeşi, fotovoltaik etki ve fotovoltaik pil yapıları hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Fotovoltaik Pillerinin Tarihçesi

İlk güneş pili Schottky, Lange ve Grondahl tarafından, bakır oksit (CuO_2) ve selenyumdan (Se) yapılmıştır. İlk silisyum (Si) güneş pili 1954 yılında RCA ve Bell Telephone Laboratuarları'nda %6 verim ile üretilmiştir [15-16]. 1958 yıllarında p-n eklem Si güneş pillerinde %15 oranında verime ulaşılmıştır. Bu piller 1958 yılında yapay uydulara elektrik enerjisi üretmek için kullanılmıştır. 1973 yılında çıkan petrol krizi ile güneş pillerinin önemi artmış ve güneş enerjisi üzerine yapılan çalışmalar tekrar hız kazanmaya başlamıştır. 1970'li yılların sonunda yeryüzündeki fotovoltaik pil kullanımı uzaydaki kullanımını geçmiştir. Dünyadaki ilk güneş pili santrali 1982 yılında Alarko Solar Inc. tarafından ABD'nin Kaliforniya Eyaleti'nde kurulmuş olan 1 MW gücündeki santraldir [15-16]. Bu santral ulusal elektrik şebekesine bağlanmıştır. Elektrik fiyatlarında düşme sağlandığı görülmüştür. 1980' li yılların başında güneş pilleri için yeni üretim yöntemleri geliştirilerek küçük çapta üretilmeye başlanmış ve çok hızlı gelişme kaydedilmiştir [16-17].

Güneş pillerinin kullanım alanlarının yaygınlaştırılabilmesi için tüm dünyada çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardaki amaç güneş pili üretim maliyetlerinin düşürülerek verimlerinin artırılmasıdır. Bu amaçla çalışma ilkeleri aynı olmak üzere çeşitli yarı iletken malzemeler ve yöntemler kullanarak güneş pilleri üretilmektedir. Güneş pilleri; birinci, ikinci, üçüncü ve son nesil güneş pilleri olarak sınıflandırılabilir.

3.1.1. Birinci nesil güneş pilleri

Birinci nesil güneş pilleri, tek ya da poly kristal silisyum (Si) yonga tabanlıdır ve tek eklemli p-n eklem diyottan oluşmaktadır. Bu piller kararlıdır ve yüksek verimlilik sağlamaktadırlar. Ancak üretim maliyetleri fazladır [8,18].

i) Mono kristal Si güneş pilleri: Bell laboratuvarlarında Chapin tarafından 1954 yılında geliştirilen ilk Si güneş pili mono kristal yonga tabanlıdır. AM1,5 spektrumu altında %6 olan pil verimliliği yapılan çalışmalarla kısa sürede %10'a çıkarılmıştır [8]. Silisyumun yapısal özelliklerinin uzun süre değişmemesi, silisyum üretim teknolojisindeki başarılar ve bu malzemenin üretiminin kolay ve ucuz olması, bu malzemenin en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır. Hücre bazında verim %24'e, modül bazında verim ise %15'e ulaşmıştır [19]. Mono kristal silisyum malzemeler yüksek verim için kullanılmış olmasına rağmen yüksek maliyetten dolayı polikristal malzemenin geniş ölçekte kullanılmasına neden olmuştur [8]. Dünya'daki fotovoltaik panellerin neredeyse %90'ı bugün kristal silisyumdur [20].

ii) Polikristal Si güneş pilleri: Güneş pillerinde üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla tek kristal büyütmek yerine geniş dikdörtgen kalıplara yüksek saflıkta ergitilmiş silisyum döküp, katılaşma sürecini kontrol etmek yoluyla polikristal silisyum hücreleri üretilmeye başlanmıştır. Polikristal silisyum güneş pilinin üretilmesinde kullanılan en yaygın yöntem 1970'li yıllarda geliştirilen "dökme" yöntemidir [8,21]. Dökme silisyum yöntemiyle elde edilen polikristal silisyum güneş pilleri ilk defa 1975 yılında SOLAREX firması tarafından AM1 güneş spektrumu altında %10 verimle üretilmiştir [8,22]. Dökme silisyum sadece güneş pillerinin üretilmesinde kullanılmaktadır [8]. Dökme silisyum kullanılma nedenlerinden biri kare şeklinde dilimlere ayrılabilmesi ve güneş pili modül alanının tamamına yakınını kaplamasıdır. Böylece güneş pillerininmodül bazlı veriminde iyileşme görülmektedir. Laboratuvar şartlarında elde edilen hücre bazında verim yaklaşık %20,4'tür [8,23].

3.1.2. İkinci nesil güneş pilleri

İkinci nesil güneş pilleri daha çok ince film teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. Bu pillerin verimi birinci nesil pillerine göre daha düşüktür ancak üretim maliyetini ve kullanılan malzeme miktarını birinci nesil güneş pillerine göre azaltmaktadır. Uzayda kullanılan ikinci nesil güneş pilleri GaAs ve bileşiklerinden elde edilmektedir.

i) İnce film Si güneş pilleri:Bu teknikte, absorban özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak düşük kalitedeki bir alttaş üzerine çok ince bir Si tabakası (50μm) geliştirilmiştir. Güneş pillerinde daha ince yonga üretme fikrini ilk olarak Wolf ve

Lofersky ortaya atmışlardır [18-19,24]. İnce film güneş pillerinde film kalınlığı azaldıkça, saturasyon akımının azaldığı ve açık devre voltajının artığı belirlenmiş, ayrıca bu avantajın geçerli olabilmesi için yüzey rekombinasyon hızının düşük olması ve iyi bir optik tutuculuk sağlanması gerektiği sonucuna varılmıştır [19]. Modül bazında verim %7-9 arasında olmaktadır [25-26].

ii) Amorf Si (a-Si) güneş pilleri: Bu yapı üzerine yapılan çalışmaların sunulduğu ilk yayınlar 1960'ların sonlarında ortaya çıkmıştır [18,27-28]. 1981 yılında ilk ürünler piyasadaki yerini almıştır. a-Si tarihçesi yanlış yapılan ve ölçülen deney verileri ile doludur [18]. Günümüzde a-Si ticari uygulamalardaki konumunu sabitlemiştir ve çalışmalar devam etmektedir [18]. Hücre bazında elde edilen verim %10 civarında ikenmodül bazında verim %5-7 arasında olmaktadır [25].

iii) Bakır indiyum diselenid (CuInSe), kadmiyum tellur (CdTe) ve bileşenleri: $CuInSe_2$ ve CdTe güneş pilleri ince film teknolojisi ile üretilen pillerdir. $CuInSe_2$ ince film güneş pillerinin içerisine Ga elementi katılarak daha yüksek verimler elde edilmektedir [8]. Ancak yarı iletkenin içerisine katılan element sayısı artıkça gereken teknoloji daha karmaşık hale gelmekte ve malzemenin özelliklerinin denetimi de daha zor olmaktadır. Poli kristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin düşürülebilineceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir [25]. $CuInSe_2$ güneş pili çok kristal yapıda laboratuvar şartlarında %17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise %10,2 verim elde edilmiştir [25].CdTe için üretim esnasında açığa çıkan zehirli atıklar sebebiyle temiz enerji kaynağı kabul edilinemeyeceği yönünde eleştiriler vardır.

iv) Uzay uygulamaları: 1970'de Zhores Alferov ve arkadaşları tarafından ilk yüksek verimli güneş pili olan GaAs p-n eklem pili üretilmiştir [18,29]. 1988'de ASEC (Applied Solar Energy Corporation) tarafından, AM0 altında %17 verim sağlayan tek eklemli GaAs güneş pili geliştirilmiştir [30]. Daha sonra 1989'da GaAs buffer üzerine Ge katkılanması ile daha yüksek çıkış voltajı sağlanmıştır ve böylece iki eklemli yeni bir güneş pili ortaya çıkmıştır [31]. 1993'de ASEC tarafından verimi %20 civarında olan ve uzay uygulamalarında kullanılacak GaAs güneş pili üretilmiştir [18,32]. Günümüzde yapılan çalışmalarda GaAs güneş pili için laboratuvar şartlarında hücre bazında elde edilen verim

%25-28 (optik yoğunlaştırıcılı) ve çok eklemli yapıda elde edilen verim %30 civarındadır [25].

3.1.3. Üçüncü nesil güneş pilleri

Birinci ve ikinci nesil güneş pillerinin aksine üçüncü nesil güneş pillerinde p-n eklem yapısı yoktur. Üçüncü nesil güneş pillerinin avantajı daha ucuz malzemeler kullanılması veya fabrika aşamasının basitleştirilmesi ile üretim maliyetinin azaltılmasıdır [18]. Ancak verim değerleri p-n eklem güneş pillerine kıyasla daha düşüktür ve verimin artırılması çalışmaları sürmektedir. Organik ve boya sentezli güneş pilleri üçüncü nesil güneş pillerindendir [18].

i) Organik güneş pilleri: Organik malzemelerin kimyasal yapılarının değiştirilebilmesi, maliyetinin düşük olması ve işlem tekniklerinin kolay olması modern toplumun hemen hemen her alanında kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Organik güneş pilleri karbon bazlı polimerlerden meydana gelmektedir. Güneş pili elde edilme tekniğe göre organik güneş pilinin özellikleri de farklılaşmaktadır. Düşük sıcaklıkta yapılan rulodan ruloya işleme tekniği diğer yöntemlerden daha etkili olup, yüksek hızda güneş pili üretimini mümkün kılmaktadır [8]. Bu işlem basit baskı kaplama yöntemidir. Aktif malzemeler bir çözücüde çözündükten sonra kaplama cihazı ile plastik bir levha üzerine uygulanmaktadır [8].

Güneş pili teknolojisinde polimer malzemelerin kullanılabilmesine yönelik ilk araştırmalar 1980'li yıllarda yapılmıştır. 1980'li yıllarda yapılan ilk çalışmalarda ortaya çıkan verim %0,1'den küçüktür. Fakat 1986 yıllarda önemli bir gelişme yaşanmış ve elde edilen verim %1 seviyesine ulaşmıştır [8,33]. Günümüzdeki yapılan çalışmalarda elde edilen verim hücre bazında %11 iken mini modül bazında elde edilen verim %9 civarındadır [8]. Organik güneş pillerinin geniş yüzeylere kaplanabilmesi, düşük maliyetli olması ve kolay üretilebilmesi bu teknolojinin en temel üstünlüğüdür.

ii) Boya sentezli güneş pilleri: Boya sentezli güneş pilleri, 1991 yılında Michael Grätze tarafından keşfedilmiştir ve çalışma prensibi fotosenteze benzerdir [9,36]. Boya sentezli güneş pillerinin çalışma prensibi bilinen yarı iletken teknolojilerden farklıdır. Çünkü ışığın soğurulması ve yükün taşınması fonksiyonları birbirinden ayrıdır. Boya sentezli güneş

pilleri teknolojisi, kristal silisyum teknolojisinin yerini alacak teknoloji olarak ön görülmektedir. Hücre bazında elde edilen verim %11,9 iken, mini modül bazında elde edilen verim %10 civarındadır [36]. Boya sentezli güneş pilleri, düşük maliyetinden dolayı endüstriyel üretim için çok önemli bir potansiyele sahiptir [8,35].

3.1.4. Son nesil güneş pilleri

Güneş pillerinde verimi sınırlayan en önemli etken, güneş pili üretiminde kullanılan her bir yarı iletken malzemenin güneş spektrumunun sadece bir bölümünü soğurabilmesidir. Güneşten gelen yasak band aralığından daha düşük enerjili fotonlar soğurulamamaktadır. Ayrıca yüksek enerjili fotonlar soğurulduktan sonra oluşan yüksek enerjili taşıyıcıların enerjilerinin bir bölümü latis ısısı olarak ortaya çıkmakta ve fotovoltaik elektrik üretimine katkıda bulunamamaktadır. Termalizasyon olarak adlandırılan bu durum Si güneş pillerinin AM1,5 güneş spektrumu altındaki enerjinin %31'inden yararlanamamasına sebep olmaktadır [8]. Bu iki önemli olay güneşten gelen enerjinin yaklaşık yarısından istifade edilememesine ve bundan dolayı güneş pillerinde verimin %50 düşmesine neden olmaktadır. Shockley ve Queisser tarafından üretilen detaylı denge analizi modeli ile siyah cisim ışıması altında mono kristal Si güneş pilinde elde edilen maximum verim tek güneş altında yaklaşık olarak %29'dur [8]. Si güneş pillerinden laboratuvar şartlarında tek güneş altında elde edilen verim %25'tir [8].

Son nesil güneş pillerinin amacı; güneş spektrumunun daha verimli soğurulmasını sağlayarak verimi artırmaktır. Bu çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

i) Çok eklemli güneş pilleri: Bu güneş pili daha fazla verim elde etmek için farklı yasak band aralığında yarı iletken malzemelerden elde edilen p-n eklem yapılarının birleştirilmesiyle oluşturulmuş yüksek verimli bir güneş pili modelidir. Yasak bant enerji seviyesi en yüksek olandan başlayarak aşağı doğru dizilir. Genelde optimum 3-4 katlı yapılır aksi takdirde kayıplardan dolayı verim azalır [18].

Çok eklemli güneş pilleri ilk olarak uzay uygulamaları için kullanılmıştır. Günümüzde ise yeryüzü uygulamalarında kullanılmaktadır. Üretim maliyeti yüksek olmasına rağmen elde edilen yüksek verimden dolayı sıradan silikon güneş pilleriyle bir rekabet halindedir. Fraunhofer ISE Laboratuvarında elde edilen verim %46'dır [33]. Bu sonuç sıradan silikon

güneş pili veriminin oldukça üstünde bir değerdir [18]. Bu güneş pilinin en önemli dezavantajlarından biri kristal yapıları birbirine uyumlu olan malzemelerin zor bulunmasıdır [18]. Her bir p-n eklemi birbirine bağlamak için kullanılan çift hetero eklemli tünel diyot yapısının tasarımı yüksek verim için oldukça önemlidir. Latis uyumu sağlanamayan yarı-iletken hücrelerin wire bonding yöntemi ile birbirine bağlanmasıyla yüksek verim sağlanabildiği de gösterilmiştir [36-39]. Kuantum kuyulu ve kuantum noktalı güneş pilleri de çok eklemli güneş pilleri arasında düşünülebilinir.

Kuantum kuyulu güneş pilleri: Kuantum kuyusu üç boyutta hareket serbestliği olan elektron ya da boşlukları iki boyutlu hareket etmeye zorlayan bir potansiyel kuyusudur [8]. Yüksek band aralıklı iki malzeme arasına daha düşük band aralıklı yarı iletken malzeme konularak kuantum kuyulu güneş pili elde edilir. Kuyu içerisinde yer alan elektron ve boşlukların sayısı, yarı iletken malzemenin kalınlığına bağlıdır. Bu pillerde ışık soğuruculuğu artarken rekombinasyon hızıda artmaktadır. Kuantum kuyulu güneş pillerinde elde edilen teorik verim %40 civarında iken ışık konsantrasyonu arttığında verimin %50 civarında olduğu hesaplanmaktadır [8]. Pratikte ise elde edilebilen verim değeri %20-25 aralığında değişmektedir [8].

ii) Çoklu Spektrum Güneş Pilleri: Geleneksel güneş piline özel bir kılıf geçirilerek çoklu spektrum güneş pilleri oluşturulur. Bu özel kılıf sayesinde gelen fotonun enerjisi band aralığından küçükse yukarı, büyükse aşağı enerji dönüşümü gerçekleşmektedir. Teorik olarak elde edilen verim sınırı %85,4 olmasına rağmen daha gerçekçi yaklaşımlar yapıldığı zaman verimlilik %50 olarak belirlenmektedir. Bu güneş pilinin dezavantajı ise özel kılıfın maliyetinin çok yüksek olmasıdır [18]. Pratik uygulaması mevcut değildir.

iii) Çoklu Soğurma Güneş Pilleri: Çoklu soğurma güneş pillerinde impact iyonizasyonu (Auger üretimi) ile yüksek enerjili bir foton birden fazla elektron-boşluk çifti üretebilmektedir. Bazı yarı iletken malzemeler için çok yüksek “impact ionization” değerleri ölçülmüştür. Ancak bu değerlerin güneş pilinin verimliliğinde bir artış sağladığı henüz ispatlanamamıştır [18].

iv) Ara Band Yapılı Güneş Pilleri: Ara band yapılı güneş pilleri (ABGP), yarı iletken malzemenin yasak band aralığında bir veya daha fazla ara band üretilmesi ile elde edilmektedir [3]. Bu yapı sayesinde gelen fotonun enerjisi band aralığından küçük olsa bile

soğurma gerçekleştirilebilmekte ve fotoakımda artma meydana gelirken çıkış gerilimi de azalmamaktadır. Tek ara banda sahip bir ABGP'nin verimi optimum şartlarda maksimum ışık konsantrasyonu altında %63,2 olarak rapor edilirken sonsuz sayıda ara bant bulunması durumunda ise verim %85 olarak hesaplanmıştır [3].

v) Çoklu Sıcaklık Güneş Pilleri (Termo fotovoltaik): Bu fikir ilk kez Aigrain tarafından 1960 yılında ortaya atılmıştır [9]. TPV enerji dönüşümünde güneş pili doğrudan güneş ışığına maruz bırakılmamaktadır. Bunun yerine önceden ısıtılmış bir ara soğurucu (intermediate absorber) güneş ışığını soğurmaktadır. Bu soğurucunun emitter bölgesinden güneş pilinin yasak band aralığına yakın enerjiye sahip fotonlar güneş pilinin üzerine düşürülmektedir. Böylece geleneksel p-n eklem güneş pillerinde fotonların uygun enerjiye sahip olmamalarından kaynaklanan verim kayıplarının önüne geçilmektedir. A. Datas ve C.Algora, düşük konsantrasyonlu (4,4 güneş) siyah cisim ışıması altında TPV güneş pili verimini teorik olarak %45,3 olarak hesaplamışlardır [8]. Maximum konsantrasyon için teorik olarak hesaplanan verim sınırı %85,4'tür [8].

3.2. Fotovoltaik Etki

Güneş pilinde gerilim üretilmesi "Fotovoltaik Etki" denilen bir mekanizma ile sağlanır. Fotovoltaik etki, bir yarı iletkenin, p-n ekleminde, potansiyel engelinin bulunduğu bölgeye ışık verildiğinde, eklemdeki potansiyel engelinde meydana gelen düşme miktarı kadar gerilim üretmesi olarak tanımlanabilir [18].

Fotovoltaik etki için aşağıdaki koşullar gereklidir:

i. Eklem bölgesine düşen fotonlar soğurulduğunda yeni elektron-boşluk çiftleri üretebilmelidir. Bunun için yarı iletkene düşen fotonun enerjisi (hυ), malzemenin yasak bant aralığından (E_G) büyük olmalıdır. Fotonun taşıdığı enerji aşağıdaki Şekilde hesaplanır:

$$E = h\upsilon = \frac{hc}{\lambda} > E_G hc = 1{,}24 eV\mu m \quad (3.1)$$

Burada h; plunck sabitini, c; ışık hızını, λ; dalga boyunu, E_G;yasak band aralığını temsil etmektedir.

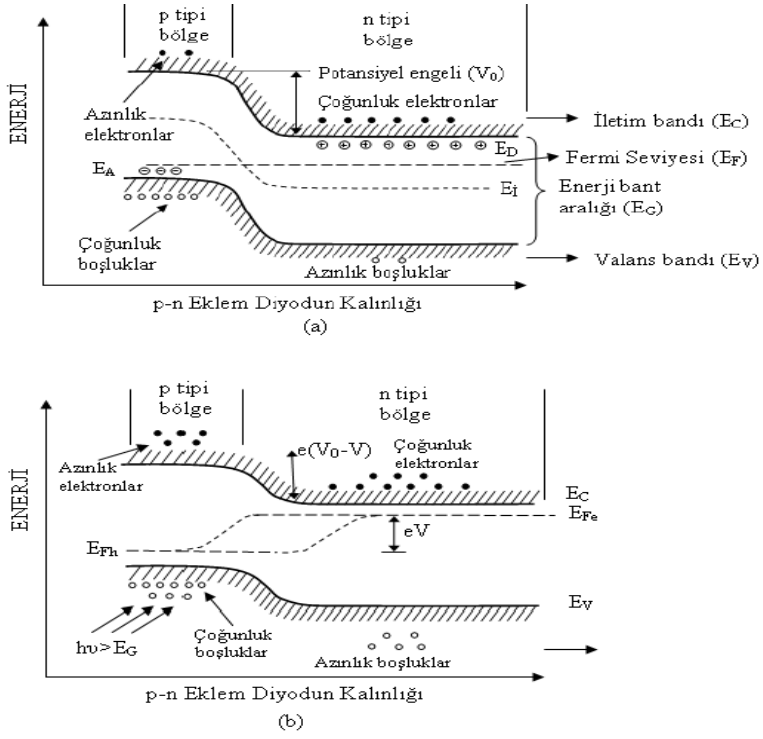
ii. Üretilen elektron ve boşluklar eklemdeki uzay yük bölgesine ulaşabilmeli ve buradaki elektrik alan etkisiyle birbirinden ayrılmalıdır.

iii. Birbirinden ayrılan bu taşıyıcılar difüzyonla yollarına devam edebilmeli ve yük üzerinden akım akıtabilmelidir.

Yukarıda belirtilen 1. ve 3.ncü şartlar akım üretimi için, 2.nci şart voltaj üretimi için gereklidir.

3.3. Fotovoltaik Pil Yapısı ve Eşdeğer Devresi

P ve n tipi yarı-iletkenler bir araya getirilerek oluşan eklemde konsantrasyon farklılığından dolayı taşıyıcı difüzyonu meydana gelir, fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar difüzyon ile çoğunluk elektronlar p tarafına ve çoğunluk boşluklar n tarafına geçmeye devam eder. Denge durumunda ise fermi seviyeleri her iki bölgede aynı seviyeye gelir ve Şekil 3.1a'daki gibi V_0 potansiyel engeline sahip bir p-n eklem meydana gelir.

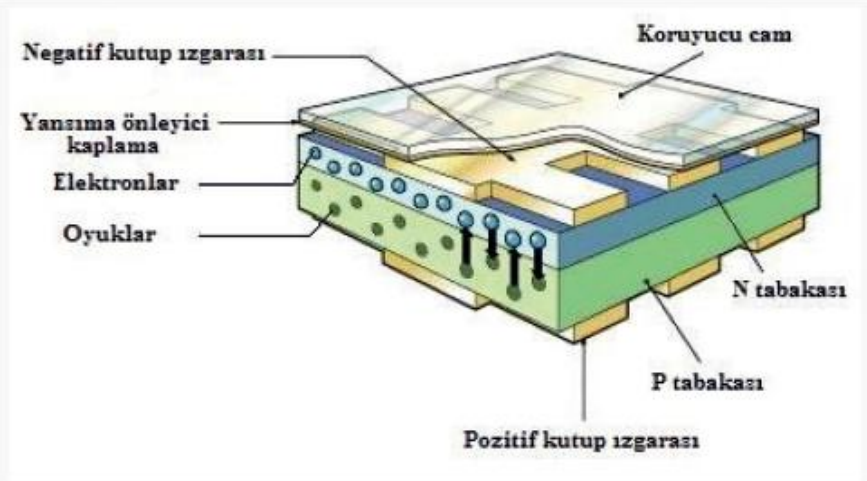


Şekil 3.1. Homoeklem fotovoltaik pilin,(a) aydınlatılmadan önceki hali (potansiyel engeli $V_0 = \frac{kT}{q}\ln(\frac{N_A N_D}{n_i^2})$ (b) ışık altındaki hali [18]

Güneşten gelen yüksek enerjili fotonlar malzeme tarafından soğurulduğunda serbest elektron boşluk çiftleri oluşturmaktadır. Meydana gelen elektron ve boşluklar

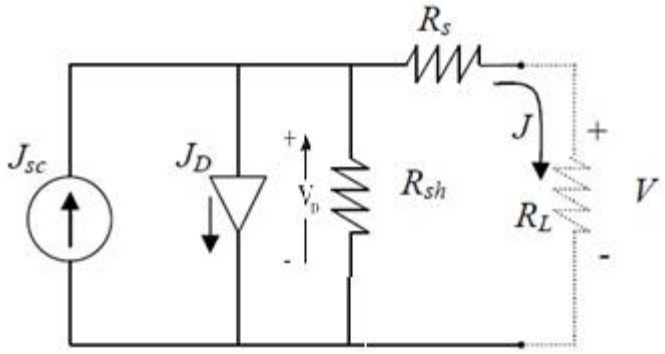
rekombinasyona uğramadan eklemdeki elektrik alana ulaşabilirlerse eklemdeki potansiyel engelini düşürmekte ve Şekil 3.1.b.'deki potansiyel engeldeki azalma kadar açık çıkış gerilimi meydana getirmektedir. Eklemdeki elektrik alana ulaşan elektron ve boşluk çiftleri elektrik alan etkisi ile birbirinden ayrılmaktadır. Ayrılan elektronlar p-bölgesinde, boşluklar n-bölgesinde yollarına devam ederek uç noktalarda akıma katkıda bulunurlar. Güneş pilinin üzerine ışık düştüğünde üretilen azınlık taşıyıcılar enerjilerini azaltma eğilimini göstermektedirler. Bundan dolayı denge durumunun korunması için elektron ve boşluk fermi seviyeleri ayrılarak kuasi-Fermi seviyesi meydana gelir ve çıkışta kuasi-Fermi seviyesindeki ayrılma kadar gerilim ortaya çıkar. Bu pile yük bağlandığında üzerinden akım akıtabilir. Üretilen gerilim ve akım değeri soğurulan foton miktarı ile orantılıdır [18].

Basit bir fotovoltaik pilin yapısı Şekil 3.2.'te görülmektedir. Fotovoltaik pillerde, fotonların yansımasının önlenmesi için ön yüzey yansıma önleyici (ARC) ile kaplanır ve bu sayede yansıma oranları %1'lere kadar düşürülür. Güneş pilleri için çok kullanılan yansıma önleyici maddeler TiO_2 ve SiN'dir. Emiter ve baz katmanlarının birleşim yerindeki p-n ekleminin taşıyıcı toplama olasılığını artırmak için yüzeye çok yakın yapılmıştır. Ayrıca ön omik kontaklar fotonların gelişini engellememek için ince ızgara şeklinde yapılır fakat kontak inceldikçe direnç artacağından çok ince kontaklar tercih edilmemektedir. Arka yüzeye de yansıtıcı konularak geri dönen fotonların yeni elektron-boşluk çiftleri üretmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.2. Tipik bir güneş pilinin yapısı

Şekil 3.3.'te bir fotovoltaik pilin eşdeğer devresi karşılığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi güneş pilleri diyot modeli ile modellenmektedir.



Şekil 3.3. Fotovoltaik pili için eşdeğer elektriksel devre

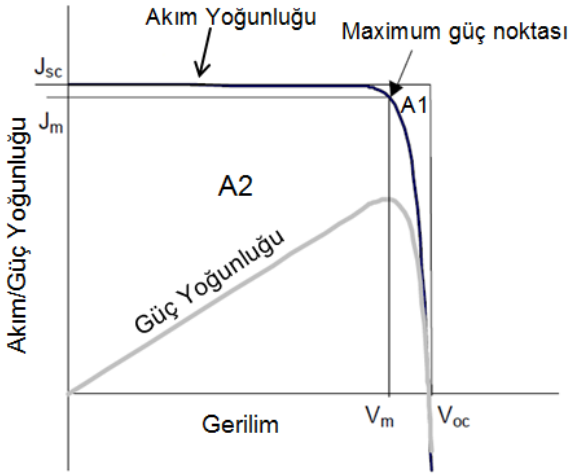
Şekil 3.3.'teki elektriksel devredeki akım-gerilim hesapları aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$V_D = V + JAR_S \tag{3.2}$$

$$J_{sc} = J_D(V_D) + J + \frac{V + AJR_s}{AR_{sh}} \tag{3.3}$$

$$J\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = J_{sc} - J_D(V_j) - \frac{V}{AR_{sh}} \tag{3.4}$$

Burada$J$; fotovoltaik pilin çıkış akım yoğunluğunu ve *V*; çıkış gerilimini, J_{sc}; kısa devre yoğunluğunu ve $J_D(V_D)$; karanlık akım yoğunluğunu, A;birim yüzey alanını göstermektedir. Kısa devre akım yoğunluğu ve karanlık devre akım yoğunluğu ifadelerinin elde edilişi bölüm 4'te açıklanmıştır. Şekil 3.3.'te şönt direnç R_{sh} ve seri direnç R_s ile temsil edilmiştir. Yukarıdaki denklemde görüldüğü gibi seri direnç (R_s) çıkış voltajını etkiler ve verimi düşürür. Seri direnç, emiter ve baz bölgelerinin direnci, yarı-iletken metal kontaklarda oluşan direnç, ön ve arka kontakların dirençlerinden oluşur. İdeal durumlarda '0' alınır ve üzerinde gerilim düşümü olmadığı kabul edilir. Şönt direnç(R_{sh}) ise genellikle üretimden kaynaklanan bir dirençtir. R_{sh}'nın küçük değerlerde olması pilin akımında büyük kayıplara yol açar ve verimi düşürür. Şönt direncin çok büyük değerlerde olması istenir ve ideal durumlarda sonsuz kabul edilerek üzerinden akım akmadığı varsayılır. Şekil 3.4.'te bir fotovoltaik pilinin J-V karakteristiği görülmektedir.



Şekil 3.4. Bir güneş pili için tipik J-V karakteristiği

$V_{oc,}$ açık devre çıkış gerilimidir.

Güneş pilinden maksimum verim elde edebilmek için pilin maksimum güç noktasına çalıştırılması gerekmektedir. Bunun için Şekil3.4'te A2 alanının maximum değerini veren J_m ve V_m değerleri için en uygun R_L'nin seçilmesi gereklidir. Güneş pilinin verimi (η) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir;

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_i} = \frac{J_{sc} V_{OC} FF}{P_i} \qquad (3.5)$$

Burada, $FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{OC}}$ oranına doluluk veya düzeltme faktörüdür. Doluluk faktörü her zaman "1" den küçük olup Si güneş pilleri için 0,8 civarındadır.

P_i güneşten gelen güç yoğunluğudur. Siyah-cisim, AM0 ve AM1 ışımaları için P_i değerleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı ışıma spektrumları için güneşten gelen ışıma miktarı

Işıma Spektrumu	P_i (mW/cm^2)
Siyah-cisim	157,9
AM0	135,3
AM1	107,0

Eş. 3.3'teki η, J_{sc}, V_{oc} ve FF değişkenleri, güneş pillerinin performansını gösteren önemli parametrelerdir. Verimi yüksek tutmak için J_{sc}, V_{OC} ve FF mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır.

3.4. Güneş Pilinde Verimliliğe Etki Eden Faktörler

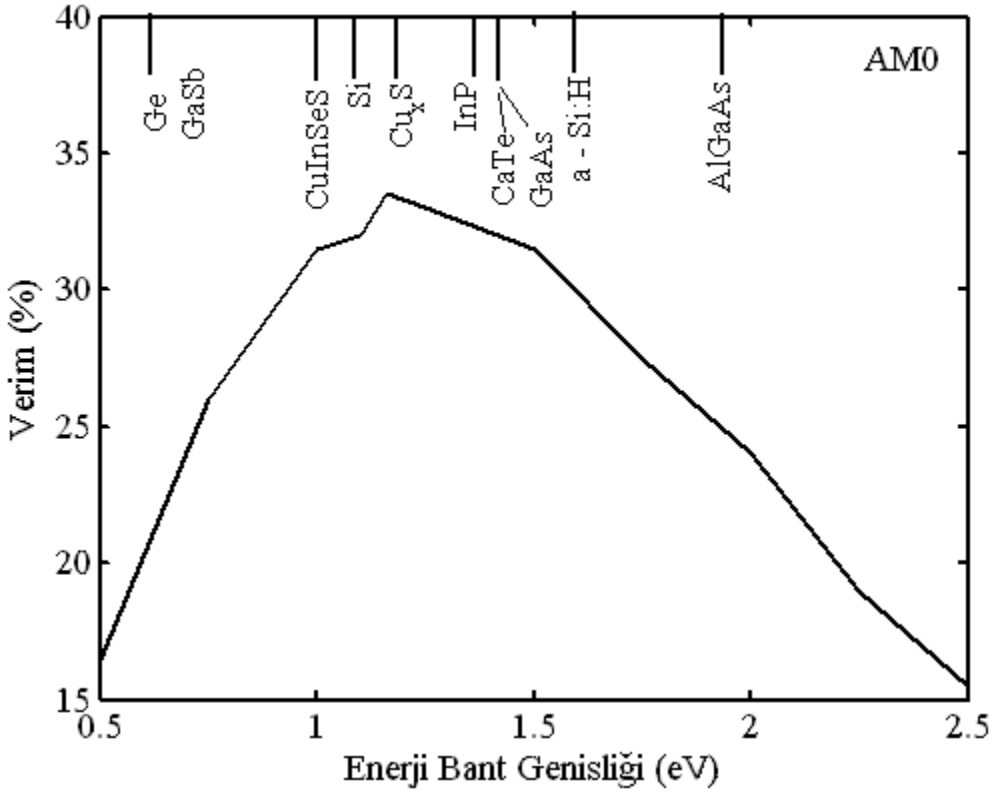
Fotovoltaik pillerde verimi artırılabilmek için fotoakım (I_{sc}) ve açık devre geriliminin (V_{oc}) mümkün olduğu kadar büyük, karanlık akımın da mümkün olduğu kadar küçük olması istenir. Çizelge 3.2.'de kısa devre foto akımını ve karanlık akımı etkileyen faktörler sunulmuştur. Bu etkenler fotovoltaik pilin optimum tasarımında dikkate alınması gereken parametrelerdir [8]. Bu parametrelerden birkaçını yakından inceleyelim;

Çizelge 3.2. Fotovoltaik pilin kısa devre foto akımına ve karanlık akımına etki edenfaktörler [18].

Fotovoltaik pilin optimum tasarımına etki eden faktörler	Kısa devre fotoakım	Karanlık akımı
Güneş spektrumu	√	
İletim verimliliği	√	
Sıcaklık	√	√
Çıkış gerilimi		√
Etkin ön yüzey alanı	√	
n, p tipi ve arıtılmış bölge kalınlıkları	√	√
Soğurma katsayıları	√	√
n, p tipi ve arıtılmış bölgelerdeki ömür süreleri	√	√
Katkılama yoğunluğu ve değişimi	√	√
Mobiliteler ve difüzyon katsayıları	√	√
Yüzey rekombinasyonu	√	√

i) Enerji band aralığı: Güneş spektrumu, güneş piline gelen güç miktarını ve foton sayısını belirlediği için fotoakımı etkileyen en temel faktörlerdendir. Güneş pili tasarımında güneş spektrumundan optimum şekilde soğurma yapabilecek yasak band aralığına (E_G) sahip bir

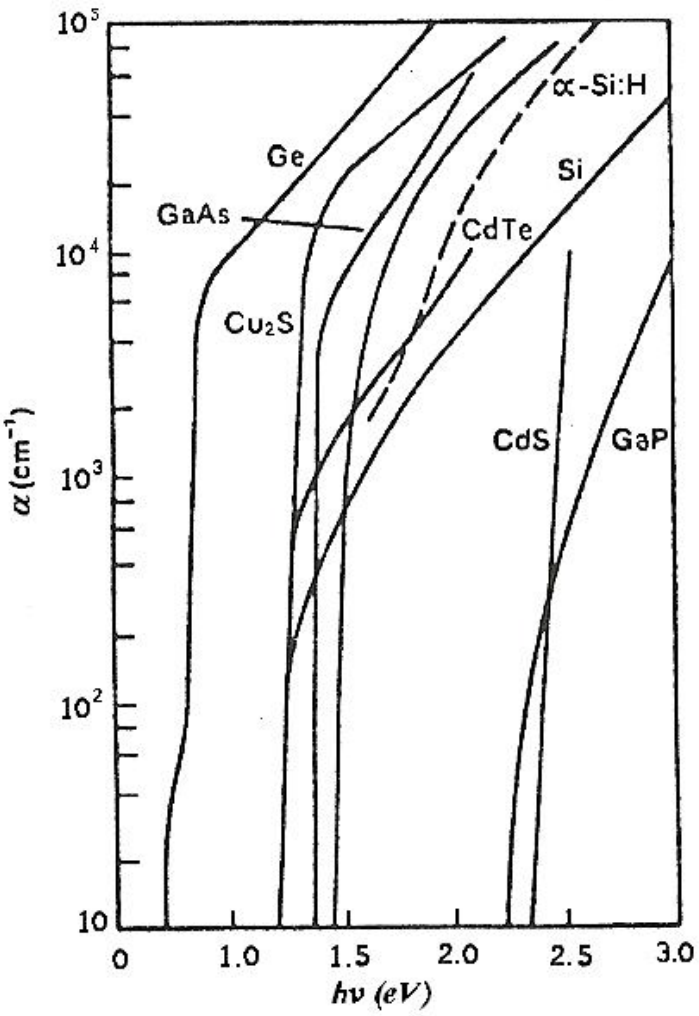
yarı iletken seçilmelidir. Eğer E_G'si büyük bir yarı iletken seçilirse güneşten gelen küçük enerjili fotonlar soğurulamaz bundan dolayı fotoakım düşer. Ancak E_G'si çok küçük bir yarı iletken malzeme seçildiği takdirde ise fotoakım artar fakat çıkış gerilimi düşer. Şekil 3.5.'de, tek eklemli güneş pilleri için teorik olarak AM0 ışıma spektrumu altında güneş pil veriminin enerji bant genişliği ile değişimi gösterilmiştir [18]. E_G 1-1,5eV aralığında seçilir ise pilin verimi en yüksek değerine ulaşmaktadır.



Şekil 3.5. AM0 spektrumu için ideal Shockley diyodunun verim-enerji band genişliği değişimi [40]

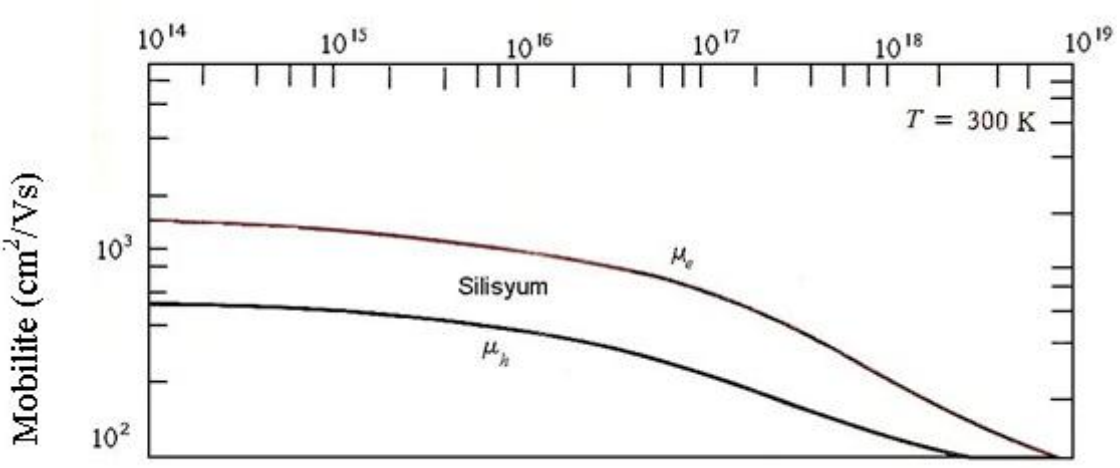
ii) Soğurma katsayısı ve güneş pili kalınlığı: Optimum fotovoltaik pil kalınlığı, soğurma katsayısı ile ters orantılıdır. Soğurma katsayısının değeri ne kadar küçükse fotovoltaik pilin kalınlığı da o kadar büyük olmalıdır. Ancak fotovoltaik pilin kalınlığı difüzyon mesafesinden büyük olmamalıdır. Fotovoltaik pilin kalınlığındaki artış ışımasız rekombinasyonu artırmaktadır. Bundan dolayı karanlık akımda artmaktadır. Eğer fotovoltaik pilin kalınlığı yeterli olmazsa pilde yeterli soğurma yapılamaz. Şekil3.6.'de çeşitli malzemelere ait soğurma katsayılarının enerji ile değişimleri verilmektedir. Direkt bant yapılı GaAs gibi yarı iletken malzemelerde soğurma katsayısı enerji ile çok hızlı bir

biçimde artarken, silisyum gibi indirekt bant yapılı yarı iletken malzemelerde bu artış biraz daha yavaş olmaktadır.

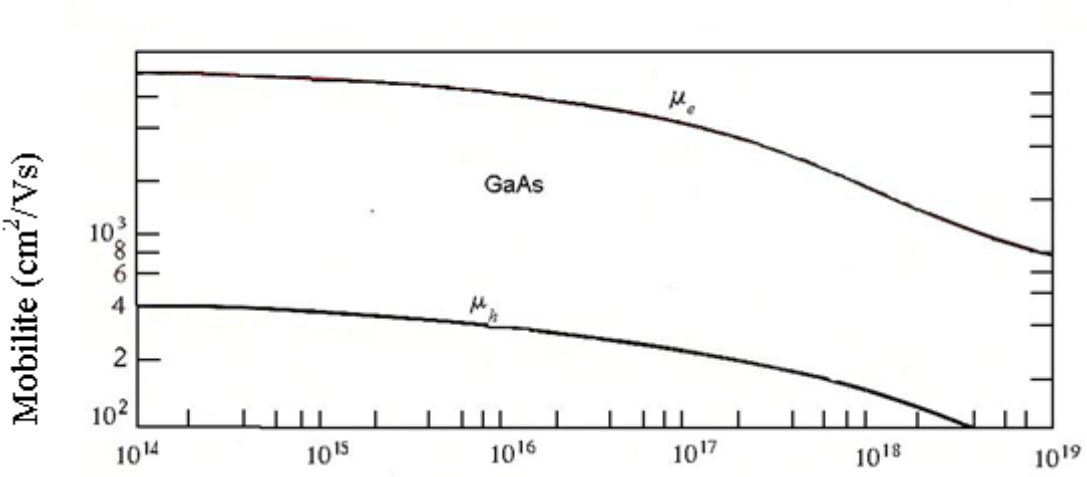


Şekil 3.6. Çeşitli yarı iletken malzemelerde, soğurma katsayısının enerji ile değişimi [18]

iii) Taşıyıcı mobiliteleri, ömür süreleri, difüzyon uzunluğu ve katkı konsantrasyonu: Difüzyon uzunluğu ile mobilite arasında doğru orantı vardır. Mobilite büyükse difüzyon uzunluğu da büyük olur. Şekil 3.7.'de, GaAs ve Siyarı iletken malzemelerin elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi verilmektedir [22]. GaAs yarı iletken malzemenin taşıyıcı mobiliteleri, Silisyum malzemenin taşıyıcı mobilitelerinden daha büyüktür fakat her iki yarı iletkende mobiliteler katkı konsantrasyonu ile azalmaktadır. Açık devre gerilimi katkı konsantrasyonu ile doğru orantılıdır, eğer katkı konsantrasyonu fazla olursa açık devre gerilimi büyük olur ancak mobilitelerin ve difüzyon uzunluğunun fazla azalmaması için bir optimizasyon yapılması gerekmektedir. Ayrıca çok katkılı yarı iletken malzemelerde Auger rekombinasyonu ortaya çıkmaktadır [10,19].



(a)Taşıyıcı yoğunluğu (cm^{-3})



(b)Taşıyıcı yoğunluğu (cm^{-3})

Şekil 3.7. Si (a) ve GaAs (b) için elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi [18]

iv) Sıcaklık: Diğer yarı iletken devre elemanları gibi güneş pilleri de sıcaklığa karşı hassastır. Güneş pillerinin çalışmasında sıcaklığın önemli bir etkisi vardır. Güneş pillerinin kısa devre akımı sıcaklığın düzgün bir şekilde artmasıyla yükselme eğilimi gösterir. Yarı iletken enerji band aralıkları genellikle sıcaklıkla azaldığından açık devre voltajı ve dolum faktörü azalır. Enerji band aralığı oda sıcaklığında lineer olarak değişim gösterirken düşük sıcaklıklarda ise doğrusal olmayan bir değişim gösterir. Yasak band aralığı ve mobilite sıcaklık ile ters orantılı olarak sıcaklık artıkça azalmaktadır. Yasak band genişliğinin azalması demek kovalent bağı kırmak için daha az enerji gerekeceğinden kısa devre akımı

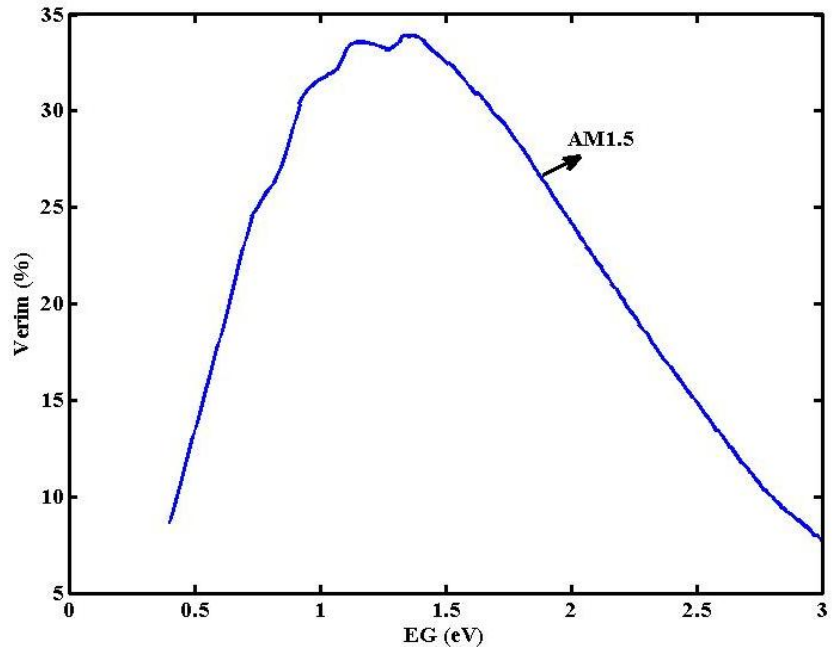
çok az olsa bile artırmak demektir. Fakat yasak band genişliği azaldığı takdirde açık devre gerilimi de azalacağından pilin toplam verimide azalacaktır [8,18].

4. P-N EKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde, geleneksel p-n eklem güneş pili çıkış parametrelerini hesaplamak için yaygın olarak kullanılan iki model tanıtılmıştır. Bu modeller; bir takım varsayımlar ile verim sınırı bulunmasını sağlayan detaylı denge modeli (DBM) ve malzeme parametrelerinin etkisini de inceleyen sürüklenme-difüzyon modeli (DDM)'dir.

4.1. P-n Eklem Güneş Pillerinde Detaylı Denge Yaklaşımı

1961 yılında Shockley ve Queisser tarafından ilk defa ortaya atılan detaylı denge modeli tek eklemli klasik güneş pillerinde elde edilebilecek maksimum verimi hesaplamak için kullanılmıştır [41]. Tek eklemli klasik güneş pillerinde E_G=1,4 eV için maksimum verim %33,7 olarak bulunmuştur. Şekil 4.1.'de AM1,5 ışıması altında verim-E_G değişimi görülmektedir.



Şekil 4.1. Detaylı denge Verim-E_G eğrisi

Detaylı denge modeline göre işlem yaparken çoğunlukla kullanılan varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- ✓ Güneşten gelen E ≥ $E_G$olan her fotonun güneş pili tarafından soğrulduğu varsayılır.
- ✓ Soğrulan her fotonun kesinlikle bir elektron-boşluk çifti ürettiği varsayılır.
- ✓ Elektron ve boşluk mobilitelerinin sonsuz olduğu kabul edilir.
- ✓ Malzemenin tüm soğurmayı sağlayacak kalınlıkta olduğu varsayılır.(Bu çalışmada kalınlık etkisi incelenmiştir.)
- ✓ Sadece ışımalı rekombinasyon olduğu varsayılır.

Bu çalışmada AM1,5 ışıma spektrum için analizler yapılmıştır. Detaylı denge modeline (DDM) göre bir klasik p-n eklem güneş pilinin akım yoğunluğu denklemi aşağıdaki gibidir;

$$J(V) = J_{SC} - J_{dark}\,(V) \tag{4.1}$$

Burada J_{SC} kısa devre durumunda ışık altında üretilen akımı ve J_{dark} karanlık akımını temsil etmektedir. Işıkla üretilen akım yoğunluğu aşağıda gibi ifade edilmektedir;

$$J_{sc} = Xq \int (1 - R(\varepsilon))(1 - e^{-\alpha(\varepsilon)w}) N_{ph}(\varepsilon) d\varepsilon \tag{4.2}$$

Burada Ɛ; enerji,X; ışık konsantrasyonu, q; elektron yükü, R_L; yüzeyden yansıma mıktarı, α;soğurma katsayısı, N_{ph}; pilin yüzeyine birim zamanda birim alana düşen foton sayısı ve w;güneş pilinin kalınlığıdır. Bu modelde karanlık akımı, ışımalı rekombinasyonda akım oluşturmaktadır.

$$J_{rad} = q \int \frac{2\pi}{h^3 c^2}\,(1 - e^{-\alpha(\varepsilon)w}) \left(\frac{\varepsilon^2}{e^{\left(\frac{\varepsilon - \Delta\square}{k_B T_C} - 1\right)}} \right) d(\varepsilon) \tag{4.3}$$

Burada, $\Delta\square = qV$ elektron ve boşlukların seviyelerinin quasi fermi seviyelerinin ayrılma miktarıdır, k_B;Boltzman sabiti, Te; pil sıcaklığı, V; pilin çıkış voltajını oluşturur.

Fotovoltaik pil DDM ile modellenirken çıkış akım yoğunluğunu bulabilmek için $\Delta\square$'ye 0'dan başlayarak değerler verilir ve çıkış voltajının her değerine karşılık pil akımı bulunur. Akım yoğunluğunun "0" olduğu noktadaki çıkış voltajı açık devre gerilimine (V_{OC}) eşit olur. Güneş pilinin çıkış gücü, verimi ve doluluk oranı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_{OC} = \frac{k_B T_C}{q} \ln\left(\frac{J_{SC}}{J_{dark}} + 1\right) \quad (4.4)$$

$$P_m = V_m J_m \quad (4.5)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \quad (4.6)$$

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{OC}} \quad (4.7)$$

Burada, P_m;çıkışta elde edilen maksimüm güçü, FF; doluluk faktörünü, P_{in};pilin üzerine düşen güç yogunlugunu, η;verimi göstermektedir.

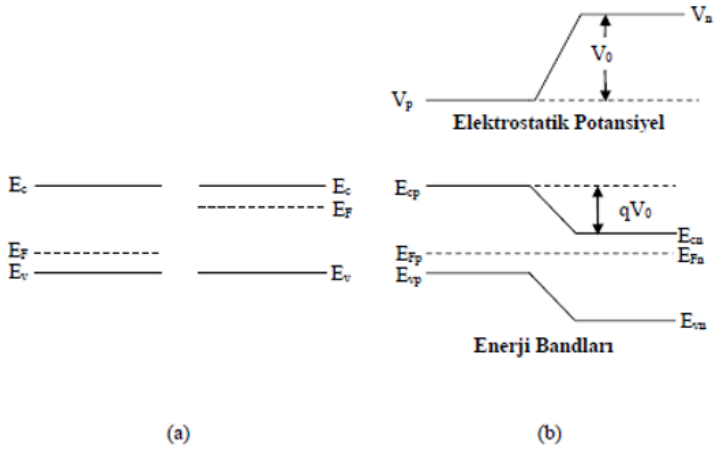
DDM ile güneş pilinin verebileceği maksimum verim hedefi belirlenir. Uygulada detaylı denge modelinden daha düşük verim elde edilmesinin nedenleri aşağıkaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Taşıyıcı mobilitelerinin sonsuz olmaması,
- ✓ Işımalı rekombinasyonların yanında diğer rekombinasyon çeşitlerinin de etkili olması,
- ✓ Bütün fotonların soğurulamaması, soğrulan fotonların zamanının serbest taşıyıcı üretmesi,
- ✓ Yüzey rekombinasyonları ve kontaklardaki kayıplar..

4.2. Sürüklenme-Difüzyon Modeli

Şekil 4.2.'teki n tipi yarı iletkende elektron konsantrasyonu fazla boşluk konsantrasyonu az, p tipi yarı iletkende ise boşluk konsantrasyonu fazla elektron konsantrasyonu azdır. İki yarı iletken bir araya gelince bir p-n eklemi oluşur ve eklemdeki konsantrasyon farklılığından dolayı taşıyıcı difüzyonu meydana gelir. Boşlukların p tipi yarı iletkenden n tipi yarı iletken tarafına doğru difüzyonu oluşurken elektronların da n tipi yarı iletkenden p tipi yarı iletken tarafına doğru difüzyonu oluşur. Elektronların ntipi bölgeden ayrılması ile geride artı (+) yükler kalırken boşlukların p tipi bölgeyi terk etmesi ile birlikte geride eksi (-) yükler kalacaktır. Geride kalan (+) ve (-) yükler eklem bölgesinde elektrik alan oluşturur, oluşan bu alan n tipi ve p tipi bölgedeki taşıyıcı farklarından dolayı oluşan doğal akışı engelleyici yönde artacaktır. Denge kurulduğunda ise taşıyıcı akışı duracak ve eklem

bölgesinde bir elektrik alan oluşacaktır ve Şekil 4.3.b.'deki gibi bir potansiyel engel oluşur. Bu elektrik alanın büyüklüğü kullanılan yarı iletkenlere ve katkılanma miktarına bağlıdır. Elektrik alan difüzyon akımlarına zıt yöndedir. Bu nedenle oluşan elektrik alan n tipi bölgeden p tipi bölgeye doğru, difüzyon akımına zıt yönde sürüklenme akımı oluşturur.



Şekil 4.2. (a) n ve p tipi malzemenin birleşmeden önceki hali, (b) n ve p tipi malzemenin birleşerek fermi seviyelerini eşitlediği hali

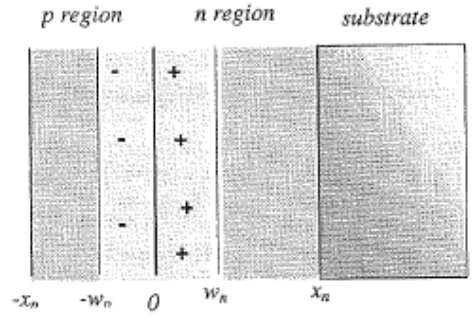
Yarı iletkenlerde drift-difüzyon modellemesi ve bazı eşitliklerden yararlanarak p-n eklemin akım-gerilin hesapları yapılmaktadır. Bu eşitlikler;

- ✓ Poisson denklemi
- ✓ Boltzmann transport denklemi
- ✓ Süreklilik denklemleridir.

Bu denklemler ışığında hareket ederek bir p-n ekleminin uzay eklem bölgesi genişliğini, akımını, gerilimini ve verim değerini hesaplayalım.

P-n eklemin elektrostatik analizi, boşaltılmış bölgede yük yoğunluğu ve elektrik alan ile ilgili bilgi sağladığı için önemlidir. Genel analiz Poisson denkleminin kurulması ile başlar. P-n eklemdeki elektrik alan ve potansiyel dağılımları bir boyutlu Poisson denkleminin çözümünden elde edilir. Hesaplamaları kolaylaştırmak için bütün yarı iletken Şekil 4.3.'teki gibi üç farklı bölgeye bölünür; n ve p tipi nötr bölgeler ve boşaltılmış bölge.

P bölgesi n bölgesi Alttaş



Şekil 4.3. P-n eklem bölge yapısı [42]

Yük yoğunluğu ve ϕ elektrostatik potansiyel arasındaki ilişki Poisson denklemi ile verilir;

$$\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial_{x^2}} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} \tag{4.8}$$

Burada Ɛs; yarı iletkenin dielektrik sabiti ve ρ; uzay yük yoğunluğudur. Bütün verici (donor) ve alıcıların (acceptor) iyonize edildiğini varsayalım. ρ; elektron yoğunluğu, boşluk yoğunluğu, alıcı ve verici yoğunluklarının bir fonksiyonu olarak $\rho=q(N_D-N_A+p-n)$ şeklinde yazılabilir. Bu durumda Poisson denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial_{x^2}} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s}(N_D - N_A + p - n) \tag{4.9}$$

Arıtılmış bölgenin tamamen hareketli taşıyıcılardan boşaltıldığı ve komşu nötr bölgelerin hiçbir yük içermediği basitleştirilmiş varsayımı yapılır. Bu varsayıma boşaltılmıştık yaklaşımı denir.

Boşaltılmışlık yaklaşımına dayanarak, boşaltılmış bölgenin tamamen hareketli taşıyıcılardan serbest olduğu düşünüldüğünde n=p=0'dır. $x = 0$'daki süreklilik durumuna göre bölgelerin genişlikleri hesaplanırsa,

$$w_p = \frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{q\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)}} \tag{4.10}$$

$$w_n = \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{q\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)}} \tag{4.11}$$

$$V_{bi} = \frac{k_B Tc}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{{n_i}^2}\right) \quad (4.12)$$

Burada, k_B; boltzmann sabiti, T_c; pilin sıcaklığını göstermektedir. Toplam uzay yük bölgesinin genişliği hesaplanırsa,

$$w_{scr} = w_n + w_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) V_{bi}} \quad (4.13)$$

olarak hesaplanır.

Yarı iletkenlerde elektronlar ve boşluklar için süreklilik denklemler aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p(x)}{\partial x} - R_p + G_L \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n(x)}{\partial x} - R_n + G_L \quad (4.15)$$

Burada, G_L elektron ve boşluk üretim hızını ve $R_{p,n}$ elektron ve boşluk yok olma hızını temsil etmektedir. $J_{n,p}$ ise elektron ve boşluk akım yoğunluğunu temsil etmektedir.
Yarı iletkenlerde elektron ve boşluk akım denklemler aşağıda verilmiştir.

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{\partial \Delta_n}{\partial_x} \quad (4.16)$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{\partial \Delta_p}{\partial_x} \quad (4.17)$$

Burada n ve p elektron ve boşluk konsantrasyonları, Δ_n ve Δ_p fazlalık tataşıyıcı yoğunluklarıdır. $\mu_{n,p}$ taşıyıcı mobilitelerini ve D_n, D_p taşıyıcı difüzyon katsayılarını temsil etmektedir. n ve p taraflarında sadece difüzyon akımı aktığı kabul edilerek süreklilik ve akım denklemleri birleştirildiğinde aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\mathrm{D_n}\frac{\mathrm{d}^2\Delta\mathrm{n}}{\mathrm{dx}^2} - \mathrm{r_g}\frac{\Delta\mathrm{n}}{\mathrm{n_{eq}}} - \frac{\Delta\mathrm{n}}{\tau_\mathrm{n}} = -\mathrm{g_{eh}} \quad (4.18)$$

$$D_p \frac{d^2\Delta p}{dx^2} - r_g \frac{\Delta p}{p_{eq}} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = -g_{eh} \quad (4.19)$$

Şekil 4.3'te gösterilen p, n tarafları ve arıtılmış bölge ayrı ayrı analiz edilir. n ve p taraflarında sadece azınlık difüzyon akımı aktığı kabul edilir. Bu bölgeler için Eşitlik 4.18 ve 19'teki diferansiyel denklemler kısa devre ve karanlık durumlar için aşağıdaki sınır koşulları kullanılarak çözülür;

$$\Delta_n(+w_p) = n_{eq}(e^{\frac{qV}{k_B T_c}} - 1) \quad (4.20)$$

$$\Delta_p(-w_n) = p_{eq}(e^{\frac{qV}{k_B T_c}} - 1) \quad (4.21)$$

$$D_n \frac{\partial_n(x_p)}{\partial_x} = S_n \Delta_n(x_p) \quad (4.22)$$

$$-D_p \frac{\partial_n(-x_n)}{\partial_x} = S_n \Delta_n(-x_n) \quad (4.23)$$

Eşitlik 4.19 ve 20'de kısa devre (V=0) ve karanlık (g_{eh}=0) durumlarında Δn ve Δp'nin x ile dğişimleri elde edilir. Bu değişimlerden yararlanılarak n ve p bölgelerinin akım katkıları bulunur;

$$J_n = D_n \frac{\partial \Delta_n}{\partial_x},\ J_p - D_p \frac{\partial \Delta_p}{\partial_x} \quad (4.24)$$

Burada τ_n, τ_p elektron ve boşlukların Shockley-Read Hall (SRH) ömür sürelerini, n_{eq}, p_{eq} denge durumundaki taşıyıcı konsantrasyonunu, r_g ışımalı rekombinasyon katsayısını ifade eder. r_g, ışımalı rekombinasyon katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$r_g = \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_0^\infty \alpha_\varepsilon(\varepsilon)\varepsilon^2 \exp(-\frac{\varepsilon}{k_B T_C}) \quad (4.25)$$

Eş.4.18 ve Eş.4.19'deki g_{eh} ifadesi foto üretimi temsil eder ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$g_{eh}(x) = \int \big(1 - R(\varepsilon)\big)\, \alpha(\varepsilon) Nph(\varepsilon) \exp(-\alpha(\varepsilon)x) d\varepsilon \quad (4.26)$$

Arıtılmış bölgede sürükleme akımının baskın olduğu kabul edilir ve kısa devre durumdaki foto akım ve karanlık akım aşağıdaki gibi bulunur;

$$J_{photo-dep} = -q \int_{-w_n}^{w_p} (g_{eh})\, dx \tag{4.27}$$

$$J_{dark-dep} = -q \int_{-w_n}^{w_p} (U_{rad} - U_{nr})\, dx \tag{4.28}$$

Burada, U_{rad} ve U_{nr} ışımalı ve ışımasız rekombinasyon hızlarıdır.

Her üç bölge için bulunan akımlar; kısa devre durumunda toplanırlar ve pilin toplam kısadevre akımı elde edilir.Karanlık durumda sınır koşulundaki V_0'a 0'dan itibaren değerler verilerek karanlık bileşenleri hesaplanır. Her bölgedeki karanlık akım yoğunluklarının toplamı pilin karanlık akım yoğunluğunu verir.Bulunan kısa devre akım yoğunluğundan karanlık akım yoğunluğu çıkarıldığında çıkış voltajının değişen değerleri için akım yoğunluğu belirlenmiş olur.Seri ve şönt direnç (R_S ,R_{SH}) etkileride hesaba katıldığında;

$$J = J_{photo} - J_0 e^{\frac{qV_0}{nk_BT_c}} - \frac{V_0}{AR_{SH}} \tag{4.29}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim p-n eklemin karanlık akım bileşenini temsil etmektedir.J_0 ters doyum akımı ve n ideallik faktörüdür. Karanlık akımın V_o ile değişimi bilindiği için J_0 ve n kolaylıkla tespit edilir.Burada V_0 , seri direnç ihmal edildiğinde bulunan çıkış voltajıdır.

$$V_{OUT} = V_0 - JAR_S \tag{4.30}$$

V_0'ın her değeri için J ve J'nin her değeri için V_{0ut} bulunur. Bu değişimden yararlanılarak kısa devre akımı (J_{SC}), açık devre voltajı (V_{0C}) ,doluluk faktörü (FF) ve verim (η) değerleri elde edilir.

4.5. Kuantum Verimi

Kuantum verimi, belli bir enerji aralığında malzemeye gelen fotonların ne kadarının foto akıma dönüştürüldüğünün ölçütüdür. Kuantum verimi dalga boyu ya da enerjinin bir fonksiyonu olarak verilir. Malzemenin kuantum verimine bakılarak fotovoltaik

malzemenin güneş enerjisi spektrumunun hangi dalga boyu ya da enerji aralığında daha hassas olduğu anlaşılabilir. Aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$EQE = \frac{\text{electrons /sec}}{\text{photons /sec}} = \frac{J_{photo}(\lambda)}{qN_{ph}(\lambda)} \tag{4.31}$$

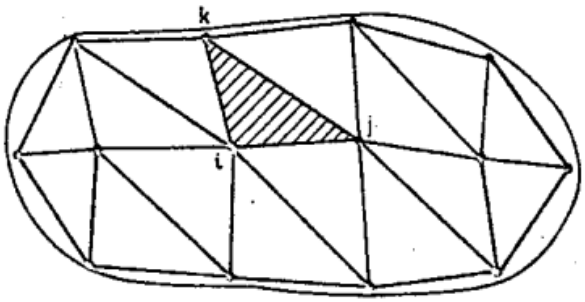
4.6. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar yönteminin (SEM) çıkış fikri karmaşık bir problemin çözümü yerine eşdeğer fakat daha basit bir problem kullanılarak çözüme gidilmesidir. Gerçek problemin yerine daha basit bir problem yerleştirildiği için alınacak sonuç genelliklebirebir doğru değildir fakat yaklaşık bir sonuçtur. Var olan matematiksel metotlar ve bilgisayar programları yardımıyla SEM ile hemen hemen her türlü problemde tatmin edici yakınlıkta sonuçlar elde etmek mümkündür. SEM'de işlem yaparken çözüm bölgesinin çok sayıda küçük ve birbirine bağlı alt bölgelerden oluştuğu kabul edilir. Bu alt bölgelere verilen isim "sonlu elemanlar" dır. Çözüm işlemi yapılırken tüm bu küçük alt bölgelerdeki sonlu elemanlar için yaklaşık en yakın sonuçlar bulunur. Sınır koşulları ve denge denklemleri kullanılarak tüm yapı için sonuca gidilir.

Sonlu elemanlar metodunun önemli avantajı, geliştirilmiş bir bilgisayar programının çok sayıda problemin çözümü için kullanılabilmesidir. SEM'de sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla ele alınıp incelenebilir. Sistem için gerekli en temel denklemler kurulduktan sonra sınır koşulları basitçe denklemlere dâhil edilebilmektedir. Bu SEM'in en önemli avantajlarından biridir çünkü sınır şartları ile değişken fonksiyonlarını değiştirme gereği ortadan kalkmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun uygulanmasında aşağıdaki adımlar uygulanır [44]:

1. Yapının parçalara ayrılması: Sonlu elemanlar metodunda ilk basamak sistemin veya çözüm bölgesinin alt parçalara veya elemanlara ayrılmasıdır. Çözümün kaç adet hangi türde ve hangi boyutlarda alt parçalara ayrılacağına karar verilmelidir. Örneğin Şekil 4.4.'de çözüm bölgesi üçgen parçalara ayrılmıştır.



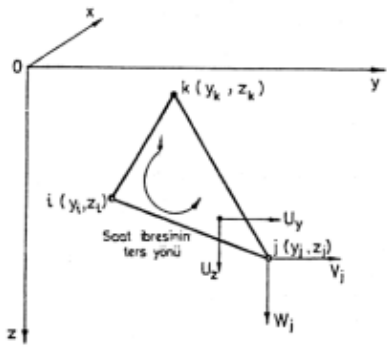
Şekil 2.4. Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi [44]

2. Uygun bir interpolasyon veya yer değişimi modelinin seçimi: Karmaşık bir sistemin veya yapının herhangi bir yük altında yer değişim çözümü net bir Şekilde doğru tahmin edilemeyeceği için eleman içinde uygun bir çözümün bilinmeyen çözüme yakın olduğu kabul edilmektedir. Kabul edilen çözüm yöntemi hesap açısından basit ve kolay olmalı fakat belli bir uyumluluk göstermeli ve sınır şartlarını sağlamalıdır.

3. Eleman katılık matrislerinin ve yük vektörlerinin elde edilmesi: Kabule edilen yer değişim yönteminden, katılık matrisi $[K^{(e)}]$ ve yük vektörü $[P^{(e)}]$ denge koşulları veya uygun bir varyasyonel yöntem kullanılarak elde edilir.

4. Eleman denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemlerini elde edilmesi: Yapı çok sayıda sonlu elemandan oluşturulur ve tek tek eleman katılık matrisleri, yük vektörleri uygun bir Şekilde birleştirilir ve toplam denge denklemleri $[K]\vec{\emptyset} = \vec{P}$ ile ifade edilir.

Burada, [K] birleştirilmiş katılık matrisini, $\vec{\emptyset}$ nodal yerdeğişimleri vektörünü, $\vec{P}$ ise tüm yapı için nodal kuvvetler vektörünü temsil etmektedir. Örnek olarak bir üçgende nodların nasıl yer aldığı Şekil 4.5.'deki görülmektedir.



Şekil 4.3. Bir üçgen eleman ve düğüm noktaları (nodlar) [43]

5. Bilinmeyen nodal yer değişimleri için çözüm: Sınır değerleri göz önüne alınarak toplam denge denklemleri değiştirilmelidir. Sınır durumlarının da hesaba katılmasıyla genel denklem, $[K]\vec{\emptyset} = \vec{P}$ şeklinde ifade edilir. Lineer denklemlerde, $\vec{\emptyset}$ vektörü kolayca çözümlenebilir. Ancak non-lineer denklemlerde, çözüme ancak her basamakta katılık matrisi $[K]$ ve/veya yük vektörü $\vec{P}$'nin değiştirilmesiyle elde edilebilmektedir.

6. Sonuçların bulunması: Bilinen düğüm noktaları yer değişimleriyle ilgili matrislerin çözümlenmesiyle gerilmeler ve şekil değişiklikleri bulunur. Yöntemin değişik disiplinlerde uygulanması ile yukarıdaki basamaklarda birkaç küçük değişiklik görülse de tüm sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplamalarda genel olarak bu sıralama takip edilmektedir.

Galerkin Sonlu Elemanlar yöntemi: Bir problem alanı küçük alt parçalara ayrılıp, her parça için bir deneme fonksiyonu yazılırsa karmaşık ve zor bir problemi basit doğrusal fonksiyonların toplamı şeklinde ifade edilebilinir. Problemin her bir alt parçasına deneme fonksiyonu oluştururken sistematik bir denklem sağlamak amacıyla fonksiyonlar noktalardaki değişkenler türünden ifade edilmektedir. Şekil 4.6.'daki problem alt parçasını düşünelim. Elemanın iki ucunda birer nokta bulunmaktadır. Şekildeki elemanın iki ucundaki noktanın koordinatları ($x_i$ve x_{i+1}) ve noktasal değişkenleri ($u_i$ve u_{i+1}) olarak belirlenmiştir.

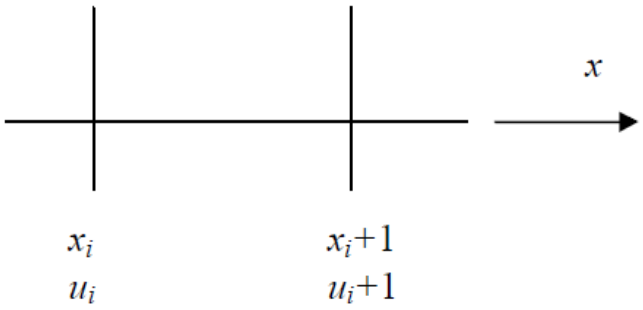
Seçilen deneme fonksiyonunu aşağıdaki gibi kabul edersek;

$$u = c_1 x + c_2 \tag{4.32}$$

Problem noktasal değişkenler türünden yazplırsa$c_1$ve $c_2$katsayıları yerine u_i ve u_{i+1} değişkenlerinin gelmesi gerekmektedir. x=$x_i$ve x=x_{i+1}noktalarında'ki fonksiyon yazılırsa;

$$u(x_i) = c_1 x_i + c_2 = u_i \tag{4.33}$$

$$u(x_{i+1}) = c_1 x_{i+1} + c_2 = u_{i+1} \tag{4.34}$$



Şekil 4.6. İki noktalı sonlu eleman [8]

Eş.4.33 ve Eş.4.34'deki denklemler eş zamanlı olarak çözülürse aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$u = H_1(x)u_i + H_2(x)u_{i+1} \tag{4.35}$$

Burada

$$H_1(x) = \frac{x_{i+1}-x}{h_i} \tag{4.36}$$

$$H_2 = \frac{x-x_i}{h_i} \tag{4.37}$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i \tag{4.38}$$

Alt parçalara ayrılan bir sistemin her parçasına yukarıda verilen doğrusal ve yaklaşık çözüm uygulanır, tam çözüm bunların toplamı şeklinde bulunur.

Bu tez çalışmasında detaylı denge modelindeki, drift-difüzyon modelindeki ve kuantum verimindeki diferansiyel denklemler sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözülmüştür. Çünkü yüksek ışık konsantrasyonunda nonlineer değerler geldiği zaman denklem analitik olarak çözülemez bu nedenden nonlineer durumlar için nonlineer çözüm metotlarından biri olan sonlu elemanlar metodu yardımıyla akım ve gerilim hesaplaması yapılır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5'te detaylı olarak sunulmuştur.

5. VERİM SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada güneş pili yapımında kullanılan Si, GaAs, Ge, InP, InGaP, InGaAs, InGaAsP gibi 7 farklı yarı iletken malzemenin detaylı denge modeli (DBM) kullanılarak teorik verim sınırı ve sürüklenme -difüzyon modeli (DDM) kullanılarak da tek eklem verim değerleri tespit edilmiş ve karşılaştırılmıştır. DDM modeli ile inceleme yapılırken katkı konsantrasyonlarında ve n ve p bölge kalınlıkları değiştirilerek maksimum verim noktaları tespit edilmiştir. Bu maksimum noktaya göre her bir yarı iletkenin maksimum çalışma noktasındaki akım ve gerilim hesapları yapılmıştır. Optimum çalışma noktasındaki katkı konsantrasyonu ve pilin kalınlığı belirlenmiştir. Katkı konsantrasyonunun ve pilin kalınlığının kısa devre akımına, çıkış voltajına ve verime etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür çalışmalarındaki değerlerle karşılaştırılarak, yapılan çalışmanın literatüre katkısı ve başarı sonuç oranları tespit edilmiştir. Ayrıca DBM modeli ile elde edilen sonuçlar ile DDM modeli ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.1'deki m_0 boş uzaydaki kütlesini temsil etmektedir.Her bir yarı iletkene ait parametreler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

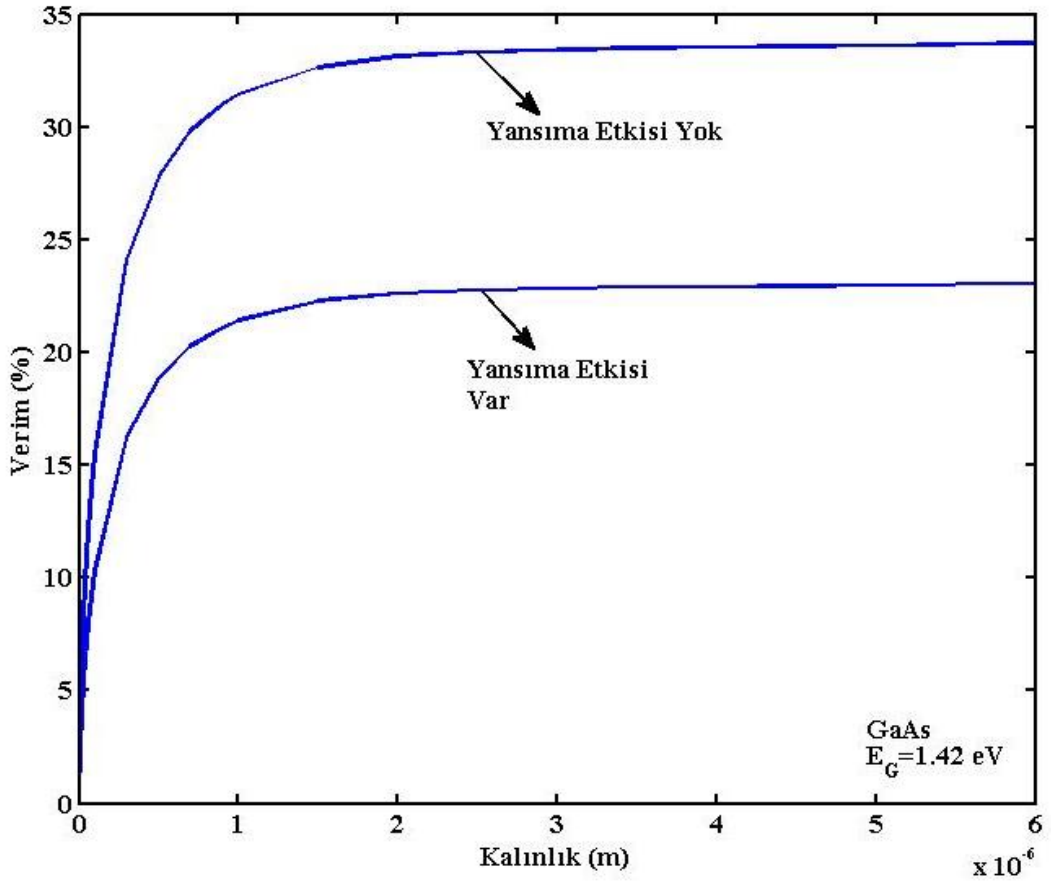
Çizelge 5.1. Si, Ge, GaAs, InP, InGaAs, InGaP, InGaAsP yarı iletkenlerine ait parametreler [45-46]

Malzeme	E_G (eV)	μ_n ($cm^2\ V^{-1}s^{-1}$)	μ_p ($cm^2\ V^{-1}s^{-1}$)	n_i (cm^{-3})	m_n	m_p
Si	1,124	1350	480	1.10^{10}	$0,98m_0$	$0,16m_0$
Ge	0,67	3900	1900	2.10^{13}	$0,33m_0$	$0,043m_0$
GaAs	1,424	5000	400	$2,5.10^{6}$	$0,67m_0$	$0,74m_0$
InP	1,34	5400	200	$1,3.10^{7}$	$0,077m_0$	$0,64m_0$
InGaAs	0,74	6000	290	$6,3.10^{11}$	$0,41m_0$	$0,045m_0$
InGaP	1,88	1945	141	$7,43.10^{4}$	$3\ m_0$	$0,64\ m_0$
InGaAsP	1,10	4445	121	$1,18.10^{9}$	$0,066\ m_0$	$0,55m_0$

5.1. GaAs p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılır. Tek eklem GaAs güneş pili için 117 güneş ışıması altında yapılan bir çalışmada elde edilen verim %29,1 olarak tespit edilmiştir [47]. GaAs güneş pili çok eklemli (multijunction) güneş pili modelinde sıklıkla kullanılır ve çok eklemli güneş pillerinde laboratuvar

şartlarında yaklaşık %40'ın üzerinde verim elde edilmiştir [47]. Güneş pilinin AM1,5 güneş spektrumu altında verim-kalınlık değişimi yansıma hesaplamalara dahilken ve değilken elde edilmiştir. Buna göre tam soğurma 3,5-4,5µm kalınlıkta gerçekleşmektedir. Maksimum verim durumunda kısa devre akım yoğunluğu, açık devre voltajı, doluluk oranı ve minimum kalınlık değerleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur. Şekil 5.1'de DDM ait yansıma etkisinin dahil edildiği ve ihmal edildiği durumlara ait kalınlık verim değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi GaAs güneş pilleri 3-5µm civarında maksimum verime yaklaşmaktadır.



Şekil 5.1. GaAs güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi

Bundan sonra kalınlık artsa bile verimde hemen hemen hiç değişim olmamaktadır. Bu şart sağlandığında pil yüzeyine gelen fotonların tamamına yakını soğurulmaktadır. Bunun nedeni ise $\alpha w \geq 5$ şartının yaklaşık sağlanmış olmasıdır [10,19]. Bu şart sağlandığında pil yüzeyine gelen fotonların tamamına yakını soğurulmaktadır. Mobilitiler sonsuz

varsayıldığı için kalınlıkla verim azalmamaktadır. Yansıma olduğundan güneşten gelen fotonların hepsi soğuralamadığında kısa devre akımı küçük olmaktadır.

Çizelge 5.2. GaAs güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/ cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*	$w_{OPTİMUM}$ *(µm)*
GaAs(Yansıma Etkisi Yok)	33,44	1,14	89,38	33,54	3,5-4,5µm
GaAs(Yansıma Etkisi Var)	22,95	1,13	89,30	22,92	3,5-4,5µm

Detaylı denge modelinde yapılan varsayımlar sebebiyle elde edilen verim yüksektir ve bize hedef verim değerini verir. Pratikte üretimi mevcut olan tek eklemli GaAs güneş pili için akım ve gerilim hesaplamaları drift-difüzyon modeli ile çözüldü, çözüm metodu olarak da sonlu elemanlar yöntemi kullanıldı. Geliştirilen modelin doğru çalıştığının ispatlanması için önce model, literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir analiz edilen güneş pili yapısı Çizelge 5.3'deki gibidir.

Çizelge 5.3. Literatürdeki makale yapısı

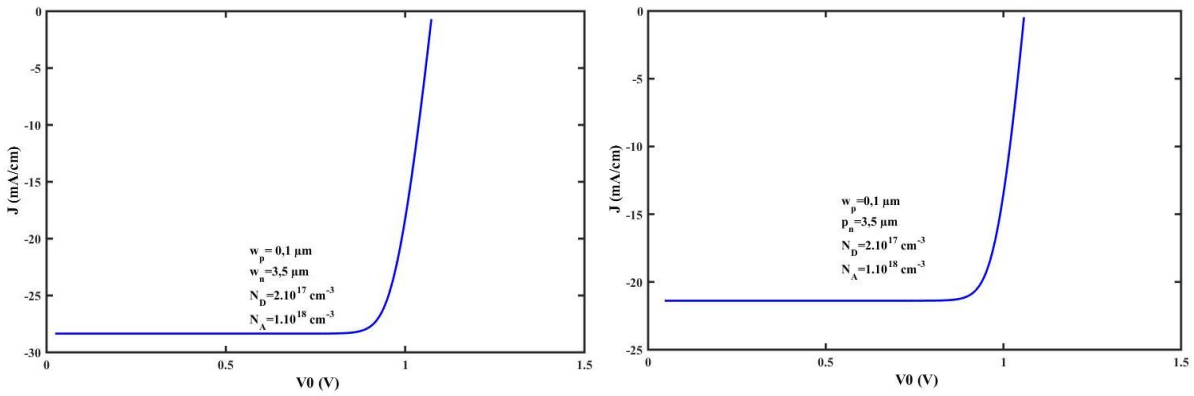
Katman Adı	Katkı Tipi	Kalınlık	Katkı Miktarı
Pencere (Window)	n^+	w_w=0.1µm	$N_w=1.10^{19}cm^{-3}$
Baz Bölgesi	N	w_n=0.1 µm	$N_D=2.10^{18}cm^{-3}$
Emitter bölgesi	P	w_p=3.5 µm	$N_A=1.10^{17}cm^{-3}$
Arka Yüzey (BSF) alanı	p^+	w_{BSF}=0.1 µm	$N_{BSF}=1.10^{19}cm^{-3}$
Alttaş	p		

Çizelge 5.3'deki yapıda asıl güneş pili işlevini gören bölgeler baz ve emiter bölgeleridir. Pencere katmanı yüzey rekombinasyon etkisini azaltmak için kullanılır. BSF katmanı ise taşıyıcıları p-n eklemine itecek bir alan oluşturmayı sağlar. Bazı yapılarda pencere katmanının üzerine yansıma önleyici bir malzeme (ARC) ile kaplanır. Böylece yüzeye gelen fotonların tamamına yakını pil içerisine alınabilir. Bu çalışma ARC varken ve yokken yapı simule edilmiş ve Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, FF ve verim değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	η (%)
GaAs(ARC yokken)	21,38	1,05	84,07	19,0
GaAs(ARC varken)	28,35	1,07	82,30	25,03
GaAs (ARC yokken) [49]	21,55	1,06	83,69	19,17
GaAs(ARC varken) [49]	28,74	1,07	81,79	25,54

Literatürdeki yapıya ait J-V eğrileri Şekil 5.2'de sunulmuştur.

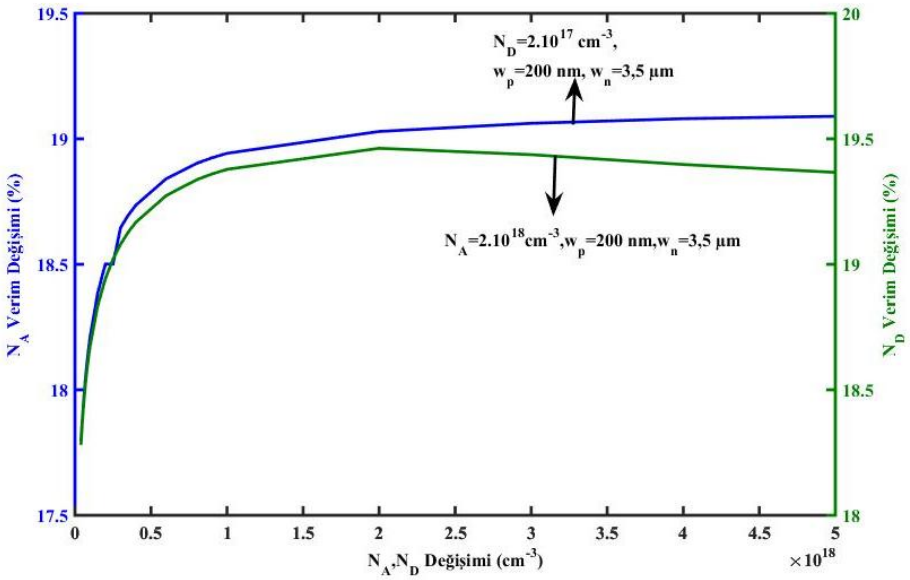


(a) (b)

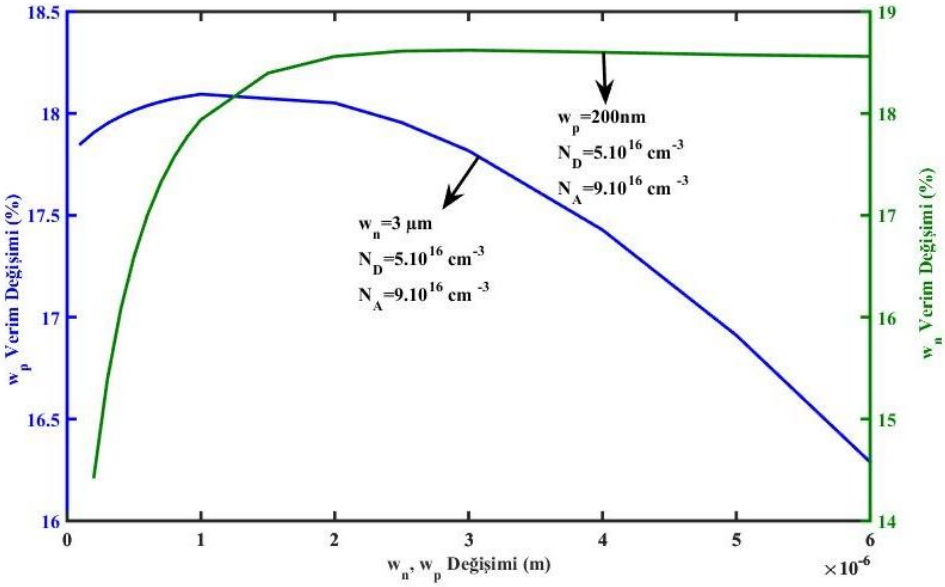
Şekil 5.2. GaAs için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen J-V karakteristikleri (a) ARC varken elde edilen J-V karakteristiği, (b) ARC yokken elde edilen J-V karakteristiği

Modelin doğruluğu test edildikten sonra, katkı konsantrasyonu ve kalınık etkilerini incelemek için; w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi elde edilmiştir. w_n=200µm, w_p=3.5µm'de sabit iken N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil 5.3'deki gibi olmuştur. Bu analizler yapılırken yarı iletkenin çok katkılı ise ince olması gerektiği, kalın olacaksa az katkılı olması gerektiği dikkate alınmıştır. Buradan üstte olan ince baz katmanının 10^{18} mertebelerinde, kalın olan emiter katmanının ise 10^{17} mertebelerinde katkılanmasının yüksek verim sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.4'de verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken wn değişimi verilmiştir. w_p=200nm iken w_n değişimi incelendiğinde yeterli soğurmayı sağlamak için 3-3.5µm'ye kadar artırılması gerektiği görülmüştür. w_n=3µm iken w_p değişimine bakıldığında n-tabakası zaten kalın

olduğu için w_p nm mertebesinde iken yeterli soğurma sağlanmıştır. w_p birkaç yüz nm'nin üzerine çıktığında ise rekombinasyon etkisinden dolayı verim azalmaya başlamıştır.



Şekil 5.3. GaAs güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi

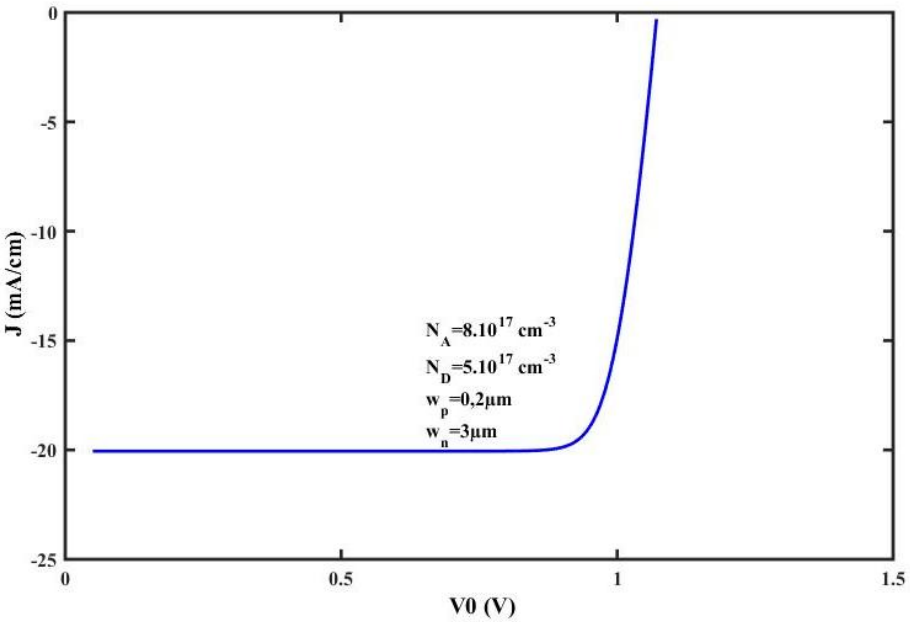


Şekil 5.4. GaAs güneş pili kalınlık verim değişimi

Maksimum verimi sağlayan yapı ve çıkış parametreleri Çizelge 5.5'te sunulmuşur. Bu yapıya ait J-V karakteristiği Şekil 5.5'de görülmektedir.

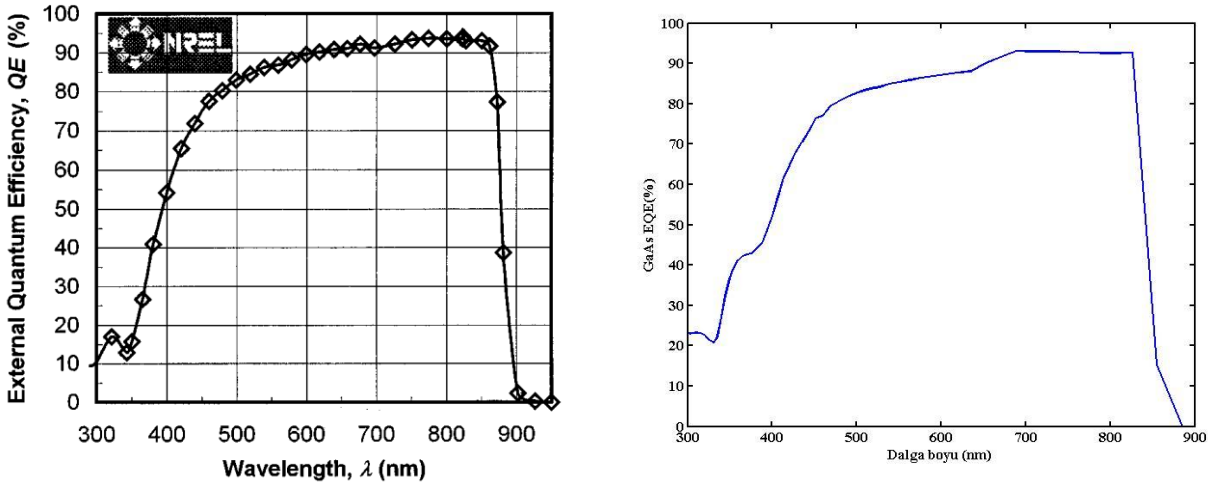
Çizelge 5.5. GaAs güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	w_n *(µm)*	w_p *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η (%)
GaAs	20,7	1,05	84,5	3	0,2	8.10^{17}	5.10^{17}	18.77



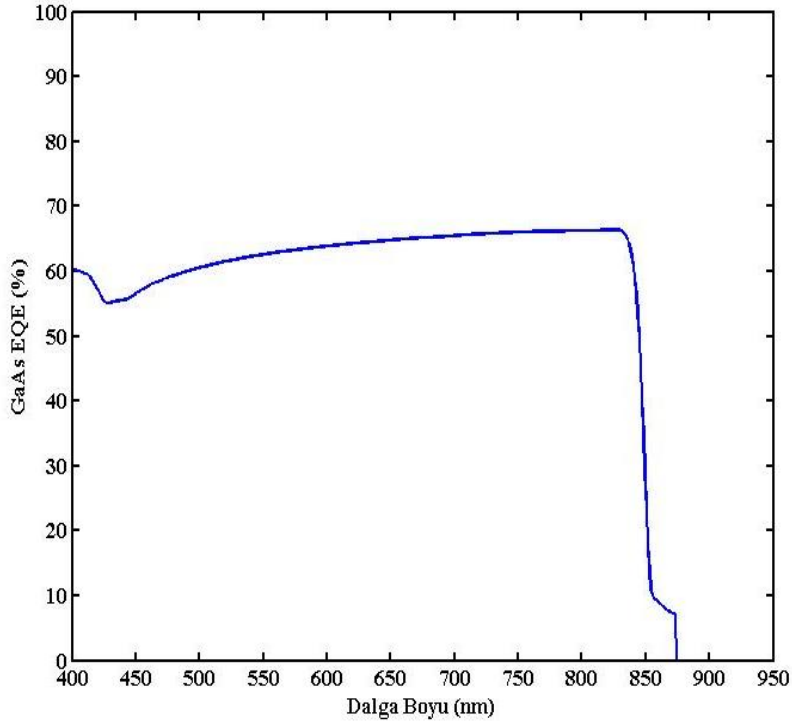
Şekil 5.5. GaAs güneş pili maksimum verim için J-V karakteristiği

Pilin çalışma aralığının ölçütü olan ve üretilen taşıyıcıların yüzde kaçının akıma etkişinin ölçütü olan kuantum verimine ait hesaplamalarda yapıldı. Yapılan hesaplamaların doğruluğunu tespit etmek için literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir. Modelin doğruluğuna ait elde ettiğimiz sonuç ve literatür sonuçu Şekil 5.6'da verilmiştir. Modellediğimiz yapıya ait elde ettiğimiz sonuç Şekil 5.7'de sunulmuştur. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi 300-900 nm arasındaki dalga boyunda pil çalışmaktadır. Şekil 5.6'daki Şekillerin birebir aynı olmama nedenlerinin başında yansıma katsayılarının birebir aynı olmaması gelmektedir.



(a) (b)

Şekil 5.6. GaAs için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga boyu karakteristikleri, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği [50], (b)Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği

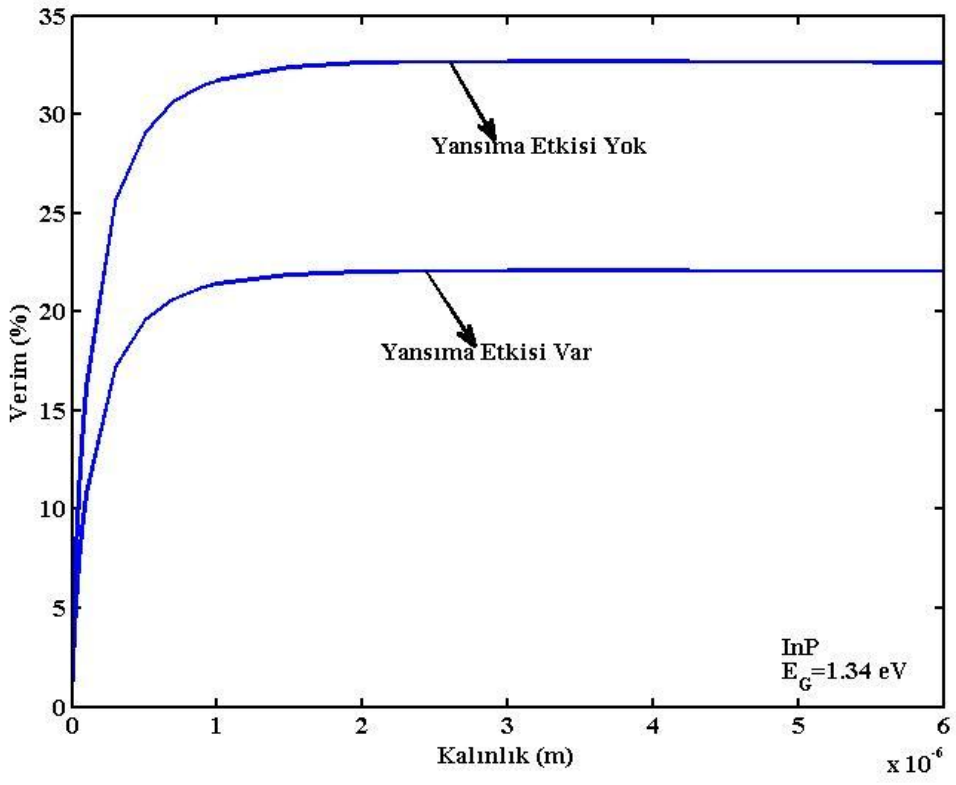


Şekil 5.7. GaAs güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği

5.2. InP p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

InP güneş pili tek eklemli olarak değil daha çok, çok eklemli güneş pili yapımında kullanılmaktadır. InP güneş pilleri üzerine yapılan çalışmalar daha çok uzay uygulamarı içindir. NASA tarafından uzay araştırmalarında kullanılmak üzere GaAs ve INP güneş pilleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar çogunlukla AM0 güneş spektrumu altında yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda INP için çeşitli yapılarda güneş pili modeli geliştirilmiştir. AM0 için yapılan modelin AM1,5 güneş spektrumu altında verim incelemesi yapılmıştır [54].

DBM ile InP güneş pili verim değerleri ile sonuç parametreleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Şekil 5.8'de InP güneş pilinin veriminin kalınlıkla değişimi görülmektedir, elde edilen maksimum verimin olduğu optimum kalınlık tespit edilmiştir Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.8. InP güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi soğurma katsayısı çok küçük olduğu için yaklaşık 3µm civarında maksimum verime yaklaşmıştır.

Çizelge 5.6. InP güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	η (%)	$W_{OPTİMUM}$ *(µm)*
InP (Yansıma Etkisi Yok)	40,78	1,05	88,72	32,67	2,5-3,5µm
InP (Yansıma Etkisi Var)	27,80	1,05	88,66	22,1	2,5-3,5µm

Geliştirilen modelin doğru çalıştığının ispatlanması için önce model, literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir analiz edilen güneş pili yapısı Çizelge 5.7'deki gibidir.

Çizelge 5.7. Literatürdeki makale yapısı

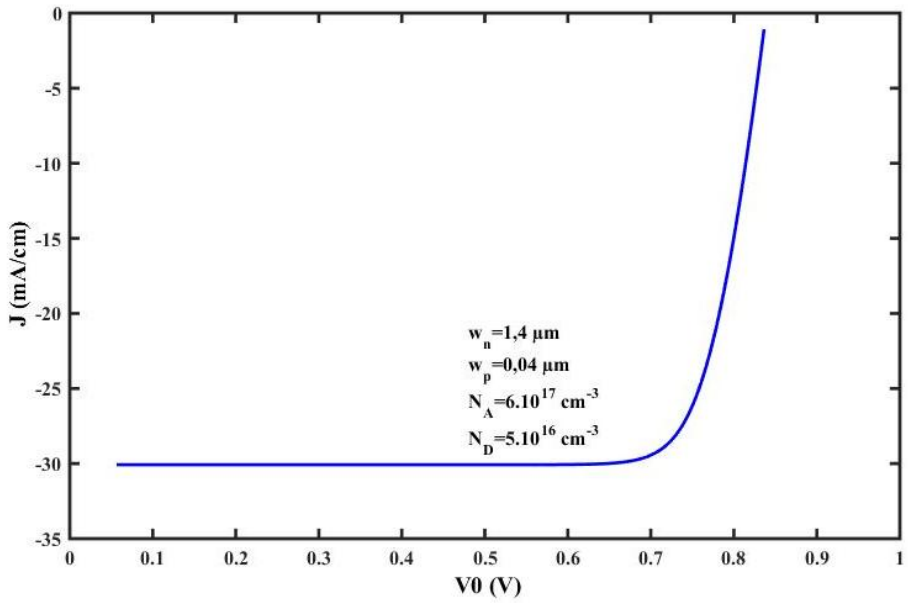
Katman Adı	Katkı Tipi	Kalınlık	Katkı Miktarı
Baz Bölgesi	n	w_n=0.04 µm	$N_D=6.10^{17}cm^{-3}$
Emitter bölgesi	p	w_p=1.5 µm	$N_A=5.10^{16}cm^{-3}$
Arka Yüzey (BSF) alanı	p^+	w_{BSF}=250 µm	$N_{BSF}=5.10^{18}cm^{-3}$
Alttaş	p		

Çizelge 5.3'deki yapıda asıl güneş pili işlevini gören bölgeler baz ve emiter bölgeleridir. Çizelge 5.8'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, FF ve verim değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.8. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları

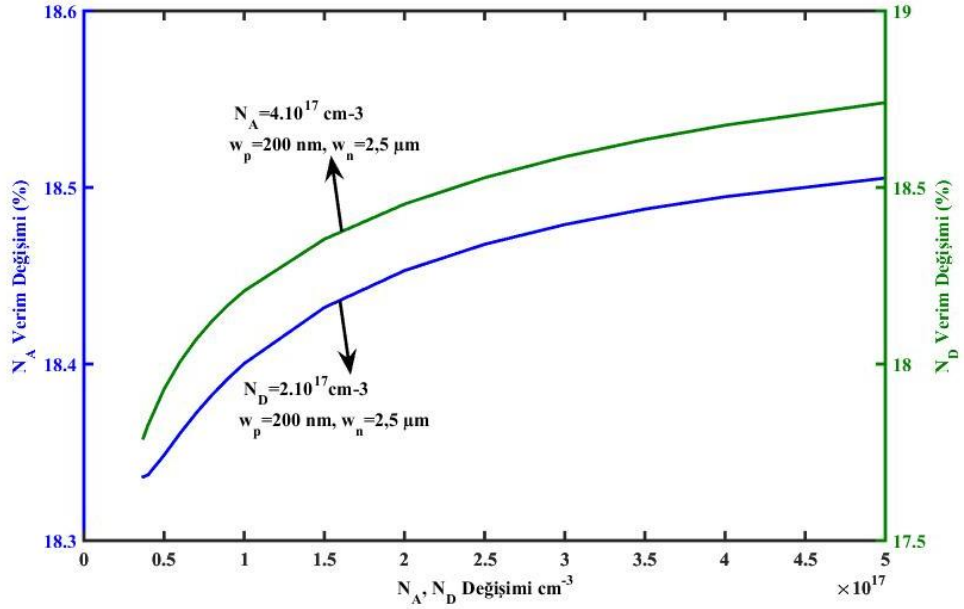
Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	η (%)
InP	30,07	0,837	80,67	20,28
InP makale [51-53]	30,0	0,83	80,0	20,0

Literatürdeki verim değerlerinden daha yüksek verim elde edilmesinin nedenleri AM1,5 güneş spektrumunda olmasıdır. Bütün parametre değerleri verilmediği için parametre farklılığından kaynaklanan verim artışı da olmuştur. InP güneş pili uzay uygulamalarında kullanıldığı için genellikle AM0 spektrumu altında çalışılmıştır. Literatürdeki yapıya ait J-V eğrileri Şekil 5.9'da sunulmuştur.

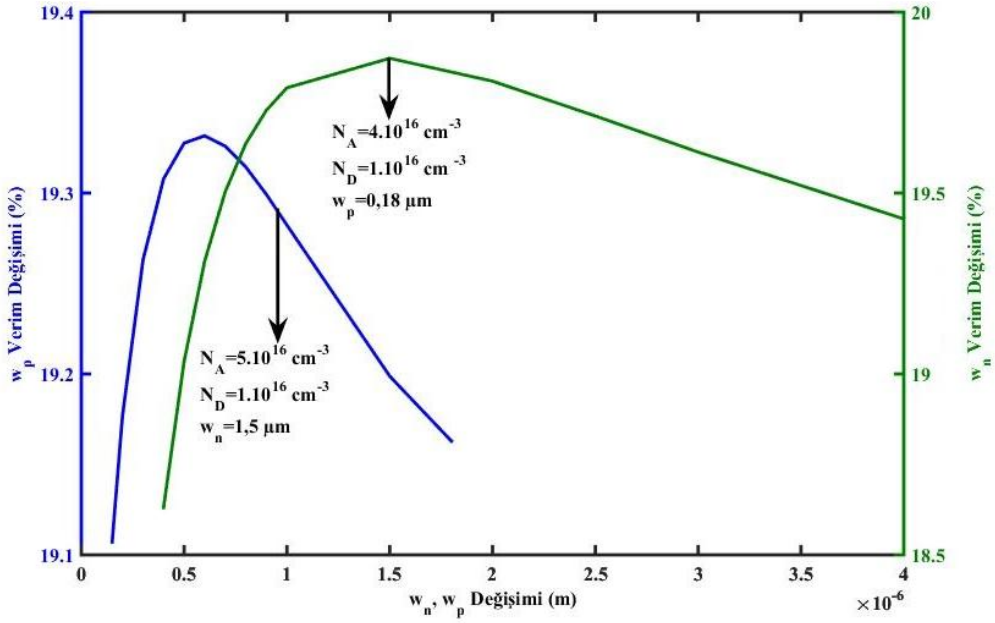


Şekil 5.9. InP için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen J-V karakteristikleri

Modelin doğruluğu test edildikten sonra, katkı konsantrasyonu ve kalınık etkilerini incelemek için; w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi elde edilmiştir. N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil 5.10'deki gibi olmuştur. Bu analizler yapılırken yarı iletkenin çok katkılı ise ince olması gerektiği, kalın olacaksa az katkılı olması gerektiği dikkate alınmıştır. Buradan üstte olan ince baz katmanının 10^{17} mertebelerinde, kalın olan emiter katmanının ise 10^{16} mertebelerinde katkılanmasının yüksek verim sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.11'de verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken w_n değişimi verilmiştir.

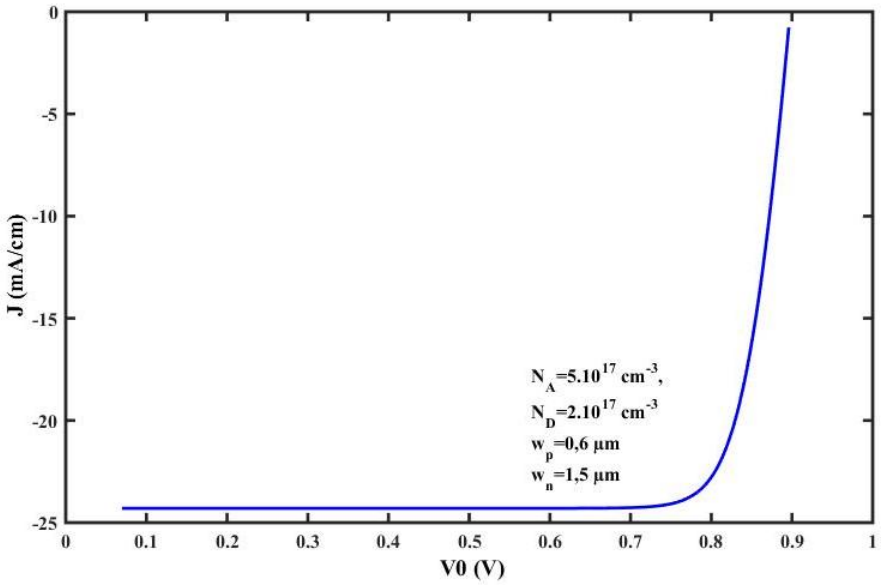


Şekil 5.10. InP Güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi



Şekil 5.11. InP güneş pili kalınlık verim değişimi

Çizelge 5.7.'de görülen katkı konsantrasyonlarıdaki ve kalınlıklardaki optimum değerler tespit edilip, InP güneş piline ait maksimum verim elde edilmiştir. Maksimum verime ait J-V karakteristiği Şekil 5.12.'de, maksimum verim çıkış değerleri ise Çizelge 5.9'da verilmiştir.

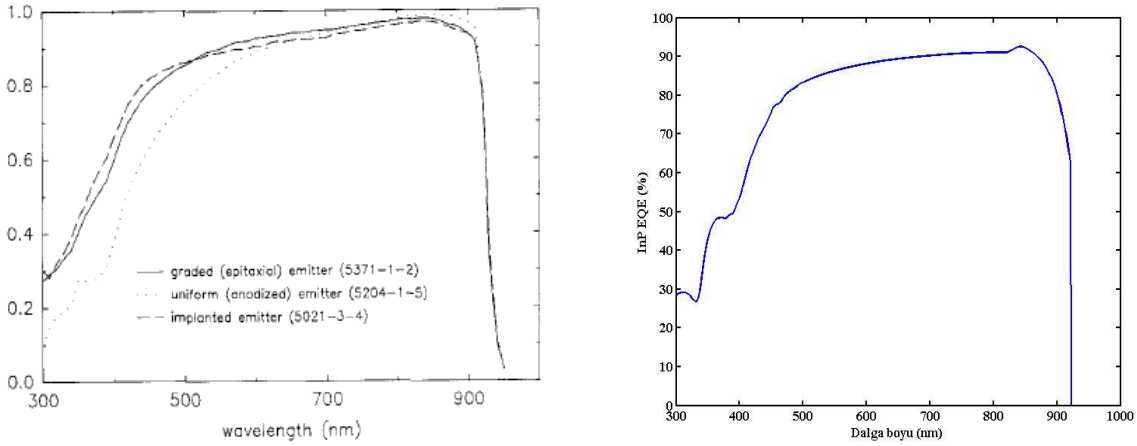


Şekil 5.12. InP güneş pili maksimum verim J-V karakteristiği

Çizelge 5.9. InP güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

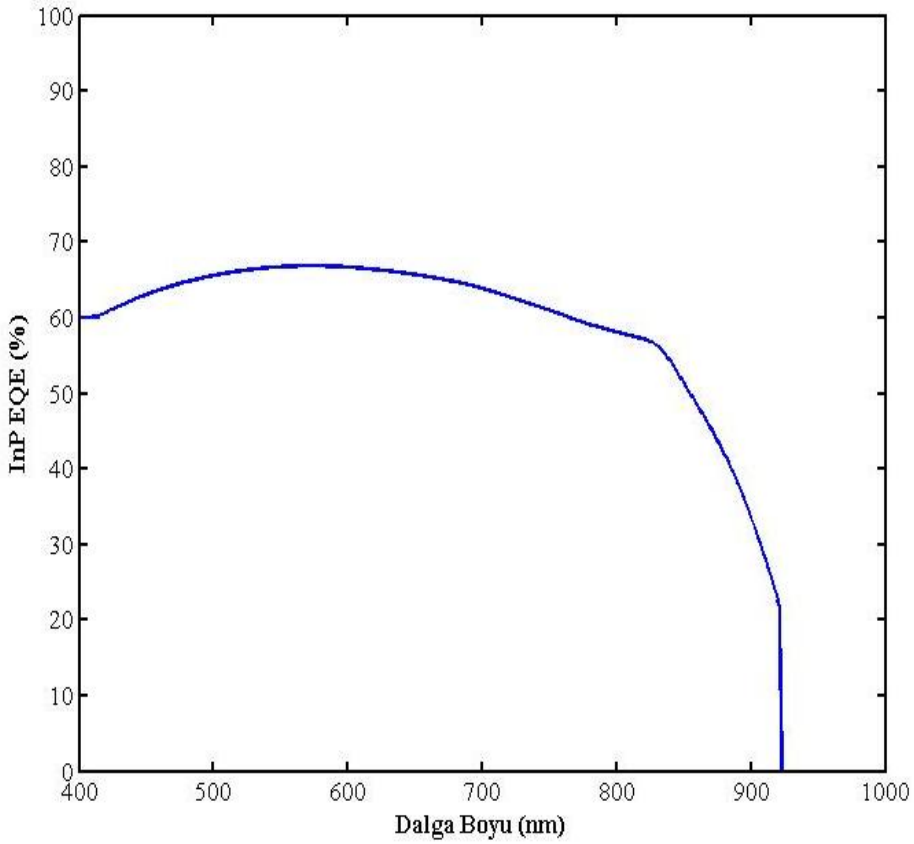
Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	w_p *(µm)*	W_n *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η (%)
InP	24,29	0,896	82,9	0,6	1,5	5.10^{17}	2.10^{17}	19,1

Şekil 5.13'de literatür de elde edilen EQE-dalga boyu grafiği ile literatürdeki değerleri kullanarak elde ettiğimiz EQE grafikleri verilerek karşılaştırılmıştır. Oluşan farkın nedeni literatürdeki pilde çift karlı ARC kullanılması ve yansıma katsayılarının birebir aynı olmamasıdır. Şekil 5.14'de modellediğimiz InP güneş pilinin çalışabileceği dalga boyu aralığı ile bu aralıktaki kuantum verimi verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 5.13. InP için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga boyu karakteristikleri, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği [53], (b) Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği



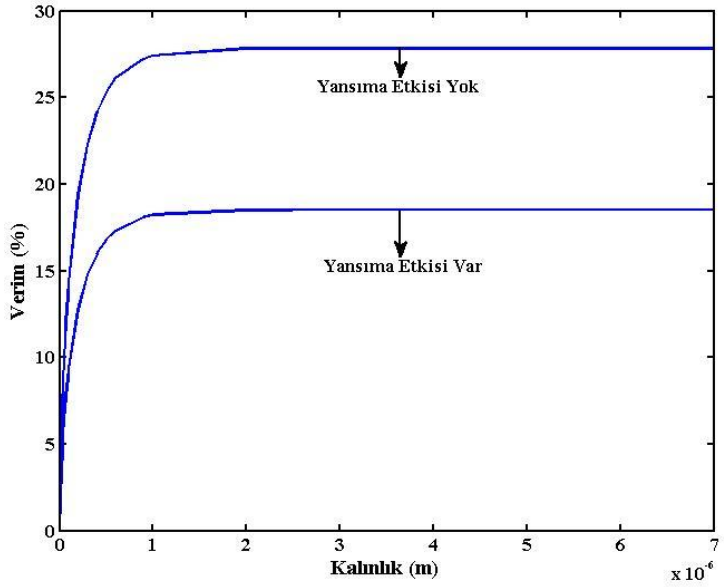
Şekil 5.14. InP güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği

5.3. InGaP p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

InGaP güneş pilinin yasak bant aralığı (E_G=1,88eV) çok yüksek olduğu için tek eklemli güneş pili olarak değil, daha çok, çok eklemli güneş pillerinde üst alttaş olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerjili fotonları soğurduğu için düşük enerjili fotonlardan dolayı verim kayıpları olmaktadır. Bundan dolayı da daha çok, çok eklemli güneş pili tasarımında kullanılmaktadır. Çok eklemli olarak kullanıldığında elde edilen verim %40-46 arasında olmaktadır [47]. Tek eklemli olarak literatürde elde edilen verim %20.8'dir [55]. DBM ile kalınlık verim grafiği Şekil 5.15'de verilmiştir. Ayrıca maksimum verime ait sonuç değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. InGaP güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı, kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	η (%)	$w_{OPTİMUM}$ *(µm)*
InGaP(Yansıma Etkisi Yok)	27,81	1,5880	91,78	27,8	2µm
InGaP(Yansıma Etkisi var)	12,91	1,577	91,77	18,05	2 µm



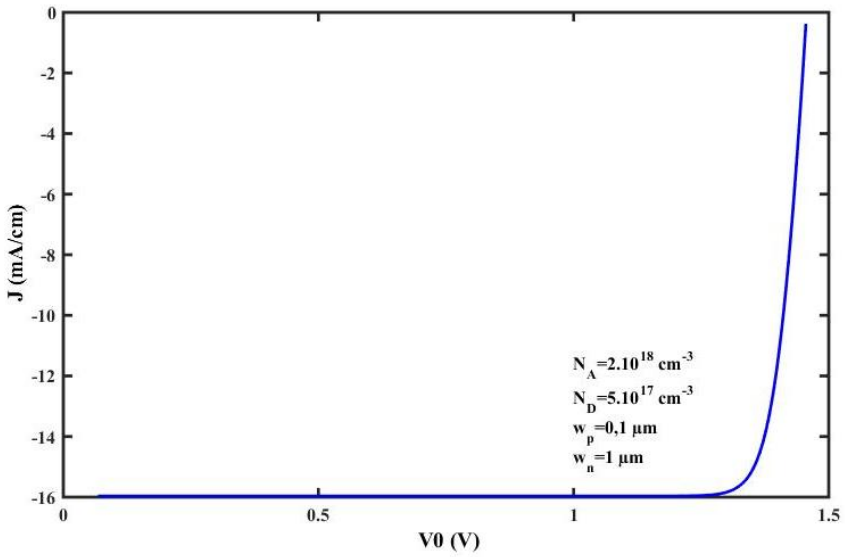
Şekil 5.15. InGaP güneş pili detaylı denge verim kalınlık değişimi

Geisz ve arkadaşları tarafından 2013 yılında yayınlanan makalede tek eklemli GaInP güneş piline ait verimi %20,8 olarak vermişlerdir [55]. Geliştirilen modelin doğru çalıştığının ispatlanması için önce model, literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir analiz edilen güneş pili yapısı Çizelge 5.11'deki gibidir.

Çizelge 5.11. Literatürdeki makale yapısı

Katman Adı	Katkı Tipi	Kalınlık	Katkı Miktarı
Pencere (Window)	n^+	w_w=0.02 µm	
Baz Bölgesi	n	w_n=0.03 µm	N_D=$2.10^{18}cm^{-3}$
Emitter bölgesi	p	w_p=1 µm	N_A=$5.10^{17}cm^{-3}$
Arka Yüzey (BSF) alanı	p^+	w_{BSF}=0.2 µm	
Alttaş	p		

Çizelge 5.11'deki yapıda asıl güneş pili işlevini gören bölgeler baz ve emiter bölgeleridir. Çizelge 5.12'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, FF ve verim değerleri elde edilmiştir. Literatürdeki yapıya ait J-V eğrileri Şekil 5.16'da sunulmuştur.



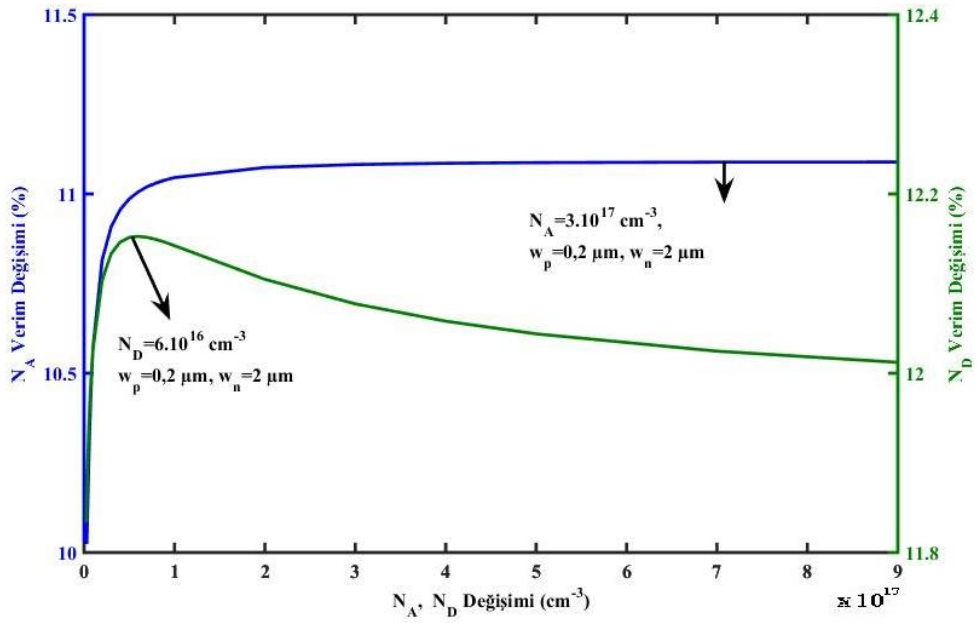
Şekil 5.16. InGaP için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen J-V karakteristikleri

Çizelge 5.12. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları

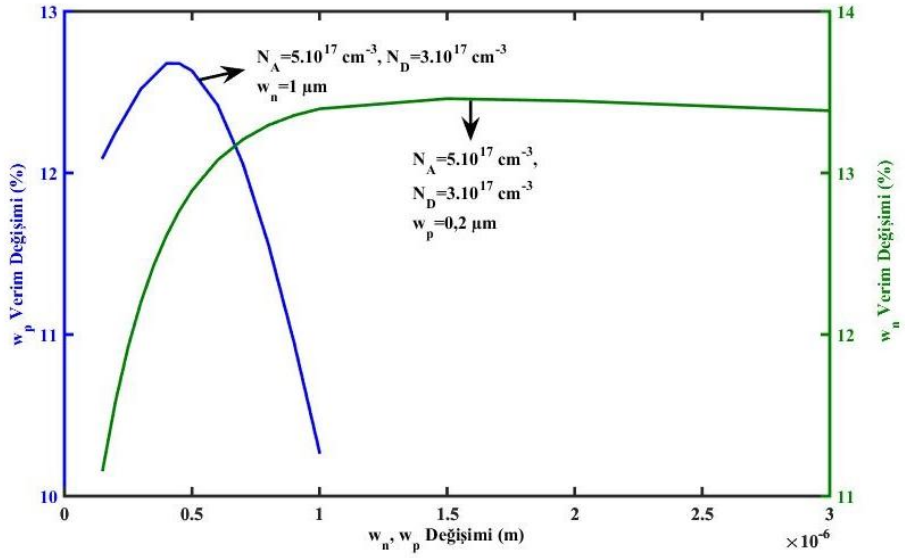
Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	η (%)
InGaP	15,9	1,45	89,1	20,6
InGaP(makale) [55]	16	1,455	89,3	20,8

Literatürdeki sonuç ile bulduğumuz verim sonucu arasındaki farkın nedenleri şunlardır;
1.Güneş pili tasarımında kullanılan tüm parametrelerin verilmemesi.
2. Kullandıkları malzemeye ait tüm özelliklerden bahsedilmemesi.

Bu gibi nedenlerden dolayı verim farkı oluşmaktadır. Modelin doğruluğu test edildikten sonra, katkı konsantrasyonu ve kalınlık etkilerini incelemek için; w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi elde edilmiştir. N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil 5.17'deki gibi olmuştur. Buradan üstte olan ince baz katmanının 10^{17} mertebelerinde, kalın olan emiter katmanının ise 10^{16} mertebelerinde katkılanmasının yüksek verim sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.18'de verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken w_n değişimi verilmiştir.



Şekil 5.17. InGaP Güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi

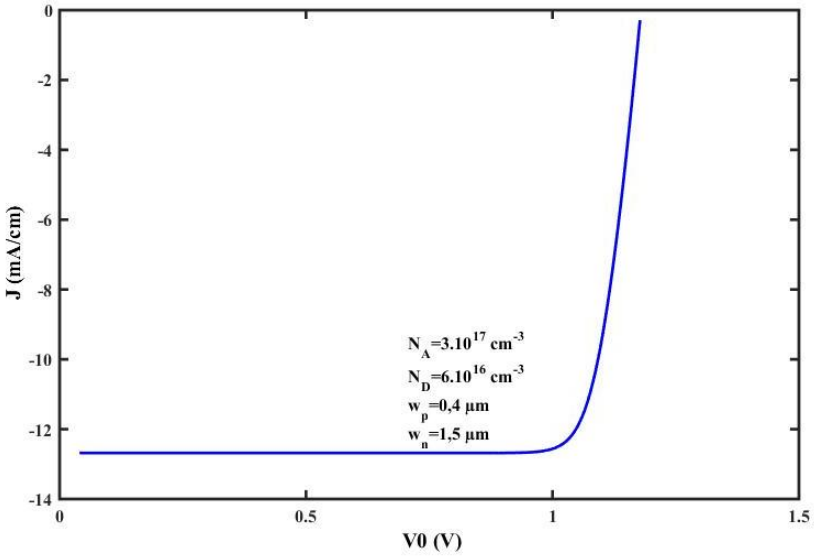


Şekil 5.18. InGaP güneş pili kalınlık verim değişimi

Her bir değişimde verimin maksimum olduğu noktaya ait pil parametreleri tespit edilmiştir.Maksimum verimi sağlayan yapı ve çıkış parametreleri Çizelge 5.13'te sunulmuştur. Bu yapıya ait J-V karakteristiği Şekil 5.19'da görülmektedir.

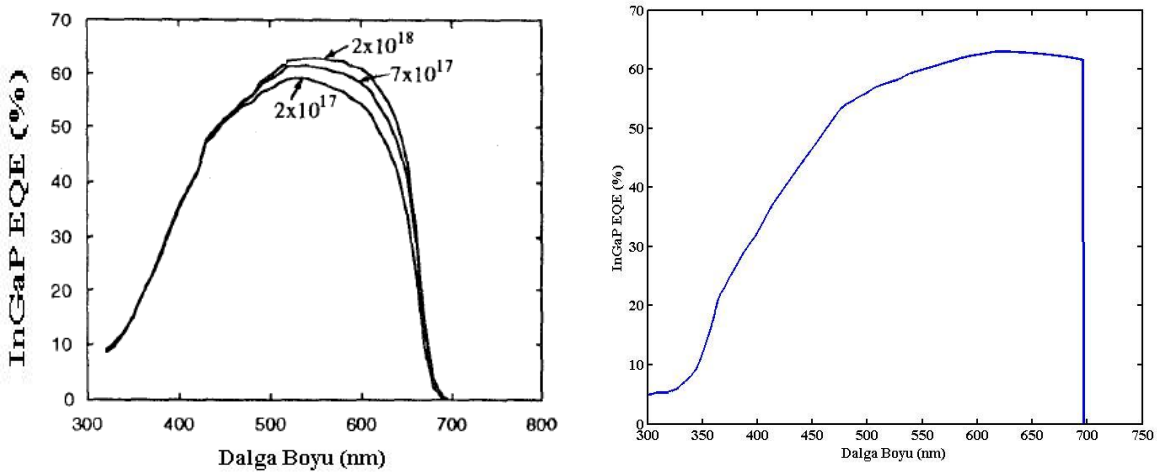
Çizelge 5.13. InGaP güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	FF (%)	w_p *(µm)*	w_n *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η (%)
InGaP	12,6	1,17	84,92	0,4	1,5	3.10^{17}	6.10^{16}	13,40



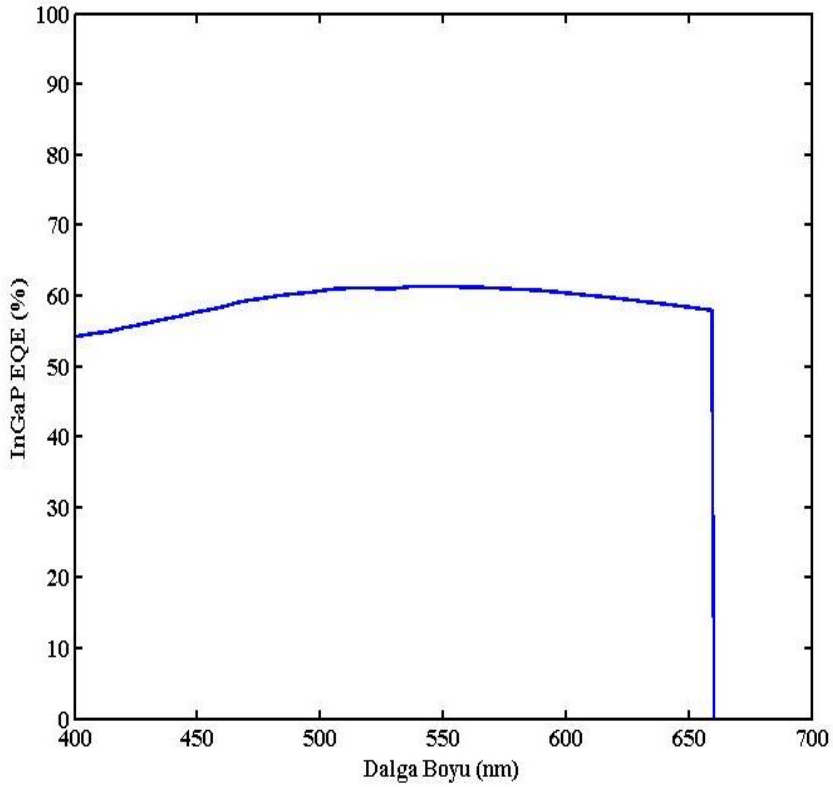
Şekil 5.19. InGaP güneş pili maksimum verim J-V karakteristiği

Pilin çalışma aralığının ölçütü olan ve üretilen taşıyıcıların yüzde kaçının akıma etkişinin ölçütü olan kuantum verimine ait hesaplamalarda yapıldı. Yapılan hesaplamaların doğruluğunu tespit etmek için literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir. Modelin doğruluğuna ait elde ettiğimiz sonuç ve literatür sonuçu Şekil 5.20'de verilmiştir. Modellediğimiz yapıya ait elde ettiğimiz sonuç Şekil 5.21'de sunulmuştur. Şekil 5.21'de görüldüğü gibi 300-900 nm arasındaki dalga boyunda pil çalışmaktadır. Şekil 5.20'daki şekillerdeki farkın nedeni literatürdeki pilde çift karlı ARC kullanılması ve yansıma katsayılarının birebir aynı olmamasıdır.



(a) (b)

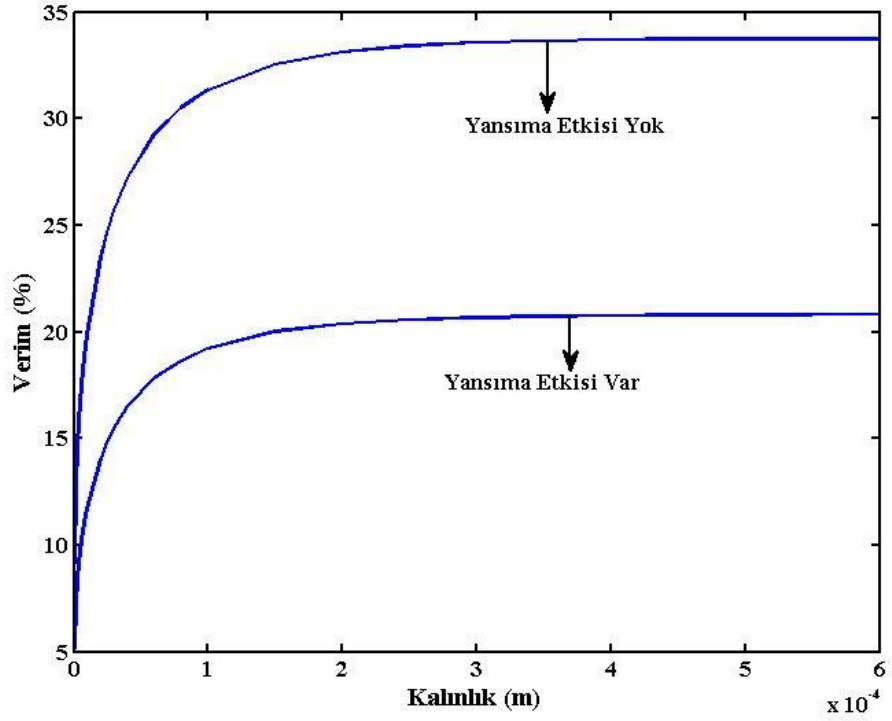
Şekil 5.20. InGaP için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği [56], (b) Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği



Şekil 5.21. InGaP güneş pili EQE-Dalga boyu karakteristiği

5.4. Silisyum p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

Silisyum elektriksel, optiksel ve yapısal özelliklerinin uzun süre değişmemesi ve silisyum üretim teknolojisinde elde edilen büyük başarılar bu malzemenin en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır. Oksijenden sonra yeryüzünde en çok bulunan element olan silisyumun bulunma biçimi kum ve kuartzdır. Kumun saflık derecesi çok düşük olduğundan kullanılmaya uygun değildir. Ancak kuartzın %90'ı silisyumdur [57]. 1998 yılında yapılan bir çalışmada petek desen dış kaplama modeli ile mono kristal silisyum güneş pillerinde %24,4 verim elde edilmiştir [58]. Kristal silisyum heterojunction teknolojisi ile silisyum güneş pillerinde %25,6 verim elde edilmiştir [58].Yaklaşık 100 güneş altında silisyum güneş pillerinde %27,6 verim elde edilmiştir [60]. DBM'yi kullanılarak silisyum yarı iletkeni ile elde edilen verim sonuçları Çizelge 5.14'te verilmiştir. DBM'ye göre optimum kalınlık belirlemek için çizilen kalınlık-verim değişim grafiği Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22. Silisyum güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi

Silisyum yarı iletkeninin soğurma katsayısı yüksek olduğu için güneş pili kalınlığı diğer güneş pillerine oranla daha fazladır. Silisyum güneş pili kalınlığı yaklaşık olarak 400μm civarında optimum kalınlığa ve maksimum verime ulaşmaktadır. Maksimum verim ve diğer sonuç değerleri Çizelge 5.14.'de görülmektedir.

Çizelge 5.14. Silisyum güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim,doluluk oranı, kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*	$w_{OPTİMUM}$ *(μm)*
Silicon(Yansıma Etkisi yok)	46,35	0,8312	86,44	32,97	400
Silicon(Yansıma Etkisi var)	29,06	0,8191	86,29	20,34	400

Modelin doğru çalıştığının ispatlanması için önce model, literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir analiz edilen güneş pili yapısı Çizelge 5.15'deki gibidir.

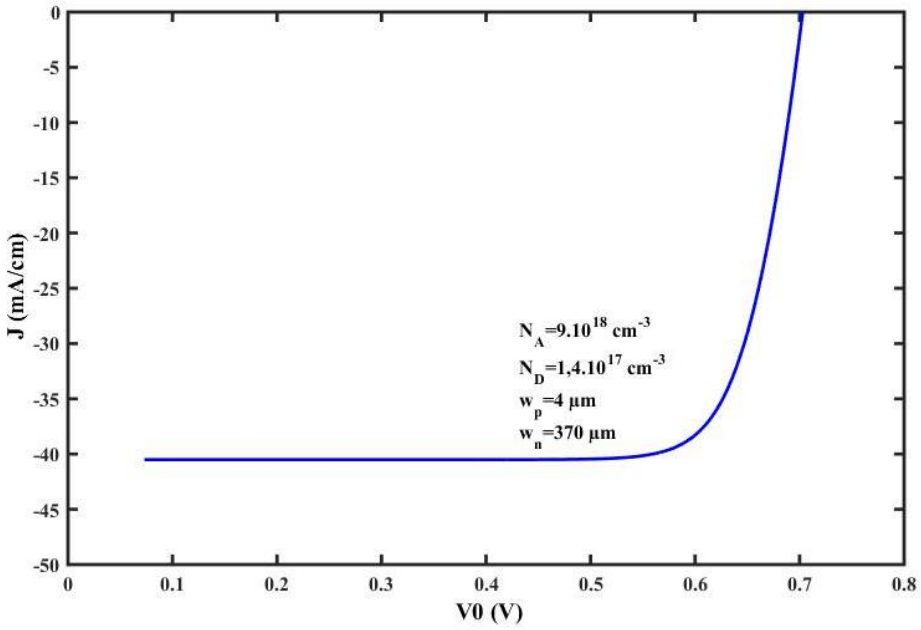
Çizelge 5.15. Literatürdeki makale yapısı

Katman Adı	Katkı Tipi	Kalınlık	Katkı Miktarı
Baz Bölgesi	n	w_n=2 µm	N_D=5.$10^{18}$$cm^{-3}$
Emitter bölgesi	p	w_p=350 µm	N_A=5.$10^{17}$$cm^{-3}$
Arka Yüzey (BSF) alanı	p^+	w_{BSF}=5 µm	N_{BSF}=5.$10^{19}$$cm^{-3}$
Alttaş	p		

Bu çalışma Çizelge 5.16'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, FF ve verim değerleri elde edilmiştir. Literatürdeki yapıya ait J-V eğrileri Şekil 5.23'de sunulmuştur.

Çizelge 5.16. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları

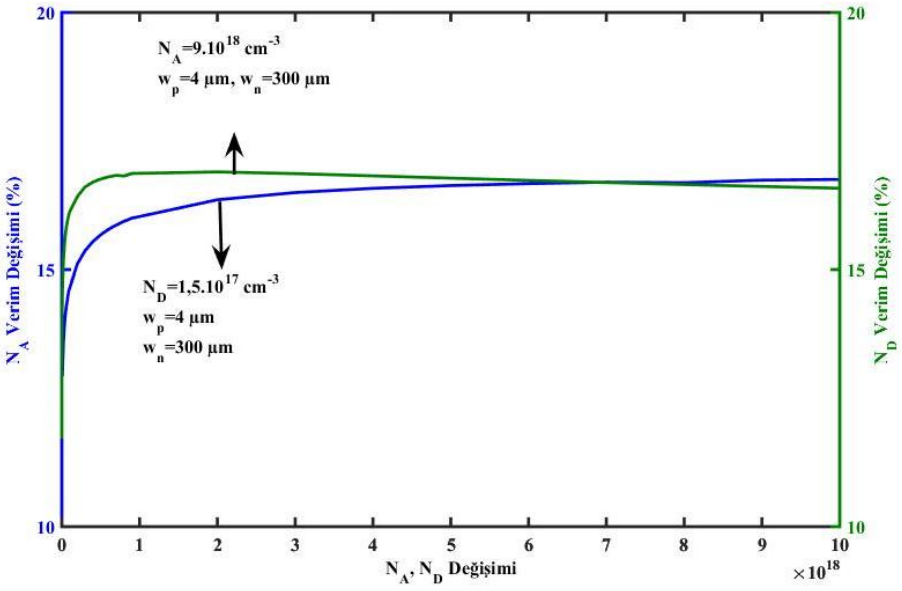
Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*
Si	40,50	0,702	80,8	22,97
Si makale [60]	40,3	0,700	80,8	22,8



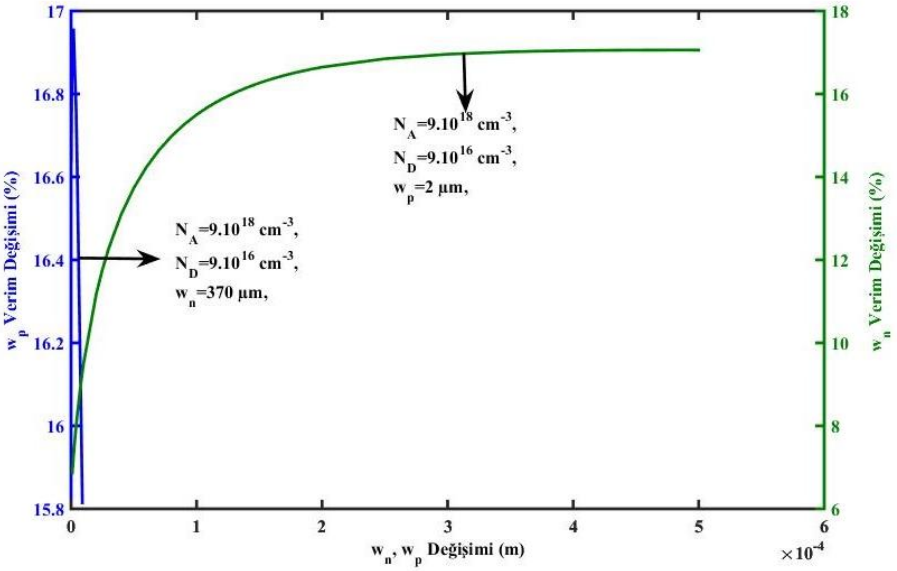
Şekil 5.23. Silisyum için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen J-V karakteristiği

Modelin doğruluğu test edildikten sonra, katkı konsantrasyonu ve kalınık etkilerini incelemek için; w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi elde edilmiştir. w_n=2µm, w_p=300µm'de sabit iken N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil

5.25'deki gibi olmuştur. Bu analizler yapılırken yarı iletkenin çok katkılı ise ince olması gerektiği, kalın olacaksa az katkılı olması gerektiği dikkate alınmıştır. Buradan üstte olan ince baz katmanının 10^{18} mertebelerinde, kalın olan emiter katmanının ise 10^{17} mertebelerinde katkılanmasının yüksek verim sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.26'da verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken wn değişimi verilmiştir. w_p=200nm iken w_n değişimi incelendiğinde yeterli soğurmayı sağlamak için 300-400µm'ye kadar artırılması gerektiği görülmüştür. w_n=350µm iken w_p değişimine bakıldığında n-tabakası zaten kalın olduğu için w_p nm mertebesinde iken yeterli soğurma sağlanmıştır. w_p birkaç yüz µm'nin üzerine çıktığında ise rekombinasyon etkisinden dolayı verim azalmaya başlamıştır.



Şekil 5.24. Silisyum güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi

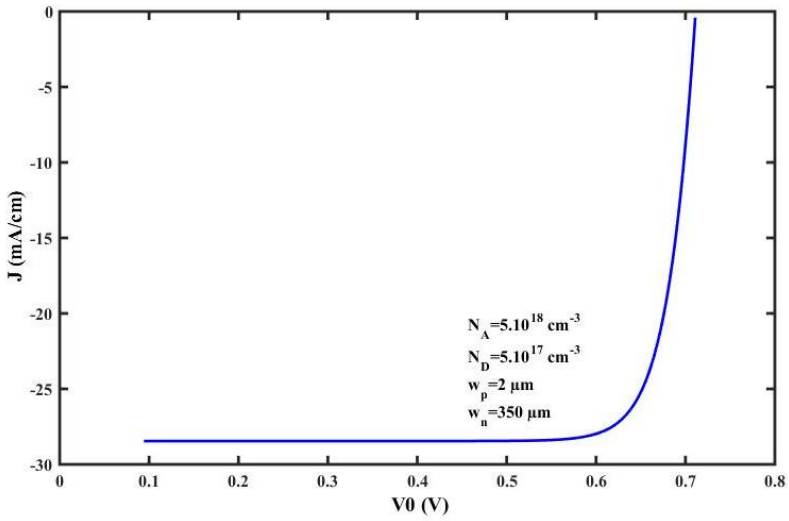


Şekil 5.25. Silisyum güneş pili kalınlık verim değişimi

Maksimum verimi sağlayan yapı ve çıkış parametreleri Çizelge 5.18'te sunulmuşur. Bu yapıya ait J-V karakteristiği Şekil 5.26'de görülmektedir.

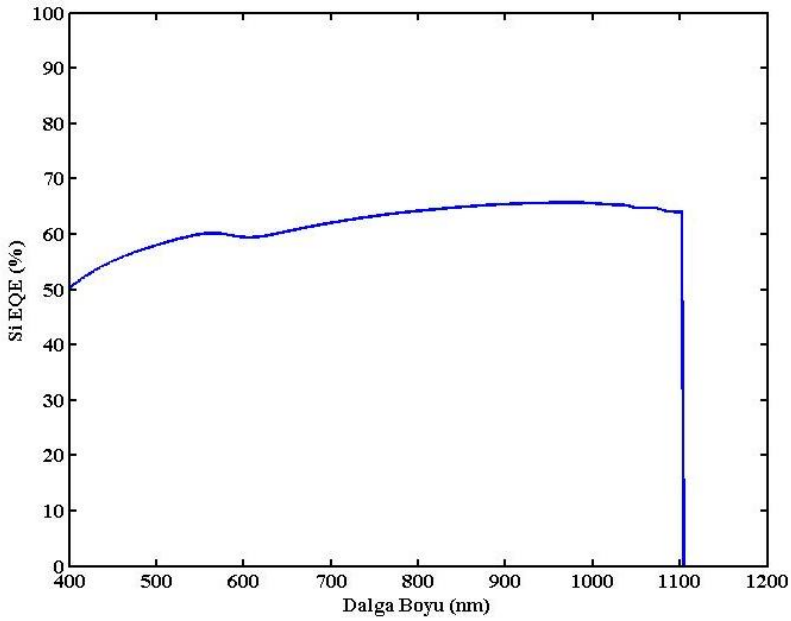
Çizelge 5.17. Silisyum güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	w_n *(µm)*	w_p *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η *(%)*
Si	28,45	0,71	84,1	350	2	5.10^{18}	5.10^{17}	17,15
Si(ARC)	38.88	0.748	84.6	350	2	5.10^{18}	5.10^{17}	23.27



Şekil 5.26. Silisyum güneş pili maksimum verim J-V karakteristiği

Şekil 5.27'de yaptığımız pilin çalışma dalga boyunun ölçütü olan kuantum verimine ait EQE dalga boyu verilmiştir. Şekil 5.28'de görüldüğü gibi 300-1100 nm arasındaki dalga boyunda pil çalışmaktadır. Yani pilimiz E_G<1,12eV değerlerde çalışmamaktadır.



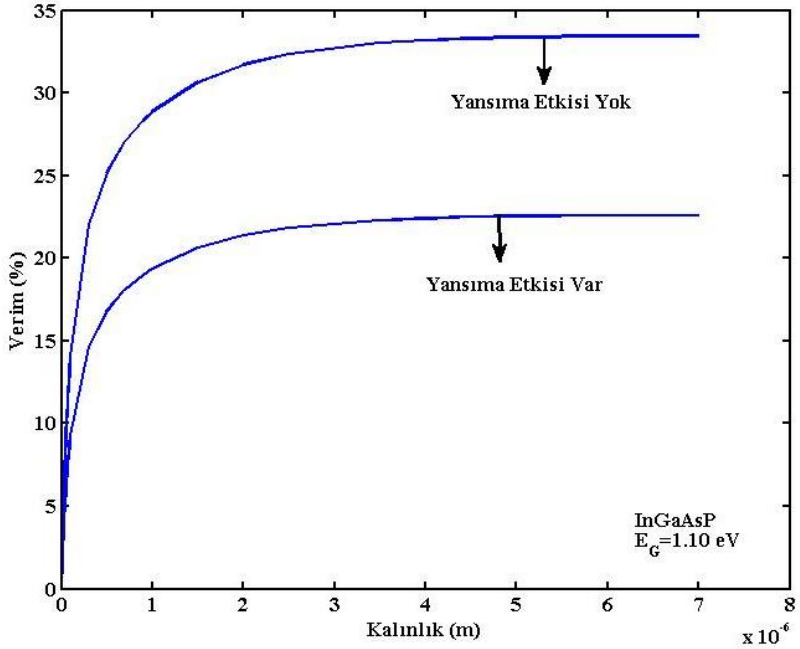
Şekil 5.27. Si güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği

5.5 InGaAsP p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

$In_{0.47}Ga_{0.53}As_{0.35}P_{0.65}$ güneş pili daha çok son nesil güneş pili modellemesinde kullanılmaktadır. Bileşik olması ve üretiminin zor olması nedeniyle tek eklemli güneş pili üretiminde tercih edilmeyen bir yarı iletkendir. Tek güneş altında AM1,5 spektrumunda tek eklemli $In_{0.78}Ga_{0.22}As_{0.48}P_{0.52}$ pilinde verim %18,8 olarak elde edilmiştir [62]. E_G'si silisyum güneş piline yakın olmasına rağmen absorption katsayısı küçük olduğu için daha ince bir şekilde tasarlanmaktadır. Detaylı denge modeli ile kalınlık verim grafiği Şekil 5.28'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi yaklaşık olarak 6µm civarında maksimum verim elde edilmiştir. Bu kalınlıkta pile ait akım, açık devre gerilimi ve doluluk oranı değerleri Çizelge 5.18'da verilmiştir.

Çizelge 5.18. $In_{0.47}Ga_{0.53}As_{0.35}P_{0.65}$ güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı (FF), kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*	$w_{OPTİMUM}$ *(µm)*
InGaAsP(Yansıma Etkisi Yok)	53,05	0,7514	85,32	33,37	5
InGaAsP(Yansıma Etkisi Var)	36,38	0,7416	85,23	22,5	5



Şekil 5.28. InGaAsP güneş pili detaylı denge verim kalınlık değişimi

Lian ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptığı $In_{0.78}Ga_{0.22}As_{0.48}P_{0.52}$ piline ait yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri verim %18.8'dir [62]. Makalede verilen parametreleri kullanarak yaptığımız model, literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir analiz edilen güneş pili yapısı Çizelge 5.19'daki gibidir.

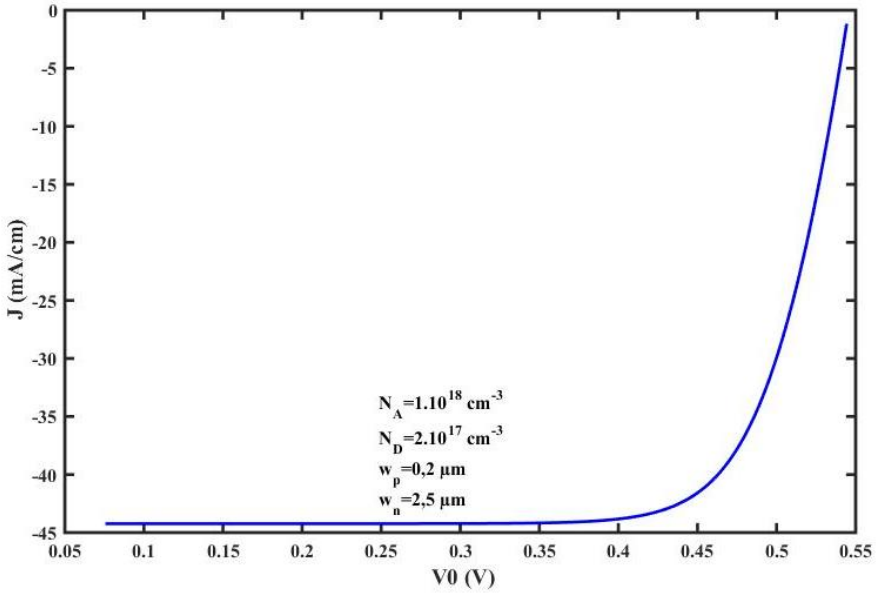
Çizelge 5.19. Literatürdeki makale yapısı

Katman Adı	Katkı Tipi	Kalınlık	Katkı Miktarı
Pencere (Window)	n^+	w_w=0.03µm	$N_w=3.10^{18}cm^{-3}$
Baz Bölgesi	n	w_n=0.2 µm	$N_D=2.10^{18}cm^{-3}$
Emitter bölgesi	p	w_p=2.5 µm	$N_A=1.10^{17}cm^{-3}$
Arka Yüzey (BSF) alanı	p^+	w_{BSF}=0.3 µm	$N_{BSF}=3.10^{18}cm^{-3}$
Alttaş	p		

Çizelge 5.20'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, FF ve verim değerleri elde edilmiştir. Literatürdeki yapıya ait J-V eğrileri Şekil 5.29'da sunulmuştur.

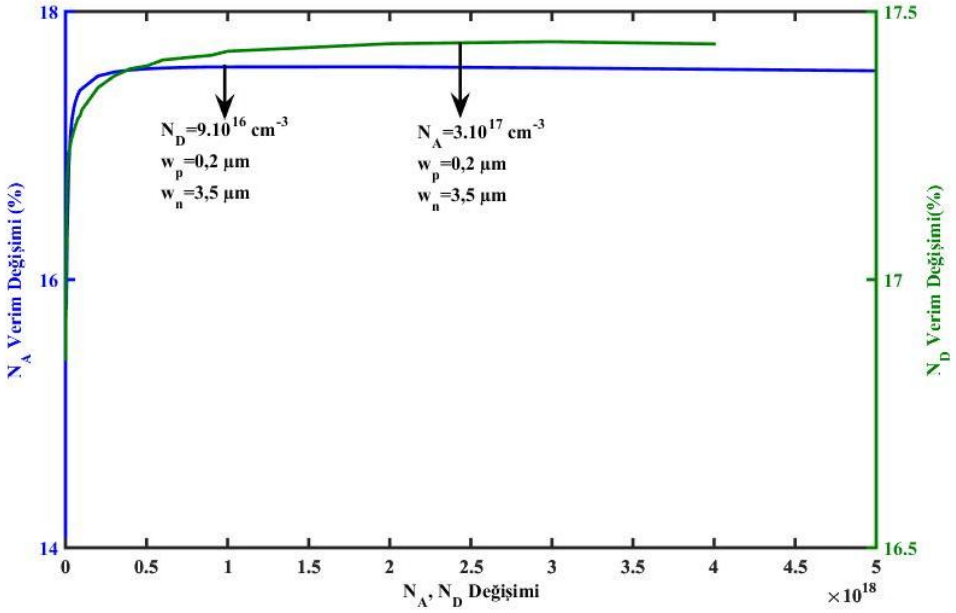
Çizelge 5.20. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları

Malzeme	J_{SC} (mA/cm^{-2})	V_{0C} (mV)	FF $(\%)$	η $(\%)$
InGaAsP	44,23	0,544	77,77	18,69
InGaAsP (makale) [62]	44,51	0,545	77,3	18,8

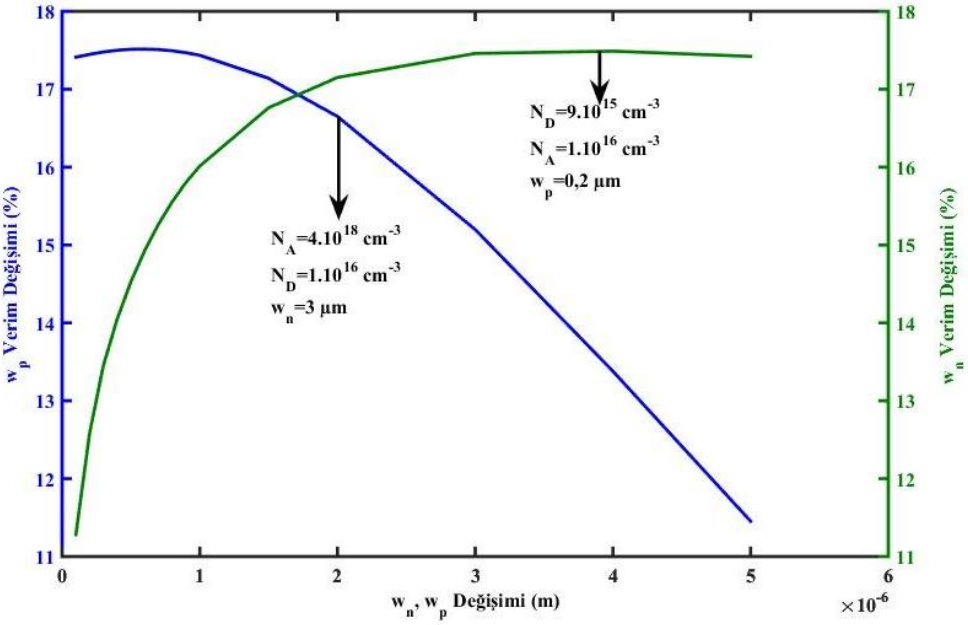


Şekil 5.29. Literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen J-V karakteristikleri

Modelin doğruluğu test edildikten sonra, katkı konsantrasyonu ve kalınık etkilerini incelemek için; w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi elde edilmiştir. N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil 5.30'deki gibi olmuştur. Buradan üstte olan ince baz katmanının 10^{18} mertebelerinde, kalın olan emiter katmanının ise 10^{17} mertebelerinde katkılanmasının yüksek verim sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.31'de verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken wn değişimi verilmiştir.

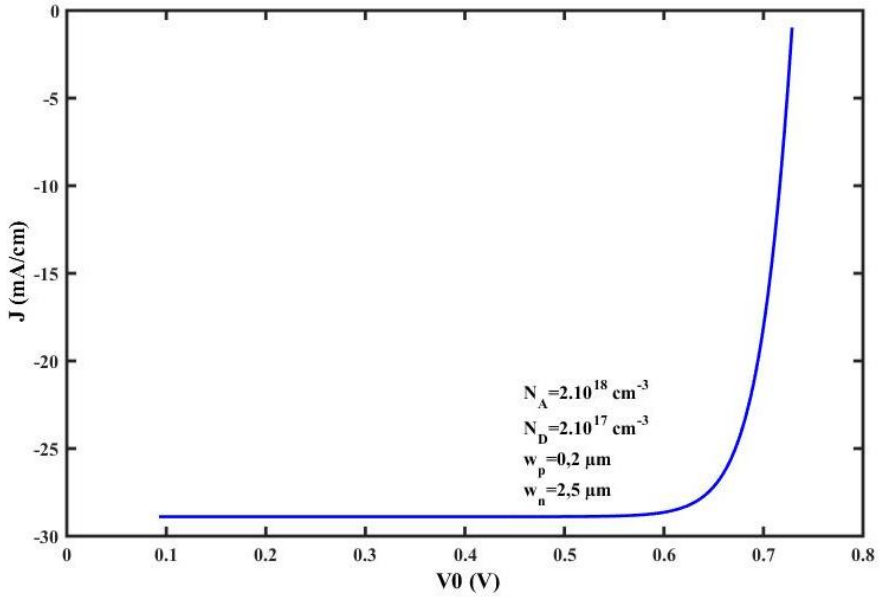


Şekil 5.30. InGaAsP güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi



Şekil 5.31. InGaAsP güneş pili kalınlık verim değişimi

Elde edilen maksimum verimlere ait parametreleri kullanarak maksimum verimi sağlayan yapı ve çıkış parametreleri Çizelge 5.21'te sunulmuşur. Bu yapıya ait J-V karakteristiği Şekil 5.32'de görülmektedir.

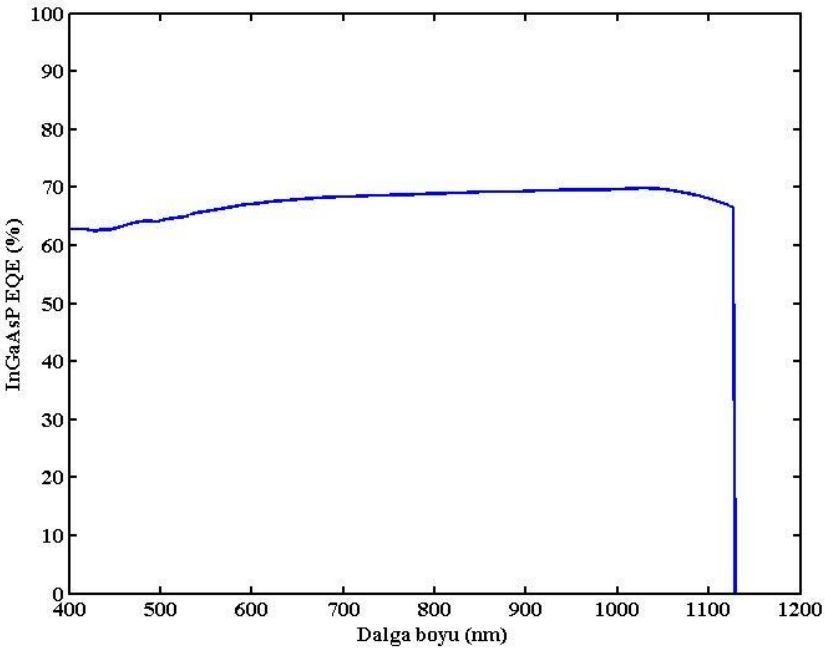


Şekil 5.32. InGaAsP güneş pili maksimum verim J-V karakteristiği

Çizelge 5.21. InGaAsP güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	w_p *(µm)*	w_n *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η *(%)*
InGaAsP	28,88	0,7280	84,4	0,2	2,5	2.10^{18}	2.10^{17}	17,93

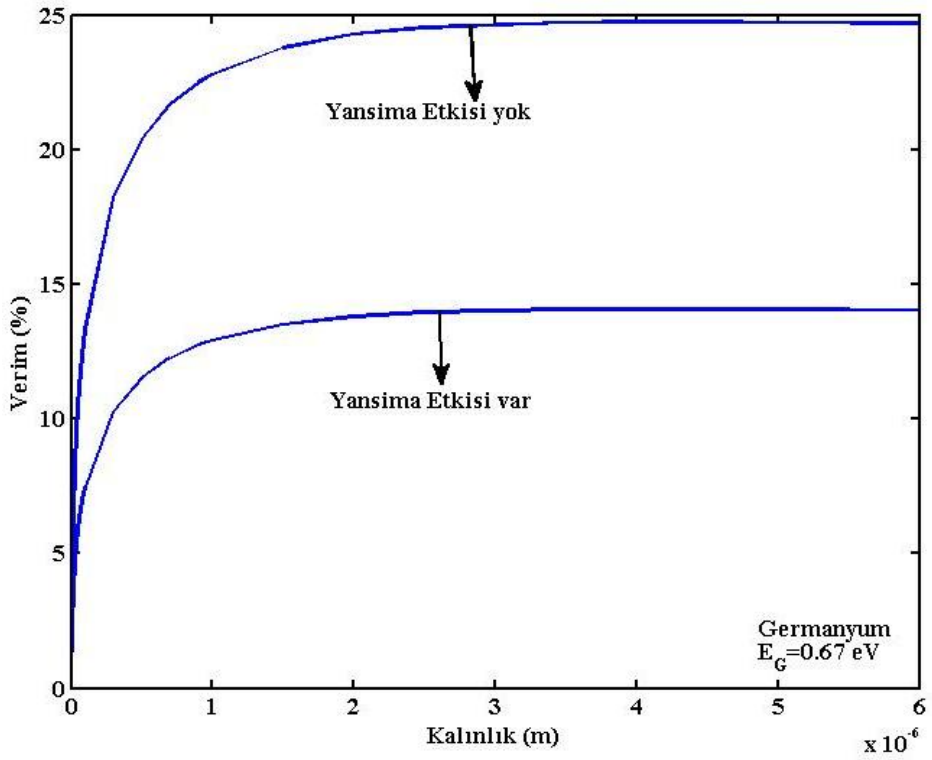
Şekil 5.32'de InGaAsP güneş pili için EQE-dalga boyu grafiği verilmiştir.



Şekil 5.33. InGaAsP güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği

5.6. Germanyum p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve Sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

Germanyum yarı iletkeni küçük yasak bant aralığına (E_G=0,67eV) sahip olduğu için tek eklemli olarak verim değeri çok düşüktür. Bu yüzden Germanyum fotovoltaik piller son nesil güneş pilleri olan çok eklemli pillerde alt taş olarak kullanılır. Detaylı denge modeli ile incelendiğinde elde edilen maksimum verim değeri %25 civarındadır. Şekil 5.34'te verim-kalınlık değişimi görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi germanyum güneş pilleri 3-4μm civarında maksimum verime ulaşmaktadır. DBM ile elde edilen diğer sonuç değerleri de Çizelge 5.22'de verilmiştir.

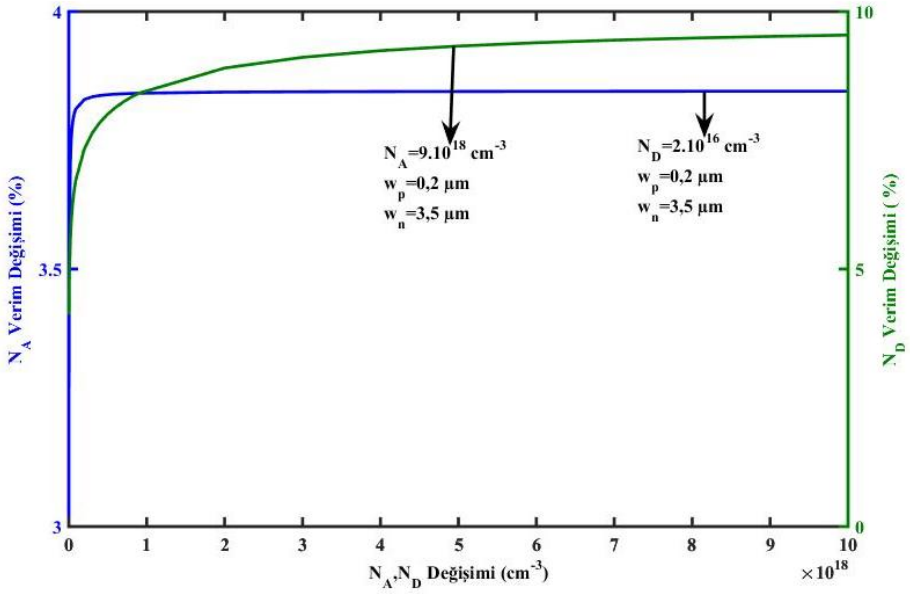


Şekil 5.34. Germanyum güneş pili detaylı denge verim kalınlık değişimi

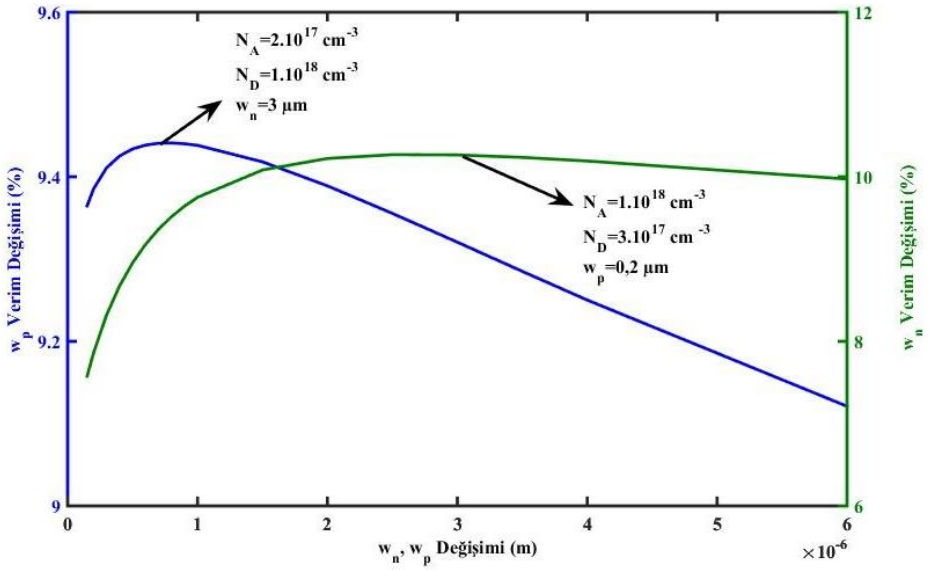
Çizelge 5.22. Germanyum güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim,doluluk oranı (FF), kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*	$w_{OPTİMUM}$ *(μm)*
Ge(Yansıma Etkisi Yok)	62,89	0,495	80,20	24,72	3,5-4,5
Ge(Yansıma Etkisi Var)	37,13	0,481	79,83	14,11	3,5-4,5

Katkı konsantrasyonu ve kalınık etkilerini incelemek için; w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi elde edilmiştir. N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil 5.35'deki gibi olmuştur. Buradan üstte olan ince baz katmanının 10^{18} mertebelerinde, kalın olan emiter katmanının ise 10^{17} mertebelerinde katkılanmasının yüksek verim sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.36'de verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken wn değişimi verilmiştir.

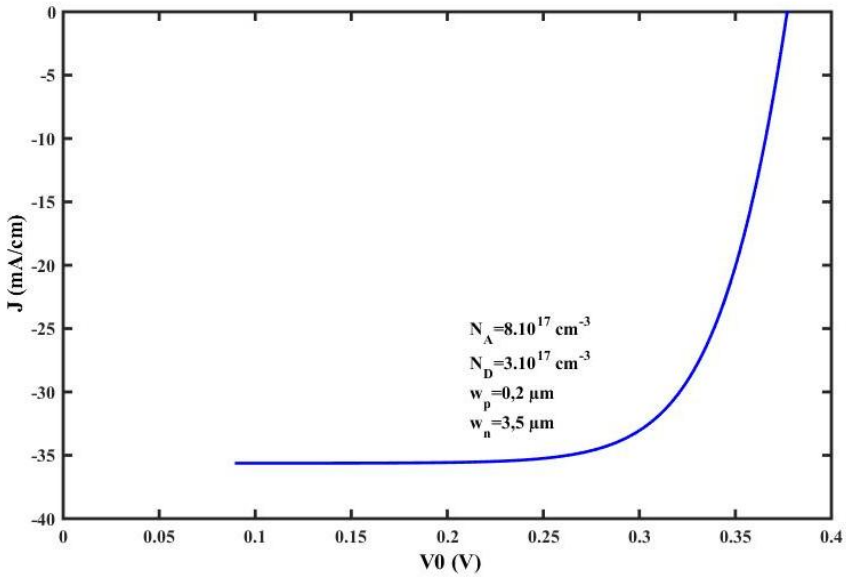


Şekil 5.35. Germanyum güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi



Şekil 5.36. Germanyum güneş pili kalınlık verim değişimi

Çizelge 5.22'de verilen maksimum verim değerlerindeki N_A, N_D, w_n, w_p değerlerini kullanarak germanyum güneş pili için elde edilebilecek maksimum verim Çizelge 5.23'te verilmiştir. Maksimum verim değerine ait J-Vkarakteristiği Şekil 5.37'de verilmiştir.

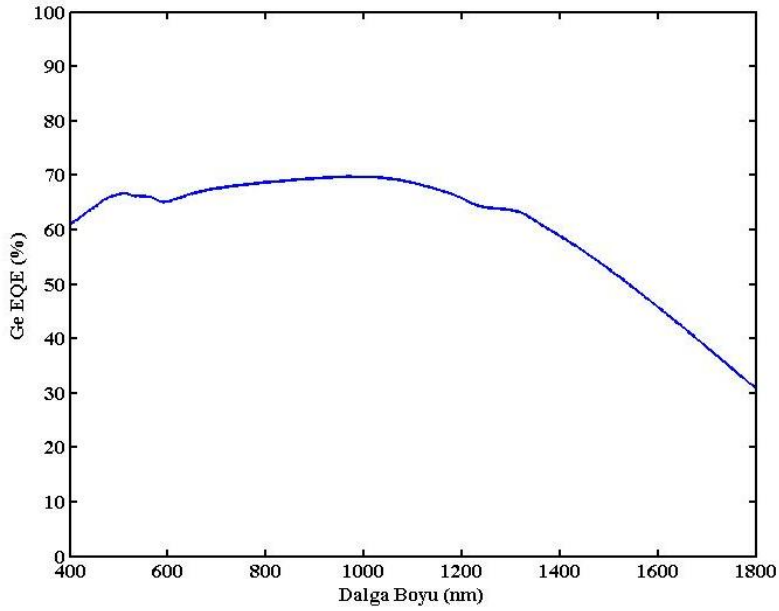


Şekil 5.37. Germanyum güneş pili maksimum verim J-V karakteristiği

Çizelge 5.23. Germanyum güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	w_p *(µm)*	w_n *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η *(%)*
Germanyum	35,6	0,376	74,34	0,2	3,5	8.10^{17}	8.10^{17}	10,21

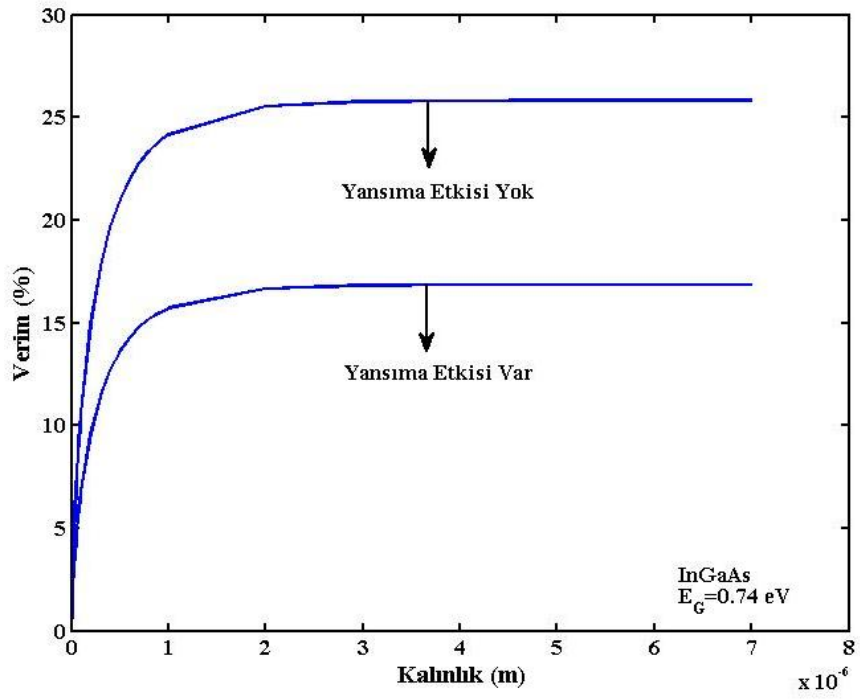
Şekil 5.37'de Ge p-n eklem güneş piline ait kuantum verim grafiği verilmektedir. Şekil 5.37'de görüldüğü üzere Ge güneş pili 300-1800 nm dalga boyları arasında etkin olarak akım ve gerilim üretmektedir.



Şekil 5.38. Ge güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği

5.7. InGaAs p-n Eklem Güneş Pili için Detaylı Denge ve sürüklenme-Difüzyon Verim Sonuçları

InGaAs yarı iletkeni germanyum gibi düşük bant aralığına (E_G=0,74 eV) sahiptir. Bundan dolayı tek eklemli değil daha çok son nesil güneş pili modellerinden biri olan çok eklemli güneş pillerinde alt taş olarak kullanılır. Böylece düşük enerjili fotonlarında soğurulması sağlanmış olur. InGaAs ait tek eklemli verim değerleri tespit edilmiştir. Detaylı denge modeli ile elde edilebilecek maksimum teorik verim sınırı tespit edilmiştir. Detaylı denge modeli ile modelleme yaparken, p-n ekleminde InP penceresi var olan şekli ile detaylı denge verimi ve çıkış parametrelerinin sınır değerini tespit ettik. Bulunan verim ve diğer sonuç değerleri Çizelge 5.24.'te verilmiştir. Maksimum verimi elde ettiğimiz kalınlık verim değişimine ait grafik Şekil 5.39'da verilmiştir.



Şekil 5.39. InGaAs güneş pili detaylı denge kalınlık verim değişimi

Çizelge 5.24. InGaAs güneş pili detaylı denge modeli ile maksimum akım, gerilim, doluluk oranı (FF), kalınlık, verimi

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*	$w_{OPTİMUM}$ *(µm)*
InGaAs(Yansıma Etkisi Yok)	62,19	0,5250	80,9	25,8	4
InGaAs(Yansıma Etkisi Var)	41,9	0,5070	80,6	16,6	3

Mathews ve arkadaşlarının makalelerinde InGaAs piline ait elde ettikleri verim %9,3'dür [62]. Geliştirilen modelin doğru çalıştığının ispatlanması için önce model, literatürdeki yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuç verip vermediği test edilmiştir analiz edilen güneş pili yapısı Çizelge 5.25'deki gibidir.

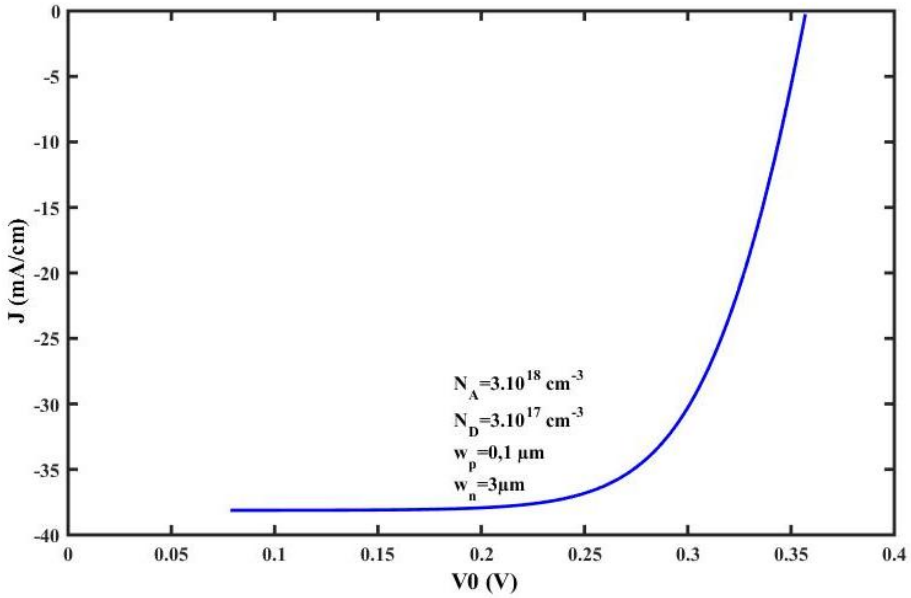
Çizelge 5.25. Literatürdeki makale yapısı

Katman Adı	Katkı Tipi	Kalınlık	Katkı Miktarı
Pencere (Window)	n^+	w_w=0.1µm	N_w=2.10^{18}cm^{-3}
Baz Bölgesi	n	w_n=0.1 µm	N_D=2.10^{18}cm^{-3}
Emitter bölgesi	p	w_p=3 µm	N_A=3.10^{17}cm^{-3}
Arka Yüzey (BSF) alanı	p^+	w_{BSF}=0.5 µm	N_{BSF}=1.10^{19}cm^{-3}
Alttaş	p		

Çizelge 5.26'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlara yakın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, FF ve verim değerleri elde edilmiştir. Literatürdeki yapıya ait J-V eğrileri Şekil 5.40'da sunulmuştur.

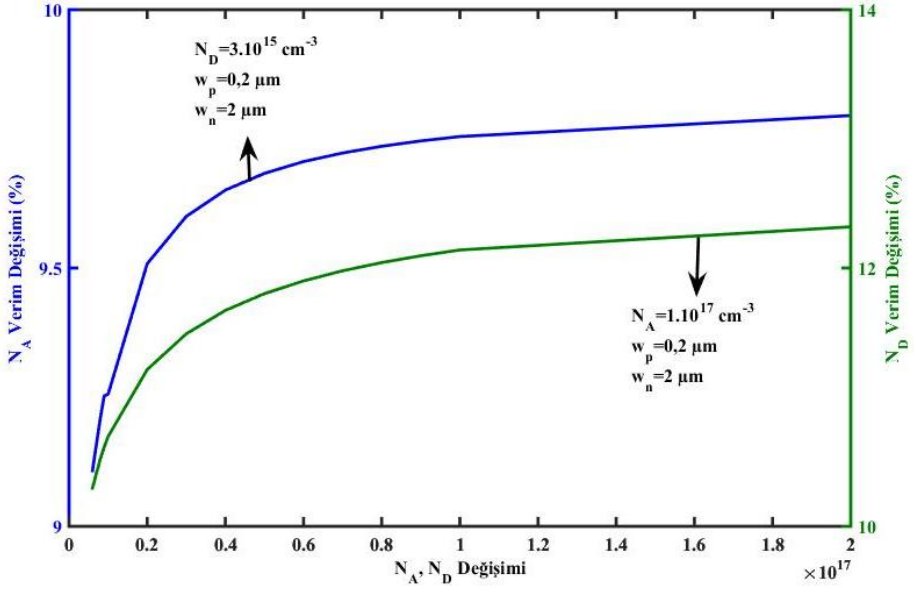
Çizelge 5.26. Literatürdeki makale sonuçları ile elde ettiğimiz verim sonuçları

Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	η *(%)*
InGaAs	38,12	0,356	69,3	9,34
InGaAs makale [63]	38,2	0,357	69	9,39

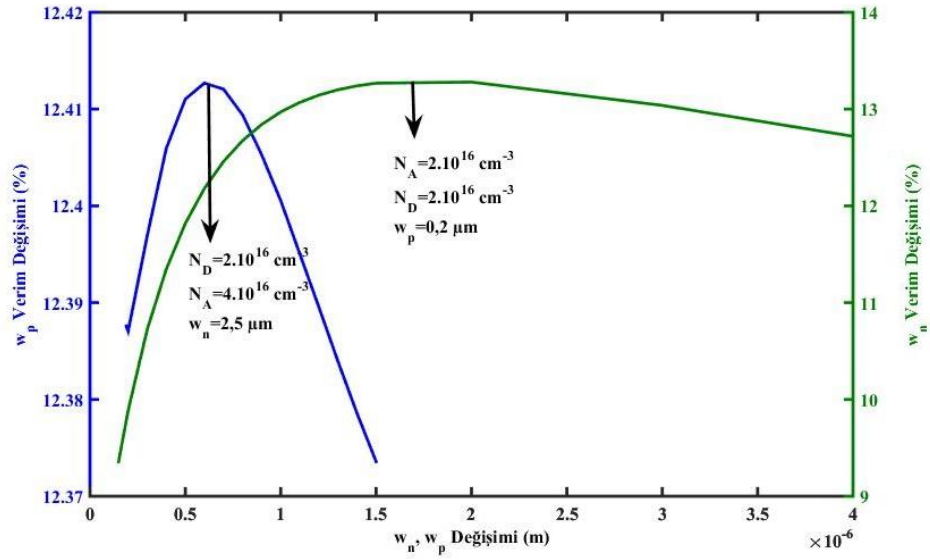


Şekil 5.40. InGaAs için literatür çalışma sonucu elde edilen J-V Karakteristiği

w_n, w_p, N_A, N_D değişkenlerinden her seferinde üçü sabit tutulup biri değiştirilerek verime etkisi incelenmiştir. N_D sabit tutulup N_A değiştirilmiş, N_A sabit tutulup N_D değiştirilmiş ve verim değişimi Şekil 5.41'deki gibi olmuştur. Şekil 5.42'de verimin, w_n sabitken w_p ile ve w_p sabitken w_n değişimi verilmiştir.

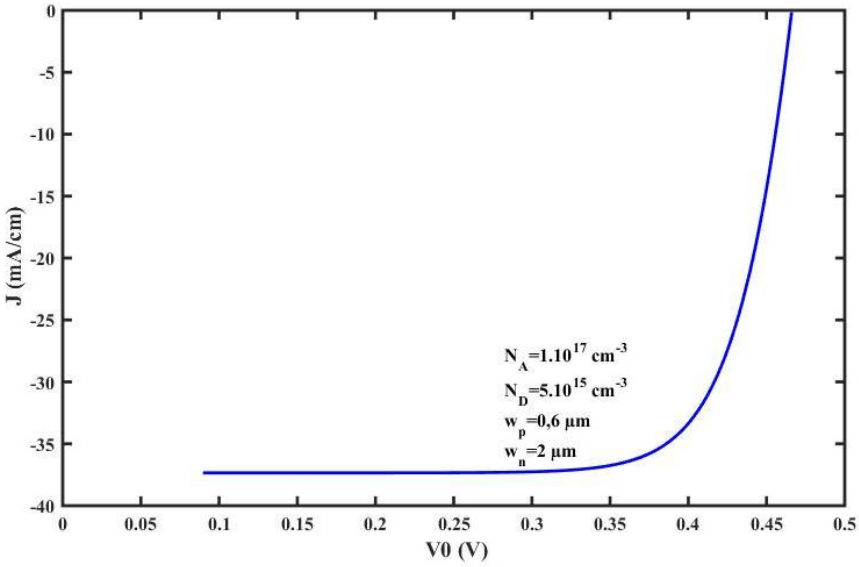


Şekil 5.41. InGaAs güneş pili verim-katkı konsantrasyonu değişimi



Şekil 5.42. InGaAs güneş pili kalınlık verim değişimi

Maksimum verim ve sonuçları Çizelge 5.27'da verilmiştir ve maksimum verime ait J-V karakteristiği Şekil 5.43'de verilmiştir.

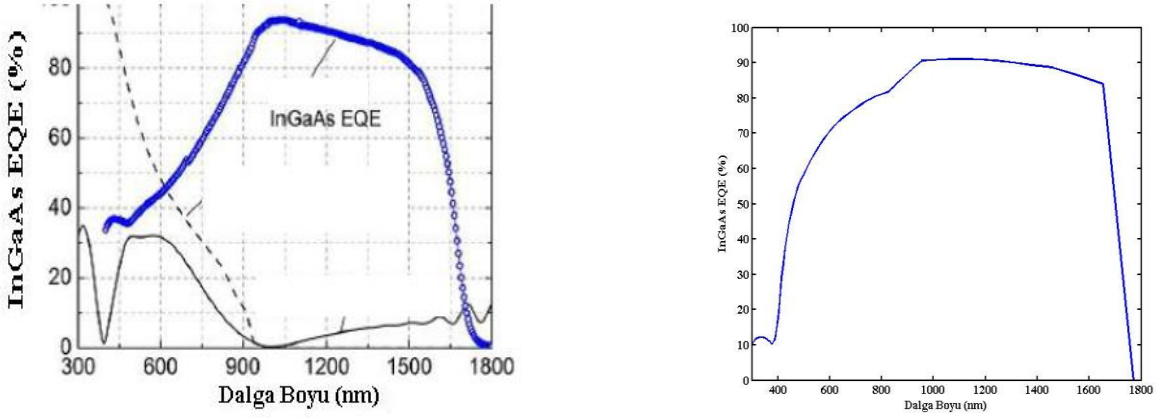


Şekil 5.43. InGaAs güneş pili maksimum verim J-V karakteristiği

Çizelge 5.27 InGaAs güneş pili maksimum verim çıkış değerleri

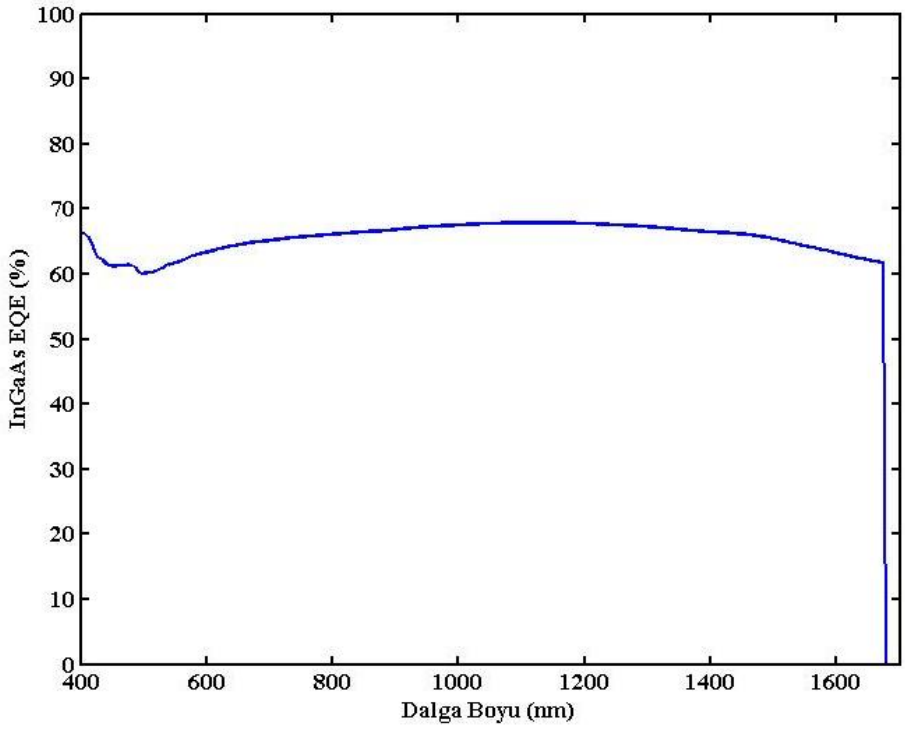
Malzeme	J_{SC} *(mA/cm)*	V_{0C} *(mV)*	*FF (%)*	w_p *(µm)*	w_n *(µm)*	N_A (cm^{-3})	N_D (cm^{-3})	η *(%)*
InGaAs	37,34	0,465	76,66	0,6	2	1.10^{17}	5.10^{15}	13,49

Şekil 5.45'da literatürdeki EQE-dalga boyu grafiği ile literatürdeki değerleri kullanarak elde ettiğimiz EQE grafikleri verilerek karşılaştırılmıştır [20]. Literatürde elde edilen maksimum verim 1030 nm dalga boyunda EQE %93 civarında iken yaptığımız çalışmada elde ettiğimiz maksimum değer 1070 nm dalga boyunda %91 civarındadır. Olıışan farkın nedeni yansıma katsayılarının aynı olmamasıdır. Şekil 5.44'te modellediğimiz InGaAs güneş piline ait EQE dalga boyu grafiği verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 5.44.InGaAs için literatürde yapılan çalışma sonuçu elde edilen EQE-dalga boyukarakteristikleri, (a) Literatürde elde edilen EQE karakteristiği [63] (b)Literatürdeki değerleri kullanılarak elde edilen EQE karakteristiği



Şekil 5.45. InGaP güneş pili EQE-dalga boyu karakteristiği

6.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güneş pili yapımında ve modellemesinde literatürde en çok kullanılan yedi yarı iletken (GaAs, Si, Ge, InGaAs, InP, InGaP, InGaAsP) malzemenin optimum parametre değerleri tespit edilerek maksimum verimleri hesaplandı. Yapılan çalışmalarda enerji kullanılarak gerçek yansıma ve soğurma katsayıları ile işlemler yapıldı. Böylece pratikte üretimi bulunan tek eklemli güneş pilinin gerçeğe yakın modellemesi yapıldı. Detaylı Denge Modeli kullanılarak p-n eklemli güneş pilinin sınır verim değerleri ve buna ulaşmak için gerekli minimum kalınlık değerleri bulundu . Ayrıca drift-difüzyon modeli kullanılarak gerçeğe yakın modelleme yapıldı ve sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapıldı.

GaAs, Si, Ge, InGaAs, InP, InGaP ve InGaAsP p-n eklem güneş pillerinde hedef verim detay denge eşitlikleri ile bulunduktan sonra,bu hedefe en yakın yapıyı tasarlamak amacıyla malzeme parametrelerinin etkilerinin modele dahil edilebildiği sürüklenme difüzyon yaklaşımı kullanılmıştır. Her bir malzeme için model öncelikle literatürde verilen yapılara uygulanmış ve deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Daha sonra her malzeme için katkı konsantrasyonu ve kalınlık değerleri değiştiğinde verimin değişimi incelenerek maksimum verimi sağlayan yapı elde edilmiştir. Bu yapının sağladığı kısa devre akımı (J_{SC}), açık devre gerilimi (V_{0C}), doluluk oranı *(FF)*, verim değerleri (η) ve *J-V* karekteristiği sunulmuştur. Ayrıca her bie malzeme için yüzeye gelen fotonların ne kadarının fotoakıma dönüştürüldüğünün ölçütü olan EQE değişimleri hesaplanmış ve hangi malzemenin güneş spekturumunun hangi bölümümü daha verimli soğurduğu tespit edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda GaAs, Si, InP ve InGaAsP dışındaki malzemelerin tek başına p-n eklem pil olarak kullanıldıklarında çok düşük verim sağladıkları görülmüştür. Ge ve InGaAsP küçük enerjili fotonlarıda soğurdukları için yüksek akıma sahip olmalarına rağmen bu malzemelerin E_G leri küçük olduğu için çıkış gerilimleri küçüktür bu durum verimi düşürmektedir. InGaP'nin ise E_G'si büyük ve çıkış gerilimi yüksektir. Ancak E_G'den daha küçük enerjiye sahip fotonlar soğurulmadığı için bu yapının fotoakımı çok küçüktür ve verimi düşüktür.

Tek eklemli olarak kullanıldıklarında düşük verime sahip bu malzemeler çok eklemli yapıda bir araya getirildiklerinde her biri kendi E_G'sine yakın enerjili fotonları en iyi verimle soğurmakta ve yüksek verim sağlamaktadır. Örneğin üç eklemli InGaP, GaAs, Ge güneş pilinde GaAs tek eklemli pilin soğuramayacağı düşük enerjili fotonları Ge p-n

eklemi soğurmakta GaAs'ın E_G'sine kıyasla çok yüksek enerjili fotonları ise GaAs yerine InGaP soğurmakta ve böylece güneş spekturumu daha verimli kullanılmakta ve GaAs tek eklemli güneş piline kıyasla daha yüksek verim elde edilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen verilerin çok eklemli yapılar tasarlanırken faydalı olacağı düşünülmektedir.İleriye dönük olarak verilen malzemelerin iki,üç ve dört eklemli yapılarda farklı kombinasyonlarla bir araya getirilmesi ve yüksek verimli güneş pilleri tasarlanması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Sarbani, B., Antia, H. M. (2007). Helioseismology and Solar Abundances, *Physics Reports*, 457, 217-283.

2. Manuel, O. K. and Hwaung, G. (1983). Solar abundance of the elements, *Meteoritics*, 18 (3), 209-222.

3. Büyükbaş, M. (2011). *Arabant yapılı güneş pillerinde Sonlu fark metodu ile modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**,** Ankara, 1-110.

4. İnternet: Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi • Dünya'da ve Türkiye'de Güneş Enerjisi.URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.dektmk.org.tr%2Fupresimler%2FGUNES.pdf&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

5. İnternet: Detaylı Güneş Enerji Teknolojileri.URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mkmenerji.com%2Fdetayli-gunes-enerji-teknolojileri.html&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

6. İnternet: Güneş Enerjisi ve Teknolojileri.URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2Feie-web%2Fturkce%2FYEK%2Fgunes%2Fgunes.html&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

7. Würfel, P. (2005). Physics of solar cells, *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim*, 23-24.

8. Şenay, G. (2011). *Çok Eklemli Güneş Pillerinde Detaylı Denge Modeli ile Verim Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara, 1-87.

9. Broman, L. (1994). *Thermophotovoltaics bibliography* (No. NREL/TP--412-6845). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States).

10. İnternet: Yenilenebilir Enerji Teknolojileri.URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.solaracademy.com%2Fmenuis%2FYenilenebilir-EnerjiTeknolojileriKaynaklariOnemi.164622.pdf&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

11. İnternet: Akkas Cural Cantug. 2015 Yılında Dünya Güneş Enerjisi Sektöründe Neler Oldu.URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.linkedin.com%2Fpulse%2F2015ded%25C3%25BCnyag%25C3%25BCne%25C5%259Fenerjisisekt%25C3%25B6r%25C3%25BCndenelerolduvuralcantugakkas%3FforceNoSplash%3Dtrue&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016

12. İnternet: Gorgus Manfred. Fotovoltaik boomt.URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.solarprofessionell.de%

2Fartikel%2Fphotovoltaik-boomt-deutschland-faellt-im-ranking.html&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

13. İnternet: Türkiye'de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü. TEİAŞ, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2F18ff249800ead7f_ek.pdf&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

14. İnternet: Price Quotes. URL :http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fpv.energytrend.com%2Fpricequotes.html&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

15. Köse, S. (1986). *Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 78.

16. Doğan, H. (2014). *Fotovoltaik Güneş Pilleri*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Isparta, 1-66.

17. Engin R. (1995). *Güneş Pilleri*, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları**,** 3,1-151,

18. Navruz, T.S. (2008). *Arabant yapılı güneş pillerinde verim optimizasyonu*, Doktora Tezi,Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**,** Ankara, 1-143

19. İnternet: Güneş Pilleri (Fotovoltaik Piller), URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2Feie-web%2Fturkce%2FYEK%2Fgunes%2Fgunespv.html&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016

20. İnternet: Mono ve Poly Fotovoltaik Panel Farkı Nedir? URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fmonovepolyfotovoltaik.blogspot.com.tr%2F&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016

21. Goetzberger,A., Hebling, C., Schock, H.W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook, *Materials Science and Engineering*, 40,1-46.

22. Green, M.A. (2009). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17,183-189.

23. Green , A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. (2010). Solar cell efficiency tables (version 36), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18,346-352.

24. Wolf, M. (1980). High efficiency silicon solar cells, *14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, 674-679.

25. Spitzer, M., Shewchun, J., Vera, E.S., Loferski, J.J. (1980). Ultra highefficiency thin silicon p-n junction solar cells using reflecting surfaces, *14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, 375-380.

26. İnternet: Güneş pili. J. Phys. Chem. C 2007, 111, 2834-2860. Accounts of Chemical Research, 2009, 42(11), 1788-1798. 2016-06-25. URL:

http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FG%25C3%25BCne%25C5%259F_pili%23.C4.B0nce_film&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016

27. Chittick, R.C., Alexander, J.H., Sterling, H.F. (1969). The preparation and properties of amorphous silicon, *Journal. Electrochemical Society*, 116,77-81.

28. Carlson, D., Wronski, C.R. (1976). Amorphous silicon solar cell**,** *Applied Physics Letters*, 28, 671-673.

29. Alferov, Z. I., Zhilyaev,Y. V., Shmartsev, Y. V. (1971), The splitting of the conduction band in 'superlattice' on the base GaP*x*As12*x Physica. Tekhnolohu Poluprovodn*, 5, 174.

30. Anspaugh, B. E., Weiss R. S. (1988), Results of the 1988 NASA/JPL Balloun Flight Solar Cell Calibration Program, *JPLPublication, Jet Prapulsion Laboratory*, Pasadena, 88-36.

31. Tobin, S.P., Vernon, S.M., Bajgar, C., Haven, V.E., Geoffroy, L.M., Sanfacon, M.M., Lillington, D.R., Hart, R.E., Emery, Jr. K.A., Matson, R.J. (1988). High efficiency GaAs/Ge monolithic tandem solar cells, *20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Las Vegas, 405-410.

32. Green, M.A., Emery, K., Hisikawa, Y., Warta, W. Solar cell efficiency tables (version 30), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15 (5), 425-430.

33. Spanggaard, H., Krebs, F.C. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83,125-146.

34. Green, Martin A. (2015), et al. Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in photovoltaics: research and applications* 23(1), 1-9.

35. O'regan, B., Grätze M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO2 films, *Nature***,** 353,737 – 740.

36. İnternet: Adhesive Bonding For Mechanically Stacked Solar Cells. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.compoundsemiconductor.net%2Farticle%2F94297-adhesive-bonding-for-mechanically-stacked-solar-cells.html&date=2016-06-25, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016

37. Dimroth, F., Tibbits, T. N., Niemeyer, M., Predan, F., Beutel, P., Karcher, C., and Bett, A. W. (2016). Four-Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells.*IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(1), 343-349.

38. Dimroth, F., Grave, M., Beutel, P., Fiedeler, U., Karcher, C., Tibbits, T. N., and Bett, A. W. (2014). Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(3), 277-282.

39. İnternet:Algora ,Carlos ; I,Rey-Stolle; B, Galiana; J R, González; M,Baudrit ; I García . III-V concentrator solar cells as LEDs. G. Purvis LED and nano could boost compound

photovoltaics III-Vs review The advanced semiconductor magazine, 17 (6) (2004), pp. 36–39 Article | PDF (341 K) | View Record in Scopus | Citing articles (3) 2 C. Algora, V. D\'az, Guidance for reducing PVc. URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0961129005712333&date=2016-06-26, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

40. Partain L. D. (1995). Solar Cells and Their Applications, *John Wiley and Sons*, New York, 32.

41. Shockley, W. and Queisser, H., J.(1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction SolarCells, *Journal of Applied Physics*, Volume 32, pp. 510-519**.**

42. Nelson, J. (2003). *The physics of solar cells.* Vol. 1. London: Imperial college press.

43. İnternet: Pala, Nezih. Charge Transport. URL :http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fweb.eng.fiu.edu%2Fnpala%2FEEE6397ex%2FEEE_6397_Ch3_Charge%2520Transport%2520%2520in%2520Semiconductors_PART3.pdf&date=2016-06-26, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

44. Çil A. (2002). *Yürüyen Merdiven Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ve Optimizasyonu*, Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul, 1-107.

45. İnternet:Semiconductors.URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ioffe.ru%2FSVA%2FNSM%2FSemicond%2F&date=2016-06-26, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

46. Nayak, P. P., Dutta, J. P., & Mishra, G. P. (2015). Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 325-335.

47. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in photovoltaics: research and applications*, *23*(1), 1-9.

48. İnternet: Refractive Index Database, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.filmetrics.com%2Frefractive-index-database&date=2016-06-26, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

49. Ho, W. J., Lin, Y. J., Chien, L. Y., Lee, Y. Y., Chen, Y. L., Yu, C. M., and Shiao, H. P. (2011, May). 25.54% Efficient Single-Junction GaAs Solar Cells Using Spin-On-Film Graded-Index TiO2/SiO2 AR-Coating. In *CLEO: Science and Innovations* (p. JWA74). Optical Society of America.

50. Bauhuis, G. J., Schermer, J. J., Mulder, P., Voncken, M. M. A. J., and Larsen, P. K. (2004). Thin film GaAs solar cells with increased quantum efficiency due to light reflection. *Solar energy materials and solar cells*, *83*(1), 81-90.

51. Brinker, D. J.,& Weinberg, I. (1987). Recent developments in indium phosphide space solar cell research . N*ational Aeronautics and Space Administration*, Cleveland, OH (USA). (No. N-87-26141; NASA-TM-100139; E-3690; NAS-1.15: 100139; AIAA-87-9053; CONF-870804-44) Lewis Research Center.
52. Weinberg, I.,& Brinker, D. J. (1988). Progress in InP solar cell research .*National Aeronautics and Space Administration*, Cleveland, OH (USA). (No. N-88-24870; NASA-TM--100914; E--4166; NAS--1.15: 100914; CONF-880702--) Lewis Research Center.

53. Keavney, C. J., Haven, V. E., and Vernon, S. M. (1990, May). Emitter structures in MOCVD InP solar cells. In *Photovoltaic Specialists Conference, 1990., Conference Record of the Twenty First IEEE*,141-144.

54. Li, X., Wanlass; M. W., Gessert, T. A., Emery; K. A., and Coutts, T. J. (1989). High-efficiency indium tin oxide/indium phosphide solar cells. *Applied Physics Letters*, *54*(26), 2674-2676.

55. Geisz, J. F., Steiner, M. A., Garcia, I., Kurtz, S. R., & Friedman, D. J. (2013). Enhanced external radiative efficiency for 20.8% efficient single-junction GaInP solar cells. *Applied Physics Letters*, *103*(4), 041118.

56. Takamoto, T., Ikeda, E., Kurita, H., and Ohmori, M. (1994, December). High efficiency InGaP solar cells for InGaP/GaAs Tandem cell application. *InPhotovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1994, 1994 IEEE First World Conference on* 2, 1729-1732.

57. İnternet: Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdocplayer.biz.tr%2F2698096-Fotovoltaik-gunes-gozeleri-ve-guc-sistemleri.html&date=2016-06-26, Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.

58. Zhao, J.,Wang A., Green M.A., Ferrazza F.Novel (1991–1993). 19.8% efficient honeycomb textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells. *Applied Physics Letters* (1998), 73.

59. Masuko, K., Shigematsu, M., Hashiguchi, T., Fujishima, D., Kai, M., Yoshimura, N., Yamanishi, T. (2014). Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell. IEEE Journal of Photovoltaics, 6(4), 1433-1435.

60. Slade, A., and Vahan, G. (2005). 27.6% efficient silicon concentrator solar cells for mass production. *Technical Digest, 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Beijing.

61. Aberle, A. G., Altermatt, P. P., Heiser, G., Robinson, S. J., Wang, A., Zhao, J., and Green, M. A. (1995). Limiting loss mechanisms in 23% efficient silicon solar cells. *Journal of applied physics*, 77(7), 3491-3504.

62. Ji, L., Tan, M., Honda, K., Harasawa, R., Yasue, Y., Wu, Y., and Yang, H. (2015). Investigation of InGaAsP solar cells grown by solid-state molecular beam epitaxy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *137*, 68-72.

63. İnternet: I Mathews, D O'Mahony, A Gocalinska, E Pelucchi. INALAS AND INGAAS SOLAR CELL DEVELOPMENT FOR USE IN MONOLITHIC TRIPLE-JUNCTION SOLAR CELLS WITH IMPROVED SPECTRUM SPLITTING URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fs3.amazonaws.com%2Facademia.edu.documents%2F45938324%2FINALAS_AND_INGAAS_SOLAR_CELL_DEVELOPMENT201605256288madtl1.pdf%3FAWSAccessKeyId%3DAKIAJ56TQJRTWSMTNPEA%26Expires%3D1470520649%26Signature%3DEIIANfesme80FykPmhR5UdrTSzg%253D%26responsecontentdisposition%3Dinline%253B%25&date=2016-08-06,Son Erişim Tarihi: 25.06.2016.
.

ÖZGEÇMİŞ

KişiselBilgiler

Soyadı,adı :KORUN, Murat

Uyruğu :T.C.

Doğumtarihiveyeri :01.10.1988, Gaziantep

Medenihali :Bekar

Telefon :05325281230

e-mail :muratkorun@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	EğitimBirimi	Mezuniyettarihi
Yükseklisans	GaziÜniversitesi/Elektrik Elektronik	Devam Ediyor
Lisans	NiğdeÜniversitesi /Elektrik Elektronik	2012
Lise	Opet Anadolu Lisesi	2006

İşDeneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	GaziÜniversitesi	Araştırma Görevlisi

YabancıDil

İngilizce

Yayınlar

Korun, M., Navruz, T. S. (2016, April). Comparison of Ge, InGaAs pn junction solar cell. In *Journal of Physics: Conference Series* ,707(1). IOP Publishing.

Hobiler

Yüzme, Kitap Okuma