

**ÇOK EKLEMLİ GÜNEŞ PİLLERİNDE
DETAYLI DENGİ MODELİ İLE VERİM OPTİMİZASYONU**

Gökhan ŞENAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2011
ANKARA**

Gökhan ŞENAY tarafından hazırlanan ÇOK EKLEMLİ GÜNEŞ PİLLERİNDE
DETAYLI DENGİ MODELİ İLE VERİM OPTİMİZASYONU adlı bu tezin
Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

.....

Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

Fizik Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd.Doç.Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

.....

Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 11/02/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans
derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gökhan ŞENAY

**ÇOK EKLEMLİ GÜNEŞ PİLLERİNDE
DETAYLI DENGİ MODELİ İLE VERİM OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Gökhan ŞENAY

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2011**

ÖZET

Geleneksel p-n eklem güneş pillerinde verim kaybına sebep olan iki önemli etken; enerjisi yasak band aralığından düşük olan fotonların soğurulamaması ve yüksek enerjili fotonların fazlalık enerjilerinin ısıya dönüşmesidir. Bu iki kayıp mekanizması, fotovoltaiik çevrimde güneş enerjisinin yaklaşık yarısının kullanılamadığı anlamına gelmektedir. Son nesil güneş pilleri; bu kullanılamayan enerjiden yararlanarak, verimi artırmayı hedeflemektedir. Bu tez çalışmasında, son nesil güneş pilleri arasında pratikte uygulaması mevcut tek ürün olan çok eklemli güneş pillerinin verimine yönelik teorik analizler yapılmıştır.

Siyah cisim (black body) ışıması altında yapılan tüm analizlerde Detaylı Denge Modeli kullanılmıştır. Çok eklemli güneş pilinin verimde nasıl iyileşme sağladığının görülmesi için, öncelikle geleneksel p-n eklem güneş pilinin verim analizi yapılmıştır.

Geleneksel p-n eklem güneş pilinde, $E_G=1.31$ eV için verim sınırı %31.162 olarak hesaplanmıştır. İki eklemli monolitik güneş pilinde, $E_{G1}=1$ eV ve $E_{G2}=1.71$ eV için verim sınırı %42.668 olarak elde edilmiştir. Ge (0.7 eV) yarı-iletkeninin alttaş ve üçüncü p-n eklemi olarak

kullanıldığı hesaba katılan üç eklemli monolitik güneş pilinde, $E_{G2}=1.21$ eV ve $E_{G3}=1.87$ eV için verim sınırı %48.27 olarak bulunmuştur. Ayrıca, ışık konsantrasyonu arttıkça, verimin logaritmik olarak arttığı gözlemlenmiştir.

İki eklemli ve üç eklemli güneş pillerinde üstteki p-n eklemının kalınlığı ayarlanarak akım uyumlandırması (current matching) işlemi yapılmıştır. İki eklemli GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) ve üç eklemli GaInP (1.9 eV)/GaInAs (1.4 eV)/Ge (0.7 eV) güneş pilinde, en üstteki p-n eklemının kalınlığının belirli bir değere kadar azaltılması ile verimin yükseldiği görülmüştür.

Son olarak; Auger üretim ve rekombinasyonunun, optimum E_G 'li tek eklemli ve iki eklemli monolitik güneş pilleri ile GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) iki eklemli monolitik güneş pilinde verime etkisi incelenmiştir. p-n eklem güneş pilinde, Auger mekanizmasının çoğullama olasılığına (σ) bağlı olarak verimde önemli oranda artış sağladığı görülmüştür. Optimum E_G 'li iki eklemli güneş pilinde ve GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) güneş pilinde Auger mekanizmasının verime neredeyse hiç etkisinin olmadığı görülmüştür. İki eklemli pillerde üstteki p-n eklemi inceltildiğinde, Auger mekanizmasının verimde kayda değer oranda katkı sağladığı müşahade edilmiştir. Buradan, Auger mekanizmasının çok eklemli monolitik güneş pillerinde verime etkisinin, üstteki p-n eklemının kalınlığına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 905.1.038
Anahtar Kelimeler : Çok eklemli güneş pili, Detaylı Denge Yöntemi, verim, Auger üretimi, Auger rekombinasyonu
Sayfa Adedi : 71
Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

EFFICIENCY OPTIMIZATION USING DETAILED BALANCE METHOD IN MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS

(Msc Thesis)

Gökhan ŞENAY

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2011

ABSTRACT

The two most important power-loss mechanism in single bandgap cells are the inability to absorb photons with energy less than the bandgap and thermalization of photon energies exceeding the bandgap. These two mechanism alone amount to the loss of about half of the incident solar energy in photovoltaic conversion. Last generation solar cells aim to increase efficiency by harnessing some of these wasted energy. In this thesis, theoretical analysis were carried out on the multi-junction solar cells, the only ones ever been realized among the last generation solar cells.

Detailed Balance Model was used in all analysis performed under black body radiation. To be able to realize efficiency improvement in multi-junction solar cells, efficiency analysis on single bandgap solar cell was performed firstly.

Maximum efficiency in the single bandgap solar cell was calculated as %31.162 for $E_G=1.31$ eV. In the double junction monolithic solar cell, maximum efficiency was obtained as %42.668 for $E_{G1}=1$ eV and $E_{G2}=1.71$ eV. In the triple junction monolithic solar cells in which Ge ($E_{G1}=0.7$ eV) is considered to have been used as substrate and third

layer, maximum efficiency was obtained as %48.27 for $E_{G2}=1.21$ eV and $E_{G3}=1.87$ eV. It is also observed that efficiency increases logarithmically with light intensity.

Current matching process was performed on the double and triple junction solar cells by adjusting the top-cell thicknesses. In the double junction GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) and triple junction GaInP (1.9 eV)/GaInAs (1.4 eV)/Ge (0.7 eV) solar cells, it was seen that efficiency increases as the top-cell is thinned to a constant value.

Finally, the effect of Auger generation and recombination on the efficiency of single junction and double junction monolithic solar cells with optimum bandgaps and GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) solar cells has been investigated. In the single junction solar cell, it was seen that Auger mechanism, depending on the multiplication probability (σ), led to significant increase in the efficiency. In the double junction monolithic solar cells with optimum bandgap and GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) solar cells, it was observed that Auger mechanism have almost no effect on the efficiencies. The top cell in double junction monolithic solar cells having been thinned, it was witnessed that Auger mechanism made significant contribution on the efficiencies. It was concluded from here that the effect of Auger mechanism on the efficiency of multi-junction monolithic solar cells depends on the top cell thickness.

Science Code	: 905.1.038
Key Words	: Multi-junction solar cell, Detailed Balance Model, efficiency, Auger generation, Auger recombination
Page Number	: 71
Adviser	: Yrd.Doç.Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ'a, her zaman bana güvenen aileme, yoğun iş temposuna rağmen bana destek olan ve zaman ayırmam için teşvik eden mesai arkadaşlarıma, varlığıyla en büyük destekçim olan değerli eşim Servet ŞENAY'a ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. GÜNEŞ PİLLERİ VE TARİHÇESİ	3
2.1. Enerji Üretimi ve Küresel Isınma	3
2.2. Güneş ve Güneş Enerjisi Spektrumu	4
2.3. Güneş Pili Pazarının Mevcut Durumu.....	7
2.4. Güneş Pili Yapısı ve Çalışma Prensipleri.....	10
2.4.1. p-n eklem diyot	10
2.4.2. Güneş ışınlamı altında p-n eklem diyot.....	11
2.4.3. Güneş pilinde verimliliğe etki eden faktörler.....	23
2.5. Güneş Pillerinin Tarihçesi.....	27
2.5.1. Birinci nesil güneş pilleri	27
2.5.2. İkinci nesil güneş pilleri	29
2.5.3. Üçüncü nesil güneş pilleri	30
2.5.4. Son nesil güneş pilleri	32

Sayfa

3. ÇOK EKLEMLİ (MULTI-JUNCTION) GÜNEŞ PİLLERİ	35
3.1. Çok Eklemlı Güneş Pilleri Tarihçesi.....	35
3.2. Çok Eklemlı Güneş Pili Uygulamaları.....	36
3.3. Üç Eklemlı Monolitik GaInP/GaInAs/Ge Güneş Piliin Yapısı.....	40
3.4. Detaylı Denge Modeli	42
3.4.1. Işık ile üretilen fotoakım yoğunlukları	43
3.4.2. Işımalı rekombinasyon akım yoğunlukları	44
3.4.3. Auger üretim ve rekombinasyon akım yoğunlukları.....	45
3.4.4. Detaylı Denge Modeli ile verim hesabı.....	45
4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	48
4.1. Geleneksel p-n eklem Güneş Piliin Verim Analizi.....	48
4.2. İki Eklemlı Monolitik Güneş Piliin Verim Analizi.....	50
4.3. Üç Eklemlı Monolitik Güneş Piliin Verim Analizi.....	54
4.4. Auger Üretimi ve Rekombinasyonunun Verime Etkisi.....	57
4.4.1. p-n eklem güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi.....	58
4.4.2. İki eklemlı güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi.....	59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Almanya'nın binalardaki fotovoltaik uygulamalarından şebekeye elektrik enerjisi aktarma tarifesi [7].....	8
Çizelge 2.2. Tek kristal, poly kristal ve ince film güneş pillerinin fiyatları [9]...	9
Çizelge 2.3. Güneş pillerinin performans değerleri [15].....	21
Çizelge 2.4. Fotovoltaik pilin kısa devre foto akımına ve karanlık akımına etki eden faktörler [16].....	23
Çizelge 3.1. Labaratuar ortamında en yüksek verim elde edilen üç eklemlı güneş pilleri [62].....	42
Çizelge 4.1. Akım uyumlandırmasının iki eklemlı monolitik güneş pillerinin verimine etkisi [63].....	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Atmosferi kirleten kaynaklar [2]	3
Şekil 2.2. Güneş enerji spektrumu [6].....	6
Şekil 2.3. Dünyadaki toplam kurulu fotovoltaik güç miktarının yıllara göre değişimi [7].....	7
Şekil 2.4. Watt başına fotovoltaik modül fiyatının yıllara göre değişimi [9]....	9
Şekil 2.5. p-tipi ve n-tipi yarı-iletkenler, (a) Birleşmeden önce, (b) Birleştikten sonra.....	10
Şekil 2.6. Güneş pili kesit alanı.....	11
Şekil 2.7. Elektron-boşluk çiftinin oluşumu.....	12
Şekil 2.8. Fotovoltaik malzemelerin azınlık taşıyıcı toplama olasılığı.....	13
Şekil 2.9. Silikon güneş pilinin harici ve dahili kuantum verimleri ile yansıtma oranının dalga boyuna göre değişimi [12].....	15
Şekil 2.10. Güneş pilinin kısa devre durumu [13].....	15
Şekil 2.11. Güneş pilinin açık devre durumu [13].....	17
Şekil 2.12. Tek kristal yapıdaki silikon güneş pilinin yapısı [14].....	18
Şekil 2.13. İdeal güneş pili için eşdeğer elektriksel devre.....	19
Şekil 2.14. İdeal güneş pili için akım/güç yoğunluğu-gerilim karakteristiği....	20
Şekil 2.15. Gerçek bir güneş pili için eşdeğer elektriksel devre.....	22
Şekil 2.16. Seri ve paralel dirençlerin, (a) R_s azalırken I - V karakteristiğine etkisi, (b) R_{sh} artarken I - V karakteristiğine etkisi [15].....	22
Şekil 2.17. AM0 spektrumu için ideal Shockley diyodunun verim-Enerji Bant genişliği değişimi [17].....	24
Şekil 2.18. Çeşitli yarı-iletken malzemelerde, soğurma katsayısının enerji ile değişimi [18].....	25

Şekil	Sayfa
Şekil 2.19. Si (a) ve GaAs (b) için elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi [19].....	26
Şekil 2.20. Sıcaklık artışının güneş pilinin I-V karakteristiğine etkisi [20].	26
Şekil 3.1. Çok eklemli güneş pili uygulamaları, (a) Spektrum bölme (Spectrum splitting) (b) Pillerin ardışık yığılması (Cell stacking)	36
Şekil 3.2. Çok eklemli yığılmış pillerdeki etkileşim.....	37
Şekil 3.3. Çok eklemli yığılmış pillerin, (a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması (b) Monolitik (series constrained) uygulaması.....	38
Şekil 3.4. İki eklemli monolitik pillerde, (a) E_G 'si küçük olan p-n eklemının J - V karakteristiği (b) E_G 'si büyük olan p-n eklemının J - V karakteristiği (c) Pilin J - V karakteristiği [5].....	39
Şekil 3.5. AM1.5 güneş spektrumundan, (a) Tek eklemli Si güneş pilinin yararlanması (b) GaInP/GaInAs/Ge güneş pilinin yararlanması [59].....	40
Şekil 3.6. III-V bileşiklerinin latis katsayıları ile E_G 'leri arasındaki ilişki [60]...	41
Şekil 3.7. Üç eklemli $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ güneş pili yapısı [61].....	41
Şekil 4.1. Geleneksel p-n eklem güneş pili veriminin E_G ile değişimi.....	48
Şekil 4.2. Optimum E_G 'li p-n eklem güneş pilinin J - V karakteristiği.....	49
Şekil 4.3. Optimum E_G 'li pilin veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi.....	49
Şekil 4.4. İki eklemli güneş pili veriminin E_{G1} ile E_{G2} değişimi.....	50
Şekil 4.5. İki eklemli güneş pilinin J - V karakteristiği.....	50
Şekil 4.6. İki eklemli güneş pili veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi....	51
Şekil 4.7. GaAs/Ge iki eklemli güneş pilinde akım uyumlandırması.....	52
Şekil 4.8. Ge'nin alttaş ve ikinci bir p-n eklemi olarak kullanıldığı pilde, üstteki p-n eklemının kalınlığının ve E_G 'sinin verime etkisi.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Üç eklemli monolitik güneş pili veriminin E_{G2} ile E_{G3} değişimi.....	54
Şekil 4.10. Üç eklemli monolitik güneş pilinin J - V karakteristiği.....	55
Şekil 4.11. Üç eklemli monolitik güneş pili veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi.....	55
Şekil 4.12. GaInP/GaInAs/Ge üç eklemli monolitik güneş pilinde akım uyumlandırması.....	56
Şekil 4.13. GaInP/GaInAs/Ge üç eklemli güneş pilinde, üstteki p-n eklemnin kalınlığının ve E_G 'sinin verime etkisi.....	57
Şekil 4.14. Geleneksel p-n eklem güneş pilinde Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkisi (a) $X=1$ için, (b) $X=46000$ için.....	58
Şekil 4.15. Çoğullama olasılığının verim üzerindeki etkisi.....	59
Şekil 4.16. Optimum E_G 'li iki eklemli güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi.....	59
Şekil 4.17. İki eklemli güneş pilinde üstteki p-n eklemnin kalınlık değişimine bağlı olarak Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 4.18. GaAs/Ge güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi.....	61
Şekil 4.19. GaAs/Ge güneş pilinde üstteki p-n eklemnin kalınlık değişimine bağlı olarak Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkisi.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
K	Kelvin
m	Hava kütlesi
E_G	Yasak Bant aralığı (eV)
E_F	Fermi enerji seviyesi
Δn	Fazlalık elektron yoğunluğu (cm^{-3})
Δp	Fazlalık boşluk yoğunluğu (cm^{-3})
$L_{e/h}$	Elektron ve boşlukların difüzyon mesafesi
$D_{e/h}$	Elektron ve boşlukların difüzyon katsayıları
$\tau_{e/h}$	Elektron ve boşlukların ömür süreleri
$\mu_{e/h}$	Elektron ve boşlukların mobiliteleri
P_i	Güneş pili yüzeyine gelen güç yoğunluğu
P_m	Maksimum çalışma güç yoğunluğu
V_{oc}	Açık devre gerilimi (volt)
J_{sc}	Kısa devre foto akım yoğunluğu (mA/cm^2)
J_o	Diyot kaçak akım yoğunluğu (mA/cm^2)
J_e	Elektron akım yoğunluğu (mA/cm^2)
J_h	Boşluk akım yoğunluğu (mA/cm^2)
R_s	Parazitik seri direnç (ohm)
R_{sh}	Şönt direnç (ohm)
R_L	Yük direnci (ohm)
η	Verim
ε	Enerji (eV)
λ	Dalgaboyu (nm)
n	Elektron yoğunluğu (cm^{-3})

Simgeler**Açıklama**

p	Boşluk yoğunluğu (cm^{-3})
P	Güç yoğunluğu (W/m^2)
μ	Mobilite (cm^2/Vs)
T	Sıcaklık (K)
c	Işık hızı
h	Planck sabiti
X	Işık konsantrasyonu
e	Elektron yükü ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
w	Baz kalınlığı (μm)

Kısaltmalar**Açıklama**

GW	10^9 Watt
AM0	Atmosferin dışındaki güneş ışıma spektrumu
AM1	Deniz seviyesine dik gelen güneş ışıma spektrumu
AM1.5	Dikeyle 48° açı yaparak gelen ışıma güneş spektrumu
AM2	60° açıyla gelen ışıma güneş spektrumu
DDM	Detaylı denge modeli
CB	İletkenlik bandı
VB	Valans bandı
Cz	Czochralski
FZ	Floating zone

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun enerji ihtiyacı, artan nüfusa ve teknolojiye bağlı olarak gün geçtikçe hızlı bir şekilde artmaktadır. Mevcut geleneksel enerji kaynaklarından petrol, kömür ve doğal gazın yakın bir gelecekte tükenme durumuna geleceği açıktır. Ayrıca, bu enerji kaynaklarının giderek artan oranda kullanımı nedeniyle, dünya küresel ısınma tehditi ile karşı karşıyadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak ve geleneksel enerji kaynaklarına alternatif çevre dostu enerjilerin elde edilmesi için, uzun süredir yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında; güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmeyi amaçlayan güneş pilleri, önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

Hammadde girdileri ve yoğun üretim teknolojisi nedeniyle, ilk yatırım maliyeti yüksek olan güneş pilleri; işletme maliyetlerinin düşük olması sebebiyle, kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Son yıllarda güneş pili teknolojisinde yaşanan gelişmeler ve güneş pili pazarının büyümesiyle maliyetler düşüş eğilimi göstermektedir. Ancak, güneş enerjisinden üretilen elektrik enerjisi, fosil yakıtlardan üretilen elektrik enerjisi ile rekabet edecek seviyeye henüz gelmemiştir. Bu sebeple; güneş pilleri üzerindeki çalışmalar, düşük maliyetle yüksek verimli piller üretilmesine odaklanmıştır.

Güneş pillerinde verimi sınırlayan en önemli etken, güneş spektrumunun tam olarak soğurulamamasıdır. Seçilen bant aralığının büyüklüğüne göre, enerjisi bant aralığından küçük olan fotonlar soğurulamazken, büyük enerjili fotonların enerjisinin bir kısmı termalizasyonla kaybolmaktadır. Son zamanlarda, güneş spektrumunun daha büyük bölümünü soğurmak için, çok eklemlili (multi-junction) piller, aşağı ve yukarı enerji dönüşümü pilleri, çoklu sıcaklık pilleri, çoklu soğurma pilleri ve arabant yapılı güneş pilleri (ABGP) üzerinde çalışmalar yürütülmektedir.

Bu tez çalışmasında, güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünü soğurarak yüksek verim sağlayan çok eklemli güneş pilleri üzerinde teorik analizler yapılmıştır.

Bölüm 2’de, enerji üretiminin küresel ısınmaya olan etkilerine ve güneş pillerinin gerekliliğine değinildikten sonra; güneş pillerinde fotovoltaiik etkiyi sağlayan, güneş enerjisi ve güneş enerji spektrumu hakkında bilgi verilmiştir. Güneş pili pazarının bugünkü durumuna ve gelecek beklentilerine yer verilmiştir. Daha sonra güneş pillerinin yapısı ve çalışma prensipleri açıklanarak, verimine etki eden faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Son olarak güneş pillerinin tarihçesi sunulmuştur.

Üçüncü Bölümde, çok eklemli güneş pillerinin tarihçesi ve farklı uygulamaları özetlenmiş, üç eklemli GaInP/GaInAs/Ge güneş pilinin yapısı açıklanmıştır. Geleneksel p-n eklem ve çok eklemli güneş pilinin Detaylı Denge Modeli (DDM) ile teorik verim sınırının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler verilmiştir.

Bölüm 4’de, geleneksel p-n eklem ve çok eklemli monolitik güneş pillerinin siyah cisim ışıması altında Detaylı Denge Modeli (DDM) ile verim analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda güneş pillerinin güneş enerjisini tamamen soğuracağı uygun kalınlık değeri alınarak, yasak band aralığının (E_G) değişimi ile verimin bundan nasıl etkilendiği incelenmiştir. En yüksek verim değerini sağlayan optimum E_G ’ler için; güneş pillerinin J-V karakteristiği elde edilmiş, ışık konsantrasyonu arttıkça verimin bundan nasıl etkilendiği analiz edilmiştir. İki eklemli ve üç eklemli güneş pilinin akım uyumlandırması (current matching) kapsamında, üstteki p-n eklemlerinin kalınlık değişiminin verime ve kısa devre akımlarına etkisi incelenmiştir. Son olarak, Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

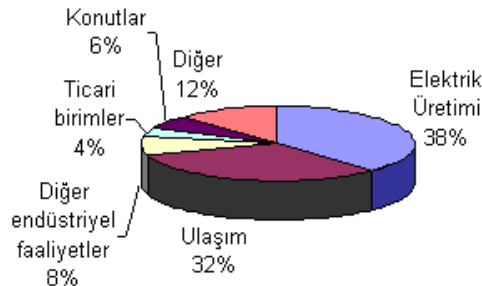
Son bölümde ise yapılan çalışmalar hakkında genel bir değerlendirmeye ve geleceğe yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. GÜNEŞ PİLLERİ VE TARİHÇESİ

Fotovoltaik piller olarak da tanımlanan güneş pilleri, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elektronik devre elemanlarıdır. Bu kısımda, enerji üretiminin küresel ısınmaya olan etkilerine ve güneş pillerinin gerekliliğine değinildikten sonra; güneş pillerinde fotovoltaik etkiyi sağlayan, güneş enerjisi ve güneş enerji spektrumu hakkında bilgi verilmiştir. Güneş pili pazarının bugünkü durumuna ve gelecek beklentilerine yer verilmiştir. Daha sonra güneş pillerinin yapısı ve çalışma prensipleri açıklanarak, verimine etki eden faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Son olarak fotovoltaik pillerin tarihçesi sunulmuştur.

2.1. Enerji Üretimi ve Küresel Isınma

Küresel ısınma ve buna bağlı olarak gelişen iklim değişikliği olgusu; artan enerji tüketimi, kentleşme ve buna bağlı ormansızlaşma gibi insan kaynaklı etkinlikler sonucunda ortaya çıkan, çevresel ve beşeri güvenliği tehdit eden en büyük çevre sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir [1]. Küresel ısınmanın başlıca nedeni olan sera gazlarının oluşumunda, özellikle enerji üretimi esnasında açığa çıkan karbondioksit ve sera gazlarının etkisi büyüktür. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, karbondioksit ve sera gazı yayarak atmosferi kirleten faktörler arasında en büyük payın sahibi, %38 ile elektrik üretimidir. Küresel ısınmanın durdurabilmesi, en azından etkilerinin azaltılabilmesi için, atmosferi kirletmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz zorunludur [2].



Şekil 2.1. Atmosferi kirleten kaynaklar [2].

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, hem çevre kirlenmesini önleyecek hem de insanlığın kısıtlı miktardaki fosil yakıtlarına bağımlılığına son verecektir. Bu, Türkiye gibi pek çok ülke için enerjide dışa bağımlılıktan kurtulma anlamına gelmektedir. Ayrıca güneş enerjisi, tüketimin gerçekleşeceği bölgede üretilebileceği için, enerji dağıtım problemi de olmayacaktır [2].

2.2. Güneş ve Güneş Enerjisi Spektrumu

Dünyanın en önemli enerji kaynağı güneştir. Güneşin ısıtım enerjisi, yer ve atmosfer sistemindeki fiziksel oluşumları etkileyen başlıca enerji kaynağıdır. Dünyadaki madde ve enerji akışları güneş enerjisi sayesinde mümkün olabilmektedir. Rüzgâr, deniz dalgası, okyanusta sıcaklık farkı ve biokütle enerjileri, güneş enerjisinin değişim geçirmiş biçimleridir. Güneş enerjisi, doğadaki su döngüsünün gerçekleşmesinde de rol oynayarak, akarsu gücünü oluşturmaktadır. Doğal enerji kaynaklarının pek çoğunun kökeni olan güneş enerjisinden, ısıtma ve elektrik elde etme gibi amaçlarla doğrudan yararlanılmaktadır [3].

Güneş enerjisi çevre açısından temiz bir kaynak özelliği taşıdığından fosil yakıtlara alternatif olmaktadır. Yeryüzüne her yıl düşen güneş ısıtım enerjisi, yeryüzünde şimdiye kadar belirlenmiş olan fosil yakıt haznelerinin yaklaşık 160 katı kadardır. Yeryüzünde fosil, nükleer ve hidroelektrik tesislerinin bir yılda üreteceği enerjiden 15.000 kat kadar daha fazladır [3]. Ayrıca, güneş enerjisi hem bol, hem sürekli ve yenilenebilir, hem de bedava bir enerji kaynağıdır. Bunların yanı sıra geleneksel yakıtların kullanımından kaynaklanan çevresel sorunların çoğunun güneş enerjisi üretiminde bulunmayışı bu enerji türünü temiz ve çevre dostu bir enerji yapmaktadır.

Çapı yaklaşık 1,4 milyon km olan ve iç çevresinde çok yoğun gazlar bulunan güneş, dünyamızdan 150 milyon km uzaklıktadır. Güneşin merkezindeki sıcaklık milyonlarca dereceye ulaşırken, yayımlanan ışıının spektrumunu belirleyen yüzey tabakasının (fotoser) sıcaklığı 6000 K'dir.

Yeryüzüne diğer yıldızlardan da elektromanyetik spektrumun değişik aralıklarında enerji gelmektedir; ancak, yerkürenin temel enerji kaynağı güneş olup, yerküreye gelen ışıının büyükçe bir bölümü görünür bölgededir. Enerji taşıyan birimler gibi düşünebilecek “fotonlar”, spektrumun görünür bölgesinin kırmızı yanında daha küçük enerji, mavi-mor yanında daha büyük enerji taşırlar. Seçilen bir dalga boyundaki fotonun taşıdığı enerji ve o dalga boyunda birim yüzeye birim zamanda gelen foton sayısı, seçilen dalga boyundaki gücü tanımlar. Dünyamıza güneşten gelen ve spektrumun kırmızının ötesinde kalan kızılötesi ve morun ötesinde kalan mor ötesi bölgelerinde bulunan ışıının da toplam enerjiye önemli bir katkısı vardır. Güneşin gücü, yani bir saniyede güneş sistemine verdiği enerji, çok büyük olmasına karşın, yerküre atmosferinin dışına ulaşan tutar yalnızca küçük bir bölümüdür [4].

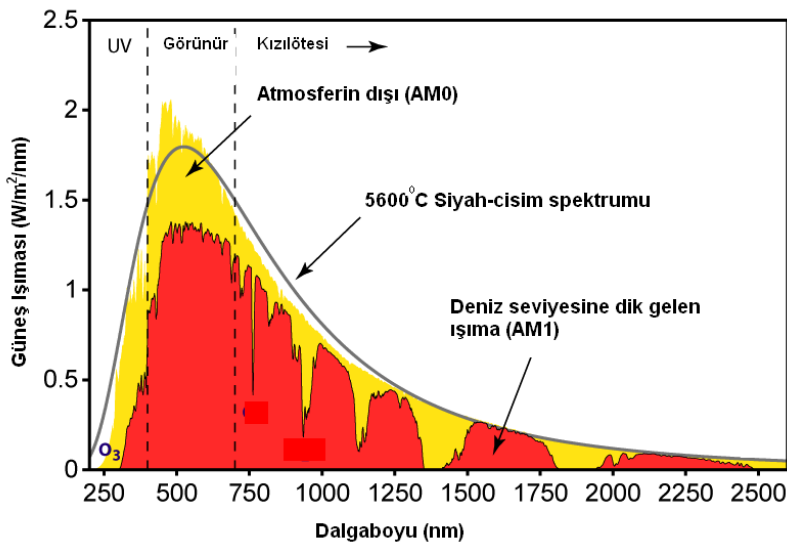
Güneş ışıınının atmosferi geçerken uğradığı değişimin bağlı olduğu değişkenlerin sayısı oldukça çok olmasına karşın, en önemli değişken, ışığın atmosferde aldığı yolun uzunluğudur. Atmosferin kalınlığını “ L_o ” ve ışığın atmosferde aldığı yolu “ L ” olarak tanımlarsak, hava kütlesi (air-mass) katsayısı aşağıdaki gibi karşımıza çıkmaktadır.

$$m=L / L_o \quad L / L_o=1 / \cos(\alpha) \quad (2.1)$$

Burada α , güneşten gelen ışığın dikeyle yaptığı açıdır. AM0 atmosferin dışındaki durumu, AM1 açık bir günde deniz seviyesine ışığın dik gelme durumunu ve AM1.5 ise ışığın dikeyle 48 derece açı yaparak gelmesi durumunu temsil etmektedir. AM1.5 spektrumu için birim yüzeye gelen toplam güç, tüm spektrum üzerinden entegre edilirse ulaşılan değer 1.0 kW/m² olup, elde edilen değer güneş pillerinin verimliliğinin ölçülmesinde standart test koşulu olarak kullanılmaktadır [5].

Sıcak cisimlerden ışıınım, elektromanyetik özelliğe sahip olup gücün spektral dağılımı sıcaklığın bir fonksiyonudur. Şekil 2.2'de 5600 °C'deki mükemmel siyah-cisim ışımasının spektrumu, atmosferin hemen dışındaki ve yeryüzündeki güneş ışıınının spektral dağılımı karşılaştırılmaktadır. Güneş ışıınları atmosferi geçerken spektrumları önemli ölçüde değişikliğe uğrar. Bulutsuz ve güneşli bir havada bile güneş ışıınları atmosferi geçerken su buharı, oksijen, karbondioksit, ozon, azot, metan gibi gaz moleküllerinin yanında, aerosol ve toz zerreciklerinde saçılarak yeryüzüne ancak atmosfer dışındaki enerjinin %70 ulaşır.

Yeryüzüne düşen güneş ışıınları, doğrudan güneşten gelen ve atmosferde saçıldıktan sonra yayınımına (difüzyona) uğramış ışıınların toplamıdır. Hava koşullarına bağlı olarak doğrudan güneşten gelen ışıınların, saçılmış ışıına oranı değişir; örneğin, bulutlu bir günde, güneş ışıınının önemli bir bölümü, saçılmış ışıınlardan oluşurken, güneşli bulutsuz bir günde güneş enerjisinin büyük bir kısmı, doğrudan ışıınlardan oluşacaktır. Doğrudan ve yayınık ışıınının toplamı, küresel ışıınım olarak adlandırılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin seçiminde, güneş ışıınının verileri büyük önem taşımaktadır [4].



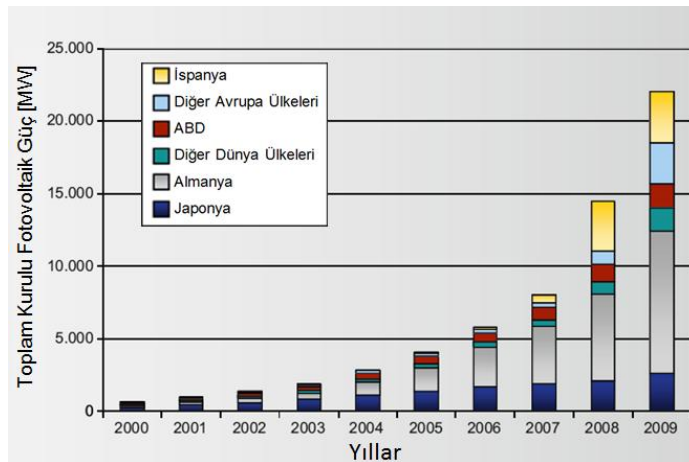
Şekil 2.2. Güneş enerji spektrumu [6].

2.3. Güneş Pili Pazarının Mevcut Durumu

Fotovoltaik sistem maliyetleri, hammadde girdileri ve yoğun üretim teknolojisi nedeniyle halen yüksektir. Bu yüzden de güneş enerjisi ile üretilen elektriğin birim fiyatı, diğer bilinen santral tiplerinden üretilenlere göre daha yüksektir.

Son yıllarda güneş pili teknolojisinde yaşanan gelişmeler ve güneş pili pazarının büyümesiyle maliyetler düşüş eğilimi göstermektedir. 2000 yılından bu yana yıllık fotovoltaik malzeme üretiminin büyüme oranı %40 ile %80 arasında değişmektedir. 2009 yılında, bir önceki yıla oranla %56'lık artış sağlanmış, yaklaşık 11,5 GW'lık fotovoltaik malzeme üretilmiştir [7].

2009 yılı sonu itibariyle dünyada toplam kurulu fotovoltaik güç 22 GW'tır. Toplam kurulu gücün 16 GW'ı Avrupa Birliği ülkelerindedir. Bu ülkelerden 8877 MW'lık kurulu gücüyle Almanya, dünyadaki fotovoltaik kurulu gücünün yaklaşık %40'ına sahiptir [8]. Almanya'yı 3,5 GW'lık kurulu gücü ile İspanya takip etmektedir [7]. 2010 yılı sonu itibariyle dünyada toplam kurulu fotovoltaik gücün 32 ile 37 GW arasında olması beklenmektedir. 2000 yılından bugüne kadar fotovoltaik kurulumdaki gelişmeler Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Dünyadaki toplam kurulu fotovoltaik güç miktarının yıllara göre değişimi [7].

Gelişmiş ülkeler; karbondioksit salınımlarını düşürmek, fosil yakıtların ithalatını azaltmak, enerji bağımsızlığını sağlamak ve teknoloji-yoğun iş olanakları yaratmak gibi temel nedenlerden dolayı, fotovoltaik sistemlerle üretilen çevre dostu temiz enerjiyi teşvik etmektedirler.

Örneğin; ABD’de “Net Ölçme (net-metering)” ve bazı Avrupa ülkelerinde “Şebekeye Satış Tarifesi (Feed in Tariff)” uygulamaları sayesinde, fotovoltaik sistemler yaygınlaştırılmaktadır. “Net Ölçme” uygulamasında, ileri ve geri sayan tek bir sayaç kullanılmaktadır. Gündüz güneş enerjisi ile elektrik üretildiğinde, sayaç geri saymakta; gece ise elektrik ihtiyacı şebekeden karşılanacağı için, sayaç ileri saymaktadır. “Şebekeye Satış Tarifesi” uygulamasında da güneş enerjisi ile üretilen elektrik, daha yüksek fiyatla üreticiden satın alınmaktadır. Bu uygulama için iki adet sayaç gerekmektedir.

Fotovoltaik pazarında lider konumda olan Almanya’nın “Şebekeye Satış Tarifesi” uygulaması kapsamında, 1 Ekim-31 Aralık 2010 tarihleri arasında yapılacak fotovoltaik kurulumlar için 20 yıl için geçerli olacak şebekeye elektrik enerjisi aktarma tarifesi örnek olarak Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Almanya’nın binalardaki fotovoltaik uygulamalarından şebekeye elektrik enerjisi aktarma tarifesi¹ [7].

Kapasite	Fotovoltaik Üretimle Elde Edilen Elektriğin Şebekeye Satış Fiyatı
< 30 kW	0.3303 €/kWh
30 to 100 kW	0.3142 €/kWh
100 kW to 1 MW	0.2973 €/kWh
> 1 MW	0.2479 €/kWh

Güneşten elde edilen elektriğin birim kWh fiyatı, geleneksel şebeke elektriğinin birim kWh fiyatını yakaladığında, artık bu teşviklere gerek kalmayacağı öngörülmektedir. Elektrik enerjisine yüksek talep olup da, yüksek güneş ışınımı alan bölgelerde şebeke paritesi daha erken yakalanabilmektedir.

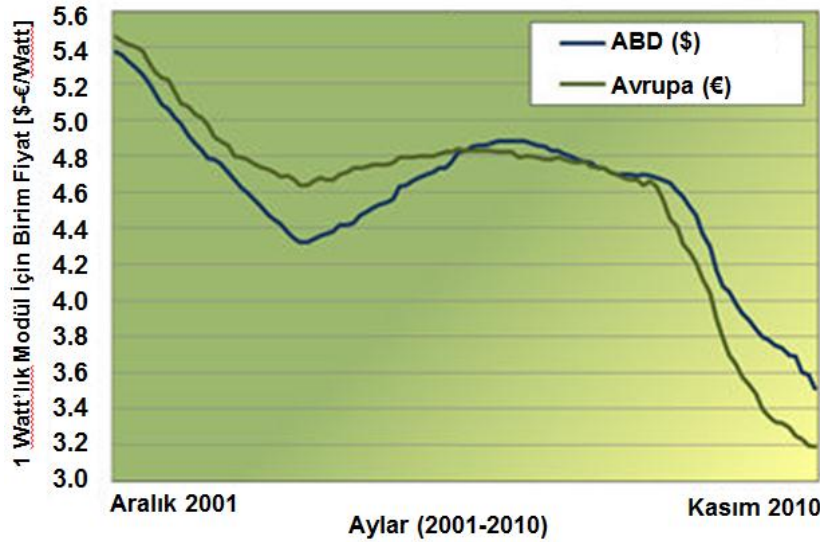
¹ Almanya’da elektriğin şebeke satış fiyatı 0.211€/kWh’tır [10].

2010 Kasım ayı itibariyle dünyada güneş pillerinin birim watt başına en düşük modül fiyatları Çizelge 2.2'de belirtilmiştir. Bu değerler, güneş pili sistemlerinin kurulum bedelinin yaklaşık % 50-60'ını yansıtmaktadır.

Çizelge 2.2. Tek kristal, poly kristal ve ince film güneş pillerinin fiyatları [9].

Malzeme	Fiyat
Tek Kristal Silisyum	\$2.27/Wp
Poly Kristal Silisyum	\$1.80/Wp
İnce Film	\$1.37/Wp

Son on yıldır güneş pili fiyatlarındaki hızlı düşüş (Şekil 2.4), güneş enerjisini fosil yakıtlarla rekabet edecek konuma getirmeye yetmemiştir. Bu sebeple güneş pili üzerine yapılan çalışmalarda asıl hedef, düşük maliyetle yüksek verimli piller elde etmektir.



Şekil 2.4. Watt başına fotovoltaik modül fiyatının yıllara göre değişimi [9].

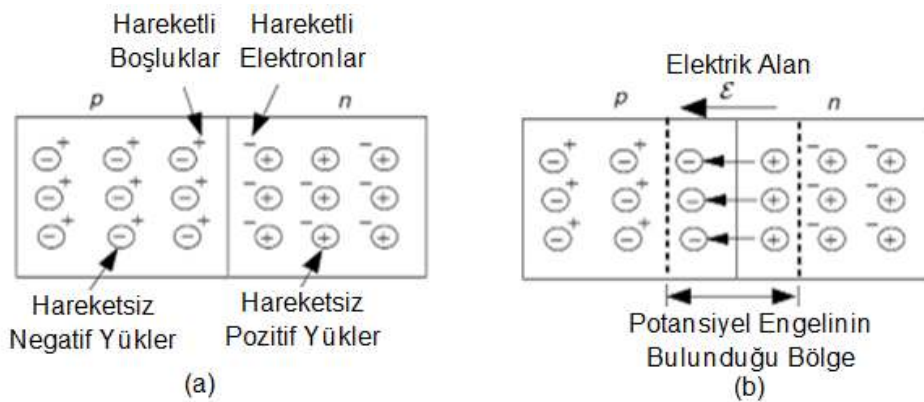
Yakıt sorununun olmaması, işletme kolaylığı, mekanik yıpranma olmaması, modüler olması, çok kısa zamanda devreye alınabilmesi, uzun yıllar sorunsuz olarak çalışması ve temiz bir enerji kaynağı olması gibi nedenlerle dünya genelinde fotovoltaik elektrik enerjisi kullanımı sürekli artmaktadır.

2.4. Güneş Pili Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Güneş pillerinin kalbi olan fotovoltaik çevirimde en çok kullanılan malzeme, elektriksel iletkenlik karakteristikleri birbirinden farklı olan p-tipi yarı-iletken ile n-tipi yarı-iletken den oluşan p-n eklem diyotlardır. Güneş pilinin çalışma prensibinin daha kolay anlaşılabilmesi için bu kısımda p-n eklem diyot hakkında genel bilgi verilerek, güneş ışınımı altında p-n eklem diyotun davranışı analiz edilecektir. Müteakiben, güneş pilinin yapısı ve önemli parametreleri incelenerek, verimliliğine etki eden faktörler ele alınacaktır.

2.4.1. p-n eklem diyot

n-tipi yarı-iletken ile p-tipi yarı-iletken fiziksel olarak birbirlerine eklendiğinde n-tipi yarı-iletkenin çoğunluk taşıyıcıları elektronlar p-tipi yarı-iletken tarafına ve p-tipi yarı-iletkenin çoğunluk taşıyıcıları boşluklar n-tipi tarafına akmaya başlar. Elektronların n-tipi bölgeden ayrılması ile geride artı (+) yükler kalırken, boşlukların p-tipi bölgeyi terk etmesi ile birlikte geride eksi (-) yükler kalmaktadır. Çoğunluk taşıyıcılarının eklem üzerinden akışları, eklem hemen çevresindeki bölgeyi etkilemektedir. Geride kalan (+) ve (-) yükler eklem çevresinde bir elektrik alan oluştururken, bu alan, iki ayrı bölgedeki taşıyıcı farklarından dolayı oluşan doğal akışı engelleyici yönde artmaktadır.

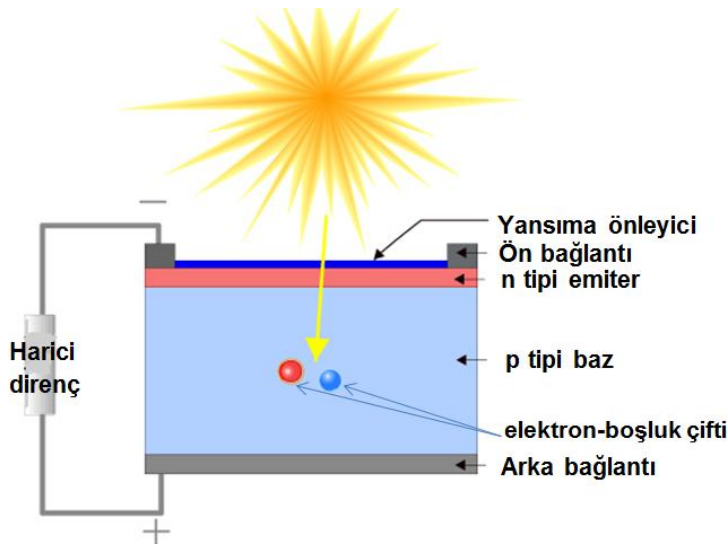


Şekil 2.5. p-tipi ve n-tipi yarı-iletkenler,
(a) Birleşmeden önce,
(b) Birleştikten sonra

Denge kurulduğunda (Şekil 2.5), taşıyıcı akışı durmakta ve eklem çevresinde bir elektrik alan kurulmaktadır. Bu elektrik alanın büyüklüğü, kullanılan yarı-iletkenlere ve yarı-iletkenlerin katkılanmalarına bağlıdır.

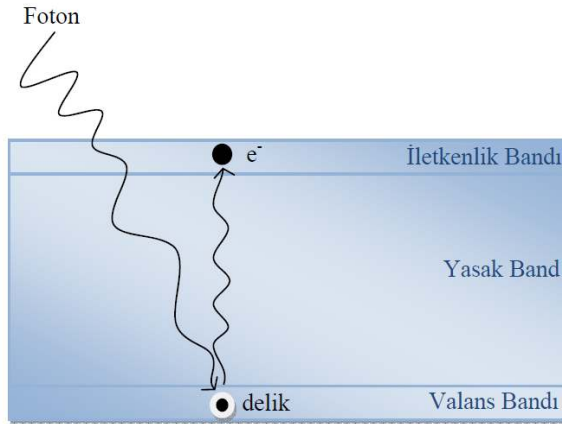
2.4.2. Güneş ışıınımlı altında p-n eklem diyot

Şekil 2.6'da kesit alanı gösterilen güneş pilinden elektriksel güç elde edilebilmesi için, güneşten gelen fotonların fotovoltaiik malzeme tarafından soğurularak foto akımın ve gerilimin üretilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.6. Güneş pili kesit alanı

Bu süreçte iki temel aşama vardır. p-n eklem diyodun p ve n bölgelerine gelen fotonlar soğurulduğunda; enerjisi yasak band aralığından daha yüksek olan fotonlar, değerlik bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkararak elektron-boşluk çiftleri (Şekil 2.7) oluştururlar. Elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılarak, harici yük üzerinden bir foto akım akar ve böylelikle yüksek enerjili elektronlar enerjisini harici yüke aktararak tekrar güneş piline dönerler.



Şekil 2.7. Elektron-boşluk çiftinin oluşumu

i) Foto akımın üretilmesi

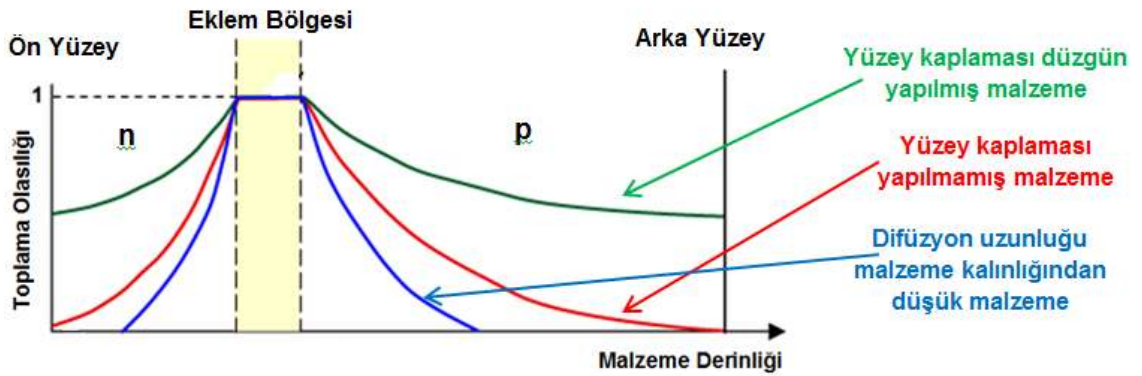
n tipi ya da p tipi bir malzeme üzerine güneş ışığı düştüğünde, yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, eşit sayıda elektron ve boşluk çifti oluştururlar ($\Delta n = \Delta p$). Işık yoğunluğu yüksek olduğunda bile, yarı-iletken içerisindeki çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonunda önemli bir değişiklik meydana gelmezken, azınlık taşıyıcı konsantrasyonunda oldukça büyük bir artış görülmektedir [2].

p-n eklem diyodun eklem bölgesindeki elektrik alan nedeniyle, p-tipi yarı-iletkende üzerine ışık düşmesi sonucu iletkenlik bandına çıkarılmış ve eklem bölgesi sınırına ulaşmış azınlık taşıyıcıları elektronlar, hızla n-tipi bölgeye çekilirler. Aynı yaklaşımla, n-tipi bölgede elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile değerlik bandında kalan azınlık taşıyıcıları boşluklar eklem bölgesinin kıyısına ulaştıklarında p-tipi bölgeye geçerler. Özet olarak, eklem bölgesi kıyısına ulaşmış azınlık taşıyıcıları, çoğunluk taşıyıcısı olarak tanımlandıkları bölgeye geçerler. Bunun sonucu olarak fotonların diyod üzerine düşmesi sonucu üretilen elektronlar, diyodun bir tarafına; boşluklar da diğer tarafa itilirler.[4]

Bu şekilde birbirlerinden ayrılmış elektronlar ve boşluklar, Şekil 2.6'daki gibi bir dış devre üzerinden birleştirildiğinde, dış devre elemanlarından akan elektriksel yükler, doğrudan güneş enerjisinden elde edilen foto akımın kaynağıdır.

ii) Azınlık taşıyıcı toplama olasılığı

Işıyla üretilen azınlık taşıyıcı elektron ve boşlukların, difüzyonla eklem bölgesine ulaşabilme olasılığıdır. Azınlık taşıyıcıların foto akıma katkıda bulunabilmeleri için, malzemelerin difüzyon uzunluğunun güneş pili uzunluğundan daha büyük olması gerekmektedir. Bu olasılık ayrıca malzemenin yüzey özelliğine de bağlıdır. Yüzey rekombinasyon hızı yüksek olan malzemelerde, yüzeyde oluşan elektron boşluk çiftlerinin eklem bölgesine ulaşma olasılığı çok düşüktür [11].



Şekil 2.8. Fotovoltaik malzemelerin azınlık taşıyıcı toplama olasılığı

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi eklem bölgesinde üretilen azınlık taşıyıcılar, çok hızlı bir şekilde elektrik alan vasıtasıyla birbirlerinden ayrılarak foto akıma katkıda bulundukları için, eklem bölgesinde toplama olasılığı "1" olup, eklem bölgesinden uzaklaştıkça olasılık azalmaktadır. Ayrıca, yüzey rekombinasyon hızını azaltmak için kaplama yapılmamış malzemenin, yüzey bölgesinde toplama olasılığı "0" olduğu; yüzey kaplaması yapılmış malzemenin de yüzey bölgesinde toplama olasılığının arttığı gözlemlenmektedir.

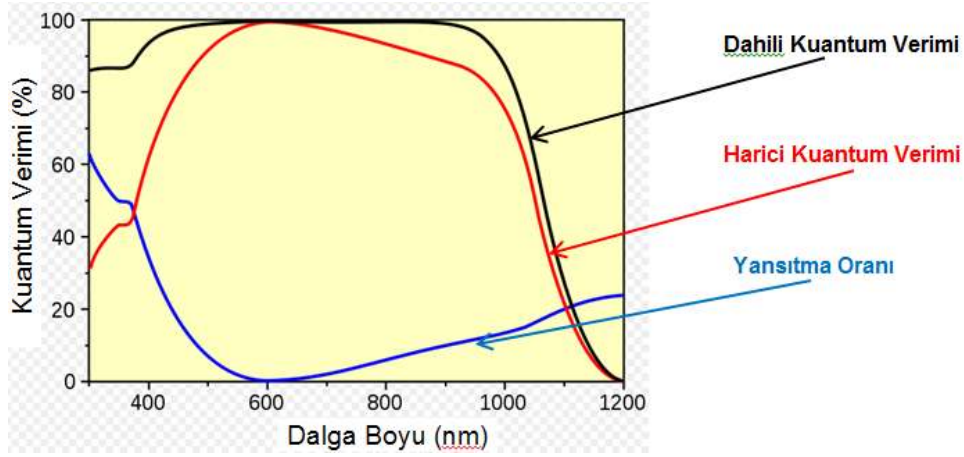
iii) Kuantum verimi

Bir fotovoltaiik malzemenin kuantum verimi, belli bir enerji aralığında malzemeye gelen her bir foton için malzeme içinde üretilen elektron boşluk çiftlerinin ne kadarının difüzyonla eklem bölgesine ulaştığının bir ölçüsüdür. Kuantum verimi, dalga boyu ya da enerjinin bir fonksiyonu olarak verilir. Malzemenin kuantum verimine bakılarak, fotovoltaiik malzemenin güneş enerjisi spektrumunun hangi dalga boyu ya da enerji aralığında daha hassas olduğu anlaşılabilir.

Belli bir dalga boyunda fotovoltaiik malzemeye çarpan tüm fotonlar malzeme tarafından soğurulduğunda ve üretilen azınlık taşıyıcıların tamamı eklem bölgesine ulaştığında, o dalga boyu için malzemenin kuantum verimi %100 olmaktadır. Enerjisi fotovoltaiik malzemenin yasak band aralığından küçük fotonlar ise malzeme içinde elektron boşluk çifti üretemeyeceğinden, o dalga boyu için malzemenin kuantum verimi %0 olacaktır.

Kuantum verimi, harici ve dahili kuantum verimi olmak üzere iki şekilde tanımlanmaktadır. Harici kuantum verimi, yukarıda tanımlandığı üzere belli bir enerji aralığında malzemeye çarpan her bir foton için üretilen azınlık taşıyıcıların ne kadarının difüzyonla eklem bölgesine ulaştığının bir ölçüsü iken; dahili kuantum verimi, malzeme tarafından belli bir enerji aralığında soğurulan fotonların aynı şekilde ne kadarının azınlık taşıyıcıların eklem bölgesine ulaşabilme ölçüsünü tanımlar.

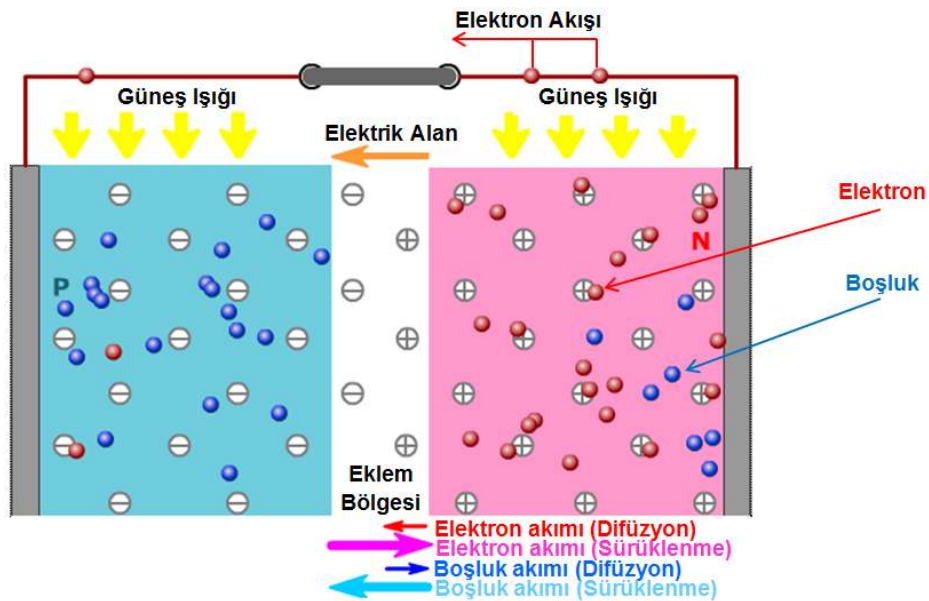
Fotovoltaiik malzemeye çarpan fotonlar belli bir oranda geri yansıyacağından, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi her zaman dahili kuantum verimi harici kuantum veriminden büyük olacaktır. Ayrıca, azınlık taşıyıcı toplama olasılığını etkileyen faktörler kuantum verimini de etkilemektedir.



Şekil 2.9. Kristal yapıdaki silikon güneş pilinin harici ve dahili kuantum verimleri ile yansıtma oranının dalga boyuna göre değişimi [12].

iv) Fotovoltaik Etki

Güneş pilinde gerilim üretilmesi “Fotovoltaik Etki” denilen bir mekanizma ile sağlanır. Fotovoltaik etki, bir yarı-iletkenin, p-n eklemünde, potansiyel engelinin bulunduğu bölgeye ışık verildiğinde, eklemdeki potansiyel engeline meydana gelen düşme miktarı kadarlık gerilim üretmesi olarak tanımlanabilir [2]. Fotovoltaik etkinin daha kolay anlaşılması için Şekil 2.10’da p ve n bölgeleri kısa devre yapılmış p-n eklemünün güneş ışınımı altındaki durumunu inceleyelim.



Şekil 2.10. Güneş pilinin kısa devre durumu [13].

Azınlık taşıyıcılar eklem bölgesindeki elektrik alan vasıtasıyla birbirinden ayrılarak, elektronlar güneş pilinin n tarafından p bölgesine akmaktadır. Kısa devre durumunda elektron ve boşluklar elektrik alan vasıtasıyla hareket ettirildiklerinden, üretilen foto akımın çoğunluğunu sürüklenme akımı oluşturmakta, difüzyon akımı ise ihmal edilecek kadar düşük olmaktadır. Kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} ile güneş enerjisi spektrumu arasında aşağıdaki eşitlik bulunmaktadır.

$$J_{sc} = q \int b_s(E)Q(E)dE \quad (2.2)$$

Burada q elektron yüküdür. $b_s(E)$, $E + dE$ enerji aralığında birim alana birim sürede gelen foton akısıdır. $Q(E)$, kuantum verimidir.

Malzemenin n ve p tarafı arasına harici bir yük ilave edilerek ışııkla üretilen azınlık taşıyıcıların güneş pilinden ayrılması engellenmeye çalışılırsa, elektronlar n tarafından p tarafına rahat akamayacağından eklem bölgesinin n tarafında elektronların ve p tarafında da boşlukların konsantrasyonu artmaya başlayacaktır. Bu durum, eklem bölgesinde var olan elektrik alana ters yönde bir elektrik alan oluşturacağından, eklem bölgesindeki net elektrik alan azalacaktır. Azalan elektrik alan, elektron ve boşlukların difüzyon (karanlık) akımının artmasına sebebiyet verecektir. Karanlık akım yoğunluğu $J_{dark}(V)$, ideal diyot denkleminde olduğu gibi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$J_{dark}(V) = J_o(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) \quad (2.3)$$

J_o , kaçak akımı; k_B , Boltzmann sabitini; T , güneş pilinin sıcaklığını; V ise diyodun eklem bölgesindeki gerilimi temsil etmektedir.

Güneş pilinin toplam akımı, kısa devre akımı ile karanlık akımın toplamından oluşacaktır.

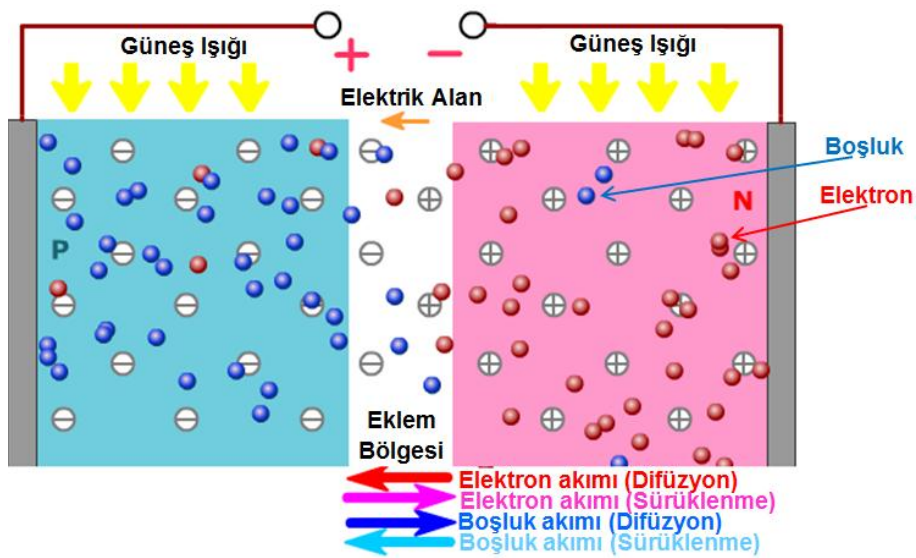
$$J(V) = J_{sc} - J_{dark}(V) \quad J(V) = J_{sc} - J_o(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) \quad (2.4)$$

Harici yükü artırdığımızda, karanlık akım da artacaktır. Karanlık akım, foto akıma eşit olduğunda net akım sıfır olacağından, tam bu noktada eklem bölgesindeki potansiyel engelindeki düşme miktarı açık devre gerilimini oluşturacaktır.

$$J_{dark} = J_o(e^{\frac{qV_{oc}}{k_B T}} - 1) \quad (2.5)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_o} + 1 \right) \quad (2.6)$$

Eş. 2.6'dan anlaşılacağı gibi açık devre gerilimi, foton yoğunluğu ile logaritmik olarak artmaktadır. Açık devre durumundaki p-n eklemine güneş ışınımı altındaki durumu Şekil 2.11'de belirtilmiştir.



Şekil 2.11. Güneş pilinin açık devre durumu [13].

Şekil 2.11, Şekil 2.10 ile karşılaştırıldığında; açık devre durumunda eklem bölgesindeki net elektrik alanının azaldığı ve elektron ve boşlukların difüzyon akımlarının arttığı gözlemlenmektedir.

2.4.3. Güneş pili yapısı ve eşdeğer devresi

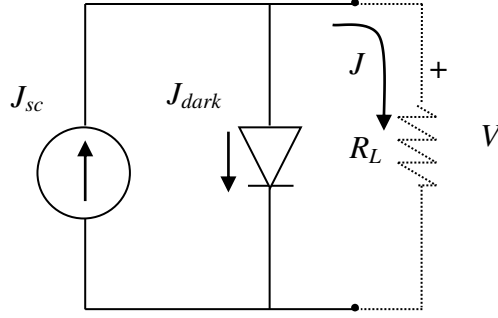
Tek kristal yapıdaki silikon güneş pilinin kesiti Şekil 2.12’de görülmektedir. Pilin üst yüzeyi prizma şekilli yapıda (surface texturing) olup, yansımaya önleyici kılıf ile kaplanmıştır. Prizma şekilli yapının amacı, pil yüzeyinden geri yansıyan fotonların ikinci bir defa daha pile çarpmasını ve fotonların pil içerisinde daha fazla yol almasını sağlamaktır [5]. Yansımaya önleyici kılıfın amacı ise, yansımaya katsayılarını düşürerek, mümkün olduğu kadar fazla sayıda fotonun soğurulmasını katkıda bulunmaktır.

Emitter ve baz katmanlarının birleşim yerindeki p-n eklemi, taşıyıcı toplama olasılığını arttırmak için yüzeye çok yakın yapılmıştır. Baz üzerindeki emitter tabakası çok incedir ve akımı iletmek için yüzeyde iyi tasarlanmış kontak ızgara gerekmektedir. Bazı fotovoltaiik pillerde arka yüzeye yerleştirilen bir yansıtıcı ile geri dönen fotonların yeni elektron-boşluk çiftleri üretmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.12. Tek kristal yapıdaki silikon güneş pilinin yapısı [14].

İdeal bir güneş pilinin basitleştirilmiş bir eşdeğer devresi Şekil 2.13’de görülmektedir. Bu şekildeki güneş pili, akım kaynağı ve buna paralel kaçak akım diyodu ile temsil edilmiştir.



Şekil 2.13. İdeal güneş pili için eşdeğer elektriksel devre

Burada, J fotovoltaik pilin çıkış akım yoğunluğunu ve V çıkış gerilimini temsil etmektedir. J_{sc} , kısa devre foto akım yoğunluğu, ışık altındaki taşıyıcı üretim hızına (g_{op}), güneş pilinin kalınlığına (w), elektron ve boşlukların difüzyon uzunluklarına (L_e ve L_h) bağlı olarak değişmektedir.

$$J_{sc} \propto eg_{op}(w + L_e + L_h) \quad (2.7)$$

Eş. 2.7’de e elektron yüküdür. Elektron ve boşluklar için difüzyon uzunlukları aşağıdaki gibidir.

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.8)$$

Burada, D_e ve D_h elektron ve boşluklar için difüzyon katsayılarıdır. Difüzyon katsayıları ile taşıyıcıların hareket kabiliyeti olarak tanımlanan taşıyıcı mobiliteleri (μ_e ve μ_h) arasında, aşağıda verilen, Einstein bağıntısı vardır.

$$\frac{D_e/h}{\mu_e/h} = \frac{kT}{e} \quad (2.9)$$

P_i , güneşten gelen güç yoğunluğudur. $FF = J_m V_m / J_{sc} V_{oc}$ oranına doluluk veya düzeltme faktörü denilmektedir. Doluluk faktörü her zaman “1” den küçük olup, silikon güneş pilleri için 0,8 civarındadır. Doluluk faktörü eğer “1” olsa idi, maximum güç noktası Şekil 2.14’deki A1 alanının köşesi olurdu.

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_i} \quad (2.12)$$

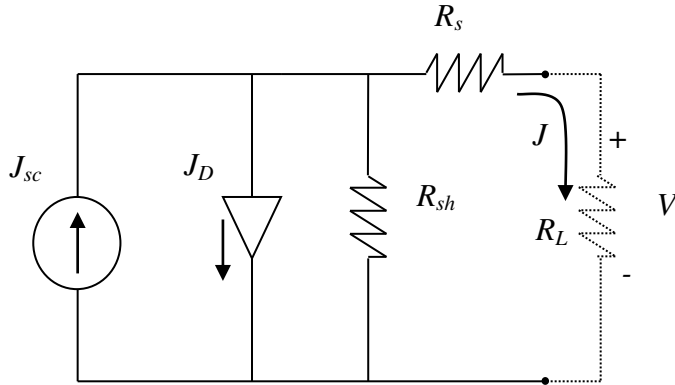
Eş. 2.12’deki η , J_{sc} , V_{oc} ve FF değişkenleri, güneş pillerinin performansını gösteren önemli parametreler olup, standart test koşulları (AM1.5 spektrumu, 25 °C) altında ölçülmektedir. Dünyada yaygın olarak kullanılan güneş pillerinin performans değerleri örnek olarak Çizelge 2.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. Güneş pillerinin performans değerleri [15].

TİP	ALAN (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%100)	η (%100)
Tek Kristal Si	4,0	0,706	42,2	82,8	24,7
Tek Kristal GaAs	3,9	1,022	28,2	87,1	25,1
Poly Kristal Si	1,1	0,654	38,1	79,5	19,8
a-Si	1,0	0,887	19,4	74,1	12,7
CuInGaSe ₂	1,0	0,669	35,7	77,0	18,4
CdTe	1,1	0,848	25,9	74,5	16,4

Çizelge 2.3 incelendiğinde, malzemenin E_G’si azaldıkça kısa devre akım yoğunluğunun arttığı, buna karşılık açık devre geriliminin azaldığı görülmektedir.

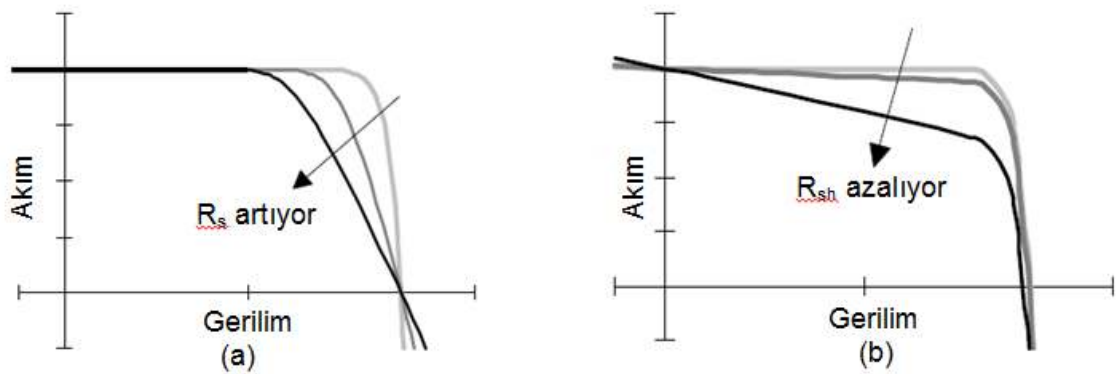
Yukarıdaki hususlara ilave olarak; gerçek güneş pillerinde yüzey ile bağlantı noktaları arasında seri direnç R_s ve eklem bölgelerindeki kaçak akımdan kaynaklanan paralel direnç R_{sh} kayıpları oluşmaktadır. Söz konusu direnç kayıpları hesaba katıldığında, güneş pilinin eşdeğer devresi Şekil 2.15’deki gibi olmaktadır.



Şekil 2.15. Gerçek bir güneş pili için eşdeğer elektriksel devre

Seri ve paralel dirençler doluluk faktörünü düşürmektedir. Bu sebeple, güneş pilleri tasarımında seri direncin mümkün olduğu kadar küçük ve paralel direncin de mümkün olduğu kadar büyük olması için tedbirler alınır. Seri ve paralel dirençlerin etkisinin hesaba katıldığı güneş pilinin, akım denklemi Eş.2.13'de verilmiştir. Şekil 2.16'da seri ve paralel dirençlerin güneş pilinin I - V karakteristiğine etkisi görülmektedir.

$$J = J_{sc} - J_o \left(e^{\frac{q(V+JAR_s)}{k_B T}} - 1 \right) - \frac{V+JAR_s}{R_{sh}} \quad (2.13)$$



Şekil 2.16. Seri ve paralel dirençlerin,
 (a) R_s azalırken I - V karakteristiğine etkisi,
 (b) R_{sh} artarken I - V karakteristiğine etkisi [15].

2.4.4. Güneş pilinde verimliliğe etki eden faktörler

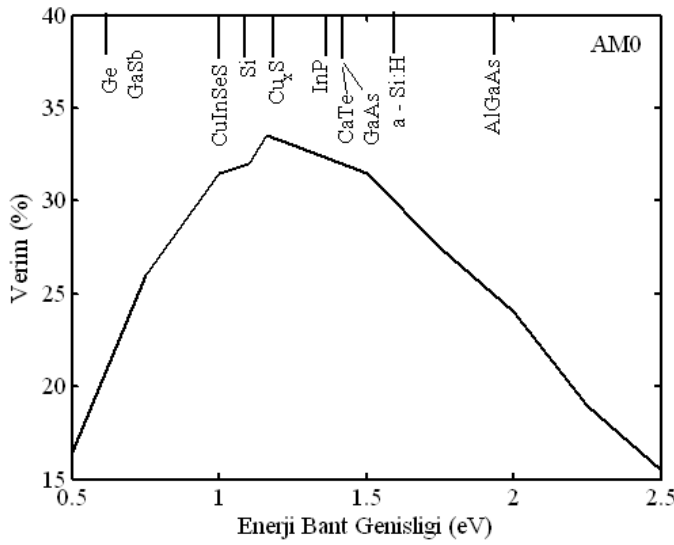
Güneş pilinde verimin artırılabilmesi için foto akım (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) mümkün olduğu kadar büyük, karanlık akımı da mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. Çizelge 2.4’de kısa devre foto akımını ve karanlık akımını etkileyen faktörler sunulmuştur. Bu etkenler fotovoltaiik pilin optimum tasarımında hesaba katılması gereken parametrelerdir [2]. Bu parametrelerden bazılarını daha yakından inceleyelim:

Çizelge 2.4. Fotovoltaiik pilin kısa devre foto akımına ve karanlık akımına etki eden faktörler [16].

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

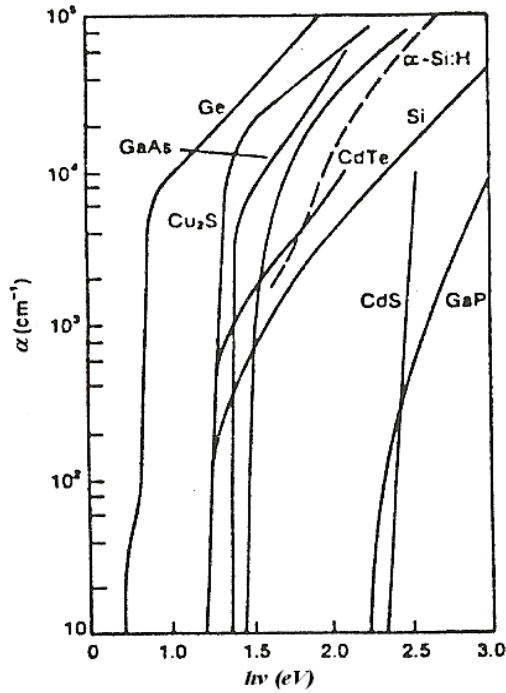
i) *Enerji bant aralığı*: Güneş spektrumu, fotovoltaiik pile gelen güç miktarını ve foton sayısını belirlediği için foto akıma etki eden temel faktörlerdendir. Fotovoltaiik pil tasarımında, güneş spektrumundan optimum soğurma sağlayabilecek enerji bant genişliğine (E_G) sahip bir malzeme tercih

edilmelidir. Eğer E_G çok büyük seçilirse küçük enerjili fotonlar soğurulamaz ve foto akım düşer. E_G çok küçük seçildiği takdirde ise foto akım artar fakat çıkış gerilimi düşer. Şekil 2.17’de, AM0 ışıma spektrumu için fotovoltaiik pil veriminin enerji bant genişliği ile değişimi verilmiştir. Enerji bant genişliği 1-1.5 eV aralığında verim en yüksek değerine ulaşmaktadır.



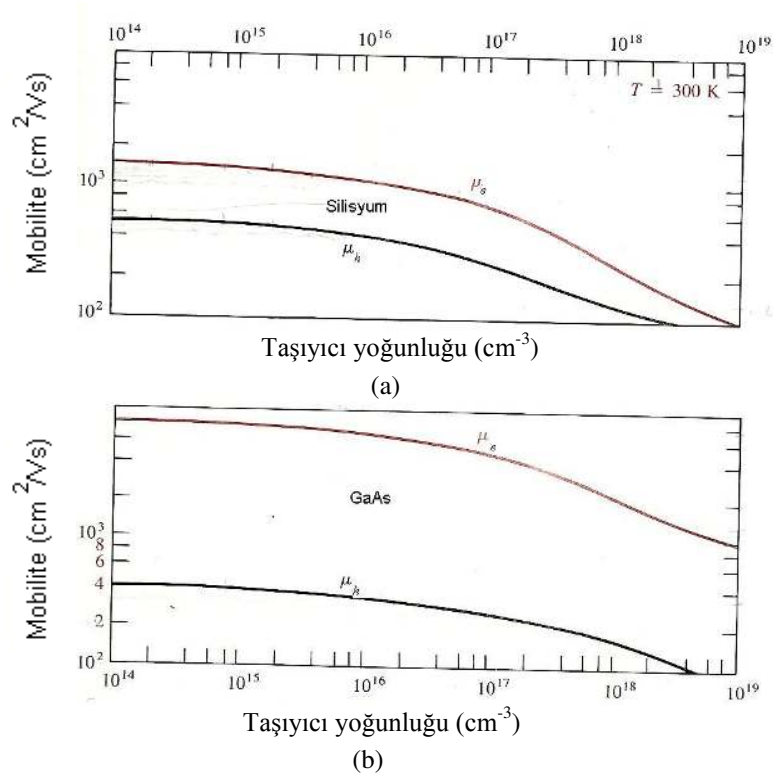
Şekil 2.17. AM0 spektrumu için ideal Shockley diodunun verim-Enerji bant genişliği değişimi [17]

ii) Soğurma katsayıları ve güneş pili kalınlığı: Güneş pilinin kalınlığı soğurma katsayısının tersi ile orantılıdır. Soğurma katsayısı ne kadar küçükse, pil kalınlığı da o kadar büyük olmalıdır. Halbuki daha önce de bahsedildiği gibi, pil kalınlığı difüzyon uzunluğundan büyük olmamalıdır. Ayrıca pil kalınlığındaki artış ışımsız rekombinasyonu ve dolayısı ile de karanlık akımını arttırmaktadır. Buna karşılık pil kalınlığı yeterli olmadığı takdirde yeterli soğurma yapılamamaktadır. Şekil 2.18’de çeşitli yarı-iletken malzemelere ait soğurma katsayılarının enerji ile değişimleri görülmektedir. GaAs gibi direkt bant yapılı malzemelerde soğurma katsayısı enerji ile çok hızlı bir biçimde artarken, silisyum gibi indirekt bant yapılı malzemelerde bu artış biraz daha yavaştır.



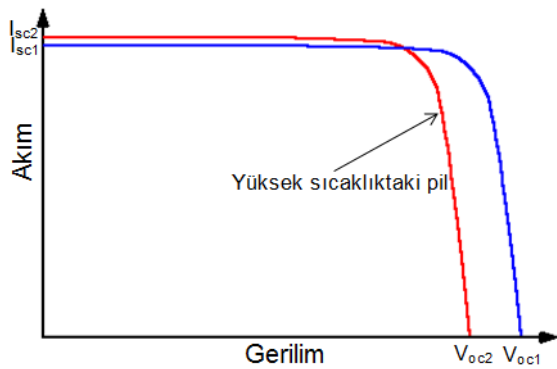
Şekil 2.18. Çeşitli yarı-iletken malzemelerde, soğurma katsayısının enerji ile değişimi [18]

iii) *Taşıyıcı mobiliteleri, ömür süreleri, difüzyon uzunluğu ve katkı konsantrasyonu*: Difüzyon uzunluğunun büyük olabilmesi için mobilitenin de büyük olması *gerekmektedir*. Şekil 2.19'da, GaAs ve silisyum için, elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi görülmektedir [19]. GaAs malzemenin taşıyıcı mobiliteleri, silisyumun taşıyıcı mobilitelerinden daha büyüktür, ancak her ikisi de katkı konsantrasyonu ile de azalmaktadır. Açık devre geriliminin büyük olması katkı konsantrasyonunun fazla olmasına bağlıdır, ancak mobilitelerin ve difüzyon uzunluğunun çok azalmaması için bir optimizasyon yapılmalıdır. Ayrıca çok katkılı malzemelerde Auger rekombinasyonu meydana gelmektedir. Difüzyon uzunluğunu belirleyen diğer parametre ömür süresidir. Ömür süresinin büyük olması için malzeme içerisinde rekombinasyon merkezi gibi davranan safsızlıklar olmamalıdır [2].



Şekil 2.19. Si (a) ve GaAs (b) için elektron ve boşluk mobilitelerinin taşıyıcı konsantrasyonu ile değişimi [19]

iv) *Sıcaklık*: Diğer yarı-iletkenler gibi güneş pilleri de sıcaklığa karşı hassastır. Yasak bant genişliği ve mobilite sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Yasak bant genişliğinin azalması ile kovalent bağı kırmak için daha az enerji gerekeceğinden kısa devre akımı çok az artar. Ancak, yasak bant genişliğinin azalması ile açık devre gerilimi (Şekil 2.20) de azalacağından, toplam verim azalacaktır.



Şekil 2.20. Sıcaklık artışının güneş pilinin I - V karakteristiğine etkisi [20]

2.5. Güneş Pillerinin Tarihçesi

Güneş pillerinin tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. İlk kez 1839 yılında A. Edmund Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek fotovoltaik etkiyi bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de, gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir.

Güneş pillerinin uygulama alanlarının genişletilebilmesi ve kullanımlarının yaygınlaştırılabilmesi için tüm dünyada çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarla, güneş pillerinin maliyetlerinin düşürülerek verimlerinin artırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla çalışma ilkeleri aynı olmak üzere, çeşitli maddeler ve yöntemler kullanarak güneş pilleri üretilmektedir. Güneş pilleri; birinci, ikinci, üçüncü ve son nesil güneş pilleri olarak sınıflandırılabilir.

2.5.1. Birinci nesil güneş pilleri

Birinci nesil güneş pilleri, tek ya da poly kristal silisyum (Si) yonga tabanlı ve tek katmanlı p-n eklem diyodundan oluşmaktadır. Bu piller kararlıdır ve yüksek verimlilik sağlamaktadırlar. Ancak üretim maliyetleri fazladır. Güneş pili piyasasının yaklaşık %90'ını birinci nesil güneş pilleri oluşturmaktadır [14].

i) Tek kristal Si güneş pilleri: 1954 yılında Bell laboratuvarlarında Chapin tarafından geliştirilen ilk Si güneş pili tek kristal yonga tabanlıdır. Başlangıçta AM1.5 spektrumu altında %6 olan pil verimliliği kısa sürede %10'a

çıkarılmıştır. Silisyumun 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. Tek kristal kullanılarak üretilen güneş pillerinde özellikle Czochralski (Cz) ve Floating zone (FZ) teknikleri kullanılmaktadır [21-22]. FZ tekniği ile elde edilen tek kristal oldukça kalitelidir ve bundan üretilen pilin verimi yüksektir. Ancak ticari amaçlı pillerde maliyeti daha düşük olduğu ve yüzey alanı daha büyük piller üretilbildiği için Cz Si tercih edilmektedir. Saf tek kristal üretimi oldukça zor ve pahalı bir teknolojiyi gerektirmektedir. Laboratuvar şartlarında elde edilen en yüksek verim %25'tir [23]. Tek kristal silisyum malzeme, güneş pili üretiminde yüksek verim için kullanılan malzemelerden biri olmakla birlikte, üretim maliyetinin yüksek olması bu alanda değişik seçenek olarak polikristal malzemenin geniş ölçekte kullanılmasına neden olmuştur.

ii) Polikristal Si güneş pilleri: Polikristal silisyumun üretilmesinde en çok kullanılan yöntem 1970'li yıllarda geliştirilen "dökme" yöntemidir [24]. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen polikristal silisyum güneş pilleri ilk defa 1975 yılında SOLAREX firması tarafından AM1 spektrumu altında %10 verimle üretilmiştir [25]. Dökme silisyum diğer yarı-iletken elektronik devrelerde kullanılmayıp, sadece güneş pillerinin yapımında kullanılmaktadır. Polikristalde, tek kristal tane sınırları birer rekombinasyon merkezi gibi davranarak taşıyıcıların ömür sürelerini azaltmakta ve verimi düşürmektedir [26]. Ancak, dökme silisyum kolaylıkla kare şeklinde dilimlere ayrılabilirdiğinden, polikristal güneş pilleri modül alanını neredeyse tamamen kaplayabilmektedir. Böylelikle, modül bazında verimde iyileşme olmaktadır. Güneş pili piyasasının yaklaşık %63'ünü %13-14'lük verimle polikristal güneş pilleri oluşturmaktadır [14]. Laboratuvar şartlarında elde edilen en yüksek verim %20,4'tür [23].

2.5.2. İkinci nesil güneş pilleri

Güneş pillerinde kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, yarı-iletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması yöntemini cazip bir yaklaşım olarak ortaya çıkarmıştır. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları güneş pilleri üretiminde kullanılabilecek bir çok yarı-iletken malzemenin düşük maliyetlerde cam, metal ya da plastik folyo gibi tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir [4]. Bu pillerin verimi birinci nesil güneş pilleri ile karşılaştırıldığında düşüktür. Ancak ikinci nesil güneş pilleri, üretim maliyetini ve kullanılan malzeme miktarını azaltmaktadır. Güneş pili piyasasının yaklaşık %5-6'sını [14] ikinci nesil güneş pilleri oluşturmaktadır. İnce film güneş pilleri arasında üç büyük aday öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf Si, kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum diselenid (CuInSe_2) bileşik yarı-iletkenidir.

i) Amorf silikon (a-Si) güneş pilleri: Amorf silikon (a-Si), silikon ve hidrojen alaşımıdır. İlk kez R. Chittick tarafından kaplaması gerçekleştirilmiştir [27]. Bu konuda ilk sistematik çalışma W. E. Spear ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [28]. 1982 yılında ilk verimliliği %10 olan a-Si güneş pili hücreleri üretilmiştir. a-Si güneş pillerinin güneş altında verimliliği hızla düştüğünden, kararlı verimlilik değerleri 1980'li yıllarda %3,5 civarında seyretmiştir. Ancak, bu sorun kısmen çözülerek, günümüzde modül verimlilikleri kararlı durumda %6-8 arasında değişen piller üretilmektedir [24]. a-Si güneş pilleri düşük güç gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

ii) Kadmiyum tellur (CdTe) güneş pilleri: Fotovoltaik dönüşümde etkin olarak kullanılabilecek CdTe bileşiği ile ilgili çalışmalar 1950'li yıllarda başlamıştır. CdTe, oda sıcaklığında yasak enerji aralığı $E_g=1,5\text{eV}$ değeri ile, güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. Yüksek soğurma katsıyı yanında, ince film büyütme

teknolojisinin bir çoğu ile kolayca üretime olanak tanınması, geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe birleşik yarı-iletkeninin öne çıkmasının sağlamıştır. Belirtilen avantajları yanında ağır metal olan kadmiyum zehirlidir ve besin zincirinde toplanmaya meyillidir. Ayrıca, tellür elementi dünyada rezerv oranı düşük olması sebebiyle pahalıdır. Laboratuvar şartlarında elde edilen en yüksek verim %16,7 olup, en yüksek modül verimliliği %10,9'dur [23]. Yukarıda belirtilen dezavantajlara ilave olarak, laboratuvar verimi ile modül verimi arasında önemli oranda fark oluşu, CdTe'ün güneş pili pazarındaki hızlı gelişememesine neden olmuştur [14].

iii) Bakır indium diselenid ($CuInSe_2$) güneş pilleri: $CuInSe_2$ (CIS) bileşiği ile ilgili çalışmalar 1975 yılında başlamıştır. 1999 yılında %12 verimle güneş pili modülü (30*30 cm) üretim hattı kurulmuştur [29]. CIS güneş pilleri ince film teknolojileri arasında en yüksek verimi sunmaktadır. Ga elementinin katılmasıyla daha yüksek verimler elde edilmektedir. Laboratuvar şartlarında elde edilen en yüksek verim %19,4 olup, en yüksek modül verimliliği %13,8'dir [23]. CIS güneş pillerinde de laboratuvar verimi ile modül verimi arasında önemli oranda fark bulunmaktadır [14].

2.5.3. Üçüncü nesil güneş pilleri

Birinci ve ikinci nesil güneş pillerinin aksine üçüncü nesil güneş pilleri p-n eklem içermezler. Bu güneş pillerinin avantajı, daha ucuz malzemeler kullanarak yada fabrikasyon aşamasını basitleştirerek maliyetin azaltılması ve verimin artırılmasıdır [2]. Organik, boya ile duyarlaştırılmış ve kuantum kuyulu güneş pilleri üçüncü nesil güneş pillerindendir

i) Organik güneş pilleri: Organik malzemeler, kimyasal yapılarını değiştirmenin mümkün olması, maliyetlerinin düşük ve işlem tekniklerinin kolay olması gibi bazı avantajlarından ötürü modern toplumun hemen her alanında kullanılabilmektedir. Organik güneş pilleri karbon bazlı polimerlerden oluşurlar. Güneş pili elde edilen tekniğe göre organik güneş

pilin özelliikleri farklılaşmaktadır. Düşük sıcaklıkta yapılan rulodan ruloya işleme, diğer yöntemlerden daha etkili olup, yüksek hızda üretimi mümkün kılmaktadır. Bu işlem tipik baskı kaplama tekniğidir. Aktif malzemeler bir çözücünde çözüldükten sonra kaplama cihazı ile plastik bir levha üzerine uygulanmaktadır [30]. Polimer malzemelerin güneş pili teknolojisinde kullanılmasına yönelik ilk araştırmalar 1980'li yıllarda yapılmıştır. O tarihlerde yapılan çalışmalarda elde edilen ilk verim %0,1'in altında olmuştur. 1986 yılında önemli bir gelişme yaşanmış ve verim %1 seviyesine ulaşmıştır [31]. Günümüzde, verimliliği % 5-6'ya kadar artmıştır. İnorganik güneş pillerinden farklı olarak geniş yüzeylere kaplanabilmesi, düşük maliyetli olması ve kolay üretilebilmesi bu teknolojinin en temel cazibelerindendir.

ii) Boya ile duyarlaştırılmış güneş pilleri: Boya ile duyarlaştırılmış güneş pillerinin çalışma prensibi fotosenteze benzerdir. Bu teknoloji, 1991 yılında Michael Grätze tarafından keşfedilmiştir [32]. Boya ile duyarlaştırılmış güneş pillerinde ışığın soğurulması ve yükün taşınması fonksiyonları ayrı olduğundan, çalışma prensibi bilinen yarı-iletken teknolojilerden farklıdır. Bu teknoloji, kristal silisyum teknolojisinin yerini alacak teknoloji olarak görülmektedir. Özellikle güneş ışığından gün boyunca elektrik üretebilme özelliğine sahip olduğundan, binaya entegre fotovoltaiik (BIPV) uygulamalarına uygun PV teknolojisi olarak görülmektedir. Laboratuvar verimi %11 ve modül verimi %6 civarında olduğundan, düşük maliyetli güneş pillerinin endüstriyel üretimi için çok önemli bir potansiyele sahiptir [33].

iii) Kuantum kuyulu güneş pilleri: Kuantum kuyusu, üç boyutta hareket serbestliğı olan elektron ya da boşlukları, iki boyutlu hareket etmeye zorlayan bir potansiyel kuyusudur. Kuantum kuyusu elde etmek için, daha büyük bant aralıklı iki malzeme arasına daha düşük bant aralıklı yarı-iletken malzeme konulur. Kuyu içerisine hapsolan elektron ve boşlukların sayısı, yarı-iletken malzemenin kalınlığına bağılıdır. Kuantum kuyulu güneş pillerinde ışık soğuruculuğı artarken rekombinasyon hızı artmaktadır. Kuantum kuyulu güneş pillerinin teorik verimliliğı %40 civarında iken ışık konsantrasyonu

arttığında verim %50 civarında olmaktadır [34]. Pratikte ise ulaşılabilen verim değeri %20-25 aralığındadır [35].

2.5.4. Son nesil güneş pilleri

Güneş pillerindeki temel sınırlamalardan biri, kullanılan her malzemenin güneş spektrumunun sadece bir bölümünü soğurabilmesinden kaynaklanmaktadır. Güneşten gelen düşük enerjili fotonlar soğurulamamaktadır. Bundan dolayı Si güneş pilleri AM-1.5 güneş spektrumu altındaki enerjinin %19'unu kullanamamaktadır. Ayrıca, yüksek enerjili fotonlar soğurulduktan sonra oluşan taşıyıcıların enerjilerinin bir bölümü latis ısısı olarak ortaya çıkmaktadır. Termalizasyon olarak adlandırılan bu durum, Si güneş pillerinin AM-1.5 güneş spektrumu altındaki enerjinin %31'inden yararlanamamasına sebep olmaktadır [36]. Söz konusu iki önemli olay, güneşten gelen enerjinin yarısından istifade edilememesine dolayısı ile verimin %50 düşmesine neden olmaktadır. Bir diğer önemli verim kaybı ise; fotovoltajik olay sonucu ortaya çıkan potansiyel gerilimin her zaman yarı-iletkenin yasak band aralığından düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da Si güneş pilleri için %16 oranında verim kaybına sebebiyet vermektedir [36].

Shockley ve Queisser tarafından üretilen detaylı denge analizi ile, siyah cisim ışınması altında tek eklem Si güneş pilinin maximum verimi yaklaşık olarak %29'dur [37]. Aynı şekilde detaylı denge analizi ile, Green tarafından AM-1.5 spektrumu altında tek eklem Si güneş pilinin maximum veriminin %26 olduğu rapor edilmiştir [38]. Si güneş pillerinden laboratuvar şartlarında elde edilen en yüksek verim %25 olup, bu değer teorik olarak elde edilen değere çok yakındır [23].

Son nesil güneş pilleri ile; yukarıda belirtilen verim kaybına sebep olan haller asgari düzeye indirgenerek, Shockley ve Queisser tarafından tek eklem güneş pili için hesaplanan teorik verim sınırının aşılması hedeflenmektedir

[39]. Son nesil güneş pilleri üzerine yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

i) Çoklu Spektrum Güneş Pilleri: Aşağı ve yukarı enerji dönüşüm güneş pilleri olmak üzere iki tip uygulaması mevcuttur. Aşağı dönüşüm piller, yüksek enerjili fotonların termalizasyonla kaybolan enerjilerini azaltmak için tasarlanmıştır. Bu yapıda, yüksek enerjili bir fotonu küçük enerjili bir yada daha fazla sayıda fotona dönüştüren özel bir yapı, geleneksel p-n eklem güneş pilinin ön yüzüne yerleştirilmiştir. Bu pillerde siyah cisim ışıması altında teorik olarak hesaplanan en yüksek verim %40 civarındadır [40]. Yukarı dönüşüm piller ise, düşük enerjili fotonların soğurulamamasından kaynaklanan verim kayıplarını azaltmak için tasarlanmıştır. Yukarı dönüşüm pilleri, geleneksel p-n eklem güneş pilinin arka yüzeyine bir dönüştürücü konulması ile elde edilmektedir. Bu yapı sayesinde küçük enerjili fotonlar, büyük enerjili fotonlara dönüştürülmektedir. Yukarı dönüşüm pillerde siyah cisim ışıması altında teorik olarak hesaplanan en yüksek verim %48 civarındadır [41].

ii) Çoklu Soğurma Güneş Pilleri: Yüksek enerjili bir fotonun ürettiği elektron, enerjisinin fazlalık kısmını başka bir elektrona vererek, o elektronu iletkenlik bandına çıkarabilir. Bu olaya “impact ionization” (Auger üretimi) denir. Bu uygulama ile yüksek enerjili fotonların birden fazla elektron boşluk çifti üretmesi sağlanarak, verimin artırılması hedeflenmektedir.

iii) Çoklu Sıcaklık (Thermophotovoltaic) Güneş Pilleri: Bu uygulamada Thermophotovoltaic (TPV) dönüşüm ile ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. TPV fikri ilk olarak 1960 yılında Aigrain tarafından ortaya atılmıştır [42]. 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. Böylelikle, 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 %45,3 olarak hesaplamışlardır [43]. Maximum konsantrasyon için teorik olarak hesaplanan verim sınırı %85,4'tür [44-45].

iv) Çoklu Enerji Seviyeli Güneş Pilleri (Ara Bant Yapılı Güneş Pilleri): Ara bant yapılı güneş pilinin (ABGP) yapısı ve ideal şartlardaki performansı, ilk olarak, 1997'de A. Luque tarafından sunulmuştur [46]. ABGP yapısında, baz bölgesinde kullanılan yarı-iletken malzemenin yasak bant aralığına bir ara bant eklenmesi gerekmektedir. Bu ara bant sayesinde, malzemenin enerji bant aralığı ikiye bölünmekte ve daha az enerjiye sahip olan fotonlar da soğurulabilmektedir. Böylece, yeni bantlar sayesinde, ABGP'nin çıkış voltajında bir azalmaya sebep olmadan akım artırılmaktadır [2]. Literatürde tek ara bant yapılı ABGP için maksimum verimlilik, %63,2 olarak sunulmuştur [47].

v) Çok eklemli (multi-junction) Güneş Pilleri: Çok eklemli güneş pillerinde, düşük enerjili fotonlar yasak band aralığı küçük olan yarıiletken üzerine, yüksek enerjili fotonlar da yasak band aralığı büyük olan yarıiletken üzerine düşürülmektedir. Böylelikle, hem düşük enerjili fotonların, hem de yüksek enerjili fotonların elektron boşluk çiftleri oluşturması sağlanarak, güneş spektrumundan azami derece faydalanılmaktadır.

Son nesil güneş pilleri içerisinde sadece çok eklemli güneş pillerinin pratikte uygulaması mevcuttur. Bu tez çalışmasında çok eklemli güneş pilleri detaylı olarak incelenecektir.

3. ÇOK EKLEMLİ (MULTI-JUNCTION) GÜNEŞ PİLLERİ

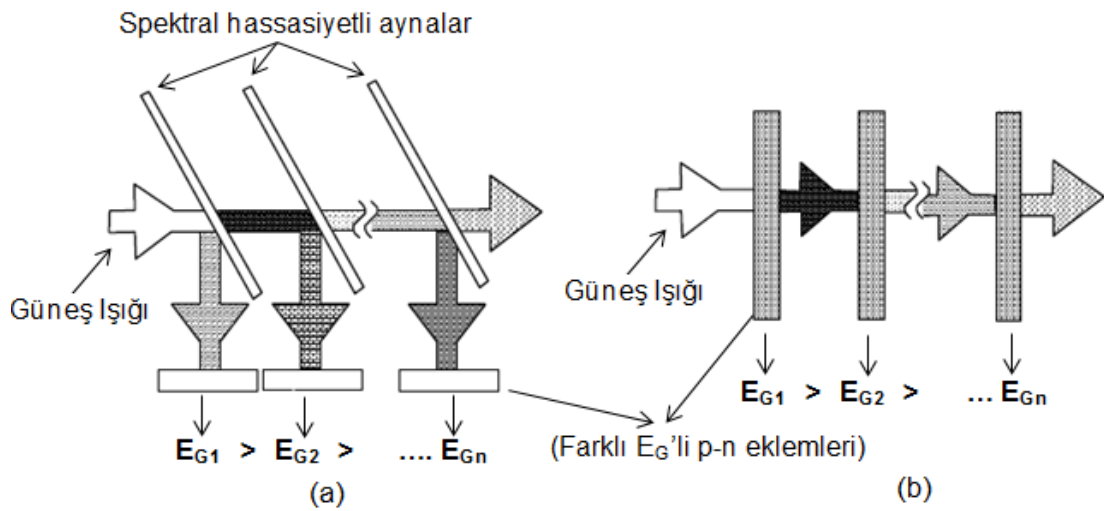
3.1. Çok Eklemlı Güneş Pilleri Tarihçesi

Geleneksel p-n eklem güneş pillerinde, yüksek enerjili fotonların fazlalık enerjilerinin ısıya dönüşmesi ve düşük enerjili fotonların soğurulamamasından kaynaklanan verim kayıpları, güneş pillerinin verimini yaklaşık %44'e sınırlamaktadır [48]. Bu kayıpları önlemenin bir yolu, güneş spektrumunu farklı enerji aralıklarına bölerek, her bir enerji aralığında yukarıda belirtilen kayıpların minimize edildiği fotovoltaiik dönüşümleri gerçekleştirecek yasak band aralığı uygun p-n eklemlerini oluşturmaktır [49]. Çok eklemlı bu yapı sayesinde; düşük enerjili fotonların fotovoltaiik dönüşümde kullanılması ve yüksek enerjili fotonların da daha fazla elektron boşluk çifti üretmesi sağlanarak, pilin verimi artırılmaktadır. Güneş spektrumundan bu şekilde yararlanılması görüşü ilk kez 1955 yılında Jackson tarafından ortaya atılmış ancak, 1970'li yıllara kadar bu konsept fazla ilgi görmemiştir [50]. Çok eklemlı güneş pilleri ile ilgili ilk deneysel çalışma 1978 yılında yapılmış, elde edilen yüksek verim bu konuya ilgi uyandırmıştır [49]. 1980'li yılların sonunda laboratuvar ortamında %27,3 verimli iki eklemlı GaInP/GaAs güneş pili geliştirilmiştir [51]. Milli Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL, ABD) 1994 yılında laboratuvar ortamında %30,2 verimli (AM1.5, 160 güneş) iki eklemlı GaInP/GaAs güneş pili üretmeyi başarmıştır [52]. 1990'lı yılların sonunda AM0 spektrumu altında modül verimlilikleri %24,1 olan iki eklemlı GaInP/GaAs güneş pilleri ve modül verimlilikleri %26,7 olan üç eklemlı GaInP/GaAs/Ge güneş pilleri ticari olarak üreilmeye başlamıştır [53]. Periyodik tablonun III-V grubuna ait yarı-iletkenlerle üretilen bu pillerin maliyeti yüksek olduğundan, ilk olarak uzay uygulamalarında kullanılmıştır. Karasal alanda uygulamaları, yoğunlaştırıcı sistemler vasıtasıyla daha küçük alanlı piller kullanılarak maliyetlerin düşürülmesi ile mümkün olmaktadır. Çok eklemlı güneş pillerinin maliyetinin düşürülmesine yönelik bir diğer uygulama da, ince film yarı-iletken malzemenin çok kristal Si alttaş üzerine kaplanmasıyla elde edilen çok

eklemlidir. Bu uygulama ile %11,7 verimli iki eklemlidir a-Si/ μ c-Si güneş pilleri ve %10,4 verimli üç eklemlidir a-Si/a-SiGe güneş pilleri üretilmiştir [54,55].

3.2. Çok Eklemlidir Güneş Pili Uygulamaları

Çok eklemlidir güneş pilleri için iki farklı uygulama mevcuttur. Bunlar, spektrum bölme (Şekil 3.1.a) ve pillerin ardışık yığılması (Şekil 3.1.b) uygulamalarıdır.



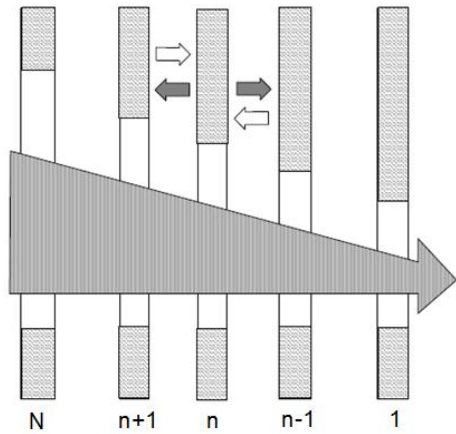
Şekil 3.1. Çok eklemlidir güneş pili uygulamaları,
 (a) Spektrum bölme (Spectrum splitting)
 (b) Pillerin ardışık yığılması (Cell stacking)

Spektrum bölme yönteminde her p-n eklemine birbirinden izole edilmiş olarak çalıştığı varsayılmaktadır. Spektrum seçici aynalar kullanılarak her p-n eklemine E_G 'sine uygun olan fotonların, o p-n eklemine ulaştırılması sağlanmaktadır. Spektral hassasiyeti sağlamak için her p-n eklemine önüne düşük enerji geçiren bir filtre yerleştirilmektedir. Bu filtre, belirtilen enerji seviyesinde enerjisi küçük olan fotonları geçirmekte, büyük olanları ise yansıtmaktadır. Çok eklemlidir güneş pilinin ilk deneysel uygulamasında spektrum bölme yöntemi kullanılmıştır [49]. Ancak, daha sonra bu yöntemin yoğunlaştırıcı sistemlerle birlikte kullanılamayacağı anlaşılmıştır [56]. Spektrum bölme yönteminde her p-n eklemi birbirinden bağımsız olarak çalıştığından, p-n eklemlerinin her birinin çıkış gerilimi maximum güç noktası

için optimize edilmesi gerekmektedir. Yukarıda belirtilen dezavantajlara ilave olarak, spektrum bölme işleminin de ek bir maliyet getirmesi sebebiyle, çok eklemli güneş pili uygulamalarında bu yöntem tercih edilmemektedir.

Farklı yasak band aralığına sahip p-n eklemlerinin, yasak band aralığı en büyük olan en üste ve yasak band aralığı en düşük olan da en alta gelecek şekilde konumlandırılması ile çok eklemli ardışık yığın yapı tesis edilmektedir. Bu yapıda; enerjisi büyük olan fotonlar, üstteki p-n eklemi tarafından ve daha küçük enerjili fotonlar ise, uygun yasak band aralığına sahip alttaki p-n eklemleri tarafından soğrulmaktadır.

Yığılmış pillerde, p-n eklemleri arasında etkileşim fazladır. Şekil 3.2’de belirtildiği gibi ortada bulunan p-n eklemi, hem diğer p-n eklemlerinin soğurmadığı fotonları hem de bir önceki p-n ekleminin arka yüzünden ışımalı rekombinasyonla yayılan fotonları soğurur. Kendisi de hem ön yüzden hem de arka yüzden foton yayar [49].

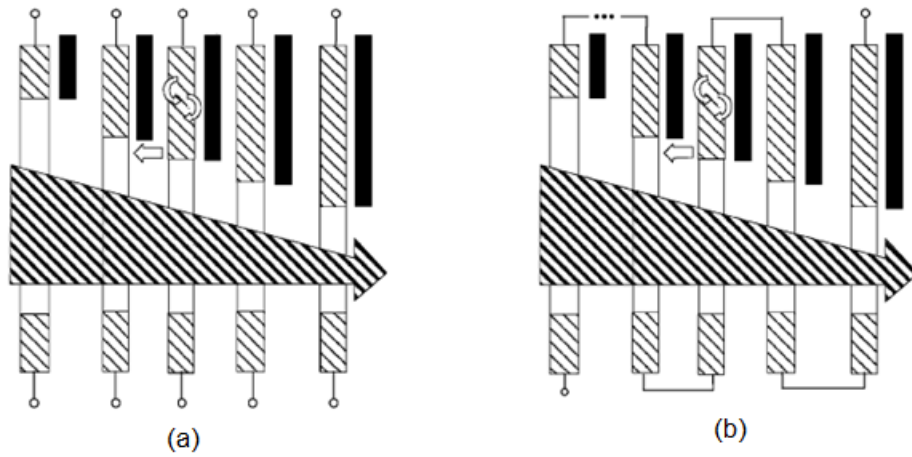


Şekil 3.2. Çok eklemli yığılmış pillerdeki etkileşim

Yığılmış yapılarda, pillerin mümkün olduğu kadar birbirinden izole edilmiş olarak çalışması verimi yükseltmektedir. Bunun için piller arasına optik filtreler yerleştirilir. Spektrum bölmeli ve yığılmış yapıdaki çok eklemli güneş

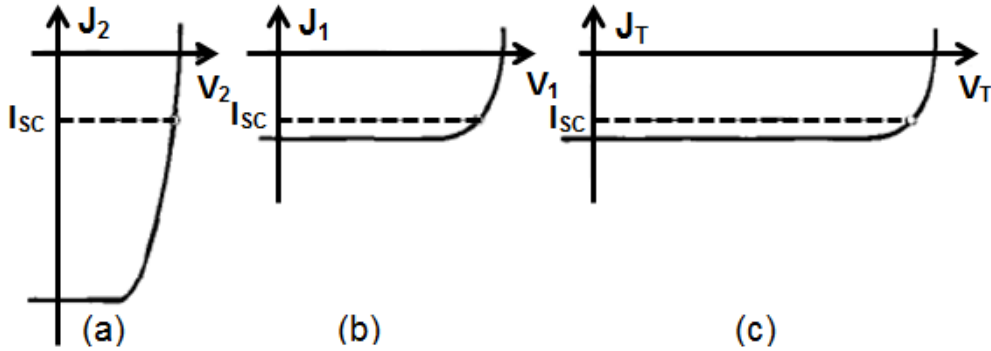
pillerinde p-n eklemi sayısı arttıkça pillerin verim sınırı birbirine yaklaşmaktadır [57].

Yığılmış pillerin de iki farklı uygulaması mevcuttur. Birincisi tüm pillerin birbirinden bağımsız olarak çalıştırıldığı mekanik olarak bağımsız (Şekil 3.3.a) uygulamasıdır. Bu yapıda teorik olarak en yüksek verim elde edilmektedir. Ancak, her p-n eklemine ayrı ayrı çıkışı olması sistemin karışık olmasına sebebiyet verdiği için, pratik uygulamalarda tercih edilmemektedir.



Şekil 3.3. Çok eklemli yığılmış pillerin,
 (a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması
 (b) Monolitik (series constrained) uygulaması

Diğer bir uygulama ise p-n eklemlerinin birbirine seri olarak bağlandığı (Şekil 3.3.b) monolitik olarak adlandırılan yapıdır. Burada p-n eklemleri birbirine seri olarak bağlandığı için, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi çok eklemli pilin toplam akım yoğunluğu, en küçük akım yoğunluğuna sahip p-n eklemine akımı ile sınırlı olmaktadır. Bu durum, mekanik olarak bağımsız uygulamasına göre çıkış gücünün biraz azalmasına yol açmaktadır. Ancak, pilin çıkış gerilimi p-n eklemlerin her birinin çıkış geriliminin toplamına eşit olduğundan (Şekil 3.4.c), toplam güç artmaktadır.



Şekil 3.4. İki eklemlı monolitik pillerde,

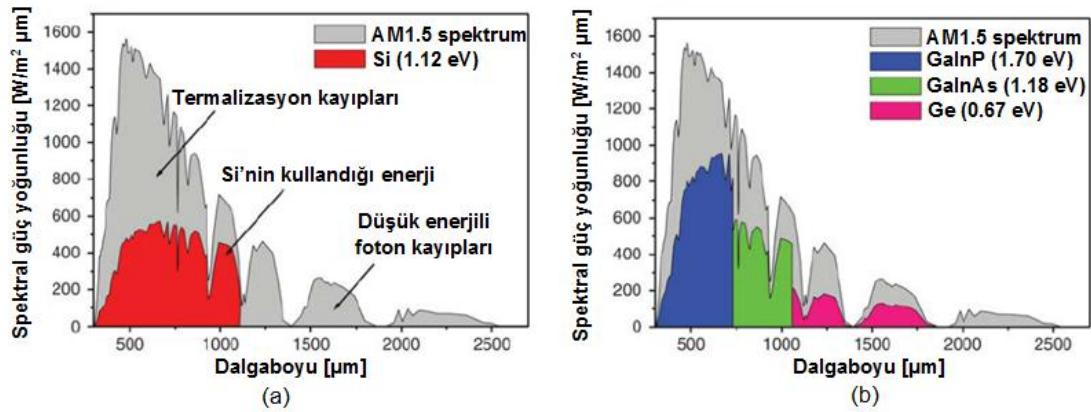
- (a) E_G 'si küçük olan p-n eklemının J - V karakteristiğı
- (b) E_G 'si büyük olan p-n eklemının J - V karakteristiğı
- (c) Piliñ J - V karakteristiğı [5]

Monolitik yapılar da farklı p-n eklemleri birbirine seri olarak tünel diyotları ile bağlanmaktadır. Geleneksel p-n eklem güneş pili modül yapılarında olduğu gibi, çok eklemlı monolitik güneş pillerinde de, her bir p-n eklemının akımlarının uyumlandırılması (current matching) gerekmektedir [49]. Ancak, p-n eklemi sayısı arttıkça bu uyumlandırma işlemleri daha da zorlaşmaktadır. Ayrıca, monolitik yapılar karasal uygulamalarda güneş spektrumunun gün içerisindeki değişikliğine karşı fazlaca hassastırlar. Aynı şekilde, p-n eklemının sayısı arttıkça, bu hassasiyet daha da arttığından, bu durum çok eklemlı pildeki p-n eklemi sayısını sınırlamaktadır. Ancak, tüm bu dezavantajlara rağmen monolitik yapılar daha çok tercih edilmektedir.

Geleneksel p-n eklem güneş pillerinde ışık şiddeti arttıkça; foto akım lineer olarak, pil gerilimi ise logaritmik olarak artmaktadır. Işık şiddeti arttıkça, seri direnç kayıpları baskın oluncaya kadar pilin verimi de logaritmik olarak artmaktadır. Benzer durum çok eklemlı güneş pilleri için de geçerlidir. Ancak, çok eklemlı güneş pillerinde fotoakım, geleneksel p-n eklem güneş pillerinin foto akımından küçük olması sebebiyle, çok eklemlı pillerde ışık şiddeti arttıkça seri direnç kayıpları daha az olmaktadır [58]. Bu sebeple, çok eklemlı güneş pilleri, yoğunlaştırıcı sistemlerle birlikte daha verimli olarak kullanılabilir.

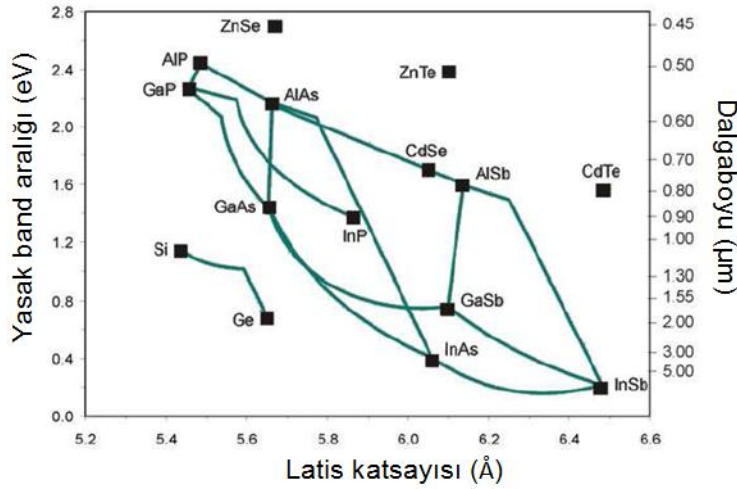
3.3. Üç Eklemlili Monolitik GaInP/GaInAs/Ge Güneş Pilinin Yapısı

Çok eklemlili güneş pillerinin üretiminde, güneş spektrumunu en az kayıpla soğuracak uygun yasak band aralığına sahip yarı-iletken malzemeler tercih edilmektedir. Periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grup elementlerinin bileşik oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşan III-V grubu bileşikleri; yasak band aralığının uygun olması, soğurma katsayılarının yüksek ve oda sıcaklığında sahip oldukları direkt bant aralıklarıyla çok eklemlili güneş pilleri için en uygun malzemelerdir. Tek eklemlili geleneksel güneş pilinin ve III-V grubu bileşiklerinden oluşan üç eklemlili GaInP/GaInAs/Ge güneş pilinin, güneş spektrumundan teorik olarak nasıl yararlandığı Şekil 3.5'te görülmektedir.



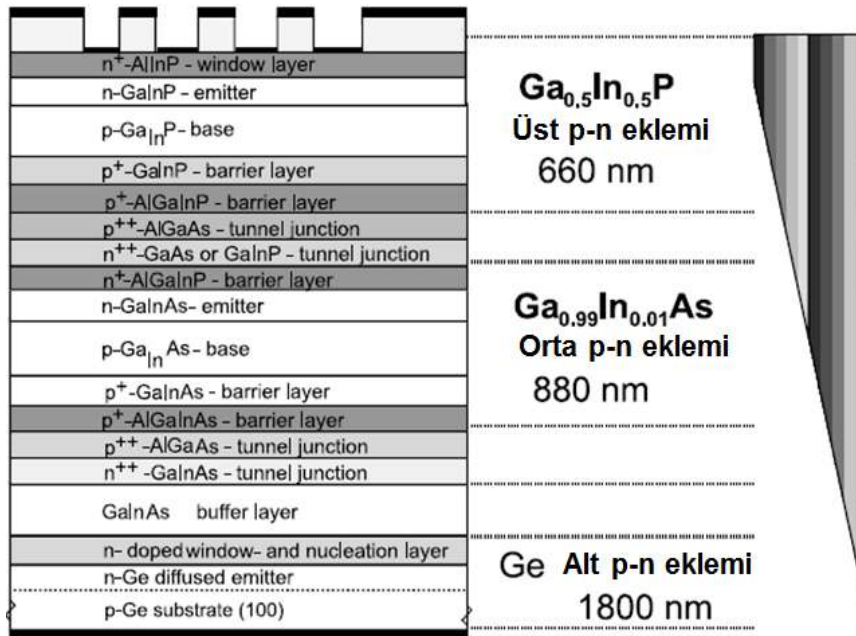
Şekil 3.5. AM1.5 güneş spektrumundan,
 (a) Tek eklemlili Si güneş pilinin yararlanması
 (b) GaInP/GaInAs/Ge güneş pilinin yararlanması [59]

III-V grubu bileşiklerinin bir diğer avantajı da, Metalorganik Kimyasal Buhar Depozisyonu (MOCVD) yöntemi ile homojen olarak büyütüldüğünde yüksek kristal kalitesine sahip olmasıdır. Çok eklemlili güneş pillerinde farklı p-n eklemlilerinin MOCVD yöntemi ile birbirinin üzerine monolitik olarak büyütülebilmesi için yarı-iletkenlerin latis uyumlu olması gerekmektedir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi GaP, GaAs ve Ge yarı-iletkenlerinin latis katsayıları birbirine çok yakındır.



Şekil 3.6. III-V bileşiklerinin latis katsayıları ile E_G 'leri arasındaki ilişki [60]

Yukarıda belirtilen temel nedenlerden dolayı, üç eklemli GaInP/GaInAs/Ge güneş pilleri, günümüzde üretilen en yüksek verimli güneş pilleridir. $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ güneş pilinin yapısı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Üç eklemli $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$ güneş pili yapısı [61].

Günümüzde III-V grubu bileşikleri ile laboratuvar ortamında elde edilen en yüksek verimli üç eklemlı güneş pillerinin özeti Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Laboratuvar ortamında en yüksek verim elde edilen üç eklemlı güneş pilleri [62].

Malzeme/ E_G	Verim	Test Koşulları
GaInP/GaInAs/Ge 1.9/1.4/0.7 eV	%41.6 (Konsantrasyon: 364, Yüzey alanı: 32 mm ² , V_{OC} : 3.19 V, I_{SC} : 1.69 A, FF: %88)	36 W/cm ² ; ASTM G173-03 direkt spektrum
GaInP/GaInAs/Ge 1.8/1.3/0.7 eV	%41.1 (Konsantrasyon: 454, Yüzey alanı: 5 mm ² , V_{OC} : 2.87 V, I_{SC} : 0.38 A, FF: %87)	45 W/cm ² ; ASTM G173-03 direkt spektrum
GaInP/GaInAs/GaInAs 1.8/1.3/0.9 eV	%40.8 (Konsantrasyon: 326, Yüzey alanı: 10 mm ² , V_{OC} : 3.28 V, I_{SC} : 0.46 A, FF: %88)	33 W/cm ² ; ASTM G173-03 direkt spektrum

3.4. Detaylı Denge Modeli

Güneş pillerinden elde edilebilecek teorik verim sınırının hesaplanmasında kullanılan Detaylı Denge Modeli (DDM) 1961 yılında Shockley ve Queisser tarafından önerilmiştir [37]. DDM'ye göre, ideal bir güneş pilinden harici devre üzerinden akan elektronların sayısı, E_1 - E_2 enerji aralığında pil tarafından soğurulan foton sayısı ile pilin aynı enerji aralığında yaydığı foton sayısının farkına eşit olmaktadır [39]. Bunun için bir takım varsayımlar yapılmaktadır. Bunlar;

- Güneş pili tarafından enerjisi yasak band aralığından büyük olan fotonların tamamı soğurulmaktadır.
- Soğurulan her foton, sadece bir elektron-boşluk çifti üretmektedir.

iii) Mobiliteler sonsuzdur ve üretilen elektron-boşluk çiftleri, kayıpsız bir şekilde yüke ulaşmaktadır.

iv) Işıkla üretilen azınlık taşıyıcı konsantrasyonları, pil boyunca sabittir.

v) Sadece ışımalı rekombinasyon vardır. Buna göre, DDM ile bir p-n eklem güneş pilinin akım denklemi;

$$J(V) = J_{photo} - J_{rad}(V) \quad (3.1)$$

Burada, J_{photo} ışıkla üretilen akım yoğunluğunu; $J_{rad}(V)$, ışımalı rekombinasyon akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Tüm bu varsayımlara göre Shockley ve Queisser, yasak band aralığı 1.1 eV olan p-n eklem güneş pilinin siyah cisim ışıması altında verimini %30 olarak hesaplamıştır.

DDM; güneş pillerinin bir takım parametreleri değiştiğinde bunun teorik olarak verime etkisinin nasıl olacağının belirlenmesinde ve farklı güneş pili teknolojilerinden elde edilecek teorik verimlerin hesap edilerek, bu teknolojilerin kıyaslanmasında faydalı bir araçtır [39].

3.4.1. Işık ile üretilen fotoakım yoğunlukları

Fotovoltaik malzemelerdeki en önemli üretim sürecidir. Güneş pili üzerine ışık düşmesi ve fotonların soğurulması ile serbest taşıyıcılar oluşmakta ve bu taşıyıcılar fotoakımı meydana getirmektedirler. Güneşi, 6000 K'de siyah cisim ışıması yapan bir kaynak olarak kabul edersek; E+dE enerji aralığında birim alana birim sürede yayılan foton akısı Eş. 3.2'de verilmiştir.

$$b_s(E) = \frac{2F_s}{h^3 c^2} \left(\frac{E^2}{e^{E/k_B T_s} - 1} \right) \quad (3.2)$$

$$F_s = \pi \sin \theta_s^2 \quad \theta_s = 0.26^\circ \quad (3.3)$$

Burada; F_s geometrik faktörü, θ_s dünya ile güneş arasındaki açıyı, k_B Boltzmann sabitini, T_s güneş sıcaklığını temsil etmektedir. Güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu Eş. 3.4'de verilmiştir.

$$J_{sc} = q \int_0^\infty (1 - R(E)) \alpha(E) b_s(E) dE \quad (3.4)$$

Burada; q elektron yükü, $R(E)$ foton yansıma ihtimali, $\alpha(E)$ foton soğurma katsayısıdır. Foton yansıma ihtimalinin olmadığı ve foton soğurma oranının malzeme içinde homojen olduğu hesaba katılırsa, kalınlığı w olan güneş pili için siyah cisim ışıması altında kısa devre akım yoğunluğu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$J_{sc} = q \frac{2\pi(\sin \theta_s)^2}{h^3 c^2} \int_{E_G}^\infty \left(\frac{E^2}{e^{E/k_B T_s} - 1} \right) (1 - e^{-\alpha w}) dE \quad (3.5)$$

3.4.2. Işımalı rekombinasyon akım yoğunlukları

Fotovoltaik dönüşüm sonucu güneş pilinin quasi-fermi enerji seviyelerindeki ayrılma miktarı kadar oluşan potansiyel gerilim ($\Delta\mu$), p-n eklemine ileri yönde (forward-bias) kutuplayarak elektron ve boşlukların difüzyon (karanlık) akımının artmasına sebebiyet vermektedir. Bu olay sebebiyle, iletim bandından valans bandına elektron geçişi ile dışarıya ışık yayılmasına "Işımalı Rekombinasyon" denmektedir. Işımalı rekombinasyon akım yoğunluğu Eş. 3.6'da verilmiştir.

$$J_{rad} = q \frac{2\pi}{h^3 c^2} e^{\Delta\mu/k_B T_c} \int_{E_G}^\infty \left(\frac{E^2}{e^{E/k_B T_c}} \right) (1 - e^{-\alpha w}) dE \quad (3.6)$$

Eş.3.5'te, $q \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_G}^\infty \left(\frac{E^2}{e^{E/k_B T_c}} \right) (1 - e^{-\alpha w}) dE$ ifadesi kaçak akımı (J_o) vermektedir. Bu nedenle, ışımalı rekombinasyon sonucu oluşan karanlık akım aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$J_{dark}(V) = J_o(e^{\frac{q\Delta\mu}{k_B T}}) \quad (3.7)$$

3.4.3. Auger üretim ve rekombinasyon akım yoğunlukları

Çok yüksek enerjili bir foton ($h\nu > 2E_G$) tarafından üretilen sıcak bir elektronun, valans bandına düşüp, enerjisinin fazlalık kısmını başka bir elektrona vermesine “Auger Rekombinasyonu” denmektedir. Sıcak elektronun verdiği enerji ile elektronun iletim bandına çıkmasına “Auger Üretimi” denmektedir. Siyah cisim ışıması altında Auger üretimi ve rekombinasyonu sebebiyle üretilen akım yoğunlukları Eş. 3.8 ve Eş. 3.9’da verilmiştir.

$$J_{Auggen} = q \frac{2\pi \sin \theta_s^2}{h^3 c^2} \sum_{i=1}^{m_{max}} \left[\sigma^i \int_{E_G+iE_G}^{\infty} \left(\frac{E^2}{e^{E/k_B T_s} - 1} \right) (1 - e^{-\alpha w}) dE \right] \quad (3.8)$$

$$J_{Augrec} = q \frac{2\pi}{h^3 c^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\int_{E_G+mE_G}^{E_G+(m+1)E_G} \sum_{i=1}^m \sigma^i \left(\frac{E^2}{e^{E/k_B T_c}} \right) \left(e^{\frac{(m+1)\Delta\mu}{k_B T_c}} \right) (1 - e^{-\alpha w}) dE \right] \quad (3.9)$$

Burada σ çoğullama olasılığı olup, “0” ile “1” arası değer almaktadır. m_{max} ise bir foton tarafından üretilen maksimum elektron sayısıdır.

Auger üretimi hızı Auger Rekombinasyon hızından fazla olursa, Auger mekanizması azınlık taşıyıcı sayısını artırarak verimde artış sağlamaktadır. DDM ile verim analizi yapılırken, sadece ışımalı rekombinasyonun olduğu hesaba katılmaktadır. Bu tez çalışmasında, ışımalı rekombinasyonun yanında, Auger üretimi ve rekombinasyonunun da verime etkileri incelenecektir.

3.4.4. Detaylı Denge Modeli ile verim hesabı

DDM’nde akım yoğunluğu, ışıkla üretilen (kısa devre) akım yoğunluğundan, ışımalı rekombinasyonun sebep olduğu karanlık akım yoğunluğu çıkarılarak bulunmaktadır.

$$J(V) = J_{photo} - J_{rad}(V) \quad (3.10)$$

$$J(V) = J_{sc} - J_{dark}(V) \quad (3.11)$$

i) *Geleneksel p-n eklem güneş pilinin verim hesabı:* Eş. 3.5'ten J_{sc} ve Eş.3.6'dan J_o bilgisayar ortamında hesaplatıldıktan sonra, $\Delta\mu$ 'ye sıfırdan itibaren E_G değerine kadar artan değerler verilerek her $\Delta\mu$ değerine karşılık gelen $J(V)$ akım yoğunluğu bulunur. Oluşan $J(V)$ dizisi ile $\Delta\mu$ dizileri çarpıldığında, güneş pili için güç dizisi hesaplanmış olacaktır. Güç dizisinin maximum değerini veren $J_x(V)$ ve $\Delta\mu_x$ değerleri, pilin J_m ve V_m değerleridir.

ii) *Çok eklemli monolitik yığılmış güneş pilinin verim hesabı:* $E_{G1} > E_{G2} \dots > E_{Gn}$ olduğu hesaba katılırsa, çok eklemli pilde de her bir p-n eklemi için Eş.3.5'ten yararlanılarak $J_{sc1}, J_{sc2}, \dots, J_{scn}$ değerleri hesaplanır. Kısa devre akımları içinde en küçük olan, çok eklemli pilin kısa devre akımıdır. Eş.3.6'dan yararlanılarak $J_{o1}, J_{o2}, \dots, J_{on}$ değerleri hesaplanır.

$$J_1(V) = J_{sc1} - \left(e^{\frac{q\Delta\mu_1}{k_B T}}\right) J_{o1} \quad (3.12)$$

$$J_2(V) = J_{sc2} - \left(e^{\frac{q\Delta\mu_2}{k_B T}}\right) J_{o2} \quad (3.13)$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$J_n(V) = J_{scn} - \left(e^{\frac{q\Delta\mu_n}{k_B T}}\right) J_{on} \quad (3.14)$$

Karanlık akımlar birbirine eşitlenerek, $\Delta\mu_1$ 'e sıfırdan itibaren E_{G1} değerine kadar artan değerler verilerek Eş. 3.15'ten her $\Delta\mu_1$ değerine karşılık gelen $\Delta\mu_2, \Delta\mu_3, \dots, \Delta\mu_n$ değerleri bulunur.

$$\left(e^{\frac{q\Delta\mu_1}{k_B T}}\right) J_{o1} = \left(e^{\frac{q\Delta\mu_2}{k_B T}}\right) J_{o2} = \dots = \left(e^{\frac{q\Delta\mu_n}{k_B T}}\right) J_{on} \quad (3.15)$$

Çok eklemli pil için Eş. 3.16'daki akım yoğunluğu dizisi hesaplanır.

$$J(V) = J_{sc(min)} - (e^{\frac{q\Delta\mu_1}{k_B T}})J_{o1} \quad (3.16)$$

Çok eklemli güneş pillerinde pilin çıkış gerilimi, her bir p-n eklemının quasi-fermi enerji seviyelerindeki ayrılma miktarlarının toplamı olduğundan; her bir $\Delta\mu_1$ dizisine karşılık gelen $\Delta\mu_2, \Delta\mu_3, \dots, \Delta\mu_n$ dizilerinin toplamı, pilin çıkış gerilimi dizisi oluşturur. Eş. 3.16'dan elde edilen akım yoğunluğu dizisi ile pilin çıkış gerilimi dizisi Eş. 3.17'de yerine konulduğunda, pilin güç yoğunluğu dizisi elde edilmektedir.

$$P = J(V)(\Delta\mu_1 + \Delta\mu_2 + \Delta\mu_3 + \dots + \Delta\mu_n) \quad (3.17)$$

Güç dizisinin maximum değerini veren $J_x(V)$ ve $(\Delta\mu_1 + \Delta\mu_2 + \Delta\mu_3 + \dots + \Delta\mu_n)_x$ değerleri, pilin J_m ve V_m değerleridir.

Son olarak, geleneksel p-n eklem ve monolitik yığılmış çok eklemli güneş pilinin verimi, η , aşağıdaki eşitlikten bulunur.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_m V_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (3.18)$$

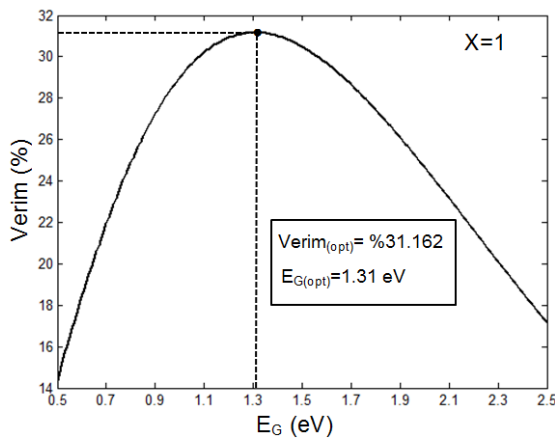
Burada J_m and V_m maksimum çalışma noktasındaki (P_m), akım yoğunluğu ve çıkış voltajı değerleridir. P_{in} ise güneş pilinin ön yüzüne gelen güç yoğunluğudur. J_{sc} , güneş pilinin kısa devre akım yoğunluğu, V_{oc} , açık devre gerilimi ve FF ise doluluk faktörüdür.

4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, geleneksel p-n eklem ve çok eklemli monolitik güneş pillerinin siyah cisim ışıması altında Detaylı Denge Modeli (DDM) ile verim analizi yapılacaktır. Yapılan çalışmalarda güneş pillerinin güneş enerjisini tamamen soğuracağı uygun kalınlık değeri ($w=10\ \mu\text{m}$) alınarak, yasak band aralığının (E_G) değişimi ile verimin bundan nasıl etkilendiği incelenecektir. En yüksek verim değerini sağlayan optimum E_G 'ler için; güneş pillerinin J - V karakteristiği elde edilecek, ışık konsantrasyonu arttıkça verimin bundan nasıl etkilendiği analiz edilecektir. İki eklemli ve üç eklemli güneş pilinin akım uyumlandırması (current matching) kapsamında, üstteki p-n eklemelerinin kalınlık değişiminin verime ve kısa devre akımlarına etkisi incelenecektir. Son olarak, Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkileri gösterilecektir.

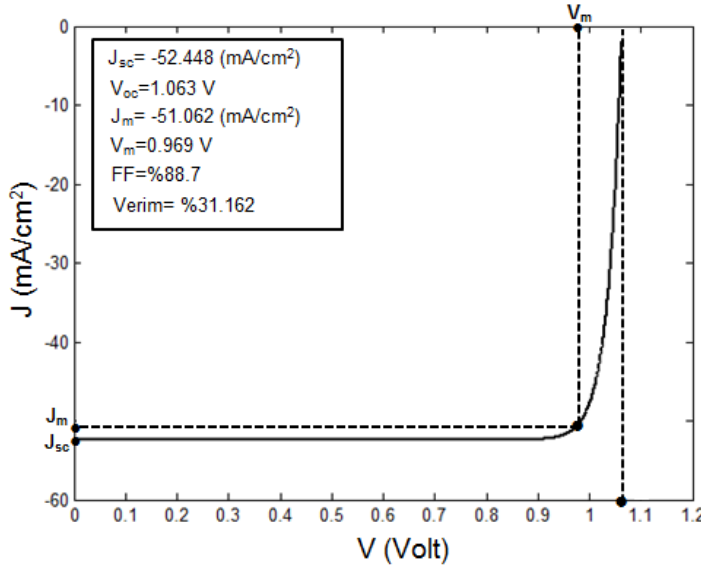
4.1. Geleneksel p-n Eklem Güneş Pili Verim Analizi

Güneş pilinin E_G 'si 0.5 eV ile 2.5 eV arasında 0.01 eV aralıklarla artırılarak, verimin E_G ile değişimi tek ışık konsantrasyonu altında Şekil 4.1'te elde edilmiştir. Burada, optimum $E_G=1.31\ \text{eV}$ için %31.162 verim hesaplanmıştır. Daha küçük E_G değerleri için, soğurulan foton sayısı arttığı için foto akım artmakta, ancak, E_G ile sınırlı olan çıkış gerilimi azaldığı için verim düşmektedir. Daha büyük E_G değerlerinde ise, $h\nu \geq E_G$ olan yeni soğurulan foton sayısı azaldığından foto akım azalmakta ve verim düşmektedir.



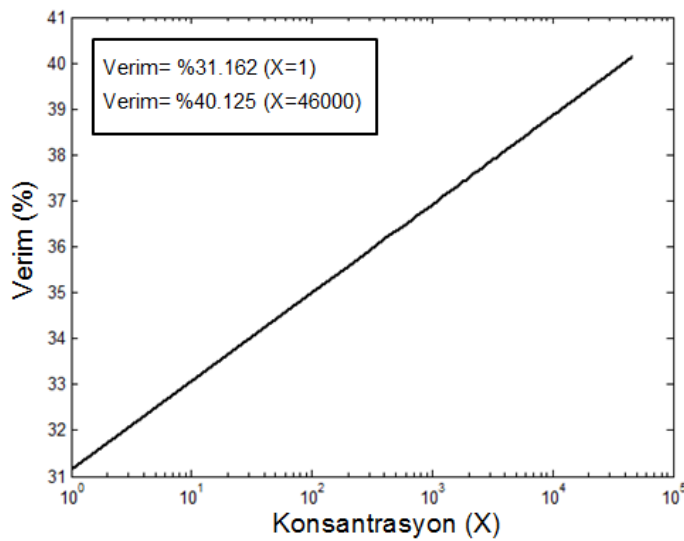
Şekil 4.1. Geleneksel p-n eklem güneş pili veriminin E_G ile değişimi.

Optimum E_G değeri için güneş pilinin J - V karakteristiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Optimum E_G 'li p-n eklem güneş pilinin J - V karakteristiği

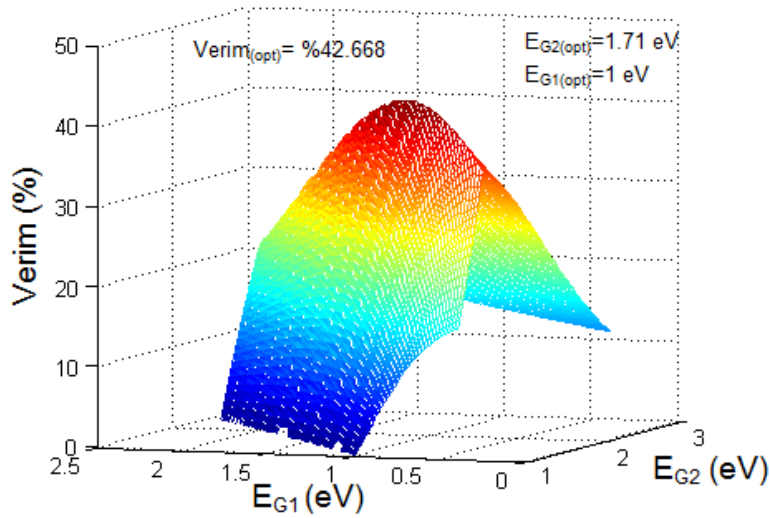
Aynı E_G 'ye sahip p-n eklem güneş pili için, verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi Şekil 4.3'te sunulmuştur. Burada ışık konsantrasyonu arttıkça, verimin logaritmik olarak arttığı görülmektedir. Yüksek ışık konsantrasyonu, küçük alanlarda yüksek güç üretimini mümkün kıldığı için, son nesil güneş pillerinde tercih edilmektedir. Ancak, çok yüksek ışık konsantrasyonu değerlerinde, malzeme parametrelerindeki değişimler sebebiyle verimde azalma olabilmektedir.



Şekil 4.3. Optimum E_G 'li güneş pili veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi

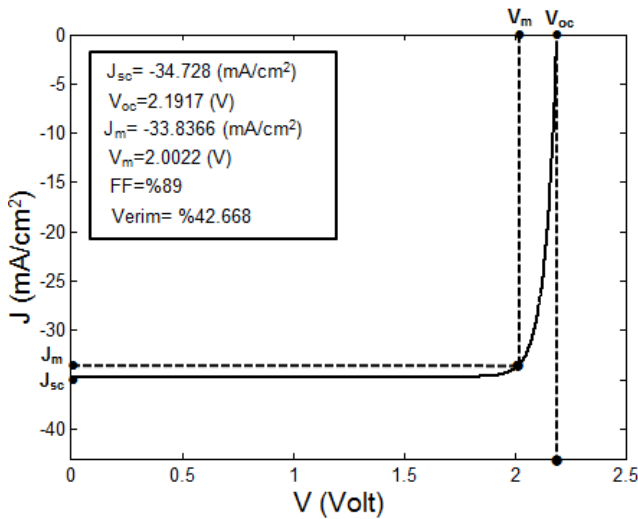
4.2. İki Eklemli Monolitik Güneş Pilinin Verim Analizi

E_{G2} üstteki p-n eklemının ve E_{G1} alttaki p-n eklemının yasak band aralığı olmak üzere; E_{G2} , 1 eV ile 3 eV arasında ve E_{G1} , 0.4 eV ile 2.4 eV arasında 0.01 eV aralıklarla artırılarak, iki eklemli pilin veriminin E_{G1} ve E_{G2} ile değişimi ($X=1$ için) Şekil 4.4'te elde edilmiştir.



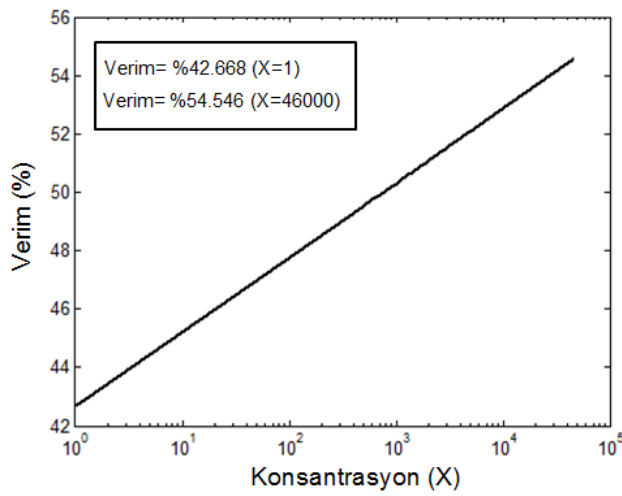
Şekil 4.4. İki eklemli güneş pili veriminin E_{G1} ile E_{G2} değişimi.

Şekil 4.4'de $E_{G2}=1.71$ eV ve $E_{G1}=1$ eV için maximum verim %42.668 bulunmuştur. Optimum E_{G2} ve E_{G1} değerleri için güneş pilinin $J-V$ karakteristiği Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. İki eklemli güneş pilinin $J-V$ karakteristiği

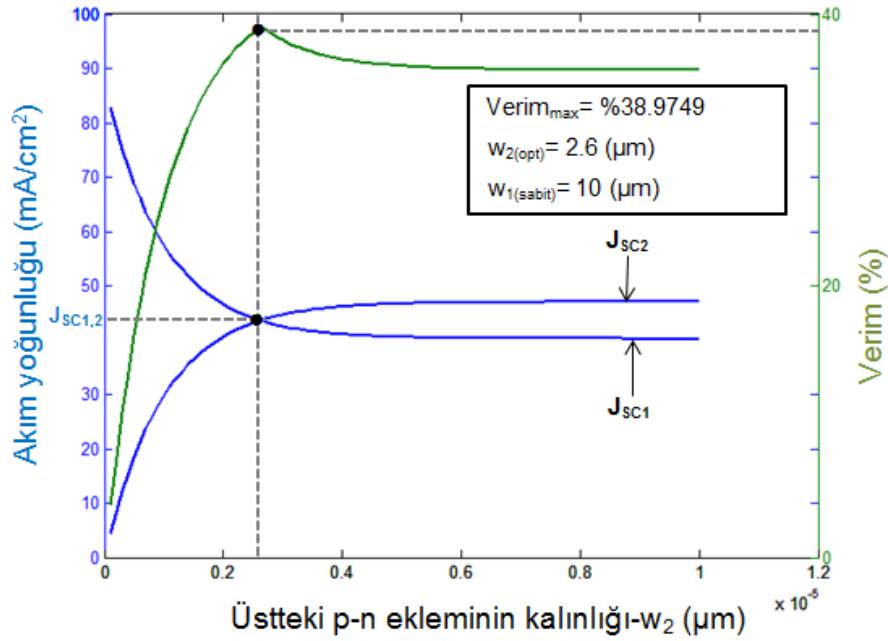
İki eklemlı pilin akım yoğunluğu, tek eklemlı pilin akım yoğunluğuna göre önemli oranda azalmıştır. Bu sebeple, çok eklemlı piller Bölüm 3'te de belirtildiği gibi yoğunlaştırıcı sistemlerle birlikte kullanılmaya daha müsaittir. Pilin ıkış gerilimi, tek eklemlı pilin çıkış geriliminin yaklaşık iki katı kadar yükselmiş, toplam verimde artış olmuştur. Optimum E_{G2} ve E_{G1} değerlerine sahip olan iki eklemlı pilde ışık konsantrasyonunun verime etkisi, şekil 4.6'da görülmektedir.



şekil 4.6. İki eklemlı güneş pili veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi

şekil 4.4 incelendiğinde; iki eklemlı monolitik pilin veriminin, yasak band aralıklarına (E_{G1} ve E_{G2}) fazlaca bağlı olduğu ve sadece dar bir aralıktaki seçilen E_G değerlerinin yüksek verim sunduğu gözlemlenmektedir. Yüksek verim için malzemelerin E_G değerlerinin özenle seçilmesine ilave olarak, bir diğer önemli hususun da malzemelerin monolitik yapıda büyütülebilmesi için latis uyumlu olması gerektiğini Bölüm 3'te belirtmiştik. Yüksek verim sağlayacak E_G 'lere sahip yarı-iletkenlerin sayısı çok az olduğundan, GaAs/Ge ve GaInP/GaAs gibi latis uyumlu ve çok eklemlı monolitik pillerde kullanılmaya müsait yarı-iletkenlerden optimum verimin alınması için akım uyumlandırma (current matching) işlemi yapılmaktadır [63]. Akım uyumlandırma işlemi, yasak band aralığı büyük olan üstteki pilin kalınlığı ayarlanarak yapılmaktadır.

GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) iki eklemli güneş pilinde, GaAs'nin kalınlığının değişmesi ile, akımların ve pilin veriminin bundan nasıl etkilendiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Hesaplamalarda, her iki p-n eklemi için soğurma katsayılarının (α) enerji ile sabit ve 10^4 cm^{-1} olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.7. GaAs/Ge iki eklemli güneş pilinde akım uyumlandırması

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, üstteki p-n ekleminin (GaAs) kalınlığı $0.1 \mu\text{m}$ 'den $10 \mu\text{m}$ 'ye $0.1 \mu\text{m}$ aralıklarla artırıldığında; üstteki p-n ekleminin akım yoğunluğunun arttığı ve alttaki p-n ekleminin akım yoğunluğunun da azaldığı gözlemlenmektedir. Üstteki p-n ekleminin kalınlığı $w_2 = 2.6 \mu\text{m}$ olduğunda, her iki p-n ekleminin de akım yoğunlukları eşit seviyeye gelmiş ve tam bu noktada maximum verim elde edilmiştir. Üstteki p-n ekleminin kalınlığı daha da fazla artırıldığında ise verimde düşme gözlemlenmektedir.

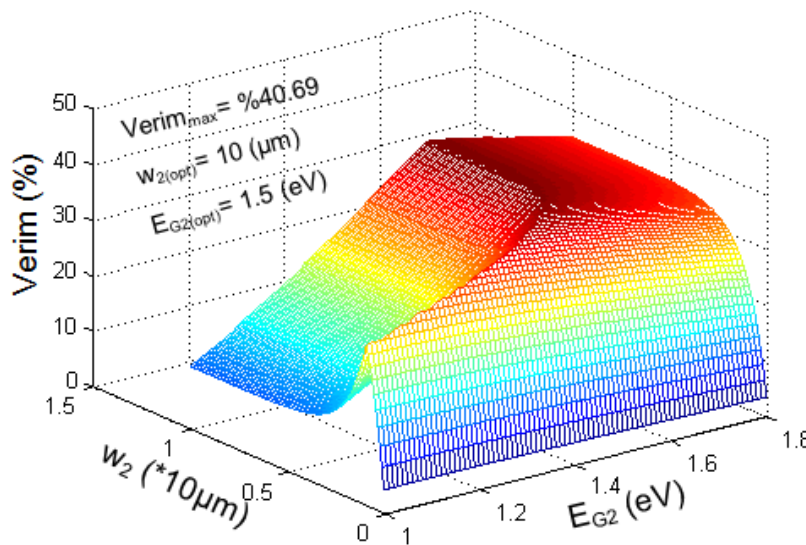
GaInP (1.9 eV)/GaAs (1.42 eV) iki eklemli güneş pilinin üstteki ve alttaki p-n ekimleri güneş spektrumunu tam soğuracak şekilde kalın ($w_{1,2} = 10 \mu\text{m}$) olduğunda DDM yöntemi ile elde edilen maximum verim değeri %29,90'dır. Akım uyumlandırma işlemini bu pil için yaptığımızda, üstteki pilin kalınlığı $w_2 = 1.8 \mu\text{m}$ olduğunda, %36,95 verim elde edilmiştir.

Akım uyumlandırması ile ilgili olarak P.J.Faine ve arkadaşları 1990 yılında bir makale yayımlamıştır [63]. AM-1.5 spektrumu altında DDM ile iki eklemlı monolitik pil üzerinde yapılan çalışmanın sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Akım uyumlandırmasının iki eklemlı monolitik güneş pillerinin verimine etkisi [63]

Malzeme	Üstteki pilin kalınlığı	Verim (%)
GaInP/GaAs (1.9 eV)/(1.425 eV)	Sonsuz	33
	Minumum	35,5
InP/GaInAs (1.35 eV)/(0.7 eV)	Sonsuz	28
	Minumum	32
GaAs/Ge (direk band) (1.424 eV)/(0.8 eV)	Sonsuz	28
	Minumum	34

İki eklemlı monolitik güneş pillerinde Ge yarı-iletkeni, alttaş ve ikinci bir p-n eklemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ge üzerine büyütülecek ve güneş pilinde maximum verimi sağlayacak uygun kalınlıkta ve yasak band aralığındaki yarı-iletkeni bulmak için; üstteki p-n ekleminin kalınlığı $w_2=0.1$ ile $10\mu\text{m}$ arasında ve yasak band aralığı $E_{G2}=1$ ile 1.8 eV arasında değiştirilmiş, bunun verime etkisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

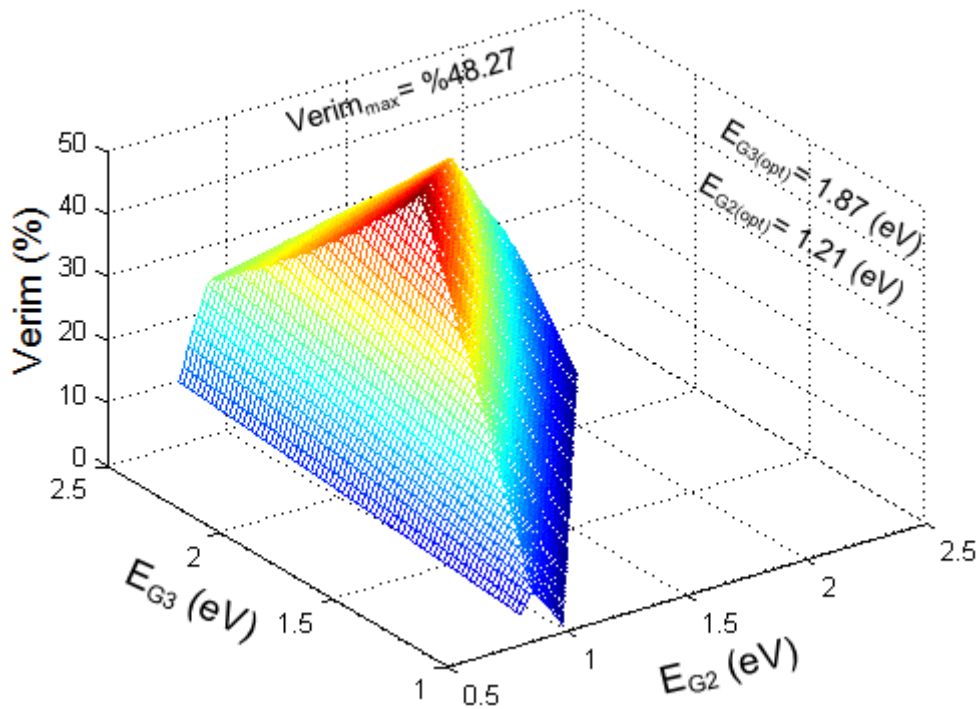


Şekil 4.8. Ge’nin alttaş ve ikinci bir p-n eklemi olarak kullanıldığı güneş pilinde, üstteki p-n ekleminin kalınlığının ve E_G ’sinin verime etkisi.

Yukarıda belirtilen aralıklarda maximum verimi (%40.69) sağlayan E_{G2} değeri, 1.5 eV ve w_2 değeri, $10\mu\text{m}$ 'dir. Şekil 4.8 incelendiğinde; E_{G2} 'nin yaklaşık 1.45 eV'den büyük değerleri için üstteki p-n eklemının kalınlığının azaltılması ile akım uyumlandırılmasının yapılamadığı ve aksine kalınlık azaldıkça verimin de azaldığı gözlemlenmiştir.

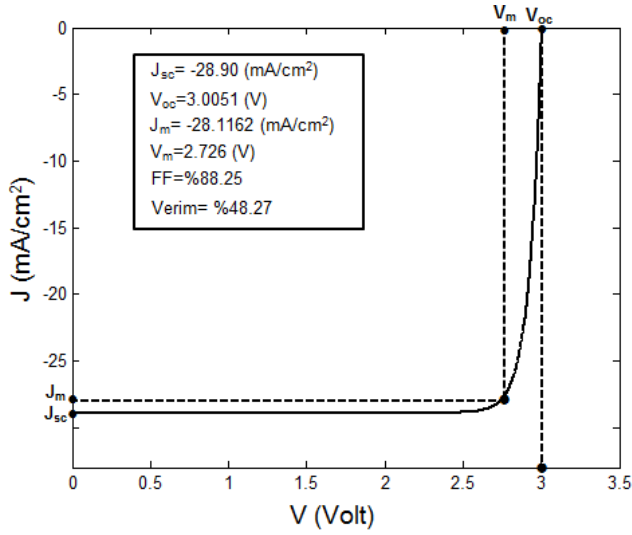
4.3. Üç Eklemli Monolitik Güneş Pilinin Verim Analizi

Üç eklemli güneş pilindeki p-n eklemının yasak band aralıklarının verime etkisi incelenirken, Ge (0.7 eV) yarı-iletkenin alttaş ve üçüncü p-n eklemi olarak kullanıldığı hesaba katılacaktır. E_{G3} üstteki p-n eklemının ve E_{G2} ortadaki p-n eklemının yasak band aralığı olmak üzere; E_{G3} , 1 eV ile 2.5 eV arasında ve E_{G2} , 0.8 eV ile 2.2 eV arasında 0.01 eV aralıklarla artırılarak, üç eklemli pilin veriminin E_{G2} ve E_{G3} ile değişimi Şekil 4.9'da elde edilmiştir.



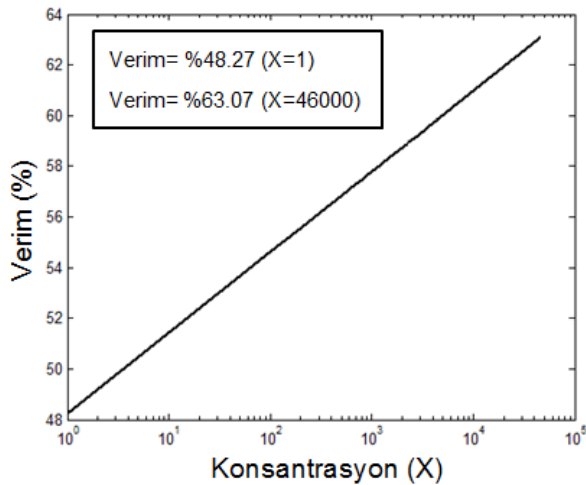
Şekil 4.9. Üç eklemli güneş pili veriminin E_{G2} ile E_{G3} değişimi.

Şekil 4.9'da $E_{G2}=1.21$ eV ve $E_{G3}=1.87$ eV için maximum verim %48.27 bulunmuştur. Optimum E_{G2} ve E_{G3} değerleri için güneş pilinin J - V karakteristiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Üç eklemli güneş pilinin J - V karakteristiği

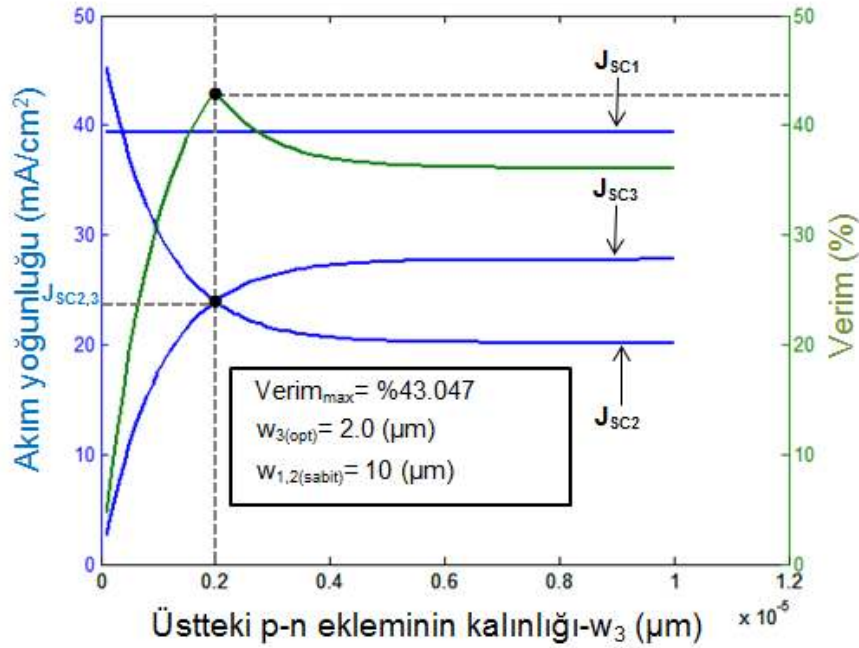
Üç eklemli pilin akım yoğunluğu da, iki eklemli pilin akım yoğunluğuna göre azalmıştır. Pilin çıkış gerilimi, tek eklemli pilin çıkış geriliminin yaklaşık üç katı ve iki eklemli pilin çıkış geriliminin de yaklaşık bir buçuk katı kadar yükselmiş, toplam verimde artış olmuştur. $E_{G1}=0.7$ eV için, optimum E_{G2} ve E_{G3} değerlerine sahip olan üç eklemli pilde ışık konsantrasyonunun verime etkisi, Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Üç eklemli güneş pili veriminin ışık konsantrasyonu ile değişimi

Şekil 4.9 incelendiğinde; üç eklemlili monolitik pilin veriminin de, yasak band aralıklarına (E_{G2} ve E_{G3}) fazlaca bağılı olduğu ve sadece dar bir aralıkta seçilen E_G değerlerinin yüksek verim sunduğu gözlemlenmektedir.

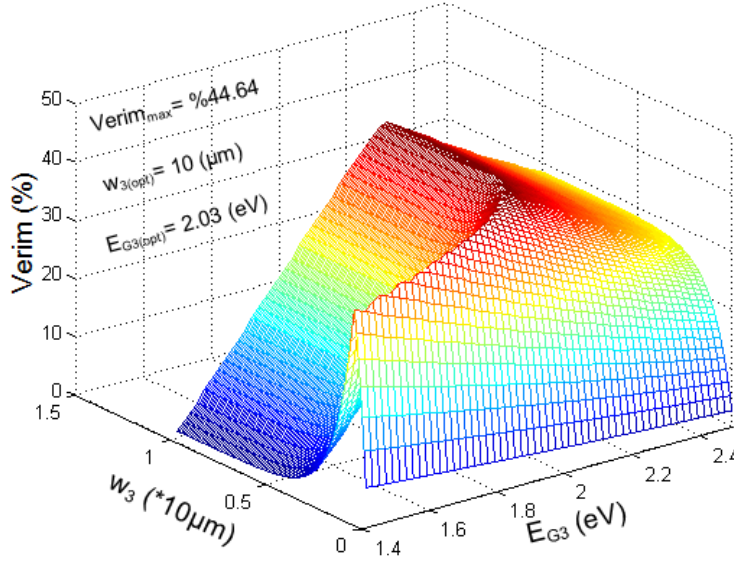
Üç eklemlili GaInP/GaInAs/Ge güneş pilinin, günümüzde üretilen en yüksek verimli güneş pili olduğunu Bölüm 3'te belirtmiştik. Latis uyumlu GaInP (1.9 eV)/GaInAs (1.4 eV)/Ge (0.7 eV) güneş pilinde; üstteki p-n ekleminin kalınlığını ayarlayarak, akımların ve pilin veriminin bundan nasıl etkilendiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu şekil, bütün p-n eklemleri için $\alpha=10^4 \text{ cm}^{-1}$ alınarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. GaInP/GaInAs/Ge üç eklemlili güneş pilinde akım uyumlandırması

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, üstteki p-n ekleminin (GaInP) kalınlığı artırıldığında; üstteki p-n ekleminin akım yoğunluğunun arttığı ve ortadaki p-n ekleminin de akım yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmektedir. Altteki p-n ekleminin akım yoğunluğunda ise herhangi bir değişiklik olmamıştır. Bunun sebebi; ortadaki p-n ekleminin, enerjisi E_{G2} 'den büyük olan fotonların ($h\nu > E_{G2}$) tamamını soğuracak şekilde yeterli kalınlığa ($w_2=10 \mu\text{m}$) sahip olmasıdır.

Son olarak; GaInP/GaInAs/Ge üç eklemlı güneş pilinde, üstteki pilin kalınlığının ve yasak band aralığının verim üzerindeki etkisi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. GaInP/GaInAs/Ge üç eklemlı güneş pilinde, üstteki p-n eklemının kalınlığının ve E_G 'sinin verime etkisi.

E_{G3} 'ün 1.4 eV ile 2.4 eV arasında ve w_3 'ün 0.1 ile 10 μm arasında değışmesiyle elde edilen verim grafiğinde, maximum verimi (%44.64) sağlayan E_{G3} değeri, 2.03 eV ve w_3 değeri, 10 μm 'dir. Yukarıda belirtilen aralıklarda Şekil 4.13 incelendiğinde; E_{G3} 'ün yaklaşık 2 eV'den büyük değeri için üstteki p-n eklemının kalınlığının azaltılması ile akım uyumlandırılmasının yapılamadığı ve aksine kalınlık azaldıkça verimin de azaldığı gözlemlenmiştir.

4.4. Auger Üretimi ve Rekombinasyonunun Verime Etkisi

DDM ile güneş pillerinin verim sınırı hesaplanırken, ışımalı rekombinasyonun baskın olduğu varsayılmakta idi. Bu sebeple; Bölüm (4.1-4.3)'de hesaplanan pillerin akım yoğunluklarında (Eş. 3.10), sadece ışımalı rekombinasyonun sebep olduğu karanlık akım yoğunluğu göz önünde bulundurulmuştur. Bölüm 3'te; Auger üretimi hızının Auger rekombinasyon hızından fazla olması

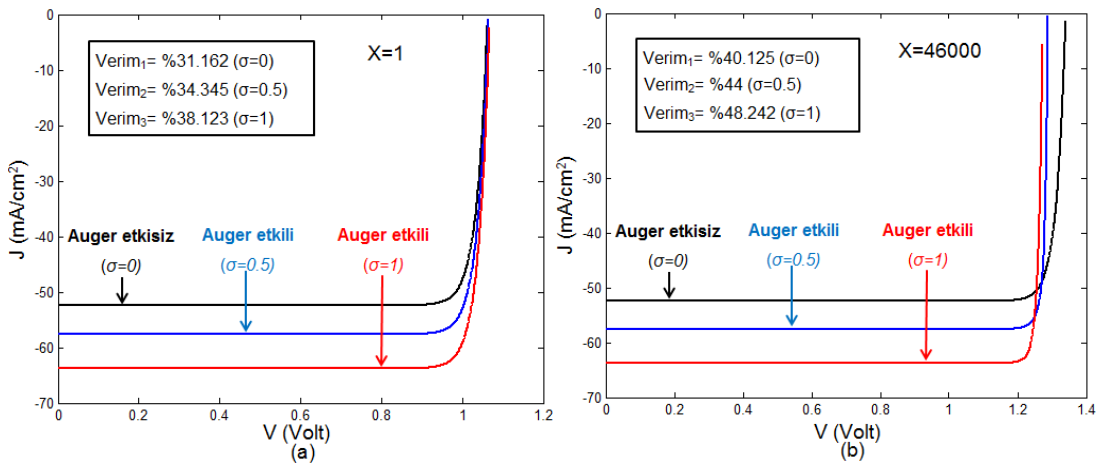
durumunda, Auger etkisinin azınlık taşıyıcı sayısını artırarak verimde artış sağladığından bahsetmiştik. Auger üretimi ve rekombinasyonu akım yoğunluklarının (Eş. 3.8 ve Eş. 3.9), Eş. 3.10'a ilave edilmesi ile Auger etkili güneş pilinde toplam akım yoğunluğu aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$J(V) = J_{photo} - J_{rad}(V) + (J_{Auggen} - J_{Augrec}(V)) \quad (4.1)$$

Şimdi, geleneksel p-n eklem ve iki eklemli monolitik güneş pillerinde Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkileri incelenecektir.

4.4.1. p-n eklem güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi

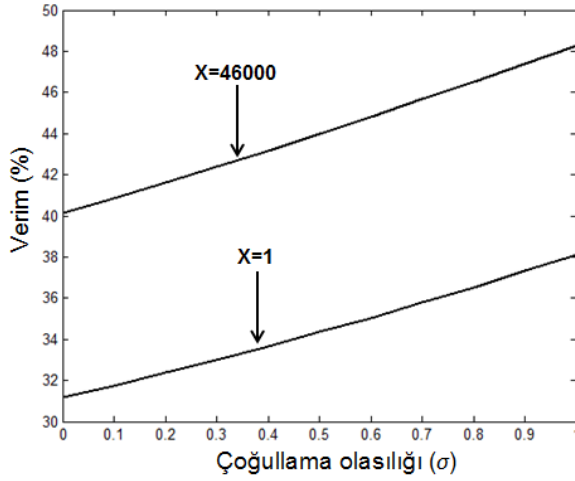
Bölüm 4.1'de; yasak band aralığı $E_{G(opt)}=1.31$ eV olan geleneksel p-n eklem güneş pilinin siyah cisim ışıması altında $X=1$ için, %31.162 ve $X=46000$ için %40.125 teorik verim sınırının olduğu hesaplanmıştı. Aynı pilde $X=1$ ve $X=46000$ için Auger etkisi hesaba katıldığında pilin $J-V$ karakteristiği, Şekil 4.14'te elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Geleneksel p-n eklem güneş pilinde Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkisi (a) $X=1$ için, (b) $X=46000$ için

Şekil 4.14 incelendiğinde, çoğullama olasılığına (σ) bağlı olarak Auger etkisi pilin verimini artırdığı gözlemlenmektedir.

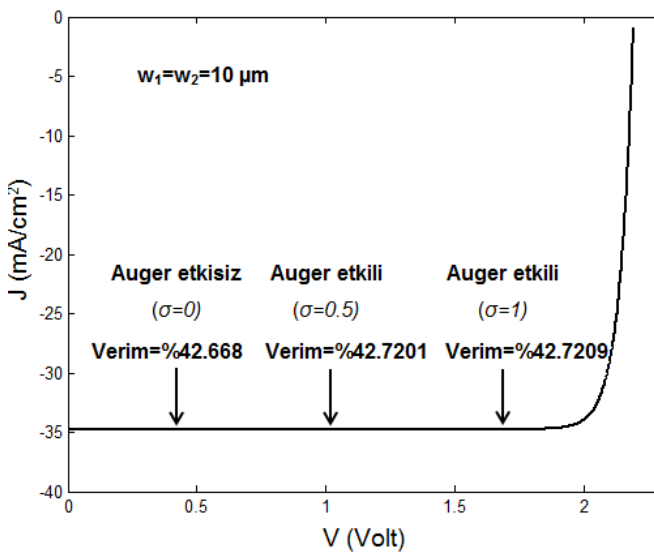
Çoğullama olasılığı (σ) 0 ile 1 arasında değiştirildiğinde, Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkileri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Çoğullama olasılığının verim üzerindeki etkisi

4.4.2. İki eklemlili güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi

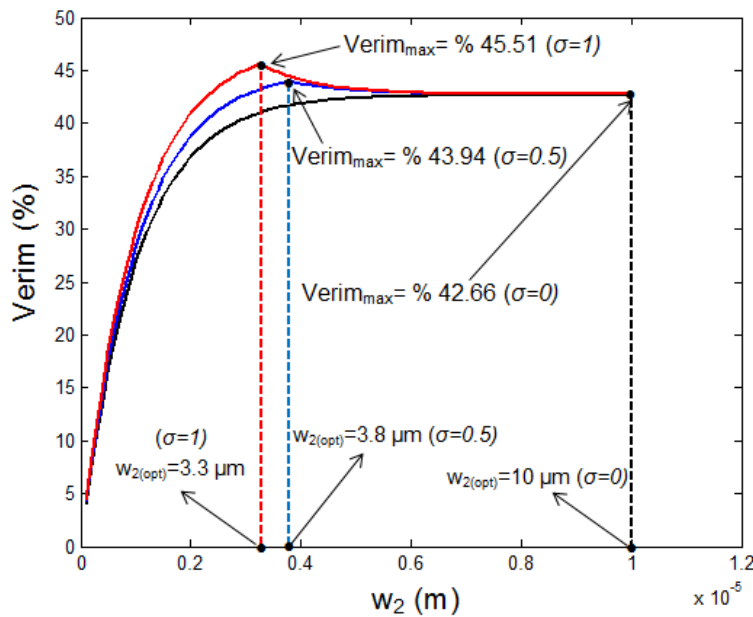
Bölüm 4.2'de; yasak band aralığı optimum olan ($E_{G2}=1.71$ eV, $E_{G1}=1$ eV) iki eklemlili monolitik güneş pilinin, siyah cisim ışıması altında $X=1$ için %42.668 teorik verim sınırının olduğu hesaplanmıştır. Aynı pilde $X=1$ için Auger etkisi hesaba katıldığında pilin J - V karakteristiği, Şekil 4.16'da elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Optimum E_G 'li iki eklemlili güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi

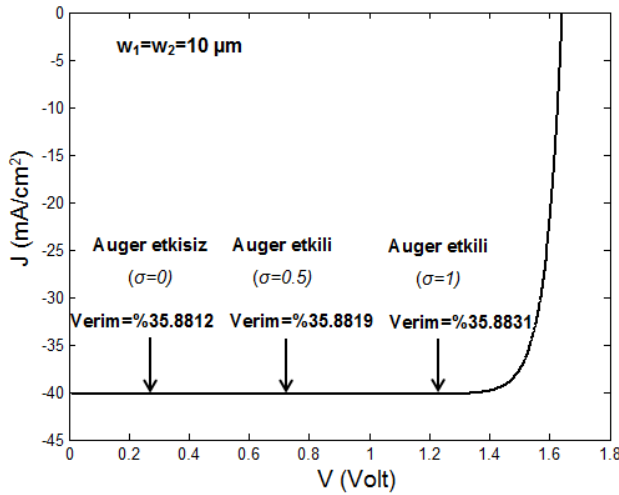
Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, maximum verim için optimum E_G 'lere sahip iki eklemlili güneş pilinde Auger mekanizmasının verime neredeyse hiç etkisi olmamıştır. Bunun sebebi; üstteki p-n eklemine, enerjisi yasak band aralığından büyük fotonların tamamını soğuracak kalınlıkta olmasındandır. Auger mekanizması burada üstteki p-n eklemine akım yoğunluğunu artırmıştır. Altta p-n eklemine enerjisi yasak band aralığının iki katından büyük enerjili fotonlar ulaşmadığından, altta p-n eklemine akım yoğunluğunda bir değişiklik olmamıştır. Çok eklemlili monolitik pillerde, akım yoğunluğu en küçük olan p-n eklemi pilin toplam akımını belirlediğinden, altta p-n eklemine akım yoğunluğu değişmediğinden, pilin akım yoğunluğu da değişmemiş ve verim neredeyse bu durumdan hiç etkilenmemiştir. $X=46000$ için de benzer sonuç alındığından, ayrıca verim grafiğinin verilmesine gerek duyulmamıştır.

Aynı E_G değerleri kullanılarak $\sigma=0$ (Auger etkisiz), $\sigma=0.5$ ve $\sigma=1$ için; üstteki pilin kalınlığı (w_2) $0.1\mu\text{m}$ ile $10\mu\text{m}$ arasında $0.1\mu\text{m}$ aralıklarla artırılarak, Auger mekanizmasının hangi w_2 kalınlıklarında verimi yükselttiği Şekil 4.17'de görülmektedir.



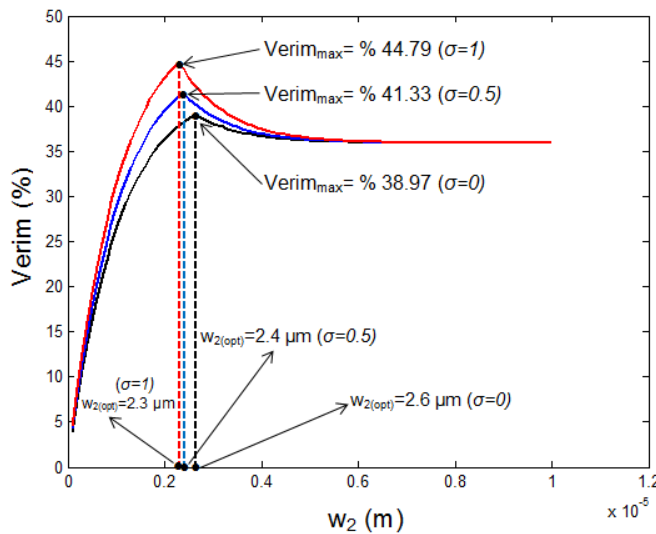
Şekil 4.17. İki eklemlili güneş pilinde üstteki p-n eklemine kalınlık değişimine bağlı olarak Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkisi.

Auger mekanizmasının, GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) iki eklemli güneş pilinde etkisini incelediğimizde, optimum E_G 'li iki eklemli pilin verimine etkisi ile benzer sonuç alınmaktadır. $X=1$ için GaAs/Ge iki eklemli güneş pilinde Auger etkisi hesaba katıldığında pilin J - V karakteristiği, Şekil 4.18'de elde edilmiştir.



Şekil 4.18. GaAs/Ge güneş pilinde Auger mekanizmasının verime etkisi

Üstteki p-n eklemi kalın olduğundan, burada da Auger mekanizmasının verime neredeyse hiç etkisi olmamıştır. Üstteki p-n ekleminin kalınlığı (w_2) 0.1 μm ile 10 μm arasında 0.1 μm aralıklarla artırılarak, benzer çalışma tekrarlandığında; çoğullama olasılığına (σ) bağlı olarak, verimde kayda değer oranda iyileşme olduğu Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19. GaAs/Ge güneş pilinde üstteki p-n ekleminin kalınlık değişimine bağlı olarak Auger mekanizmasının verim üzerindeki etkisi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, enerji bant aralığından daha küçük ve daha büyük enerjiye sahip fotonları, daha verimli olarak elektrik enerjisine dönüştürebilmek için, çok eklemli (multi-junction) güneş pilleri üzerinde incelemeler yapıldı. Çok eklemli güneş pilinin verimde nasıl iyileşme sağladığının görülmesi için, öncelikle geleneksel p-n eklem güneş pilinin verim analizi yapıldı. Siyah cisim (black body) ışıması altında geleneksel p-n eklem ve çok eklemli güneş pilinin verimini optimize etmek için Detaylı Denge Modeli kullanıldı.

Geleneksel p-n eklem güneş pilinde; verimin yarı-iletkenin yasak band aralığı (E_G) ile değişimi incelenerek, bir güneş ışıması altında maximum verimi sağlayan optimum E_G değeri 1.31 eV ve verim sınırı %31.162 olarak bulundu. Optimum E_G için güneş pilinin J - V karakteristiği çıkarılarak, pilin kısa devre akımı (J_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), çalışma noktasındaki akım yoğunluğu ve gerilim (J_m ve V_m) değerleri ile doluluk oranı (FF) hesaplandı. Işık konsantrasyonu arttığında verimin de logaritmik olarak arttığı, optimum E_G için maximum ışık konsantrasyonunda ($X=46000$) verim sınırının %40.125 olduğu görüldü.

İki eklemli monolitik güneş pilinde; verimin yarı-iletkenlerin yasak band aralıkları (E_{G1} ve E_{G2}) ile değişimi incelenerek, bir güneş ışıması altında maximum verimi sağlayan optimum E_{G1} değeri 1 eV ve E_{G2} değeri 1.71 eV için verim sınırı %42.668 olarak bulundu. Optimum E_G 'ler için güneş pilinin J - V karakteristiği çıkarılarak; J_{sc} , V_{oc} , J_m , V_m ve FF değerleri hesaplandı. J_{sc} 'nin (-34.728 mA/cm²), geleneksel p-n eklem güneş pilinin J_{sc} 'sine (-52.448 mA/cm²) göre önemli oranda azaldığı ancak, V_{oc} 'nin (2.1917 V.) de geleneksel p-n eklem güneş pilinin V_{oc} 'sine (1.063 V.) göre önemli oranda arttığı, bu sebeple, toplam verimde artış sağlandığı gözlemlendi. Işık konsantrasyonu arttığında verimin de logaritmik olarak arttığı ve $X=46000$ için verim sınırının %54.546 olduğu görüldü.

Verimin, yarı-iletkenlerin yasak band aralıkları (E_{G1} ve E_{G2}) ile değişim grafiği incelendiğinde; yüksek verim sağlayacak E_G 'lerin, sadece dar bir aralıkta bulunduğu gözlemlendi. Yüksek verim sağlayacak E_G 'lere sahip yarı-iletkenlerin sayısı çok az olduğundan, GaAs/Ge ve GaInP/GaAs gibi latis uyumlu ve çok eklemli monolitik pillerde kullanılmaya müsait yarı-iletkenlerden optimum verimin alınabilmesi için, üstteki p-n eklemının kalınlığı inceltirilerek akım uyumlandırma (current matching) işlemi yapıldı.

GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) iki eklemli monolitik güneş pilinde; GaAs'nin kalınlığı, enerjisi yasak band aralığından büyük olan fotonların tamamını soğuracak kalınlıkta ($w_2=10 \mu\text{m}$) olduğunda, pilin verimi %35.88 olarak hesaplandı. GaAs'nin kalınlığının azalması ile, her iki p-n eklemının akımlarının ve pilin veriminin bundan etkilendiği müşahade edildi. $w_2=2.6 \mu\text{m}$ olduğunda, akımların eşitlendiği ve tam bu noktada maximum verimin %38.97 olduğu görüldü.

Akım uyumlandırma işlemi, GaInP (1.9 eV)/GaAs (1.42 eV) iki eklemli güneş pili için de tekrarlandığında; GaInP'nin kalınlığı $10 \mu\text{m}$ olduğunda %29,90 olan verim sınırının, kalınlık $1.8 \mu\text{m}$ olduğunda %36,95'e yükseldiği hesap edildi.

İki eklemli monolitik güneş pillerinde Ge yarı-iletkeni, alttaş ve ikinci bir p-n eklemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ge üzerine büyütülecek ve güneş pilinde maximum verimi sağlayacak uygun kalınlıkta ve yasak band aralığındaki yarı-iletkeni bulmak için; üstteki p-n eklemi kalınlığı ve yasak band aralığı değişiminin verime etkisi incelendi. Üstteki p-n eklemi kalınlığının inceltmesi ile E_{G2} 'nin yaklaşık 1.45 eV'den küçük değerleri için akım uyumlandırmasının yapılabildiği görüldü. E_{G2} 'nin yaklaşık 1.45 eV'den büyük değerleri için akım uyumlandırılmasının yapılamadığı, aksine kalınlık azaldıkça verimin de azaldığı gözlemlendi.

Ge (0.7 eV) yarı-iletkeninin alttaş ve üçüncü p-n eklemi olarak kullanıldığı hesaba katılan üç eklemli güneş pilinde, üstteki ve ortadaki p-n eklemalarının

yasak band aralıklarının verime etkisi incelendi. Bir güneş ışması altında maximum verimi sağlayan optimum E_{G2} değeri 1.21 eV ve E_{G3} değeri 1.87 eV için verim sınırı %48.27 olarak bulundu. Optimum E_G 'ler için güneş pilinin J-V karakteristiği çıkarılarak; J_{sc} , V_{oc} , J_m , V_m ve FF değerleri hesaplandı. J_{sc} 'nin (-28.90 mA/cm²), iki eklemlili güneş pilinin J_{sc} 'sine (-34.728 mA/cm²) göre azaldığı ancak, V_{oc} 'nin (3.0051 V.) de iki eklemlili güneş pilinin V_{oc} 'sine (2.1917 V.) göre arttığı, bu sebeple, toplam verimde artış sağlandığı gözlemlendi. Işık konsantrasyonu arttığında verimin de logaritmik olarak arttığı ve X=46000 için verim sınırının %63.07 olduğu görüldü.

Verimin, yarı-iletkenlerin yasak band aralıkları (E_{G2} ve E_{G3}) ile değişim grafiği incelendiğinde; yüksek verim sağlayacak E_G 'lerin, üç eklemlili güneş pilinde de sadece dar bir aralıkta bulunduğu gözlemlendi. Günümüzde üretilen en yüksek verimli güneş pili olan üç eklemlili GaInP/GaInAs/Ge güneş pilinde akım uyumlandırma işlemi yapıldı.

Latis uyumlu GaInP (1.9 eV)/GaInAs (1.4 eV)/Ge (0.7 eV) üç eklemlili monolitik güneş pilinde; GaInP'nin kalınlığı, enerjisi yasak band aralığından büyük olan fotonların tamamını soğuracak kalınlıkta ($w_3=10 \mu m$) olduğunda, pilin verimi %36.08 olarak hesaplandı. GaInP'nin kalınlığının azalması ile; üstteki ve ortadaki p-n eklemının akımlarının ve pilin veriminin bundan etkilendiği görüldü. Ortadaki p-n eklemi yeterince kalın ($w_2=10 \mu m$) olduğundan, alttaki p-n eklemının akım yoğunluğunda herhangi bir değişiklik olmadığı müşahade edildi. $w_3=2 \mu m$ olduğunda, üstteki ve ortadaki p-n eklemalarının akımların eşitlendiği ve tam bu noktada maximum verimin %43.047 olduğu görüldü.

Üç eklemlili monolitik güneş pillerinde de Ge yarı-iletkeni, alttaş ve üçüncü bir p-n eklemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ge üzerine büyütülecek ve güneş pilinde maximum verimi sağlayacak uygun kalınlıkta ve yasak band aralığındaki yarı-iletkeni bulmak için; üstteki p-n eklemi kalınlığı ve yasak band aralığı değişiminin verime etkisi incelendi. Üstteki p-n eklemi kalınlığının

inceltmesi ile E_{G3} 'ün yaklaşık 2 eV'den küçük değerleri için akım uyumlandırmasının yapılabildiği görüldü. E_{G3} 'ün yaklaşık 2 eV'den büyük değerleri için akım uyumlandırılmasının yapılamadığı, aksine kalınlık azaldıkça verimin de azaldığı gözlemlendi.

Son olarak; Auger üretimi ve rekombinasyonunun, optimum E_G 'li geleneksel p-n eklem ve iki eklemli monolitik güneş pilleri ile GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) iki eklemli monolitik güneş pilinde verime etkisi incelendi. p-n eklem güneş pilinde, Auger mekanizmasının çoğullama olasılığına bağlı olarak verimde önemli oranda (%31.162 ($\sigma=0$)→%34.345 ($\sigma=0.5$)→ %38.123 ($\sigma=1$)) artış sağladığı görüldü.

Optimum E_G 'li iki eklemli güneş pilinde ve GaAs (1.42 eV)/Ge (0.7 eV) güneş pilinde Auger mekanizmasının verime neredeyse hiç etkisinin olmadığı görüldü. Bunun sebebinin; üstteki p-n eklemının, enerjisi yasak band aralığından büyük fotonların tamamını soğuracak kalınlıkta olmasından kaynaklandığı anlaşıldı

Üstteki p-n eklemi inceltilerek aynı işlem tekrarlandığında, verimde kayda değer oranda iyileşme sağlandığı görüldü. Buradan, Auger mekanizmasının çok eklemli monolitik güneş pillerinde verime etkisinin, üstteki p-n eklemının kalınlığına bağlı olduğu tespit edildi.

Bu çalışmada, güneş ışıma spektrumunun siyah-cisim ışıma spektrumu ile aynı olduğu varsayıldı. AM1.5 spektrumu için, incelemeler tekrarlanabilir.

Ayrıca, bu çalışmada, Detaylı Denge Modeli (DDM) ile verim analizi yapıldı. Işımalı rekombinasyon ve Auger mekanizması hesaplamalara dahil edildi ancak, SRH rekombinasyon etkisi ihmal edildi. İleriye yönelik çalışmalarda, DDM'ye SRH rekombinasyon etkisi dahil edilip etkileri incelenebilir. Ayrıca, mobilite, katkı konsantrasyonu gibi malzeme parametrelerinin pil performansı üzerindeki etkilerini daha detaylı analiz edebilmek için sürüklenme difüzyon modeli (SDM) ile hesaplamalar yapılarak, sonuçlar DDM ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Uğurlu Ö., Örcen İ., “Türkiye’de küresel ısınmanın enerji kaynakları üzerine etkisi”, **TMMOB 6. Enerji Sempozyumu**, Ankara,1 (2007).
2. Navruz T.S., “Arabant yapılı güneş pillerinde verim optimizasyonu”, Doktora, **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-143 (2008).
3. Köroğlu T., Teke A., Bayındır K.Ç., Tümay M., “Güneş paneli sistemlerinin tasarımı”, **Elektrik Mühendisliği Dergisi**, 439, 98-104 (2010).
4. “Güneş-elektrik dönüşümleri, fotovoltaik güneş gözeleri ve güç sistemleri”, **Temiz Enerji Vakfı**, 2-4 (2001).
5. Würfel P., “Physics of solar cells”, **WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.**, Weinheim, 23-24 (2005).
6. Smith, E. V. P., Gottlieb, D. M., “Solar flux and its variations,” **Space Science Reviews**, 16 (5): 771-802 (1974).
7. “PV status report 2010”, **European Commission Joint Research Centre Institute for Energy**, 9-15,19, 38-39 (2010).
8. “Development of renewable energy sources in Germany 2009”, **Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety**, 10-11 (2010).
9. İnternet: Solar Module Retail Price Environment, “Solar module retail price highlights: november 2010”, <http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>, (2010).
10. İnternet: Europe’s Energy Portal, “Domestic electricity prices”, <http://www.energy.eu>, (2010).
11. İnternet: Photovoltaic Education, “Collection probability”, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/collection-probability>, (2010).
12. İnternet: Wikipedia, “Quantum efficiency of a solar cell”, http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_efficiency_of_a_solar_cell, (2010).
13. İnternet: Photovoltaic Education, “Photovoltaic effect”, <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/photovoltaic-effect>, (2010).
14. Bagnall D.M., Boreland M., “Photovoltaic technologies”, **Energy Policy**, 36 : 4390-4396 (2008).

15. Nelson J., "Physics of solar cells", Imperial College Press., London, 13-14 (2004).
16. Saritas M., *Review paper on solar cell technology*, ***Proceedings of ECO Electronics Technology Workshop***, Turkey, 83-128 (1988).
17. Partain L. D., "Solar Cells and Their Applications", ***John Wiley and Sons***, New York, 32 (1995).
18. Murr L. E., "Solar Material Science", ***Academic Press***, London, (1980).
19. Streetman B. G., "Solid state electronic devices 3rd edition", ***Prentice Hall***, New Jersey, 87 (1990).
20. İnternet: Photovoltaic Education, "Effect of Temperature", <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>, (2010).
21. Zulehner W., "Status and future of silicon crystal growth", ***Materials Science and Engineering B***, 4 : 1-10 (1989).
22. Fischer H., Pschunder W., "Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells", ***Proceedings of the 10th IEEE PV Specialists Conference***, Palo Alto, CA, USA, 405-411 (1973).
23. Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., "Solar cell efficiency tables (version 36)", ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications***, 18:346-352 (2010).
24. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.W., "Photovoltaic materials, history, status and outlook", ***Materials Science and Engineering***, 40:1-46 (2003).
25. Green M.A., "The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution", ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications***, 17:183-189 (2009).
26. Goetzberger A., Shockley W., "Metal Precipitates in Silicon p-n Junctions" ***Journal of Applied Physics***, 31(10): 1821-1824 (1960).
27. Chittick R.C., Alexande J.H., Sterling H.F., "The preparation and properties of amorphous silicon", ***Journal of the Electrochemical Society***, 116: 77–81 (1969).
28. Spear W.E., Lecomber P.G., "Electronic properties of substitutionnally doped amorphous Si and Ge", ***Philosophical Magazine***, 33: 935–949 (1976)

29. Powalla M., Dimmler B., Groß K.H., "CIS thin-film solar modules – an example of remarkable progress in PV", **20th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Barcelona, Spain, (2005).
30. İnternet: Ulusal Metroloji Enstitüsü, "Organik güneş pilleri", http://www.ume.tubitak.gov.tr/lablar/menu_lablar.php?f=241, (2010).
31. Spanggaard H., Krebs F.C., "A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 83:125-146 (2004).
32. O'regan B., Grätze M., "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", **Nature**, 353:737 - 740 (1991).
33. İnternet: Ulusal Metroloji Enstitüsü, "Boya ile duyarlaştırılmış güneş pilleri(DSSC)",http://www.ume.tubitak.gov.tr/lablar/menu_lablar.php?f=240, (2010).
34. Barham K. W. J., Duggan G., " A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells", **Journal of Applied Physics**, 67(7): 3490-3493 (1990).
35. Bushnell D.B., Ekins-Daukes N.J., Mazzer M., Connolly J.P., Barnham K.W.J., Roberts J.S., Clark J., Hill G., Forbes I., "Strain-balanced GaAsP/InGaAs quantum well solar cells", **Applied Physics Letters**, 75: 4195-4197 (1999).
36. Rockett A.A., "The future of energy-Photovoltaics", **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, 14: 117-122 (2010).
37. Shockley W., Queisser H.J., "Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells", **Journal of Applied Physics**, 32: 510–519 (1969)
38. Green M.A., "Solar cells: operating principles, technology, and system applications", **Prentice-Hall**, Englewood Cliffs, (1982).
39. Conibeer G., "Third-generation photovoltaics", **Materialstoday**, 10(11):42-50 (2007).
40. Trupke T., Green M.A., Würfel P., "Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons", **Journal of Applied Physics**, 92:1668-1674 (2002).
41. Trupke T., Green M.A., Würfel P., "Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light", **Journal of Applied Physics**, 92:4117-4122 (2002).
42. Broman L., "Thermophotovoltaics Bibliography", **National Renewable Energy Laboratory**, (1994).

43. Datas A., Algora C., "Detailed balance analysis of solar thermophotovoltaic systems made up of single junction photovoltaic cells and broadband thermal emitters", ***Solar Energy Materials & Solar Cells***, 94:2137-2147 (2010).
44. Luque A., Hegedus S., "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", ***John Wiley & Sons, Ltd***, (2003).
45. Davis P., Luque A., "Solar thermophotovoltaics: brief review and new look", ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 33:11-22 (1994).
46. Luque A., Martí A., "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels", ***Physical Review Letters***, 78(26): 5014–5017 (1997).
47. Brown A.S., Green M. A., "Intermediate band solar cell with many bands: Ideal performance", ***Journal Of Applied Physics***, 94(9): 6150-6158 (2003).
48. Green M.A., "Third generation photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion", ***Physica E***, 14:65-70 (2002).
49. Green M.A., "Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond", ***Springer***, 5:59-67 (2006).
50. Imenes A.G., Mills D.R., "Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review", ***Solar Energy Materials and Solar Cells***, 84:19-69 (2004).
51. Olson J.M., Kurtz S.R., Kibbler A.E., Faine P., "A 27.3% efficient Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs tandem solar cell", ***Applied Physics Letters***, 56: 623 (1990).
52. Friedman D.J., Kurtz S.R., Bertness K.A., Kibbler A.E., Kramer C., Olson J.M., King D.L., Hansen B.R., Snyder J.K., "GaInP/GaAs monolithic tandem concentrator cells", ***Proc 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion***, Waikoloa, Hawaii, 1829–1832 (1994).
53. Karam N.H., King R.R., Lillington D.R., Keyes B.M., Ahrenkiel R.K., "Development and characterization of High-Efficiency Ga In P/GaAs/Ge Dual- and Triple-Junction Solar Cells", ***IEEE transactions on electronic devices***, 46(10): 2116-2125 (1999).
54. Yoshimi M., Sasaki T., Sawada T., Suezaki T., Meguro T., Matsuda T., Santo K., Wadano K., Ichikawa M., Nakajima A., Yamamoto K., "High efficiency thin film silicon hybrid solar cell module on 1m²-class large area substrate", ***3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion***, Osaka, 1566–1569 (2003).

55. Yang J., Banerjee A., Glatfelter T., Hoffman K., Guha S., "Progress in triple-junction amorphous silicon-based alloy solar cells and modules using hydrogen dilution", **1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Hawaii, 380–385 (1994).
56. Hamakawa Y., Okamoto H., Nitta Y., Adachi T., "Photovoltaic cell array having multiple vertical PIN junctions", US Patent 4,271,328 (1981).
57. Marti A., Araujo G.L., "Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 43:203-222 (1996).
58. Green M.A., "Photovoltaic principles", **Physica E**, 14:11-17 (2002).
59. Yastrebova N.V., "High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential", **Centre for Research in Photonics**, University of Ottawa, (2007).
60. Román J.M., "State-of-the-art of III-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications", **Advanced Photovoltaic Cell Design**, 1-8 (2004).
61. Luque A., Andreev V., "Concentrator photovoltaics", **Springer**, 4:67-87 (2007).
62. Kurtz S., Geisz J., "Multi-junction solar cells for conversion of concentrated sunlight to electricity", **Optics Express**, 18(S1):A73-A78 (2010).
63. Faine P.J., Kurtz S.R., Olson J.M., "Modelling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top cell and coating thicknesses as adjustable parameters", **Solar Energy Research Institute**, Golden, 339-344 (1990).

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : ŞENAY, Gökhan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16. 05. 1979 Karabük
Medeni Hali : Evli
Telefon : 0 (312) 2770059 (5136)
e-mail : gsenay@kkk.tsk.tr

**Eğitim
Derece****Eğitim Birimi****Mezuniyet tarihi**

Lisans : Gazi Üniv. / Elk-Elekt. Müh.
Lise : Karabük Demir Çelik Lisesi

2001
1995

İş Deneyimi**Yıl****Yer****Görev**

2003- : Kara Kuvvetleri Komutanlığı
Elektro Optik Sistemler
Bakım Merkezi Müdürlüğü
Tanksavar ve
Hava Savunma
Silah Sistemleri
Bölüm Amiri

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Kitap okumak, spor yapmak ve seyahat etmek.