



**ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİL VERİMİNİN ARA BANDIN DOLULUK  
ORANINIYLA DEĞİŞİMİ**

**Volkan KIZILOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2015**

Volkan KIZILOĞLU tarafından hazırlanan “ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİL VERİMİNİN ARA BANTIN DOLULUK ORANINIYLA DEĞİŞİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

**Başkan :** Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

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

**Üye :** Doç. Dr. M. Timur AYDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 09/01/2015

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

.....  
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Volkan KIZILOĞLU

09.01.2015

ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİL VERİMİNİN ARA BANDIN DOLULUK  
ORANINIYLA DEĞİŞİMİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Volkan KIZILOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2015

ÖZET

Güneş pilleri, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken devre elemanlarıdır. Düşük enerjili fotonlar ( $h\nu < E_G$ ), tek eklemli güneş pilleri tarafından soğurulamazlar. Bu sebeple, tek eklemli güneş pilleri düşük verimlere sahiptirler. Tek eklemli güneş pilleri için teorik verim sınırı %41'dir. Ara bant yapılı güneş pilleri, baz bölgesine eklenen ara bant sayesinde düşük enerjili fotonları da soğururlar. Bu sayede, ara bant yapılı güneş pilleri güneş spektrumunu daha efektif kullanırlar ve tek eklemli güneş pillerinden daha yüksek verimlere sahiptirler. Tek ara bant seviyesine sahip bir ara bant yapılı güneş pili için teorik verim sınırı %63.2'dir. İdeal modelde, taşıyıcıların valans banttan ara banda ve ara banttan iletkenlik bandına geçişlerinin kolayca gerçekleşmesi için, ara bandın yarı dolu olduğu kabul edilir. Bu çalışmada, çeşitli pil parametrelerinin, ara bandın doluluk oranının ve örtüşmenin ara bant yapılı güneş pillerinin verimlerine etkisi detaylı denge modeli kullanılarak incelenmiştir. Bant aralığı  $E_G=1.42$  eV olan GaAs yarı iletken malzeme için ara bant yapılı güneş pilinin verim sınırı %59.9 olarak bulunmuştur. Örtüşmesiz durumda, doluluk oranı 0.2-0.8 arasında değiştirildiğinde pil verimi neredeyse sabit kalmaktadır. Ancak doluluk oranı bu değerlerin dışında ise, verim büyük ölçüde azalmaktadır. Örtüşmeli durumda doluluk oranının verime etkisi, örtüşmesiz durumda elde edilen iki optimum ara bant enerji seviyesi kullanarak incelenmiştir. Bu ara bant seviyeleri için verimin, en yüksek olduğu doluluk oranlarının, 0.2 ve 0.8 civarında olduğu görülmüştür. Her örtüşme seviyesi için optimum ara bant enerji seviyeleri kullanıldığında ise, en yüksek verim noktaları, doluluk oranlarının 0.5 değerine kaymıştır. Son olarak, sonuçlar detaylı olarak tartışılmış ve yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 905.1.035  
Anahtar Kelimeler : Güneş pilleri, ara bant yapılı güneş pilleri, verim, soğurma, doluluk oranı, örtüşmeli soğurma katsayıları  
Sayfa Adedi : 59  
Danışman : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

THE EFFICIENCY VARIATION IN INTERMEDIATE BAND SOLAR CELLS DUE TO  
THE OCCUPATION FACTOR OF IB LEVEL

(M. Sc. Thesis)

Volkan KIZILOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2015

ABSTRACT

Solar cells are semiconductor devices that convert solar energy to electricity. The low energy photons ( $h\nu < E_G$ ) can't be absorbed by a single junction solar cell. This is the main reason why solar cells have lower efficiencies. Single junction solar cells have the theoretical efficiency limit of %41. Intermediate band solar cells (IBSCs) can also absorb low energy photon through intermediate band (IB) inserted inside the base region of solar cell. By means of this, intermediate band solar cell use solar spectrum much more effectively than normal p-n junction solar cell and has higher efficiency. The intermediate band solar cell, with a single IB, had shown a theoretical efficiency limit of %63.2. In ideal model, the IB energy level of IBSC was assumed to be half-filled with electrons to ensure carrier transition easily from valance band to intermediate band and intermediate band to conduction band. In this study, the effect of occupation factor, overlap and cell parameters on the efficiency of IBSC has been investigated using the detailed balance model (DBM). IBSC with a single IB energy level has shown a maximum efficiency of %59.9 for  $E_G=1.42\text{eV}$  of GaAs semiconductor. When the occupation factor was varied between 0.2 - 0.8, in non overlapping case, almost constant efficiency value was obtained. But, when  $f$  was beyond 0.2 and 0.8 values, the efficiency has been decreased considerably. The effect of overlapping on efficiency of IBSC has also been investigated using the two optimum IB levels obtained for non overlapping case. When these two optimum IB levels were used two maximum efficiency points were observed at around 0.2 and 0.8 respectively. If the optimum IB energy levels found for each of the overlapping energy values were taken into account, the maximum efficiency points has been shifted near to 0.5 of the occupation factor. Finally, the results have been discussed in detail and concluded.

Science Code : 905.1.035

Key Words : Solar cells, intermediate band solar cells, efficiency, absorption occupation factor, overlapping absorption coefficients

Page Number : 59

Supervisor : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Mőzeyyen SARITAŞ'a, yardımlarını ve görüşlerini hiçbir zaman esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ'a, beni bugőnlere getiren annem Dőriye KIZILOğLU ve babam Turgut KIZILOğLU'na, her zaman yanımda olan abim Ozan KIZILOğLU'na, maddi manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen Kőbra GŐLDOęAN'a ve desteklerinden dolayı Tőrkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teőekkőrő bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE FOTOVOLTAİK DEVRELER.....	3
2.1. Dünyada ve Türkiye’de Güneş Enerjisi.....	3
2.2. Dünden Bugüne Fotovoltaik Piller ve Verimleri.....	5
2.3. Fotovoltaik Etki .....	6
2.4. Klasik Güneş Pili Modeli.....	7
2.4.1. Güneş pilinin çalışması ve akım-gerilim karakteristikleri.....	8
2.4.2. Klasik güneş pillerinde detaylı denge modeli .....	12
2.5. IV. Nesil Yüksek Verimli Güneş Pilleri .....	14
2.5.1. Çok eklemlili güneş pilleri .....	15
2.5.2. Aşağı-Yukarı dönüşüm pilleri.....	18
2.5.3. Termofotovoltaik güneş pilleri .....	20
2.5.4. Ara bant yapıli güneş pilleri.....	22
2.5.5. Kuantum Noktalar.....	23
3. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLİNDE VERİM İNCELEMESİ .....	25



	<b>Sayfa</b>
3.1. Ara Bant Yapılı Güneş Pilinin Yapısı ve Çalışması .....	25
3.2. Ara Bant Yapılı Güneş Pilinin Detaylı Denge Modeli .....	27
3.3. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Doluluk Oranı .....	35
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>39</b>
4.1. Klasik Tek Eklemlı Güneş Pili ile Ara Bant Yapılı Güneş Pili Karşılaştırılması .....	40
4.2. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Malzeme Parametrelerinin Pil Verimi Üzerine Etkisi.....	41
4.2.1. Ara bant yapılı güneş pilinde kalınlığın pil verimine etkisi.....	41
4.2.2. Ara bant yapılı güneş pilinde soğurma kat sayılarının pil verimine etkisi.....	42
4.2.3. Ara bant enerji seviyesinin ara bant yapılı güneş pili J-V karakteristiğine etkisi .....	43
4.3. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Doluluk Oranın Pil Verimine Etkisi .....	44
4.3.1. Örtüşmesiz durumda ara bant yapılı güneş pilinde doluluk oranın pil verimine etkisi.....	44
4.3.2. Örtüşmeli durumda ara bant yapılı güneş pilinde doluluk oranın pil verimine etkisi.....	45
4.3.3. Ara bant yapılı güneş pilinde doluluk oranın optimum ara bant enerji seviyesine etkisi .....	49
4.3.4. Ara bant yapılı güneş pilinde doluluk oranın J-V karakteristik eğrisine etkisi.....	50
4.4. Yorumlar ve Öneriler .....	52
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>59</b>

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Çeşitli bölgelerin güneş ışınım miktarları .....	3
Çizelge 2.2. Güneş ışınlarının güç yoğunluğu .....	12
Çizelge 2.3. Tandem pillerin detaylı denge verim sınırı.....	17
Çizelge 4.1. $E_G=1.42\text{eV}$ için Tek eklemli ve ara bant yapılı güneş pilinin karşılaştırılması.....	41

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Dünyada fotovoltaik enerji üretiminde en yüksek kapasiteye sahip 10 ülke.....	4
Şekil 2.2. Dünya üzerinde kurulu toplam fotovoltaik güç.....	4
Şekil 2.3. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlası .....	5
Şekil 2.4. Güneş pilleri ve verimlerinin yıllar içinde değişimi.....	6
Şekil 2.5. P tipi yarıiletkenin, n tipi yarıiletkenin ve p-n eklemının enerji bant diyagramı .....	7
Şekil 2.6. Güneş pili kesiti .....	8
Şekil 2.7. Güneş pili eşdeğer devresi .....	9
Şekil 2.8. Güneş pili için I-V karakteristiği .....	11
Şekil 2.9. AM1.5 Güneş spektrumu.....	15
Şekil 2.10. Üç eklemli bir tandem pilin spektrumu .....	16
Şekil 2.11. Spektrum bölmeli 3 eklemli güneş pili.....	16
Şekil 2.12 Yığın yapıli tandem güneş pilinin yapısı.....	18
Şekil 2.13. Aşağı dönüşüm pili ve dönüştürücü enerji bant diyagramı .....	19
Şekil 2.14. Aşağı dönüşüm pili verim - bant aralığı değişimi .....	19
Şekil 2.15. Yukarı dönüşüm pilinin yapısı ve dönüştürücü enerji bant diyagramı.....	20
Şekil 2.16. Termofotovoltaik güneş pili yapısı.....	21
Şekil 3.1. Ara bant yapıli güneş pili yapısı ve enerji bant diyagramı .....	25
Şekil 3.2. Ara bant yapıli güneş pilinde foton soğurulması ve elektron hareketi .....	26
Şekil 3.3. Ara bant yapıli güneş pilinde örtüşmeli durumda soğurma kat sayıları .....	27
Şekil 3.4. Ara bat yapıli güneş pilinde ışınların soğurulması ve emisyonu için tanımlanan açılar .....	29
Şekil 4.1. GaAs ara bant yapıli güneş pili verim – ara bant seviyesi değişimi.....	40

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.2. Tek eklemli güneş pili ile ara bant yapıli güneş pili karşılaştırılması .....	41
Şekil 4.3. Ara bant yapıli güneş pilinde baz bölgesi kalınlığı ile pil verimi değişimi ....	42
Şekil 4.4. Ara bant yapıli güneş pilinde verimin soğurma katsayıları ile değişimi .....	43
Şekil 4.5. Ara bant enerji seviyesinin J-V karakteristik eğrisi üzerindeki etkisi .....	43
Şekil 4.6. Ara bant yapıli güneş pilinde örtüşmesiz durumda doluluk oranı ile verim değişimi .....	44
Şekil 4.7. Farklı örtüşme seviyeleri ve $E_t=0.4856$ eV için pil verimi–doluluk oranı değişimi.....	45
Şekil 4.8. Farklı örtüşme seviyeleri ve $E_t=0.9344$ eV için pil verimi–doluluk oranı değişimi.....	46
Şekil 4.9. İki optimum $E_t$ değeri için optimum doluluk oranı - örtüşme miktarı değişimi.....	47
Şekil 4.10. Farklı örtüşme seviyelerinde $E_v$ 'ye yakın optimum ara bant seviyeleri alınarak elde edilen verim - doluluk oranı değişimi .....	48
Şekil 4.11. Farklı örtüşme seviyelerinde $E_c$ 'ye yakın optimum ara bant seviyeleri alınarak elde edilen verim - doluluk oranı değişimi .....	48
Şekil 4.12. Farklı örtüşme seviyeleri için optimum $E_t$ 'ler alınarak elde edilen optimum doluluk oranı - örtüşme miktarı değişimi .....	49
Şekil 4.13. Örtüşmesiz ve örtüşmeli durumlarda doluluk oranı ile optimum ara bant seviyesinin değişimi.....	50
Şekil 4.14. Örtüşmesiz durumda doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi .....	51
Şekil 4.15. 0.4 eV örtüşme varken doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi ...	51
Şekil 4.16. 4 eV örtüşme varken doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi .....	52

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>K</b>	Kelvin
<b>T</b>	Sıcaklık (K)
<b>c</b>	Işık hızı
<b>h</b>	Planck sabiti
$\lambda$	Dalga boyu(nm)
<b>E<sub>G</sub></b>	Bant aralığı (eV)
<b>E<sub>F</sub></b>	Fermi enerji seviyesi
<b>GaAs</b>	Galyum arsenit
<b>P<sub>in</sub></b>	Güneş pili yüzeyine gelen güç yoğunluğu
<b>P<sub>m</sub></b>	Maksimum çalışma güç yoğunluğu
<b>V<sub>oc</sub></b>	Açık devre gerilimi (V)
<b>J<sub>sc</sub></b>	Kısa devre foto akım yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )
<b>J<sub>o</sub></b>	Diyot kaçak akım yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )
<b>I</b>	Akım(A)
<b>V</b>	Gerilim(V)
<b>R<sub>s</sub></b>	Seri direnç ( $\Omega$ )
<b>R<sub>sh</sub></b>	Şönt direnç ( $\Omega$ )
<b>R<sub>L</sub></b>	Yük direnci ( $\Omega$ )
$\eta$	Verim(%)
<b>FF</b>	Doluluk faktörü
$\alpha$	Soğurma katsayısı (cm <sup>-1</sup> )
<b>L<sub>n/p</sub></b>	Elektron ve boşlukların difüzyon mesafesi
<b>D<sub>n/p</sub></b>	Elektron ve boşlukların difüzyon katsayıları
$\mu_{n/p}$	Elektron ve boşlukların mobiliteleri
<b>n</b>	Elektron yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )
<b>p</b>	Boşluk yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )
<b>J<sub>e</sub></b>	Elektron akım yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b><math>J_h</math></b>	Boşluk akım yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )
<b><math>E_{ort}</math></b>	Örtüşme miktarı(eV)
<b><math>E_t</math></b>	Ara bant enerji seviyesi(eV)
<b><math>f</math></b>	Ara bandın doluluk oranı
<b><math>X</math></b>	Işık konsantrasyonu
<b><math>e</math></b>	Elektron yükü
<b><math>w</math></b>	Baz kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
<b><math>\nu</math></b>	Bir moddaki foton sayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AB</b>	Ara bant
<b>AM0</b>	Atmosferin dışındaki güneş ışıma spektrumu
<b>AM1</b>	Deniz seviyesine dik gelen güneş ışıma spektrumu
<b>AM1.5</b>	$60^\circ$ açıyla gelen ışıma güneş spektrumu
<b>BSF</b>	Back Surface Field
<b>CB/İB</b>	İletkenlik bandı
<b>GW</b>	$10^9$ Watt
<b>MW</b>	$10^6$ Watt
<b>NREL</b>	National Renewable Energy Laboratory
<b>TEİAŞ</b>	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
<b>TFV</b>	Termofotovoltaaj pili
<b>VB</b>	Valans bandı

## 1. GİRİŞ

Fotovoltaaj pilleri, diğere adıyla güneş pilleri, güneşten gelen fotonların enerjisini soğurarak elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken devre elemanlarıdır. Temelde yapıları p-n eklem diyotlu güneş pillerinin üzerine ışık düşürüldüğünde, yarı iletken malzemenin enerji bant aralığından yüksek enerjili olan fotonlar soğurularak elektron-boşluk çiftler üretirler. Bu elektron-boşluk çiftleri devreyi tamamlayarak fotoakım oluştururlar. Yarı iletken malzemenin enerji bant aralığından düşük enerjili fotonlar soğurulamaz. Ara bant yapılı güneş pilleri ise düşük enerjili fotonları da soğurarak güneş pillerinin fotoakımını dolayısıyla verimini artırmaktadır. Klasik tek eklemli güneş pillerinde teorik verim sınırı maksimum ışık yoğunluğu altında %41 olarak belirlenmiştir [1]. Ara bant yapılı güneş pilleri ilk defa 1997'de ortaya atılmıştır [2]. Tek ara bant enerji seviyesine sahip bir ara bant yapılı güneş pili için teorik verim sınırı %63,2'dir [3]. Teorik olarak yüksek verimler vaat eden ara bant yapılı güneş pillerinde, pratikte henüz istenilen verim değerlerine ulaşılamamıştır.

Bu çalışmada, ara bant yapılı güneş pillerinde ara bantın doluluk oranının güneş pili verimine etkisi detaylı denge modeli ile incelenmiştir.

2. bölümde, güneş enerjisinin önemi ve ülkemizin güneş enerjisinden yararlanma miktarı, geçmişten günümüze güneş pil verimlerinin tarihçesi sunulmuştur. Daha sonra fotovoltaaj etki ve klasik güneş pilleri hakkında bilgi verilerek klasik güneş pillerinin verim sınırı detaylı denge modeline göre incelenmiştir. Ayrıca 4. nesil güneş pilleri olarak adlandırılan, çok eklemli güneş pilleri, aşağı-yukarı dönüşüm pilleri, termofotovoltaik piller ve ara bant yapılı güneş pillerinden bahsedilmiştir.

Bölüm 3'te ara bant yapılı güneş pillerinin yapısı ve çalışması hakkında bilgiler verilerek, matematiksel modelinin detaylı denge yaklaşımı ile oluşturulmasına ilişkin denklemler verilmiştir. İdeal ara bant yapılı güneş pili modelinde, ara bant enerji seviyesinin elektron ve boşluk bakımından yarı dolu olduğu kabul edilmektedir [3,4]. Bu çalışmada, Doluluk oranının pil verimine etkilerinin incelenmesi için, ara bant yapılı güneş pillerinde doluluk oranının hesaplanmasına ve detaylı denge modeline dâhil edilmesine ilişkin bağıntılara yer verilmiştir.

4. bölümde ise GaAs yarıiletken malzeme kullanılan ara bant yapılı güneş pili detaylı denge modeli ile modellenmiş ve ara bant enerji seviyesi yarı dolu iken pil verimine etki eden önemli parametreler(baz kalınlığı, soğurma katsayıları, ara bant enerji seviyesi) incelenmiştir. Ara bant yapılı güneş pili ile tek eklemli güneş pili detaylı denge modeli kullanılarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Örtüşmesiz ve örtüşmeli durumlarda ara bant enerji seviyesinin doluluk oranının pil verimine etkileri incelenmiştir. Doluluk oranının optimum ara bant enerji seviyesi ve pilin akım-gerilim karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalara yönelik önerilere yer verilmiştir.



## 2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE FOTOVOLTAİK DEVRELER

Güneş, güneş sisteminin merkezinde bulunan ve orta büyüklükte olan bir yıldızdır. Güneş enerjisi ise güneş ışığından enerji elde edilmesine yarayan teknolojidir. Günümüzde, yoğun olarak güneş enerjisinden termal enerjiye dönüştürülerek faydalanılmaktadır. Fosil kaynakların hızla tükenmesi ve elektrik üretiminde fosil kaynakların kullanılması atmosferi yüksek oranda kirletmekte küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu nedenle, ülkeler, yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının kullanımına yoğunlaşmaktadır. Güneş, rüzgâr ve dalga enerjisi sistemleri bu alanların başında gelmektedir. Bu bölümde, dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisinin durumu ve fotovoltaik pillerin tarihçesi hakkında bilgiler verilmiştir daha sonra fotovoltaik etki ile klasik güneş pillerinden ve yüksek verimli güneş pili modellerinden bahsedilmiştir.

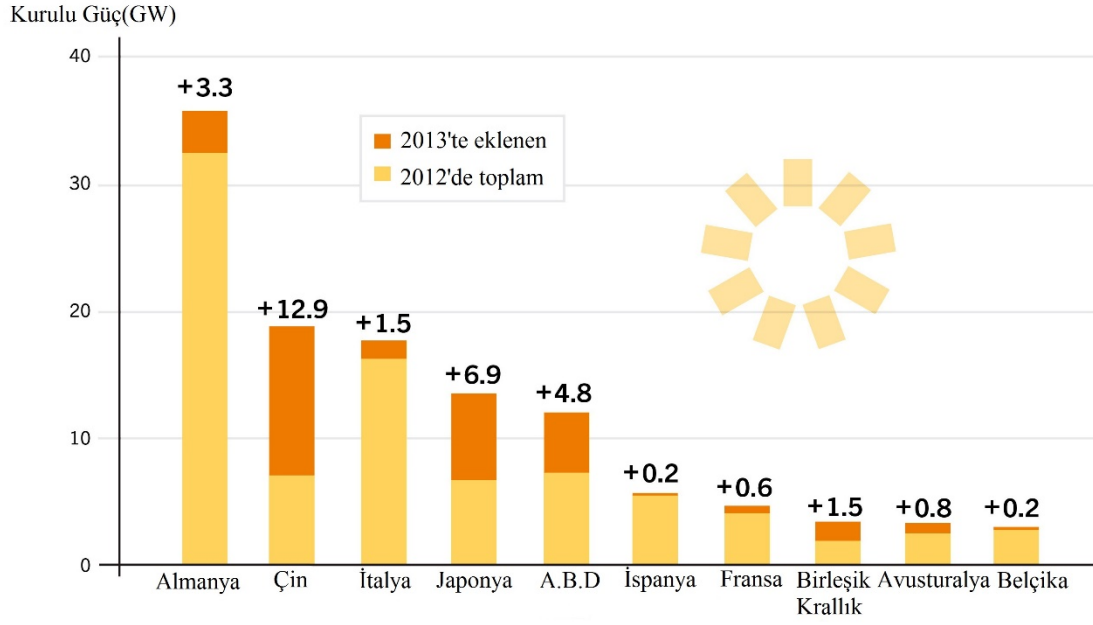
### 2.1. Dünyada ve Türkiye’de Güneş Enerjisi

Güneş ışınlarının atmosferin hemen dışındaki bir birim alana düşen ortalama güneş enerjisi yoğunluğu  $1370 \text{ W/m}^2$ ’dir [5]. Bu değer büyük bir kısmı atmosfer tarafından soğurulur veya atmosfer ya da yeryüzünden geri yansıtılır. Bu kayıplara rağmen yeryüzüne bir yıl boyunca düşen güneş enerji miktarı bir yılda hidroelektrik ve fosil yakıtlar kullanılarak üretilen enerjiden 15000 kat daha fazladır. Dünyanın değişik bölgelerdeki güneş ışınım miktarları Çizelge 2.1’de verilmiştir [6].

Çizelge 2.1. Dünyanın çeşitli bölgelerindeki güneş ışınım miktarları

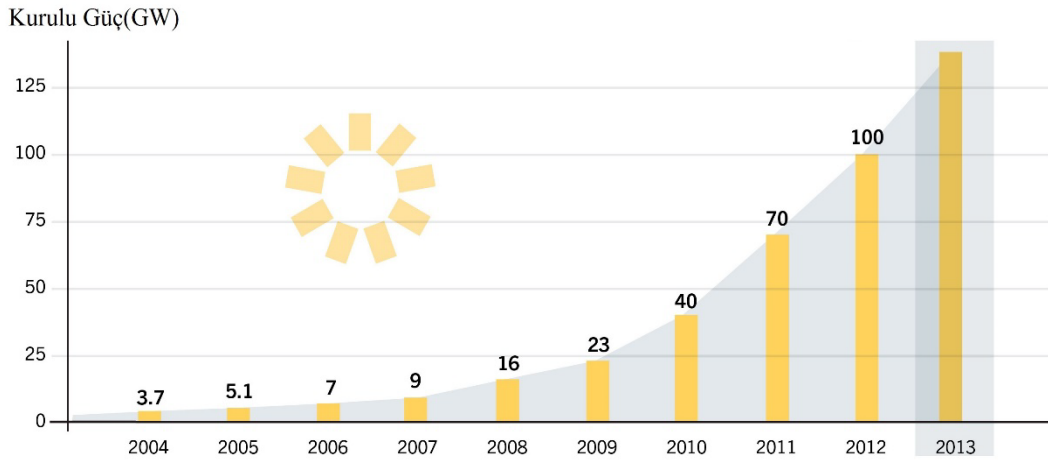
Bölge	kWh/m <sup>2</sup>
Kuzey Avrupa	800
Orta Avrupa	1000
Akdeniz Bölgesi	1700
Ekvator	2200

Kuzey Avrupa ülkesi olan Almanya’da yıllık güneş ışınım miktarı az olmasına rağmen, güneş enerjisine en büyük yatırımlar yapılmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi 2013 yılının sonunda Almanya’da toplam kurulu güç kapasitesi 40 GW’a yaklaşmıştır. Almanya’yı takip eden Çin ise 2013 yılında kurulunu gücünü 20 GW’a çıkarmıştır.



Şekil 2.1. Dünyada fotovoltaik enerji üretiminde en yüksek kapasiteye sahip 10 ülke [7]

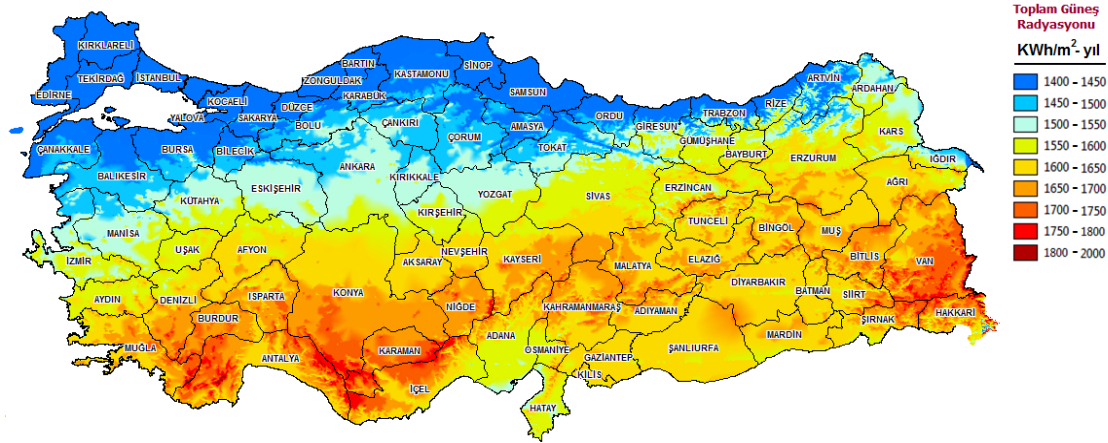
Dünya üzerinde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten santrallerin toplam gücü 2013 itibariyle 140GW'lara kadar yükselmiştir. Şekil 2.2'de yıllara göre kurulu toplam fotovoltaik gücün değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2. Dünya üzerinde kurulu toplam fotovoltaik gücün yıllara göre değişimi [7]

Ülkemiz ise yer aldığı kuşak sebebiyle güneş ışınımı açısından zengin bir potansiyele sahiptir. Ülkemizde, güneşlenme süresi günlük ortalama 7,2 saattir. Güneşlenme yoğunluğu ortalama olarak 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl olarak tespit edilen Türkiye'de gerekli yatırımlar yapıldığında, ortalama 1,1GWh/m<sup>2</sup>enerji üretilebilir [8].

Yüksek güneşlenme potansiyeline sahip olan ülkemizde, güneş enerjisi kullanımı sadece termal uygulamalar ile sınırlı kalmıştır. Ülkemizde toplam kurulu enerji güç miktarı



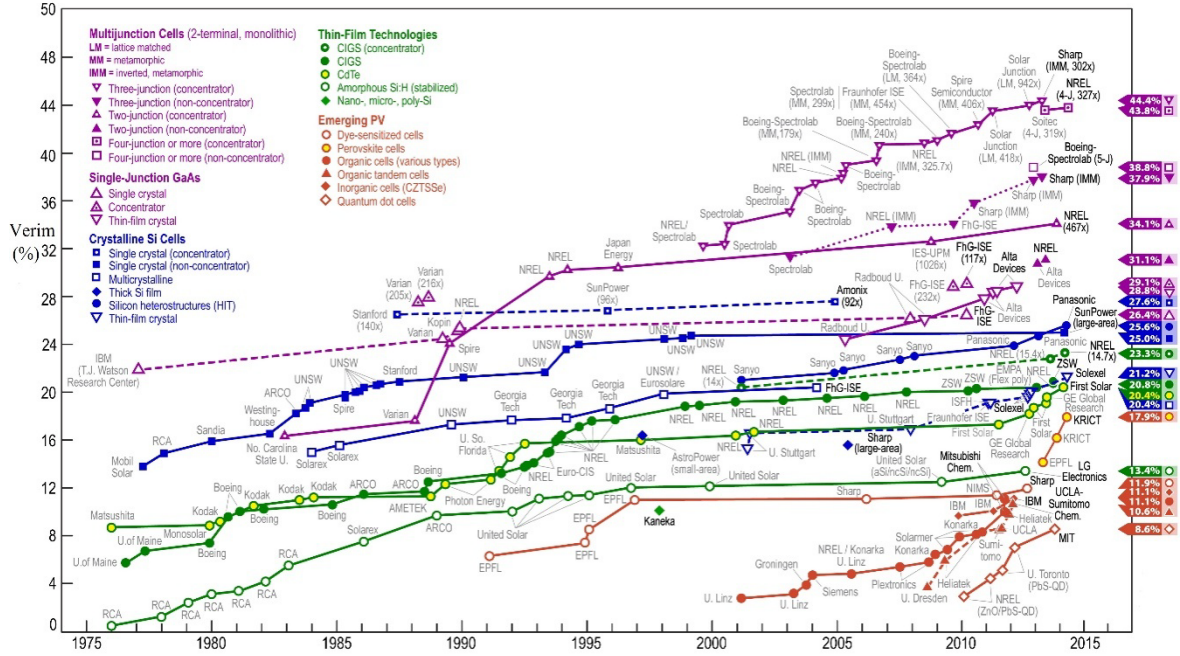
Şekil 2.3. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlası [9]

Temmuz 2014 itibariyle 67431MW civarındayken, güneş enerjinin kullanım payı 13,8MW kadardır [10]. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi güneş enerjisi potansiyeli bakımından en yüksek bölge Konya ili ve çevresidir.

## 2.2. Dünden Bugüne Fotovoltaik Piller ve Verimleri

Fotovoltaik etki, ilk 1839'da görülmesine rağmen, bu alandaki çalışmalar sadece araştırma düzeyinde kalmıştır. 1950'lerde ilk yarı iletken güneş pili üretilmiş ve uzay uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. 1970'lerde patlak veren petrol krizinden sonra alternatif ve yenilenebilir enerji alanlarında çalışmalar hız kazanmıştır. Bu alanların başında Güneş enerjisi gelmektedir. Şekil 2.4'de NREL(National Renewable Energy Laboratory) tarafından hazırlanan 1975 – 2015 yılları arasında üretilen güneş pillerinin verimleri görülmektedir. Güneş pillerinin verimleri yıllar içindeki teknolojik gelişmeler ve bilgi birikimi ile çok düşük seviyelerden %45'lere ulaşmışlardır. Üretilmiş güneş pilleri arasında en yüksek verimler çok eklemler güneş pillerinden alınmıştır. Yoğunlaştırılmış güneş ışığı altında üç eklemler güneş pilinden %44,4 verim elde edilmiştir. Tek eklemler pillerde verim rekoruna, GaAs yarı iletken malzemeleri kullanılarak üretilmiş pil sahiptir ve verimi %29,1 olarak kaydedilmiştir. Halen güneş pili piyasasında en büyük paya sahip olan Silisyum güneş pillerinde verim, yoğunlaştırılmış ışık altında %27'ler seviyesinde iken normal ışık altında %25 civarındadır. Tek eklemler Silisyum güneş pillerinde, en üst verim sınırına yaklaşıldığı

düşünüldüğü için çalışmalarda 2000 yılı sonrasında azalma gözlemlenmiştir. İnce film güneş pillerinde ise verimler şu anda %23 seviyelerine



Şekil 2.4. Güneş pilleri ve verimlerinin yıllar içinde değişimi [11]

yükseltilebilmiştir. Kuantum noktalı güneş pilleri ve ara bant yapıllı güneş pilleri, teorik olarak yüksek verimlere sahip olmalarına rağmen, üretimlerinde karşılaşılan problemler nedeniyle verimleri henüz düşük seviyelerdedir.

### 2.3. Fotovoltaik Etki

Fotovoltaik etki, ilk defa 1839 yılında E. Becquerel tarafından gözlenmiştir [12]. Bir yarı iletken p-n eklemi üzerine güneş ışığı düşürüldüğünde, eklemdeki potansiyel engelinde bir düşüş meydana gelir ve bu düşüş kadar bir gerilim üretilmesi de fotovoltaik etki olarak tanımlanır.

Fotovoltaik etki için üç koşul gereklidir [13];

i) Ekleme gelen fotonlar soğurulduğunda yeni elektron-boşluk çiftleri üretebilmelidir. Bunun için gelen fotonun enerjisi( $h\nu$ ), malzemenin enerji bant aralığından( $E_G$ ) büyük olmalıdır. Fotonun enerjisi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

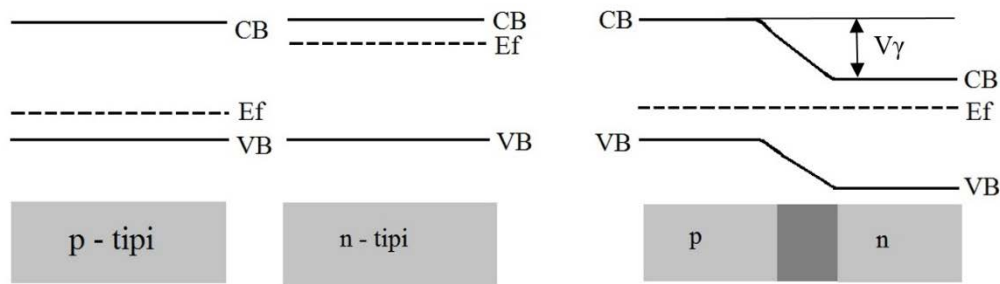
$$E_{foton} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} > E_G \quad (2.1)$$

Burada  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı,  $\lambda$  gelen fotonun dalga boyunu temsil etmektedir.

- ii) Fotonun soğurulmasıyla üretilen elektron ve boşluklar, eklemdeki uzay yük bölgesine ulaşarak buradaki elektrik alanın etkisiyle birbirinden ayrılmalıdır.
- iii) Birbirinden ayrılan bu taşıyıcılar kaybolmadan yollarına devam edebilmeli ve yük üzerinden akım akıtılabilmelidirler.

#### 2.4. Klasik Güneş Pili Modeli

Klasik güneş pilleri, temelde, yarı iletken p-n eklem diyotlardır. Şekil 2.5’de p-tipi ve n-tipi yarı iletken malzemelerin ve bu malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşan p-n eklemine enerji bant diyagramları verilmiştir. N-tipi yarı iletkende Fermi seviyesi iletkenlik bandına p-tipi yarı iletkende ise valans bandına yakın olmaktadır. Bunun sebebi n-tipi yarı iletkenlerin 5 elektronlu atomlarla katkılanıp son yörünge elektronlarını iletkenlik bandına göndermesi; p-tipi yarı iletkenlerin ise 3 elektronlu atomlarla katkılanarak valans banttan elektron almasıdır. Böylece n-tipi yarı iletkenlerde elektron ve p-tipi yarı iletkenler de ise boşluk sayısı çoğunlukta olmaktadır. P ve n-tipi yarı iletkenler bir araya getirildiklerinde Fermi seviyeleri eşitlenerek  $V_\gamma$  potansiyel engeline sahip bir eklem oluştururlar.



Şekil 2.5. P tipi yarıiletkenin, n tipi yarıiletkenin ve p-n eklemine enerji bant diyagramı

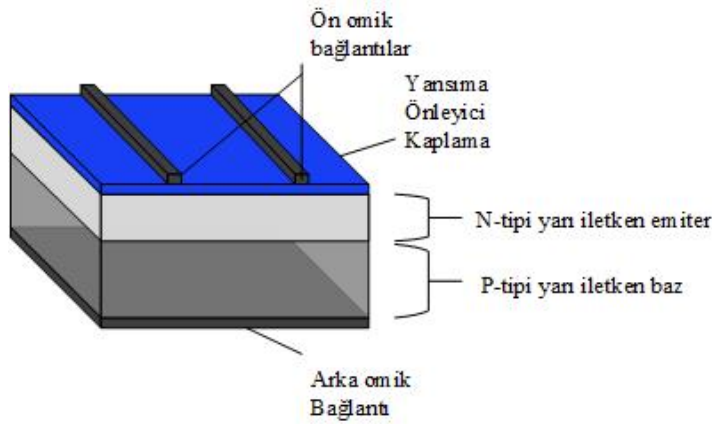
Güneş pili aydınlatıldığında fotonlar, kovalent bağları kırarak yeni elektron-boşluk çiftleri üretirler, üretilen bu çiftlerden p-n eklemine ulaşanlar eklemdeki potansiyel engelini azaltarak gerilim üretirler. Bu gerilim, aynı zamanda üretilen azınlık taşıyıcılarının enerjilerini azaltma eğilimlerinden dolayı denge durumunun korunması için oluşan Kuasi-Fermi seviyelerinin ayrılma miktarı kadardır. Güneş pilinin karanlıktaki  $V_\gamma$  potansiyel engeli

aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir;

$$V_V = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.2)$$

Eş. 2.2’de,  $k$  Boltzmann sabitini,  $T$  pili sıcaklığını,  $N_A$  ve  $N_D$  sırası ile p ve n tarafının katkı konsantrasyonlarını belirtirler.

Tipik bir güneş pilinin yapısı Şekil 2.6’da verilmiştir. Güneş pillerinde, gelen fotonların yansımalarının önlenmesi için ön yüzey yansımaya önleyici kaplama(ARC) ile kaplanır ve yansımaya oranları %1’lere kadar düşürülür. Ön omik kontaklar fotonların gelişini engellemek için ince ızgaralar şeklinde yapılır, ancak, kontak incelidikçe direnci

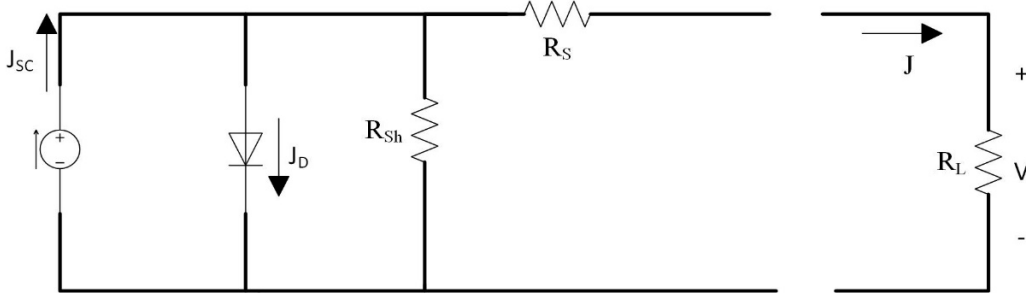


Şekil 2.6. Güneş pili kesiti

artacağından çok ince kontaklar tercih edilmemektedir. Taşıyıcı toplama olasılığını artırmak için n tipi yarı iletken bölgesi ince ve yüzeye yakın yapılmaktadır. Güneş pili tarafından soğurulamayan fotonların tekrar baz bölgesine yönlendirilmesi için arka omik kontakta önce yansıtıcı arka yüzey eklenmesi de sıkça tercih edilen yöntemlerdendir.

#### 2.4.1. Güneş pilinin çalışması ve akım-gerilim karakteristikleri

Güneş pilinin eşdeğer devresi Şekil 2.7’de verilmiştir. Güneş pili eşdeğer devresinde,  $J_{SC}$  kısa devre akım yoğunluğu,  $J_D$  karanlık akım yoğunluğu,  $J$  üretilen toplam akım yoğunluğu,  $R_{Sh}$  şönt direnci,  $R_S$  seri direnci,  $V$  çıkış gerilimidir.



Şekil 2.7. Güneş pili eşdeğer devresi

Akım yoğunluğu ve gerilim ifadeleri aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır:

$$J(V) \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = J_{sc} - J_D(V) - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemde görüldüğü gibi seri direnç ( $R_s$ ) çıkış voltajını etkiler ve verimi düşürür. Seri direnç, emiter ve baz bölgelerinin direnci, yarı iletken-metal kontaklarda oluşan direnç, ön ve arka metal kontakların dirençlerinden oluşur. Pil verimi üzerinde etkisi büyük olduğundan ideal durumlarda “0” alınır ve üzerinde gerilim düşümü olmadığı kabul edilir. Şönt direnç,  $R_{sh}$ , ise genellikle üretimden kaynaklanan bir dirençtir.  $R_{sh}$ 'in küçük değerlerde olması pilin akımında büyük kayıplara yol açar ve verimi düşürür. Şönt direncin çok büyük değerlerde olması istenir ve ideal durumlarda sonsuz kabul edilerek üzerinden akım akmadığı varsayılır. İdeal durumda,  $R_s=0$  ve  $R_{sh}=\infty$ , iken akım yoğunluğu-gerilim denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$J(V) = J_{sc} - J_D(V) \quad (2.4)$$

Kısa devre akım yoğunluğu,  $J_{sc}$ , ışık altında pilde taşıyıcı üretim hızıyla ( $G_{n,p}$ ), pilin uzay yük bölgesinin kalınlığıyla ( $w$ ) ve elektronların ve boşlukların difüzyon uzunluklarıyla ( $L_n, L_p$ ) doğru orantılıdır.

$$J_{sc} \propto G_{n,p}(w + L_n + L_p) \quad (2.5)$$

Karanlık akım yoğunluğu ise;

$$J_D = J_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$J_o$ , kaçak akım yoğunluğunu temsil eder ve yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$J_o = qn_i^2 \left[ \frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right] \quad (2.7)$$

Kaçak akım yoğunluğu pilin çıkış gerilimini düşürdüğü için azaltılması gerekir.  $J_o$ 'ı azaltmak için dört farklı öneri verilmiştir:

i)  $n_i$ (saf taşıyıcı yoğunluğu) küçük olmalı; bant aralığı büyük malzeme seçilerek sağlanabilir.  
ii)  $D_n$  ve  $D_p$  küçük olmalı; difüzyon katsayıları ile taşıyıcı mobiliteleri arasında Eş. 2.8'de görülen Einstein bağıntısı vardır. Difüzyon katsayılarını düşürmek mobiliteleri de düşüreceğinden bu önerinin uygulanması mantıklı değildir.

$$\frac{D_{n,p}}{\mu_{n,p}} = \frac{kT}{e} \quad (2.8)$$

iii)  $L_n$  ve  $L_p$  büyük olmalı;  $L_n$  ve  $L_p$ , taşıyıcıların difüzyonla gidebileceği mesafeyi temsil etmektedir  $L_n$  ve  $L_p$  yüksek olduğunda kaçak akım yoğunluğu azalacağı gibi Eş. 2.5'deki bağıntıdan kısa devre akım yoğunluğu da artacaktır ve verime katkı sağlanacaktır.

iv)  $N_A$  ve  $N_D$  büyük olmalı ancak katkı konsantrasyonlarının çok büyük olması rekombinasyon sürelerini kısaltacağından verimi düşürecektir.

Şekil 2.8'de tipik bir güneş pilinin akım-gerilim (I-V) karakteristiği görülmektedir. Burada kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ), kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) ile pilin yüzey alanının çarpımıdır.  $V_{OC}$  ise, pilin açık devre gerilimidir. Pil açık devre konumunda iken akım akmayacağından dolayı açık devre gerilimi,  $V_{OC}$ , aşağıdaki denklemden hesaplanır.

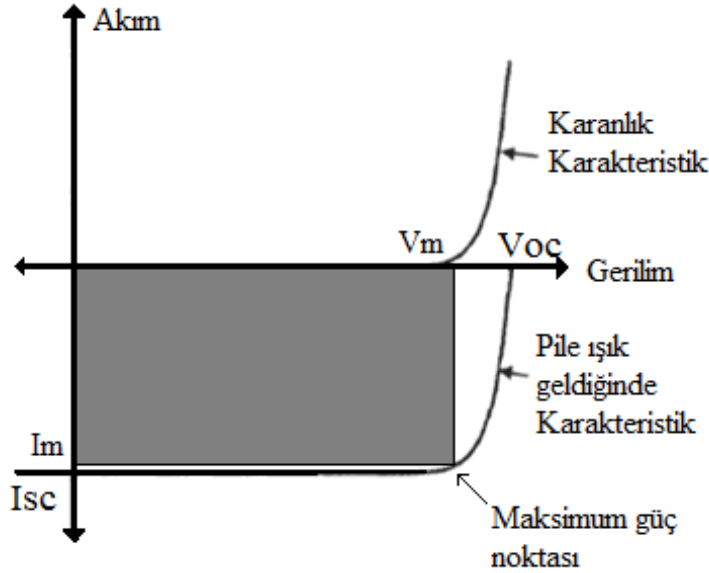
$$J = 0 = J_{SC} - J_o \left( e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

$$J_{SC} = J_o \left( e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_{SC}}{J_o} + 1 \right) \quad (2.11)$$



Güneş pilinin, Şekil 2.8'deki, I-V karakteristik eğrisinde görülen  $I_m$  ve  $V_m$ , sırası ile pilin maksimum güç noktasındaki yük akımı ve çıkış gerilim değerleridir. Pilin en verimli çalışacağı bu maksimum güç noktası için yük dirençlerinin de uygun seçilmesi gerekir.



Şekil 2.8. Güneş pilinin I-V karakteristik eğrisi

Güneş pilinin verimi ise, maksimum güç noktasındaki akım yoğunluğu ( $J_m$ ) ve çıkış voltajı ( $V_m$ ) çarpılarak elde edilen gücün, pilin üzerine düşen güç yoğunluğuna oranından elde edilir;

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_{in}} \quad (2.12)$$

Doluluk faktörü (FF) ise;

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanır. Eş. 2.12 ve Eş. 2.13 kullanılarak güneş pilinin verimi ( $\eta$ ) yeniden düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\eta = \frac{FF J_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (2.14)$$

Güneş piline düşen ışık güç yoğunluğu ise, pilin konumu ve güneş ışınlarının pil yüzeyine

geliş açısına göre farklılık göstermektedir. AM0, atmosfer dışında uzay uygulamaları için kullanılan spektrumdur. AM1 ışınması ise, ekvatorial ve tropik kuşakta kalan güneş ışınlarının dik olarak geldiği yerlerde kullanılır. Ülkemiz, Avrupa, ABD ve Çin gibi ülkeler AM1.5 spektrumundadır. Güneş ışınlarının geliş açısı yükseldikçe spektrum sabiti(AM) de yükselmektedir ve kutup bölgelerinde AM38 spektrumu görülür. Spektrum sabiti arttıkça güneş pili yüzeyine düşen güç yoğunluğu azalmaktadır. Kutup bölgelerinde bu değer 20W/m<sup>2</sup>'ye kadar düşmektedir. Güneş güç yoğunluğu aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir [14].

$$I = (1,1I_0)0,7^{AM^{0,678}} \quad (2.15)$$

Eş. 2.15'te  $I_0$ , güneşin atmosfer dışındaki sabit güç yoğunluğunu temsil etmektedir ve değeri 1,353 kW/m<sup>2</sup>'dir. Çizelge 2.2'de en sık kullanılan ışınma spektrumları için güç yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Güneş ışınlarının güç yoğunluğu

Işınma Spektrumu	Güç(mW/cm <sup>2</sup> )
Siyah cisim ışınması	157,9
AM0	155,3
AM1	107,0
AM1.5	100,0

#### 2.4.2. Klasik güneş pillerinde detaylı denge modeli

İlk defa 1961 yılında Shockley ve Queisser tarafından ortaya atılan detaylı denge modeli, klasik güneş pillerinden elde edilebilecek olan maksimum verimi hesaplamak için kullanılmıştır [1]. Tek eklemli klasik güneş pillerinde bu değer yaklaşık %30 olarak tespit edilmiştir.

Detaylı denge modelinde yapılan kabuller aşağıdaki gibidir;

- i) Güneş piline gelen ve enerjisi  $E \gg E_G$  olan her fotonun soğrulduğu ve hiçbir fotonun kaybolmadığı varsayılır.
- ii) Soğrulan her fotonun kesinlikle bir elektron-boşluk çifti ürettiği varsayılır.

- iii) Işımalı rekombinasyonun diğer rekombinasyon çeşitlerinden hızlı ve baskın olduğu varsayılır.
- iv) Elektron ve boşlukların mobilitelerinin sonsuz olduğu varsayılır.
- v) Malzemenin gerekli soğurmayı sağlayacak kadar kalın olduğu varsayılır.
- vi) Son olarak güneşin 6000K sıcaklıkta siyah cisim ışınması yapan bir kaynak olduğu kabul edilir.

Detaylı denge ile modellenen güneş pilinde akım yoğunluğu denklemi;

$$J(V) = J_{gen} - J_{rad}(V) \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. Burada  $J_{gen}$ , üretilen fotoakım yoğunluğunu ve  $J_{rad}$ , ışımalı rekombinasyon akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Üretilen fotoakım yoğunluğunun açık ifadesi ise aşağıda verilmiştir.

$$J_{gen} = J_{sc} = q \frac{2\pi}{h^3 c^2} \sin\theta_s \int_{E_G}^{\infty} \frac{\alpha(\epsilon)}{\alpha(\epsilon)} (1 - e^{-\alpha(\epsilon)w}) \frac{\epsilon^2}{e^{kT_s} - 1} d\epsilon \quad (2.17)$$

Bu ifade de  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı,  $\sin\theta_s$  katı açısı,  $\alpha(\epsilon)$  pilin foton soğurma kat sayısı,  $w$  pilin kalınlığı ve  $T_s$  güneşin sıcaklığıdır. Karanlık akım yoğunluğu ifadesi, Eş. 2.18'de tanımlanmıştır.

$$J_{rad} = J_D = q \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_G}^{\infty} \frac{\alpha(\epsilon)}{\alpha(\epsilon)} e^{\frac{V}{kT_c}} \frac{\epsilon^2}{e^{kT_c} - 1} d\epsilon \quad (2.18)$$

$T_c$  pil sıcaklığı ve  $T_s$  güneş sıcaklığı, detaylı denge modelinde sırasıyla 300K ve 6000K olarak kabul edilir.  $V$  ise pilin çıkış voltajını temsil etmektedir. Eş. 2.18 yeniden düzenlenirse;

$$J_o = q \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_G}^{\infty} \frac{\alpha(\epsilon)}{\alpha(\epsilon)} \frac{\epsilon^2}{e^{kT_c}} d\epsilon \quad (2.19)$$

$$J_{rad} = J_o e^{\frac{V}{kT_c}} \quad (2.20)$$

ifadeleri elde edilir. Klasik Güneş pilleri, detaylı denge modeli ile modellenirken Eş. 2.16, Eş. 2.17 ve Eş. 2.18'den yararlanır. Çıkış voltajı  $V$ 'ye 0'dan başlayarak belirli adımlarla değerler verilir. Her voltaj değeri için çıkış akım yoğunluğu değeri hesaplanır ve akım yoğunluğu sıfır oluncaya kadar işleme devam edilir. Çıkış akım yoğunluğunun "0" olduğu noktada çıkış voltajı,  $V_{oc}$ , açık devre gerilimine eşit olur. Bu değerlerden güneş pilinin I-V karakteristik eğrisi elde edilir. Bu eğri kullanılarak güneş pilinin çıkış gücü, verimi ve doluluk oranı hesaplanabilir. Detaylı denge modeli ile güneş pilinin verebileceği maksimum hedef verim belirlenir. Detaylı denge modelinden daha düşük verim elde edilmesinin sebepleri arasında; taşıyıcı mobilitelerin sonsuz olmaması, ışımali rekombinasyonların yanında diğer rekombinasyon çeşitlerinin de etkili olması, bütün fotonların soğurulmaması, yüzey rekombinasyonları ve kontaklarıdaki kayıplar gibi etkiler olabilir.

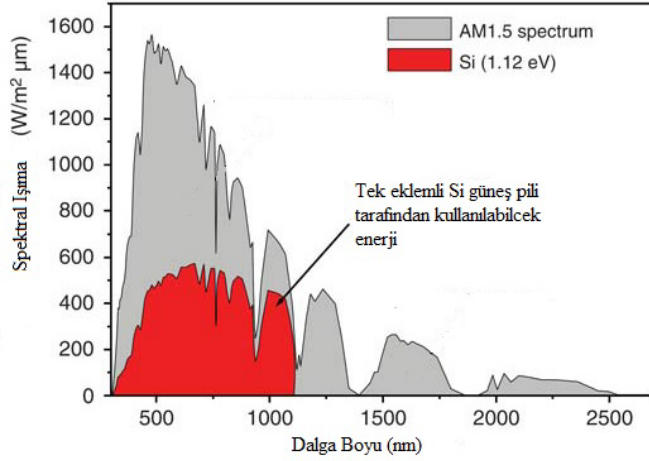
## 2.5. IV. Nesil Yüksek Verimli Güneş Pilleri

Klasik güneş pillerinin Shockley ve Queisser tarafından belirlenen üst verim sınırı güneş enerjisinin etkin kullanımı için yeterli olamamaktadır [1]. Bunun için çalışmalar, klasik güneş pillerinden yüksek verimli güneş pili modellerine doğru ilerlemiştir. Güneş pilleri dört nesil altında incelenebilir. Birinci nesil olan klasik, tek eklemlili güneş pilleri halen güneş pili piyasasının büyük bir kısmını kapsamaktadır. En yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzeme silisyumdur.

İkinci nesil güneş pilleri ise ince film teknikleri kullanılarak üretilen pillerdir. Kara ve uzay uygulamaları olmak üzere iki farklı uygulama alanı vardır. Kara uygulamalarında daha çok silisyum tabanlı piller tercih edilirken uydu uygulamalarında kullanılan güneş pilleri GaAs tabanlıdır. İkinci nesil güneş pillerinde üretim maliyetleri azdır ancak birinci nesil güneş pillerinden daha az verime sahiptirler. Üçüncü nesil güneş pilleri ise, ucuz malzemeli, üretimi kolay ancak düşük verimlere sahip güneş pilleridir. Üçüncü nesil güneş pillerine örnek olarak organik güneş pilleri ve boya sentezli güneş pilleri gösterilebilir.

Şekil 2.9'da AM1.5 ışınması için güneş spektrumu ve tek eklemlili Si güneş pili tarafından kullanılabilen güneş enerjisi spektrumu görülmektedir. Bölüm 2.3'de güneş pilinde, gelen bir fotonun soğurulması için fotonun enerjisinin pilin enerji bant aralığından büyük olması gerektiği belirtilmişti. Dördüncü nesil güneş pillerinde hedef güneş spektrumunu daha etkin kullanarak yüksek verimli güneş pilleri üretebilmektedir. Dördüncü nesil güneş pilleri

arasında; çok eklemli güneş pilleri, aşağı-yukarı dönüşüm pilleri, termofotovoltaik güneş pilleri ve ara bant yapılı güneş pilleri gösterilebilir.



Şekil 2.9. AM1.5 Güneş spektrumu [15]

### 2.5.1. Çok eklemli güneş pilleri

Tandem piller olarak da adlandırılan çok eklemli güneş pilleri, adından da anlaşılacağı gibi farklı bant aralıklarına sahip birden fazla p-n eklemine bir araya getirilmesiyle oluşur. Farklı bant aralıklı malzemelerden yapılan p-n eklem diyotlar güneş spektrumunun daha geniş dalga boyu aralığından yararlanırlar.

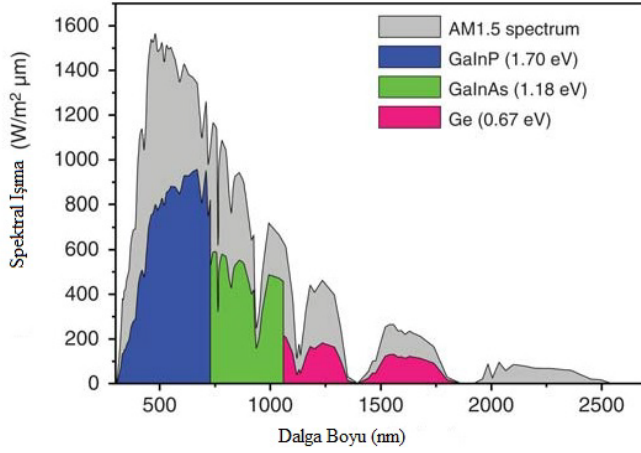
Şekil 2.10'da 3 eklemli bir tandem pilin, güneş spektrumundan faydalanma miktarı görülmektedir. Şekil 2.9 ile karşılaştırıldığında güneş spektrumunun çok daha verimli kullanıldığı görülmektedir. Üretilmiş güneş pilleri arasında en yüksek verime sahip olan pil 3 eklemli bir tandem pil olup, verimi %44,4 olarak belirlenmiştir [16]. Bu yapıdaki pilde InGaP/GaAs/InGaAs eklemeler kullanılmıştır. Verim değeri ise, 302 kat yoğunlaştırılmış güneş ışığı altında elde edilmiştir.

Çok eklemli güneş pilleri, yapıları itibariyle, spektrum bölmeli ve yığın yapılı olarak ikiye ayrılırlar;

#### Spektrum bölmeli tandem piller

Yapısı Şekil 2.11'de görülen spektrum bölme yöntemi ile tasarlanan tandem pilde seçici

geçirgen aynalar yardımı ile her p-n eklem için, spektrumun uygun bölümü yansıtılarak güneş spektrumu etkin bir şekilde kullanılır.



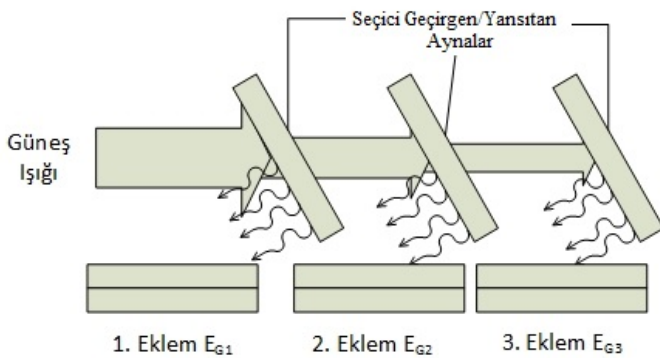
Şekil 2.10. Üç eklemli bir tandem pilin spektrumu [15]

Şekil 2.11'deki yapıda;

$E_{G1} < E_{G2} < E_{G3}$  olmak üzere enerjisi;

- i)  $E_{G1} < E_{ph} < E_{G2}$  olan fotonlar 1. eklem üzerine,
- ii)  $E_{G2} < E_{ph} < E_{G3}$  olan fotonlar 2. eklem üzerine,
- iii)  $E_{G3} < E_{ph}$  olan fotonlar 3. eklem üzerine yansıtılır.

Böylece, her eklem, kendi bant aralığına uygun olan fotonları soğurarak soğurabilecek fotonların toplam enerji aralığı artırılmış olur.



Şekil 2.11. Spektrum bölmeli 3 eklemli güneş pili

Spektrum bölmeli yaklaşımda, her pilin bir birinden yalıtılmış olarak çalıştığı kabul edilir. Aynaların mükemmel ve uygun enerji aralıklarını pil yüzeylerine yansıttığı varsayıldığında,

n. Pilin akım yoğunluğu;

$$J_n = J_{SCn}(E_{Gn}, E_{Gn+1}) - J_{Dn}(E_{Gn}, E_{Gn+1}, V_n) \quad (2.21)$$

şeklinde hesaplanır. Bu ifade de  $(E_{Gn}, E_{Gn+1})$  integral sınırları ve  $V_n$  ise n. pilin çıkış voltajıdır.

### Yığın yapıli tandem piller

Bu yapıdaki piller, p-n eklemleri üst üste yığılarak oluşturulur. En yüksek bant aralığına sahip eklem en üste ve aşağıya doğru bant aralığı daha düşük eklemler yerleştirilir. Böylece, en büyük enerjili fotonlar en üst eklemden soğurulur ve her eklem için uygun enerjili fotonların soğurulması aşağıya doğru devam eder. Dünya verim rekoruna sahip yığın yapıli çok eklemli güneş pilinin yapısı Şekil 2.12’de verilmiştir. Tandem pillerden alınabilecek en yüksek teorik verim sınırı, sonsuz eklem için %86,8 olarak hesaplanmıştır [15]. Çizelge 2.3’de tandem pillerin, maksimum ışık yoğunluğundaki siyah cisim ve AM1.5 ışımada, detaylı denge verim sınırları ve eklemlerin uygun bant aralıkları dizini verilmiştir [16].

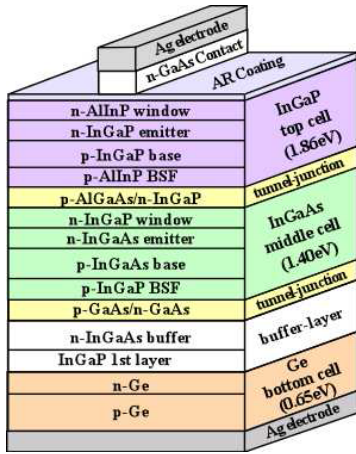
Çizelge 2.3. Tandem pillerin detaylı denge verim sınırı

Işıma	Eklem Sayısı	Bant aralıkları				Verim η(%)
		E <sub>G1</sub>	E <sub>G2</sub>	E <sub>G3</sub>	E <sub>G4</sub>	
Siyah Cisim Işıması	1	1,11				40,8
	2	0,77	1,70			55,9
	3	0,62	1,26	2,10		63,8
	4	0,52	1,03	1,61	2,41	68,8
	∞					86,8
	AM1.5 Işıması	1	0,94			
2	0,71	1,41			59,7	
3	0,69	1,16	1,84		67	
4	0,53	1,13	1,55	2,13	71	
∞					85	

Bu yapıdaki eklemlerin birbirini etkileme oranları oldukça fazladır. İki eklem arasında ters diyot etkisi oluşarak akım akmasını engeller bunu önlemek için tünel diyotlar kullanılır. Ayrıca eklemlerde elektronların düşük bant aralıklı eklemlere gitmesini önlemek için yüksek

katkılı arka yüzey alanları (BSF) kullanılır.

Yığın yapılı tandem pillerde her pil maksimum güç noktasında çalışamaz. Tandem piller yapı gereği seri bağlı diyotlar olarak düşünülürse, devreden akacak akım, en küçük pil akımına eşit olacaktır. Çıkış voltajı ise, pillerin çıkış voltajının toplamı şeklindedir. Tandem pillerde, pillerin birbirlerini etkilemesi ne kadar önlenebilirse pil verimi de o kadar artacaktır.



Şekil 2.12. Yığın yapılı tandem güneş pilinin yapısı [17]

### 2.5.2. Aşağı-Yukarı dönüşüm pilleri

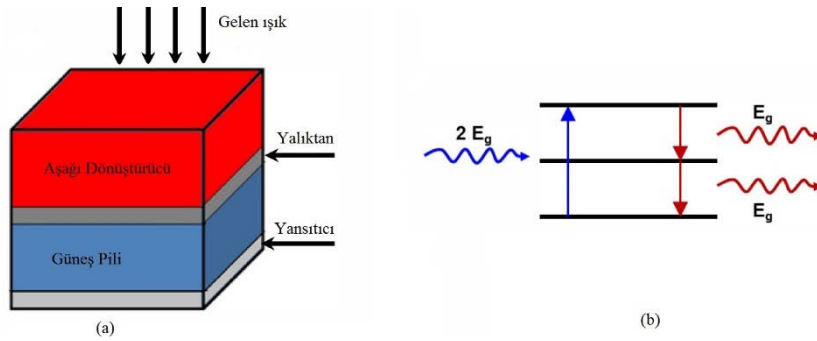
Aşağı-yukarı dönüşüm pilleri, tek eklemli güneş pillerinin soğuramadığı ve soğursa da enerjiye çeviremediği fotonları bir dönüştürücü yardımıyla güneş piline uygun hale getirilmesini amaçlar. Böylece, güneş spektrum etkin şekilde kullanılır. Bu dönüştürücüler yarı iletken malzemeler ile üretilmeye çalışılmaktadır. Dönüştürücü ve pilin etkileşimini önlemek için birbirlerinden elektriksel olarak yalıtılması ve bu yalıtım malzemesinin de optik geçirgenliğinin olması gerekir.

#### Aşağı dönüşüm pilleri

Yarı iletken enerji bant aralığından çok büyük enerjili bir foton güneş pili tarafından soğurulunca oluşan elektron, iletkenlik bandına çıktıktan sonra valans banda geri dönerken fazlalık enerjisini güneş piline ısı enerjisi olarak verir bu olaya termalizasyon adı verilir. Güneş pilinin sıcaklığının artmasıyla verimde kayıplar kaçınılmazdır. Bu sebeple bu yüksek enerjili fotonları iki ya da fazla sayıda düşük enerjili fotonlara dönüştürecek bir dönüştürücü

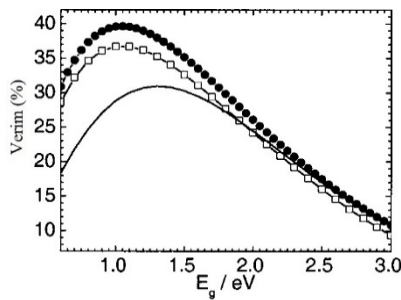


yardımıyla güneş pilinin fotoakımı ve verimi yükseltilebilir. Şekil 2.12’de pilin yapısı ve dönüştürücü enerji bant diyagramı görülmektedir. Gelen fotonların enerjisi,  $E_G < E_{ph} < 2E_G$  ise foton, dönüştürücüyü geçerek pil tarafından soğrulur,  $2E_G < E_{ph}$  ise foton dönüştürücü tarafından soğrulup dönüştürücüde valans banttandır iletkenlik bandına bir elektron geçer, daha sonra bu elektron, ışımali rekombinasyon ile önce ara banda daha sonra valans bandına dönerek enerjisi  $E_G$  olan iki foton yayar. Bu yeni fotonlar pil tarafından soğrularak yeni e-h çiftleri üretirler. Dönüştürücüde yalnızca ışımali rekombinasyon olduğu varsayılır.



Şekil 2.13. Aşağı dönüşüm pili(a) ve dönüştürücü enerji bant diyagramı (b) [18]

Aşağı dönüşüm pillerinde, detaylı denge modeline göre verim sınırı %40 olarak hesaplanmıştır [19]. Şekil 2.14 görüldüğü gibi en yüksek verimli aşağı dönüşüm pilinin bant aralığı 1 - 1,1 eV civarında iken elde edilmektedir ve bant aralığı yükseldikçe verim de düşmektedir. Bunun sebebi ise bant aralığı arttıkça dönüştürücünün dönüştürebileceği foton sayısının azalmasıdır.

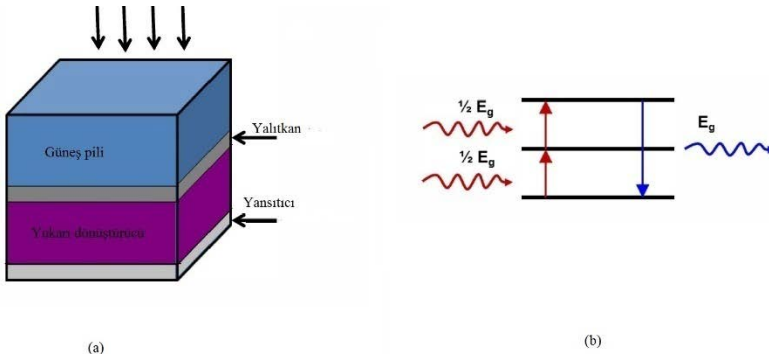


Şekil 2.14. Aşağı dönüşüm pili verim - bant aralığı değişimi(daireli çizgi: dönüştürücü arkada iken, kareli çizgi: dönüştürücü önde iken, düz çizgi: dönüştürücü yok iken) [19]

Aşağı dönüşüm pillerinde en verimli enerji bant aralığının 1 - 1,1 eV olması, güneş pili piyasasında en yaygın olarak kullanılan Si güneş pillerinin verimlerini artırmayı sağlayacaktır [19].

## Yukarı dönüşüm pilleri

Yukarı dönüşüm pilleri aşağı dönüşüm pillerinden farklı olarak güneş pilinin soğuramadığı düşük enerjili fotonların toplanarak pilin bant aralığına uygun fotonlara dönüştürülmesini hedefleyen bir yapıdır. Şekil 2.15'de pilin yapısı ve dönüştürücü enerji bant diyagramı görülmektedir [18].  $E_G/2 < E_{ph} < E_G$  enerjili fotonlar, dönüştürücü tarafından soğrulur ve oluşan elektronlar valans banttı ara banda ve ara banttı iletkenlik bandına geçerler. İletkenlik bandından valans bandına ışımalı rekombinasyon ile dönen elektron,  $E_G$  enerjili bir foton yayımlar ve bu foton güneş pili tarafından soğrulur. Yukarı dönüşüm pillerinde, enerjisi pilin enerji bant aralığından büyük fotonların, dönüştürücü tarafından soğrulmaması için dönüştürücü, pilin arkasına konulur ve pil ile dönüştürücü arasına ise aşağı dönüşüm pillerinde olduğu gibi bir yalıtkan yerleştirilir.



Şekil 2.15. Yukarı dönüşüm pilinin yapısı (a) ve dönüştürücü enerji bant diyagramı (b)

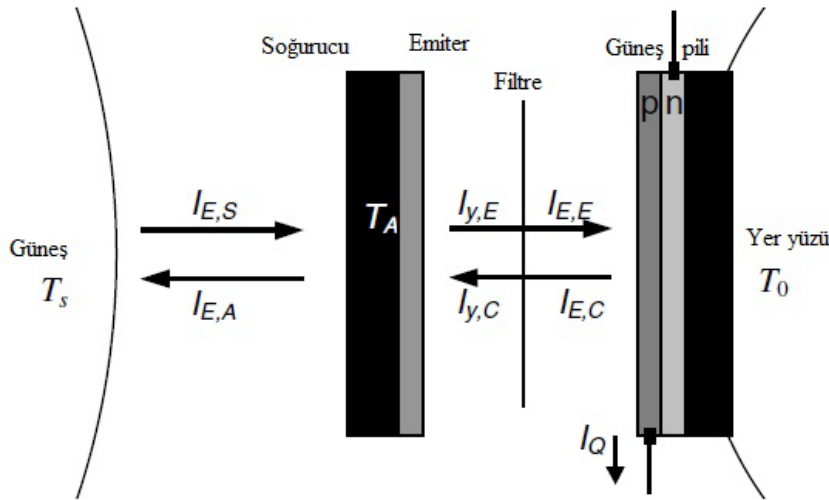
Yukarı dönüşüm pillerinde verim sınırı %63,17 olarak hesaplanmıştır [20]. En yüksek verimdeki güneş pili bant aralığı 1,955 eV'tur. Yukarı dönüşüm pillerinde, aşağı dönüşüm pillerinden daha fazla verim artışı sağlanmasının sebebi düşük enerjilerde foton sayısının fazla olmasıdır. Aşağı ve yukarı dönüştürücüler bir arada kullanılarak daha fazla verim artışı sağlanabilir. Dönüştürücü tasarımları ve teknolojileri yeterince gelişemediğinden verim artışları şu anda sınırlıdır.

### **2.5.3. Termofotovoltaik güneş pilleri**

Güneş spektrumunu daha verimli kullanmanın bir diğer yolu termofotovoltaik(TFV) pillerdir. TFV'de, güneş ışınları bir ara soğurucu tarafından soğurulduktan sonra soğurucuya bağlı olan emiter ısınır ve sıcaklığın etkisiyle güneş pilinin bant aralığına uygun enerjili

fotonlar salınır. Böylece yüksek enerjili fotonların termalizasyona uğrayarak pilin çok ısınması engellenmiş olur.

Şekil 2.16'da görülen yapıya sahip olan termofotovoltaik pillerde verim sınırı, maksimum ışık konsantrasyonunda %85 iken normal ışık altında %54 olarak hesaplanmıştır [21]. Ayrıca pilin yapısında güneş pilinin üzerine sadece pilin bant aralığına uygun enerjili fotonların ulaşması için filtre ilave edilmiştir.



Şekil 2.16. Termofotovoltaik güneş pili yapısı

Detaylı denge modeli ile pil verimi hesaplanırken, soğurucunun ve pilin verimleri ayrı ayrı hesaplanır [21]. Soğurucunun verimi hesaplanırken  $\Omega_S$  güneşin katı açısı olmak üzere Stefan-Boltzmann kanununa göre güneşten gelen enerji akım yoğunluğu;

$$j_{E,S} = \frac{\Omega_S}{\pi} \sigma T_S^4 \quad (2.22)$$

Ve soğurucudan yayınlanan kayıp enerji akım yoğunluğu;

$$j_{E,A} = \sigma T_A^4 \quad (2.23)$$

ifadeleri kullanılır. Bu eşitliklerde  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabiti,  $T_S$  güneşin sıcaklığı ve  $T_A$  soğurucunun sıcaklığıdır. Eş. 2.23, soğurucudan güneş piline doğru yayınlanan ışımayı içermez. Soğurucunun verimi aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\eta_{abs} = \frac{j_{E,S} - j_{E,A}}{j_{E,S}} = 1 - \frac{\pi T_A^4}{\Omega T_S^4} \quad (2.24)$$

Güneş pilindeki rekombinasyonların tümü ışımalı rekombinasyon olarak kabul edilir. Açık devre durumunda güneş pilinin soğurduğu foton sayısı kadar foton yayacağı düşünüldüğünde  $T_O$  pilin sıcaklığı olmak üzere pilin verim ifadesi;

$$\eta_{cell} = 1 - \frac{T_O}{T_A} \quad (2.25)$$

şeklinde olacaktır. Bu ifadeye Carnot verim sınırı denir. Burada pil veriminin,  $E_G$  bant aralığından bağımsız olması dikkat çekicidir. TFV yapının verimi ise;

$$\eta_{TPV} = \left(1 - \frac{\pi T_A^4}{\Omega T_S^4}\right) \left(1 - \frac{T_O}{T_A}\right) \quad (2.26)$$

olarak ifade edilir. TFV güneş pillerinde verimi etkileyen diğer önemli faktör ise soğurucu yüzey alanıdır. Soğurucu yüzey alanı, pilin yüzey alanından en az 30 kat daha büyük olmalıdır.

#### 2.5.4. Ara bant yapılı güneş pilleri

IV. nesil güneş pillerinin son üyesi olan ara bant yapılı güneş pilleri, güneş pilinin yasak bandına bir ara bant dâhil edilerek oluşturulur ve bu yapıda, güneş pilinin soğuramayacağı düşük enerjili fotonlarında soğurulması hedeflenir. Böylece güneş pilinin, güneş spektrumunun verimli kullanımı ile pil veriminde artış sağlanır.

İlk olarak 1997'de, Luque ve Marti ve diğerleri tarafından önerilen tek ara bant yapılı güneş pillerinde verim sınırı %63,2 olarak verilmiştir [2,3]. Ara bant sayısı arttıkça teorik olarak verim de artmaktadır. Çoklu ara banda sahip olan pillerde verim sınırı iki ara bantlı, üç ara bantlı ve dört ara bantlı piller için sırasıyla %70,1, %73,1 ve %74,6 olarak hesaplanmıştır [22]. Teorik olarak yüksek verimler vaat etse de ara bant yapılı güneş pillerinin üretim güçlüğünden dolayı pratikte henüz bu değerlere ulaşamamıştır.

Ara bant yapılı malzeme üretimindeki farklı yaklaşımlar 3 ana grupta toplanabilir. Bunlar;

kuantum noktalar gibi nano yapılar, aşırı uyumsuz alaşımlar(HMAs) ve yüksek yoğunlukta derin-seviyede safsızlık (DLIs) içeren yarı iletkenler [23].

Ara bant yapılı güneş pillerinde, ara bant sayesinde kısa devre akımında iyileşme gözlenirken pilin açık devre geriliminde azalma önlenmelidir. Yukarıda bahsedilen üç grupta çalışmalar devam etmektedir. Ancak kısa devre akımında ve açık devre geriliminde iyileşme sadece kuantum noktalı pillerde beraber olarak gözlemlenmiştir [23]. Detaylı denge modeli ile ara bant yapılı güneş pilinin incelenmesi 3. Bölümde verilmiştir.

### 2.5.5. Kuantum noktalar

Kuantum noktalar, nano boyutlarda yarı iletken malzemelerdir. 100 nm altına inildiğinde malzemeler, Newton mekaniğinin açıklamakta yetersiz kaldığı özellikler göstermektedir. Bu özellikler, kuantum mekaniğiyle açıklanabilir. Kuantum mekaniğine göre malzemelerin boyutlarının değişmesi, renk, bant aralığı gibi diğer fiziksel özelliklerini etkilemektedir.

Kuantum noktaların sahip olabilecekleri elektron sayısı ve enerji seviyesi sınırlıdır ve bu özellikler nokta boyutlarıyla değişebilmektedir. Yani kuantum noktaların bant aralıkları, boyutları ile kontrol edilebilmektedir. Kuantum noktaların bu özellikleri, güneş pili araştırmalarını daha popüler hale getirmiştir. Kuantum noktasının çapına göre bant aralığının değişimi etkin kütle yaklaşımı ile küresel yapıdaki noktalar için aşağıdaki gibi hesaplanır [24];

$$E_{G,QD} = E_{C,QD} - E_{V,QD} \quad (2.27)$$

$E_{C,QD}$  ve  $E_{V,QD}$  sırasıyla kuantum noktanın iletkenlik ve valans bant sınırları olup;

$$E_{V,QD}(d) = -\frac{2\hbar^2\pi^2}{m_h^*d^2} \quad (2.28)$$

$$E_{C,QD}(d) = -\frac{2\hbar^2\pi^2}{m_e^*d^2} + E_{G,Bulk} \quad (2.29)$$

Şeklinde hesaplanır. Eş. 2.28 ve 2.29'da  $m_h^*$  ve  $m_e^*$  sırası ile boşlukların ve elektronların

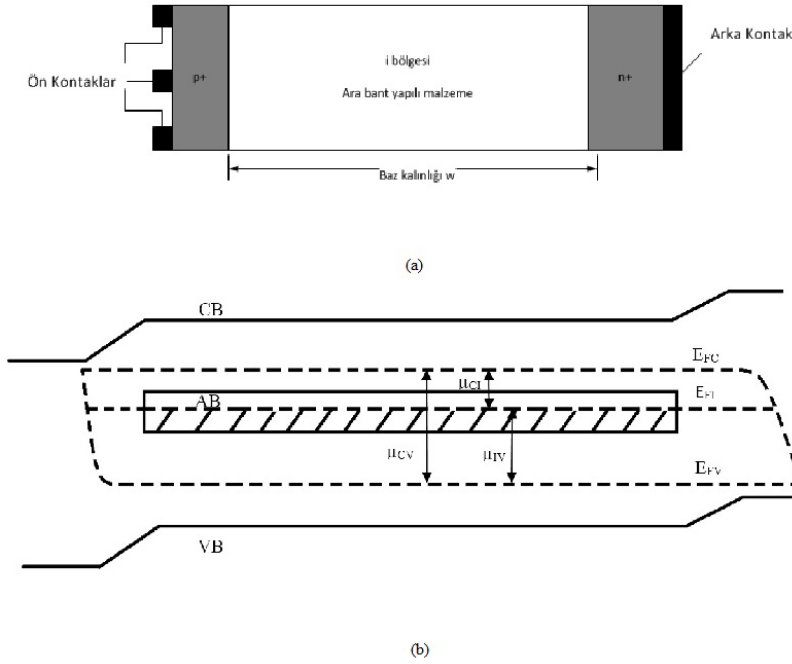
etkin küttelelerini,  $\hbar$  Dirac sabiti,  $d$  kuantum noktanın yarıçapı ve  $E_{G,Bulk}$  malzemenin büyük boyutlardaki bant aralığıdır. Kuantum noktaların boyutlarına göre enerji bant aralığının değişimi, ara bant yapılı güneş pillerinde, ara bantın enerji seviyesinin ayarlanmasında kullanılmaktadır. Kuantum noktalı ara bant yapılı güneş pilleri fikri 2000’li yılların başlarında ortaya atılmıştır [25].

### 3. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLİNDE VERİM İNCELEMESİ

Bu bölümde ara bant yapılı güneş pilleri detaylı olarak incelenecektir. Ara bant yapılı güneş pillerinin yapısı ve genel olarak çalışması incelendikten sonra detaylı denge modeliyle analizi için gerekli denklemler çıkarılarak verim incelemesi yapılacaktır.

#### 3.1. Ara Bant Yapılı Güneş Pilinin Yapısı ve Çalışması

Ara bant yapılı güneş pilleri temel olarak p-i-n yapıya sahiptir. İ-bölgesi katkısız saf bölge veya baz bölgesi olarak da adlandırılır ve ara banda sahip olan bu bölge güneş pilinde önemli role sahiptir. Baz bölgesini izole etmek için kullanılan p+ ve n+ katkılı katmanlar, emiter olarak da adlandırılır ve aynı zamanda omik kontaklara bağlantı noktalarıdır. Ara bant yapılı güneş pilinin basit yapısı ve enerji bant diyagramı Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Ara bant yapılı güneş pili yapısı(a) ve enerji bant diyagramı(b)

Ara bant yapılı güneş pilinin enerji bant diyagramında görülen (Bkz. Şekil 3.1)  $\mu_{CI}$  ve  $\mu_{IV}$  sırasıyla elektronların ve boşlukların Kuasi-Fermi seviyelerinin ayrılma miktarlarını ifade eder. Ara bant yapılı güneş pilinin çıkış voltajı ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu_{CV} = \mu_{CI} + \mu_{IV} \quad (3.1)$$

Ara bant yapılı güneş pili termal denge durumunda iken yani pil aydınlatılmamışken serbest elektron ve boşluk taşıyıcı yoğunlukları( $n_{eq}, p_{eq}$ ) sırasıyla;

$$n_{eq} = N_C e^{-\frac{E_{FC} - E_{FI}}{kT}} \quad (3.2)$$

$$p_{eq} = N_V e^{-\frac{E_{FI} - E_{FV}}{kT}} \quad (3.3)$$

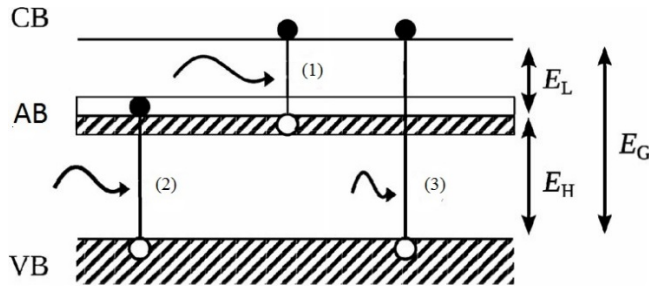
şeklinde hesaplanır. Bu eşitliklerde,  $N_C$  iletkenlik bandında etkin enerji durum yoğunluğu,  $N_V$  valans bandında etkin enerji durum yoğunluğu,  $k$  Boltzman sabiti ve  $T$  pilin sıcaklığıdır. Pilin üzerine ışık düşürüldüğünde serbest taşıyıcı yoğunlukları( $n, p$ ) aşağıdaki şekilde değişir.

$$n = n_{eq} e^{\frac{\mu_{CI}}{kT}} \quad (3.4)$$

$$p = p_{eq} e^{\frac{\mu_{IV}}{kT}} \quad (3.5)$$

Ara bant yapılı güneş piline ışık düşürüldüğünde  $E_{ph}$ , gelen fotonun enerjisi olmak üzere üç olasılık söz konusu olur(Bkz. Şekil 3.2);

1.  $E_H > E_{ph} > E_L$  ise, foton ara bant tarafından soğurulur ve bir elektron ara banttan iletkenlik bandına geçer
2.  $E_G > E_{ph} > E_H$  ise, foton ara bant tarafından soğurulur ve bir elektron valans banttan ara banda geçer
3.  $E_{ph} \gg E_G$  ise, foton ana bant tarafından soğurulur ve bir elektron valans banttan iletkenlik bandına geçer



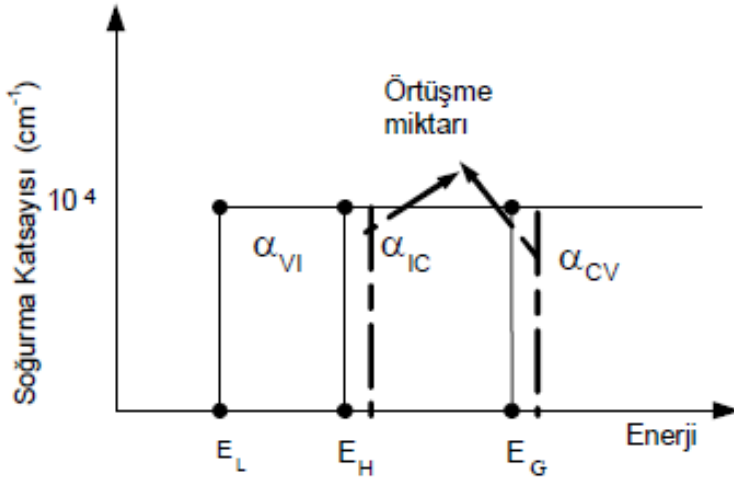
Şekil 3.2. Ara bant yapılı güneş pilinde foton soğurulması ve elektron hareketi [22]



Ara bant yapılı güneş pilinde var olan bu üç soğurma olayı için 3 farklı foton soğurma kat sayısı tanımlanmıştır;

1. Valans banttan iletkenlik bandına;  $\alpha_{CV}$
2. Valans banttan ara banda;  $\alpha_{IV}$
3. Ara banttan iletkenlik bandına;  $\alpha_{CI}$

Örtüşme, Şekil 3.3’de görüldüğü gibi tanımlanan üç soğurma kat sayısının kendi enerji aralığından farklı olarak diğer iki enerji aralığına ait fotonları soğurması ihtimalidir. 2 ve 3 numaralı kaynaklarda sunulan ideal modelde örtüşme olmadığı varsayılmıştır. Soğurma katsayıları, pratikte değişim gösterse de kolaylık sağlamak adına, katsayılar ilgili enerji aralığında sabit olarak alınır.



Şekil 3.3. Ara bant yapılı güneş pilinde örtüşmeli durumda soğurma kat sayıları [3,13]

### 3.2. Ara Bant Yapılı Güneş Piliin Detaylı Denge Modeli ile Analizi [3,4]

Ara bant yapılı güneş pili, detaylı denge modeli ile modellenirken öncelikle fotonların değişimleri incelenmiştir. Bir moddaki foton sayısı  $\nu$  olmak üzere, o mod içerisinde ışın ilerledikçe foton sayısının mesafe ile değişimi [4]

$$\frac{d\nu}{d\zeta} = \alpha_{CV}(\nu_{CV} - \nu) + \alpha_{CI}(\nu_{CI} - \nu) + \alpha_{IV}(\nu_{IV} - \nu) \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilmiştir.  $\nu_{CV}$ ,  $\nu_{CI}$ ,  $\nu_{IV}$  sırasıyla iletkenlik bandından valans bandına, iletkenlik bandından ara banda ve ara banttan valans banda elektron geçişlerin sebep olduğu

ışımalar için Bose-Einstein faktörü olup aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$u_{XY} = \frac{1}{\exp\left(\varepsilon - \frac{\mu_{XY}}{kT}\right) - 1} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.6'de ilk terim, iletkenlik bandı ve valans bant arasındaki elektron geçişlerinden kaynaklanan soğurmayı ve emisyonu temsil etmektedir. Kalan terimler ise, sırası ile iletkenlik bandı ile ara bant ve valans bandı ile ara bant arasındaki geçişleri temsil etmektedir.

Eşitlik 3.6,  $v_{CV}$ ,  $v_{CI}$ ,  $v_{IV}$ 'nin sabit olduğu düşünülerek çözülmüş ve bir yol üzerindeki foton sayısının değişimi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [4].

$$v(\zeta) = \frac{\alpha_{CV}v_{CV} + \alpha_{CI}v_{CI} + \alpha_{IV}v_{IV}}{\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV}} \{1 - \exp[-(\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV})\zeta]\} \\ + v(0)\exp[-(\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV})\zeta] \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte, ilk terim ara bant yapılı yarı iletken tarafından üretilen fotonları, ikinci terim ise güneşten gelen fotonları temsil eder. Formülden anlaşılacağı gibi mesafe( $\zeta$ ) arttıkça fotonların soğurulması azalır ancak foton üretimi devam eder. Yarı iletken malzemede fotonların soğurulması elektron ve boşluk konsantrasyonlarında değişikliğe sebep olur. İletkenlik bandındaki serbest taşıyıcılar(elektronlar) için bu değişim [4];

$$\delta_n = \frac{2}{(2\pi)^3} \int [\alpha_{CV}(v - v_{CV}) + \alpha_{CI}(v - v_{CI})] \frac{c}{n_r} \delta t \sin\theta k^2 dk d\phi d\theta \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu eşitlikte iletkenlik bandının diğer iki banttan soğurma ile aldığı ve diğer iki banda emisyon ile verdiği elektronlar hesaba katılmıştır.  $2/(2\pi)^3$  kat sayısı,  $k$  uzayındaki foton mod yoğunluğudur.  $c$ ,  $n_r$  ve  $\delta t$  sırasıyla ışık hızını, ara bant yapılı yarı iletkenin kırılma indisini ve küçük bir zaman aralığını temsil etmektedir. İntegral,  $k$  uzayında alınmaktadır ve hacim elementi küresel koordinatlar için  $\sin\theta k^2 dk d\phi d\theta$  olarak ifade edilmiştir.  $k$  ile dalga boyu,  $\lambda$ , arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir;

$$k = \frac{2\pi n_r}{\lambda} \quad (3.10)$$

Eş. 2.1'de verilen foton enerjisi bağıntısı Eş. 3.10'de kullanılarak yeniden düzenleme yapılırsa;

$$\varepsilon = \frac{hck}{2\pi n_r} \quad (3.11)$$

$$k = \frac{\varepsilon 2\pi n_r}{hc} \quad (3.12)$$

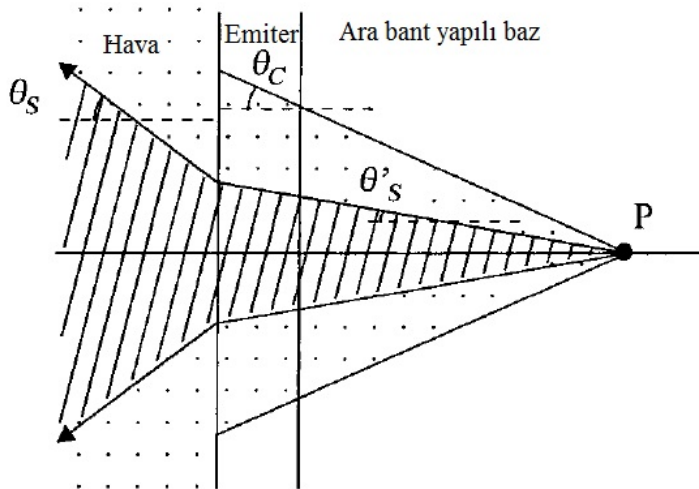
enerji ile k arasındaki bağlantı Eş. 3.9'de yerine konulursa

$$\frac{\delta n}{\delta t} = \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int [\alpha_{CV}(v - v_{CV}) + \alpha_{CI}(v - v_{CI})] \varepsilon^2 d\varepsilon \sin\theta d\theta d\varphi \quad (3.13)$$

elde edilir. Eşitlik üzerinde yeniden  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$  olmak üzere düzenleme yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilir [13]:

$$\frac{\delta n}{\delta t} = \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{\varepsilon, \Omega} [-(\alpha_{CV}v_{CV} + \alpha_{CI}v_{CI}) + v(\alpha_{CV} + \alpha_{CI})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \quad (3.14)$$

Şekil 3.4'de ara bant yapılı güneş piline gelen veya ara bant yapılı güneş pilinden emisyon ile ayrılan ışınlar için açılar verilmiştir. Herhangi bir P noktası için elektron konsantrasyon değişimini bulmak için Eş. 3.14'de kullanılacak integral sınırlarını belirlemek gerekir.



Şekil 3.4. Ara bat yapılı güneş pilinde ışınların soğurma ve emisyon açıları [4]

Eşitlik 3.14’de ilk olarak  $v_{CV}$  ve  $v_{CI}$  terimleri ele alınır. Bu terimler ışımali foton emisyonuna karşılık gelmektedir ve fotonlar izotropik olarak yayıldığı için açısal integraller tüm yönlerde alınmalıdır. Ara bant yapılı güneş piline dışarıdaki bir kaynaktan gelen ve sayıları  $v(0)$  olan fotonlar pilin yüzeyine  $\theta_s$  açısı ile gelirler(Bkz. Şekil 3.4). Bu fotonlar emiterde kırılmaya uğradıktan sonra ara bant yapılı baz bölgesine  $\theta'_s$  açısıyla ulaşırlar.  $\theta'_s$  açısı Snell yasası kullanılarak Eş. 3.15’de hesaplanır. Eş. 3.14’de parantez içerisindeki  $v$  terimi foton soğurulmasına karşılık gelmektedir. Dışarıdaki bir kaynaktan gelen fotonlar için integral sınırları Şekil 3.4’de görülen taralı alandır.

$$\theta'_s = \arcsin[\sin(\theta_s)/n_r] \quad (3.15)$$

Taralı alanın dışında kalan noktali alanlar ise ortamın sıcaklığıyla oluşan termal fotonları temsil etmektedir. Noktali alan,  $\theta_c = \arcsin(1/n_r)$  açısıyla belirtilir. Bu fotonların dışarıdaki bir kaynakla ilgileri olmadığı için  $v(0) = 0$  olup integral noktali bölgeler için alınır. Son olarak yarı iletkenin içerisinde ve arka metal kontaklardan yansıyıp gelen fotonlar için integral taralı ve noktali alan dışındaki diğer bölgelerde alınmalıdır.

İntegral sınırları belirlendikten sonra Eş. 3.8 ile 3.14 kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta n}{\delta t} = & \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{izotropik} [(\alpha_{CV} + \alpha_{CI}) \frac{\alpha_{CV}v_{CV} + \alpha_{CI}v_{CI} + \alpha_{IV}v_{IV}}{\alpha_{TOT}} \\ & - (\alpha_{CV}v_{CV} + \alpha_{CI}v_{CI})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \quad (3.16) \\ & + \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{taralialan} [(\alpha_{CV} + \alpha_{CI})v(0)\exp(-\frac{\alpha_{TOT}x}{\cos\theta})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \\ & - \frac{2n_r^2}{h^3 c^2} \int_{nktlialan} [(\alpha_{CV} + \alpha_{CI}) \frac{\alpha_{CV}v_{CV} + \alpha_{CI}v_{CI} + \alpha_{IV}v_{IV}}{\alpha_{TOT}} \\ & \times \exp(-\frac{\alpha_{TOT}x}{\cos\theta})] \varepsilon^2 d\varepsilon d\Omega \\ & + \frac{\delta n}{\delta t} (\text{ışımatsızSRH}) + \frac{\delta n}{\delta t} (\text{Auger üre/rek}) \end{aligned}$$

Yukarıdaki denklemde,  $\alpha_{TOT}$ ;

$$\alpha_{TOT} = (\alpha_{CV} + \alpha_{CI} + \alpha_{IV}) \quad (3.17)$$

Eş 3.16'de ilk integral, bir enerji bandı çifti arasındaki elektron hareketinden dolayı ortaya çıkan fotonların başka bir enerji bandı çifti tarafından soğurulmasını ifade eden dâhili rekombinasyonu temsil etmektedir. Dâhili rekombinasyon, ara banda sahip olmayan güneş pillerinde sıfırdır. Ayrıca ara bant yapılı güneş pillerinde soğurma kat sayıları arasında örtüşme yoksa dâhili rekombinasyon yine sıfır olmaktadır.

İkinci ve üçüncü integraller sırası ile dışarıdan gelen fotonların soğurulmasını ve ışımalı rekombinasyonları temsil etmektedir. Son olarak ışımsız rekombinasyon ve Auger üretimi ve rekombinasyonu eşitliklere dâhil edilmiştir [13].

İletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonu ifadesi elde edildikten sonra aynı yollar valans bandındaki boşluk konsantrasyonu için izlenir ve elektron ve boşluklar için aşağıdaki süreklilik denklemleri kullanılarak akım yoğunlukları hesaplanır:

$$\frac{\nabla J_e}{e} = \frac{\delta n}{\delta t} \quad (3.18)$$

$$\frac{\nabla J_h}{e} = \frac{\delta p}{\delta t} \quad (3.19)$$

Ara bant yapılı güneş pilleri detaylı denge modeli ile modellenirken;

- i) Taşıyıcı mobilitelerinin sonsuz olduğu
  - ii) Işımalı rekombinasyonun baskın olduğu
  - iii) Baz bölgesinin soğurmayı sağlayacak kadar kalın olduğu
  - iv) Ara banttan akım çıkışı olmadığı
  - v) Kuasi-Fermi seviyelerinin baz bölgesi boyunca değişmediği
  - vi) Güneşin, 6000K'de siyah cisim ışıması yapan bir kaynak olduğu
- varsayımları yapılır. Baz bölgesi boyunca taşıyıcı konsantrasyonunun değişmediği kabul edilir. Elektron ve boşluklar için akım yoğunlukları sırasıyla;

$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} - J_{int,e} - J_{nonrad,e} + J_{Auggen,e} - J_{Augrec,e} + J_p(0) + J_n(w) \quad (3.20)$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} - J_{int,h} - J_{nonrad,h} + J_{Auggen,h} - J_{Augrec,h} + J_p(0) + J_n(w) \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitliklerde bulunan ifadeler açıklanacak olursa  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$  ifadeleri, ışıkla üretilen elektronlar ve boşluklar için fotoakım yoğunluklarıdır.  $J_{rad,e}$  ve  $J_{rad,h}$  sırasıyla elektron ve boşlukların ışımalı rekombinasyon akım

yoğunluklarıdır.  $J_{int,e}$  ve  $J_{int,h}$  dahili rekombinasyonların akım yoğunluklarını temsil ederken;  $J_{nonrad,e}$  ve  $J_{nonrad,h}$  ışımaz rekombinasyon akım yoğunluklarını ifade etmek için kullanılmıştır.  $J_{Auggen}$  ve  $J_{Augrec}$  ifadeleri Auger üretim ve rekombinasyon akım yoğunluklarını temsil ederler. Son ifadeler  $J_p(0)$  ve  $J_n(w)$  ise, p ve n emiter bölgelerinin akım yoğunluklarıdır. Bu terimler sırayla detaylı olarak açıklanacaktır.

*Fotoakımlar:* Fotoakım güneş pilinin üzerine ışık düşürüldüğünde fotonların soğurulmasıyla oluşan serbest taşıyıcıların oluşturduğu akımdır. Aynı zamanda pilin kısa devre akımında etkilidir. Ara bant yapılı güneş pillerinde kısa devre akımı, elektron ve boşlukların fotoakımlarından hangisi küçük ise ona eşittir. Dolayısıyla fotoakımların bir birine yakın olmaları istenir. Dışarıdan gelen fotonların soğurulmasıyla oluşan elektron ve boşluk akım yoğunlukları Eş. 3.16'deki ikinci integral düzenlenerek:

$$J_{gen,e} = e \int_{\varepsilon} M_e F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.22)$$

$$J_{gen,h} = e \int_{\varepsilon} M_h F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.23)$$

elde edilir. Burada:

$$M_e = \frac{\alpha_{CV} + \alpha_{CI}}{\alpha_{TOT}} \quad (3.24)$$

$$M_h = \frac{\alpha_{CV} + \alpha_{IV}}{\alpha_{TOT}} \quad (3.25)$$

olarak tanımlanmıştır.  $F_{abs}$ , ara bant yapılı güneş pili tarafından soğurulan spektral foton akısını temsil etmektedir [13].

$$F_{abs} = X \frac{2\pi}{h^3 c^2} (1 - \sin^2 \theta_s) (1 - \exp(-\alpha_{TOT} 2w)) v(0) \quad (3.26)$$

Eş. 3.26'da  $X$  güneş ışığı konsantrasyonunu gösterirken,  $\theta_s$  pilin güneş ile arasındaki katı açığı temsil etmektedir.  $v(0)$  ise pilin ön yüzeyine gelen belirli bir enerji seviyesindeki foton sayısıdır. Eş. 3.7 kullanılarak aşağıdaki şekilde türetilmiştir:

$$v(0) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{kT_s}\right) - 1} \quad (3.27)$$

*Işımalı rekombinasyon akım yoğunlukları:* Bir elektron boşluk çiftinin foton açığa çıkararak yok olmasına ışmalı rekombinasyon denir. Ara bant yapılı güneş pillerinde ışmalı rekombinasyon akım yoğunluğu, Eş. 3.16'de üçüncü integral kullanılarak ifade edilir.

$$J_{rad,e} = e \int_{\varepsilon} M_e F_{emi} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.28)$$

$$J_{rad,h} = e \int_{\varepsilon} M_h F_{emi} \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.29)$$

Burada,  $F_{emi}$  Ara bant yapılı güneş pilinin yaydığı spektral foton akı miktarıdır [13]:

$$F_{emi} = \frac{2\pi}{h^3 c^2} (1 - \exp(-\alpha_{TOT} 2w)) \frac{A}{\alpha_{TOT}} \quad (3.30)$$

A ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$A = \alpha_{CV} v_{CV} + \alpha_{CI} v_{CI} + \alpha_{IV} v_{IV} \quad (3.31)$$

*Dâhili rekombinasyon akım yoğunlukları:* Dâhili rekombinasyon akım yoğunlukları, Eş. 3.16'deki ilk integral kullanılarak türetilmiştir:

$$J_{int,e} = \frac{e8\pi}{h^3 c^2} w \int \frac{\alpha_{CV} \alpha_{IV}}{\alpha_{TOT}} (v_{CV} - v_{IV}) + \frac{\alpha_{CI} \alpha_{IV}}{\alpha_{TOT}} (v_{CI} - v_{IV}) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.32)$$

$$J_{int,h} = \frac{e8\pi}{h^3 c^2} w \int \frac{\alpha_{CV} \alpha_{CI}}{\alpha_{TOT}} (v_{CV} - v_{CI}) + \frac{\alpha_{CI} \alpha_{IV}}{\alpha_{TOT}} (v_{IV} - v_{CI}) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.33)$$

Ara bant yapılı güneş pillerinde sadece soğurma katsayıları arasında örtüşme olduğu durumda etkili olan dahili rekombinasyon Eş. 3.32 ve 3.33'de görüldüğü gibi baz kalınlığıyla doğru orantılıdır.

*Işımasız rekombinasyon akım yoğunlukları:* Bir elektron-boşluk çiftinin iletkenlik bandından ara banda, ara banttan valans banda veya iletkenlik bandından valans bandına

geçiş ile yok olurken foton açığa çıkarmamasına ışımsız rekombinasyon denir.  $J_{nonrad,e}$  ve  $J_{nonrad,h}$  sırası ile elektronların ve boşlukların ışımsız akım yoğunluklarını temsil etmekte olup Eş. 3.16'de bulunan  $\delta_n/\delta_t(nonrad)$  terimleri kullanılarak hesaplanır [4].

$$\frac{\delta_n}{\delta_t}(nonrad) = -\frac{n-n_{eq}}{\tau_c} = -\frac{\Delta n}{\tau_c} \quad (3.34)$$

$$\frac{\delta_p}{\delta_t}(nonrad) = -\frac{p-p_{eq}}{\tau_v} = -\frac{\Delta p}{\tau_v} \quad (3.35)$$

$\tau_c$  ve  $\tau_v$  elektron ve boşlukların ömür süreleri olmak üzere ışımsız rekombinasyon akım yoğunlukları:

$$J_{nonrad,e} = e \frac{n_{eq}W}{\tau_c} \exp(\mu_{CI}/kT_c) \quad (3.36)$$

$$J_{nonrad,h} = e \frac{p_{eq}W}{\tau_v} \exp(\mu_{IV}/kT_c) \quad (3.37)$$

şeklinde ifade edilirler.

*Auger üretimi ve rekombinasyonu akım yoğunlukları:* Auger üretimi, yüksek enerjili fotonlar ile iletkenlik bandında üretilen sıcak elektronların impact iyonizasyon ile yeni elektron-boşluk çifti oluşturarak yeni taşıyıcılar üretilmesine denir. Soğurulan fotonun enerjisi,  $E_G+E_L < h\nu < E_G+E_H$  aralığında ise, foton soğurulduğunda, elektronlar valans banttan iletkenlik bandına geçtikten sonra fazlalık enerjileriyle valans banttan ara banda bir elektron geçirerek akıma ekstra katkıda bulunmuş olur. Fotonun enerjisi,  $E_G+E_H < h\nu < 2E_G$  için, valans bant ile iletkenlik bandı ve ara bant ile iletkenlik bandı arasında elektronların geçişine; foton enerjisi  $2E_G < h\nu$  için, valans bant ile iletkenlik bandı arasında iki defa elektron geçişine sebep olurlar. Auger üretimi için akım yoğunlukları aşağıdaki gibi verilmiştir [13].

$$J_{auggen,e} = e \sum_{i=1}^{m_{max}} \left[ \sigma^i \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{CIA}}{\alpha_{TOT}} F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \right] \quad (3.38)$$

$$J_{auggen,h} = e \sum_{i=1}^{m_{max}} \left[ \sigma^i \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{IVA}}{\alpha_{TOT}} F_{abs} \varepsilon^2 d\varepsilon \right] \quad (3.39)$$



Bu eşitliklerde  $\sigma$ , çoğullama olasılığı olup ara bant yapılı güneş pilinde baz bölgesi boyunca 1 olduğu varsayılmıştır.  $m_{max}$  ise, bir fotonun soğurulmasıyla üretilen maksimum elektron sayısıdır. Auger üretiminin ters mekanizması olan Auger rekombinasyonu için akım yoğunlukları elektron ve boşluklar için sırayla;

$$J_{augrec,e} = e \sum_{m=1}^{+\infty} \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{CIA}}{\alpha_{TOT}} (\sum_{i=1}^m \sigma^i) F_{emi}(v_{CI}^m + v_{CV}^m) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.40)$$

$$J_{augrec,h} = e \sum_{m=1}^{+\infty} \int \frac{\alpha_{CVA} + \alpha_{IVA}}{\alpha_{TOT}} (\sum_{i=1}^m \sigma^i) F_{emi}(v_{IV}^m + v_{CV}^m) \varepsilon^2 d\varepsilon \quad (3.41)$$

şeklindedir.

*Detaylı denge verim hesabı:* Ara bant yapılı güneş pillinde, akım yoğunluğu-gerilim karakteristiğinin elde edilebilmesi için  $J_e$  ve  $J_h$  akım yoğunluklarının birbirine eşitlenmesi gerekmektedir. Çıkış gerilimi, Eş. 3.1’de belirtildiği üzere Kuasi-fermi seviyelerinin ayrılma miktarlarının toplamı kadardır. Son olarak verim,  $\eta$ , klasik güneş pillerinde olduğu gibi aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_m V_m}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (3.42)$$

### 3.3. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Doluluk Oranı

Ara bant yapılı güneş pilleri detaylı denge modeli ile modellenirken ara bandın doluluk oranı 0,5 olarak alınır yani ara bant enerji seviyesi elektron bakımından yarı dolu kabul edilir. Böylece valans bant ile ara bant arasında ve ara bant ile iletkenlik bandı arasında elektron alışverişinin daha kolay yapıldığı kabul edilir. Ancak daha gerçekçi verim hesabı yapabilmek için doluluk oranı etkisinin de incelenmesi gerekmektedir. A. Luque ve arkadaşları ara bant yapılı güneş pillerinde doluluk oranının pile etkisini aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır [26].

$$\alpha_{IV} = \alpha_{IV0}(1 - f) \quad (3.43)$$

$$\alpha_{CI} = \alpha_{CI0}f \quad (3.44)$$

Bu eşitliklerde,  $f$  doluluk oranını temsil eder ve  $\alpha_{IV0}$  ve  $\alpha_{CI0}$  sırasıyla ara bant tamamen boş olduğu durumda valans banttan ara banda ve ara bant tamamen dolu olduğu durumda ara banttan iletkenlik bandına geçişler için tanımlanan soğurma katsayılarıdır. Ara bandın doluluk oranı,  $f$ , iletkenlik bandı ile ara bant arasındaki net elektron transferi ile valans bant ile ara bant arasındaki net elektron transferi eşitlenerek hesaplanır [26].

$$G \equiv g_{CI} - r_{CI} = g_{IV} - r_{IV} \quad (3.45)$$

Burada  $g_{CI}$  ve  $r_{CI}$  sırası ile iletkenlik bandı ile ara bant arasında birim hacimdeki elektron üretim ve rekombinasyon hızlarını temsil ederken,  $g_{IV}$  ve  $r_{IV}$  valans bant ile ara bant arasında birim hacimdeki elektron üretim ve rekombinasyon hızlarını temsil etmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [27];

$$g_{CI} = e_e N_I f + g_{CI}^L \quad (3.46)$$

$$r_{CI} = \sigma_n N_I (1 - f) V_{Th} n \quad (3.47)$$

$$g_{VI} = e_h N_I (1 - f) + g_{IV}^L \quad (3.48)$$

$$r_{CI} = \sigma_p N_I f V_{Th} p \quad (3.49)$$

Yukarıdaki ifadeler ve  $g_{CI}^L = \gamma_{CI} N_I f V_{Th}$  ile  $g_{IV}^L = \gamma_{IV} N_I (1 - f) V_{Th}$  bağıntıları kullanılarak Eş. 3.45'de verilen eşitlik yeniden düzenlendiğinde doluluk oranı ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmiştir [27];

$$f = \frac{\sigma_n n + \sigma_p p_t + \gamma_{IV}}{\sigma_n (n + n_t) + \sigma_p (p + p_t) + \gamma_{IV} + \gamma_{CI}} \quad (3.50)$$

Burada  $\sigma_n$  ve  $\sigma_p$  taşıyıcılar için yakalama kesit alanlarını,  $\gamma_{IV}$  ve  $\gamma_{CI}$  sırası ile iletkenlik bandından ara banda ve ara banttan iletkenlik bandına üretim katsayılarını ifade etmektedir.  $n$  ve  $p$  taşıyıcı konsantrasyonlarıdır ve son olarak  $n_t$  ve  $p_t$ , ara bandın enerji seviyesine bağlı olup aşağıdaki denklemlerden hesaplanırlar.

$$n_t = n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \quad (3.51)$$

$$p_t = n_i^2 / n_t \quad (3.52)$$

Bu eşitliklerde  $n_i$  saf taşıyıcı konsantrasyonunu,  $E_t$  ara bandın enerji seviyesini ve  $E_i$  saf durumda enerji seviyesini temsil etmektedir.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada detaylı denge modeli kullanılarak ara bant yapılı güneş pillerinin verimleri incelenmiş ve sonuçlar klasik güneş pillerinin verimleri ile karşılaştırılmıştır. Ara bant yapılı güneş pilinin performansına, kalınlığın, soğurma katsayılarının ve ara bant enerji seviyesinin etkileri incelenmiştir. Örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlarda ara bant enerji seviyesinin doluluk oranının verime etkisi, doluluk oranıyla ara bant seviyesinin değişimi incelenmiş ve maksimum verim için doluluk oranı değerleri bulunmuştur [28].

Ara bant yapılı güneş pili detaylı denge ile modellenirken çeşitli varsayımlar yapılmaktadır. Bu çalışmada, detaylı denge modelinde, ara bant yapılı güneş pilinde sadece fotoakımların ve ışımali rekombinasyonların etkili olduğu kabul edilmiştir. Eş. 3.20 ve Eş. 3.21’de bulunan emiter akım yoğunlukları, ışımaz rekombinasyon akım yoğunlukları ve Auger üretim ve rekombinasyonlardan kaynaklanan akım yoğunlukları sıfır kabul edilmiştir. Böylece eşitlikler soğurma kat sayıları arasında örtüşmenin olmadığı durumlarda;

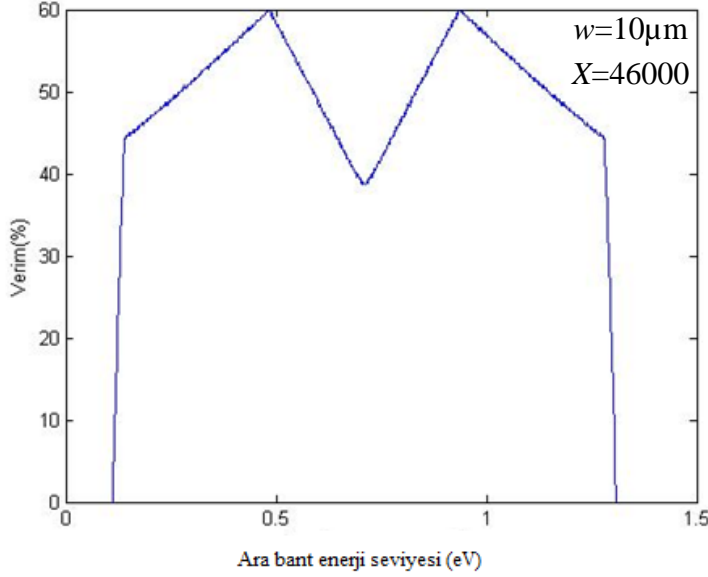
$$J_e = J_{gen,e} - J_{rad,e} \quad (4.1)$$

$$J_h = J_{gen,h} - J_{rad,h} \quad (4.2)$$

şekline indirgenir. Soğurma katsayıları arasında örtüşme olması durumunda ise dâhili rekombinasyon akım yoğunlukları,  $J_{int,e}$  ve  $J_{int,h}$ , da eşitliklere dâhil edilmiştir. Ayrıca, ara banttan akım çıkışı olmadığı, baz bölgesinin kalınlığının soğurmayı sağlayacak kadar kalın olduğu ve Kuasi-Fermi seviyelerinin ara bant yapılı baz bölgesi boyunca değişmediği varsayımları yapılmıştır.

Aksi belirtilmedikçe pilin maksimum ışık konsantrasyonunda ( $X=46000$ ) çalıştığı kabul edilmiştir. GaAs yarı iletken malzemesinden oluşan, bir ara bant yapılı güneş pili üzerine yapılan bu çalışmada enerji bant aralığı  $E_G=1,42\text{eV}$  ve pil sıcaklığı 300K olarak kabul edilmiştir. 3.1’de tanımlanan üç soğurma katsayısı  $10^{-6}\text{m}^{-1}$  alınmıştır. Güneşin siyah cisim ışımaya yapan bir kaynak olduğu varsayılmış ve güneş sıcaklığı 6000K olarak hesaplamalara dâhil edilmiştir.

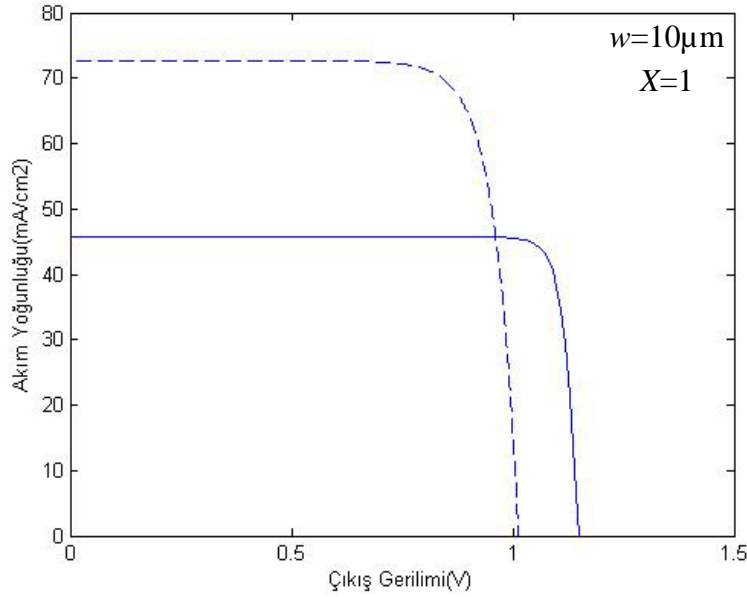
T.S. Navruz, ara bant yapılı güneş pillerinde ara bant enerji seviyesinin güneş pili verimine etkisini incelemiştir;  $E_G=1,95\text{eV}$  ve  $E_G=1,12\text{eV}$  için optimum ara bant enerji seviyelerini bulmuştur [3,13]. Bu çalışmada, enerji bant aralığı  $E_G=1,42\text{eV}$  olan malzemede, verimin ara bant enerji seviyesine göre değişimi incelenmiş ve Şekil 4.1'deki gibi bulunmuştur. Bu şekil, T.S. Navruz'un  $E_G=1,95\text{eV}$  ve  $E_G=1,12\text{eV}$  için bulduğu verim-ara bant enerji seviyesi profiline benzemektedir. Şekil 4.1'de, verimin maksimum olduğu 2 nokta görülmektedir. Bu iki noktada verim %59,93 olarak tespit edilmiştir. Optimum ara bant seviyelerinin  $E_G$ 'nin  $1/3$  ve  $2/3$ 'ü kadar olduğu ve değerlerinin sırası ile  $E_t=0,4856\text{eV}$  ve  $E_t=0,9344\text{eV}$  olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ara bant enerji seviyesi  $E_G/2$  iken verimin minimum olduğu görülmüştür. Literatürle uyumlu olan bu sonuçlar daha sonraki kısımlarda kullanılacaktır.



Şekil 4.1. GaAs ara bant yapılı güneş pili verim – ara bant enerji seviyesi değişimi

#### 4.1. Klasik Tek Eklemlerli Güneş Pili ile Ara Bant Yapılı Güneş Pili Karşılaştırılması

Bu kısımda, enerji bant aralığı,  $E_G=1,42\text{eV}$  olan tek eklemlerli güneş pili ile ara bant yapılı güneş pili detaylı denge modeli ile modellenerek normal ışık yoğunluğu altında ( $X=1$ ), incelenmiş ve J-V karakteristik eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.2'deki J-V karakteristik eğrilerine bakıldığında, ara bant yapılı güneş pilinin tek eklemlerli güneş piline göre açık devre geriliminde bir miktar düşme olduğu, ara bant yapısından dolayı düşük enerjili fotonları soğurarak kısa devre akımında önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede verimde de artış sağlanmıştır.



Şekil 4.2. Tek eklemli güneş pili(düz çizgi) ile ara bant yapılı güneş pilinin(kesikli çizgi) karşılaştırılması

Her iki pil için hesaplanan verim değerleri( $\eta$ ), açık devre gerilimleri( $V_{OC}$ ), Kısa devre akımları( $J_{SC}$ ) ve doluluk faktörleri( $FF$ ) Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1.  $E_G=1,42\text{eV}$  için tek eklemli ve ara bant yapılı güneş pilinin karşılaştırılması

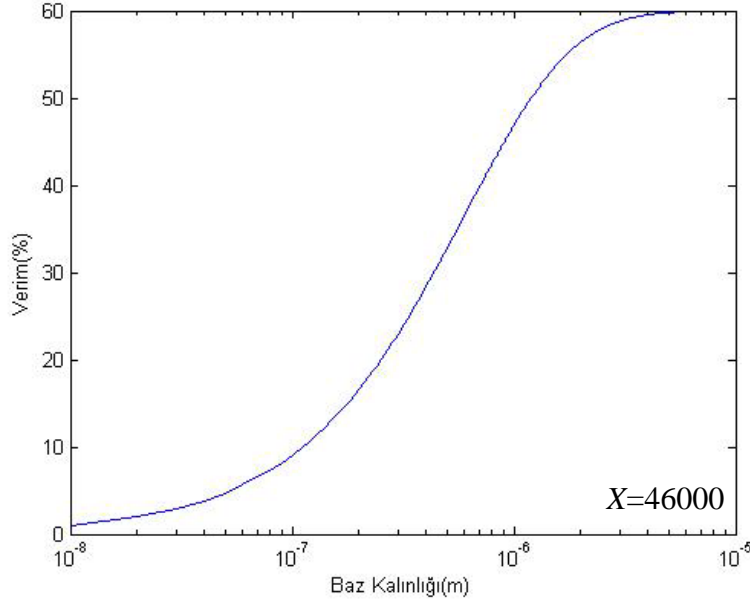
X=1 ve $aw=10$ için	Tek eklemli	Ara bant yapılı
$\eta(\%)$	29,66	37,3
$V_{oc}(V)$	1,14	1,01
$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	45,71	72,62
FF	0,89	0,80

## 4.2. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Malzeme Parametrelerinin Pil Verimi Üzerine Etkisi

Bu kısımda, baz kalınlığı, soğurma katsayıları ve ara bant enerji seviyesinin güneş pilinin verimine etkileri incelenmiştir. Baz kalınlığı ve soğurma katsayılarının etkileri incelenirken ara bant enerji seviyesi önceki bölümlerde örtüşmesiz durumda hesaplanan valans bandına yakın optimum ara bant seviyesine eşit olarak alınmıştır.

### 4.2.1. Ara bant yapılı güneş pilinde kalınlığın pil verimine etkisi

Soğurma kat sayıları sabit ve  $10^6\text{m}^{-1}$  olarak alınmış ve pilin kalınlığı 10nm - 10µm arasında değiştirilerek, kalınlığın verime etkisi incelenmiş ve Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Ara bant yapılı güneş pilinde baz bölgesi kalınlığı ile pil veriminin değişimi

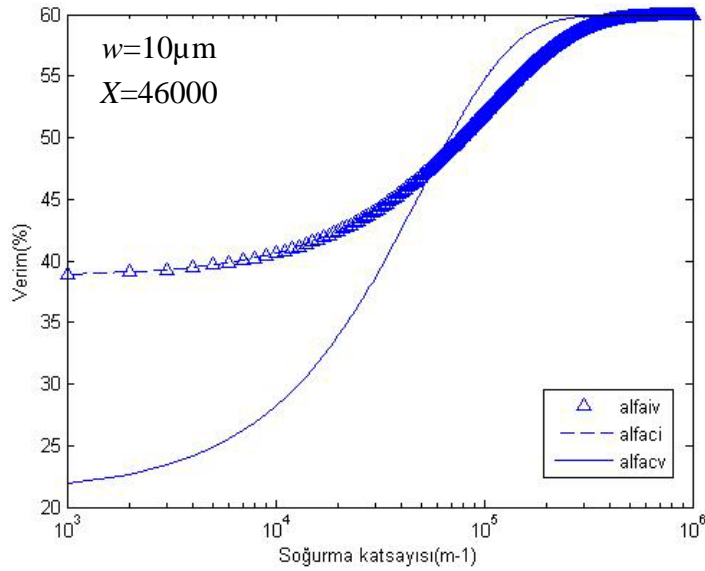
Güneş pillerinde soğurma oranı  $\alpha_w$  değeri ile değişmektedir. Eş. 3.26 incelenecek olursa ara bant yapılı güneş pilinde fotoakım  $\alpha_w$  ile üstel olarak değişmektedir. Literatür ile uyumlu bir şekilde  $\alpha_w \geq 5$  olduğunda tam soğurma gerçekleşmekte ve bütün fotonlar soğurulmaktadır. Aksi durumlarda ise, fotonlardan bazıları soğurulmadan pili geçip kaybolmaktadır. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi baz kalınlığı 5 $\mu$ m ve üzerinde iken pilden maksimum verim elde edilmektedir.

#### 4.2.2. Ara bant yapılı güneş pilinde soğurma kat sayılarının pil verimine etkisi

Soğurma katsayılarının pil verimine olan etkisini incelemek için ilk olarak ana bant soğurma katsayısı,  $\alpha_{CV}$ , sabit ve değeri 10<sup>6</sup>m<sup>-1</sup> olarak alınmış ve ara bant soğurma katsayılarının ( $\alpha_{CI}$ ,  $\alpha_{IV}$ ) verime etkileri sırayla incelenmiştir.  $\alpha_{CI}$  sabit ve 10<sup>6</sup>m<sup>-1</sup> alınıp  $\alpha_{IV}$ 'ye 10<sup>3</sup>m<sup>-1</sup> ile 10<sup>6</sup>m<sup>-1</sup> arasında değerler verilerek verim değerleri hesaplanmıştır. Aynı işlem  $\alpha_{IV}$  sabit alınıp,  $\alpha_{CI}$  değiştirilerek tekrarlanmıştır.  $\alpha_{CV}$ ,  $\alpha_{CI}$  ve  $\alpha_{IV}$  soğurma katsayıları ile pil veriminin değişimi, Şekil 4.4.'de verilmiştir. Verimin ara bant soğurma katsayıları ile değişim eğrileri çakışık olarak elde edilmiştir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi ara bant soğurma katsayılarından herhangi birinin düşük değerinde olması ara bantın etkisini kaybetmesine sebep olmuştur. Elde edilen verim(%38), ana bantın verimidir. Daha sonra ana bant soğurma katsayısının etkisini incelemek için  $\alpha_{CI}$  ve  $\alpha_{IV}$  10<sup>6</sup>m<sup>-1</sup> olmak üzere eşit alınmış ve  $\alpha_{CV}$ 'ye 10<sup>3</sup>m<sup>-1</sup> ile 10<sup>6</sup>m<sup>-1</sup> arasında değerler verilmiştir. Düşük  $\alpha_{CV}$  değerlerinde, ana bantın



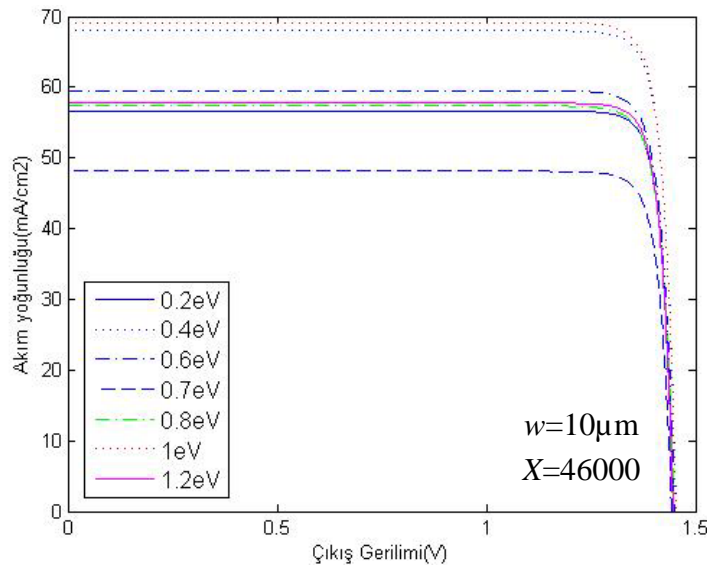
soğurma katsayısının pil verimini çok daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. Elde edilen bu verim (%22), ara bantın verimidir. Düşük soğurma katsayılarında elde edilen verimlerin toplamı ise ara yapılı güneş pilinin verim sınırını vermektedir.



Şekil 4.4. Ara bant yapılı güneş pilinde verimin soğurma katsayıları ile değişimi

#### 4.2.3. Ara bant enerji seviyesinin, ara bant yapılı güneş pili J-V karakteristiğine etkisi

Ara bant enerji seviyesinin verime etkisi daha önceki çalışmalarda incelenmiştir [13]. Ara bant yapılı güneş pilinin çalışmasının iyi anlaşılabilmesi için bu kısımda ara bant enerji seviyesinin J-V karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.5. Ara bant enerji seviyesinin pilin J-V karakteristik eğrisi üzerindeki etkisi

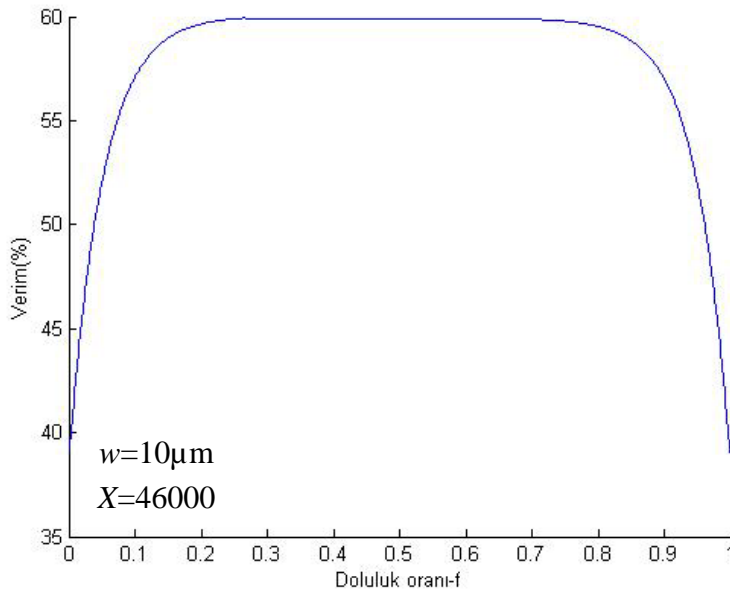
Şekil 4.5’de görüldüğü gibi farklı ara bant enerji seviyeleri için J-V eğrileri oluşturulmuştur. Ara bant yapılı güneş pilinde ara bant enerji seviyesinin verim üzerinde ki etkisinin daha çok kısa devre akımı üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Şekilde, maksimum akım yoğunluğuna sahip ara bant enerji seviyelerinin, pilin enerji bant aralığının 1/3 ve 2/3’ne yakın olan noktalarda olduğu görülmüştür. Ayrıca, ara bant enerji seviyesi bant aralığının yarısı kadar olduğunda, ara bantın akım yoğunluğuna katkısının çok düştüğü görülmüştür.

### 4.3. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Doluluk Oranın Pil Verimine Etkisi

Ara bant yapılı güneş pilinde doluluk oranının verime etkisini incelemek için Eş. 3.43 ve 3.44’de yer alan ifadeler kullanılmıştır.  $\alpha_{IV,0}$  ve  $\alpha_{CI,0}$  katsayıları  $10^6\text{m}^{-1}$  olarak alınmıştır.

#### 4.3.1. Örtüşmesiz durumda, ara bant yapılı güneş pilinde, doluluk oranının pil verimine etkisi

Soğurma katsayıları arasında örtüşme durumu 3.1’de detaylı olarak açıklanmıştır. Bu kısımda öncelikle soğurma katsayıları arasında örtüşmenin olmadığı durum için hesaplamalar yapılmıştır. Ara bant enerji seviyesi olarak optimum seviyelerden valans banda yakın olan  $E_t=0,4856$  eV, baz kalınlığı olarak  $10\mu\text{m}$  seçilmiş ve doluluk oranı değiştirilerek hesaplanan pil verimi eğrisi Şekil 4.6’da verilmiştir.

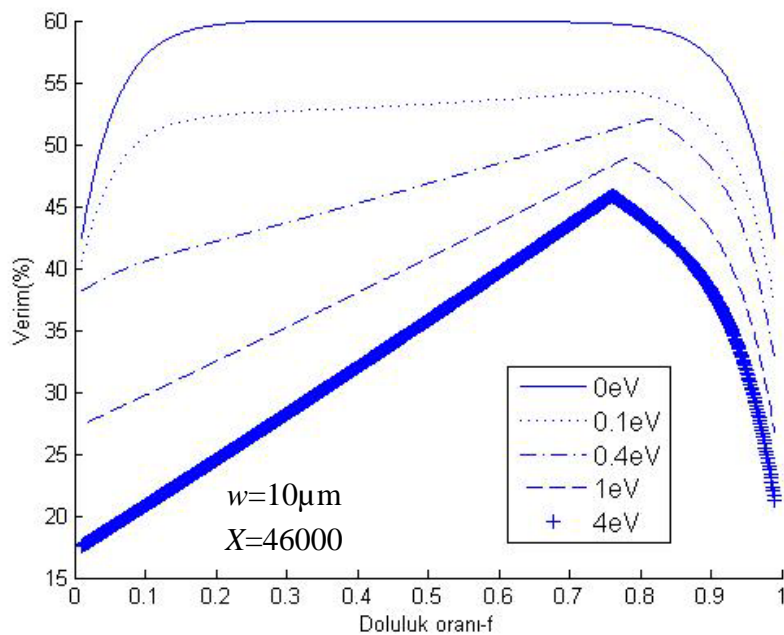


Şekil 4.6. Ara bant yapılı güneş pilinde, örtüşmesiz durumda doluluk oranı ile pil verimi değişimi

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi örtüşmesiz durumda, ara bandın elektron ve boşluk sayısı bakımından yarı dolu olması halinde, pil verimi maksimum olmaktadır. Bu değer, detaylı denge verim sınırı hesaplamalarında kullanılmaktadır [2,3,13]. Bu çalışmada doluluk oranının,  $0,2 < f < 0,8$  aralığında, değişiminin pil verimine çok fazla etki etmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, Eş. 3.43 ve 3.44'de görüldüğü gibi doluluk oranının değişimiyle ara bant soğurma katsayılarından biri artarken diğerinin azalmasıdır. Ancak, doluluk oranının, 0,2'nin altında veya 0,8'in üzerinde olması durumunda soğurma katsayılarından biri çok azaldığında soğurulan foton sayısını azaltarak verimi çok düşürmektedir. Kullanılan eşitlikler ve hesaplamalarda, doluluk oranının, 0 veya 1'e çok yakın değerler olan 0,001 ve 0,999 değerleri verilerek incelenmesi halinde, ara bandın etkisinin ortadan kalktığı ve pilin tek eklemli güneş pili davranışı sergilediği görülmüştür.

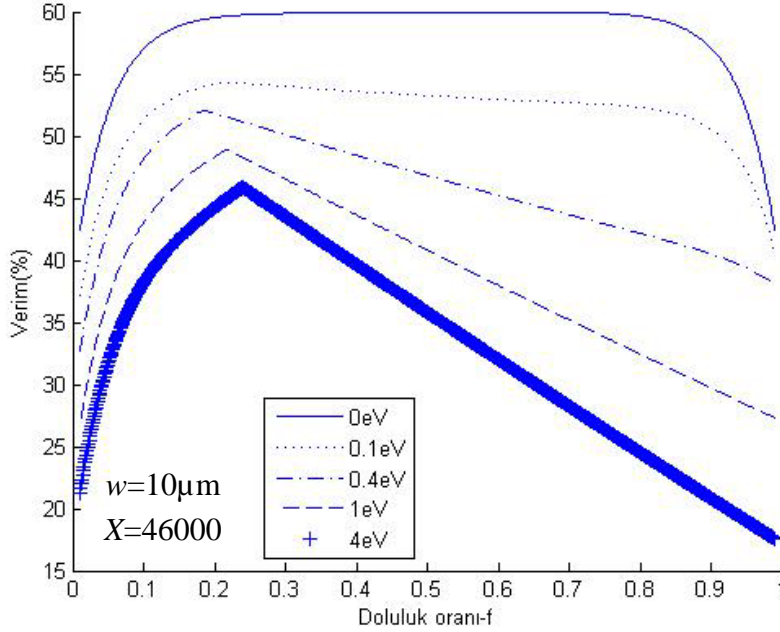
#### 4.3.2. Örtüşmeli durumda, ara bant yapılı güneş pilinde, doluluk oranının pil verimine etkisi

Doluluk oranının örtüşme olduğu durumlarda da verime etkisini incelemek için sırayla 0 eV, 0,1 eV, 0,4 eV, 1 eV ve 4 eV örtüşme olduğu durumlar için hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikle, örtüşmesiz durumda hesaplanan optimum ara bant enerji seviyeleri,  $E_t=0,4856$  eV ve  $E_t=0,9344$  eV, kullanılarak farklı örtüşme değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. Valans bandına yakın olan optimum ara bant enerji seviyesi,  $E_t=0,4856$  eV, için doluluk oranının pil verimine etkisi incelenmiş ve Şekil 4.7'deki gibi bulunmuştur.



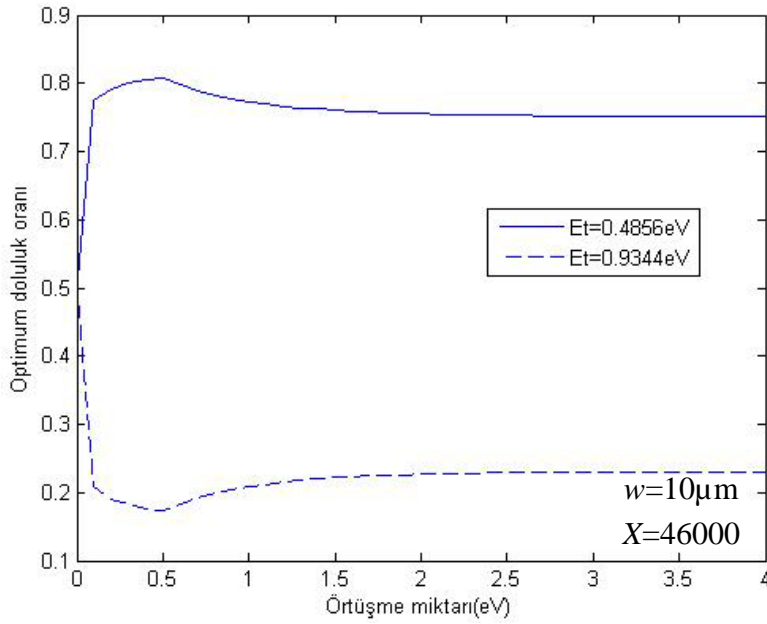
Şekil 4.7. Farklı örtüşme seviyeleri ve  $E_t=0,4856$  eV için pil verimi–doluluk oranı değişimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi örtüşme miktarına bağlı olarak pil veriminin doluluk oranı ile fazla değişime uğradığı gözlemlenmiştir. Örtüşmeli durumlarda optimum doluluk oranında(0,75 – 0,82 arasında) maksimum verim elde edilmiştir. Ayrıca örtüşme miktarı ile optimum doluluk oranının değiştiği gözlemlenmiştir. İletkenlik bandına yakın olan optimum ara bant enerji seviyesi,  $E_t=0,9344$  eV için de doluluk oranının pil verimine etkisi incelenmiş ve Şekil 4.8’deki gibi bulunmuştur. Şekil 4.7 ve 4.8 karşılaştırıldığında en yüksek verimlerin elde edildiği doluluk oranlarının  $f = \frac{1}{2}$  etrafında simetrik olduğu gözlemlenmiştir. 0,1 – 4 eV örtüşme değerlerinde  $E_t=0,4856$  eV için optimum doluluk oranı  $f \approx 0,8$ ; iken  $E_t=0,9344$  eV için optimum doluluk oranının olarak  $f \approx 0,2$  olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalarda olduğu gibi, soğurma katsayıları arasında örtüşme olması verimi düşürmektedir. Maksimum örtüşme durumunda, her iki optimum ara bant enerji seviyesi için maksimum verim %45 seviyelerinde bulunmuştur. Maksimum örtüşme durumunda, doluluk oranının çok düşük veya çok yüksek değerlerinde, verim %20 civarında inmektedir.



Şekil 4.8. Farklı örtüşme seviyeleri ve  $E_t=0,9344$  eV için pil verimi–doluluk oranı değişimi

İki farklı optimum ara bant enerji seviyeleri kullanılarak hesaplanan optimum  $f$  değerinin örtüşme miktarı ile değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu şekilde, başlangıç noktası olarak örtüşmesiz durumdaki doluluk oranı  $f = \frac{1}{2}$  olarak seçilmiş ve doluluk oranının örtüşme miktarı ile değişimi incelenmiştir.

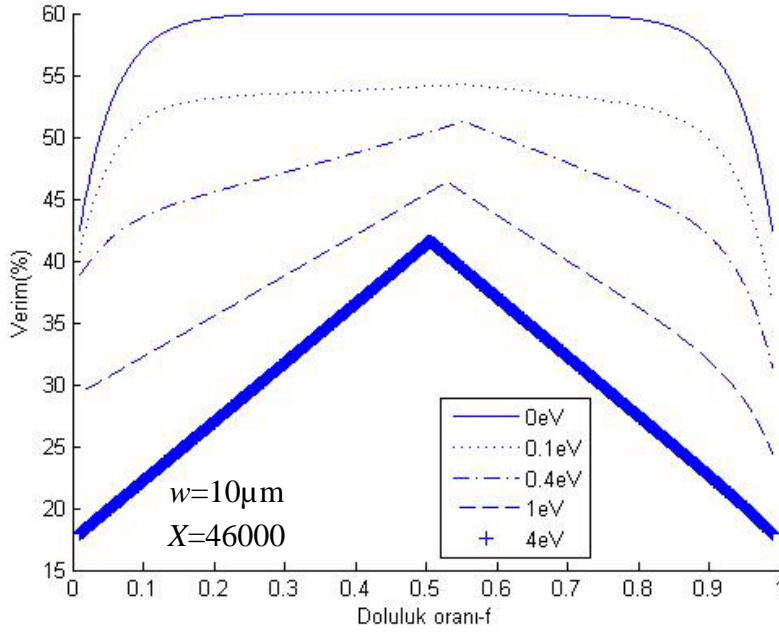


Şekil 4.9. İki optimum  $E_t$  değeri için optimum doluluk oranı - örtüşme miktarı değişimi

Ara bant yapılı güneş pillerinde soğurma katsayıları arasında örtüşme olması taşıyıcı üretim hızlarını etkilemektedir. Ara bant enerji seviyesi valans bandına yakın iken, örtüşme durumunda, boşlukların üretim hızı artarken elektronların üretim hızı azalmaktadır. Ara bant enerji seviyesi iletkenlik bandına yakın iken ise tam tersi durum meydana gelerek elektronların üretim hızı artarken boşlukların üretim hızı azalmaktadır. Bu sebeple örtüşme durumunda taşıyıcı üretim hızlarını eşitlemek için maksimum verimin elde edildiği ara bant doluluk oranı, ara bant enerji seviyesi, valans banda yakın iken  $\frac{1}{2}$ 'den yüksek, iletkenlik bandına yakın iken  $\frac{1}{2}$ 'den düşük olarak bulunmuştur.

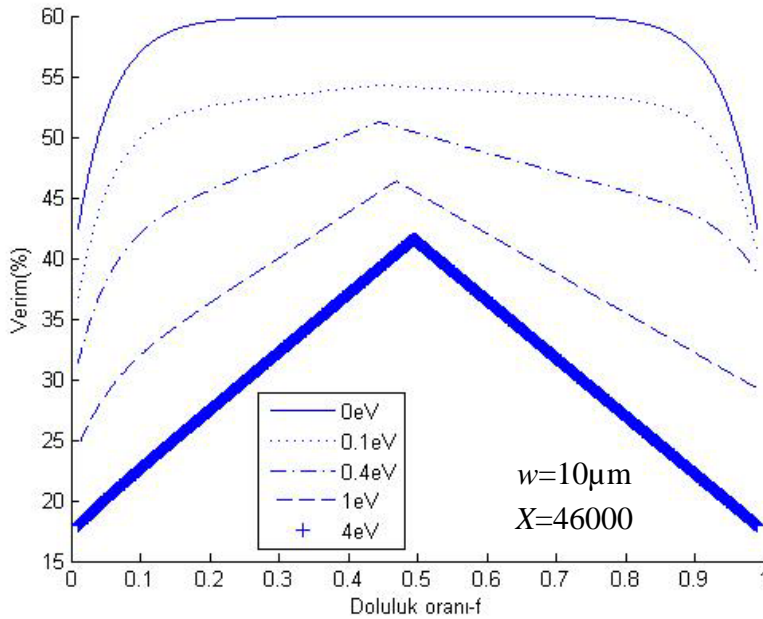
Örtüşme miktarının, ara bant enerji seviyesini değiştirdiği bilinmektedir [3]. Bu kısımda, farklı örtüşme değerleri için optimum ara bant enerji seviyeleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu optimum ara bant enerji seviyeleri kullanılarak, örtüşme miktarının, pil verimi - doluluk oranına etkisi incelenmiştir.

Farklı örtüşme miktarlarında, valans bandına yakın bulunan optimum ara bant enerji seviyeleri kullanılarak hesaplanan pil verimi - doluluk oranı değişimi Şekil 4.10'da görülmektedir. Burada dikkat çekici nokta, optimum ara bant enerji seviyeleri kullanılarak elde edilen verim -  $f$  değişiminde maksimum verimin elde edildiği doluluk oranlarının  $f=\frac{1}{2}$  civarında olduğudur.



Şekil 4.10. Farklı örtüşme seviyelerinde  $E_v$ 'ye yakın optimum ara bant seviyeleri alınarak elde edilen verim - doluluk oranı değişimi

Şekil 4.11'de ise, farklı örtüşme miktarlarında iletkenlik bandına yakın bulunan optimum ara bant enerji seviyeleri kullanılarak hesaplanan pil verimi - doluluk oranı değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, iletkenlik bandına yakın olan optimum ara bant seviyeleri kullanıldığında da optimum doluluk oranlarının  $\frac{1}{2}$  civarında olduğu tespit edilmiştir.

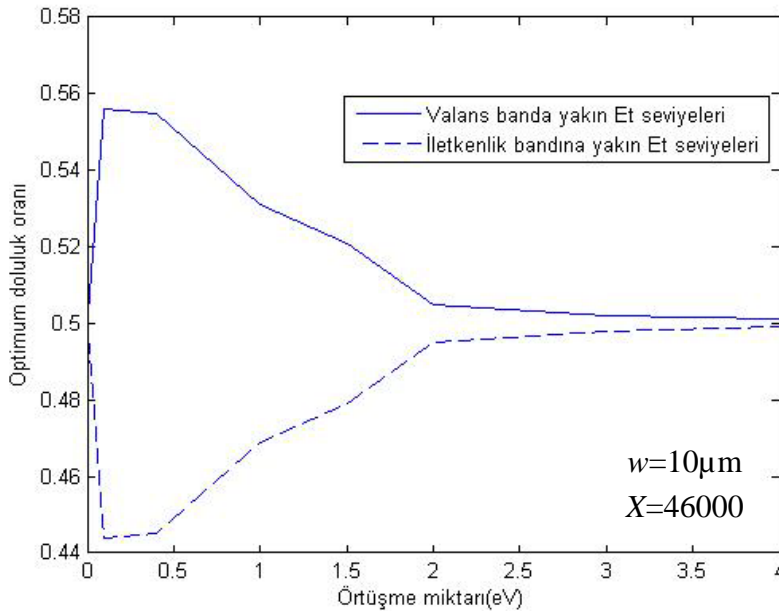


Şekil 4.11. Farklı örtüşme seviyelerinde  $E_c$ 'ye yakın optimum ara bant seviyeleri alınarak elde edilen verim - doluluk oranı değişimi

Şekil 4.10 ve 4.11 karşılaştırıldığında optimum doluluk oranlarının tıpkı Şekil 4.7 ve 4.8’de olduğu gibi  $f=0,5$  etrafında simetrik olduğu tespit edilmiştir. Buna ilave olarak  $f=0,5$  etrafında verimin, doluluk oranının 0,2-0,8 aralığında, lineer olarak azaldığı ve örtüşme miktarı arttıkça verimin de daha fazla düştüğü gözlemlenmiştir.

Optimum ara bant seviyeleri kullanıldığında maksimum örtüşme durumunda, maksimum verim %40 civarında tespit edilmiştir. Örtüşmeli durumda hesaplanan optimum ara bant enerji seviyeleri kullanıldığında, sabit ara bant seviyeli duruma göre maksimum verimde bir miktar azalma olduğu görülmüştür.

Şekil 4.12’de farklı örtüşme seviyeleri için hesaplanan optimum ara bant seviyeleri kullanılarak hesaplanan doluluk oranı – örtüşme miktarı değişimi verilmiştir. Başlangıç noktası olarak yine  $f=1/2$  seçilmiştir ve örtüşme miktarı arttıkça optimum doluluk oranının  $1/2$ ’ye yaklaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.9 ile 4.12 karşılaştırıldığında optimum doluluk oranı değişiminin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

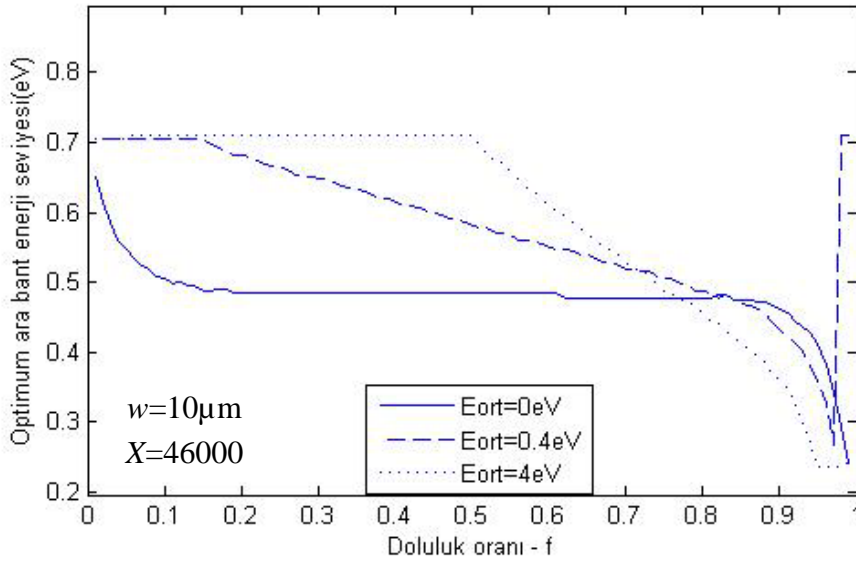


Şekil 4.12. Farklı örtüşme seviyeleri için optimum  $E_t$ 'ler alınarak elde edilen optimum doluluk oranı - örtüşme miktarı değişimi

### 4.3.3. Ara bant yapılu güneş pilinde, doluluk oranının optimum ara bant enerji seviyesine etkisi

Ara bant yapılu güneş pilinde doluluk oranının verime etkisi incelenirken ara bant seviyesi üzerindeki etkileri de incelenmelidir. Şekil 4.13’da doluluk oranı değişiminin, örtüşmesiz ve

örtüşmeli durumlarda valans banda yakın olan optimum ara bant enerji seviyesine etkisi verilmiştir. Örtüşmesiz durumda, doluluk oranıyla ara bant enerji seviyesinin değişimi verimde olduğu gibi, doluluk oranının çok büyük veya çok küçük olduğu durumlarda büyük değişimler göstermektedir. Örtüşme miktarı 0,4eV olduğu durumda ise, ara bant enerji seviyesi doluluk oranıyla doğrusal olarak düşmektedir. Örtüşme miktarı 4eV iken ara bant enerji seviyesi, doluluk oranı 0,5'e kadar sabit kalmış ancak doluluk oranı arttıkça ara bant enerji seviyesinde büyük bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13. Örtüşmesiz ve örtüşmeli durumlarda doluluk oranı ile optimum ara bant enerji seviyesinin değişimi

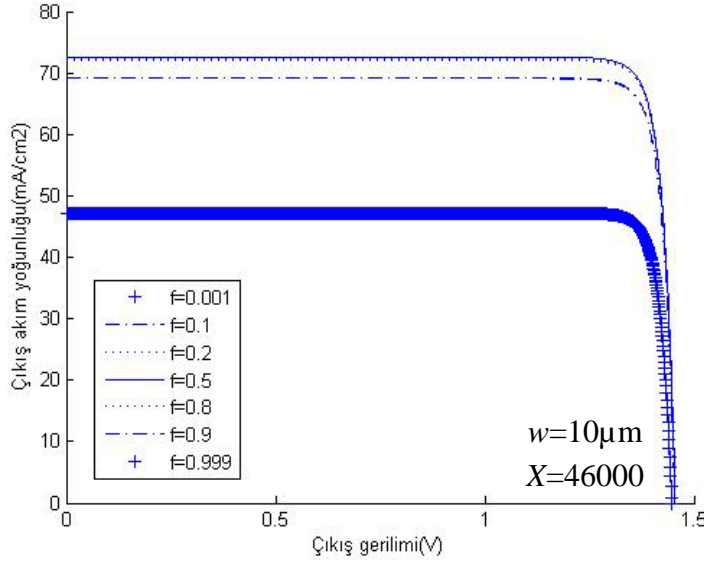
Şekil 4.13'de görülen optimum ara bant enerji seviyesinin doluluk oranıyla değişimi,  $J_{gen,e}$  ve  $J_{gen,h}$  ifadelerinde bulunan  $\alpha_{CI}$  ve  $\alpha_{IV}$  soğurma kat sayılarının doluluk oranı ile birbirlerinden çok farklı değerlere sahip olması nedeniyle üretim ifadelerinin de birbirlerinden çok farklı olmasına dayanmaktadır. Böylece, maksimum verimin elde edilmesi için üretim ifadelerinin eşitleneceği optimum ara bant enerji seviyesi değeri, doluluk oranıyla ve örtüşme miktarı ile farklı değerler almaktadır.

#### 4.3.4. Ara bant yapılı güneş pilinde, doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi

Doluluk oranının ve örtüşmenin, ara bant yapılı güneş pillerinin verimi üzerine etkilerinin daha iyi kavranabilmesi için, güneş pilinin J-V karakteristik eğrileri elde edildi. Örtüşmesiz durumda hesaplanan valans banda yakın optimum ara bant enerji seviyesi ( $E_t=0,4846\text{ eV}$ )

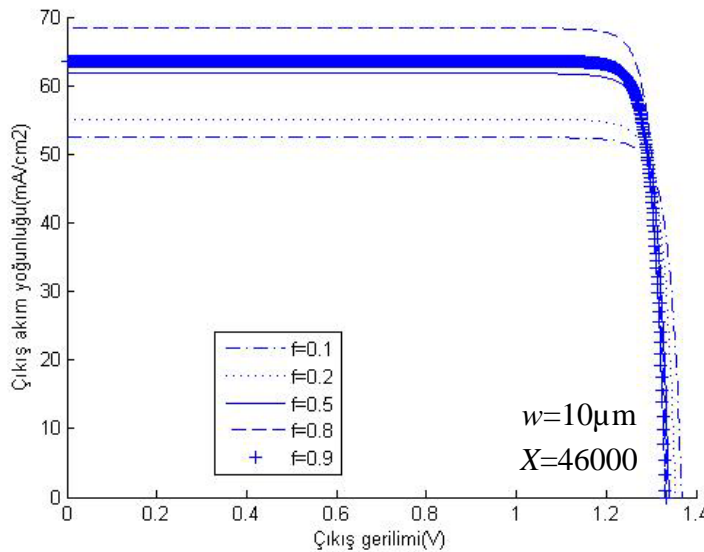


seçilerek örtüşmesiz durum, örtüşme miktarı 0,4 eV ve 4 eV olduğu durumlar için J-V eğrileri çizildi. Örtüşme olmadığı durumda doluluk oranının akım-gerilim karakteristik eğrisine etkisi Şekil 4.14’de sunulmuştur.



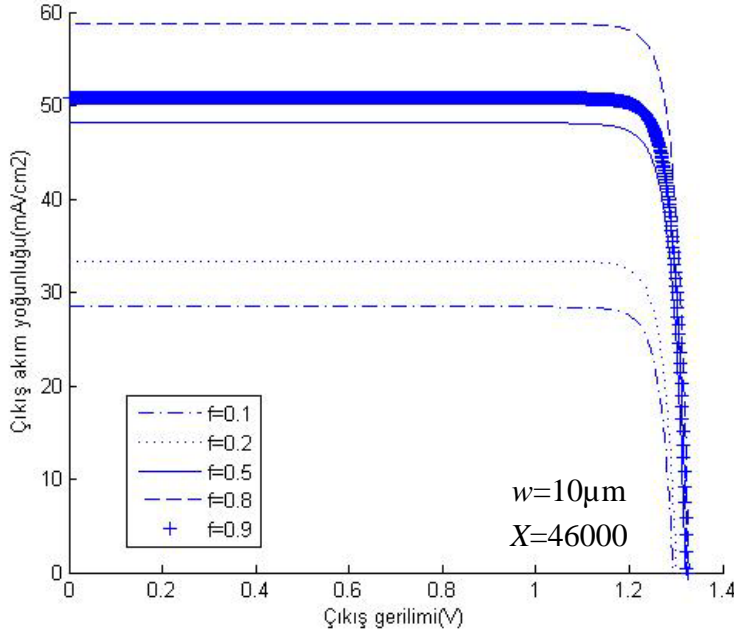
Şekil 4.14. Örtüşmesiz durumda, doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi

Şekilde görüldüğü gibi örtüşmesiz durumda kısa devre akımında, doluluk oranının çok büyük veya çok küçük değerlerinde en düşük akım yoğunlukları gözlemlenmiştir. Doluluk oranındaki değişim açık devre geriliminde önemli bir değişiklik yaratmamıştır. Örtüşmeli durumlarda, doluluk oranının pilin akım-gerilim karakteristiğine etkisi incelenmiş ve örtüşme miktarı 0,4 eV için Şekil 4.15’de ve örtüşme miktarı 4 eV için Şekil 4.16’da sunulmuştur.



Şekil 4.15. 0,4 eV örtüşme durumunda doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi

Şekil 4.15 ve 4.16 göz önüne alındığında, örtüşme ile beraber doluluk oranının değişimi kısa devre akımında daha fazla ve açık devre geriliminde ise daha az olmak üzere değişikliklere neden olmuştur. Ayrıca, valans banda yakın olan ara bant enerji seviyesi seçildiği için doluluk oranının 0,5'ten yüksek olduğu durumlarda yüksek akımlar ve dolayısıyla yüksek verimler gözlemlenmiştir.



Şekil 4.16. 4 eV örtüşme durumunda, doluluk oranının J-V karakteristik eğrisine etkisi

#### 4.4. Yorumlar ve Öneriler

Bu çalışmada, detaylı denge modeli kullanılarak, GaAs yarı iletken malzemeli ( $E_G=1,42$  eV) ve ara bant yapılı güneş pili için teorik verim sınırı %59,9 olarak bulunmuştur. GaAs yarı iletken malzeme kullanılarak tek eklemlili güneş pili ve ara bant yapılı güneş pili, tek güneş altında ( $X=1$ ) detaylı denge modeli kullanılarak karşılaştırıldığında (Şekil 4.2), ara bant yapılı güneş pilinin açık devre gerilimindeki düşüşe rağmen kısa devre akımında tek eklemlili pile göre %60 kadar bir artış gözlemlenmiştir. Bu sayede tek güneş altında pil verimi, %29,66'dan %37,3'e yükselmiştir.

Ara bant yapılı güneş pilinin veriminde soğurma katsayılarının ve baz kalınlığının seçimleri çok önemlidir. Gelen fotonların pil tarafından tamamen soğurulabilmeleri için soğurma katsayılarının ve kalınlığının değeri ( $\alpha w \geq 5$ ) uygun seçilmelidir.

Detaylı denge modeline göre, ara bant yapılı güneş pilinde maksimum verimin elde edilebilmesi için elektronların ve boşlukların üretim hızlarının eşit olması gerekir. Tek ara bant enerji seviyesine sahip güneş pilinde, ara bant enerji seviyesinin iki farklı değerinde taşıyıcı üretim hızları eşit olmaktadır. Bu ara bant enerji seviyeleri literatürle uyumlu olarak örtüşmesiz ve ara bandın yarı dolu olduğu durumlar için, bant aralığının 1/3 ve 2/3'üne denk gelmektedir. Örtüşmeli durumlarda ise optimum ara bant enerji seviyeleri bant aralığının ortasına doğru kaymaktadır.

Ara bandın doluluk oranının etkisi detaylı denge yaklaşımına dahil edilerek incelendiğinde(Şekil 4.6), örtüşmesiz durumda maksimum verimin(%59,9) geniş bir aralıkta (0,2 – 0,8) sabit kaldığı tespit edilmiştir. Bu değerlerin dışında ise verimde, büyük ölçekte düşüşler görülmüştür. Ara bandın elektron bakımından tam dolu veya tam boş olduğu durumlarda ise, ara bant üzerinden taşıyıcı transferi olmadığından, pilin, tek eklemli güneş pili davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.

Örtüşmesiz durumda elde edilen iki ara bant enerji seviyesi kullanılarak, değişik örtüşme değerleri için pil veriminin değişimi incelenmiş ve optimum doluluk oranı değerleri tespit edilmiştir(Şekil 4.7 ve 4.8). Ara bant enerji seviyesi valans bant sınırına yakın iken optimum doluluk oranlarının 0,8 civarında; ara bant enerji seviyesi iletkenlik bandına yakın iken ise 0,2 civarında olduğu tespit edilmiştir. Optimum doluluk oranlarında verimler, 0,4 eV örtüşme miktarı için %52,09; 4eV örtüşme miktarı için %45,86 olarak elde edilmiştir. Ara bant enerji seviyesinin yarı dolu olduğu durumlarda( $f=0,5$ ) ise aynı örtüşme miktarları için verim değerleri sırasıyla %46,83 ve %35,8 olarak elde edilmiştir. Yüksek örtüşmeli durumlarda, yüksek verimler elde edilebilmesi için, ara bant enerji seviyesinin optimum doluluk oranında tutulması gerekmektedir.

Her örtüşme durumu için hesaplanan optimum ara bant enerji seviyeleri kullanıldığında, en yüksek verimlerin bulunduğu doluluk oranlarının 0,5 civarına doğru kaydığı gözlemlenmiştir(Şekil 4.10 ve 4.11). Bu optimum doluluk oranlarında verimler; 0,4eV örtüşme miktarı için %51,25; 4eV örtüşme miktarı için %41,57 olarak elde edilmiştir. Optimum doluluk oranlarının 0,5 civarına kaymasıyla ara bant enerji seviyesinin yarı dolu olduğu durumlarda daha yüksek verimler elde edilmiştir. Bu verim değerleri 0,4 eV ve 4 eV örtüşme miktarları için sırasıyla %50,34 ve %41,32 olarak tespit edilmiştir. Ancak, elde

edilen bu maksimum verimler, örtüşmesiz durumda bulunan ara bant enerji seviyeleri kullanıldığında elde edilen verimlere göre bir miktar düşüş göstermiştir.

Örtüşmeli ve örtüşmesiz durumlarda, optimum ara bant enerji seviyesinin doluluk oranıyla değişimi(Şekil 4.13), doluluk oranının pil modellenirken dikkate alınması gereken çok önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Farklı örtüşme seviyelerinde optimum ara bant enerji seviyelerinden daha yüksek verimlerin elde edilmesi, literatürden farklı olarak yeni optimum ara bant seviyelerinin kullanılması gerektiğine işaret etmektedir.

Ara bant yapıları güneş pilleri, teorik olarak yüksek verimler vaat etse de üretim ve modellenmesindeki zorluklar nedeniyle, henüz istenilen verim değerlerine ulaşamamıştır.

İleriye yönelik olarak, ara bantın doluluk oranının, katkı konsantrasyonlarını, ışık şiddetini ve kuantum nokta boyutlarını değiştirerek ayarlanabileceği kanaatine varılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, ara bant yapıları güneş pillerinin kuantum noktalar kullanılarak modellenmesi hedeflenmektedir. Daha gerçekçi hesaplamalar için, ara bantın kuantum noktalar kullanılarak oluşturulması ve Drift-difüzyon modeli [29], Taşıyıcı üretim ve rekombinasyon(CTR) modeli [30] ve k.p methodu [31] gibi daha kompleks yöntemler kullanılarak modellenmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Shockley, W., Queisser, H.J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510-519.
2. Luque, A., Marti, A. (1997). Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels. *Physical Review Letters*, 78(26), 5014-5017.
3. Navruz, T.S., Sarıtaş, M. (2008). Efficiency variation of the intermediate band solar cell due to the overlap between absorption coefficients. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(3), 273-282.
4. Marti, A., Luque, A. (2001). A Metallic Intermediate Band High Efficiency Solar Cell. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(2), 73-86.
5. Markvart, T. (2000). *Solar Electricity*.(2). West Sussex/İngiltere: John Wiley&Sons, 6.
6. Aksungur, K.M., Kurban, M. ve Başaran Filik, Ü. (2013, 23-24 Mayıs ). *Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi*. EVK'2013 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli.
7. Renewable Energy Policy Network for The 21st Century. (2014). *Renewables 2014 Global Status Report*; REN21.Paris, 49
8. Varınca, K.B., Gönüllü, M.T. (2006, 21-23 Haziran ). *Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma*. UGHEK'2006: I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, Eskişehir.
9. İnternet: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası(GEPA).(Temmuz, 2014).  
URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2FMyCalculator%2FDefault.aspx&date=2014-08-21>, Son Erişim Tarihi: 21.08.2014.
10. İnternet: Türkiye Elektrik Enerjisi Kuruluş ve Yakıt Cinslerine Göre Kurulu Güç.(Temmuz,2014).  
URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.teias.gov.tr%2Fyukdagitim%2Fkuruluguc.xls&date=2014-08-21>, Son Erişim Tarihi: 21.08.2014.
11. İnternet: Research Cell Efficiency Records (Mayıs, 2014).  
URL:[http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nrel.gov%2Fncpv%2Fimages%2Fefficiency\\_chart.jpg&date=2014-07-05](http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nrel.gov%2Fncpv%2Fimages%2Fefficiency_chart.jpg&date=2014-07-05), Son Erişim Tarihi: 05.07.2014.
12. Becquerel, E. (1839). On electric effect under the influence of solar radiation. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 9, 31-33.
13. Navruz, T.S. (2008). *Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinde Verim Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10,35-47,64.

14. İnternet: Honsberg, C., Bowden, S. PVCDROM - Properties of Sunlight – AirMass. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.pveducation.org%2Fpvcdrom%2Fproperties-of-sunlight%2Fair-mass&date=2014-08-21>, Son Erişim Tarihi: 21.08.2014.
15. Dimroth, F., Kurtz S. (2007). High- Efficiency Multijunction Solar Cells. *MRS Bulletin*, 32(3), 230-235.
16. Marti, A., Araujo, G.L. (1996). Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 43(2), 203-222.
17. Takamoto, T., Agui, T., Yoshida, A., Nakaido, K., Juso, K., Sasaki, K., Nakamora, K., Yamaguchi, H., Kodama, T., Washio, H., Imaizumi, M., ve Takahashi, M. (2010, 20-25 Haziran ). *World's highest efficiency triple-junction solar cells fabricated by inverted layers transfer process*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010,35th IEEE, Honolulu.
18. Verma, D., O. Saetre, T., ve Midtgard, O. (2012, 3-8 Haziran ). *Review on up/down conversion materials for solar cell application*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012,38th IEEE, Austin.
19. Trupke, T., Green, M. A., ve Würfel, P. (2002). Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons, *Journal of Applied Physics*, 92(3), 1668-1674.
20. Trupke, T., Green, M. A., ve Würfel, P. (2002). Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light, *Journal of Applied Physics*, 92(7), 4117-4122.
21. Harder, N., Würfel, P. (2003). Theoretical limits of thermophotovoltaic solar energy conversion. *Semiconductor Science and Technology*, 18(5), 151-157.
22. Nozawa, T., Arakawa, Y. (2011). Detailed balance limit of the efficiency of multilevel intermediate band solar cells. *Applied Physics Letters*, 98(1), 171108-1-171108-3.
23. Ramiro, I., Marti, A., Antolin, E. ve Luque, A. (2014). Review of Experimental Results Related to the Operation of Intermediate Band Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), 736-748.
24. Lippens, P. E., Lannoo, M. (1989). Calculation of the band gap for small CdS and ZnS crystallites. *Physical Review B*, 39(15), 10935-10942.
25. Marti, A., Cuadra, L. ve Luque, A. (2000, 15-22 Eylül ). *Quantum dot intermediate band solar cell*. Photovoltaic Specialists Conference, 2000. 28th IEEE, Anchorage.
26. Luque, A., Marti, A., Lopez, N., Antolin, E., Canovas, E., Stanley, C., Farmer, C., ve Díaz, P. (2006). Operation of the intermediate band solar cell under nonideal space charge region conditions and half filling of the intermediate band. *Journal of Applied Physics*, 99, 094503-1-094503-9.

27. Tobias, I., Luque, A., ve Marti, A. (2011). Numerical modeling of intermediate band solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 26(1), 1-8.
28. Kızıloğlu V., Navruz T.S. ve Saritaş M. (2014, 19-21 Kasım ). *The Efficiency Variation in IBSCs Due to the Occupation Factor of IB Level*, Solartr 2014 Conference & Exhibition, İzmir.
29. Navruz, T.S., Saritas, M. (2014). Determination of the optimum material parameters for intermediate band solar cells using diffusion model. *Progress in Photovoltaics*, 22(5), 593-602.
30. Lin A.S., Wang W., ve Phillips J.D.(2009). Model for intermediate band solar cell incorporating carrier transport and recombination. *Journal of Applied Physics*, 105(6), 064512.
31. Dahal S.N., Bremner S.P., ve Honsberg C.B., (2008, 11-16 Mayıs). *Band structure calculation for quantum dot solar cells using kp method*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2008, 33th IEEE, San Diego, CA.





## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KIZILOĞLU, Volkan  
 Uyuğu :T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri :06.01.1991, Erzurum  
 Medeni hali :Bekar  
 Telefon :0 (312) 582 33 09  
 Faks :0 (312) 202 37 10  
 E-Posta :volkankiziloglu@gazi.edu.tr



### Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Atatürk Üniversitesi/Elektrik Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	Nevzat Karabağ Anadolu Öğretmen Lisesi	2008

### İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2012-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

1. Kızıloğlu V., Navruz T.S. ve Sarıtaş M. “The Efficiency Variation in IBSCs Due to the Occupation Factor of IB Level” SOLARTR 2014 CONFERENCE & EXHIBITION, 19 – 21 Kasım 2014, İzmir

### Hobiler

Sinema, Kitap okumak



*GAZİ GELECEKTİR..*