

**ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNİN
SONLU FARK METODU İLE MODELLENMESİ**

Mahmut BÜYÜKBAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2011

ANKARA

Mahmut BÜYÜKBAŞ tarafından hazırlanan “ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNİN SONLU FARK METODU İLE MODELLENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

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

Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

.....

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

.....

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ

.....

Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Tarih 19/08/2011

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Mahmut BÜYÜKBAŞ

**ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNİN
SONLU FARK METODU İLE MODELLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Mahmut BÜYÜKBAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ağustos 2011

ÖZET

Bu çalışmada, yarı-iletken malzemenin baz bölgesine yerleştirilen bir ara bant (AB) sayesinde yarı iletkene üç farklı enerji aralığı kazandıran ve dolayısıyla çıkış gerilimi düşmeden daha fazla enerji aralığındaki fotonların soğurulmasına imkan sağlayan Ara bant Yapılı Güneş Pili (ABGP), sonlu fark metodu kullanılarak matematiksel olarak yeniden modellenmiştir. Gerekli integral hesaplamaları yamuk yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sonlu fark metodu kullanarak elde ettiğimiz denklemler Gauss Eleme metodu kullanılarak çözülmüştür. Bu hesaplamalar sonucu, ABGP’de mobilitenin, ışık konsantrasyonunun, enerji durum yoğunluğunun, baz bölgesi kalınlığının ve AB enerji seviyesinin verim üzerindeki etkileri elde edilmiştir. Ayrıca bu parametrelerin taşıyıcı yoğunluğu ve akım yoğunluğu değerlerinin baz bölgesi boyunca değişimlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Hesaplamalarda ABGP için optimum band aralığı olan 1.95 eV kullanılmıştır ve nonlineerlik etkisi ihmal edilerek literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, enerji durum yoğunluğu değeri 10^{19} cm^{-3} ve mobilité $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’nin üzerinde olduğunda maksimum verim %63.8 olarak elde edilmektedir. Enerji durum yoğunluğu 10^{17} cm^{-3} ve mobilité $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’nin altına indiğinde verimde önemli oranda azalma tespit edilmiştir. Verimin ışık konsantrasyonu ile logaritmik bir artış sergilediği tespit edilmiştir. Optimum soğurma sağlanabilmesi için, optimum

baz bölgesi kalınlığının mobilitenin $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'den büyük değerleri için $5 \text{ }\mu\text{m}$ olması gerektiği gözlenmiştir. AB enerji seviyesininse detaylı denge modeli ile hesaplanan 0.71 eV 'da bulunduğu bu yöntemle de gösterilmiştir. Emitter etkisi modele dahil edilerek, emitter kalınlıklarının verime etkisi elde edilmiştir.

Bilim Kodu	: 905.1.035
Anahtar Kelimeler	: Pili, Ara Bant Yapılı Güneş Pili, Emitör
Sayfa Adedi	: 90
Tez Yöneticisi	: Yrd. Doç. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

**MODELLING INTERMEDIATE BAND SOLAR CELL
USING FINITE DIFFERENCE METHOD**

(M.Sc. Thesis)

Mahmut BÜYÜKBAŞ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

August, 2011

ABSTRACT

The Intermediate band solar cell which is obtained through disposing an intermediate band into the base region of semiconductor material and gained three different energy intervals thus providing more energy interval photon absorbing without decreasing output voltage, is mathematically remodeled by using finite difference method. Necessary integral equations are solved using trapezoidal rule. The equations that we obtained using finite difference method are solved using Gauss elimination method. As a result of these calculations, the effects of carrier mobility's, light concentration, density of states, base region width and intermediate band energy level on the efficiency are obtained. Besides, the effects of these parameters, on the carrier concentration and current density variations along the base region are also investigated. The optimum band gap value of 1.95 eV is used during calculations and it is seen that the results are in agree with literature with neglecting nonlinear effect. The maximum efficiency value is obtained as 63.8% when the density of states is equal or over to 10^{19} cm^{-3} and the mobility is higher than $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. An important amount of decrement in the efficiency is seen when the density of states is lower than 10^{17} cm^{-3} the mobility is lower than $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. It is obtained that efficiency shows a logarithmic increment with the light concentration. It is observed that the optimum base width should be $5 \mu\text{m}$ to

ensure optimum absorption when the mobility is higher than $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. It is shown that the same optimum intermediate band level of 0.71 eV is found using finite difference method. Finally, the effects of emitters are added to the model and the effect of emitter thickness on the efficiency is investigated.

Science Code	: 905.1.035
Key Words	: Solar Cell, Intermediate Band Solar Cell, Emitter
Page Numbers	: 90
Supervisor	: Assistant Professor. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca ortaya çıkan her türlü probleme getirmiş olduğu bakış açısı ve yaklaşımları ile bana yol gösteren, iyi bir çalışma ortamı sağlayan ve her zaman desteğini hissettiren değerli Hocam Yrd. Doç. Dr. Tuğba Selcen NAVRUZ'a, ve bu günlere gelmemde emeği olan bütün hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tüm hayatım boyunca bana büyük moral ve destek veren, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan aileme en derin saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım

Çalışmalarım boyunca bana her türlü kolaylığı sağlayan çok değerli Hocam Yrd. Doç. Dr. Orhan ER'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan çok değerli arkadaşım Mahmut YILDIRIM'A teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GÜNEŞ VE GÜNEŞ ENERJİSİ.....	2
2.1.Güneşin Yapısı	3
2.2. Güneş Enerjisi	5
2.3. Güneş Spektrumu	6
2.4. Dünya’da Güneş Enerjisinin Kullanımı	8
2.5.Türkiye’de Güneş Enerjisinin Kullanımı	9
3. FOTOVOLTAİK PİLLER.....	15
3.1. Fotovoltaik Etki.....	15
3.2. Fotovoltaik Hücrelerinin Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	16
3.3. Fotovoltaik Pillerinin Tarihçesi	19
3.4. Fotovoltaik Pil Yapıları.....	21
3.4.1. Kristal silisyum güneş pilleri	21

Sayfa

3.4.2. Monokristal silisyum güneş pilleri.....	21
3.4.3. Polikristal silisyum güneş pilleri.....	22
3.4.4. Ribbon silisyum güneş pilleri	23
3.4.5. İnce film güneş pilleri	23
3.4.6. Amorf silisyum güneş pilleri.....	24
3.4.7. Bakır indiyum diselenoid güneş pilleri	25
3.4.8. Yüksek verimli yeni nesil güneş pilleri.....	26
4. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİ(ABGP)	31
4.1. Giriş.....	31
4.2. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinin Temelleri.....	31
4.3. Ara Bant Yapılı Güneş Pili Araştırmalarındaki Güncel Durum	34
4.3.1. Ara bant yapılı güneş pili genel teorisindeki gelişim.....	34
4.3.2. Ara bant modelini pratiğe koymayı amaçlayan çalışmalar	36
4.4. KD-ABGP İçin Sonlu Fark Modeli	39
4.4.1. Başlangıç denklemleri.....	40
4.4.2. Taşıyıcı üretimi ve rekombinasyon terimleri	40
4.4.3. Sürüklenme akımının difüzyon akımından çok daha az olduğu yaklaşımı	44
4.4.4. Düşük-enjeksiyon yaklaşımı	46
5. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNDE EMİTÖRÜN VERİME ETKİSİ... 48	
5.1. Emitör Etkisinin İhmal Edilmesi Durumunda Verimin İncelenmesi.....	48
5.1.1. Mobilitenin verime etkisi	49

Sayfa

5.1.2. Işık konsantrasyonunun verime etkisi.....	54
5.1.3. Enerji durum yoğunluğunun verime etkisi.....	60
5.1.4. Pil kalınlığının verime etkisi	62
5.1.5. Ara bant enerji seviyesinin verime etkisi	71
5.2. Emitör Etkisinin Hesaba Katılması Durumunda Verimin incelenmesi.....	72
5.2.1. Emitör kalınlıklarının verime etkisi	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	80
EKLER.....	85
EK-1. Sınır Değer Problemleri: Sonlu Fark Metodu	86
ÖZGEÇMİŞ	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye ‘nin yıllık yenilenebilir enerji potansiyeli	10
Çizelge 2.2. Türkiye’nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli.....	13
Çizelge 2.3. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı	14
Çizelge 5.1. Maksimum verim parametreleri.....	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Güneşten gelen ışınımın dağılımı	5
Şekil 2.2. Güneş ışığının enerji akış diyagramı.....	6
Şekil 2.3. Güneş enerji spektrumu	8
Şekil 2.4. Dünya çapındaki kurulu yükün evrimi	9
Şekil 3.1. Işık altındaki fotovoltaiik yapının diyagramı.....	16
Şekil 3.2. Fotovoltaiik hücrenin basit yapısı	17
Şekil 3.3. Bir fotovoltik hücrenin basit elektriksel eşdeğer modeli	18
Şekil 3.4. Eşdeğer devre modeli kullanılarak elde edilen matematiksel model.....	18
Şekil 3.5. Herhangi bir hücre için akım-gerilim karakteristiği	19
Şekil 3.6. Monokristal silisyum güneş pili.....	22
Şekil 3.7. Polikristal silisyum güneş pili.....	22
Şekil 3.8. Ribbon silisyum güneş pili.....	23
Şekil 3.9. İnce film güneş pili	24
Şekil 3.10. Amorf silisyum güneş pili.....	24
Şekil 3.11. Bakır indiyum diselenoid güneş pilleri	26
Şekil 3.12. Tandem Güneş Pili Yapısı	27
Şekil 3.13. Aşağı dönüşüm güneş pili.....	28
Şekil 3.14. Yukarı dönüşüm güneş pili	29
Şekil 4.1.a. Ara bant yapıli güneş pilinin temel gösterilişi	32
Şekil 4.1.b. Temel yapı	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1.c. Kuantum nokta(QD) ara bant yapılı güneş pilinin şematik yapısı.....	32
Şekil 4.2.a. KN-ABYG'nin katman yapısı.....	38
Şekil 4.2.b. Arabandın malzeme arasına yerleştirilmiş Kuasi-Fermi ayrılmalarının da gösterildiği ışık altındaki bant diyagramı	38
Şekil 4.3. Kuantum dot ara banttaki üretim ve rekombinasyon süreçlerinin gösterimi.....	39
Şekil 5.1 Mobilite-verim ilişkisi	50
Şekil 5.2. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	50
Şekil 5.3. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	51
Şekil 5.4. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi.....	52
Şekil 5.5. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi.....	52
Şekil 5.6. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi eristiği.....	53
Şekil 5.7. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	53
Şekil 5.8. Işık konsantrasyonu-verim ilişkisi	54
Şekil 5.9. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	55
Şekil 5.10. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	56
Şekil 5.11. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	56
Şekil 5.12. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi.....	57
Şekil 5.13. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi.....	57
Şekil 5.14. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi.....	58
Şekil 5.15. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	59
Şekil 5.17. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	59
Şekil 5.18. Enerji durum yoğunluğu - verim ilişkisi	60
Şekil 5.19. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	61
Şekil 5.20. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi.....	61
Şekil 5.21. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	62
Şekil 5.22. Kalınlık-verim ilişkisi	63
Şekil 5.23. Kalınlık-verim ilişkisi	63
Şekil 5.24. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	64
Şekil 5.25. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri.....	65
Şekil 5.26. Kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu	65
Şekil 5.27. Kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu	66
Şekil 5.28. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi....	67
Şekil 5.29. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi....	67
Şekil 5.30. Kısa devre durumlarında akım yoğunluklarının değişimi	68
Şekil 5.31. Kısa devre durumlarında akım yoğunluklarının değişimi	68
Şekil 5.32. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	69
Şekil 5.33. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	69
Şekil 5.34. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	70
Şekil 5.35. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi	70
Şekil 5.36. E_L -verim ilişkisi	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.37. E_L -verim ilişkisi	72
Şekil 5.38. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	73
Şekil 5.39. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	74
Şekil 5.40. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	74
Şekil 5.41. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	75
Şekil 5.42. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	75
Şekil 5.43. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	76
Şekil 5.44. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	76
Şekil 5.45. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi.....	77

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Güneş	4

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
AB	Ara bant
a_e	Elektron soğurma katsayısı
a_h	Boşluk soğurma katsayısı
a_{eh}	Elektron boşluk soğurma katsayısı
c	Işık Hızı
C	Karbon
CdS	Kadmiyum sülfür
Ca	Kalsiyum
CB	İletkenlik Bandı
cm	Santimetre
Cr	Krom
CuInSe₂	Bakır indiyum diselenid
Dark	Karanlık
e	Elektron
E	Foton enerjisi
E_G	Valans ve iletkenlik arası bant aralığı
E_H	Valans ve ara bant arası bant aralığı
E_L	İletkenlik ve ara bant arası bant aralığı
f	Frekans
Fe	Demir
FF	Dolum faktörü
ge	Elektron üretim hızı

Simgeler	Açıklama
gh	Boşluk üretim hızı
geh	Elektron boşluk üretim hızı
G	Giga(10^9)
GaAs	Galyum Arsenid
h	Planck sabiti
h	Boşluk
I	Akım
IB	Ara bant
J	Akım
Je	Elektron akımı
Jh	Boşluk akımı
km	Kilometre
kB	Boltzman sabiti
m	Metre
M	Giga(10^6)
Ne	Neon
Nv	Valans banttaki enerji durum yoğunluğu
Nc	İletkenlik bandındaki e. durum yoğunluğu
Ni	Nikel
nm	Nanometre
n+	n katkılı
O	Oksijen
P	Peta(10^{15})
p+	p katkılı
QD	Kuantum Dot
R	Direnç
SC	Kısa devre
Si	Silisyum
S	Sülfür

Simgeler**Açıklama**

T	Tera(10^{12})
Ts	Güneş sıcaklığı
Tc	Pil sıcaklığı
T	Pil sıcaklığı
V	Volt
VB	Valans Bandı
W	Watt
w	Ara bant kalınlığı
we	Emitör kalınlığı
°C	Celsius
μe	Elektron mobilitesi
μh	Boşluk mobilitesi
μm	Mikrometre
η	Pil verimi
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar**Açıklama**

ABGP	Ara Bant Yapılı Güneş Pili
EPIA	Avrupa Fotovoltaik Sanayi Birliği
FV	Fotovoltaik
IBSC	Ara Bant Yapılı Güneş Pili
ISET	Uluslar arası solar enerji teknolojisi
pv	Fotovoltaik

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacının gittikçe artması, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi ve çevreye olan zararlı etkilerinden dolayı alternatif enerji kaynaklarının ihtiyacı gündeme gelmiştir. Çevreye zararlı olmaması ve diğer enerji kaynakları gibi tükenme probleminin olmamasından dolayı, bu anlamada güneş enerjisinden yararlanmak en iyi alternatiflerden biridir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi fotovoltaik etki sayesinde gerçekleşir. Fotovoltaik etkisi ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Tez çalışmamıza, güneş, güneş enerjisi ve fotovoltaik etki hakkında gerekli bilgiler ve açıklamalar verilerek başlanmıştır. Üçüncü bölümde en çok bilinen p-n eklem tipi güneş pilinin çalışması ve bölümde bugüne kadar geliştirilen güneş pillerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde tez konumuzun temeli olan Ara bant yapılı güneş pili'ne giriş yapılmıştır. Ara bant yapılı güneş pili'nin temelleri ve ara bant yapılı güneş pili araştırmalarındaki güncel durumdan ayrıntılı bir şekilde bahsedilmiştir. Sonrasında, sonlu fark metodu kullanarak modellediğimiz ara bant yapılı güneş piline ait güneş pili verimlilik parametreleri olan güneş pili kalınlığı, ışık konsantrasyonu ve güneş pilinin hammaddesi değiştirilerek gerekli sonuçlar bulunmuştur. Emitörün verime etkisi hesaplanmıştır.

Güneş, Güneş Sistemi'nin merkezinde yer alan yıldızdır. Orta büyüklükte olan Güneş tek başına Güneş Sistemi'nin kütlelerinin % 99,8'ini oluşturur. Geri kalan kütle Güneş'in çevresinde dönen gezegenler, asteroitler, göktaşları, kuyruklu yıldızlar ve kozmik tozdan oluşur. Güneş'in şeklinde Güneş'ten yayılan enerji, fotosentez yoluyla Dünya üzerindeki hayatın hemen hemen tamamının var olmasını sağlar ve Dünya'nın iklimiyle hava durumunun üzerinde önemli etkilerde bulunur.

Samanyolu gökadasında bilinen 200 milyar yıldızdan birisi olan Güneş, kütlesi sıcak gazlardan oluşan ve çevresine ısı ve ışık yayan bir yıldızdır. Güneş'in çapı dünyanın çapının 109 katı (1.5 milyon km), hacmi 1,3 milyon katı ve ağırlığı 333.000 katı kadardır. Güneş'in yoğunluğu ise Dünyanın yoğunluğunun $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Güneş kendi eksenini etrafında saatte 70.000 km hızla döner. Bir turunu ise 25 günde tamamlar. Güneş'in yüzey sıcaklığı 5500 °C ve çekirdeğinin sıcaklığıysa 15,6 milyon °C'dir. Güneş'ten çıkan enerjinin 2 milyonda 1'i yeryüzüne ulaşır. Güneş'in üç günde yaymış olduğu enerji, dünyadaki tüm petrol, ağaç, doğalgaz, vb. yakıta eşdeğerdir. Güneş ışınları 8,44 dakikada yeryüzüne ulaşır. Güneş dünyaya en yakın yıldızdır. Çekim kuvveti dünya yer çekiminin 28 katıdır.

Güneş yüzeyi kütlelerinin %74'ünü ve hacminin %92'sini oluşturan hidrojen, kütlelerinin %24-25'ünü ve hacminin %7'sini oluşturan helyum ile Fe, Ni, O, Si, S, Mg, C, Ne, Ca, ve Cr gibi diğer elementlerden oluşur [1-2]. Güneş'in yıldız sınıfı G2V'dir. G2 Güneş'in yüzey sıcaklığının yaklaşık 5780 K⁰ olduğu, dolayısıyla beyaz renge sahip olduğu anlamına gelir. Güneş'in atmosferden geçerken kırılması sonucu sarı gibi görünür. Bu mavi fotonların Rayleigh saçılımının sonucunda yeteri kadar mavi ışığın kırılmasıyla geride sarı olarak algılanan kırmızılığın kalmasıdır.

Tayfi içinde iyonize ve nötr metaller olduğu kadar çok zayıf hidrojen çizgileri de bulunur. V eki (Roma rakamıyla beş) çoğu yıldız gibi Güneş'in de ana dizisi üzerinde olduğunu gösterir. Enerjisini hidrojen çekirdeklerinin füzyonla helyuma dönüşmesinden elde eder ve hidrostatik denge içindedir, yani zaman içinde ne dönüşmesinden elde eder ve hidrostatik denge içindedir, yani zaman içinde ne

genişler ne de küçülür. Saniyede 600 milyon ton hidrojen, helyuma dönüşür. Bu da, Güneş'in her geçen saniye 4,5 milyon ton hafiflemesine yol açar. Güneşteki füzyon olayı sonucunda kızıl kırmızımsı bir alev 15-20 bin km yükselir ve Güneş Fırtınası meydana gelir. Galaksimizde 100 milyondan fazla G2 sınıfı yıldız bulunur. Güneş, galaksimiz içinde bulunan yıldızların % 85'inden daha parlaktır, bu yıldızların çoğu kırmızı cücelerdir.

Güneş Samanyolu merkezinin çevresinde yaklaşık 26.000 ışık yılı uzaklıkta döner. Galaktik merkez çevresinde bir dönüşünü yaklaşık 225–250 milyon yılda bir tamamlar. Yaklaşık yörünge hızı saniyede 220 kilometredir (+/-20 km/s). Bu da her 1.400 yılda bir, 1 ışık yılı ve her 8 günde 1 GB'dir. Bu galaktik uzaklık ve hız bilgileri şu anda sahip olduğumuz en doğru bilgilerdir ancak daha fazla öğrendikçe bunlar da gelişebilir [3].

Güneş günümüzde Samanyolu'nun daha büyük olan Kahraman takımyıldızı ve Yay takımyıldızı kolları arasında kalan Orion Kolu'nun iç kısmında, Yerel Yıldızlararası Bulut içinde yüksek sıcaklıkta dağınık gaz bölgesi olan düşük yoğunluklu Yerel Kabarcık içinden geçmektedir. Dünya'ya 17 ışık yılı uzaklıkta yer alan en yakın 50 yıldız içinde Güneş, mutlak kadir olarak dördüncü sıradadır.

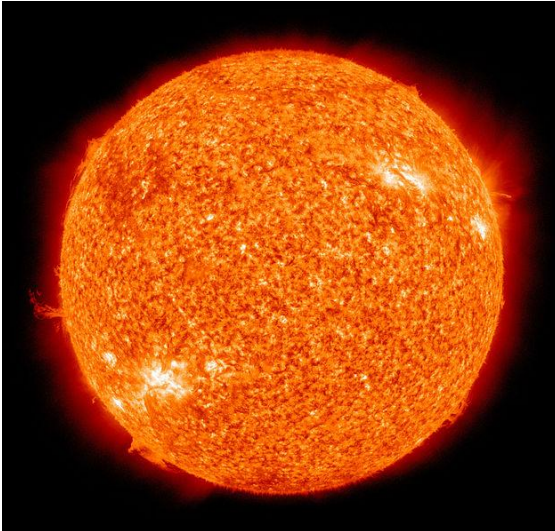
2.1. Güneşin Yapısı

Güneş bir sarı cücedir. Güneş Sistemi'nin toplam kütesinin yaklaşık % 99'unu oluşturur. Güneş hemen hemen mükemmel bir küre şeklindedir, basıklığı yalnızca 9 milyonda birdir yani kutuplararası çapı ile ekvator çapı arasında bulunan fark yalnızca 10 km'dir [4]. Güneş plazma hâlinindedir ve katı değildir; dolayısıyla kendi eksenini etrafında dönerken kademeli olarak döner, yani ekvatorunda kutuplarda olduğundan daha hızlı döner. Bu *gerçek dönüşün* periyodu ekvatorunda 25 gün, kutuplarda 35 gündür. Ancak Dünya Güneş'in etrafında dönerken gözlem noktamız sürekli değiştiği için Güneş'in *görünür dönüşü* ekvatorunda yaklaşık 28 gün kadardır. Bu yavaş dönüşün merkezkaç etkisi Güneş'in ekvatorunda yüzey çekiminden 18

milyon kat daha güçsüzdür. Aynı zamanda gezegenlerden kaynaklanan gelgit etkisi Güneş'in şeklini belirgin derecede etkilemez.

Kayalık gezegenlerde olduğu gibi Güneş'in belirli sınırları yoktur. Dış katmanlarında, merkezinden uzaklaştıkça gaz yoğunluğu üstel olarak azalır. Ancak aşağıda açıklandığı gibi Güneş'in belirgin bir iç yapısı bulunur. Güneş'in yarıçapı merkezinden ışıkyuvarının (fotosfer) kenarına kadar ölçülür. Bu hemen yukarısında gazların önemli miktarda ışık saçamayacak kadar çok soğuk ya da çok ince olduğu katmandır. Işık yuvarı çıplak gözle görülen yüzeydir. Güneş çekirdeği toplam hacminin yüzde 10'una ama toplam kütesinin yüzde 40'ına sahiptir.

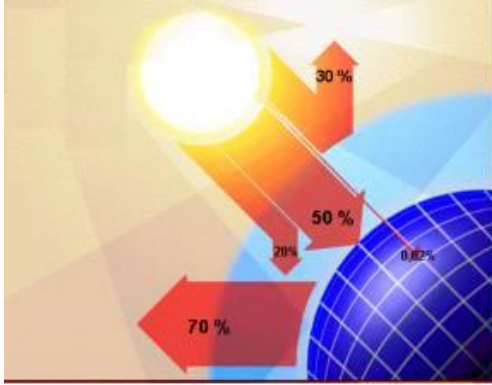
Güneş'in içi doğrudan gözlemlenemez ve Güneş elektromanyetik ışımaya karşı opaktır. Ancak nasıl sismoloji deprem tarafından üretilen dalgaları kullanarak Dünya'nın iç yapısını ortaya çıkarıyorsa helyosismoloji de Güneş'in içinden geçen basınç dalgalarını kullanarak iç yapısını ölçmeye ve görüntülemeye çalışır. Güneş'in bilgisayar modellemesi de iç katmanları araştırmak amacıyla kuramsal bir araç olarak kullanılır.



Resim 2.1. Güneş

2.2. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, güneş enerjisi çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir [5].



Şekil 2.1. Güneşten gelen ışımanın dağılımı [5]

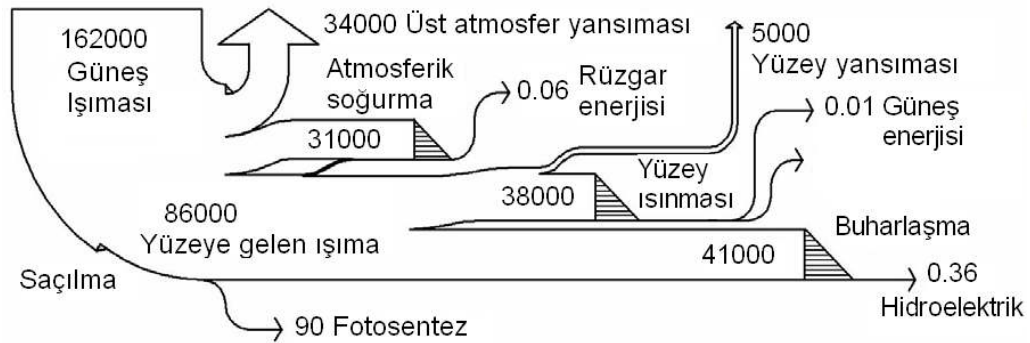
Dünya ile Güneş arasındaki mesafe 150 milyon km'dir. Dünya'ya güneşten gelen enerji, Dünya'da bir yılda kullanılan enerjinin 20 bin katıdır. Güneş, 5 milyar yıl sonra tükeneyecektir [5].

Güneş ışıınının tamamı yer yüzeyine ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışıınının %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgar hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ısınma neden olur. Güneşten gelen ışıınının %20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yer yüzeyine gelen güneş ışıınının %1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır.

Bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, oksijen ve şeker üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır. Dünya'ya gelen bütün güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir [5].

2.3. Güneş Spektrumu

Şekil 2.2 atmosfere ve dış ekosisteme gelen güneş enerjisinin dağılımını göstermektedir. Bu değer, güneş ışığından dönüştürülebilecek enerji miktarının üst sınırını belirlemektedir. Bu sınır termodinamiğin ikinci kanuna bağlıdır ve cihazlardan bağımsızdır. Dünyaya ulaşan 162 PW'lık (10^{15} Watt) güneş ışığının 86 PW'lık kısmı yeryüzüne direkt (%75) ve dağınık (%25) ışık olarak ulaşmaktadır. Dağınık ışımının enerji kalitesi düşüktür. Güneş enerjisinin yaklaşık 0,01 TW'lık bölümünü güneş ışığının toplanması ve enerji dönüştürücüleri tarafından kullanılması ile harcanmaktadır. Bu, elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik devreler ve su ısıtmak için kullanılan solar termal sistemler için de geçerlidir. Benzer yaklaşımlar rüzgar enerjisi (0,06 TW) ve hidroelektrik enerji (0,36 TW) için de gösterilmiştir [6].

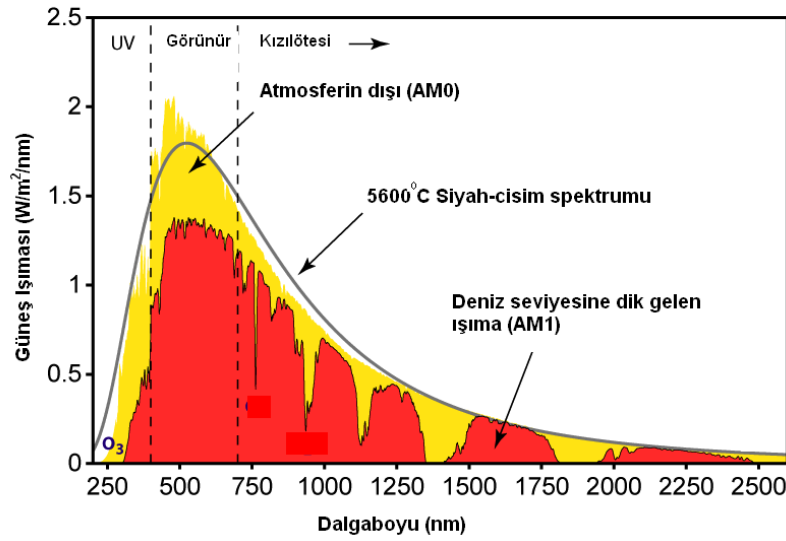


Şekil 2.2. Güneş ışığının enerji akış diyagramı (Güç birimi TW) [6]

Fotovoltaik sistemlerde, yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi miktarının değişimini temsil edebilmek için iki önemli parametre tanımlanmıştır. Bunlardan ilki ve sıkça kullanılanı hava kütlesi m 'dir. Hava kütlesi $m=1/z$ şeklinde tanımlanmaktadır ve burada $z=\cos(\alpha)$ ve α , güneşten gelen ışığın dikeyle yaptığı açıdır. AM0 ($m=0$)

atmosferin dışındaki durumu, AM1 açık bir günde deniz seviyesine ışığın dik gelme durumunu ve AM2 ise ışığın dikeyle 60 derece açı yaparak gelmesi durumunu temsil etmektedir. Güneş spektrumunu incelerken dikkate alınan ikinci önemli parametre su buharı miktarı w 'dur. w , dikey ekseninde santimetredeki su miktarı olarak tanımlanabilir. Örneğin, $w=2$, nemliliğin %50 olduğu anlamına gelir. Atmosferde, güneş spektrumunu etkileyen kirlilik ve saçılma gibi başka faktörler de mevcuttur.

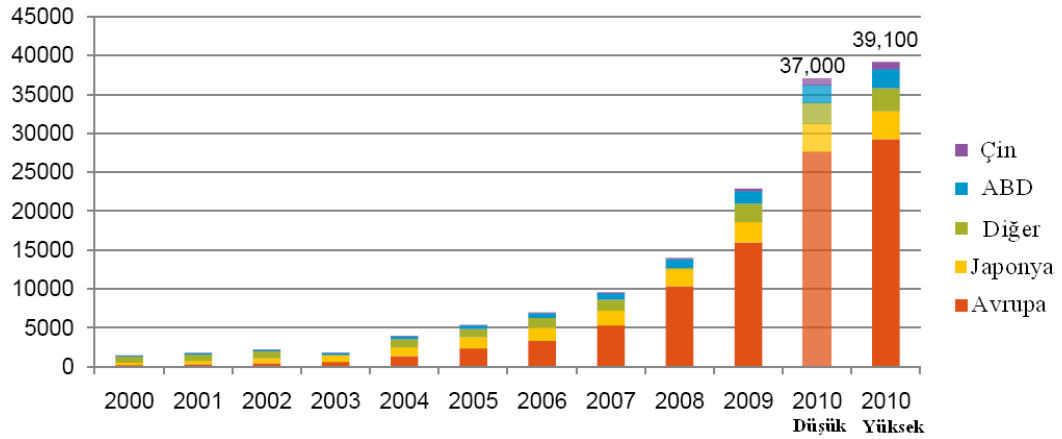
Güneş ışığı, gama ve x ışınlarının bulunduğu nanometrik dalga boylarından radyo dalgalarının bulunduğu metrik dalga boylarına kadar çok geniş bir spektruma sahiptir. Güneş ışığının spektrumu üç büyük spektral kategoriye ayrılmaktadır. Morötesi (ultraviolet) (UV) ışık ($\lambda < 400\text{nm}$), toplam spektrumun %9'dan daha azını; görünür ışık (VIS) ($400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$), %39'unu ve kızılötesi (infrared) (IR) ışık yaklaşık %52'sini oluşturmaktadır. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, güneş enerji spektrumu, 5600 °C'deki mükemmel siyah-cisim ışımasının spektrumuna çok benzemektedir. Şekilde AM0, atmosferin dış yüzeyinde ölçülen ve bir bölümü modellenen hava kütlesi sıfır referans spektrumunu göstermektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi dünya yüzeyine ulaşan ışıma, dünya ekseninin eğimi ve gelen ışımının bir bölümünün soğurulmasına ve bir bölümünün de yansımaya sebep olan atmosferik etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Bütün bu faktörlerin etkisi Şekil 2.3'de AM1 eğrisinde görülmektedir. Atmosferin üst kısmındaki ozondan ve moleküler ve atomik yapıdaki oksijen ve nitrojenlerdeki elektronik geçişlerden dolayı meydana gelen soğurulma ile, morötesi bölgede, dalgaboyu 0,3 μm 'den daha küçük olan ışımların yeryüzüne ulaşması engellenmektedir. Kızıl ötesi bölgede ise, su (H_2O) ve karbondioksit (CO_2) gibi çoklu atomik yapıların sebep olduğu bir soğurulma mekanizması söz konusudur. Atmosferdeki soğurmalar, bulutlardan, okyanuslardan ve yeryüzünden meydana gelen yansımalar ve dünyanın dönüşü (gece/gündüz dönüşümü) hesaba katıldığında yeryüzüne ulaşan güneş enerjisi miktarı okyanuslarda 17 mW/cm^2 ve karalarda 18 mW/cm^2 olmaktadır. Bu ışığın %75'i güneşten direkt olarak gelen ışık iken; geri kalanı havadaki moleküllerden, nemden, bulutlardan ve kirlilikten saçılan kısımdır [6].



Şekil 2.3. Güneş enerji spektrumu [6]

2.4. Dünya’da Güneş Enerjisinin Kullanımı

Avrupa Fotovoltaik Sanayicileri Birliği (EPIA) verilerine göre 2010 yılında dünyadaki kurulu fotovoltaik gücü 16 GW artış göstererek toplam 40 GW'lık seviyeye ulaştı. 2009 yılında küresel güneş enerjisi sektöründe 7.2 GW'lık büyüme görülürken sektör yılı 23 GW'lık kurulu güç ile tamamlamıştı. Bu yüksek büyüme özellikle Avrupa'da 2010 yılında başlayan ve 2011 yılında devam edecek olan yüksek alım fiyatlarından yararlanmak isteyen yatırımcıların etkisi ile yaşandı. Bu sebeple bölgelere göre büyüme rakamları incelendiğinde Avrupa'nın 13 GW'lık yeni kurulum ile açık ara liderliği aldığı görülürken, kıtayı 1 GW'lık kurulum ile Japonya, 0.8 Gw'lık kurulum ile ABD, 0.4 GW'lık kurulum ile de Çin takip etti. Avrupa ülkeleri özelinde incelendiğinde ise 7 GW ile Almanya'nın neredeyse dünyadaki kurulumların yarısını tek başına yaptığı görülüyor. Bu ülkeyi 3 GW ile İtalya, 1.3 GW ile Çek Cumhuriyeti, 0.5 GW ile Fransa ve 0.4 GW ile İspanya takip ediyor. Bu rekor büyümede düşen panel fiyatlarının da önemi büyük. EPIA'nın verilerine göre 2007 yılında güneş panellerinin watt başına maliyeti ortalama 3.7 dolar iken 2010'da bu rakam iki kattan fazla düşerek 1.8 dolara geriledi. Aşağıda düşük ve yüksek tahminli veriler gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Dünya çapındaki kurulu yükün evrimi

Türkiye’de ise yıllık güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yaklaşık 3 MW civarındadır. Bu değer Avrupa’daki diğer ülkelerle kıyaslanmayacak kadar azdır.

2.5. Türkiye’de Güneş Enerjisinin Kullanımı

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği ve potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir. Ülkemiz birçok ülkede bulunmayan jeotermal enerji de dünya potansiyelinin %8’ ine sahiptir. Ayrıca coğrafi konumu nedeniyle büyük ölçüde güneş enerjisi almaktadır. Türkiye hidrolik enerji potansiyeli açısından dünyanın sayılı ülkeleri arasındadır. Rüzgar enerjisi potansiyeli yaklaşık 160 TWh olarak tahmin edilmektedir [7].

Çizelge 2.1.’ de Türkiye’nin yenilenebilir enerji türleri; güneş enerjisi, hidrolik enerji, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji olarak gösterilmiştir. Enerji potansiyeli bakımından ilk sırayı güneş enerjisi alıp, bunu hidrolik enerji takip etmektedir.

Çizelge 2.1. Türkiye ‘nin yıllık yenilenebilir enerji potansiyeli
(MTEP:Mega Ton Eşdeğer Petrol)

Yenilenebilir Enerji Türü		Kullanım Enerji Türü	Doğal Potansiyel	Teknik Potansiyel	Ekonomik Potansiyel
Güneş Enerjisi		Elek.Enj.(milyarkWh)	977000	6105	305
		Isı (MTEP)	80000	500	25
Hidrolik Enerji		Elek.Enj.(milyarkWh)	430	215	124.5
Rüzgar Enerjisi	Direkt Rüzgar Enj.Karasal	Elek.Enj.(milyarkWh)	400	110	50
	Direkt Rüzgar Enj.Denizsel				
	Deniz Dalga Enj.	(Milyar kWh)	150	18	-
		Elek.Enj.(milyarkWh)	-	-	1.4
		Isı (MTEP)	31500	7500	2843
		Yakıt Modern (MTEP)	90	40	25

Türkiye’nin temel enerji kaynakları petrol, linyit, kömür, doğalgaz, jeotermal ve hidrolik enerji olarak gözükmektedir. Türkiye’nin kendi üretimi tüm enerji ihtiyacının ancak % 48’ ini sağlayabilmektedir. Yenilenebilir olmayan fosil yakıtlar bakımından fakir bir ülke olan ülkemiz direkt elektrik, doğalgaz, petrol ve yüksek kalitede kömür alımı için her yıl milyarlarca dolar ödemektedir. En çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları hidrolik enerji ve güneş kolektörleridir. Güneş enerji sistemlerinin bir avantajı, herhangi bir enerji maddesinden tam bağımsızlık, doğal afetlere karşı güvenlik, enerji kaynağının çeşitlendirilmesi ve merkezi enerji üretiminden kurtulmak olarak sıralandırılabilir. FV sistemin, güneşi ve rüzgarı çok bol olan Türkiye için çok önemli kriterler olan taşınabilirliği, bakım ihtiyacı olmaması, ihtiyacın olduğu yerde üretimi, hiçbir açık çıkmaması, sessiz üretim ve modüler yapı özellikleri ile merkezci enerji üretimi ve dağıtımından uzak olması diğer avantajları arasındadır. Bu avantajlar yerli enerji üretim modellerine geçişi sağlamakta önemli etkenlerdendir [7].

Sınırsızca ve sorumsuzca enerji tüketiminin yerini, bilinçli ve çevreye saygılı ve ihtiyacı karşılamaya yönelik enerji kullanımı alacaktır. Böyle bir ortamda da, refah düzeyini en fazla tüketen sistem yerine, en verimli enerji kullanan sistemler belirleyecektir. Türkiye’de benzeri bir anlayışın hakim olması ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artacaktır [7].

Elektrik enerjisi tüketiminin gelişmişliğin bir göstergesi halini aldığı çağımızda, birincil enerji kaynaklarının sürekli tükenmekte oluşu ve bu kaynakların enerji üretimi için yakılmaları esnasında ortaya çıkan ekolojik bozulmalar, bugün enerji konusunu acil olarak çözülmesi gerekli bir problem olarak ortaya koymaktadır. Bu problemin çözümlerinden birincisi yeni ve temiz enerji kaynaklarının bulunması, ikincisi ise tüketimin ekonomik olarak kabul edilebilecek en alt düzeye indirilmesi biçiminde özetlenebilir [7].

Sanayileşme süreci ile birlikte hızla artan enerji ihtiyacının karşılanması için geliştirilen ve uygulanan yeni teknolojiler birçok problemi de beraberinde getirmiştir. Dünya ekolojisinin etkilenmesi bakımından büyük önem taşıyan, enerji ve çevre etkileşiminde ortaya çıkabilecek çevresel bozulmaların en azda tutulabilmesi, bu problemin en büyüğüdür. Günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri bilinmekte ve çevre üzerindeki bu tahribatın durdurulmasına çalışılmaktadır. Çevre dostu enerji kaynaklarının kullanılmasının yaygınlaştırılması, dünyanın geleceği bakımından çok önemli bir adım olacaktır. Güneş enerjisi ile rüzgar enerjisinin çevreye verdiği zarar, günümüz enerji sistemleriyle karşılaştırılmayacak kadar azdır. Ancak dünya genelinde bu enerji kaynaklarına, ülkelerin enerji politikaları veya bu kaynakların yetersizliği gibi nedenlerle gerekli önem verilmemektedir [7].

Son yıllarda görülen yakıt fiyatlarındaki yüksek artışlar nedeniyle birkaç yıl öncesine kadar ekonomik görülmeyen güneş enerjisi, bazı kullanım alanlarında oldukça ekonomik hale gelmiştir. Fizyon enerjisinin en büyük kaynağı, dünyaya zarar vermeyecek bir mesafede olan güneştir. Nitekim petrol, kömür ve atom enerjisi gibi

birincil enerji kaynaklarına alternatif olarak güneş enerjisi çok umut vericidir. Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu, atmosferin üzerindeki m^2 başına 1.35 kW kadardır. Bu yoğunlukta dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü 178-106 MW düzeyindedir. Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi, 1.22-1014 TET (ton eşdeğer taş kömürü) ya da 0.814-1014 TEP gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi miktarı, bilinen kömür rezervinin elli katı, bilinen petrol rezervinin 800 katıdır [7].

Türkiye'deki elektrik enerjisi üretiminin %34'ü fueloil ve motorin tüketilerek küçük kapasitelerde yapılmaktadır. 1MW 'dan küçük bu güç üniteleri ile 1500 MW güç üretilmektedir. Ülkemizin dağlık bir yapıya sahip olması ve yerleşim merkezinin birbirinden uzak olması, bu yerleşim merkezlerine elektrik enerjisi iletimini güçleştirmektedir. Üretimin ancak %3'ü bu tip yalıtılmış yerlerde tüketilmektedir. Bu bölgelerin bileşik bağlı sisteme bağlanma maliyetlerinin çok yüksek olması ve üretilen enerjinin önemli bölümünün iletim ve dağıtım hattında kaybolduğu göz önüne alınırsa, bölgesel ve bağımsız olarak çalışacak küçük güneş enerjisi elektrik santrallerinin önemi belirginleşmektedir [7].

Türkiye'nin güneş enerjisi gücü ilk kez 1970 yılında, bir bilimsel araştırma kapsamında yapılmıştır. Belirlenen olgulara göre Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi 2608.8 saat olup, maksimum değer 361.8 saat ile temmuz ayında ve minimum değer 97.8 saat ile aralık ayında görülmektedir. Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge yılda 3015,8 ile Güneydoğu Anadolu'dur [7].

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMI) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışıyım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışıyım şiddeti 1311 kWh/ m^2 -yıl (günlük toplam 3,6 kWh/ m^2) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Çizelge 2.2' de verilmiştir [8].

Çizelge 2.2. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi (Kcal/cm ² -ay) (KWh/m ² -ay)		Güneşlenme Süresi (Saat/ay)
Ocak	4.45	51.75	103.0
Şubat	5.44	63.27	115.0
Mart	8.31	96.65	165.0
Nisan	10.51	112.23	197.0
Mayıs	13.23	153.86	273.0
Haziran	14.51	168.75	325.0
Temmuz	15.08	175.38	365.0
Ağustos	13.62	158.40	343.0
Eylül	10.60	123.28	280.0
Ekim	7.73	89.90	214.0
Kasım	5.23	60.82	157.0
Aralık	4.03	46.87	103.0
Toplam	112.74	1311	264.0
Ortalama	308.0 cal/cm ² -gün	3.6 kWh/m ² -gün	7.2 saat/gün

Çizelge 2.3.'e göre Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da Çizelge 2.3.'de verilmiştir [8]. Ancak, bu değerlerin Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. Bu durumun nedenleri arasında, öncelikle DMI'nin güneş enerjisi ölçümlerini, enerji amaçlı değil tarımsal klimatoloji amaçlı ölçmüş olması, kullanılan cihazların hassasiyetinin düşük olması ve zamanla istasyonların şehir içinde kalması yer almaktadır [8].

Çizelge 2.3. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

3. FOTOVOLTAİK PİLLER

Bu bölümde fotovoltaiik etki ve fotovoltaiik pil yapılarından bahsedilecektir.

3.1. Fotovoltaiik Etki

Fotovoltaiik etki birbirinden farklı iki malzemenin ortak temas bölgesinin (common junction) foton radyasyonu ile aydınlatılması durumunda bu iki malzeme arasında oluşan elektriksel potansiyel olarak tanımlanabilir.

Yeterli enerjiye sahip fotonlar yarı iletken malzemelerde boşluk-elektron çifti oluşturur. {Boşluk→ + yüklü; elektron→(-) yüklü}

Fotonlar dalga boylarıyla, frekanslarıyla ve enerjileri ile karakterize edilebilirler.

$$c = \lambda \cdot f$$

$c \rightarrow$ Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s); $f \rightarrow$ Frekans (hz); $\lambda \rightarrow$ Dalga boyu (m)

Foton enerjisi ise;

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$E \rightarrow$ Foton enerjisi ; $h \rightarrow$ Plank sabiti ($6,626 \cdot 10^{-34}$ j.s)

Fotovoltaiik etki için üç koşul gereklidir.

i) Yarı iletkende, foton enerjisi ile yeni elektron-boşluk çiftleri üretilmelidir. Bunun için yarı iletkene gelen fotonun taşıdığı enerji, yarı iletkenin yasak bant aralığından daha büyük olmalıdır. Fotonun taşıdığı enerji ile dalgaboyu arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur:

$$E = \frac{hc}{\lambda} > E_G \quad hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m}$$

Burada h Plunck sabitini, c ışığın boşluktaki hızını ve λ ise fotonun dalgaboyunu temsil etmektedir. E_G yasak bant aralığı ve E de fotonun enerjisidir.

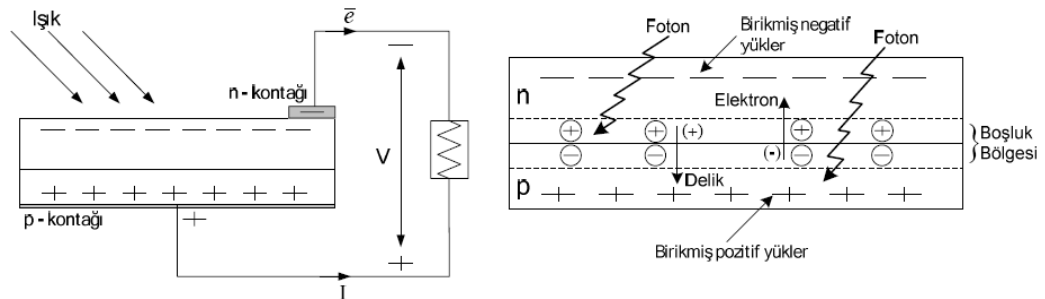
ii) Üretilen azınlık taşıyıcılar eklemdeki elektrik alana ulaşabilmeli ve elektrik alan etkisi ile birbirinden ayrılmalıdır.

iii) Elektrik alan ile birbirinden ayrılan azınlık taşıyıcılar, difüzyonla yollarına devam edebilmeli ve yük üzerinden akım akıtabilmelidir.

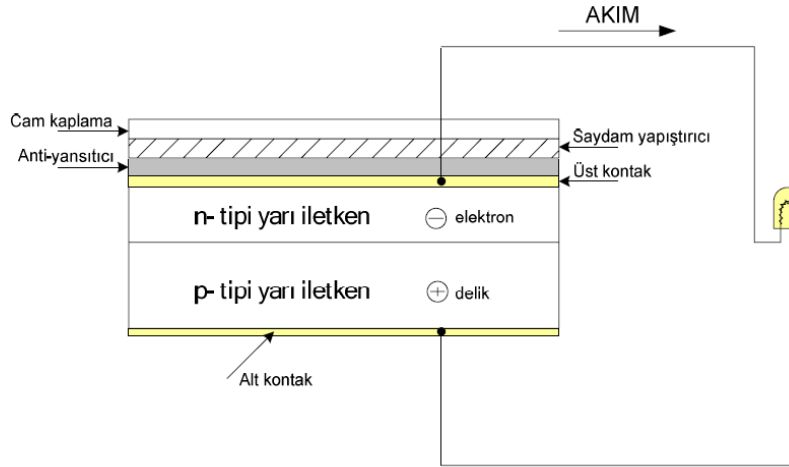
Yukarıda belirtilen birinci ve üçüncü şartlar akım üretimi, ikinci şart ise voltaj üretimi için gerekmektedir.

3.2. Fotovoltaik Hücrelerinin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Bir fotovoltaik hücresinin çalışma prensibi klasik p-n eklemli diyot ile çok benzerdir. Işık eklem tarafından absorbe edilince, absorbe edilmiş foton enerjisi malzemenin elektron yapısına aktarılır ve eklem civarında oluşan boşluk bölgesinde, ayrıışan yük taşıyıcıların oluşmasına neden olur.



Şekil 3.1. Işık altındaki fotovoltaik yapının diyagramı



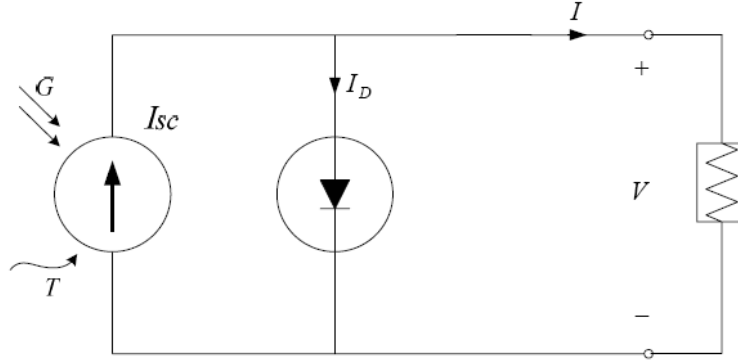
Şekil 3.2. Fotovoltaik hücrenin basit yapısı

Eklem bölgesindeki elektrik yükü taşıyıcıları bir potansiyel oluşturur ve harici bir devre üzerinde akım sirkülasyonu olur. $I \cdot R_{devre}^2$ elektrik enerjisine dönüşen güç olup, geriye kalan ve elektrik enerjisine dönüşmeyen foton gücü fotovoltaik hücrenin sıcaklığını artırır.

Dış devreye bağlanan iletkenler delikleri iletemeyeceğinden dolayı sadece elektronlar dış devre boyunca akar. n kontağı üzerinde biriken elektronlar n-den p'ye doğru ve yüzeyinde deliklerle birleşerek devreyi tamamlar.

Bir fotovoltaik hücresinin basit yapısı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Foto akımlarını toplamak için eklemim her iki tarafına metal kontaklar yerleştirilmiştir. Hücrenin ön yüzü, yansıtmayı minimum seviyede tutacak ve mümkün mertebe çok miktarda ışığı yutacak anti yansıtıcı bir kaplama ile kaplıdır. Ayrıca mekanik koruma için en dış yüzeyi koruyucu bir cam ile kapalı olup, bu cam saydam bir yapıştırıcı ile sisteme tutturulmuştur.

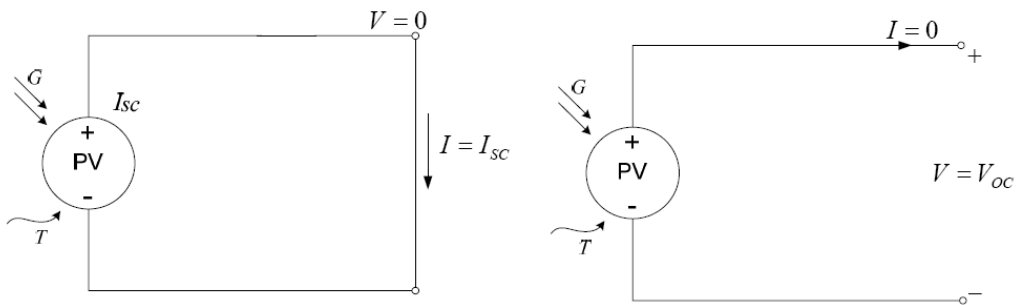
Bir fotovoltaik hücrenin basit elektriksel eşdeğer modeli aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.3. Bir fotovoltaik hücrenin basit elektriksel eşdeğer modeli

Devredeki ideal akım kaynağı maruz kaldığı güneş akısı ile doğru orantılı olarak akım verir. Gerçek bir PV hücresinde temel olarak iki özellik ile ilgilenilir:

- (i) Kısa devre akımı (I_{sc})
- (ii) Açık devre gerilimi (V_{oc})



Şekil 3.4. Eşdeğer devre modeli kullanılarak elde edilen matematiksel model

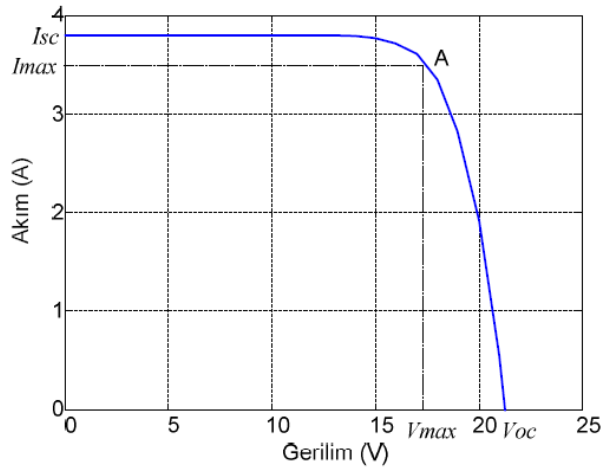
$$I = I_{sc} - I_d$$

I_d diyot akımı yerine yazılırsa:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{kT}} - 1 \right)$$

$$25^0 \text{ C için } I = I_{sc} - I_0 (e^{38,9V} - 1)$$

Yukarıdaki denklem kullanılarak bir fotovoltaik hücreye ilişkin akım-gerilim ilişkisi çizilebilir.



Şekil 3.5. Herhangi bir hücre için akım-gerilim karakteristiği

$$I = 0 \text{ için } V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \text{ (Açık Devre Gerilimi)}$$

$$V_{oc} = 0.0257 \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \text{ (25}^0 \text{ C için } V_{oc} \text{ gerilimi)}$$

3.3. Fotovoltaik Pillerinin Tarihçesi

İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914

yılında fotovoltaiik diyotların verimliliği %1, değetine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaiik diyotlar ilk kez 1954 yılında silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaiik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaiik güç sistemleri 1960' ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir. 1970' li yılların başlarına kadar, güneş pillerinin uygulamaları ile sınırlı kalmıştır. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954' ler de başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. petrol bunalım"ını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika' da, Avrupa' da, Japonya' da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. 1975' ten sonraki ilk 15 yılda özellikle uzay programları için silikon güneş pillerinin üretimi yılda ortalama 100 kW civarındaydı. 1987 yılına doğru tüm dünya içinde yerküre uygulamaları için kullanılan modellerin yıllık siparişi 1986 yılında 28.6 MW' a ulaştı. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme, basit, çevre dostu olan fotovoltaiik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaiik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olarak

değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek “sosyal maliyet” göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemlerden fosile dayalı sistemlerin daha ekonomik olarak değerlendirilebilir [7].

3.4. Fotovoltaik Pil Yapıları

Güneş pili teknolojisi, kullanılan maddeler ve yapım türleri açısından son derece zengindir. Güneş pili yapımı için şu anda kullanılmakta olan bir düzineden fazla maddenin yanı sıra, yüzlerce maddenin de üzerinde çalışılmaktadır. Belli başlı güneş pili türleri aşağıda anlatılmaktadır [9].

3.4.1. Kristal silisyum güneş pilleri

Silisyum yarı iletken özellikleri tipik olarak gösteren ve güneş pili yapımında en çok kullanılan bir maddedir ve uzun yıllarda bu konumunu koruyacak gibi görünmektedir. Fotovoltaik özellikleri daha üstün olan başka maddeler de olmakla birlikte, silisyum hem teknolojinin üstünlüğü nedeniyle hem de ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir.

3.4.2. Monokristal silisyum güneş pilleri

İlk ticari güneş pillerinde, CHROZALSKI kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapılı silisyum kullanılmıştır. Fotovoltaik endüstride hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve termal reaksiyonlardan geçirilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe çekirdek denen tek kristal yapılı bir silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış olur. Bu silisyum külçe olur olmaz bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu, iki

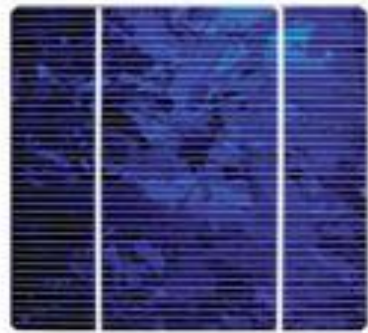
aşamada olur. Önce külçe dikdörtgen bloklar şeklinde kesilir. Daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak pil şeklinde işlenir. Verimleri %15 civarındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajıdır.



Şekil 3.6. Monokristal silisyum güneş pili

3.4.3. Polikristal silisyum güneş pilleri

Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen polikristal Silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verim de daha düşük olmaktadır. Verim, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır.



Şekil 3.7. Polikristal silisyum güneş pili

3.4.4. Ribbon silisyum güneş pilleri

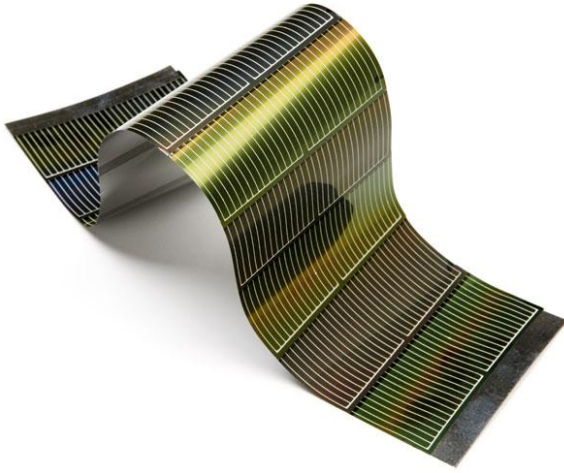
Bu piller, malzeme kaybının azaltılması amacıyla levha halinde silisyum tabakalarından yapılırlar. Çeşitli yöntemlerle (Efg, Dendritik ağ) elde edilen bu piller, halen geliştirme aşamasındadır. Verimleri laboratuvar şartlarında %13-14 arasındadır.



Şekil 3.8. Ribbon silisyum güneş pili

3.4.5. İnce film güneş pilleri

Bu teknikte, absorban özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 1-500'ü kalınlığında) güneş pilleri yapılır. Örneğin amorf silisyum güneş pillerinin absorpsiyon katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0.7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile absorblanabilirken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu absorblamak için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılı güneş pillerinde daha az malzeme kullanılır ve montaj kolaylığı nedeniyle bir avantaj sağlar.



Şekil 3.9. İnce film güneş pili

3.4.6. Amorf silisyum güneş pilleri

Amorf silisyum güneş pilleri (a-Si), ince film güneş pili teknolojisinin en önde gelen örneğidir. İlk yapılan a-Si piller Schottky bariyer yapısında iken, daha sonraları p-i-n yapıları geliştirilmiştir. P-i-n yapısındaki pillerin fabrikasyonu kalay oksitle kaplı iletken bir yüzeyin üzerine çöktürme yöntemi ile yapılır, bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Verimleri %5-8 arasındadır. Ancak bu piller, kısa zamanda bozunuma uğrayarak çıkışları azalır.



Şekil 3.10. Amorf silisyum güneş pili

3.4.7. Bakır indiyum diselenoid güneş pilleri

Periyodik tablonun birinci, üçüncü ve altıncı gruptan elementlerin üçüncünün yada daha fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan bu bileşik yarı-iletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak enerji aralıkları güneşin spektrumu ile ideal bir şekilde uyuşacak biçimde ayarlanabilir. Bakır indiyum ve selenyum dan yapılan üçlü bileşik yarı-iletkenle başlayan bu grup (CuInSe_2) güneş pilleri olarak anılır. CdTe (Kadmiyum Tellür) güneş pillerine en yakın rakip olarak gözükmektedir. Bu gün CuInSe_2 ince film güneş pillerinin çoğunluğu içerisinde Ga elementinin katılması ile daha yüksek verimlilikler elde edilir. Ancak yarı-iletkeni oluşturan element sayısı artıkça gereken teknoloji ve malzemenin özelliklerinin denetimi de bir o kadar karmaşık duruma gelmektedir. Laboratuardaki küçük alan pillerin verimliliği %18'e kadar ulaşırken, 900cm^2 yüzey alana sahip modüllerin verimlilikleri ancak %15 dolayındadır. CuInSe_2 pillerde uygulanan teknolojilerden iki tanesi öne çıkmıştır. Bunlardan birincisi, elementlerin eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırılmasıdır. İkinci yöntem, herhangi bir yöntemle büyütülen bakır-indiyum ince film alaşımının uygun bir ortamda selenyumla tepkimeye sokulmasıdır (Selenizasyon). Her iki durumda da soğurucu olarak kullanılan CuInSe_2 yarı-iletken, CdS ile bir araya getirilerek heteroeklem diyot oluşturulur. CdS tabakaların üretilmesinde ortaya çıkan yöntem CdTe tabakalarında olduğu gibi burada da kimyasal banyo yöntemidir. Metal elementlerin buharlaştırılmasının ardından selenizasyonu seçen ISET, Shell-Showa ve Siemens Solar gibi firmalardan Siemens Solar 5-10watt değerinde küçük modül üretiminde ABD başlamıştır. CuInSe_2 tabakaların büyütülmesinde Stuttgart Üniversitesi (Almanya) tarafından geliştirilen ve yine bir alman firması olan ZSW tarafından üretime hazır hale getirilen eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırma yöntemi üretim yöntemlerinden birisidir. Bu ince film güneş pillerinde test altındaki uzun dönem modül verimlilikleri %10 değerinin altında kalmaktadır.



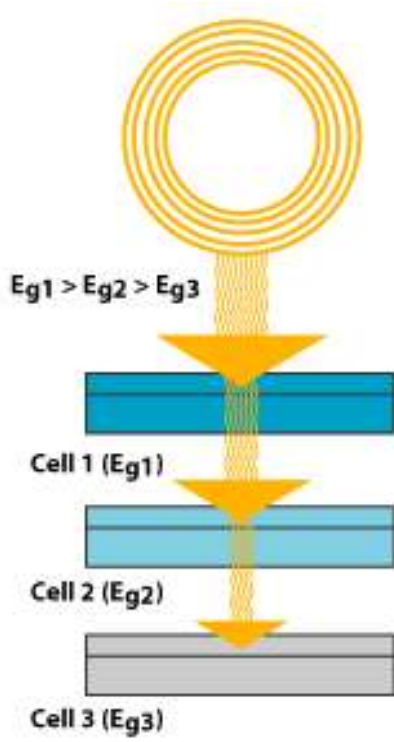
Şekil 3.11. Bakır indiyum diselenoid güneş pilleri

3.4.8. Yüksek verimli yeni nesil güneş pilleri

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, güneş enerjisinden daha yüksek verimde elektrik enerjisi elde etmek için yeni modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, daha önce bahsedilen klasik güneş pillerinin aksine birden fazla yasak bant aralığına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı da daha geniş enerji aralığına sahiptir. Bu yüzden daha fazla güneş spektrumunun soğurulmasına imkan sağlar ve daha yüksek bir verimle elektrik enerjisinin elde edilmesine imkan sağlar. Bu modeller aşağıda detaylı bir şekilde incelenecektir.

Tandem güneş pilleri

Tandem güneş pilleri güneş enerjisinden daha fazla verim elde etmek için farklı yasak bant enerji seviyelerine sahip yarı iletkenlerin birleştirilmesiyle oluşturulmuş yüksek verimli bir güneş pili modelidir. Yasak bant enerji seviyesi en üstte olacak şekilde büyükten küçüğe doğru yukarıdan aşağıya dizilir. Optimum 3-4 katlıdır. Aksi takdirde kayıplardan dolayı verim azalır.



Şekil 3.12.Tandem Güneş Pili Yapısı

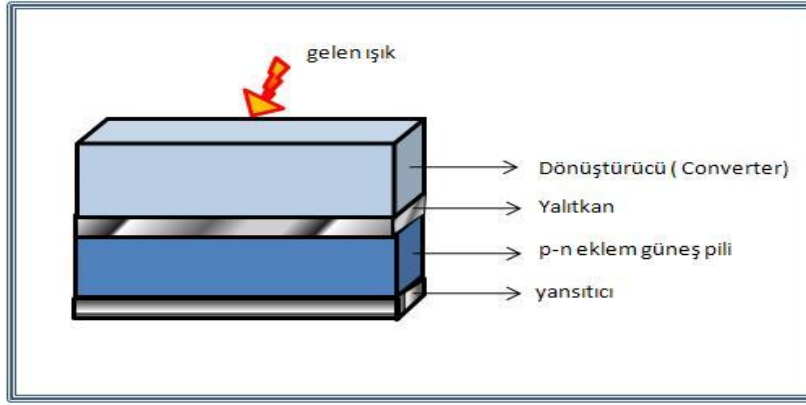
Tandem güneş pilleri ilk olarak yüksek güç gerektiren uzay uygulamaları için kullanılmıştır. Şu an yeryüzünde de diğer güneş pilleriyle konsantre bir şekilde kullanılmaktadır. Maliyet olarak yüksek olsa da verimi de yüksek olduğu için sıradan silikon güneş pilleriyle bir rekabet içindedir. ABD Enerji Bakanlığı'nın Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL)'ndaki bilim adamları bu yapıyla yüzde 42,8 verim elde etmiştir. Buda sıradan silikon güneş pili veriminin oldukça üstünde bir değerdir.

Aşağı dönüşüm güneş pilleri

Güneş pilindeki temel kayıplardan biri yüksek enerjili fotonların fazlalık enerjilerinin termalizasyonla kaybolmasıdır. Aşağı Dönüşüm Güneş Pili bu kayıpları azaltmak için tasarlanmıştır.

Bu yapıda yüksek enerjili bir fotonu, düşük enerjili iki fotona çeviren dönüştürücü geleneksel p-n eklem güneş pilinin ön yüzüne yerleştirilmiştir. İdeal yapıda dönüştürücü pilden elektriksel olarak izole edilmiştir. Dönüştürücü iki yada daha fazla sayıda fotonu soğuran güneş pilinde yüksek enerjili foton başına üretilen e-h çifti sayısı artar. Buda fotoakımı artırır.

Dönüştürücü pilin arka yüzeyine yerleştirilir. Bu yapıda çift yüzlü güneş pili kullanılmasını gerektirir. Ayrıca yüksek enerjili fotonları geçirmesi gerekir.



Şekil 3.13. Aşağı dönüşüm güneş pili

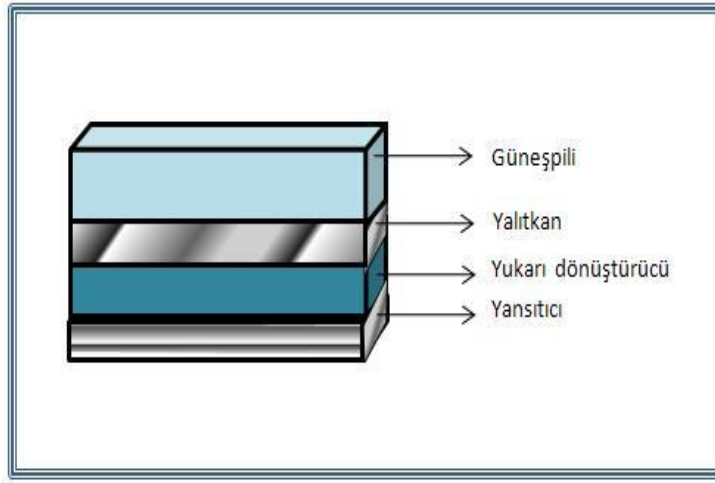
Gelen fotonun dönüştürülmesi üç basamaklı bir yapı ile mümkündür. Bu yapıda gelen fotonun enerjisi $h\nu < 2E_G$ ise foton dönüştürücüye geçip (dönüştürücü ön yüzeyde ise) pil tarafından soğrulmaktadır. Eğer foton enerjisi $h\nu \leq 2E_G$ ise dönüştürücüde VB'deki bir elektronu CB'ye çıkarmaktadır. Daha sonra bu elektron ışımalı rekombinasyonla önce AB'ye daha sonra VB'ye iner. Bu esnada yayılan E_G enerjili iki foton p-n eklem pil tarafından soğrulur.

Böylece tek fotonla iki e-h çifti üretilmiş olur. Bu yapı dönüştürücüde ışımasız rekombinasyon meydana gelmediği varsayımına dayanır.

Dönüştürücü arka yüzeyde olursa güneş pilinin bantları sınırlandırılarak yüksek enerjili fotonların dönüştürücüye ulaşması sağlanır.

Yukarı dönüşüm güneş pilleri

Yukarı dönüşüm güneş pilleri p-n eklem güneş pilinin arka yüzeyine bir dönüştürücü konması ile elde edilir. Dönüştürücünün görevi küçük enerjili fotonları büyük enerjili fotonlara dönüştürmektedir. Dönüştürücü güneş pilinden elektriksel olarak yalıtılmıştır.



Şekil 3.14. Yukarı dönüşüm güneş pili

Yukarı dönüşüm yasak bandında bir ara bant mevcuttur. E_G 'si pilin E_G 'sine eşittir. Dönüştürücüde iki adımlı soğurma ile (VB-IB, IB-CB) elektronlar iletkenlik bandına çıkarılır. Bu elektronların bir kısmı ışımalı rekombinasyonla VB'ye inerler. Bu esnada açığa çıkan fotonun enerjisi $\geq E_G$ olduğundan pil tarafından soğrulur.

Çoklu Spektrum Güneş Pilleri

Çoklu spektrum güneş pillerinin üretimi geleneksel güneş piline özel bir kılıf yapılarak gerçekleştirilmektedir [53-54]. Bu özel kılıf sayesinde yukarı ve aşağı enerji dönüşümü sağlanmaktadır. Gelen fotonun enerjisi, bant aralığından küçükse yukarı, büyükse aşağı enerji dönüşümü gerçekleşmektedir. Teorik olarak verimlilik sınırı %85,4 olmasına rağmen daha gerçekçi yaklaşımlar yapıldığında verimlilik %50

olarak belirlenmektedir. Bu tür malzemelerin dezavantajı ise özel kılıfın maliyetinin çok yüksek olmasıdır.

Çoklu Soğurma Güneş Pilleri

Geleneksel güneş pillerinde, bir foton ile sadece bir elektron-boşluk çifti üretilmektedir. Çoklu soğurma güneş pillerinde ise impact iyonizasyonu (Auger üretimi) ile, iki foton bir tek elektron-boşluk çifti üretmek üzere soğurulabilmektedir veya yüksek enerjili bir foton birden fazla elektron-boşluk çifti üretebilmektedir [55-56]. Bazı malzemeler için çok yüksek “impact ionization” seviyeleri ölçülmüştür, ancak bunun güneş pilinin verimliliğinde bir artış sağladığı henüz ispatlanamamıştır.

Çoklu Sıcaklık Güneş Pilleri

Çoklu Sıcaklık pilleri enerjiyi pil içerisindeki sıcaklık değişimlerinden üretmektedirler. Sıcaklık değişimi, latıs sıcaklığının veya taşıyıcı sıcaklığının değişimi olabilir. Sıcaklık değişimi sağlamak için bant yapısında değişimler oluşturulabilir [57].

Ara Bant Yapılı Güneş Pilleri

Ara bant yapılı güneş pilleri (ABGP), güneş pili malzemesinin yasak bant aralığında bir veya daha fazla ara bant üretilmesi ile elde edilmektedir [11]. Böylece gelen fotonun enerjisi, bant aralığından küçük olsa da soğurma gerçekleştirilmekte ve foto akım artarken çıkış gerilimi azalmamaktadır. Optimum çalışma şartlarında, tek ara banda sahip bir ABGP’nin verimi %63,2 olarak rapor edilmiştir. Sonsuz sayıda ara bant bulunması durumunda ise %85’lik bir verim hesaplanmıştır [58]. Bu tez çalışmasında ABGP’ler detaylı olarak incelenecektir.

4. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİ(ABGP)

4.1. Giriş

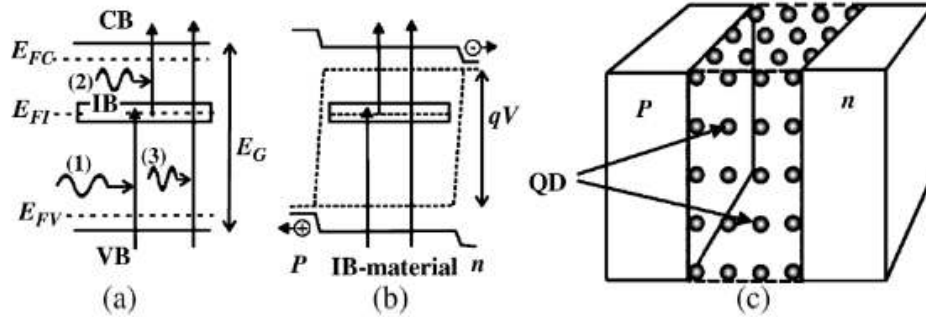
Ara bant yapılı güneş pilleri, bilinen tek bantlı güneş pillerindeki verim performansını artırmak için tasarlanmış bir güneş pili modelidir. Bu model, iki bantta fotonları absorbe ederek, çıkış gerilimini düşürmeden tek bantlı güneş pillerine göre daha fazla foto akım üretme temeline dayanmaktadır. Bu, elektriksel olarak yalıtılmış ve kısmen doldurulmuş bir ara bantın yasak bant içine yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Kullanılan bu materyal ara bant materyali olarak adlandırılmaktadır [10]. Bu bölümde günümüzdeki ara bant yapılı güneş modelleri hakkındaki güncel araştırmalara değinilecektir.

Tek bant yapılı güneş pillerindeki temel kayıp mekanizmalarından biride düşük bant enerjili fotonların soğurulamaması ve bu yüzden akıma hiçbir katkı sağlamadan boşa gitmesidir. Ara bant yapılı güneş pilleri (ABGP), düşük bant enerjili fotonları soğurarak çıkış gerilimini düşürmeden yüksek foto akımı elde etme düşüncesinden yola çıkılarak tasarlanmıştır [11-13]. Bu düşük bant enerjili fotonlar, valans bandıyla iletkenlik bandı arasına konulan bir ara bant sayesinde soğurulabilir. Bu ara bant, düşük bant enerjili fotonları iki adımda soğurduğundan, daha fazla elektron-boşluk çiftinin üretilmesine imkan vermektedir. Birinci adım, valans bandından ara banda elektron geçişi, ikinci adım ara banttan iletkenlik bandına elektron geçiştir. Bu konsept göz önüne alınarak, teorik çalışmaların temellerinin ve prensiplerinin uyduğu ticari ara bant yapılı güneş pilleri üretilmeye çalışılmaktadır [10]. Bu anlamda, günümüzdeki ara bant yapılı güneş pili çalışmaları, önemli noktaları ve uygulamalarından bahsedilecektir.

4.2. Ara Bant Yapılı Güneş Pillerinin Temelleri

Ara bant yapılı güneş pillerinin yapısını ve günümüze kadarki gelişmelerini anlamak için bazı anahtar kavramlardan bahsedilmelidir. Şekil 4.1.a bu konuda bize yardımcı

olacak. Bu şekil valans bandı ile iletkenlik bandı arasına yerleştirilmiş bir ara bant materyalinin bant diyagramını göstermektedir. (1) ve (2) ile numaralandırılmış düşük enerjili fotonların nasıl soğurulduğuna dikkat edin: foton soğurulması valans banttan ara banda elektron geçişini sağlıyor (1.adım), diğer bir fotonun soğurulmasında ara banttan iletkenlik bandına elektron geçişini sağlıyor (2.adım) [10].



Şekil 4.1. (a) Ara bant yapılı güneş pilinin temel gösterilişi. CB, IB ve VB sırasıyla iletkenlik bandı, ara bant ve valans bandını temsil ediyor, E_{FC} , E_{FI} ve E_{FV} üç bantta elektronlar için kuasi-fermi seviyeleridir (b) Temel yapı: ara bant materyali p ve n emitörleri arasına yerleştirilmiş (c) Kuantum dot(QD) ara bant yapılı güneş pilinin şematik yapısı

Ara bant sayesinde soğurulan bu iki fotonun yanı sıra enerjileri bant aralığından büyük fotonların sayesinde direk valans banttan iletkenlik bandına elektron geçişi de vardır (3.adım). Bu fotonların sadece tek bant yapılı güneş pilleri tarafında soğurulması durumunda, yani eğer ara bant olmasaydı bundan daha düşük enerjili fotonlar akıma katkı sağlamadan boşa gidecekti. Şu çok iyi biliniyor ki, fotovoltaiik pillerde çok yüksek verim oranına ulaşabilmek için ışımalı rekombinasyonun baskın olduğu varsayılıyor. Can alıcı nokta neden farklı enerji seviyeli hücreler kullanmak yerine bir ara bant yapılı güneş pili tasarladığımızdır. Bu, üzerinde duracağımız başlıca konulardan biridir. Mesela GaAs gibi farklı bant aralığına sahip bir malzeme neden kullanmıyoruz. Çünkü GaAs ya da farklı bir fotovoltaiik malzemenin bant aralıkları sabittir ama biz ara bant kullanarak bu malzemenin bant seviyelerini ortam şartlarına göre istediğimiz oranda değiştirerek daha fazla fotonun soğurularak akıma katkıda bulunmasını sağlayabiliriz. Bu da ışımalı rekombinasyonun ışımsız rekombinasyona göre baskın olmasına neden oluyor. Sonuç olarak, biz ara bant

kullanarak malzemenin ışımaz rekombinasyon oranının düştüğünü varsayıyoruz [10].

Işımalı rekombinasyon baskın olduğunda, üç bant arasındaki rekombinasyon zamanlarının her üç banttaki taşıyıcı dinlenme zamanından çok daha büyük olduğunu varsayıyoruz. Ara bant yapılı güneş pilinin çalışması esnasında üç banttaki taşıyıcı konsantrasyonları sırasıyla iletkenlik, ara ve valans bant için kendi Kuasi-Fermi seviyeleri E_{FC} , E_{FI} ve E_{FV} ile tanımlanmaktadır. Bu kuantum nokta uygulaması yoluyla önerilen aşağıda açıklanacak olan, pratiğe konulması muhtemel en zor konudur. Buna ek olarak maksimum verim için malzeme içindeki üç Kuasi-Fermi seviyesinin de sabit olduğu kabul edilir [10].

Şekil 4.1.b.'de ara bandın p^+ ve n^+ emitörleri sayesinde dış kontaklardan izole edildiğine dikkat ediniz. Böylece akım ara banttan dışarı çıkamaz. Bu da üzerinde durulması gereken üçüncü temel konudur. Hücreler tarafından üretilen akım, dış yüke iletkenlik bandından elektron, valans banttan boşluk olarak gönderilir. Bunu başarmak için şekil 1.b'de gösterildiği gibi ara bant, geleneksel yarı iletken yapılmış emitörlerin arasına yerleştirilmiştir[12-13]. n^+ emitöründen boşluk, p^+ emitöründen elektron çıkışı olmaz. Bu yapıda, n^+ emitöründeki elektronlar için Kuasi-Fermi seviyesi, ara bandın iletkenlik bandındaki elektronlar için olan Kuasi-Fermi seviyesini düzenler. Bu esnada p^+ emitöründeki boşluklar için kuasi-Fermi seviyesi, ara bandın valans bandındaki boşluklar için olan kuasi-Fermi seviyesini belirler. Pil çıkış gerilimi emitörlerdeki çoğunluk taşıyıcıların kuasi-Fermi seviyeleri arasındaki farkla verildiği için, bu gerilim ara bandı, iletkenlik bandından ve valans banttan ayıran herhangi bir alt bant aralığı tarafından değil, toplam bant aralığı E_G tarafından sınırlandırılır [11]. Bu, ara bant yapılı güneş pilinin, eş zamanlı olarak, düşük enerjili fotonları da soğurarak daha fazla akım oluşturmasını ve de daha yüksek çıkış gerilimi verilmesini sağlar.

Dördüncü temel kavram da, ara bant yapılı güneş pilinde ara bandın, elektronlarla yarı doldurulmuş bir yapıya sahip olması gerektiğidir. Bu, valans banttan gelen

elektronlar için yer sağlamak ve elektronları iletkenlik bandına göndermek için gereklidir. Şekil 4.1.c.'de bu yapı gösterilmiştir.

Sonuç olarak maksimum verimi elde etmek için foton seçiciliği olduğu kabul edilir. Bu her fotonun sadece kendi enerji aralıklarında soğurulduğu varsayılır.

Bahsedilen temellere göre ara bant yapıları güneş pili için full konsantre güneş ışığı altında elde edilen maksimum verim 63.2%'dir [11,15,16]. Bu oran tek yapıları sıradan güneş pillerinde 40.7%'dir [11].

4.3. Ara Bant Yapılı Güneş Pili Araştırmalarındaki Güncel Durum

4.3.1. Ara bant yapıları güneş pili genel teorisindeki gelişim

Önceki bölümde fotovoltaj dönüşüm verimini yükseltmek için yarı dolu ve elektriksel olarak izole edilmiş ara bantla taşıyıcının ek iki adımlı üretim yolundan bahsedilmiştir. Aslında, boşluk içindeki aşağı bant seviyesindeki fotonları soğurmak için, bir bant değil de ayrık bir elektron seviyesini kullanma fikri daha önce önerilmiş ve yayımlanmıştır [16-18]. Bununla birlikte, ayrık seviyenin hücrenin verimini düşüreceğinin tartışıldığı birçok çalışma vardır [22-24]. Bunun altında yatan sebep, elektron dalga fonksiyonunun ayrık seviyedeki yerleşmiş karakterinin, muhtemelen olarak ışısız rekombinasyona hatta Shockley-Read-Hall (SRH)'ye yol açabileceğidir [22-23]. Ara bant yapıları güneş pillerinin temellerinde daha önce de bahsedildiği gibi, bu durumun oluşmayacağını varsayıyoruz. Çünkü, ara banttaki elektron dalga fonksiyonunun genişletilmiş karakteristiği, bantlar arasındaki ışımali rekombinasyon şansını artırıyor. Bunun yanında, çoklu kuantum kuyulu (MQW) güneş pilleri kullanımı da, aşağı bant seviyeli fotonları soğurmak için önerilmiştir ama tek boşluklu güneş pillerinin verimini artırıp artırmadığı konusunda anlaşmazlıklara sebep olmuştur [24-27]. Bu uygulama ikiden fazla kuasi-Fermi seviyesi kullanarak açıklanmıştır [28]. Şu anki ara bant yapıları güneş pili modelleri, yıllardır süregelen çalışmalarla ilk temel konseptinin geliştirilmesiyle elde

edilmişlerdir [11-13]. İlk teorik gelişmeler grubu ara bant yapılı güneş pilinin termodinamik uyumuyla ilgilidir [28-31]. Yapılan teklifler termodinamiklerle uyumludur. Bu çalışma, termodinamik kurallara aykırı olmayan, aşağı enerji seviyeli fotonların soğurulmasına dayanan son çıkan modellerin gerekliliğini gösteriyor. Teorik gelişmelerin birinci grubu ara bant yapılı güneş pilinin termodinamik tutarlılığıyla ilgilidir. Son çıkan ara bant yapılı güneş pil modellerinde aşağı enerji seviyeli fotonların soğurulması, termodinamik kurallara aykırı değildir. Ayrıca, geliştirilen modellerde, fotovoltaiiklerde termodinamik sınırlamalarda çalışılmış ve ara bant yapılı güneş pili modellerine pozitif olarak uygulanmıştır. Bir diğer önemli teorik katkılar grubu ise, daha önce de bahsedilen foton soğurma seçiciliği hipotezi ile ilgilidir. Bu aslında çok fazla sınırlayıcı bir etken olarak görünse de, bazı kurallar tolere edilerek kabul edilirse ya da soğurma enerji eşik seviyeleri enerji bantlarının genişliğinden hesaplanırsa, doğru olarak sayılabilir. Buna ek olarak, eğer her bir soğurma katsayısı diğerlerinde çok daha fazla büyükse ışık yakalama teknikleri ile birlikte, foton soğurma seçiciliği hipotezi daha esnek olabilir. Üçüncü teorik çalışma grubu, bir hücre konseptinin sadece bir ara bantla ya da üç-bant hücresiyle (CB,IB ve VB) n-banta ya da çoklu bant solar hücresine çoğaltıldığı modeldir. Sonsuz sayıda alt-boşluk içeren çalışmalarda verim %86.8 olarak elde edilmiştir [32]. Üç bantla %63.2, dört bantla %71.7 verim elde edilmiştir [33]. Her bant için sonsuz bant genişlikleri düşünülmüş fakat o zamanda verim sırasıyla üç ve dört bantlılar için %58.9 ve %59 seviyelerine düşmüştür [34]. Ara bant yapılı güneş pilinin davranışında Auger rekombinasyonunun etkilerinin katkı sağladığı noktalar vardır. Auger rekombinasyonu bazı ideal olmayan cihazlar için ideal olabilir. Ayrıca impact iyonizasyonun da verim üzerinde etkili olduğunu belirten çalışmalar olmuştur [27-28]. Diğer bölümde, günümüzde Ara bant yapılı güneş pillerinin pratiğe dökülmesi için yapılan uygulamalardan bahsedilecektir.

4.3.2. Ara bant modelini pratiğe koymayı amaçlayan çalışmalar

Günümüzde IBSC üretmek için üç farklı yaklaşım uygulanmaktadır [37]. (1) Bir malzemenin ara bantla birlikte direkt sentezi; (2) Yüksek nano-geçirgen(nanoporous) olarak adlandırılan malzeme kullanımı; (3) Kuantum dotlar kullanılarak yapılan uygulama(QD-IBSC)

Direk sentez

IBSC modelini pratiğe koymaya çalışıldığında ortaya çıkan ilk soru yarı dolu ara bantlı bir malzemenin bulunabilip bulunamadığıdır. Bu soruyu yanıtlamak için gerekli stratejilerden biri gerekli bant diyagramına sahip ara bandın kristal yapıların ve latiste tam anlamıyla özel olarak konumlandırılmış atomik boşluklara sahip olmasıdır. Wahnnon ve Tablero, latisin doğru taraflarına uygun geçiş atomlarını koyarak, teorik olarak çeşitli III–V bileşik yarıiletkenlerin temel kristal latisinin modifikasyonunu araştırmışlardır. Kendi başlangıç denklemlerini kullanarak Ga_4As_3Ti bileşiğinin yarı dolu ara bant olarak kullanılabileceğini bulmuşlardır [38-39]. Bu yapıdaki optik geçişin karakterizasyonu hakkında çalışmışlardır [40]. Geriye kalan soru, böyle bir bileşiğin termodinamik olarak her durumda uygun olup olmadığı ve kimyasal metotlarla sentezinin uygun bir şekilde gerçekleştirilebilip gerçekleştirilemeyeceğidir.

Çok ince soğurucu yüksek geçirgen yaklaşımı

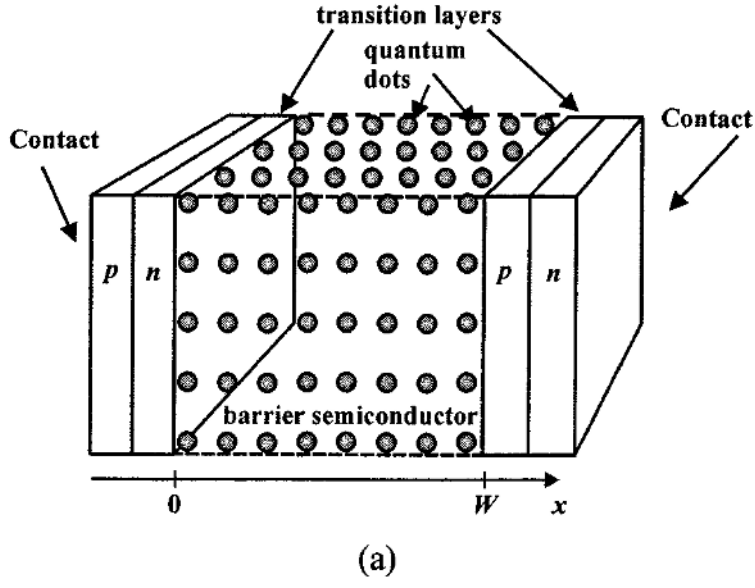
Könenkamp, Dloczik, Ernst ve Olesch saydam büyük bant aralıklı bir yarıiletkenin nano-boşluklarını(nano-cavities) hazırlamak için, uygun çok ince bir soğurucu malzeme kullanarak metotlar geliştirdiler. Bu yaklaşım düşük maliyetli bir ABGP üretmeyi amaçlamaktadır. En ilgi çekici sistemlerden biride TiO_2 ve PbS bileşiklerinin sırasıyla geçirgen ve soğurucu malzeme olmasıdır. Henüz tam bir hücre üretilmemesine rağmen bu sistemde ara adımlarda yukarı dönüşüm(up-converting) mekanizmasının varlığının izleri görülmektedir [41].

Kuantum dot-ara bant yapılı güneş pilleri (KD-ABGP)

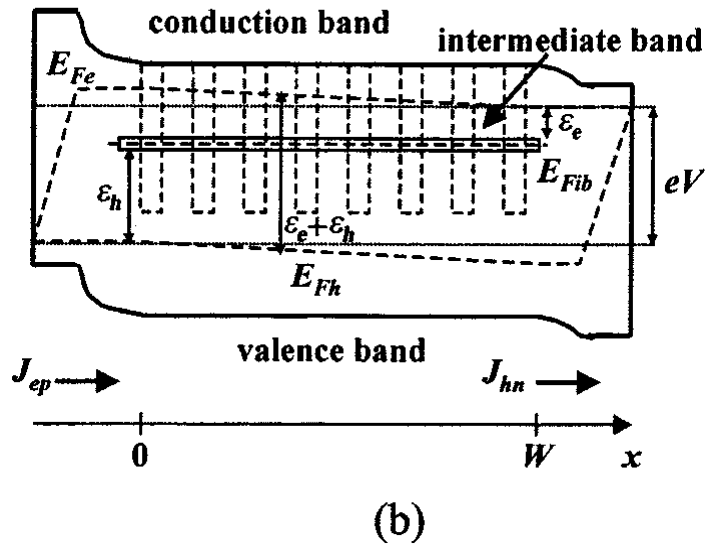
Kuantum Dot Ara bant Yapılı Güneş Pilleri(KD-ABGP) ara bant yapılı güneş pilinin temel uygulama prensiplerinin pratiğe dökülmesiyle oluşturulan bir konsept yapıdır[11-12,32,42-43]. Bu yapı, şekil 4.2.a'da gösterildiği gibi, bir dizi kuantum noktalarının(Kuantum noktaları etrafındaki küçük elektrik alanlarını kontrol ederek elektronlar içeri ya da dışarı pompalanabiliyor) uygun p ve n katmanları arasında sıkıştırılmasıyla elde edilmiştir [44]. En önemli özellik, ara bandın sıradan yarı iletkenlerin içinde olmasıdır. Bu yapının bant aralığı şekil 4.2.b'de gösterilmiştir.

Bu yapını temel amacı, hücrenin çıkış gerilimini düşürmeden düşük bant aralıklı fotonların soğurulmasını sağlayan bir güneş pili elde etmektir. $h\nu_1$ ve $h\nu_2$ gibi düşük enerji aralığına sahip fotonlar soğurularak sırasıyla, valans banttan ara banda, ara banttan iletkenlik bandına elektron geçişi sağlanır. $h\nu_3$ gibi yüksek enerji aralığına sahip fotonların soğurulmasıyla, valans banttan direk iletkenlik bandında elektron geçişi sağlanır [44].(Şekil 4.3)

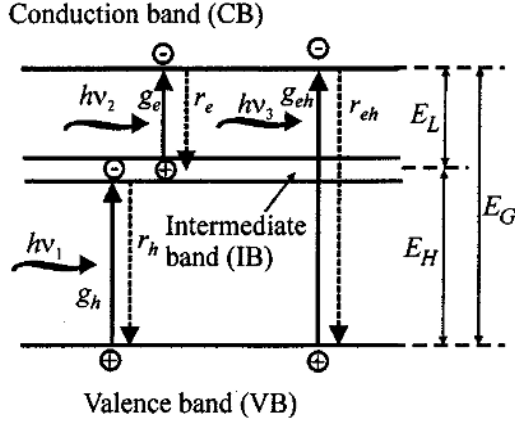
Üç tane elektronik bandın varlığından dolayı gerilim düşümü yaşanmaz. Böylece elde edilen çıkış gerilimi $x=W$ 'deki Kuasi-Fermi seviyesi ayrılması ϵ_c ve $x=0$ 'daki Kuasi-Fermi seviyesi ayrılması ϵ_v lerin toplamı kadardır.(Şekil 4.2.b.) Bu ayrılma aynı zamanda ara bandı dış kontaklardan koruyan emitörler tarafından üretilir. Geçiş katmanları ise isteğe bağlıdır. Olmadığı takdirde, p geçiş katmanı tamamen elektronlarla dolu kuantum noktalar içeren bir bölge, n geçiş katmanı ise hiç elektron içermeyen kuantum noktalar içeren bir parça haline gelecektir. Emitörler yüksek oranda katkılıandığı zaman, bu parçaların her biri kendi içlerinde bir potansiyel farka sahip olacaklardır. Dotlar bu parçalarda tamamen elektronlarla dolu ya da tamamen boş olacağından dolayı, ara bant malzemesi olarak kullanımı engellenecektir.(Bandın elektronlarla yarı dolu olması gerekmektedir.)



Şekil 4.2.a KD-ABYG'nin katman yapısı



Şekil 4.2.b Ara bandın malzeme arasına yerleştirilmiş Kuasi-Fermi ayrılımlarının da gösterildiği ışık altındaki bant diyagramı



Şekil 4.3. Kuantum dot ara banttaki üretim ve rekombinasyon süreçlerinin gösterimi

Daha önce de bahsedildiği gibi geçiş katmanlarının görevi potansiyel farkı desteklemektir. Bu geçiş katmanlarını yerine üç beş katmanlı kuantum dotlar da kullanılabilir [45-46]. Ara banttaki elektronlar için olan Kuasi-Fermi seviyesi E_{Fib} , verimli yüksek yoğunluklu dotların sonucu olarak denge pozisyonunda sabitlenmiş olarak kabul edilmektedir. Işımalı rekombinasyon mekanizmaları baskın kabul edilmektedir. Elektronlarla yarı dolu ara bant n katkılama yöntemiyle yapılmaktadır [44].

4.4. KD-ABGP İçin Sonlu Fark Modeli

Bu bölüm, Kuantum Dot Ara bant Yapılı Güneş Pilleri uygulamasını ve onun geçerlilik limitlerini göstermek için sonlu fark modeli uygulamasını anlatmaktadır. Modelin temel özellikleri, ara bant yapılı güneş pilinin iki azınlık taşıyıcılı bir malzeme olma özelliğinden ileri gelmektedir. Ara banttaki akım geçişi, bu akımın sifıra ulaştığı zaman sağladığı faydalar tartışılmaktadır. Aynı zamanda elektrik akımı da ara banttaki akım yoğunluğunu etkilemektedir. Elektron ve boşluk sürüklenme akımları, tartışılan toplam akımla kıyaslandığında, küçük kalır.

Sonlu fark metodu kullanılarak Kuantum Dot Ara bant Yapılı Güneş Pili modellenenbilir. Bu, bize ara bant içindeki taşıyıcı geçişleri hakkında bir anlayış elde etmemize imkân sağlayacaktır.

4.4.1. Başlangıç denklemleri

Başlangıç noktamız iletkenlik ve valans bandındaki elektron ve boşluklar için olan süreklilik denklemleri olacaktır.

$$\begin{aligned} \frac{1}{e} \frac{dJ_e}{dx} = & -g_e - g_{eh} - r_e + r_{eh} - g_{e,phr} \\ & -g_{e,th} - g_{eh,th} + u_{nr,e} \end{aligned} \quad (4.1.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{e} \frac{dJ_h}{dx} = & -g_h - g_{eh} - r_h + r_{eh} - g_{h,phr} \\ & -g_{h,th} - g_{eh,th} + u_{nr,h} \end{aligned} \quad (4.1.b)$$

Burada J_e iletkenlik bandında elektronların sağladığı elektron akım yoğunluğunu, J_h ise valans bandında boşlukların sağladığı boşluk akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Eşitlik (4.1.a) ve (4.1.b) eşitliklerinin sağ tarafında taşıyıcı üretimi ve rekombinasyonunu içeren terimler ilerleyen bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır.

4.4.2. Taşıyıcı üretimi ve rekombinasyon terimleri

$u_{nr,e}$ ve $u_{nr,h}$ terimleri sırasıyla elektron ve boşluklar için ışımasız rekombinasyon oranlarını ifade etmektedir. Bu oranlar bilinen tek enerji seviyeli yarı iletkenlerde aynıdır ama AYGP'nde bu oranlar farklılık gösterebilir. Bu, ara bandın varlığından kaynaklanır, iletkenlik bandında bir elektron kaybolduğunda, bu valans bantta da illaki bir boşluk kaybolacağı anlamına gelmez. Bu elektron ara bantta bir boşlukla rekombine olabilir. Bu yorum yapıldıktan sonra, ABGP modellerinde $u_{nr,e}$ ve $u_{nr,h}$ ışımasız rekombinasyon oranları sıfır kabul edilmeye başlandı. Bunun sebebi ise ışımalı rekombinasyonun ışımasız rekombinasyona göre bir hayli dominant olmasıdır [44].

g_e , g_h ve g_{eh} terimleri sırası ile ara banttan iletkenlik bandına, valans banttan ara banda ve valans banttan iletkenlik bandına elektron geçişi ile oluşan taşıyıcı üretim hızlarıdır.

$$g_e(x) = \gamma \int_E a_e F_0 \exp(-a_e x) dE \quad (4.2.a)$$

$$g_h(x) = \gamma \int_E a_h F_0 \exp(-a_h x) dE \quad (4.2.b)$$

$$g_{eh}(x) = \gamma \int_E a_{eh} F_0 \exp(-a_{eh} x) dE \quad (4.2.c)$$

a_e , a_h ve a_{eh} soğurma katsayılarıdır. AYGp'nin genel teorisine uyması açısından, bu katsayılarda örtüşme olmadığı varsayılır.

(4.2.a) - (4.2.c) arası denklemlerin kullanımı düzensiz üretim(nonuniform generation) durumu olarak bilinir. Standart taşıyıcı üretimi için olan denklemlerin modeli, arka yansıtıcısı olmayan sadece ön yüzden ışımaya maruz kalmış güneş pilleri için bulunmuştur. F_0 , E ve $E + dE$ enerji aralığında güneş pilinin birim yüzeyine birim saniyede vuran fotonların sayısıdır. Eğer güneş $T_s=6000 \text{ K}^0$ de siyah cisim ışıması yapıyor olarak kabul edilirse:

$$F_0 = X \sin^2 \theta_s \frac{2\pi E^2}{h^3 c^2 \exp\left(\frac{E}{k_B T_s}\right) - 1}$$

şeklinde olur.

Burada θ_s dünya ile güneş arasındaki açıyı temsil etmektedir ve $\sin^2(\theta_s)=1/46050$ kabul edilmektedir.

γ faktörü ise sınır bölgesinde elektron bulunmasıyla ilgili farklı bir kayıp mekanizmasıdır. Yapılan çalışmalarda en iyi sonuç bu faktörün 1 alınmasıyla elde edilmiştir [47].

(4.1.a) ve (4.1.b) deki th alt terimli ifadeler termal taşıyıcı üretimi ile ilgili ifadelerdir. Bu üretim güneş pilinin kendi sıcaklığı T_c 'de kendi siyah cisim ışımasından kaynaklanmaktadır.

phr alt terimli üretim ifadeleri, yarı iletkenin içindeki fotonların ışımalı geri dönüşünden kaynaklanan soğurulma sonucu taşıyıcı üretilmesi ile ilgilidir. Yapılan çalışmalar sonucu en iyi verim bu ifadelerin ihmal edilmesiyle bulunmuştur.[48]

Eşitlik (4.3.a), (4.3.b) ve (4.3.c)'deki r_e , r_h ve r_{eh} terimleri, sırasıyla iletkenlik bandı ve ara bant, ara bant ve valans bant ve iletkenlik bandı ve valans bant arası meydana gelen ışımalı rekombinasyon ifadeleridir.

$$r_e - g_{e,th} = B_e N_{Dh} \Delta n(x) \quad (4.3.a)$$

$$r_h - g_{h,th} = B_h N_{De} \Delta p(x) \quad (4.3.b)$$

$$r_{eh} - g_{eh,th} = B_{eh} \Delta n(x) \Delta p(x) \quad (4.3.c)$$

$$B_e N_{Dh} = \frac{1}{n_0} \frac{8\pi}{h^3 c^2} \int_E a_e E^2 \exp\left(\frac{-E}{k_B T}\right) dE \quad (4.4.a)$$

$$B_h N_{De} = \frac{1}{p_0} \frac{8\pi}{h^3 c^2} \int_E a_h E^2 \exp\left(\frac{-E}{k_B T}\right) dE \quad (4.4.b)$$

$$B_{eh} = \frac{1}{n_0 p_0} \frac{8\pi}{h^3 c^2} \int_E a_{eh} E^2 \exp\left(\frac{-E}{k_B T}\right) dE \quad (4.4.c)$$

N_{De} ve N_{Dh} ara banttaki dolu ve boş durum yoğunluklarıdır.

Bu noktada B katsayısının önceden Asbeck faktörüyle ($0 < \zeta \leq 1$) çarpılmasıyla elde edilen foton geri dönüş etkilerinden bahsedilebilir [52]. Soğurma katsayısı $a_{e(h)}$ 'nin x ile sabit olduğu varsayıldığı için $B_{e(h)}N_{Dh(e)}$ 'nin de x ile sabit olduğu varsayılır. Bu durum E_{Fib} , denge pozisyonunda sabitlendiği zaman oluşur. $E_{Fib,0}$ ve E_{Fe} ve de E_{Fh} , uyarılmış yayılım engellenirse iletkenlik bandı ve valans bant arası geçiş olmaz. Böylelikle $E_{Fib} \approx E_{Fib,0}$ tahminin tutarlılığı geçerli olur. Bu tahminin geçerli durumu için Δn ve Δp sırasıyla iletkenlik bandındaki(elektron) ve valans bandındaki(boşluk) taşıyıcılarının yoğunluklarıdır [42].

$$\Delta n = n_0 [\exp(\frac{\varepsilon_e}{kT}) - 1] \quad (4.5.a)$$

$$\Delta p = p_0 [\exp(\frac{\varepsilon_h}{kT}) - 1] \quad (4.5.b)$$

$\varepsilon_e = E_{Fe} - E_{Fib}$ ve $\varepsilon_h = E_{Fib} - E_{Fh}$ sırasıyla Şekil 4.2.b'de gösterildiği üzere elektron ve boşluk Kuasi-Fermi seviyeleri ayrılımlarıdır. n_0 ve p_0 denge durumunda sırasıyla, iletkenlik bandı ve valans banttaki elektron ve boşluk konsantrasyonlarıdır.

$$n_0 = N_C \exp(\frac{-E_L}{kT}) \quad (4.6.a)$$

$$p_0 = N_V \exp(\frac{-E_H}{kT}) \quad (4.6.b)$$

N_C ve N_V sırasıyla iletkenlik ve valans banttaki enerji durum yoğunluklarıdır. E_L ve E_H ara bant malzemeli yapıda iki bant aralığıdır (Şekil 4.3).

(4.4.a) - (4.4.c) denklemleri Roosbroek-Shockley ilişkisi kullanılarak elde edilmiştir [53].

Örnek olarak, sıradan bir yarı iletkenle uğraşmadığımız için $B_e N_{Dh}$ burada çıkarılacaktır. Detaylı denge varsayımlarından:

$$r_e - g_{e,th} = \frac{2}{h^3 c^2} \int_{E,\Omega} a_e \left[\frac{E^2}{\exp\left(\frac{E-\varepsilon_e}{kT}\right)-1} - \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E-\varepsilon}{kT}\right)-1} \right] dE d\Omega \quad (4.7)$$

eşitliğini elde ederiz.

Genel olarak:

$$\varepsilon_e = E_{Fe} - E_{Fib} = E_{Fe} - E_{Fib,0} + E_{Fib,0} - E_{Fib} \quad (4.8)$$

Yine de, daha önceki gibi, Kuasi-Fermi seviyesi denge pozisyonunda sabitlendiği varsayılırsa ($E_{Fib} \approx E_{Fib,0}$) ve dejenere durumda olmadığı varsayılırsa $\varepsilon_e < E_L$ olur ve aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$r_e - g_{e,th} = \frac{8\pi}{h^3 c^2} \frac{\Delta_n}{n_0} \int_E a_e E^2 \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) dE = B_e N_{Dh} \Delta_n \quad (4.9)$$

$B_e N_{Dh}$ (4.4.a)'da tanımlanmıştır.

4.4.3. Sürüklenme akımının difüzyon akımından çok daha az olduğu yaklaşımı

Aynı sıradan yarı iletkenlerde olduğu gibi, iletkenlik bandı ve valans battaki akımları onların sürüklenme ve difüzyon bileşenleri ile ifade edebiliriz.

$$J_e = e\mu_e(n_0 + \Delta_n)\xi + eD_e \frac{d\Delta_n}{dx} \approx eD_e \frac{d\Delta_n}{dx} \quad (4.10.a)$$

$$J_h = e\mu_h(p_0 + \Delta p)\xi + eD_h \frac{d\Delta p}{dx} \approx eD_h \frac{d\Delta p}{dx} \quad (4.10.b)$$

μ mobilitedir(taşıyıcı hareket kabiliyeti). D taşıyıcı difüzyon katsayısı ve ξ elektrik alanıdır. " e " alt terimi iletkenlik bandındaki elektronları, " h " alt terimi ise valans banttaki boşlukları kastetmektedir. (4.10.a) ve (4.10.b)'deki tahmin, akımın difüzyon bileşeninin baskın olduğu varsayımından kaynaklanmaktadır.

(4.10.a) ve (4.10.b) denklemlerini sırasıyla (4.1.a) ve (4.1.b) denklemlerinin içine alırsak, ve daha önceki bahsedilen üretim ve rekombinasyon terimleriyle birleştirirsek aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$D_e \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - B_e N_{Dh} \Delta n - B_{eh} \Delta n \Delta p = -g_e - g_{eh} \quad (4.11.a)$$

$$D_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - B_h N_{De} \Delta n - B_{eh} \Delta n \Delta p = -g_h - g_{eh} \quad (4.11.b)$$

Bu denklemler Δn ve Δp için sınır koşulları kullanılarak çözülmelidir.

$$\Delta n(W) = n_0 \left(\exp \frac{\varepsilon_e(W)}{kT} - 1 \right) \quad (4.12.a)$$

$$D_e \frac{d\Delta n}{dx}(0) = -\frac{1}{e} J_{ep} \quad (4.12.b)$$

$$\Delta p(0) = p_0 \left(\exp \frac{\varepsilon_h(0)}{kT} - 1 \right) \quad (4.12.c)$$

$$-D_h \frac{d\Delta p}{dx}(W) = -\frac{1}{e} J_{hn} \quad (4.12.d)$$

J_{ep} Kuantum Dotlu Ara bant materyalinden p emitörünün içine enjekte edilen elektron akımı, J_{hn} ise Kuantum Dotlu Ara bant materyalinden n emitörünün içine enjekte edilen boşluk akımıdır. İdeal emitörlerde bu akımlar sıfır olarak kabul edilir.

Fakat farklı çalışmalarda bu akımlar sıfırdan farklı değerlerde alınmaktadır. $\varepsilon_h(0)$ ve $\varepsilon_e(W)$ terimleri p emitör ve n emitör eklemlerindeki Kuasi-Fermi seviyesi ayrılımlarıdır. Bu büyüklükler aynı zamanda emitör eklemlerindeki gerilim düşümleri olarak da tanımlanmaktadır (e ile çarpılması durumunda).

4.4.4. Düşük-enjeksiyon yaklaşımı

(4.11.a) ve (4.11.b) denklemleri, Δn ve Δp için birlikte çözümlenmelidir. Bu noktada, $B_{eh}\Delta n\Delta p$ rekombinasyon teriminin değerinin $B_eN_{Dh}\Delta p$ ve $B_hN_{De}\Delta n$ terimlerinin değerlerinden çok küçük olduğu varsayımı yapılabilir [44]. Bu varsayım, ışımalı rekombinasyon içeren sıradan yarı iletkenlerdeki düşük-enjeksiyon yaklaşımına benzediği için, düşük-enjeksiyon yaklaşımı olarak adlandırılabilir.

(4.11.a) ve (4.11.b) denklemlerinin çözümü analitik hale gelir ve bu terimler artık bu kısımdan sonra $\Delta n^{(0)}[x, \varepsilon_e(w)]$ ve $\Delta p^{(0)}[x, \varepsilon_h(0)]$ olarak ifade edilecektir. Üst indeks "0" $B_eN_{Dh}\Delta n \ll B_hN_{De}\Delta n, B_eN_{Dh}\Delta p$ varsayımından sonra türettiğimiz birinci derece çözümü ifade etmektedir. Birinci derece çözümler daha önceden farklı bir çalışmada türetilmiştir[51]. Bunlar düşük enjeksiyon altında bir güneş pilinde elde edilen azınlık taşıyıcı konsantrasyonlarıyla biçim olarak tek bir fark dışında benzerdir. Bu fark, geleneksel güneş pilinde, $\Delta n(\Delta p)$, yarı iletken eklemin $p(n)$ tarafındaki azınlık taşıyıcı konsantrasyonunu ifade ederken, ara bant yapılı güneş pillerinde Δn ve Δp pilin aynı bölgesi ile ara bant bölgesi arasındaki azınlık taşıyıcı konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Bu çözümler iki bileşenden oluşan çözümler halinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta n^{(0)}[x, \varepsilon_e(w)] = \Delta n_{dark}^{(0)}[x, \varepsilon_e(w)] + \Delta n_{sc}^{(0)}(x) \quad (4.13.a)$$

$$\Delta p^{(0)}[x, \varepsilon_h(0)] = \Delta p_{dark}^{(0)}[x, \varepsilon_h(0)] + \Delta p_{sc}^{(0)}(x) \quad (4.13.b)$$

dark alt terimli ifadeler (4.11.a) veya (4.11.b) denklemlerinde ışıklı üretim terimleri için g sıfıra ayarlandığı zamanki durum için çözüm sağlamaktadır. sc alt terimli ifadeler (4.10.b) veya (4.11.a) denklemlerinde $\varepsilon_e(W)$ veya $\varepsilon_h(0)$ ifadeleri sıfıra ayarlandığı zamanki durum için çözüm sağlamaktadır (kısa devre durumu için çözüm).

(4.11.a) ve (4.11.b) denklemlerinin çözümü daha öncede bahsedildiği gibi $B_{eh}\Delta n\Delta p$ 'nin ihmal edilmesiyle sağlanır. Bu durumda, $B_{eh}\Delta n^{(0)}\Delta p^{(0)}$ 'nin (4.11.a) ve (4.11.b) denklemlerinde $B_{eh}\Delta n\Delta p$ ile yer değiştirilmesiyle çözümünden elde edilen sayısal sonuçla Δn ve Δp değerleri için daha iyi bir yaklaşım elde edilmiş olur, yani $\Delta n^{(1)}$ ve $\Delta p^{(1)}$ elde edilir.

Sonuçta güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği $J(V)$ 'yi bulmak mümkündür. Her iki terminalden çıkan J akımları birbirine eşittir. p emitörünün kenarının ara bantla birleştiği bölgede, ara banttaki taşıyıcılar akıma katkı sağlamadığı için toplam akım J aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$J = J_{ep} + J_h[0, \varepsilon_h(0)] \quad (4.14)$$

Yukarıdaki değer iletkenlik bandındaki elektronların ve valans banttaki boşlukların katkısıyla oluşan akımın üzerindeki ilavesidir. Aynı şekilde, n emitörünün kenarının ara bantla birleştiği bölgede akım aşağıdaki gibidir.

$$J = J_{hn} + J_e[w, \varepsilon_e(w)] \quad (4.15)$$

Aşağıdaki durumla birlikte;

$$eV = \varepsilon_e(w) + \varepsilon_h(0) \quad (4.16)$$

$J(V)$ karakteristiğini elde etmek mümkün olacaktır.

5. ARA BANT YAPILI GÜNEŞ PİLLERİNDE EMİTÖRÜN VERİME ETKİSİ

Bu çalışmada, ABGP'lerde maksimum verimi sağladığı daha önce gösterilen $E_G=1.95$ eV [6,11] olan bir ABGP için emitör kalınlık etkisi matematiksel modele dahilken ve değilken verim hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Emitör kalınlık etkisi modele dahil edilmediğinde mobilitenin, N_c , N_v 'nin, baz bölgesi kalınlığının, ara bant enerji seviyesinin ve ışık konsantrasyonunun verime etkileri incelenmiş, her durum için elektron ve boşluk konsantrasyonlarının ve akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimleri sonlu fark modeli ile elde edilmiş ve daha önce sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [6].

Emitörler, ara bandın dış kontaklardan izolasyonunu sağlamak, elektron, boşluk kaçışlarını engellemek ve potansiyel fark elde etmek için ara bandın her iki kenarında da bulunan yapılardır. Emitörler, yarı iletken malzemelerin n ve p tipi katkılanmasıyla, n ve p tipi olmak üzere elde edilirler. Emitörler de yarı iletken olmalarından dolayı, ışık altında bir fotoakım oluştururlar. Fakat emitörler ara banda göre çok ince yapıda olduklarından, ürettikleri akım toplam akıma kıyasla ihmal edilebilecek seviyededir. Bu çalışmada emitör etkisi modele dâhil edildiğinde emitör kalınlıklarının verime etkileri analiz edilmiştir.

5.1. Emitör Etkisinin İhmal Edilmesi Durumunda Verimin İncelenmesi

Ara bant yapılı güneş pillerinde verimi etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Biz tezimizde bunlardan beş tanesinin verim üzerindeki etkilerini inceleyeceğiz. Bunlar; elektron ve boşluk mobiliteleri (μ_e, μ_h), valans ve iletkenlik bandındaki enerji durum yoğunlukları (N_v, N_c), ışık konsantrasyonu (X), pil kalınlığı (w) ve ara bant enerji seviyesidir (E_L). Biz tezimizde yasak bant aralığını (E_G) 1.95 eV olarak sabit alacağız fakat ara bandı yerleştireceğimiz konumu değiştirmemiz sonucunda E_L 'yi değiştirerek farklı kombinasyonlar deneyeceğiz. Sadece değiştirdiğimiz parametreleri şekiller üzerinde belirteceğiz. Belirtmediğimiz parametrelerin hepsini, optimum

verim noktası olan değeri elde ettiğimiz için geçerli olan parametre değerlerini alacağız. Optimum değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Maksimum verim parametreleri

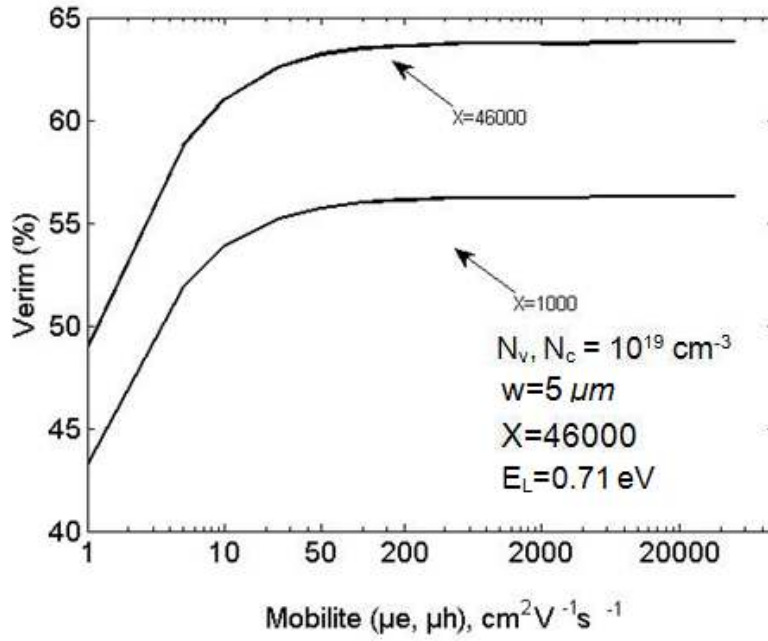
$\mu_e = \mu_h$	$N_v = N_c$	w	E_L	X
$2000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	10^{19} cm^{-3}	$5 \mu\text{m}$	0,71 eV	46000

5.1.1. Mobilitenin verime etkisi

Mobilite, fotoakım oluşturan elektron ve boşluk taşıyıcılarının hareket kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Yani, elektron ve boşlukların rekombinasyona uğramadan fotoakıma katkı sağlaması için mobilitelerinin yüksek olması gerekir. Bu bağlamda mobilitenin verime etkisi incelenmiş ve aşağıdaki şekiller elde edilmiştir.

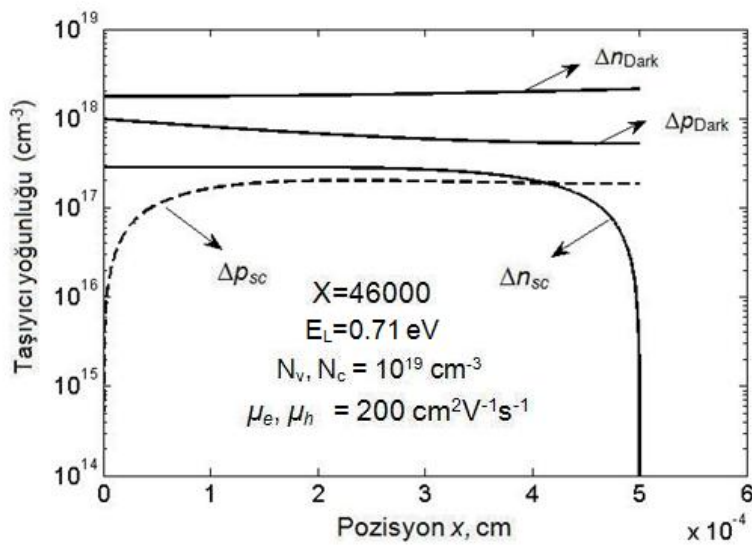
X=1000 ve X=46000 değerlerinde mobiliteler için verimler hesaplanmış ve aşağıdaki şekil elde edilmiştir.

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere ışık konsantrasyonun artması verimi önemli ölçüde artırıyor. Aynı şekilde mobilitenin de artması verimi artırıyor fakat $2000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ değerinden sonra mobilitenin artması verime önemli bir katkı sağlamıyor ve verim sabitleniyor. X=1000 için maksimum verim % 56.2 iken , X=46000 için maksimum verim % 63.7’dir. Mobilite $200 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ’nin altına indiğinde verimde hızlı bir azalma meydana gelmektedir. Bunun sebebi yeteri kadar hızlı olamayan taşıyıcıların akıma katkıda bulunamadan yok olmalarıdır. Yani pil kalınlığının taşıyıcı difüzyon mesafesinden büyük olmasıdır.

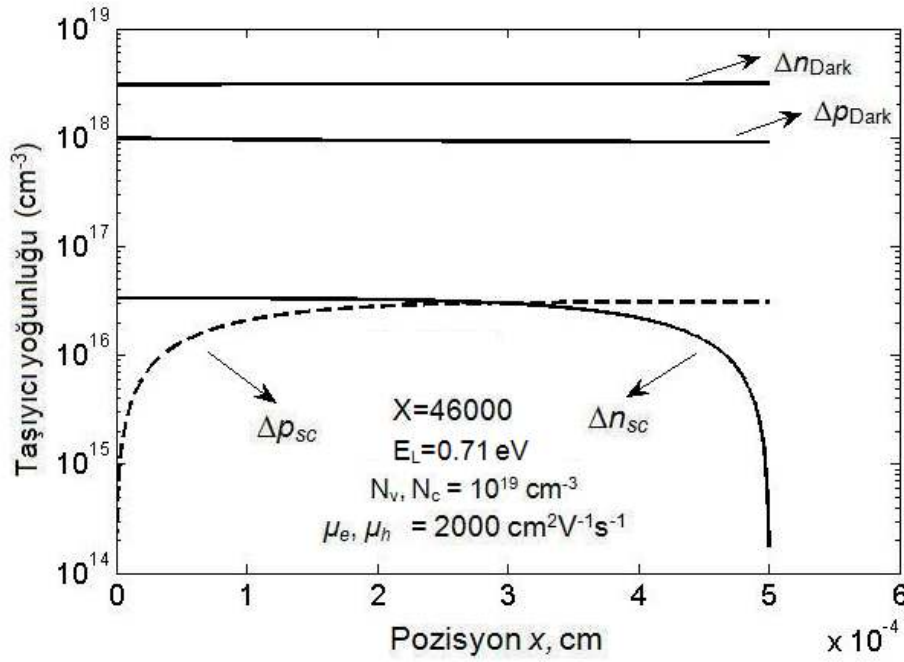


Şekil 5.1. Mobilite-verim ilişkisi

Şekil 5.2. ve Şekil 5.3’de ise $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için kısa devre ve karanlık durumlarındaki $V_o = V_{oc}$ iken taşıyıcı yoğunlukları değişimleri gösterilmiştir.

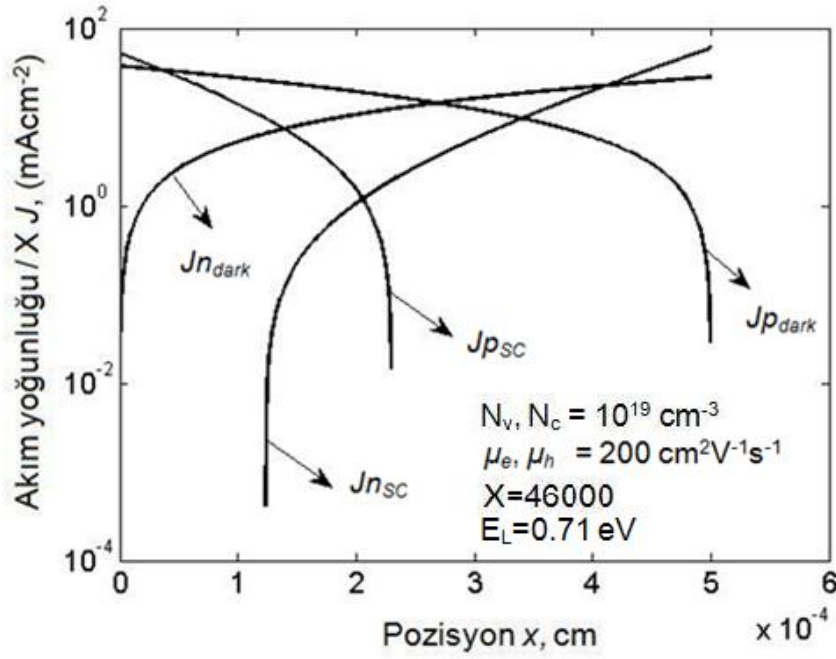


Şekil 5.2. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri

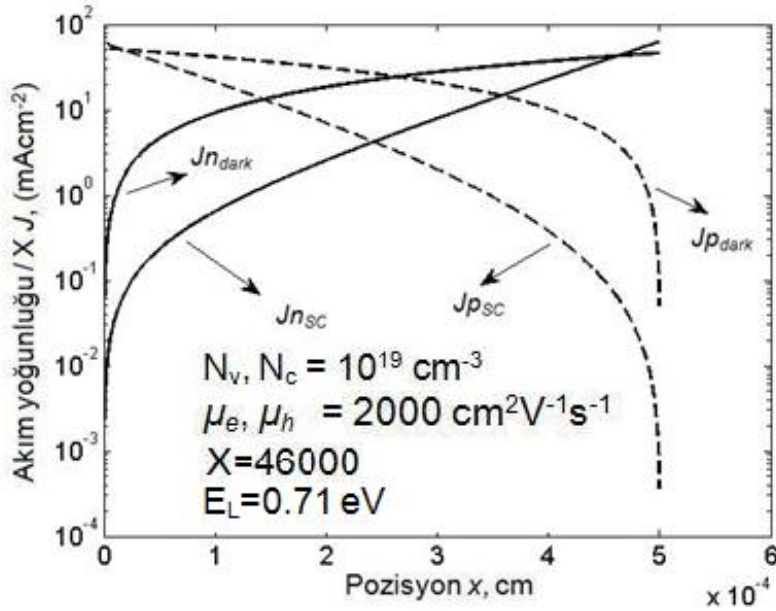


Şekil 5.3. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri

Mobilitenin azalması kısa devre taşıyıcı yoğunluklarının artmasına sebep olmuştur. Şekil 5.4. ve 5.5.'t görülen kısa devre ve karanlık akım yoğunlukları ise mobiliteden çok fazla etkilenmemişlerdir. Ancak mobiliteler $200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'den daha küçük bir değer alınsaydı akımlarda azalma oluşacaktı.

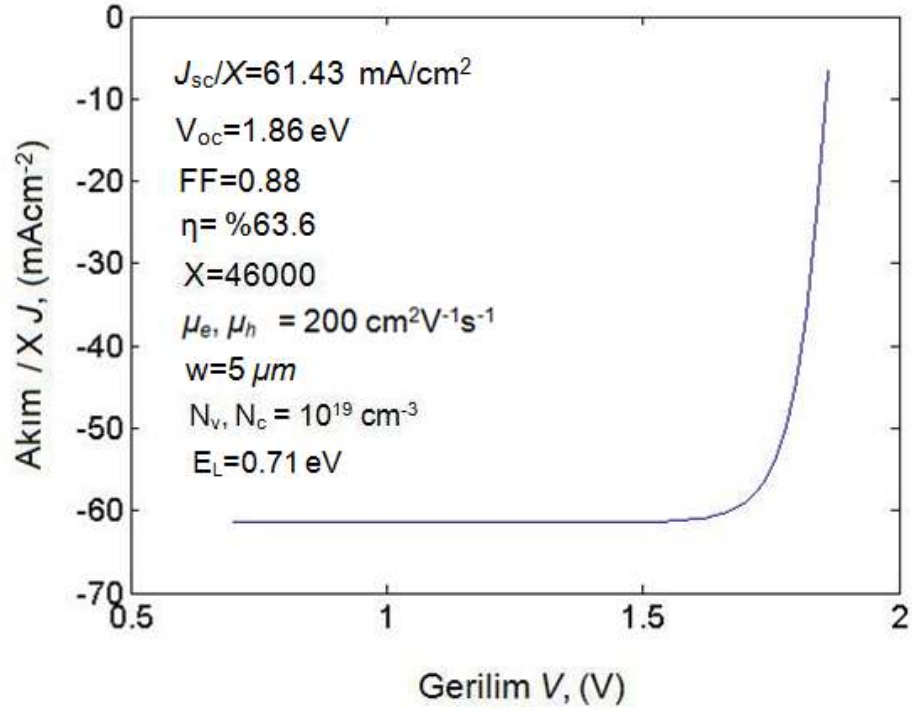


Şekil 5.4. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi

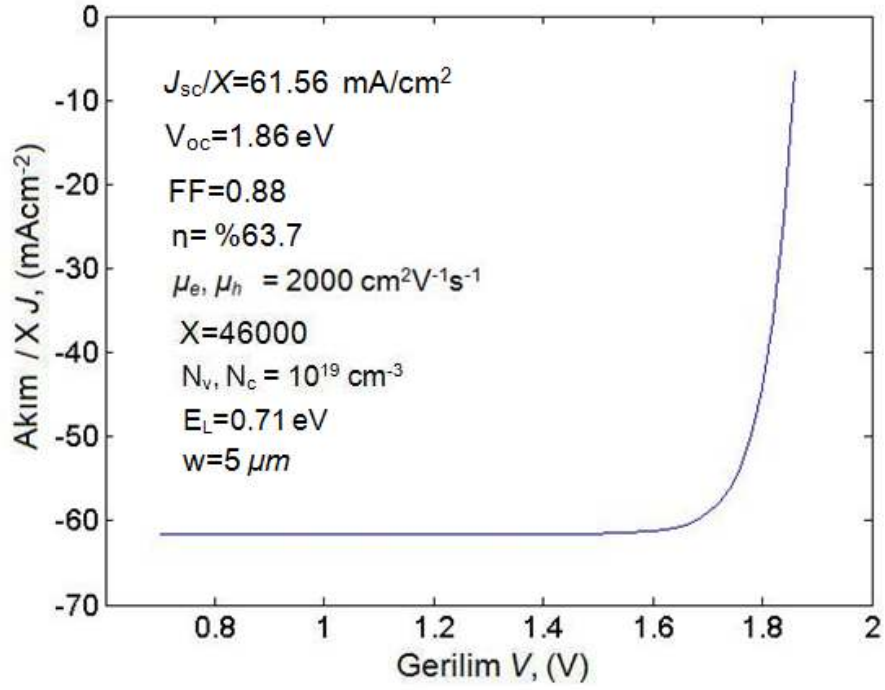


Şekil 5.5. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi

Şekil 5.6. ve 5.7.'de $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ve $200 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ değerleri için J - V eğrileri çizdirilmiştir. Buradan elde edilen değerler birbirine yakındır.



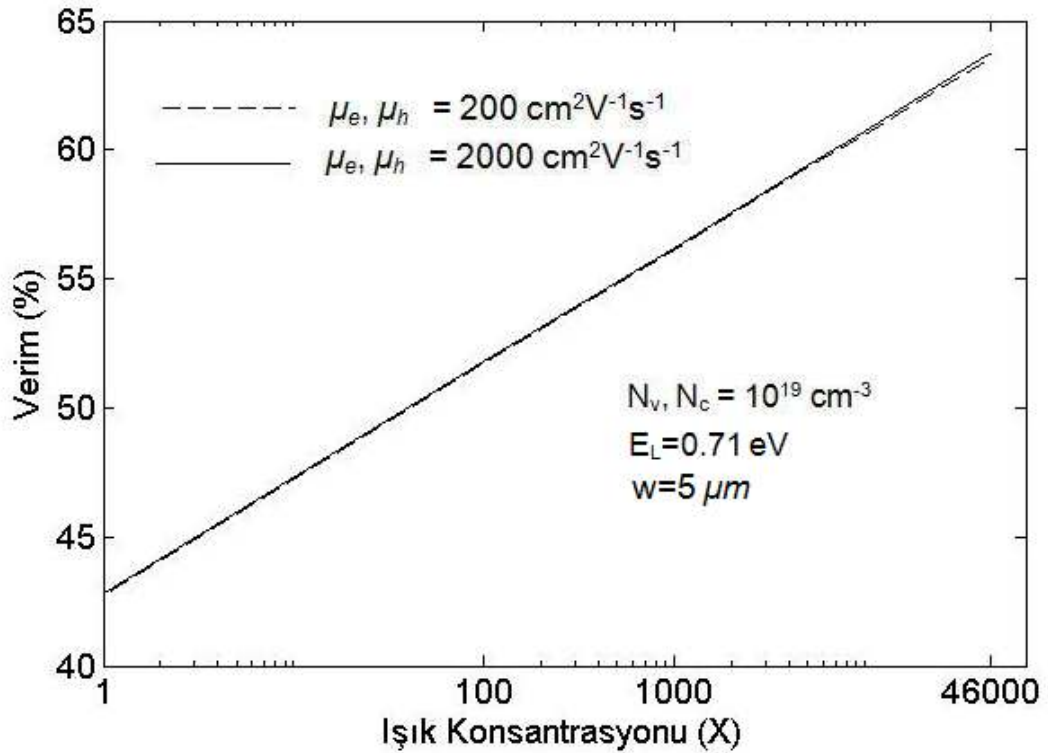
Şekil 5.6. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi



Şekil 5.7. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi

5.1.2. Işık konsantrasyonunun verime etkisi

Işık konsantrasyonuna 1 ile 46000 arasında farklı değerler verilerek $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için verimler hesaplanmış ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

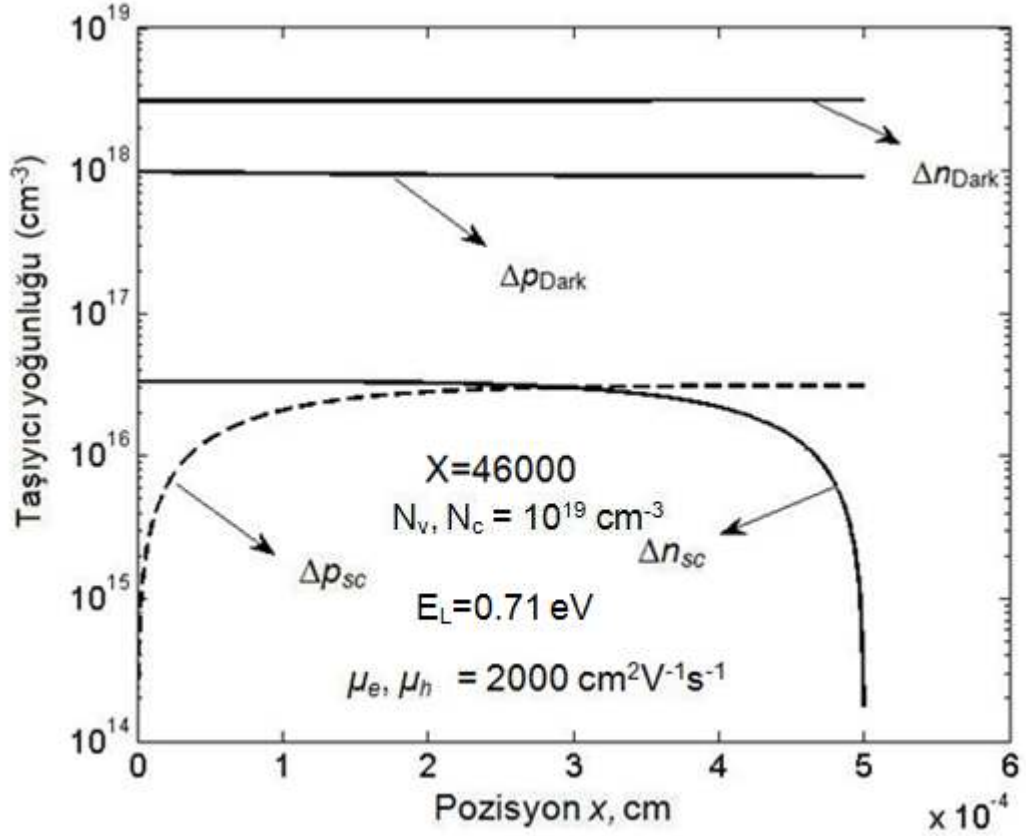


Şekil 5.8. Işık konsantrasyonu-verim ilişkisi

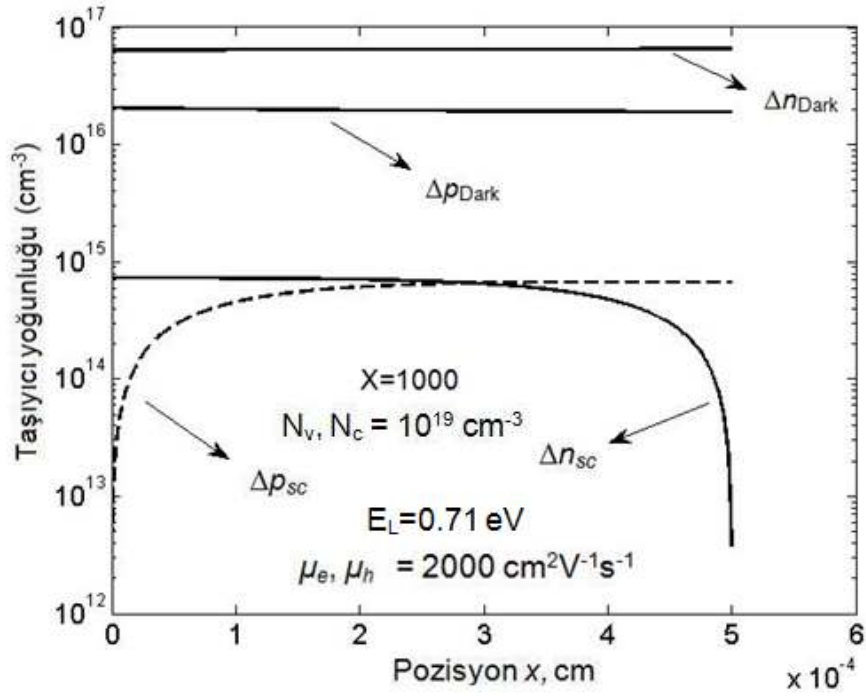
Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi ışık konsantrasyonun artması verimi logaritmik olarak artırmaktadır. Işık konsantrasyonu arttığında pil yüzeyine gelen foton sayısı arttığından ışıkla üretilen taşıyıcı sayısı ışık konsantrasyonu ile doğrusal olarak artmaktadır. Bu da foto akımın artmasını sağlamaktadır. Foto akımın artması ise quasi-Fermi seviyelerinin ayrılma miktarını yani çıkış gerilimini artırmaktadır. Işık konsantrasyonu ile verimin artmasındaki asıl etken budur. Ancak burada non-lineerlik ihmal edilmiştir. Eğer ihmal edilmeseydi belli bir değerden sonra ışık konsantrasyonu verimi azaltacaktı [6].

$\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için verimler neredeyse aynıdır. $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için maksimum değer %63.6 iken, $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için maksimum değer %63.7'dir.

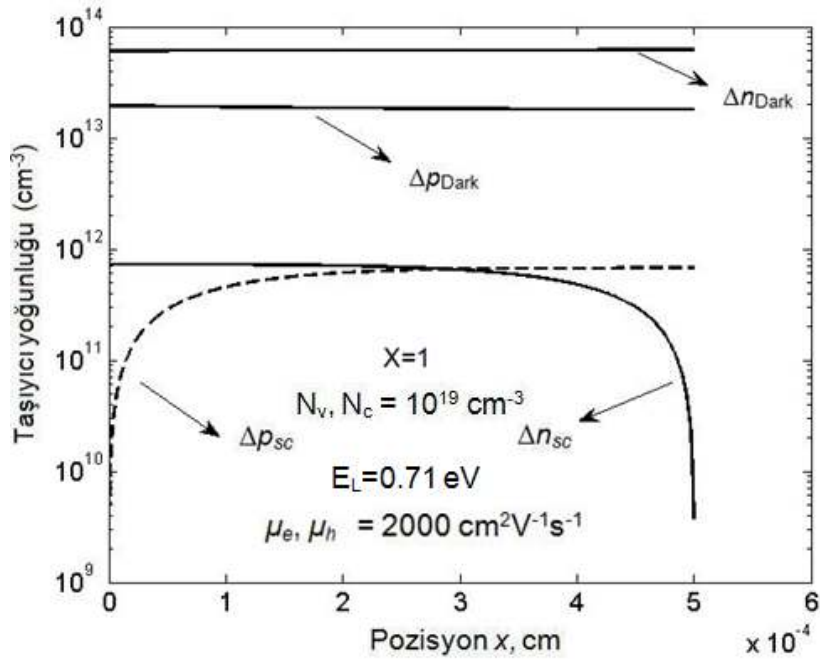
Şekil 5.9.- 5.14.'te $X=46000$, 1000 ve 1 için kısa devre ve karanlık durumlarında farklı ışık konsantrasyonlarındaki taşıyıcı yoğunlukları ve akım yoğunluklarının pil boyunca değişimleri görülmektedir. Taşıyıcı yoğunluğu değerlerinde X ile doğrusal bir artış olduğu görülmektedir. Kısa devre akım yoğunluğu değerinde de benzer bir artış söz konusudur. Ancak şekil üzerinde J/X eğrileri çizdirildiğinden bu fark gözlenememektedir.



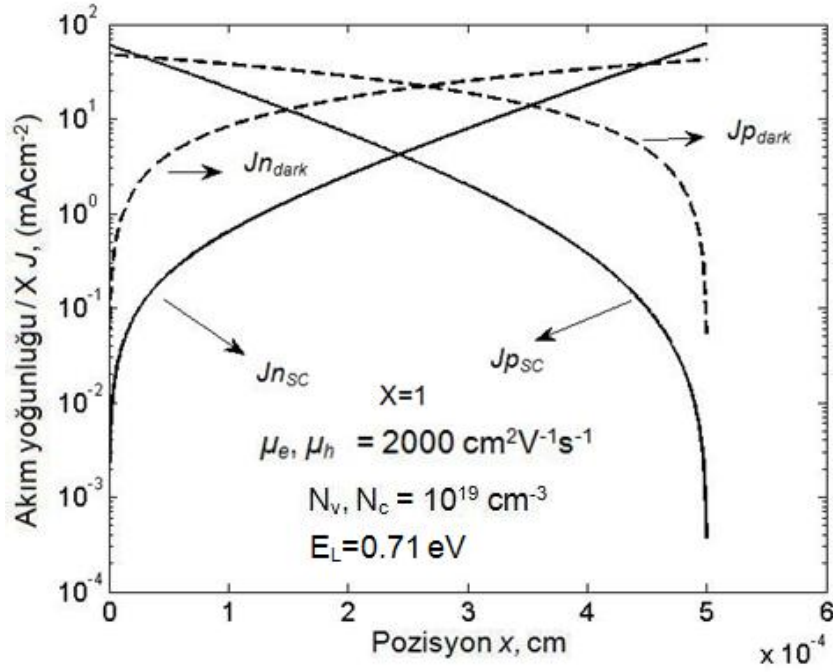
Şekil 5.9. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



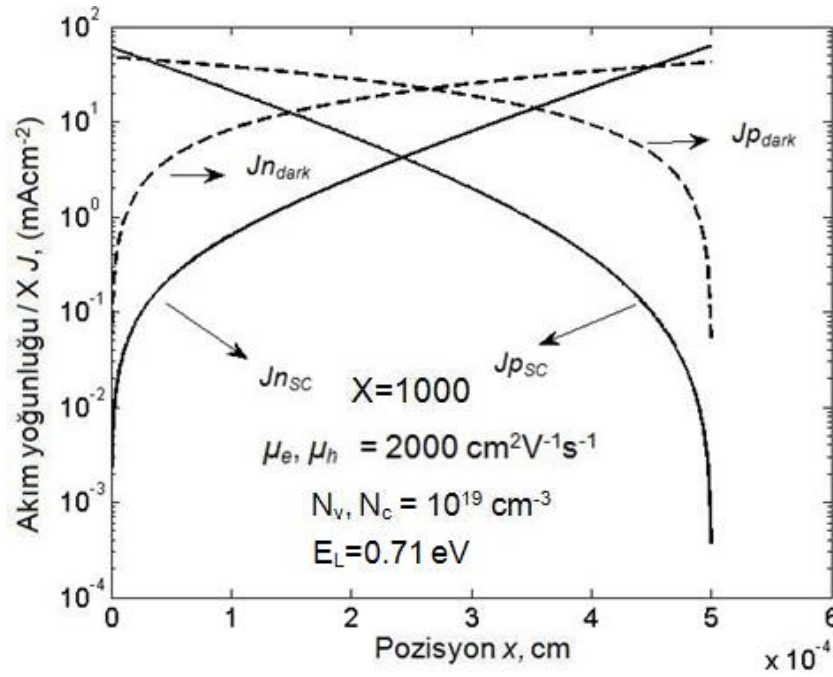
Şekil 5.10. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



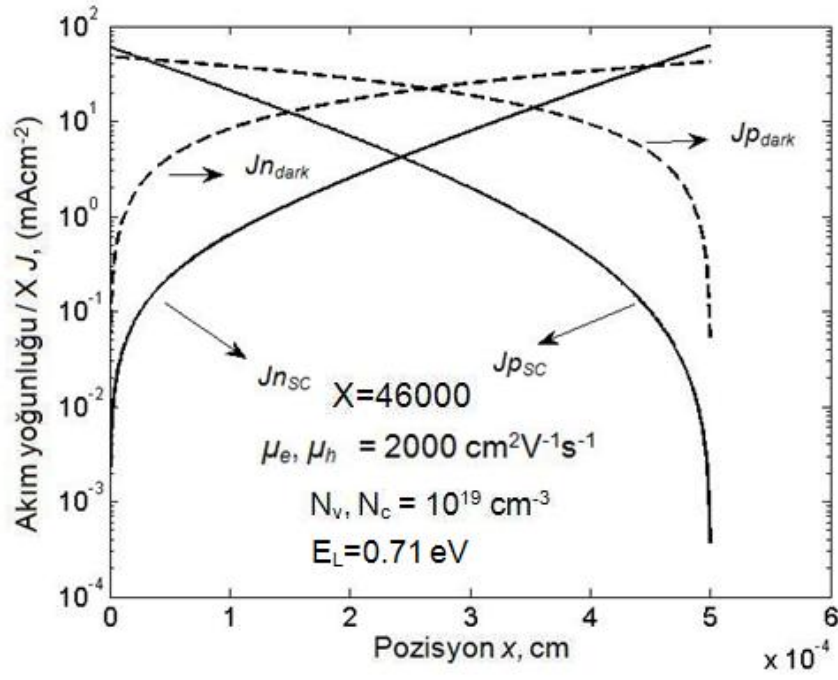
Şekil 5.11. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



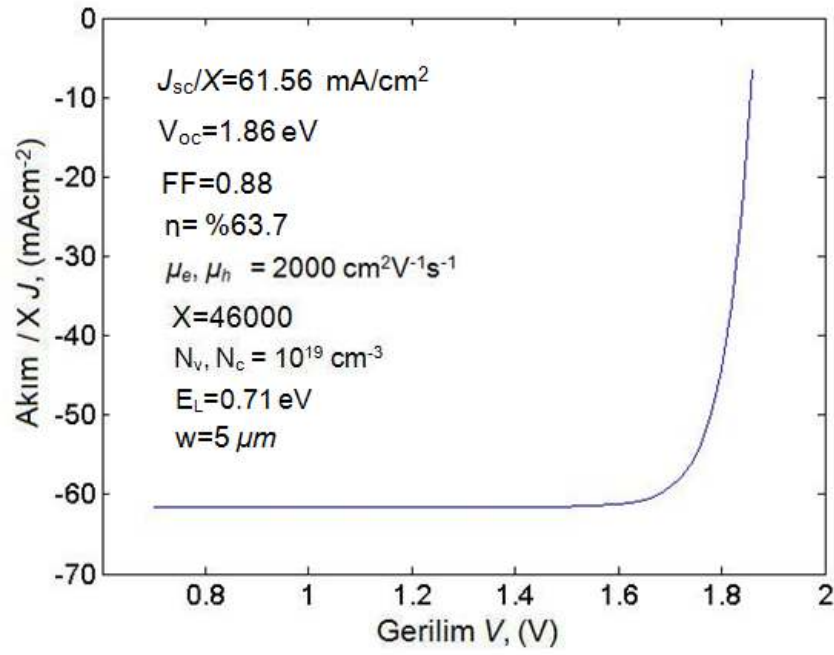
Şekil 5.12. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi



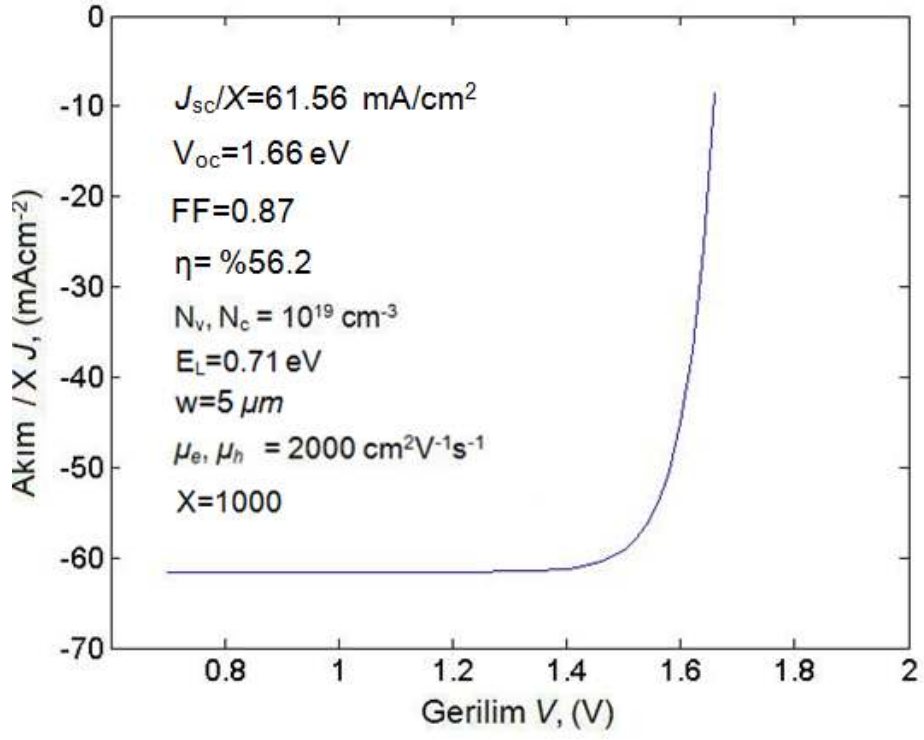
Şekil 5.13. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi



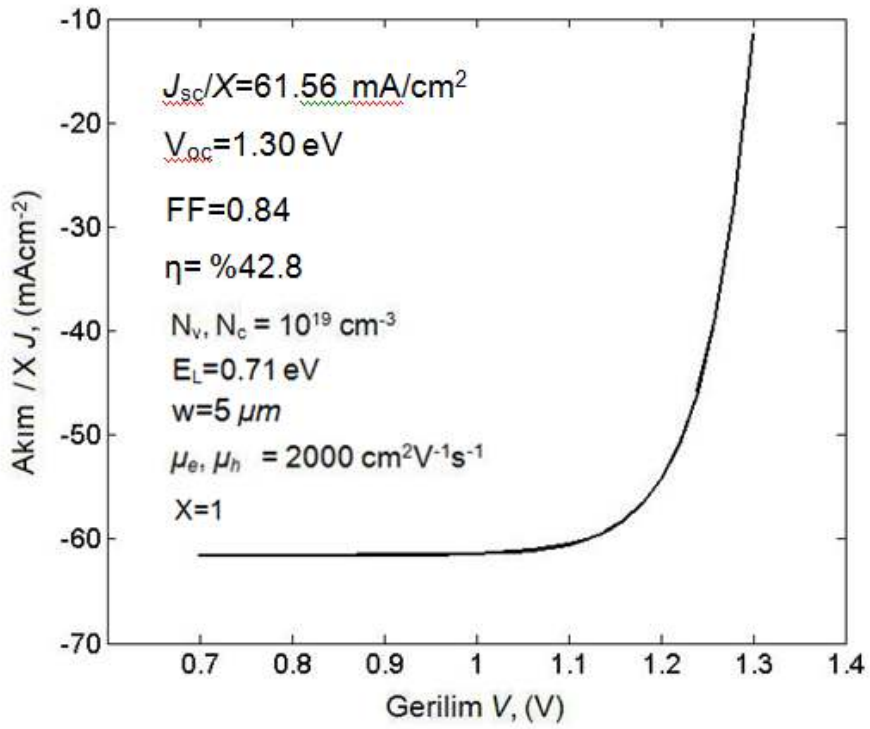
Şekil 5.14. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi



Şekil 5.15. Ara bant yapılu güneş pilinin J - V eğrisi



Şekil 5.16. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi

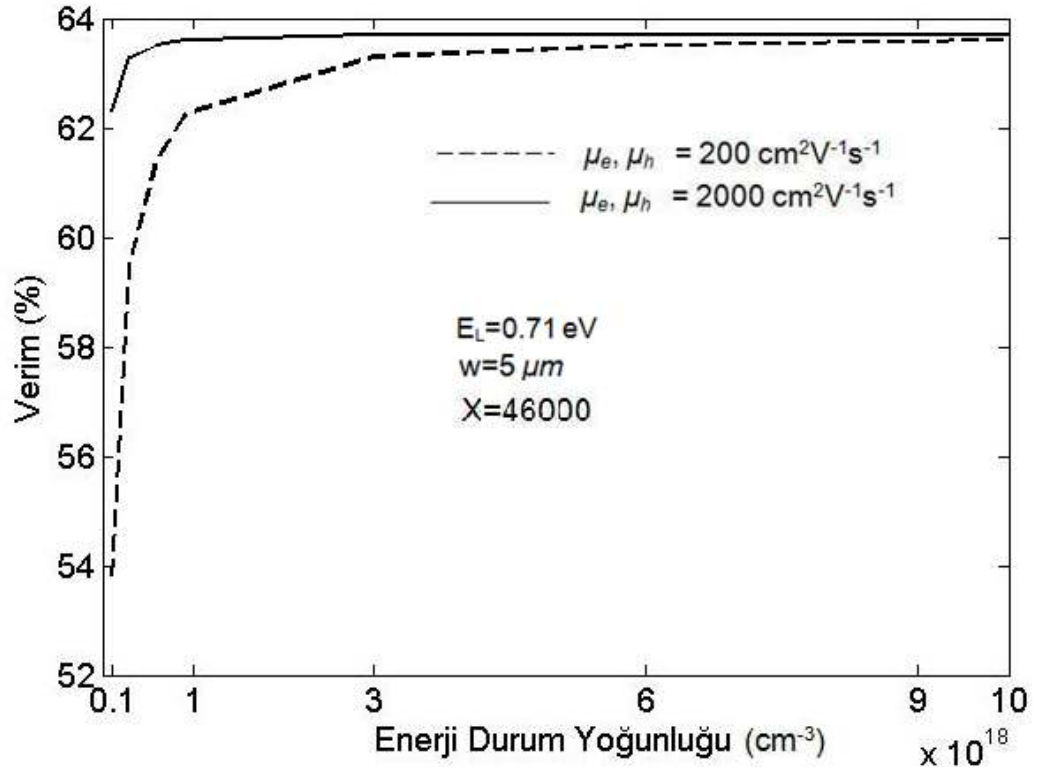


Şekil 5.17. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi

Yukarıda farklı ışık konsantrasyonları için akım-gerilim grafiği oluşturulmuştur. Grafiklerden yola çıkarak şöyle bir yorum yapabiliriz; ışık konsantrasyonundaki artış açık devre gerilimini artırdığı için verimi artırmaktadır. $X=46000$ için açık devre gerilimi 1.86 eV, $X=1000$ için 1.66 eV ve $X=1$ için 1.30 eV'tur.

5.1.3. Enerji durum yoğunluğunun verime etkisi

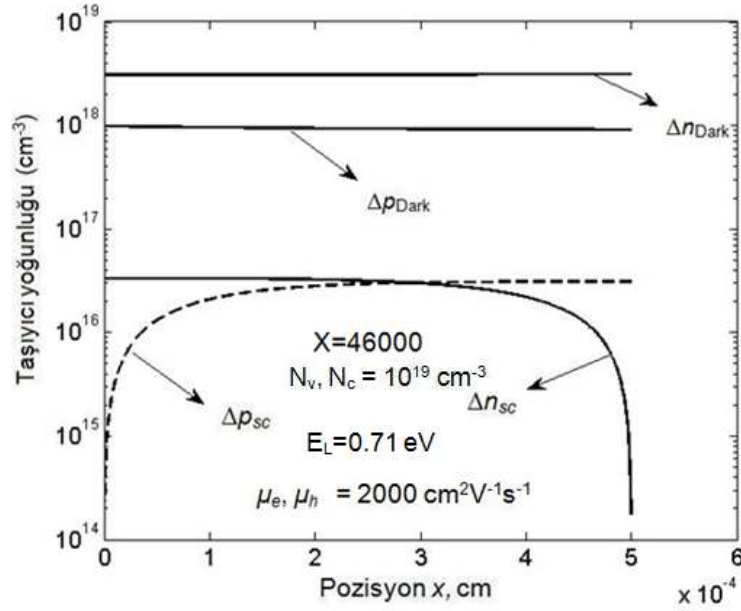
Bu bölümde ise valans ve iletkenlik bandındaki enerji durum yoğunluklarının verim üzerindeki etkisi incelenmiş ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



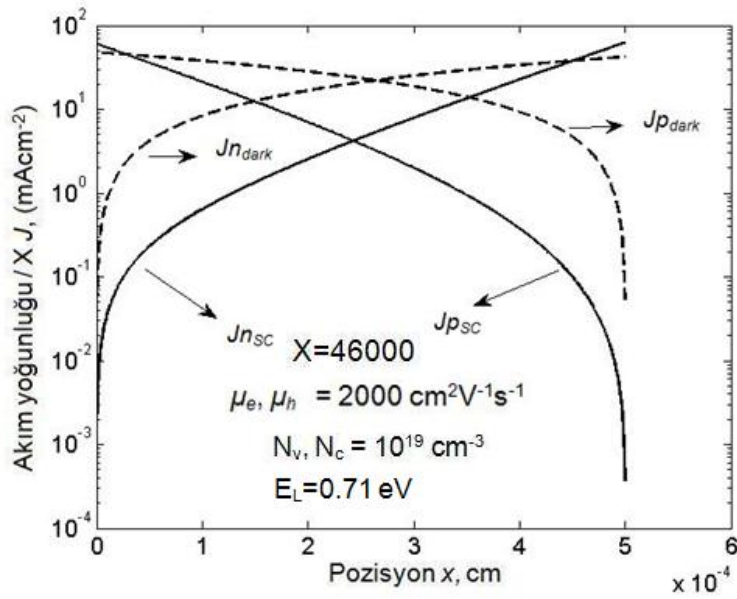
Şekil 5.18. Enerji durum yoğunluğu - verim ilişkisi

Enerji durum yoğunluğundaki artış verimi artıran bir etkidir. Bu durum $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ değeri için daha bariz bir şekilde görülmektedir. Fakat iki durumda da verim, $N_v = N_c = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar artmaktadır. Bu değerden sonra enerji durum yoğunluğundaki artış verimi etkilememektedir. $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için maksimum verim % 63.7 iken, $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ %63.6 dır.

Aşağıda kısa devre ve karanlık durumları için taşıyıcı yoğunlukları ve akım yoğunluklarının pil boyunca değişimleri gösterilmektedir.

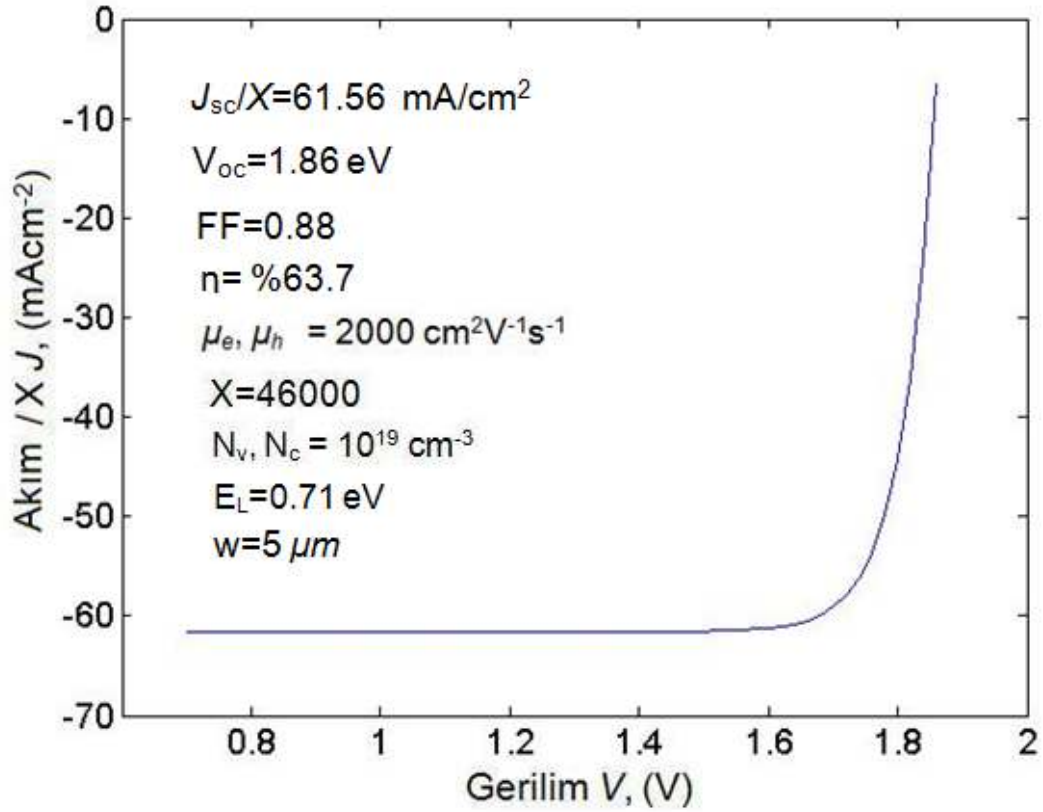


Şekil 5.19. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



Şekil 5.20. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi

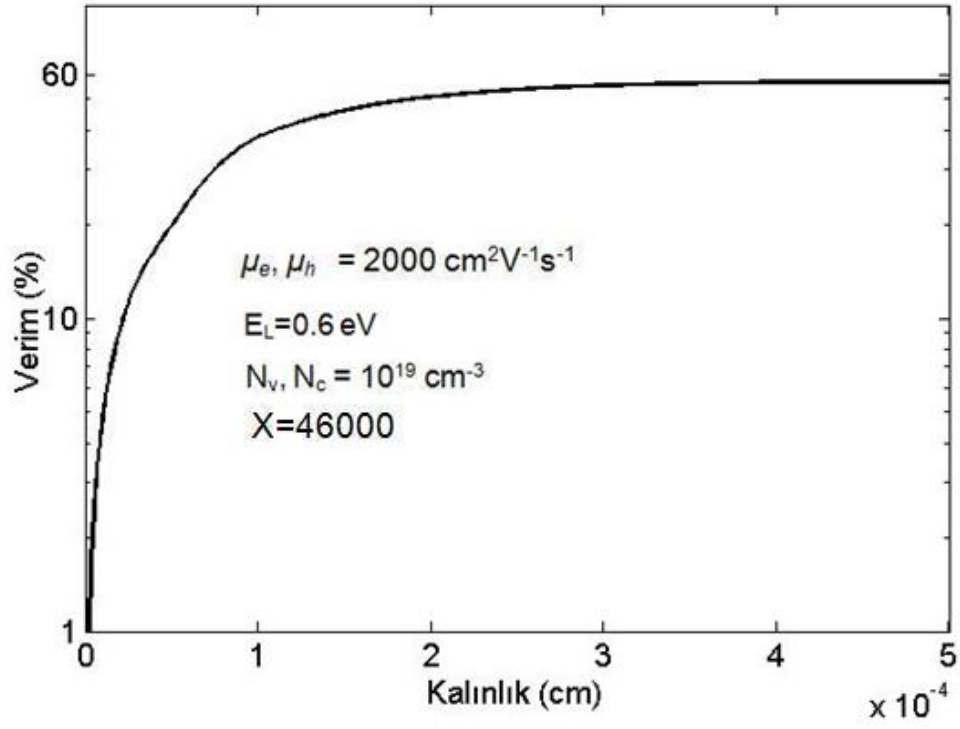
Son olarak Şekil 5.21’de J - V eğrisi çizdirilmiştir.



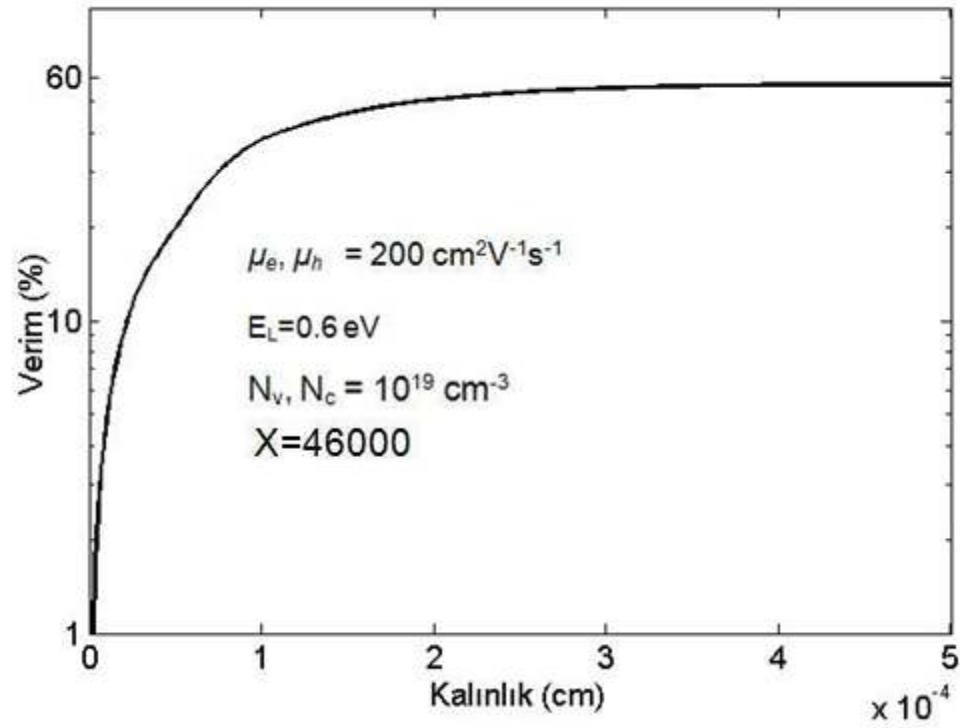
Şekil 5.21. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi

5.1.4. Pil kalınlığının verime etkisi

Bu bölümde Ara bant enerji seviyesi E_L diğer bölümlerdeki gibi 0.71 eV değil, bazı grafikler için 0.6 eV alınmış ve verim grafikleri bu değer için elde edilmiştir. Şekil 5.22. ve Şekil 5.23.’den görüldüğü gibi kalınlık yaklaşık $2\mu\text{m}$ ’den sonra verim hemen hemen sabit kalmaktadır. Kalınlık $2\mu\text{m}$ ’den küçük olduğunda ise bir kısmı soğurulmadan arka yüzden kaçmaktadır. Eğer kalınlık daha da artırılırsa taşıyıcıların bir kısmı akıma katkıda bulunamadan kaybolacağından verim azalacaktır.

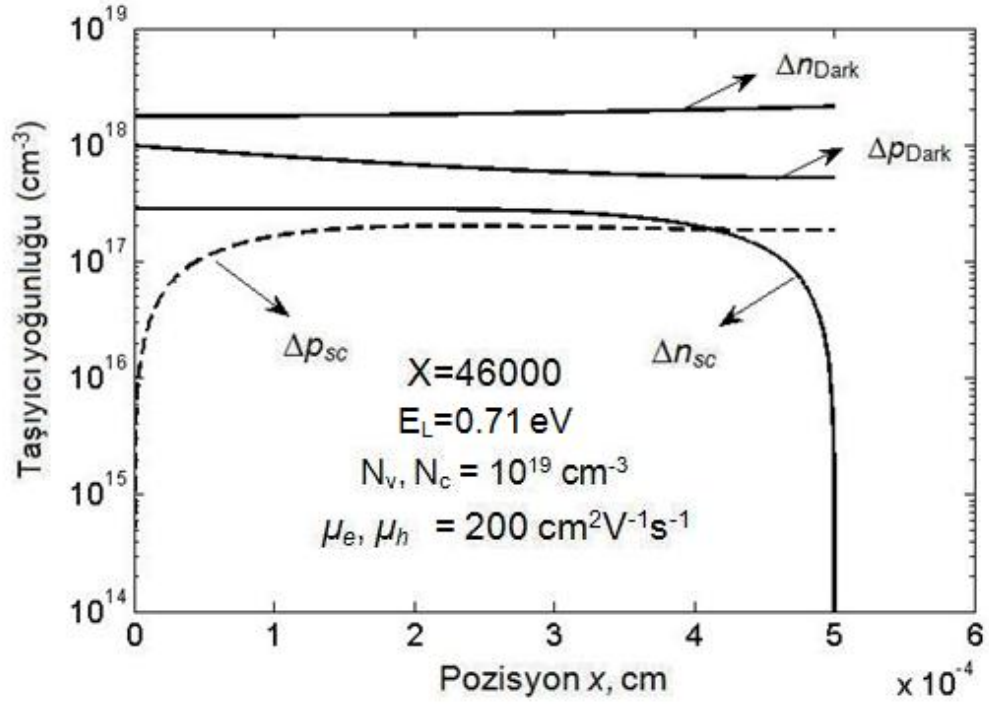


Şekil 5.22. Kalınlık-verim ilişkisi

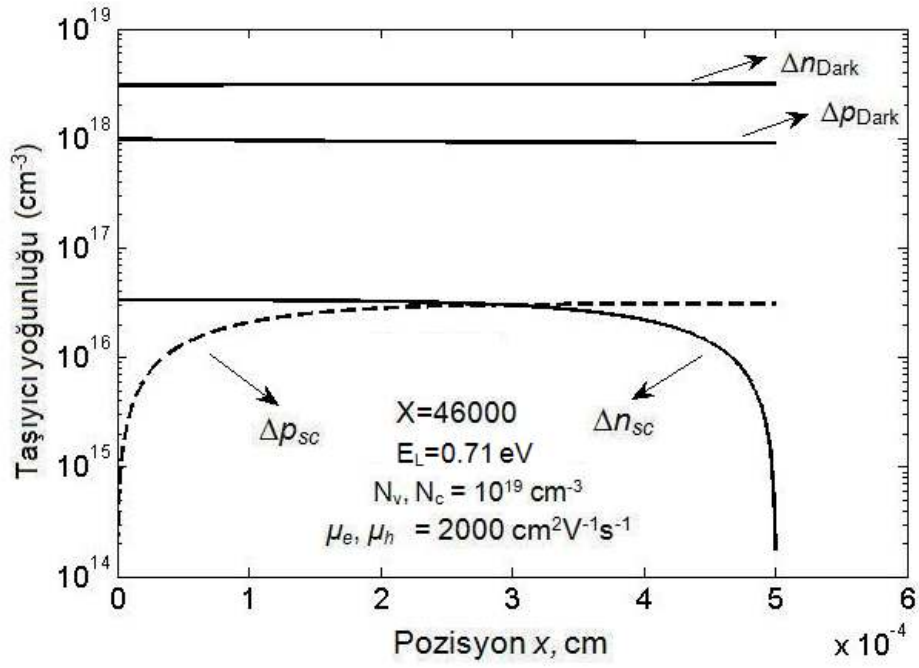


Şekil 5.23. Kalınlık-verim ilişkisi

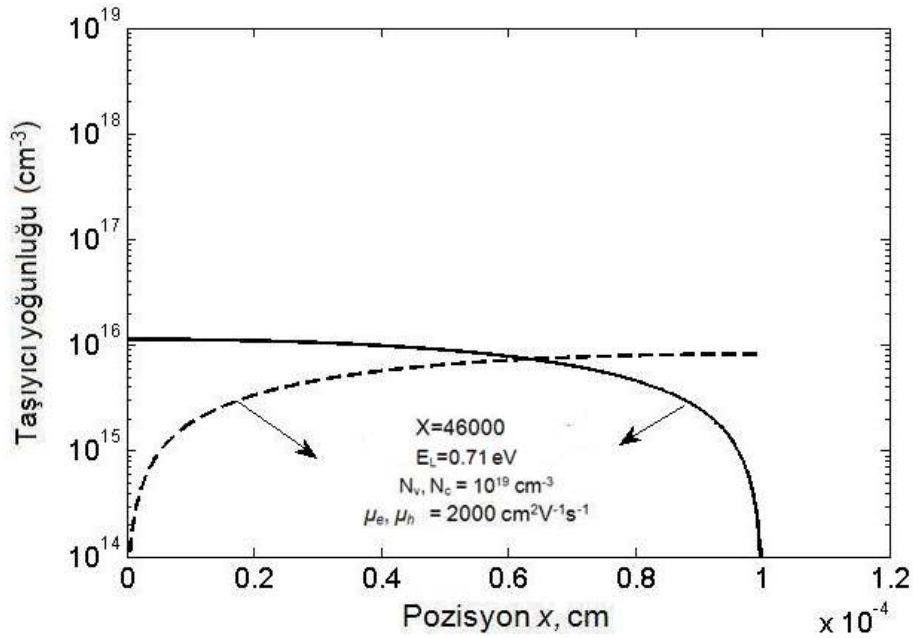
Şekil 5.24. ve 25.'de $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için karanlık ve kısa devre taşıyıcı yoğunlukları $w=5\mu\text{m}$ için çizdirilmiştir. Şekil 5.26. ve 27.'de ise $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ için kısa devre taşıyıcı yoğunlukları $w=1\mu\text{m}$ için çizdirilmiştir. $w=1\mu\text{m}$ 'de fotonların tamamı soğurulamadığı için taşıyıcı konsantrasyonun az olduğu görülmektedir.



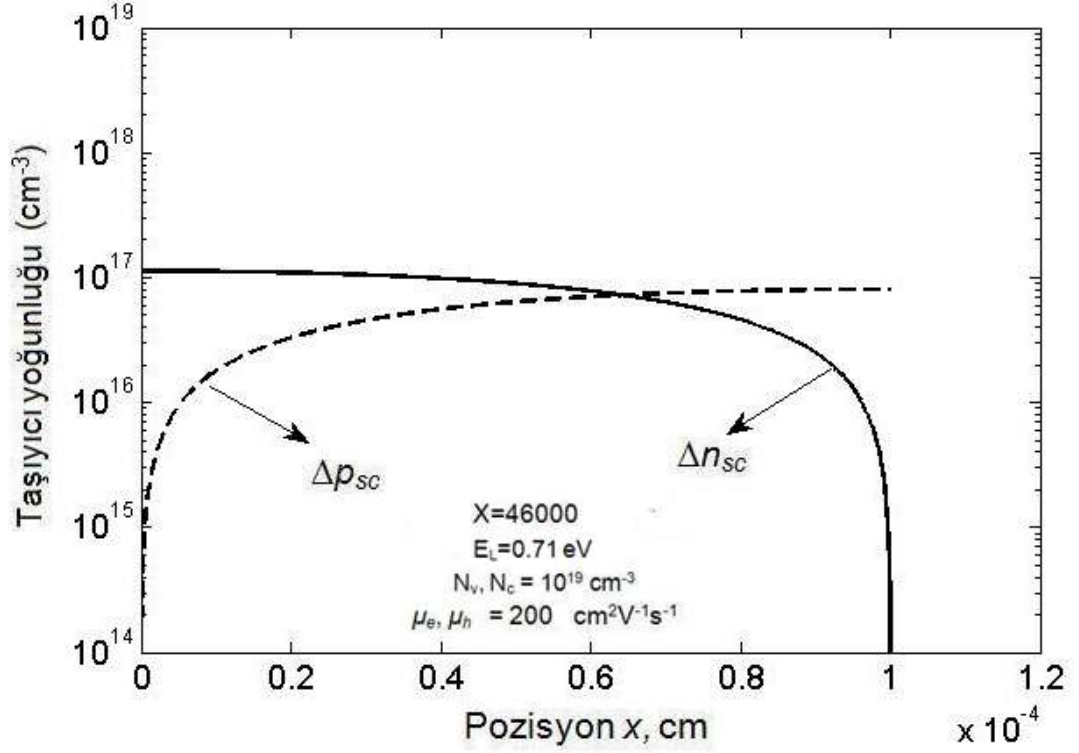
Şekil 5.24. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



Şekil 5.25. Karanlık ve kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



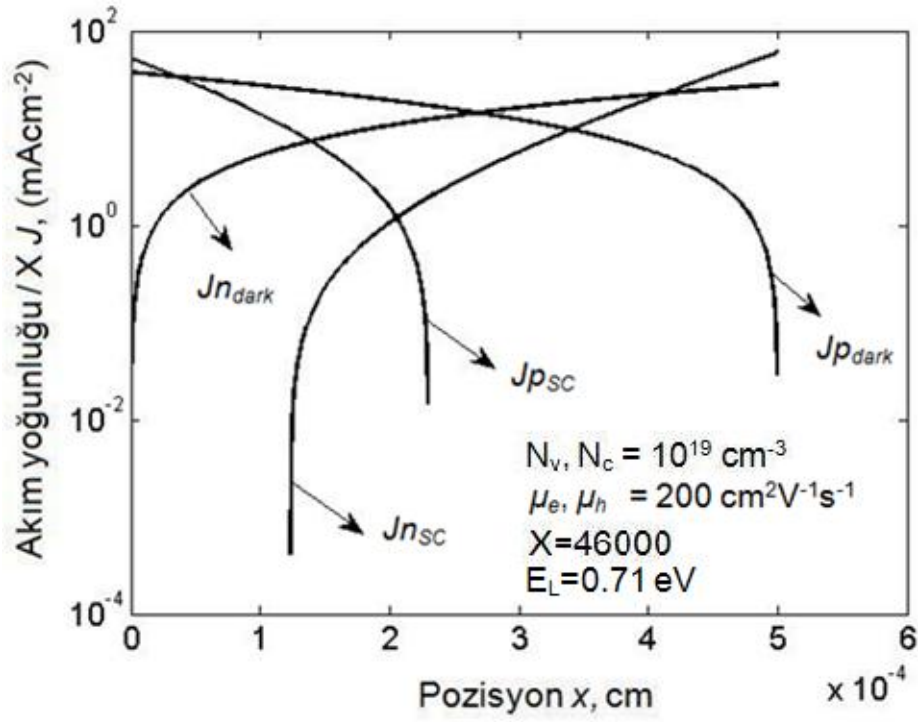
Şekil 5.26. Kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri



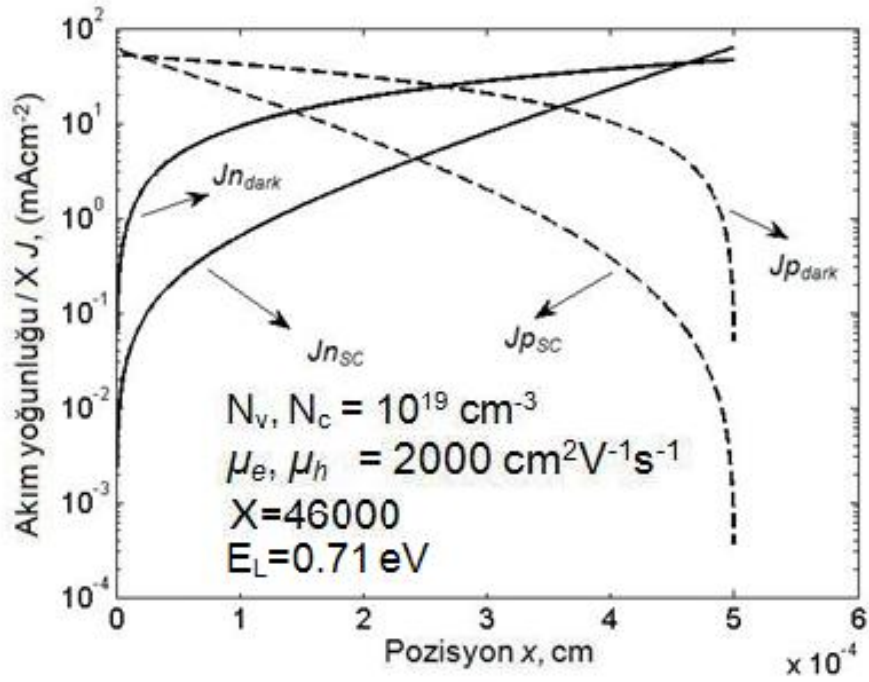
Şekil 5.27. Kısa devre durumları için pil boyunca taşıyıcı yoğunluğu değişimleri

Mobilitenin $2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ den $200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ye düşmesi karanlık ve kısa devre durumlarının her ikisi için taşıyıcı yoğunluklarını artırmaktadır.

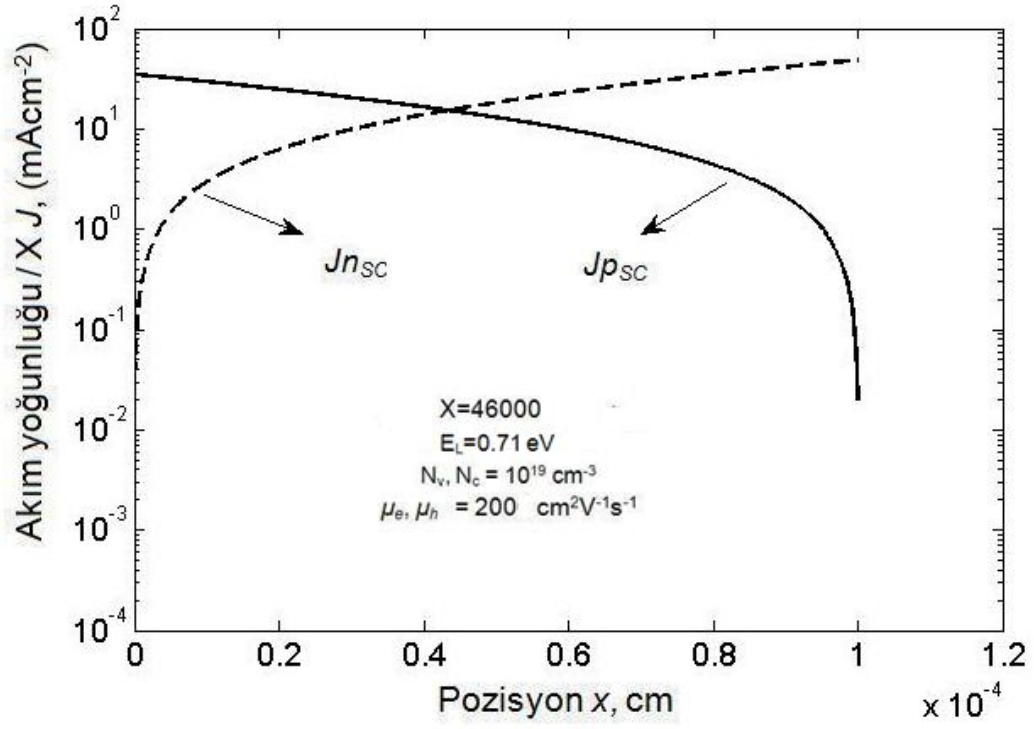
Şekil 5.28. ve Şekil 5.29.'da karanlık ve kısa devre akım yoğunluklarının değişimi görülmektedir. Akımlarda da $w=1\mu\text{m}$ durumunda azalma meydana gelmektedir. Bu azalma Şekil 5.30. ve 5.31.'de görülmektedir.



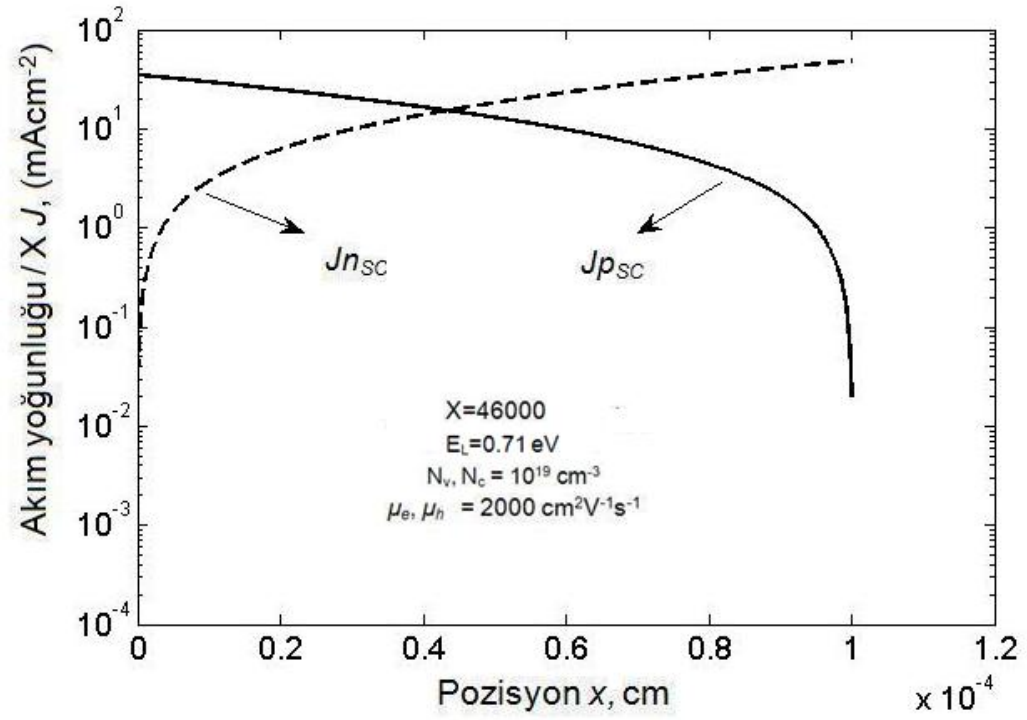
Şekil 5.28. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi



Şekil 5.29. Kısa devre ve karanlık durumlarında akım yoğunluklarının değişimi

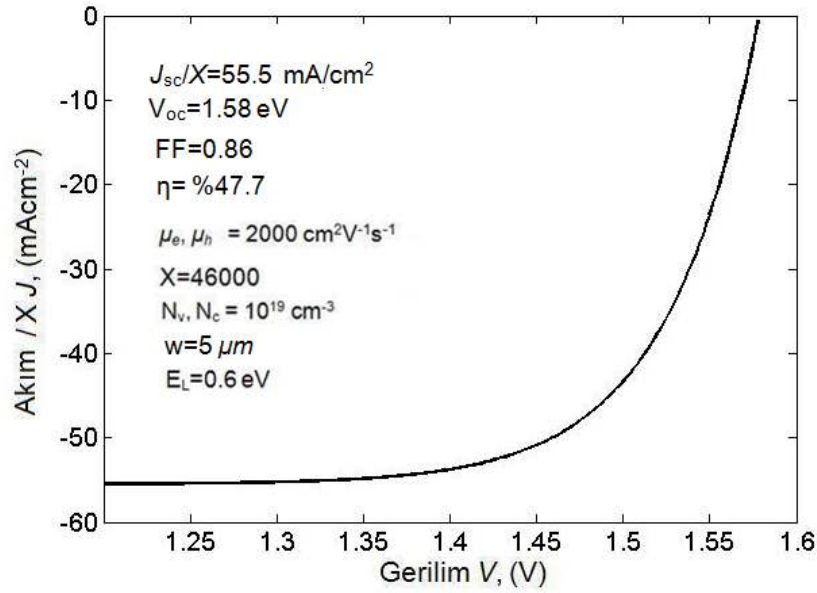


Şekil 5.30. Kısa devre durumlarında akım yoğunluklarının değişimi

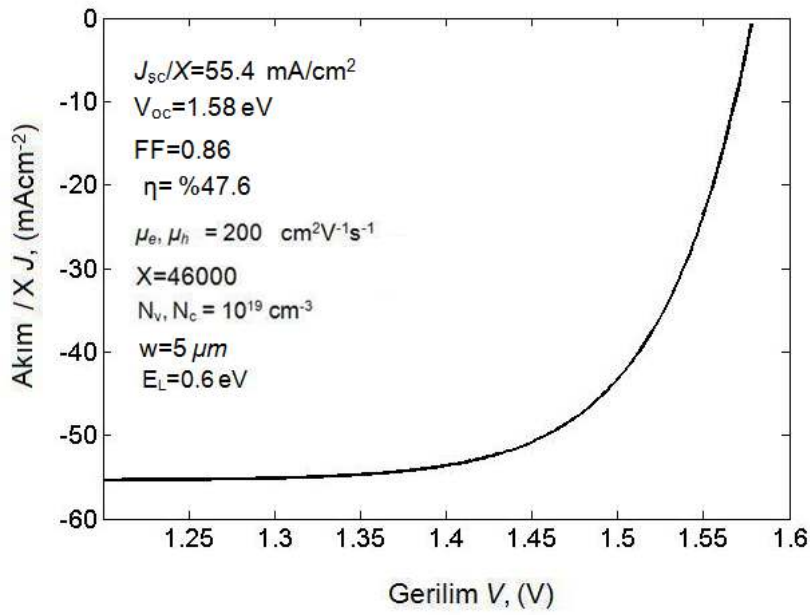


Şekil 5.31. Kısa devre durumlarında akım yoğunluklarının değişimi

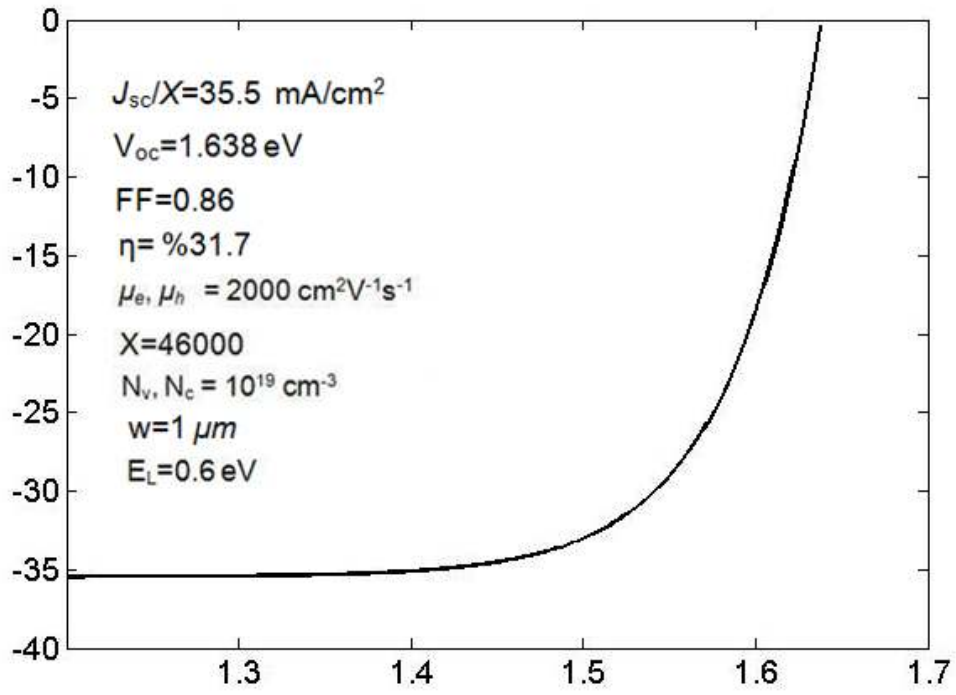
Şekil 5.32.- Şekil 5.35.' de $w=5\mu m$ ve da $w=1\mu m$ için J-V eğrilerini göstermektedir. $w=1\mu m$ durumunda fotoakımın dolayısı ile de çıkış gerilimi ve verimin azaldığı görülmektedir.



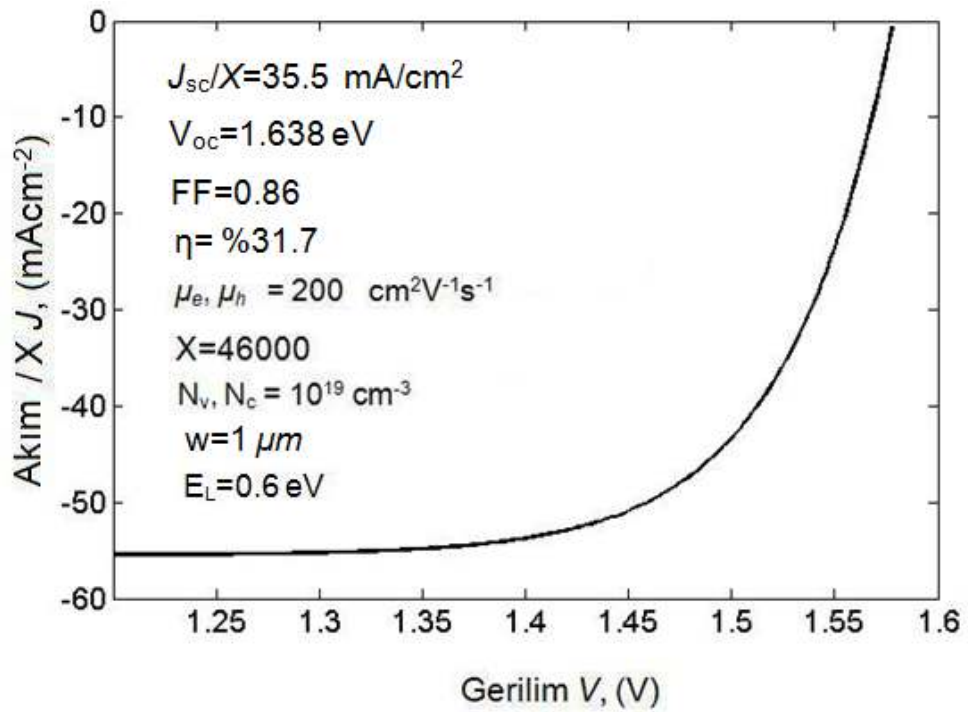
Şekil 5.32. Ara bant yapılu güneş pilinin J-V eğrisi



Şekil 5.33. Ara bant yapılu güneş pilinin J-V eğrisi



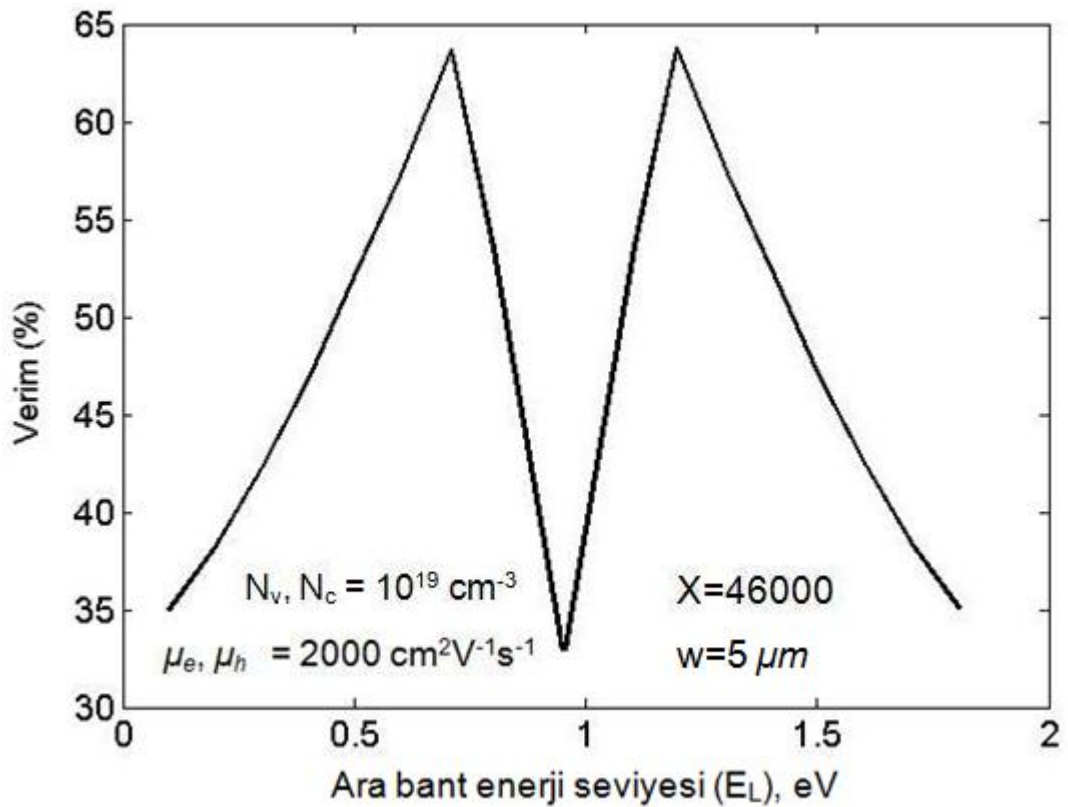
Şekil 5.34. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi



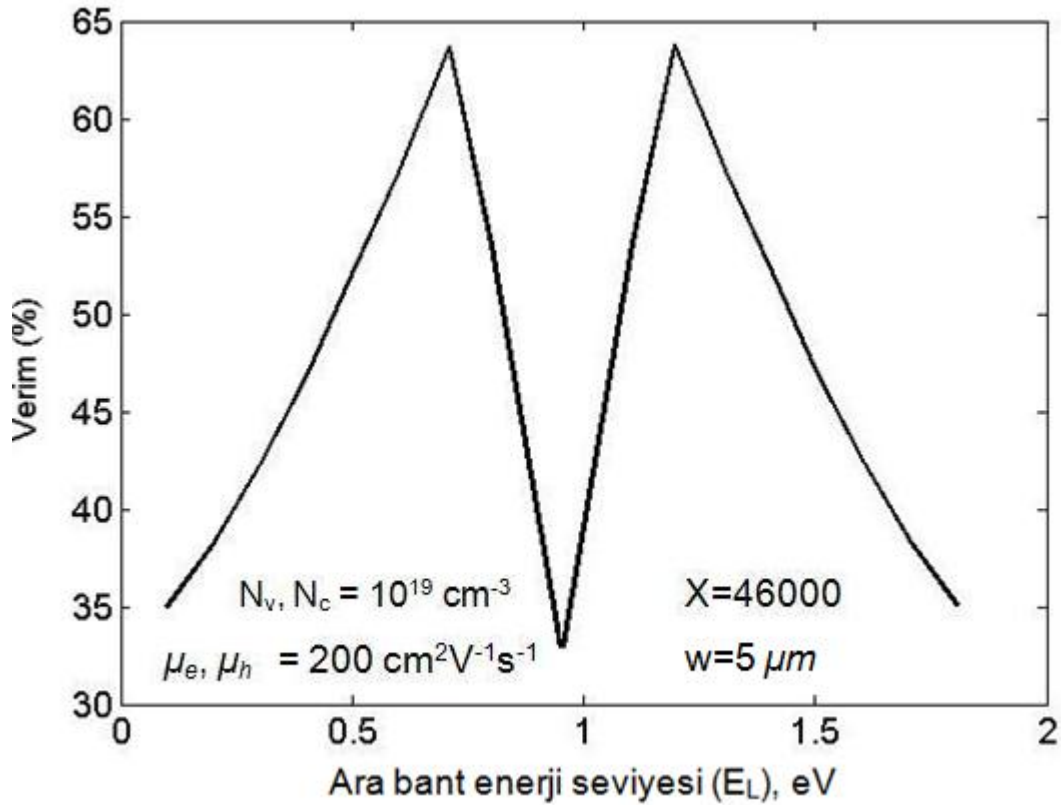
Şekil 5.35. Ara bant yapılı güneş pilinin J - V eğrisi

5.1.5. Ara bant enerji seviyesinin verime etkisi

Ara bant enerji seviyesinin verim üzerindeki etkisi $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.36. ve 5.37.'de sunulmuştur. ABGP'de hedeflenen verim artışını elde edebilmek için ara bandın optimum noktada olması gerekmektedir. İletkenlik bandına, valans banda ya da yasak bandın ortasına çok yakın olursa verimde artış sağlanamamaktadır. Ara bant yasak bandın yaklaşık 1/3 ya da 2/3'ünde olursa verim maksimum olmaktadır. Çünkü bu noktalarda VB'den AB'ye geçen elektronların sağladığı akım katkısı, AB'den CB'ye geçen elektronların sağladığı akım katkısına eşit olmaktadır.



Şekil 5.36. E_L -verim ilişkisi



Şekil 5.37. E_L -verim ilişkisi

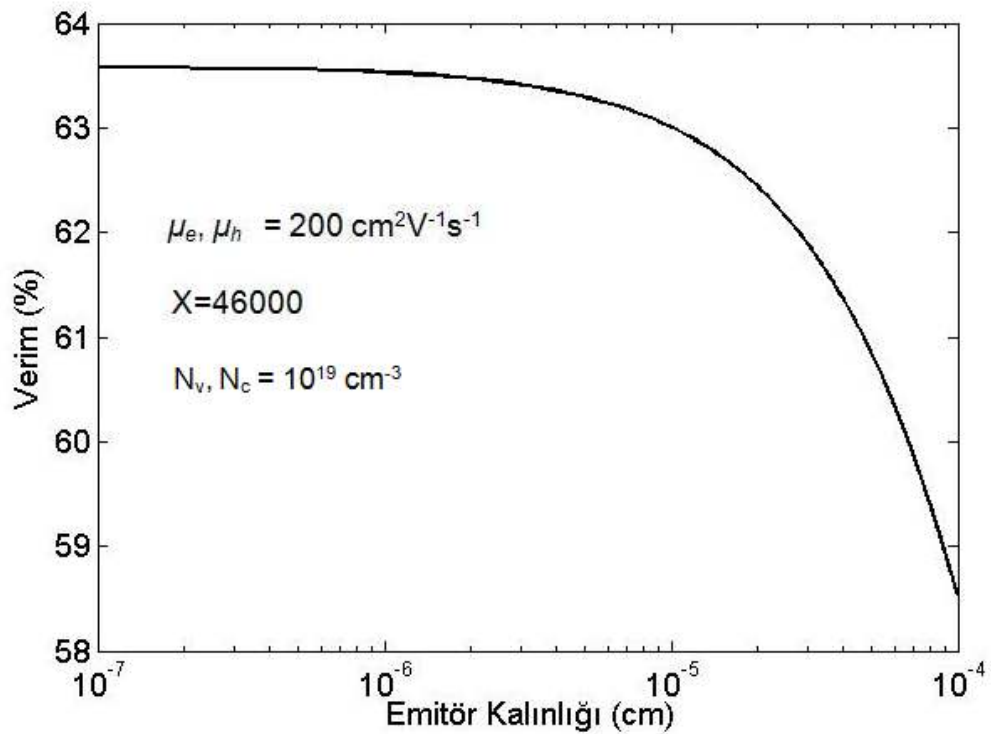
Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü üzere $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ve $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ değerleri arasında önemli bir verim farkı bulunmamaktadır. $\mu_e = \mu_h = 200 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ için maksimum verim %63.6 iken $\mu_e = \mu_h = 2000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ için maksimum verim % 63.7 'dir

5.2. Emitör Etkisinin Hesaba Katılması Durumunda Verimin İncelenmesi

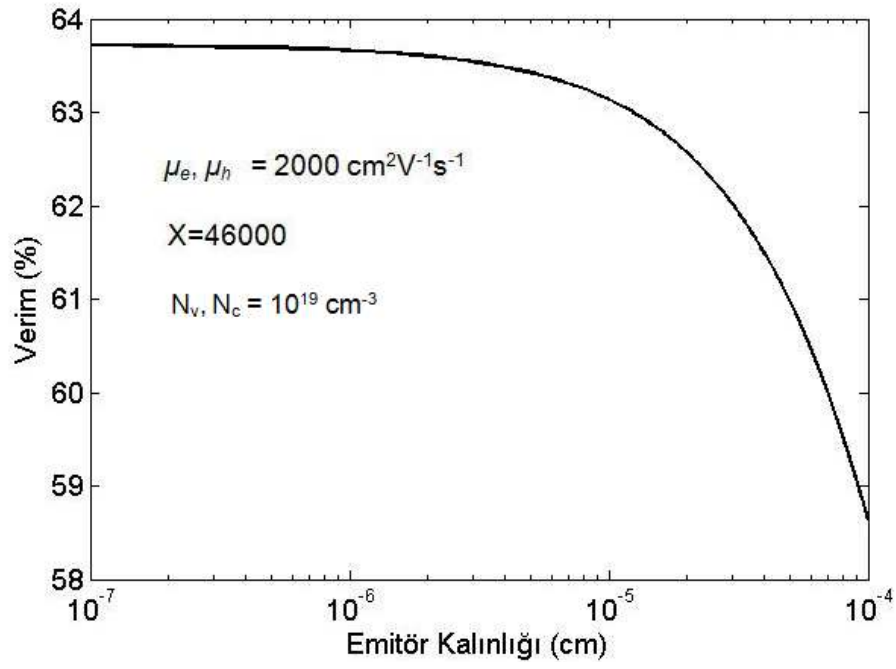
Bundan önceki bölümde, elektron ve boşluk mobiliteleri (μ_e, μ_h), valans ve iletkenlik bandındaki enerji durum yoğunlukları (N_v, N_c), ışık konsantrasyonu (X), pil kalınlığı (w) ve ara bant enerji seviyesinin (E_L) verim üzerindeki etkilerini inceledik. Bu bölümde ise emitörle ilgili olan parametrelerin verim üzerindeki etkilerini inceleyeceğiz. Bu parametreler; emitör kalınlığı ve emitör katkı oranıdır. Emitör katkı oranını emitör $E_C - E_F$ 'sine farklı değerler vererek değiştireceğiz. Emitör yasak bant aralığını (E_G) 1.95 eV olarak sabit alacağız.

5.2.1. Emitör kalınlıklarının verime etkisi

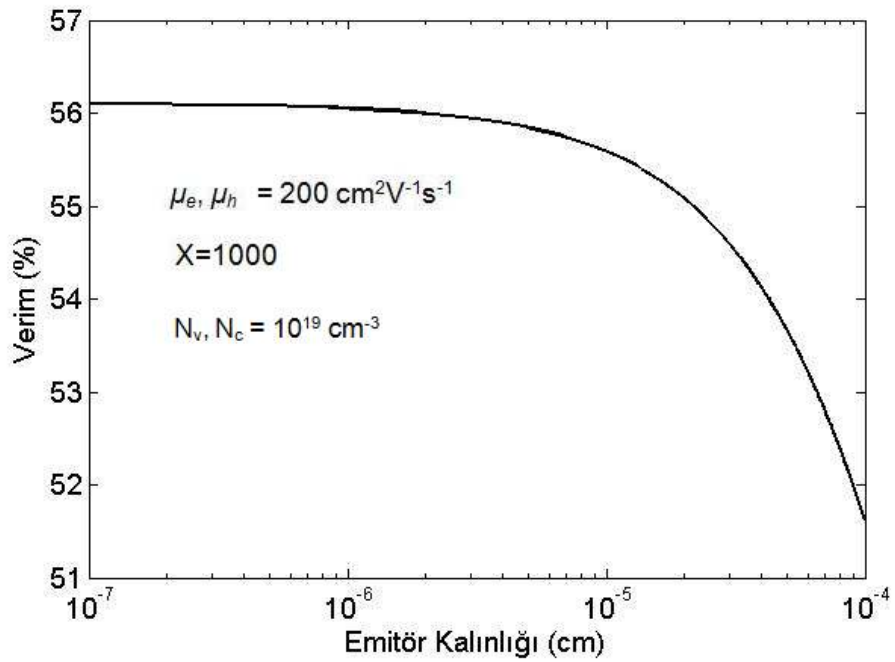
Bundan önceki bölümlerde emitör etkisi matematiksel modele dahil edilmemişti. Bu bölümde ise emitör kalınlığının verime etkisi incelendi. Farklı mobilite, enerji durum yoğunluğu ve ışık konsantrasyonları altında emitör kalınlığının da hesaba katılması sonucu Şekil 5.38.-5.45. şekilleri elde edilmiştir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere emitör kalınlığı arttıkça verim daha da azalmaktadır.



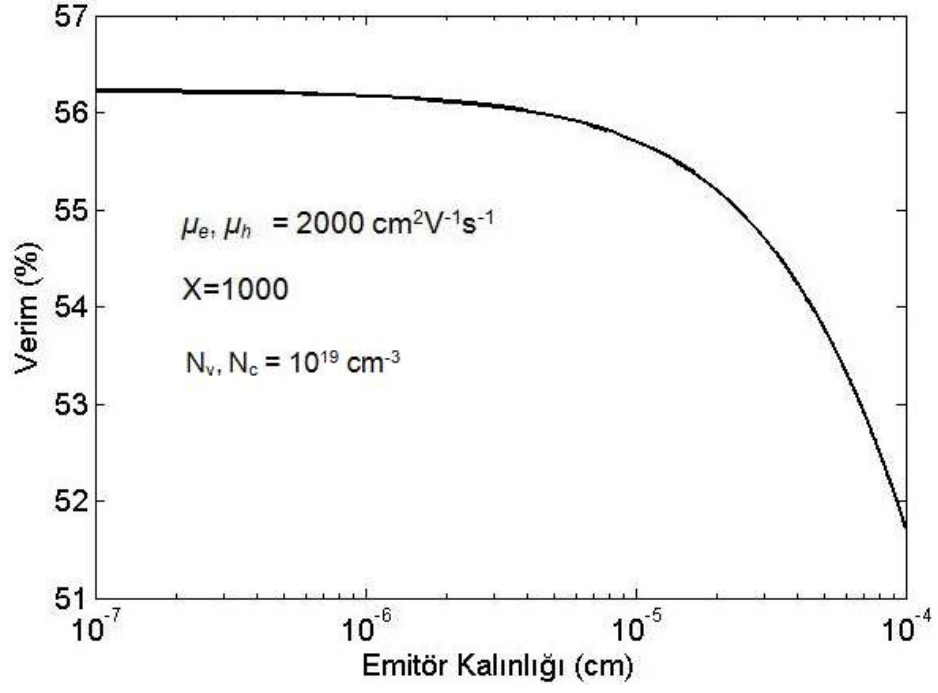
Şekil 5.38. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



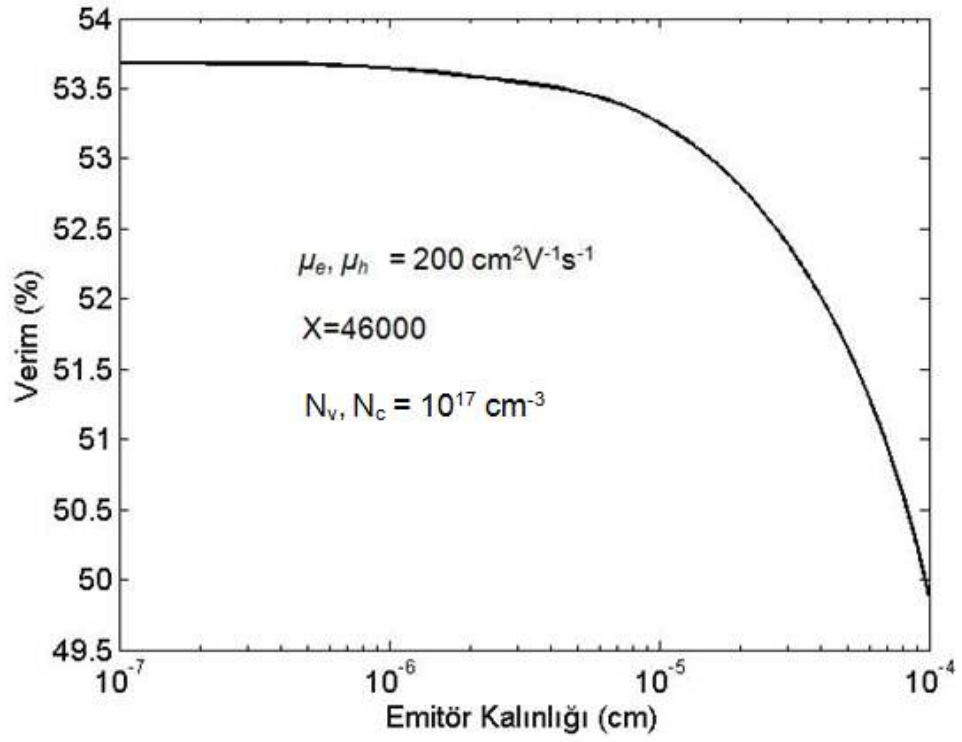
Şekil 5.39. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



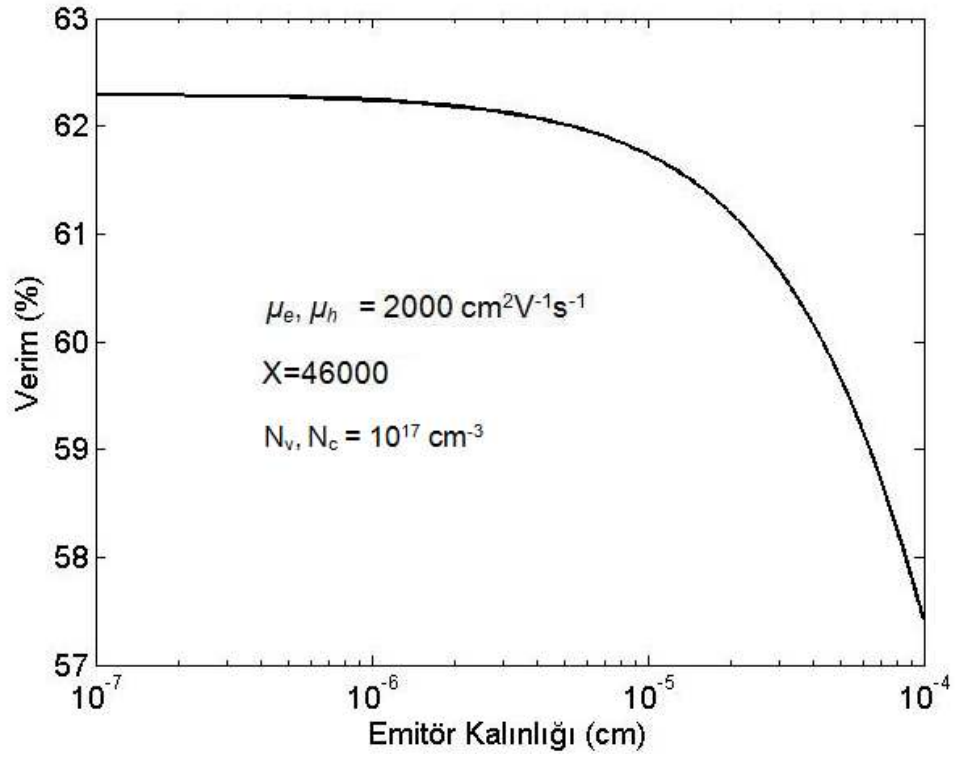
Şekil 5.40. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



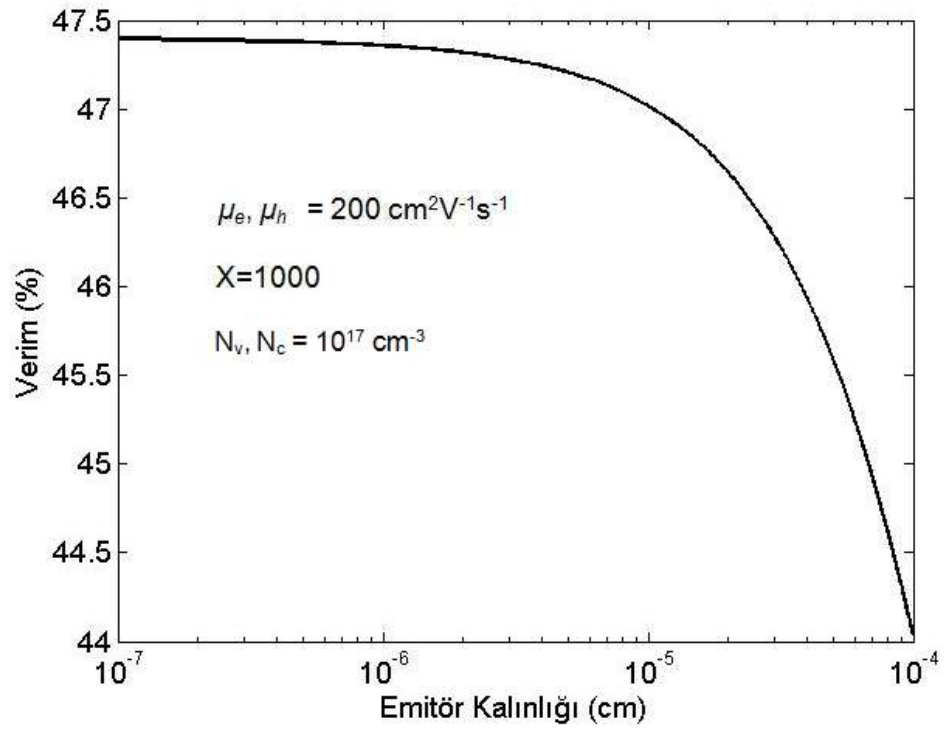
Şekil 5.41. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



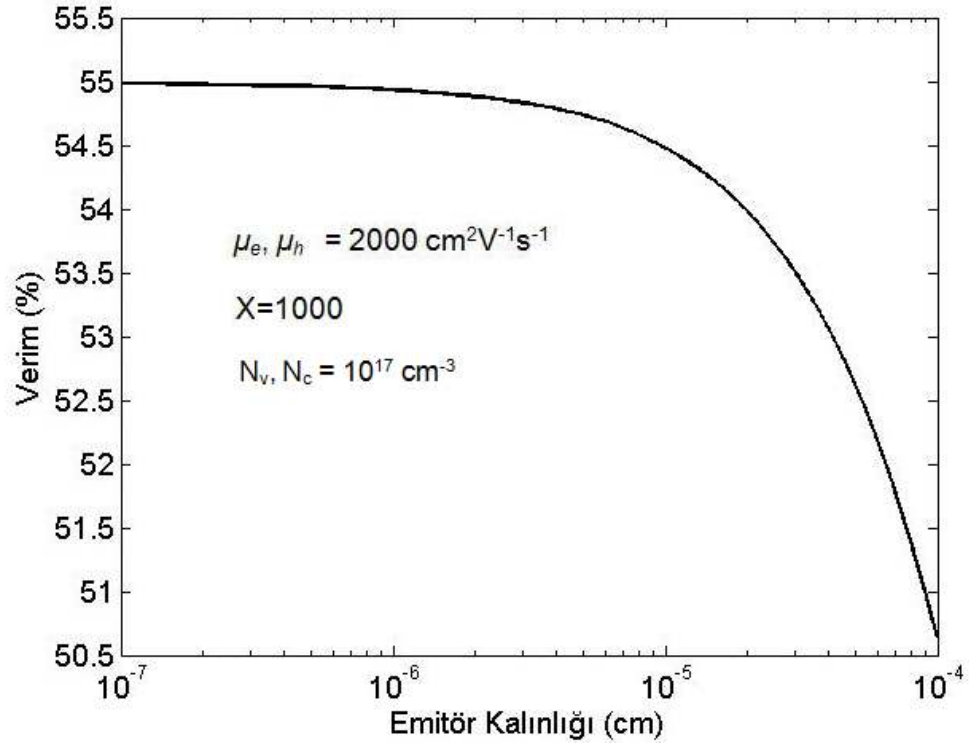
Şekil 5.42. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



Şekil 5.43. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



Şekil 5.44. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi



Şekil 5.45. Emitör kalınlığı-verim ilişkisi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ara bant yapılı güneş pilleri, baz bölgesindeki yarıiletkenin yasak bant aralığının içine yerleştirilen ara bant sayesinde düşük enerjili fotonları da soğurarak fotoakımı çıkış gerilimini düşürmeden artıran bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada ABGP sonlu farklar yöntemi ile modellenmiş ve nonlinearlik etkisi ihmal edilerek literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [6].

Hesaplamalarda ABGP için optimum bant aralığı olarak bildirilen $E_G=1.95$ eV değeri kullanılmıştır. Bu ABGP için verimin; taşıyıcı mobiliteleri, etkin enerji yoğunluğu, baz bölgesi kalınlığı, ışık konsantrasyonu ve AB enerji seviyesi ile değişimleri elde edilmiştir. Her bir parametrenin, taşıyıcı yoğunlukları ve akım yoğunluklarının baz bölgesi boyunca değişimlerine ve $J-V$ karakteristiklerine olan eğrileri de incelenmiştir. Son aşamada başlangıçta çok ince kabul edilerek etkileri ihmal edilen emitörler modele dahil edilmiş ve verimin emitör kalınlığı ile değişimi bulunmuştur.

Yapılan hesaplamalarda, daha önce sunulan sonlu elemanlar yöntemine uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [6]. Buna göre detaylı denge modelinde sunulan hedef verime ulaşabilmek için mobilitenin $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'den ve etkin enerji durum yoğunluğunun 10^{19} cm^{-3} 'den küçük olmaması gerekmektedir. Verimde önemli bir kayıp olmaması içinse enerji durum yoğunluğunun 10^{17} cm^{-3} 'den ve mobilitenin $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'den büyük olması gerekmektedir [6]. Mobilitenin azaldığında, ışıkla üretilen taşıyıcılar yeteri kadar hızlı olmadıklarından, akıma katkıda bulunamadan kaybolmaktadırlar. Bunu engellemek için baz bölgesi kalınlığı azaltılabilir fakat bu defa da baz bölgesi çok ince olduğundan fotonların bir kısmı soğuramaz ve verim yine azalır. Bu sonuçlar ABGP üretimi için malzeme seçiminde yol gösterici olabilecek niteliktedir.

Verimin ABGP baz bölgesi kalınlığı ile değişimi $N_{C,V}=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ için mobilitenin 2000 ve $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerlerinde incelenmiş ve bu değerler için optimum baz kalınlığının yaklaşık $5 \text{ }\mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir.

Verimin ışık konsantrasyonu ile değişimi incelendiğinde logaritmik bir artış olduğu görülmüştür. Işık konsantrasyonu pil yüzeyine gelen foton sayısını artırdığı için fotoakımda doğrusal, çıkış gerilimi ve verimde ise logaritmik bir artış sağlamaktadır. Yüksek ışık konsantrasyonu küçük alanlardan yüksek güçler elde etmek için son nesil güneş pillerinde tercih edilen bir uygulamadır. Ancak ışık konsantrasyonunun çok yüksek değerlerinde verimde artış yerine azalma meydana gelmektedir [6]. Bu çalışmada nonlineerlik terimi hesaba katılmadığından bu azalma hesaplama sonuçlarına yansımamıştır.

Verim- E_L değişimi detaylı denge ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olmuş [6] ve maksimum verimi sağlayan optimum AB seviyesinin 0.71 eV'da olduğu görülmüştür.

Emitör etkisi modele dahil edilip, verimin emitör kalınlığı ile değişimi incelendiğinde, emitör yaklaşık 20 nm'den daha kalın olduğunda verimde bir azalma olduğu görülmüştür. Bu azalmanın sebebi, fotonların bir kısmının baz bölgesine ulaşmadan emitör tarafından soğurulmasıdır.

Bu çalışmada, sonlu farklar yöntemi ile çözülen eşitlikte, örtüşme ve nonlineerlik terimleri ihmal edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda örtüşme terimi modele dahil edilerek, soğurma katsayıları arasındaki örtüşmenin etkileri incelenebilir. Nonlineerliğin modele dahil edilmesi ise yüksek ışık konsantrasyonu değerlerinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Düşük ışık konsantrasyonunda modelimizin verdiği sonuçların oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir. Burada, emitörlerin sadece kalınlık etkileri analiz edilmiştir. Emitör katkı konsantrasyonu etkileri de kritik öneme sahiptir ve incelenmesi uygulamaya yönelik çalışmalar için faydalı bilgiler sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Sarbani B., Antia H. M. "Helioseismology and Solar Abundances", *Physics Reports*, 457: 217-283 (2007).
2. Manuel O. K. and Hwaung G. "Solar abundance of the elements", *Meteoritics*, 18 (3): 209-222 (1983).
3. Kerr F. J., Lynden-Bell D. "Review of galactic constants", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 221: 1023–1038 (1986).
4. Godier S., Rozelot J.-P. "The solar oblateness and its relationship with the structure of the tachocline and of the Sun's subsurface", *Astronomy and Astrophysics*, 355: 365–374 (2000).
5. İnternet: E.İ.E. İdaresi Genel Müdürlüğü "Güneşten Gelen Işınının Dağılımı" <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunesisinim.html> (2011).
6. Navruz, T.S., "Arabant Yapılı Güneş Pillerinde Verim Optimizasyonu", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-8 (2008).
7. Özgöçmen, A., "Güneş Pilleri Kullanarak Elektrik Üretimi", Yüksek lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-11 (2007).
8. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü " Türkiye'de Güneş Enerjisi" <http://www.eie.gov.tr/turkce/yek/gunes/tgues.html> (2011).
9. Karamanav, M., "Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri" Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 28-31 (2007).
10. Cuadra L., Marti A., Luque A. "Present status of intermediate band solar cell research", *Thin Solid Films*, 451–452, 593–599 (2004).
11. Luque A., Marti A., "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels", *Phys. Rev.Lett.* 78 (26): 5014–5017 (1997).
12. Luque A., Marti A., "A metallic intermediate band high efficiency solar cell", *Prog.Photovolt. : Res. Appl.*, 9 (2): 73–86 (2001).
13. Luque A., Marti A., Cuadra L., "High efficiency solar cell with metallic intermediate band", *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Glasgow, 59–62 (2000).

14. Brown A.S., Green M.A., Corkish R.P., "Limiting efficiency for a multi-band solar cell containing three and four bands", *Physica E*, 14 (1–2): 121–125 (2002).
15. Bremner S.P., Corkish R., Honsberg C.B., "Detailed balance efficiency limits with quasi-fermi level variations", *IEEE Trans. Electron Dev.*, 46 (10): 1932–1939 (1999).
16. M.Wolf, "Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters, Part I: considerations for earth's surface operation", *Proc.IRE*, 48 :1246–1263 (1960).
17. Keevers M.J., Green M.A., "Efficiency improvements of silicon solar cells by the impurity photovoltaic effect", *J. Appl.Phys.*, 75: 4022–4031 (1994).
18. Keevers M.J., Green M.A., "Efficiency improvements of silicon solar cells by the impurity photovoltaic effect", *J.Appl.Phys.*, 75 (8): 4022-4031 (1994).
19. Shockley W., Queisser H.J., "Detailed balance limit of efficiency of p-n junctions solar cells", *J.Appl.Phys.*, 32: 510 (1961).
20. Güttler G. , Queisser H.J.," Impurity photovoltaic effect in silicon", *Energy Convers.*,10: 51–55 (1970).
21. Würfel P., "Limiting efficiency for solar cells with defects from a three-level model", *Sol. Energy Mater.Sol.Cells*, 29 :403–413 (1993).
22. Shockley W., Read W.T., "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons", *Phys. Rev.*, 87 (5): 835 (1952).
23. Hall R.N., "Electron-Hole Recombination in Germanium" *Phys. Rev.*, 87 (2): 387 (1952).
24. Barnham K., Duggan G., "A new approach to high-efficiency multi- band-gap solar cells ", *J. Appl. Phys.*, 67 (7): 3490–3493 (1990).
25. Araujo G.L., Marti A., Ragay F.W., Wolter J.H., "H.S. Stephens and Associates" *Proceedings of 12th E.C Photovoltaic Energy Conference*, , Bedford, 1481 –1484 (1994).
26. Ragay F.W., Wolter J.H., Marti A., Araujo G.L., "Experimental analysis of the efficiency of MQW solar cells", *Proceedings of 12th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Bedford, 1429 –1432 (1994).

27. Ragay F.W., Marti A., Araujo G.L., Wolter J.G., "Experimental analysis of the efficiency of heterostructure GaAs-AlGaAs solar cells", *Sol.Ener gy Mater. Sol.Cells*, 40 (1): 5–21 (1996).
28. Kettemann S., Guillemoles J.F., "H.S. Stephens and Associates" *Proceedings of 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Bedford, 119–121 (1995).
29. Luque A., Marti A., Cuadra L., "Thermodynamic consistency of sub-bandgap absorbing solar cell proposals", *IEEE Trans. Electron Dev.*, 48 (9) : 2118–2124 (2001).
30. Anderson N.G., "On quantum well solar cell efficiencies", *Physica E*, 14 (1–2): 126–131 (2002).
31. Luque A., Marti A., Cuadra L., "Thermodynamics of solar energy conversion in novel structures", *Physica E*, 14 (1–2): 107–114 (2002).
32. Green M.A., "Multiple band and impurity photovoltaic solar cells: general theory and comparison to tandem cells", *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 9: 137–144 (2001).
33. Brown A.S., Green M.A., Corkish R.P., "Limiting efficiency for a multi-band solar cell containing three and four bands", *Physica E*, 14 (1–2): 121–125 (2002).
34. Würfel P., "Three and Four Bands Solar Cells", *Oral presentation at the International Workshop on Nanostructures in Photovoltaics*, Dresden, (2001).
35. Bremner S.P., Honsberg C.B., Corkish R., "Non-ideal recombination and transport mechanisms in multiple band gap solar cells", *28th PVSC, IEEE*, New York, 1206 –1209 (2000).
36. Luque A., Marti A., Cuadra L., "Impact-ionization-assisted intermediate band solar cell", *IEEE Trans.Electr on Dev.*, 50 (2): 447–454 (2003).
37. Luque A., Marti A., Wahnou P., Cuadra L., Tablero C., Stanley C., McKee A., Zhou D., Könenkamp R., Bayon R., Belaidi A., Alonso J., Ruiz J., Fernandez J., Palacios P., Lopez N., "Progress towards the practical implementation of the intermediate band solar cell", *29th IEEE PVSC*, New Orleans (2002).
38. Wahnou P., Tablero C., " Ab initio electronic structure calculations for metallic intermediate band formation in photovoltaic materials", *Phys.Rev . B*, 65 (165115): 1–10 (2002).

39. Tablero C., Wahnou P., “ Analysis of metallic intermediate-band formation in photovoltaic materials”, *Appl.Phys.Lett.*, 82 (1): 151–153 (2003).
40. Wahnou P., Tablero C., Palacios P., Fernandez J.J., “Characterisation of optical transitions by first principles for new photovoltaic material with isolated metallic intermediate band”, *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, (2003).
41. Konenkamp R., Dloczik L., Ernst K., Olesch C., “Nanostructures for solar cells with extremely thin absorbers”, *Physica E*, 14 (1–2): 219–223 (2002).
42. Luque A., Marti A., Cuadra L., “High efficiency solar cell with metallic intermediate band”, *Proc. 16th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.*, London , 59–61 (2000).
43. Luque A., Marti A., Cuadra L., “Thermodynamic consistency of sub-bandgap absorbing solar cell proposals,” *IEEE Trans. Electron Devices*, 48: 2118–2124 (2001).
44. Marti A., Cuadra L., Luque A., “Quasi drift-diffusion model for the quantum dot intermediate band solar cell”, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 49 (9): 1632–1639 (2002).
45. Marti A., Cuadra L., Luque A., “Analysis of the space charge region of the quantum dot intermediate band solar cell, ”*Proc. 199th Electrochem. Soc. Meeting*, 46–60 (2001).
46. Marti A., Cuadra L., Luque A., “Partial filling of a quantum dot intermediate band for solar cells,” *IEEE Trans. Electron Devices*, 48: 2394–2399 (2001).
47. Marti A., Cuadra L., Luque A., “Design constraints of the quantum dot intermediate band solar cell,” *Phys. E*, 14: 150–157 (2002).
48. Balenzategui J. L., Marti A., “The losses of efficiency in a solar cell step by step, ”*Proc. 14th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Bedford, 2374–2377 (1997).
49. Asbeck P., “Self-absorption effects on the radiative lifetime in GaAs–GaAlAs double heterostructures,” *J. Appl. Phys.*, 48: 820–822 (1977).
50. Pankove J. I., “Optical Processes in Semiconductors”, *New York*, Dover, 108–111 (1975).
51. Hovel H. J., “Semiconductors and Semimetals”: *Solar Cells*, London, ch. 1-2 (1975).

52. Yablonovitch E., Cody G. D., "Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells," *IEEE Trans. Electron Devices*, 29: 300–305 (1982).
53. Trupke T., Green M.A., Würfel P., "Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light", *Journal of Applied Physics*, 92(7): 4117-22 (2002).
54. Trupke T., Green M.A., Würfel P., "Improving solar cell efficiencies by down-conversion", *Journal of Applied Physics*, 92(3): 1668-1674 (2002).
55. Schaller R.D., Klimov V.I., "High efficiency carrier multiplication in PbSe nanocrystals: Implications for solar energy conversion", *Physical Review Letters*, 92(18): 186601/1-4, (2004).
56. Brendel R., Werner J. H., Quessier H.J., "Thermodynamic efficiency limits for semiconductor solar cells with carrier multiplication", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 42: 419-425 (1996).
57. Honsberg C.B., "Approaches for Ultra High Efficiency Solar Cells", *School of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware*, Newark, DE, 19711, 1-3 (2005).
58. Brown A.S., Green M. A., "Intermediate band solar cell with many bands: Ideal performance", *Journal Of Applied Physics*, 94(9): 6150- 6158 (2003).
59. Internet: Massachusetts Institute of Technology " Boundary Value Problems:The Finite Difference Method "
http://web.mit.edu/10.001/Web/Course_Notes/Differential_Equations_Notes/node9.html (1998).

EKLER

EK-1. Sınır Değer Problemleri: Sonlu Fark Metodu [59]

Sınır değer problemlerinin sayısal çözümü için bir çok metot vardır. Biz bunlardan, olan sonlu fark modelini bir örnek vasıtasıyla açıklayacağız. Ayrıca, bu bize başlangıç değer problemleri ve sınır değer problemleri için sayısal çözüm teknikleri arasındaki önemli farkları göstermektedir.

Aşağıdaki reaksiyon difüzyon probleminde $0 \leq x \leq 1$ aralığında $C(x)$ 'in kararlı durum konsantrasyonu profilini tanımladığı bir lineer sınır değer problemi olarak düşünelim. Sınır değer problemi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{d^2 C}{dx^2} - C = 0$$

$$C(x=0) = 1$$

$$\frac{dC}{dx}(x=1) = 0.$$

Yukarıdaki sınır değer probleminin analitik çözümü şu şekilde verilir:

$$C^e(x) = \frac{\exp(2-x) + \exp(x)}{1 + e^2}$$

Biz yukarıdaki denklemin sonlu fark metoduyla çözümünü ilgileniyoruz. İlk adım $[0,1]$ aralığını belli bir sayıda alt aralığa yada h uzunluktaki aralıklara bölmektir. Yani, eğer aralık sayısı n ise, $nh=1$ olmalıdır. Biz sınır değerlerini ve $x_i=0, x_{n+1}=1$ arası değerleri x_i ile gösteriyoruz.

EK-1. (Devam) Sınır Değer Problemleri: Sonlu Fark Metodu [59]

Genel olarak;

$x_i = (i-1)h \quad i = 1, 2, \dots, n+1$ eşitliğimiz bulunmaktadır.

i noktasındaki değer C_i ile ifade edilmektedir.

İkinci adım ise d^2C/dx^2 diferansiyel operatörünü ayrık formda ifade etmektir. Bu, sonlu fark yaklaşımlarını diferansiyel operatörlere uygulanmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu problemde biz aşağıdaki yaklaşımı kullanacağız.

$$\left(\frac{d^2C}{dx^2}\right)_i = \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{h^2}.$$

Birinci derece türev çözümü için ise aşağıdaki ayrıştırmayı kullanacağız.

$$\left(\frac{dC}{dx}\right)_i = \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h}. \quad (1.1)$$

Yukarıda verilen sonlu fark ayrıştırmaları, merkezi fark yaklaşımları olarak adlandırılmaktadır. Yukarıda verilen yaklaşımlarla birleştirilen yerel kırpmada hatası $O(h^2)$ 'dir. Şimdi ayrık eşitlikler türetelim. İlk olarak sınır şartları dahil edilmelidir. $x=0$ 'da verilen sınır koşulu;

$$C_1 = 1 \text{ olur} \quad (1.2)$$

$x=1$ 'deki uygulama biraz daha zordur. Eşitlik 1.2'ye göre aşağıdaki eşitlik türetilebilir. ($i=n+1$ ile)

EK-1. (Devam) Sınır Değer Problemleri: Sonlu Fark Metodu [59]

$$\frac{C_{n+2} - C_n}{2h} = 0 \quad \text{or} \quad C_{n+2} - C_n = 0.$$

Ancak, C_{n+2} zorluk yarattığı için bizim aralığımıza dahil değildir. Biz burada ne yapıyoruz? Çözüm orijinal aralığı olan $(0, nh)$ aralığından $(0, (n+1)h)$ aralığına genişletilmiştir.

$C_1, C_2, \dots, C_{n+1}$ sonuçlarına ilaveten C_{n+2} sonucunu da buluyoruz ama en son çözümden C_{n+2} sonucunu eliyoruz.

Böylece $2, 3, \dots, n+1$ biz $n+2$ tane bilinmeyen için iki tane eşitlik bulmuş olduk. Kalan n tane eşitlik şeklinde yazılarak elde edilmiştir. 1.1 eşitliğindeki uygulama sınır koşullarının uygulanmasıyla C_i için aşağıdaki lineer sistem oluşturulmuştur.

$$C_1 = 1$$

$$C_3 - (2 + h^2) C_2 + C_1 = 0$$

$$C_4 - (2 + h^2) C_3 + C_2 = 0$$

.....

$$C_{n+2} - (2 + h^2) C_{n+1} + C_n = 0$$

$$C_{n+2} - C_n = 0.$$

Biz bu $(n+2) \times (n+2)$ sistemi matris kullanarak ifade edebiliriz. Yukarıdaki eşitlikleri verilen sisteme göre A matrisi oluşturabiliriz.

EK-1. (Devam) Sınır Değer Problemleri: Sonlu Fark Metodu [59]

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -(2+h^2) & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -(2+h^2) & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -(2+h^2) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Sistem eşitliği $\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} = \mathbf{b}$ şeklindedir.

$\mathbf{b} = (1, 0, 0, \cdots, 0)^T$ eşitliğin sağ tarafı vektörüdür.

$\mathbf{c} = (C_1, C_2, \cdots, C_{n+2})^T$ ise çözüm vektörüdür.

Bu sistem eşitliğini biz Gauss Eleminasyon yöntemi kullanarak çözdük.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BÜYÜKBAŞ, Mahmut
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.04.1985 Kayseri
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (532) 612 38 83
e-mail : mahmutbuyukbas@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi /Elekt.Elekt. Müh. Bölümü	2009
Lise	Sema Yazar Anadolu Lisesi	2003

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Basketbol, Sinema, Seyahat etmek.