



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**FOTOVOLTAİK CİHAZLARIN VERİMİNE ETKİ EDEN FİZİKSEL
FAKTÖRLERİN MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ersin YILDIZ

Danışman: Prof. Dr. Salih SAYGI

TOKAT- 2023

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Salih SAYGI danışmanlığında hazırlamış olduğum “Fotovoltaik Cihazların Verimine Etki Eden Fiziksel Faktörlerin Modellenmesi” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

.../.../...

Ersin YILDIZ



İTHAF

Eşime ve kızıma...

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince gece gündüz demeden ilgisini, desteğini ve bilgisini esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. Salih SAYGI' ya teşekkür ederim.

Bu hayatta her durumda bana olan desteğini, sabrını ve hiç çekinmeden fedakârlığını esirgemedi hep destekçim olan sevgili eşim Şeyma KARAMETE YILDIZ' a, çok sevdiğim biricik kızım Zeynep HÜMA YILDIZ' a, bu duruma gelebilmemde çok büyük emeği olan annem Nezahat YILDIZ' a, babam Ebubekir YILDIZ' a teşekkürlerimi borç bilirim.



ÖZET

Fotovoltaik Cihazların Verimine Etki Eden Fiziksel Faktörlerin Modellenmesi

Ersin YILDIZ

Yüksek Lisans, Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Salih SAYGI

Ağustos 2023, vi + 65 sayfa

Foto-voltaik sistemler, diğer sistemlere oranla üretim maliyeti düşük olan, ara malzemeye ihtiyaç duymadan güneşten aldığı ışığı doğru akıma çevirerek elektrik enerjisi elde etmemizi sağlayan sistemlerdir. Günümüzde enerjinin maliyeti ve önemi göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden elektrik elde etme yöntemi oldukça kullanışlı bir yöntem olacaktır. Güneş pili foto-voltaik sistemlerin en temel halidir. Foto-voltaik sistemlerin veriminin artırılmasını sağlamak için güneş pilinin verimini arttırmamız gerekmektedir. Teorik çalışma deneysel çalışmanın zaman ve maliyet açısından daha uygun bir şekilde planlama yapılmasını sağlar. Teorik olarak yapılan çalışmalarda güneş pilinin üzerine düşen ışık vasıtasıyla oluşturduğu akım ve gerilime bağlı matematiksel ifadesinin analizi yapılabilir. Üretilen bu matematiksel ifade bize güneş pilinin üzerindeki oluşan akım, gerilim ve çıkışından alacağımız güç değerlerinin hangi değişken parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir. Güneş pilinin verimine etki eden parametrelerin değişimine bağlı olarak oluşan sonuç gözlemlenebilir.

Güneş pili üzerine düşürülen ışığın şiddeti, sıcaklık ve katkılama yöntemi ile konsantrasyon değerleri değiştirip diğer parametreleri sabit tutup güneş pilinin akım gerilim ve güç gerilim grafiklerini MATLAB benzetim programı ile oluşturduk. Bu grafikler yardımıyla güneş pili üzerindeki doldurma faktörü ve kuantum verimlilik değerlerinin hesaplaması yapıldı.

Bunun sonucunda ışık akısı artarsa güneş pili üzerine oluşan kısa devre akımın değeri ile açık kapı voltajının arttığı gözlemlendi. Bu durumda güneş pilinin çıkışından alınacak güç değerinin ve veriminin arttığını gördük. Bu durum bize foto-voltaik sistemlerin üzerine düşen ışık ve niteliği ile daha verimli çalışacağını gösterdi. Elde edilen bu sonuç daha önceki çalışmalar ile uygun olduğu görülmüştür.

Güneş pili verimine etki eden diğer parametre olan sıcaklık değerinin değişimi ve oluşan akım gerilim ve güç gerilim grafikleri incelendi. Yapılan inceleme sonucunda verime etki eden diğer parametreler sabit tutulurken sadece sıcaklık değerini artırdığımızda kısa devre akımındaki küçük artışa karşılık açık kapı gerilimindeki büyük azalma güneş pilinin çıkışından

aldığımız güç ve verim değerinde azalma görülmüştür. Bunun sonucunda foto-voltaik sistemlerin sıcaklığın fazla olduğu bölgelerde veriminin düştüğünü söyleyebiliriz. Bu durumun daha önceki çalışmalar ile uyumluluk gösterdiği görülmüştür.

Bir diğer parametre olan elektron-hol konsantrasyonunun değişimi ile oluşturduğumuz akım gerilim ve güç gerilim grafikleri incelendi. Yapılan inceleme sonucunda katkılama da ortaya çıkan sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görüldü. Güneş pillerinden oluşturulan fotovoltaik panelin üreteceği enerji miktarının tahmin edilmesi ve verimli bir şekilde çalışması nümerik ifadelerin analizi ve simülasyonu oldukça önemlidir. Yaptığımız bu çalışmanın amacı bu alanda yapılacak çalışmalara yol gösterici olması açısından güneş pilinin verimine etki eden parametreleri bir arada inceledik.

Anahtar Kelimeler: Güneş Pili, Matlab, Fotovoltaik, Verim, Yarıiletken, Kirlilik, Sıcaklık

ABSTRACT

MODELING OF PHYSICAL FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC DEVICES

Ersin YILDIZ

M.Sc., Department of Solid-State Physics

Supervisor: Assist. Prof.Dr. Salih SAYGI

August 2023, viii + 65 pages

Photovoltaic systems with low production budgets are systems that convert the light collected from the sun to direct-current, DC, without using any intermediate materials. Considering the cost and importance of obtaining energy, it is a useful method to get electricity from solar energy which is one of the renewable energy sources.

The solar cell is a photovoltaic system. For the efficiency of photovoltaic systems, in general, it is necessary to work on the efficiency of the solar cell. In this study we work theoretically which is complementary to the experimental work and admits better intending in terms of time and cost. With the analytical equations obtained from the theoretical study, the expression based on the current and voltage produced by the light falling on the solar cell examined. In this work, generated mathematical expressions allow us to effort on the dependence of the current, of the voltage and of the power values that we will get from the solar cell on external variable parameters. The external variables are those that affect the efficiency of the solar cell.

The current voltage and power voltage graphs of the solar cell are analyzed regard as the function of intensity of incident light, effect of temperature and doping-concentration values. In study, other than these parameters were kept in constant. Here, the analysis was made with Matlab and Mathematica like simulation program. Using these graphs, the occupancy factor and quantum efficiency values in a solar cell were calculated. So, it was observed that the magnitude of the short-circuit current and the open-gate voltage on the solar cell increased with increasing luminous flux. In this case, we have seen that the power value and efficiency obtained at the output of the solar cell increase. This showed us that photovoltaic systems will work more efficiently with the falling light and light-quality. The results were found good consistent with previous studies.

The change in the temperature value which is an important parameter affecting the efficiency of the solar cells were investigated thru graphs of the current-voltage and power-voltage.

As a result, there was a significant decrease in open-gate voltage compared to a small increase in short-circuit current when we only increased the temperature value while keeping other parameters constant affected efficiency.

It can be said that the efficiency of photovoltaic systems decreases in regions where the temperature is high. This circumstance was found to be consistent with previous studies. We examined the graphs IV and PV generated with altering electron-hole concentration parameters. As a result of the circumstance, it was seen that the results obtained with doping, electron-hole concentration, correspond with the literature data.

Keywords: Solar Cell, Matlab, Photovoltaic, Efficiency, Semiconductor, Impurity, Temperature



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME	iii
İTHAF.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bakış.....	1
1.2.Tezin Amacı ve Önemi	2
1.3. Tezin İşleme Biçimi	4
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ, KURAMSAL TEMELLER	6
2.1.Yarıiletkenler	6
2.1.1. Katkılı Yarıiletkenler, N Tipi Yarıiletken, P Tipi Yarıiletken	8
2.1.2. Jenerasyon-Rekombinasyon ve Yüzey Rekombinasyon Olayları	10
2.2. PN Eklem.....	11
2.2.1. PN eklemde Düz Beslenme ve Ters Beslenme	13
2.2.2. Foto-voltaiklik	15
2.3. Yarıiletken Elektronik Cihaz: Güneş Pili	17
2.3.1. Güneş Pili ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar	19
2.3.2. Birinci Nesil Güneş Pilleri	26
2.3.3. İkinci Nesil Güneş Pilleri.....	27
2.3.4.Üçüncü Nesil Güneş Hücreleri	30
3.1. Güneş Pili, Akım Gerilim Karakteristiği	33
3.2. Analitik Modellenmesi	35
3.3. Cihazın Nümerik Sonuçlarının Elde edilmesi.....	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1. Işık Şiddeti Etkisi.....	44
4.2 Katkılama Etkisi	50

4.3 Sıcaklık Etkisi	54
4.4 Yüzey Yüklerinin Etkisi.....	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
6. KAYNAKLAR.....	62
7. ÖZGEÇMİŞ	66



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Sayfa
Şekil 1. Enerji Bandları	6
Şekil 2. Periyodik cetvelde yarıiletken özellik gösteren elementler	7
Şekil 3. Silisyum atomunun fosfor atomu ile yaptığı kovalent bağ	9
Şekil 4. Silisyum atomunun Bor atomu ile yaptığı kovalent bağ.....	10
Şekil 5. Elektron ve hollerin difüzyonu sonucu arınmış bölgenin oluşması(Collinge JP & Collinge CA, 2011)	12
Şekil 6. Düz beslem altındaki PN eklem.....	13
Şekil 7. Düz beslem altındaki PN eklem enerjisi band şeması	14
Şekil 8. Ters beslem altındaki PN eklem	14
Şekil 9. PN eklem ters beslem ve düz beslem altındaki akım gerilim karakteristiği	15
Şekil 10. Foto-voltaik hücrenin gösterimi(Nocito & Koncar, 2016)	17
Şekil 11. Güneş pili yapısı(Erol A & Balkan N, 2013).....	18
Şekil 12. Foto-voltaik cihazların sınıflandırılması.....	26
Şekil 13. a) p-i-n yapılı a-Si:H hücresi b) n-i-p yapılı a-Si:H hücresi	28
Şekil 14. CdTe güneş hücre yapısının gösterimi.....	29
Şekil 15. Boya duyarlı ve kuantum nokta duyarlı güneş hücrelerinin gösterimi(Kaya İ.C., 2021).....	31
Şekil 16. Organik güneş hücrelerinin şema gösterimi.....	32
Şekil 17. Güneş piline ait akım voltaj grafiği.....	34
Şekil 18. Güneş pilinin şematik gösterimi	35
Şekil 19. Aydınlik ve karanlık ortamda güneş piline ait akım gerilim karakteristiği. Gri bölge pilden dolayı direnç üzerine sağlanan gücü temsil eder.....	41
Şekil 20. Değişen ışık şiddeti altında güneş piline ait oluşan akım gerilim grafiği	47
Şekil 21. Değişen ışık şiddeti altında güneş piline ait güç gerilim grafiği.....	49
Şekil 22. Katkılama yapılan güneş piline ait akım gerilim grafiği.....	51
Şekil 23. Katkılama yapılan güneş piline ait güç gerilim grafiği.....	53
Şekil 24. Sabit ışınım ve konsantrasyon değerleri altında farklı sıcaklıklarda oluşan güneş pilinin akım gerilim grafiği	56
Şekil 25. Sıcaklık değişimi ile oluşan güneş piline ait güç gerilim grafiği	57

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo No	Sayfa
Tablo 1. Şekil 20 de akım gerilim grafiği verilen güneş piline ait değler.....	48
Tablo 2. Şekil 22’de verilen akım gerilim grafiğine ait değler	52
Tablo 3. Şekil 24’de verilen akım gerilim grafiğine ait veriler.....	56



SİMGE VE KISALTMALAR

SİMGE	AÇIKLAMA
A	PN eklem alanı (cm^2)
D _n	Elektron difüzyon katsayısı (cm^2/s)
D _p	Hol difüzyon katsayısı (cm^2/s)
FF	Dolum faktörü
G	Birim zamanda birim hacimde düzgün üretilen elektron hol çifti sayısı
G _n	Birim zamanda birim hacimde düzgün üretilen elektron sayısı
G _p	Birim zamanda birim hacimde düzgün üretilen hol sayısı
I_D	Karanlık akım (A)
I_L	Işık altında oluşan akım (A)
I_{sc}	Kısa devre akımı (A)
j	Toplam akım yoğunluğu (A/cm^2)
j_n	Elektron akım yoğunluğu (A/cm^2)
j_p	Hol akım yoğunluğu (A/cm^2)
k	Boltzmann sabiti ($J/°K$)
L _n	Elektron difüzyon uzunluğu (cm)
l_n	Elektronların eklem bölgesindeki genişliği (cm)
L _p	Hol difüzyon uzunluğu (cm)
l_p	Hollerin eklem bölgesindeki genişliği (cm)
n	Elektron yoğunluğu (cm^{-3})
n_0	Denge durumundaki elektron konsantrasyonu (cm^{-3})

n_p	Denge durumundaki hol konsantrasyonu (cm^{-3})
n_{p0}	Denge durumunda P tipi bölgedeki elektron konsantrasyonu (cm^{-3})
n'_p	P tipi bölgedeki fazla elektron konsantrasyonu (cm^{-3})
p	hol yoğunluğu (cm^{-3})
p_0	Denge durumundaki hol konsantrasyonu (cm^{-3})
p_n	N tipi bölgedeki hol konsantrasyonu (cm^{-3})
p_{n0}	Denge durumunda N tipi bölgedeki hol konsantrasyonu (cm^{-3})
p'_n	N tipi bölgedeki fazla hol konsantrasyonu (cm^{-3})
R	Direnç (Ω)
T	Sıcaklık ($^{\circ}K$)
U_n	Elektronlar için jenerasyon rekombinasyon hızı (cm/s)
U_p	Holler için jenerasyon rekombinasyon hızı (cm/s)
V_{oc}	Açık kapı gerilimi (V)
τ	Elektron ve holler için ortalama yaşam süresi (s)
τ_n	Elektronların yaşam süresi(s)
τ_p	Hollerin yaşam süresi (s)
η	Verim
q	Elektron yükü (C)

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bakış

Ekonomik ihtiyaçlar ve yaşamın devamlılığı için insanoğlu için enerji olmazsa olmaz ihtiyaçlardan biridir. Enerji ihtiyacı için yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere birçok noktadan karşılanması istenmiş ve bu alanda çalışmalar yapılmıştır. Kullandıkça rezervi tükenmeyen enerji türlerini yenilenebilir enerji kullandıkça rezervi tükenen enerji kaynaklarına yenilenemez enerji kaynakları diye ifade ediyoruz. Yenilenemez enerji kaynakları hem çevreye verdiği zarar hem de rezervinin tükenebilir olması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmasına ve yenilenebilir enerji ile enerji ihtiyacımızı karşılama noktasında bir zorunluluk haline gelmiştir.

Elektrik enerjisi hayatın her alanında kullanılan ve en çok ihtiyaç duyduğumuz bir enerji türüdür. Elde ettiğimiz elektrik enerjisinin birçok farklı enerji türüne dönüştürebildiğimiz içinde elektrik enerjisi diğer enerji türlerine oranla daha çok ihtiyaç duyduğumuz bir enerji türüdür. Bu durum insanları elektrik elde etme yöntemlerini aramaya itmiştir. Bu araştırma ve çabanın sonucu olarak yenilenebilir ve çevreye zarar vermeyen enerji elde etme yöntemleri bulunmuştur.

Hidroelektrik enerji suyun sahip olduğu potansiyel enerjinin barajlardaki tribünleri döndürüp kinetik enerjiye dönüşmesi ile elektrik elde etme yöntemidir. Bu yöntem hem maliyet çok maliyetli hem de zaman açısından oldukça zaman harcamasına sebep olan bir çalışmaydı. Ayrıca hidroelektrik santraller su kaynaklarının olduğu bölgelerde kurulabilir ve su kaynaklarının olmadığı bölgelerde bu santraller kurulamayacaktır.

Rüzgâr enerjisi kullanılmaya başlandı ve rüzgâr enerjisinden elektrik elde etmek için kurulan rüzgâr santralleri hidroelektrik santraller gibi oldukça maliyetli hem de rüzgâr santralleri kurulduğu bölgedeki rüzgârın yeterli düzeyde olması gerekiyordu. Tabi bu durumda rüzgâr enerjisinin her bölge için uygun olmayacağı ve kâr zarar dengesi açısından bakıldığında yeryüzündeki bazı bölgeler için kurulması o bölgedeki dengenin zarar yönünde değiştireceğini gösterecektir. Ayrıca rüzgâr enerjisi yapmış olduğu gürültü sebebiyle çevreye ve canlılara oldukça zarar vermektedir.

Güneş ışığı ise yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş ışığı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü enerji üretimi için yenilenebilir ve umut verici bir alternatiftir. Bu açıdan foto-voltaik teknolojisinin varlığı, insanlığın ihtiyaç duyduğu enerji ihtiyacının karşılanması noktasında önemli bir başlangıç noktası olmuştur. Foto-voltaik modüller hem maliyet açısından oldukça ucuz hem de ürettiği enerji bakımından gelişime açık modüllerdir. Bu ince film modüllerden üretilen enerjinin verimliliği güneş hücresi bazında %13,75 civarındadır. Bu verimlilik yüzdesi, yüzey yüklerinin katkısı ve değişkenlerin incelenmesi ile elde edilmiştir (Imran vd., 2021)

Dolayısıyla bu durumda insanları bu ucuz ve çevreci enerji üzerinde araştırma yapmaya sevk etmiştir. Nitekim güneş hücresi güneş ışınlarından elde ettiği enerji sayesinde hem ucuz hem de çevreci olması bakımından oldukça avantajlıdır. Fakat verimliliğinin düşük olması güneş hücresini dezavantajlı hale getirmektedir. Çalışmalar güneş hücresinin verimliliğinin artışı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Güneş hücrelerinin bir araya getirilmesiyle çok daha yüksek değerlerde elektrik enerjisi elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Güneş hücrelerinin verimliliğinin artması doğal olarak kullanılan güneş panellerinin verimini arttıracak ve güneş ışınlarından daha yüksek oranda enerji elde etmemizi ve bu enerji ile ihtiyaçlarımızı karşılamamızı sağlayacaktır. Foto-voltaik güneş hücresinde genellikle silikon malzeme kullanılmaktadır. Bununla birlikte daha yüksek verimlilik elde etmek için son zamanlarda, grup III–V bileşik yarı iletkenler de kullanılmaya başlanmıştır (Imran ve ark., 2021). Bu alandaki en uygun yarıiletken materyal ise düşük sıcaklık katsayılı, elektron hareketliliği ve durum yoğunluğu yüksek olan materyaldir (Imran ve ark., 2021).

1.2. Tezin Amacı ve Önemi

Bir bütün olarak çalışmanın amacı, öncelikle; bir güneş hücresinde akım-gerilim denklemlerinin analitik olarak türetilmesi, sonrasında güneş hücresinde verimlilik denkleminin belirli parametrelere bağlı olarak ortaya çıkarılmasıdır. Çalışmanın sonucunda ince film modülün karakteristiklerinin sıcaklık değişimi, materyallerin katkılanması ve ince film modülünü oluşturan materyalin yüzey yük yoğunluğu gibi dış etkilere nasıl değiştiğine nümerik hesaplamalar yapılarak ulaşılabacaktır.

Bu çalışmada foto-voltaik ince film modüller ile ilgili güneş hücresinin yapısının anlaşılmasında sayısal benzetim ve analitik yaklaşımların en iyi yöntemlerden birisi olduğu gösterilmeye çalışılacaktır.

Zira sayısal benzetim maliyet, zaman ve modül üretim karmaşıklığında azalma sağladığı için foto-voltaik modüllerin yapısını optimize etmek için en iyi araçtır. Bu konu ile ilgili daha önceki bazı çalışmalarda da bu durum görülmektedir(Imran ve ark., 2021).

Foto-voltaik modüller yarıiletken malzemelerden elde edilmekte ve bu modüller N ve P tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesiyle oluşmaktadırlar. Yarıiletkenlerin materyal olarak oluşumları ve dış etkilere dolaylı olarak karakteristik değişimleri çok karmaşıktır. Bundan dolayı analitik olarak incelenmeleri zordur.

Yine foto-voltaik modüllerde, çalışmaya temel olacak kuantum verimliliği (QE), fotoakımı yükseltip karanlık akımı düşürmekle artırılabilir. Kuantum verimliliği artırmak esastır. Fermi düzeyinde sabitleme ve elektron hole katkılama yoğunluğu düşünülerek bir analitik ifade oluşturulabilir (Siddharth ve ark., 2020). Basit bir güneş hücresindeki PN yapısı için, kuantum verimliliğini araştırma aşamasında sonucun analitik denklemlerle kurulması zordur. Öncelikle ince film modül için I-V ve P-V grafikleri elde edilecek, bu değerlerden verimlilik denklemi kurulacaktır. Daha sonra da bu denklemlerle parametrelerin değiştirilmesinde asıl değişiklik nümerik olarak gösterilecektir. Buradaki amaç tezdin elde edilecek sonuçları literatürdeki diğer deneysel verilerle karşılaştırmaktır.

Bütün bu gerçekler doğrultusunda, foto-voltaik modüller üzerine yapılan çalışmaların artması kaçınılmaz bir sonuçtur. Bu tez çalışması iki sebeple önemlidir: Modül karakteristiklerini analitik yöntemlerle çıkardıktan sonra nümerik olarak sonuçların verilmesi ve modülün kuantum verimliliğindeki (QE) değişimleri taşıyıcı hareketliliğine, yüzey rekombinasyon olaylarına ve taşıyıcı yaşam sürelerine bağlı olarak araştırılması. Sonuçların literatür çalışması ile desteklenmesi de öngörülmektedir.

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda; güneş hücrelerinin verimini etkileyen faktörlerin analitik incelemesi yapılacaktır. Çalışmanın sonucunda elde edilecek faydalar şu şekilde sıralanabilir:

- 1) İnceleme teorik olarak yapılacağı için deneysel çalışmalara oranla maliyeti daha az olacaktır.
- 2) Bu çalışmadan elde edilecek sonuç bu konu ile ilgili yapılacak deneysel çalışmalara yön verecektir.
- 3) Teorik çalışmadan elde edilen verilerle, literatürde deneysel ve buna paralel teorik çalışmalarla karşılaştırma imkânı sağlanacaktır.

Yapılacak çalışmada foto-voltaik modüllerin (güneş hücresinin) verimliliğine etki eden faktörlerin hangilerinin anlamlı olarak etki ettiğine dair bilgi sahibi olup bu alanda yapılacak diğer çalışmalarda da belirlenen o etkiye daha fazla yoğunlaşma imkânı elde edilecektir.

1.3. Tezin İşleme Biçimi

Bu tez beş bölüm halinde hazırlanmıştır. Birinci bölüm GİRİŞ ikinci bölüm LİTERATÜR TARAMA/KURAMSAL TEMELLER üçüncü bölüm MATERYAL TASARIM dördüncü bölüm BULGULAR VE TARTIŞMA ve son bölüm olan beşinci bölüm ise SONUÇLAR VE ÖNERİLER başlığı altında hazırlanmıştır.

Birinci bölüm olan giriş bölümünde konunun eksikliğine dair ön bilgi verilecektir. Bu ön bilgi neden bu alanda çalışmanın olması gerektiği şeklinde olacaktır. Bu bölümde tezin amacı ve neden önemli olduğuna dair ifadeler yer alacaktır.

İkinci bölüm de ise literatürde bulunan ve tez için önemli ve ilgili olan kavramlar ve kuramsal temeller bulunmaktadır.

Üçüncü bölüm de ise tez içinde verilen analitik denklemlerin çıkarılma evrelerini, cihazın nümerik sonuçlarının değerler girerek verildiği akım gerilim karakteristiğinin oluşturulması, literatürdeki benzer çalışmalarda oluşturulan akım gerilim grafiklerinin gösterimi ve son olarak da bu cihaz için oluşturacağımız verim ifadesinin literatürdeki diğer ifadeler ile karşılaştırılması ve doğrulanması şeklinde olacaktır.

Dördüncü bölümde ise tez için oluşturduğumuz model ve bu modelin literatürdeki deneysel sonuçlar ile doğrulanması olacaktır. Ayrıca yapmış olduğumuz hesaplamaların benzetim sonuçları ile doğrulanması ve tartışma bu bölümde olacaktır. Son bölümde ise tezden elde edilen sonuçların çıkarımı ve öneriler yapılacaktır.

MATLAB (matrix laboratory) sayısal olarak hesap yapabilme özelliğine sahip bilgisayar yazılımı çok paradigmalı ve dördüncü nesil programlama dilidir. Bu programlama lisansı olan MATLAB MathWorks tarafından gelişimi sağlanmaktadır. MATLAB kullanıcıya matris işleme, fonksiyon ve grafiğinin çizebilme, algoritmayı uygulayabilme, kullanıcıya ait ara yüzü oluşturabilme, C, C++, Java ve Fortran gibi programlama dillerine ara bağlama olanağı sağlar.

İlk olarak analitik işleme yönelik olarak üretilen MATLAB istek doğrultusunda sembolik hesaplamayı yapan MuPAD sembolik motorunu kullanmaktadır. İlave olarak Simulink dinamik ve gömülü sistemler için grafiksel çoklu bölge benzetimi ve temel model dizaynı ekler. 2004 yılında MATLAB'ın akademi ve endüstriyel bölgedeki kullanıcı sayısı yaklaşık olarak bir milyon civarındaydı. MATLAB programını daha çok mühendislik, bilim ve ekonomik alanlarda çalışmalar yapanlar kullanmaktadır(Rump, 2010).

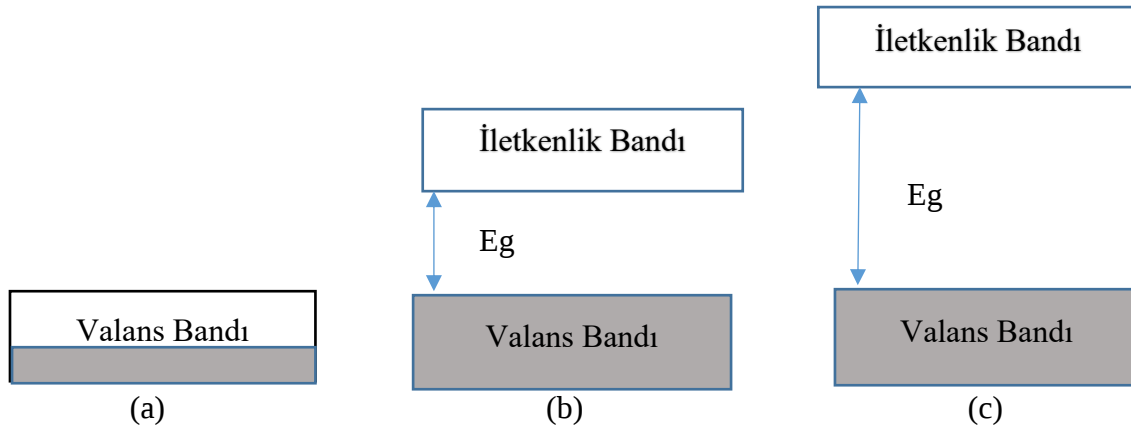
MATLAB programlama dilini tez için kullandığımızda elde ettiğimiz kazanımları ifade edelim. Yazmış olduğumuz analitik ifadelere ait veriler girilir. Daha sonra değişkenler belirlenir ve değişken değerleri kare parantez içinde girilir. Bu değerler belirli bir aralık için belirli artış şekliyle seçilir. Yapmak istediğimiz her özellik için ayrı grafikler olduğundan hangi grafik türünü istiyorsak o grafik türüne ait komutları girmeliyiz. Komutları girdikten sonra F5 tuşuna basılıp çalıştırılır ve grafik oluşturulur. Daha önce belirlediğimiz değişken aralığına sahip grafik oluşur bu grafikte bağımlı değişkenin bağımsız değişkenin değişmesi ile oluşan grafikteki tepkisi incelenir

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ, KURAMSAL TEMELLER

2.1.Yarıiletkenler

Madde merkezinde çekirdek ve etrafında elektronların belirli bir yörüngede dolanması ile meydana gelmiştir. Çekirdek ve yörüngede dolanan elektron dışarıdan bir etki ile karşılaşmaz ise birbirini dengeler. Elektronlar dolandıkları birinci yörüngede maksimum iki elektron ikinci yörüngede sekiz elektron üçüncü yörüngede ise on sekiz elektron bulunur. Elektronların her biri belirli bir sayıya sahip enerji bantları içerisinde yer alırlar.

Elektrona dışarıdan enerji verilir ise bir üst enerji seviyesine çıkar. Eğer elektron bulunduğu yörüngede enerjisinin bir kısmını ortama verirse elektron bir alt enerji seviyesine düşer ve yörüngeler arası enerji farkını ortama elektromanyetik dalga olarak verir. Elektron yeterli enerjiye sahip olacak şekilde uyarılırsa elektron çekirdeğinin elektrostatik çekim kuvvetinden kurtulup iyonlaşabilir. Maddenin sahip olduğu atomları diğer atomlardan farklı kılan özelliği son yörüngesindeki elektronlar belirler ve bu son yörüngede bulunan elektronların içinde bulunduğu banda valans bandı denir. Elektronlar valans bandında iken dışarıdan aldıkları enerji ile iletkenlik bandına geçebilirler. Elektronların iletkenlik bandı ile valans bandı arasındaki enerji farkına yasak enerji aralığı denir(Karamanav, 2007). Katı maddeler yasak enerji aralığının durumuna ve büyüklüğüne göre elektriksel iletkenliklerine bağlı olarak; iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere sınıflandırılmaktadır.



Şekil 1. Enerji Bandları

Şekil 1’de iletken, yalıtkan ve yarıiletkene ait iletkenlik bandı ve valans bandı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bant profilinin gösteriminde yaklaşık mutlak sıcaklık değerinde elektronların işgal ettiği banda valans bandı yasak enerji aralığı (Eg) ile birbirinden ayrılmış band ise iletkenlik bandı olarak ifade edilir.

Şekil 1a'da iletkenlere ait enerji band profili gösterilmektedir. Görülüyor ki metallerde iletkenlik bandı ile valans bandı iç içe geçmiş durumdadır. Valans bandındaki elektronların dışarıdan bir enerjiye ihtiyaç duymadan iletkenlik bandına geçebilmektedir. Bu durumda iletkenlerde en yüksek enerji değerine sahip iletkenlik bandı mutlak sıfır sıcaklığında bir miktar doludur.

Şekil 1b' de yarıiletkenlere ait enerji band profili gösterilmektedir. Yarıiletkenlerdeki elektronlar mutlak sıfır sıcaklığında valans bandında bulunmaktadır ve iletkenlik bandı ise bu sıcaklıkta boştur. Bu durumda yarıiletkenler mutlak sıcaklık değerinde yalıtkan özellik gösterecektir.

Şekil 1c'de yalıtkanlara ait enerji bant profili gösterilmektedir. Yalıtkanlardaki elektronlar mutlak sıfır sıcaklığında valans bandın da bulunmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere yalıtkanların yasak enerji aralığı yarıiletkenin yasak enerji aralığından daha büyüktür(Erol A & Balkan N, 2013).Maddeler elektriksel iletkenliğe elektronların iletkenlik bandına çıkması ile sağlarlar. İletkenler maddeler (metaller) yapısı gereği elektronlarının bir kısmı iletkenlik bandında olduğundan dolayı iletken hale geçmeleri için dışarıdan enerjiye ihtiyaç duymazlar.

1 H																	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
3 Li	4 Be																	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La*	58 Ce*	59 Pr*	60 Nd*	61 Pm*	62 Sm*	63 Eu*	64 Gd*	65 Tb*	66 Dy*	67 Ho*	68 Er*	69 Tm*	70 Yb*	71 Lu*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn								
87 Fr	88 Ra	89 Ac**	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og								

Yarıiletken özellik gösteren elementler

Şekil 2. Periyodik cetvelde yarıiletken özellik gösteren elementler

Yarıiletkenlerin valans bandı ile iletkenlik bandı arasında enerji farkı olduğundan dolayı iletken hale geçebilmeleri için enerjiye ihtiyaçları vardır. Bu enerji değeri çok küçüktür.

Yarıiletken malzemelerde yasak enerji aralığı genel olarak 3eV'dan daha küçük olduğundan dolayı oda sıcaklığında bulunan yarıiletken malzemenin uyarılan elektron sayısı elektriksel iletimi sağlayacak sayıda olacak ve malzeme iletken hale geçecektir.

Yalıtkanlarda ise bu enerji değeri çok büyüktür ve bu enerji değerinin yalıtkan malzemeye verilmesi ile malzeme zarar görür ve özelliğini kaybeder. Malzemeye verilecek bu enerji sıcaklık, ışık ya da mekanik yollar ile sağlanabilir.

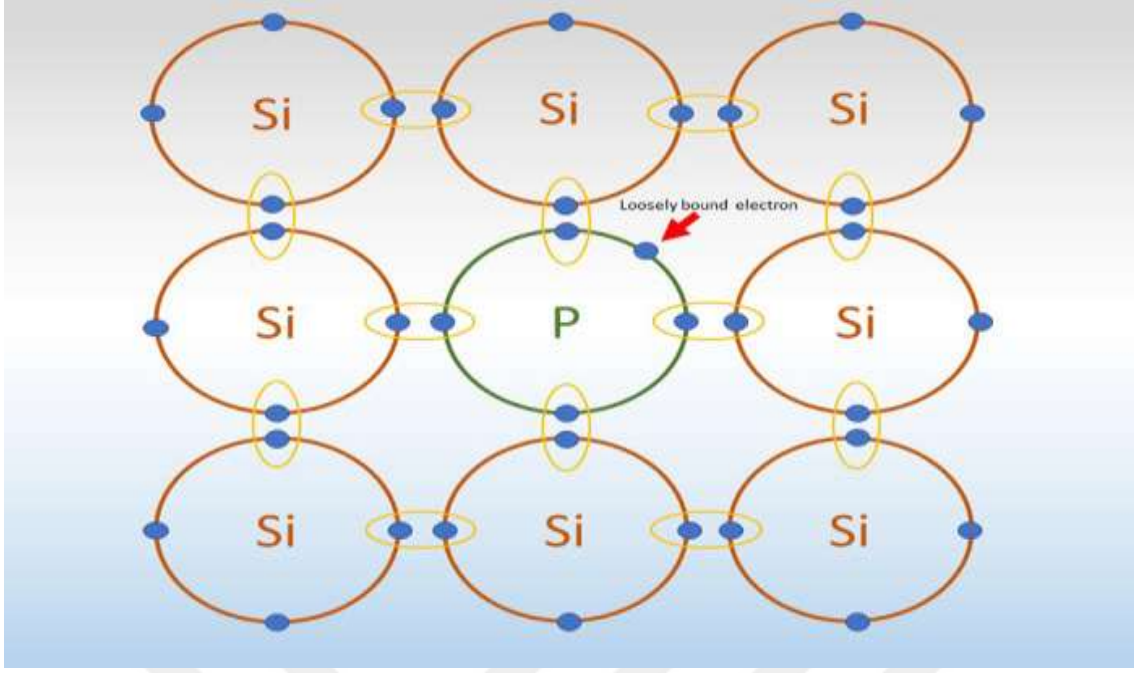
2.1.1. Katkılı Yarıiletkenler, N Tipi Yarıiletken, P Tipi Yarıiletken

Yarıiletkenlerin tamamı içerisinde az sayıda yabancı atomlar barındırır. Yabancı atomlar safsızlık enerji seviyeleri diye ifade edilen enerji seviyelerinde bulunurlar ve yarıiletkenin elektriksel iletkenliklerine önemli miktarda etkilerler. Sıcaklık arttıkça yarıiletken içerisindeki yabancı atom yoğunluğu düşer.

Yarıiletkenlere belirli miktarlarda katkı atomlarının farklı teknikler ile aktarılmasına katkılama ve bu işlemin yapıldığı yarıiletkenlere de katkılı yarıiletken denir. Katkılama işlemi yapılan yarıiletkenin katkılama sonunda elektriksel özellikleri değişim gösterir. Elektriksel iletiminin elektronlar vasıtasıyla yapan yarıiletken türüdür.

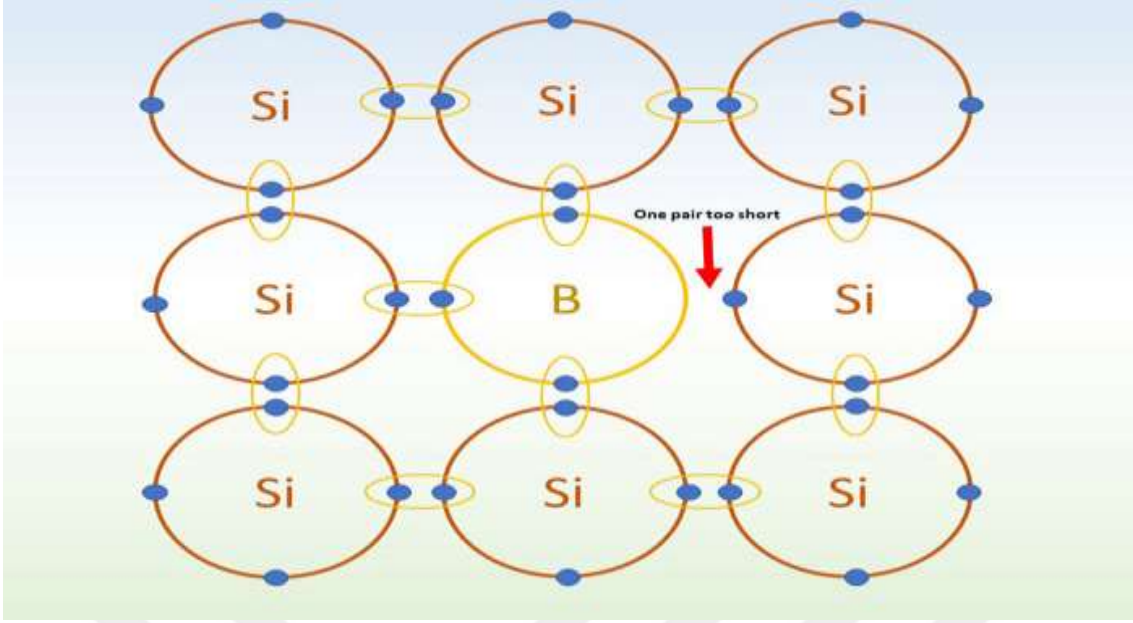
Silisyum atomunun son yörüngesinde bağ yapmamış 4 elektronu bulunmaktadır. Silisyum atomu son yörüngesinde bağ yapmamış 5 elektronu bulunan fosfor atomu ile katkılama yapılır ise fosfor atomları ile silisyum atomları kovalent bağ yapacak ve fosfor atomunun bağ yapmayan bir elektronu açıkta kalacaktır. Fosfor atomunun bağ yapmayan bu atomu elektriksel iletkenlik sağlayacaktır.

Bu durumda yarıiletken de elektriksel iletkenlik elektronlar vasıtasıyla yapılacaktır. Bu tür yarıiletkenlere N tipi yarıiletken denir.



Şekil 3. Silisyum atomunun fosfor atomu ile yaptığı kovalent bağ

Elektriksel iletimin boşluklar vasıtasıyla sağlayan yarıiletken türüdür. Silisyum atomunun son yörüngesinde bağ yapmamış 4 elektronu bulunmaktadır. Bor atomunun ise son yörüngesinde bağ yapmamış 3 elektronu bulunmaktadır. Silisyum atomu bor atomu ile katkılama yapılır ise silisyum atomunun bağ yapmayan 4 elektronun 3 tanesi bor atomunun bağ yapmayan 3 elektronu ile bağ yapar ve silisyum atomunun sağ yapmayan 1 elektronu bor atomunun komşu yörüngesinden bir elektron koparır ve bağ yapar. Yörüngeden kopan elektronun yeri boş kalır ve oluşan bu boşluk yarıiletkende elektriksel iletimin boşluklar ile yapılmasını sağlar. Bu tür yarıiletkenlere P tipi yarıiletken denir.



Şekil 4. Silisyum atomunun Bor atomu ile yaptığı kovalent bağ

2.1.2. Jenerasyon-Rekombinasyon ve Yüzey Rekombinasyon Olayları

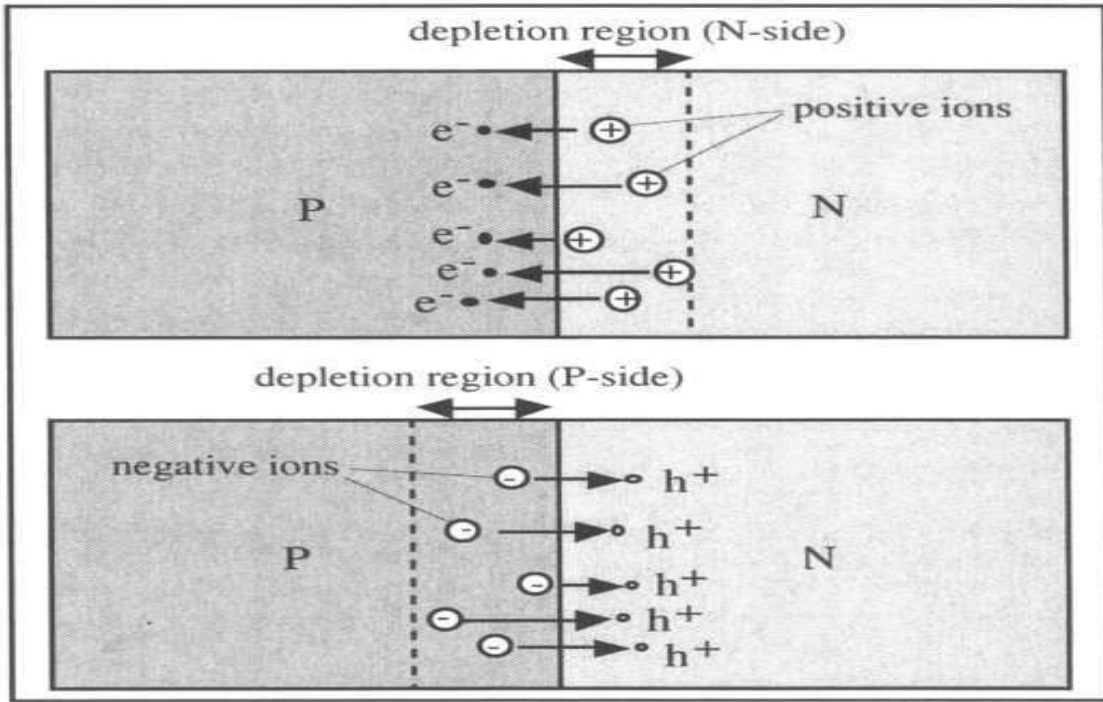
Yarıiletkenlerin sahip olduğu elektronlar mutlak sıcaklık değerinde valans bandında bulunur. Oda sıcaklığında valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına çıkar ve yarıiletkenler iletken hale geçer. Elektronun valans bandından iletkenlik bandına çıkma olayına jenerasyon iletkenlik bandından tekrar valans bandına geri dönmesi olayına rekombinasyon denir. Bu olay sırasında elektronun valans bandından iletkenlik bandına çıktığında elektronun daha önceden bulunduğu valans bandında boşluk oluşacaktır. İletkenlik bandındaki elektronun tekrar valans bandına geri dönmesi ile birlikte elektron oluşan bu boşluk ile birleşecek ve yok olacaktır. Bu olay gerçekleşene kadar geçen süreye elektronun ya da boşluğun yaşam süresi ismi verilir. Bu olay ne kadar hızlı gerçekleşirse elektron-hol çiftinin ömrü o kadar kısa olur. Elektronun valans bandından iletkenlik bandına çıkabilmesi için yasak enerji değeri kadar dışarıdan enerji alması gerekir. Elektron iletkenlik bandından valans bandına tekrar geri döndüğünde aradaki enerji farkını ışıma olarak yani elektromanyetik dalga olarak ortama verecektir.

Yarıiletkenin içerisinde veya yüzeyinde bulunan bir kusur veya safsızlık rekombinasyon olayının gerçekleşmesini sağlar. Güneş pilinin yüzeyi kristal yapıdaki yarıiletkenin bozulmasını temsil ettiğinden güneş pilinin yüzey bölgeleri yüksek oranda rekombinasyon olayının gerçekleştiği yerdir.

Bir bölgedeki yüksek rekombinasyon olayı o bölgedeki azınlık taşıyıcıların yok olmasına sebep olur. Düşük taşıyıcı konsantrasyonunun lokalize bir bölgesi, taşıyıcıların çevredeki daha yüksek konsantrasyonlu bölgelerden bu bölgeye akmasına neden olur. Azınlık taşıyıcıların yüzeye hareket etme hızı yüzey rekombinasyon oranını belirler. Eğer yüzeyde rekombinasyon olayı gerçekleşmiyorsa taşıyıcıların yüzeye doğru hızı sıfırdır ve o bölgede yüzey rekombinasyon hızı sıfırdır. Yarıiletkenin yüzeyinde bulunan eşleşmemiş elektronlar o bölgede rekombinasyon oluşmasına sebep olurlar. Kristal kafesin periyodikliğinin kesintiye uğraması bağ yapmamış elektronları yarıiletken yüzeyde kusur oluşmasına sebep olur. Eşleşmemiş elektronların sayısının azaltılması ve dolayısıyla yüzey rekombinasyonu, yarıiletken yüzeyin üzerinde bu eşleşmemiş elektronların bazıları bağ yapmayı sağlayan bir tabakanın büyütülmesiyle elde edilir. Bağ yapmamış elektronların bu şekilde azaltılmasına yüzey pasivasyonu olarak ifade edilir.

2.2. PN Eklem

Bir P-tipi ve bir N-tipi yarı iletken temas halinde olduğunda bir PN bağlantısı oluşur. N- ve P-tipi bölgeler aynı yarı iletken malzemeden yapılmışsa (örneğin, N-tipi silikon ve P-tipi silikon), bağlantı bir homo-eklemidir. Yarı iletken malzemeler farklıysa (örneğin, N-tipi silikon ve P-tipi germanyum), bağlantı bir heteroeklemidir(Collinge JP & Collinge CA, 2011).



Şekil 5. Elektron ve hollerin difüzyonu sonucu arınmış bölgenin oluşması(Collinge JP & Collinge CA, 2011)

Farklı taşıyıcı yoğunluklarına sahip iki yarıiletken birleştirildiğinde, n bölgesinden p bölgesine doğru azalan elektron konsantrasyonu ve p bölgesinden n bölgesine doğru azalan boşluk konsantrasyonu heterojen bir dağılım sağladığından difüzyon olayının başlamasına sebep olacaktır. Yarıiletkenlerin bağlantı yapıldığı bölgede çoğunluk taşıyıcılar (p tipi bölgede holler ve n tipi bölgede ise elektronlardır) eklem diğer bölgesine difüzyon yoluyla ulaşacaklardır.

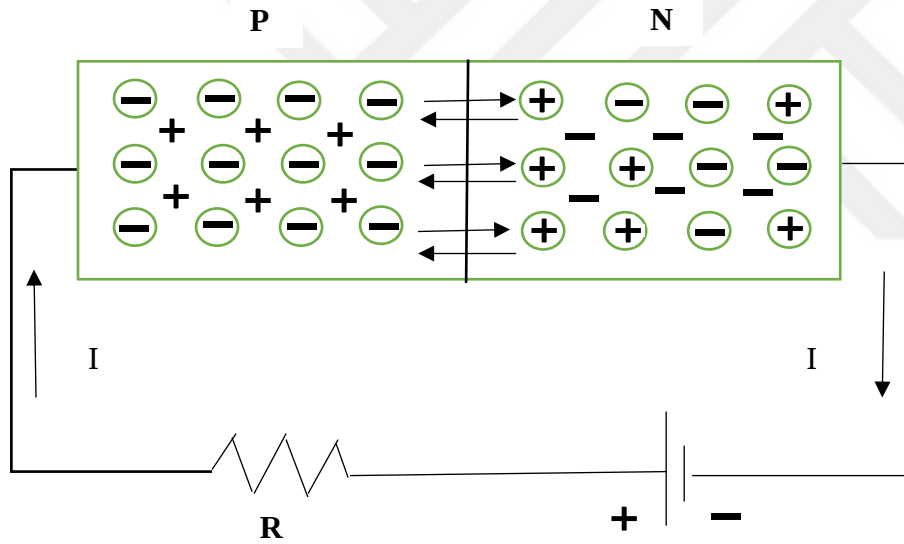
Difüzyon sonucu p tipi bölgeye ulaşan elektronlar bu bölgedeki holler ile birleşip rekombine olacaklar ve yok olacaklardır. Bu durumun sonunda eklem bölgesi hareketli taşıyıcılardan temizlenmiş olacaktır. P tipi bölgeden n tipi bölgeye doğru difüze olan hollerin (boşlukların) ardından negatif olarak iyon hale gelmiş akseptör atomları ve n bölgesinden p bölgesine doğru difüze olan hareket halindeki elektronlar ardından da pozitif iyonize olmuş donör atomları kalacaktır.

Serbest halde bulunan taşıyıcılar geçtikleri yerlerde çoğunluk taşıyıcılar ile birleşip rekombinasyona uğrarlar. Eklem p bölgesinde hareketsiz halde duran pozitif yükler ve eklem sağ tarafında hareketsiz halde duran negatif yüklerin olmasından dolayı bağlantı bölgesinde deplasyon bölgesinin (arınmış bölge) n bölgesinden p bölgesine doğru elektrik alan oluşur. Oluşan bu elektrik alana zıt yönde p bölgesinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar ve

elektrik alana zıt yönde n tipi bölgedeki azınlık taşıyıcılar olan holler elektrik alanın oluşması ile bağlantı bölgesinin diğer tarafına sürüklenir. Elektrik alan oluşması ile sürüklenen taşıyıcıların oluşturduğu sürüklenme akımları difüzyon akımı ile eşit olması dengeye ulaşılmasını sağlar(Erol A & Balkan N, 2013).

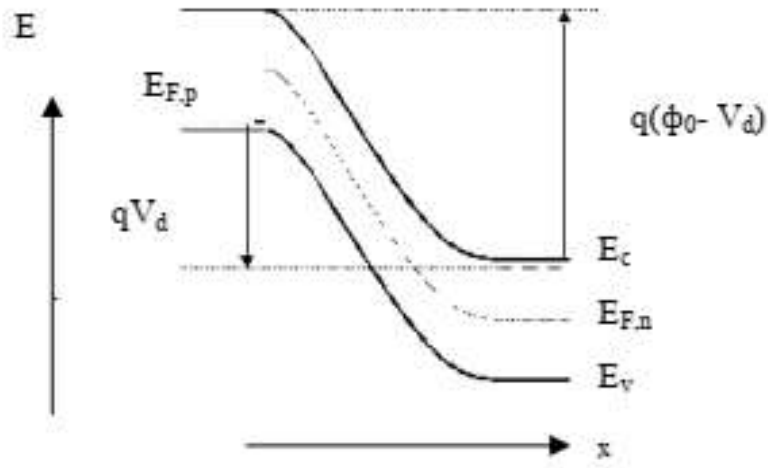
2.2.1. PN eklemde Düz Beslenme ve Ters Beslenme

Pn eklemnin düz beslenmesi için eklemnin p tarafına üreticinin pozitif kısmı n tarafına ise üreticinin negatif kısmı bağlantı yapılır. Dışarıdan uygulanan potansiyelin eklemnin p bölgesine hol n bölgesine ise elektron kazandırdığı düşünülür. Üreticinin kazandırdığı yükler deplasyon bölgesinin potansiyel değerinin düşürecek ve bu durum difüzyon olayının kolaylaşmasını sağlayacaktır. Bu durumda difüzyon akımı ile sürüklenme akımı arasındaki denge bozulacak ve net bir akımın oluşmasına sebep olacaktır.



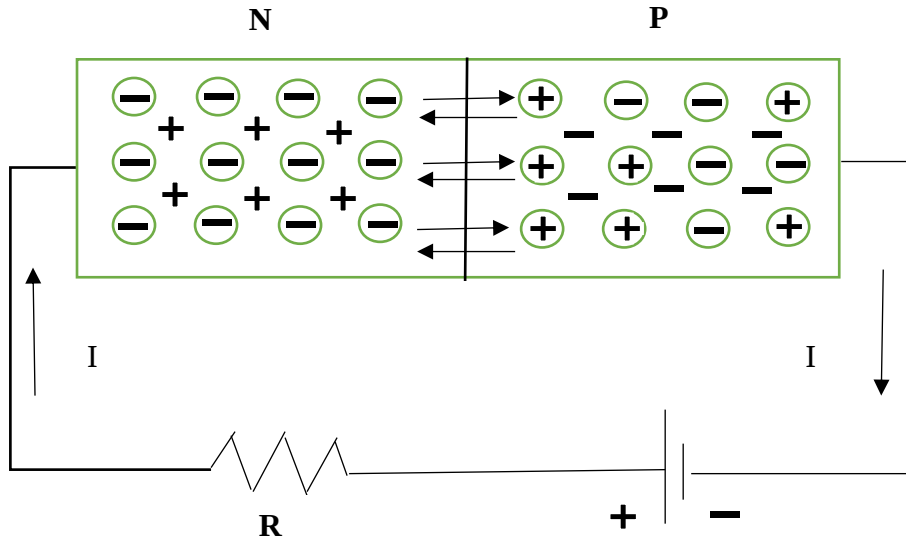
Şekil 6. Düz beslem altındaki PN eklem

Düz beslem altındaki PN eklemnin enerji band şeması şekil 2.6' da belirtilmiştir. PN eklemnin düz beslem altında deplasyon bölgesinde oluşan potansiyel enerjiyi qV_d kadar azaltacaktır. Burada q elektronun yükü V_d ise dışarıdan uyguladığımız üreticinin potansiyelidir(Küpeli vd., 2005).



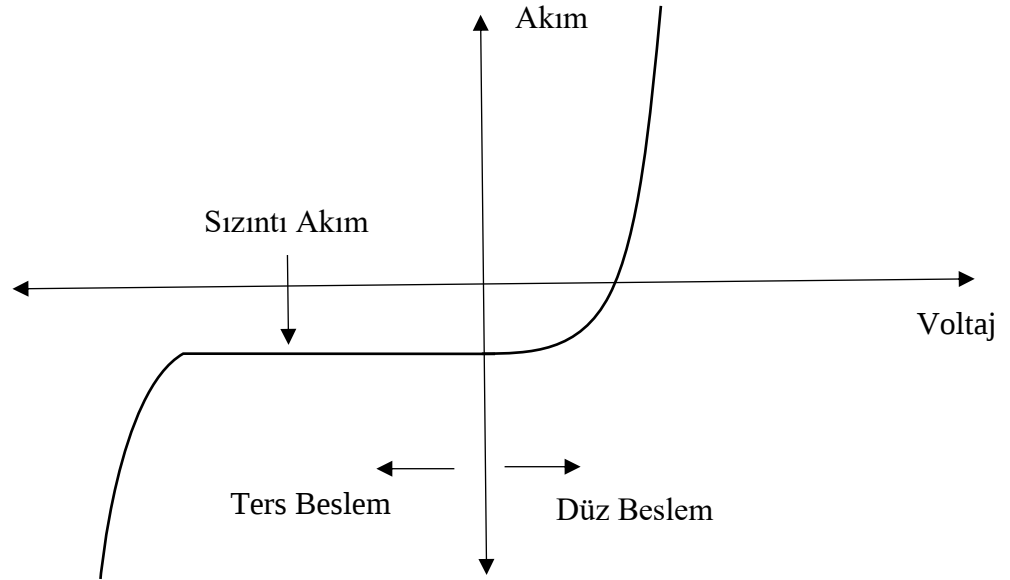
Şekil 7. Düz beslem altındaki PN eklemin enerji band şeması

PN Eklemin Ters Beslenmesi: PN eklemin ters beslenmesi için eklemin p tarafına üreticin negatif kutbu eklemin n tarafına ise üreticin pozitif kutbu bağlantı yapılır.



Şekil 8. Ters beslem altındaki PN eklem

Ters beslem altındaki PN ekleme uyguladığımız gerilim PN eklemin n bölgesindeki elektronların ve p bölgesindeki hollerin hareketliliğinin azaltacaktır. Dışarıdan uyguladığımız potansiyel fark deplasyon bölgesinde ki elektrik alan ile aynı yönde elektrik alan oluşturacak bu durum deplasyon bölgesinde ki potansiyel bariyerin artmasına ve deplasyon bölgesinin genişlemesine neden olacaktır. Bu durumda yüklerin difüzyonunu zorlaştıracak ve bunun sonucunda oluşacak akım değerini azaltacaktır. PN eklem bu durumda akıma karşı bir direnç oluşturacaktır. PN eklemin üzerinden zıt yönde çok küçük bir akım geçecektir. Bu değer diyotun iletimde olmayacağı kadar küçük bir değerde olacaktır. Bu akım sızıntı akım olarak ifade edilir. İdeal bir PN eklemden sızıntı akım olması söz konusu değildir. Fakat her malzeme içerisinde kusur bulunduğu azınlık taşıyıcılar bu sızıntı akımı sağlar bu durumda bize kullandığımız PN eklemin kalitesi hakkında bilgi verir.



Şekil 9. PN eklemin ters beslem ve düz beslem altındaki akım gerilim karakteristiği

2.2.2. Foto-voltaiklik

Foto-voltaik sistemler güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren çevreye zararı olmayan üretim maliyeti ucuz ve diğer enerji üreten sistemlere göre daha uzun ömürlü fakat verimi diğer enerji elde edilen sistemler ile kıyaslandığında düşük olan sistemlerdir.

Foto-voltaik modüller yarıiletken malzemelerden elde edilmekte ve bu modüller N ve P tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesiyle oluşmaktadırlar. P tipi ve N tipi yarıiletkenin deplasyon bölgesi vasıtasıyla birleştirilmesi sonucu diyot oluşur. Bu diyot PN eklem diyot olarak ifade edilir ve yarıiletkenidir. PN eklem diyot üzerine ışık düşürülmesi vasıtasıyla yüklerin (elektron ve hollerin) kutuplara ayrışması (P ve N bölgelerine toplanması) durumunda, eğer yükler tam olarak kutuplaşmış ve hareket etmiyor ise bu durumda foto-voltaiklik oluşmuştur. Daha sonra, yüklerin ayrışması durumunda, P ve N bölgelerinin uçlarını kontaklar vasıtasıyla birleştirdiğimizde iletken üzerinde yüklerin hareketi oluşur ve sonrasında bu durumdan elektrik akımı elde edilebilirse, bu PN eklem, diyot bir güneş hücresini oluşturur.

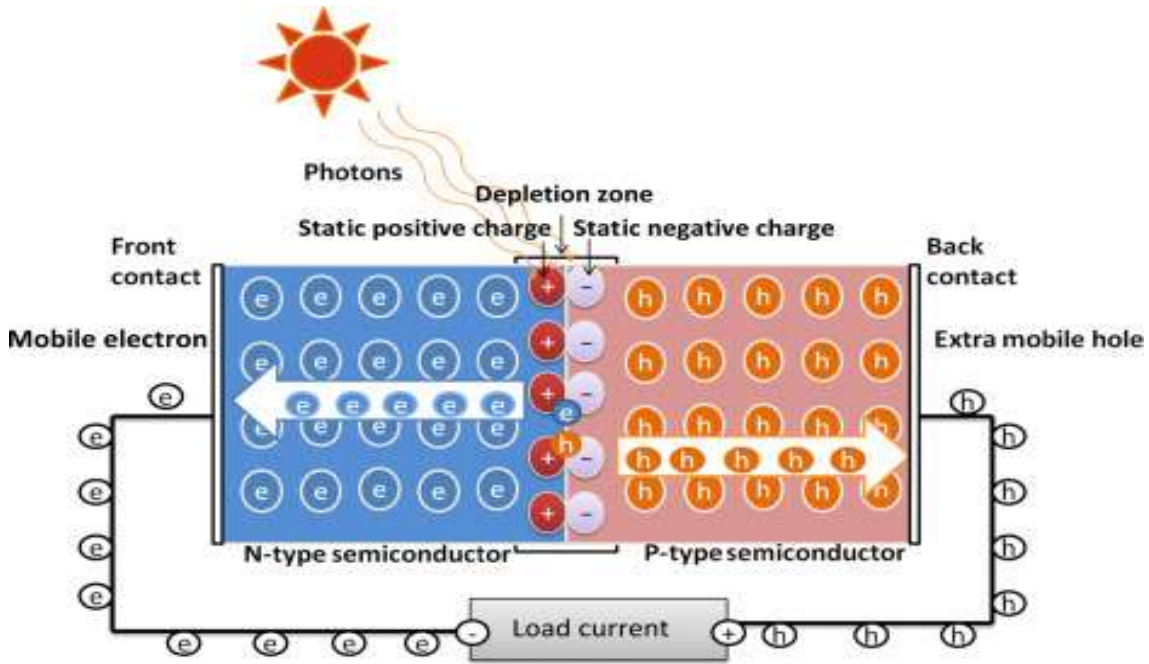
Son yıllarda yapılan çalışmalar güneş hücresinin yüzey yüklerinin yaşam süreleri güneş hücresinin verimini önemli ölçüde artırmıştır (Imran ve ark,2020,6). Literatürdeki çalışmalar bize, güneş hücresinden daha yüksek verim ve daha fazla enerjiyi hem ucuz hem de çevreci olacak şekilde elde edebileceğimizi göstermektedir.

Güneş den dünyamıza ulaşan güneş ışığı enerjisi güneşin çekirdeğinde oluşan füzyon tepkimesi (hidrojenin helyuma dönüşmesi) ile oluşur. Atmosfer dışında oluşan güneş enerjisi yaklaşık 1370W/m^2 değerindedir. Ancak yeryüzüne gelen ışıma miktarı atmosferde oluşan kırılmadan dolayı yaklaşık olarak $0-1100\text{ W/m}^2$ değerinde bir değer yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne ulaşan bu enerjinin küçük bir kısmı bile ülkelerin enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamaktadır. Bu durumun farkında olan bilim insanları yeryüzüne düşen bu ışık enerjisinin en verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüşümü üzerinde uğraşmaktadır.

PN eklem p ve n bölgesi üzerine enerji değeri yasak enerji değerinden büyük ışık düşürüldüğünde bu bölgelerde oluşan elektron ve holler deplasyon bölgesinden uygulana elektrik alan ile kısa bir süre sonra tekrar birleşip yok olacaklardır. Dolayısıyla bu bölgelere ışık düşürülmesi elektrik üretmemizi sağlamayacaktır. Fakat deplasyon bölgesine düşürdüğümüz ışık eğer yasak enerji aralığından daha büyük bir değere sahip bir enerji değeri varsa bu bölgede elektron-hol çifti oluşturur.

Deplasyon bölgesindeki elektrik alanın etkisi ile elektronlar n bölgesine holler ise p bölgesine birikmeye başlar. Daha fazla ışık düşürdüğümüzü düşünürsek oluşacak elektron hol çiftinin deplasyon bölgesi tarafından süpürülmesi zorlaşır ve bir süre sonra p ve n bölgelerinde maksimum hol ve elektron birikir.

Bu olay PN eklemnin iki ucu arasında maksimum voltaj üretilmesine sebep olur. Bu şekilde ışıktan potansiyel fark üretilmesine “foto-voltaik” ya da foto-voltaik efekt denir(Khan Academy, 2020b).



Şekil 10. Foto-voltaik hücrenin gösterimi(Nocito & Koncar, 2016)

2.3. Yarıiletken Elektronik Cihaz: Güneş Pili

Güneş pili elektriksel enerji üretmek için güneş ışığını kullanan bir PN eklemdir. Diğer bir deyişle güneş pili güneşten aldığı ışığın enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirir. Günümüzde fosil kaynaklardan elde ettiğimiz enerjiye rakip olabilecek en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır. Canlıların yaşamlarını devam ettirebilmesi için güneşe ihtiyaçları vardır. Bir başka enerjinin oluşması içinde güneşe ihtiyaç vardır.

Örneğin daha önce dünyada olan canlılar güneş enerjisinden yararlanmış ve yaşamlarını sona erince uzun yıllar toprağın altında kalmalarıyla fosil yakıt haline gelmiştir. Ya da güneşin dünyayı ısıtması ile oluşan basınç farkından rüzgârlar oluşur ve bu rüzgârlar rüzgâr enerjisini oluşturur.

Aslında diğer enerji türlerinde de dolaylı olarak güneş enerjisini kullanmaktayız. Fakat bu enerji türlerinin kullanırken çevreye de zarar vermekteyiz. Mesela fosil yakıtları kullandığımızda hava salınan gazlardan dolayı havadaki karbon miktarı artıyor bu durumda asit yağmurları ve küresel ısınma gibi büyük problemlere yol açıyor. Ya da rüzgâr enerjisinden yararlandığımızda rüzgâr tribünlerinin rüzgâr enerjisinden dolayı tribünlerin dönmesi esnasında çıkan ses ise rüzgâr tribünlerinin çalıştığı esnada yanına yaklaşmayı ve çevresinde yaşamayı zorlaştırıyor. Fakat güneş pilleri bu anlamda hem çevreye zarar vermiyor hem de ses çıkarmıyor. Dolayısıyla güneş pilleri diğer enerji dönüşümlerine oranla hem daha çevreci hem de canlılar üzerinde etkisi daha azdır (Erol A & Balkan N, 2013).



Şekil 11. Güneş pili yapısı(Erol A & Balkan N, 2013)

Yukarıdaki şekilde klasik bir güneş pili yapısı verilmiştir. Güneşten gelen ışınlar üst yüzeye gelir ve yansımayı önleyen bir kaplama zeminden içeri girer. N tipi yarıiletkenin kalınlığı p tipi yarıiletkenine göre daha azdır. N tipi yarıiletkenin katkılanması oldukça fazla iken p tipi yarıiletkenin katkılanması oldukça düşüktür. Bundan dolayı PN eklemnin arınmış bölgesinin n kısmı p kısmına göre daha dardır.

Arınmış bölgenin ve azınlık taşıyıcıların difüzyon uzunluğunun toplamı cihazın aktif bölgesinin oluşmasını sağlar. Aktif olan bölgede fotonlar tarafından üretilen elektron hol çifti çoğunluk taşıyıcı bölgelerine doğru sürüklenir. Bu durumda cihazdan akım geçmesi sağlanır. Üst ve alt metal kontaklara ampermetre bağlanırsa ampermetreden akımın geçtiği gözlemlenebilir.

Bu duruma ışık enerjisi doğrudan elektrik akımı sağlar buda elektrik enerjisi oluşmasını sağlar. Cihazdan en yüksek seviyede verim elde etmek için uygun olan bir direnç kullanılmalı. Güneş pili tasarımı yapılırken aşağıdaki ifadelerin özelliklerine dikkat etmek gerekir(Erol A & Balkan N, 2013).

- Bağlantı yerleri ohmik kontak olmalıdır.
- Diyot direncini en aza indirmek ve verimi arttırmak için seri direnç kullanılır.
- Güneş pilinin verimini arttırmak için kontaklar olabildiğince geçirgen olmalı.
- Aktif bölgede gerçekleşecek rekombinasyonlar güneş pilinden geçecek akımı azaltır. Bu kayıplara engel olmak için aktif bölgenin pn eklemine ne kadar derinliklerinde olacağı incelenmelidir.
- Soğurma katsayısı PN eklemeye gelen ışığın dalga boyuna bağlı olarak değişir. Eklemiden itibaren elektronların ve hollerin difüzyon olan bölgede fazla miktarda foton soğurulması gerektiği için eklem derinliği ile soğurma katsayısını bir arada değerlendirilmesi gerekir.
- PN eklemine yapıldığı yarıiletken materyalin yasak enerji aralığı gelen fotonun sahip olduğu enerjiden küçük olmalıdır (Erol A & Balkan N, 2013).

Güneş pilleri diğer enerji üretim yollarına kıyasla verim olarak daha düşük bir değere sahiptir. Bu düşük verimi arttırabilmek için güneş hücrelerinin seri ya da paralel bağlayarak güneş paneli adı verilen ve birçok güneş hücresinin bir arada bulunduğu sistem oluşturulmuştur.

2.3.1. Güneş Pili ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

Fransız fizikçi Antonie Henri Becquerel tarafından ilk olarak 1839 yılındaki yapmış olduğu çalışmada elektrotları elektrolit içine daldırdığında elektrotlar arasında oluşan gerilimi fark edip bu gerilimin üzerine düşen ışıktan kaynaklandığını bulmuş ve böylece foto-voltaik olayını ilk bulan kişi olmuştur. Benzer bir olay 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından katı selenyum üzerine ışık düştüğünde fark edilmiş ve bunun ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

İlerleyen yıllardaki yapılan çalışmalarda kullanılan malzemeler selenyum ve bakır oksitte dayalı foto diyotların ışık metrelerinde ve fotoğrafçılık alanında daha yoğun olarak kullanımını sağlamıştır. İlk olarak foto-voltaik cihazların verimi 1914 yılında %1 olarak ölçülmüştür. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda 1954 yılında elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan foto diyotlar ilk defa silikon kristali üzerine uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda ölçülen verimlilik değeri %6 olarak ölçülmüştür. Foto-voltaik sistemlerden güç elde etme adına bir dönüm noktası olan bu çalışma neticesinde bu sefer çalışmaların yönü uzay araçlarındaki kullanılacak gücün temini için olmuştur. Foto-voltaik sistemler uzay araçları için güç teminini 1960 yılından beri güvenilir bir kaynağı şekilde sürdürmektedir. Fakat 70'li yılların başına kadar güneş pilleri olarak kalmıştır. Aslında güneş pillerinin laboratuvar çalışmaları 1954 yılında başlamış fakat uzun bir süre benimsenememiştir.

Daha sonra 1973 yılında patlak veren 1. petrol krizinin ardından gelişmiş ülkeler bu alanda geniş bütçeler ayırıp büyük bir ARGE çalışmasına başlamıştır. Diğer taraftan uzayda yapılan çalışmalarda güneş hücreleri kendini ispatlamış ve gelişmiş ülkeler tarafından bu hücrelerin verim artırma çalışmaları devam etmekteydi. Özellikle uzay programları için 1975 yılından sonraki 15 yıl boyunca her yıl silikon güneş pillerinin üretimi 100kw civarındaydı. Bu üretim 1986 yılına gelindiğinde o yıl için tüm çalışmalar 28,6MW'a ulaşmıştı.

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürmek için herhangi bir hareketli sisteme ihtiyaç duymayan çevreye zarar vermeyen ve ekonomik olan foto-voltaik sistemler bu gelişmeler karşısında üniversiteler ve bakanlıklar tarafından geliştirilmesi ve veriminin artırılması için araştırılmaktadır. Fakat bu nedenden dolayı laboratuvar ortamından çıkıp bir türlü yaygın hale getirilememiştir. Son yıllarda ülkelerin fosil yakıtlara bağıllığını azaltmak istemesi ve çevreye verilen zarar göz önüne alındığında şirketlerin güneş hücrelerini insanların daha aktif kullanmasına olanak sağladığını görmekteyiz.

Foto-voltaik teknolojinin hızla değişmesi ve gelişmesi bu teknolojinin daha fazla günlük hayatın içine girmesine sebep olmuştur. Güneş enerjisi sistemlerinin optimum tasarımı yapmak için güneş piline ve güneş paneline ait eş değer devre modelini oluşturmak çok önemlidir. Bu model elde edilen sistemin analizini kolay bir şekilde yapılmasını sağlar. Literatürde bu model ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda devrelerin analizi için benzetim programları kullanılmaktadır. Matlab benzetim programı literatürde sıklıkla karşılaştığımız benzetim programlarından biridir. Benzetim programlarında güneş hücrelerinin analiz ve test aşamalarından sonra foto-voltaik sistemlerin günlük hayatta performansının test edilmesi şarttır.

Tarihte yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir(Aladağ, 2017).

- 2009 yılında (Villalva vd., 2009) yapmış oldukları çalışmada foto-voltaik sistemlerin modellenmesi ile ilgili bir metot teklif etmişlerdir. Teklif edilen bu metot güneş panellerinin matematiksel modelleme yapılarak elektriksel eşdeğer devresinin oluşturulmuş olmasıydı. Yapılan çalışmada güneş panelinin tek diyotlu seri ve paralel dirence sahip elektriksel eşdeğer devresi kullanılmıştır. İki farklı güneş panelinin sonuçları ile önerdikleri metot sonuçlarını karşılaştırması yapılarak doğrulanmıştır (Villalva vd., 2009).
- 2012 yılında (Ding vd., 2012) yapılan çalışmada foto-voltaik panele ait benzetim yapmışlardır. Foto-voltaik panele ait önerilen bu model farklı ışık alma durumu ve değişken sıcaklık durumunda foto-voltaik panele ait çıkış değerleri için doğru sonuçlar vermekteydi. Önerilen model deneysel ortamdaki bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların doğruluğu ifade edilmiştir. İfade edilen bir diğer önemli nokta ise önerilen bu modelin devrenin kontrol stratejisinde ve devreye ait benzetim kullanılarak bir elektronik devreyle birlikte çalışmasının mümkün olmasıdır(Ding vd., 2012).
- 2010 yılında (Tsai, 2010) yapılan çalışmada güneş piline ait tek diyotlu elektriksel eşdeğer devreyi kullanarak foto-voltaik panelin modelini yapmıştır. Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilen benzetimde panele ait çıkış özelliklerini etkileyen asıl faktörlerin güneşten gelen ışık şiddeti ve ortama ait sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bu benzetimin deneysel düzeneği kurularak da çıkan sonuçlar incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda deneysel sonuçlar ile benzetimde çıkan sonuçlar karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür(Tsai, 2010).
- 2007 yılında (Celik ve Acikgoz, 2007) tarafından yapılan çalışmada 120 wattpeak etiket gücü olan tek kristalli yapıya sahip güneş panelinin matematiksel modellemesini yapmışlardır. Modellemesi yapılan panelin gerçek ortamdaki çıkış karakteristiklerini incelemek adına çalışma şartları sağlanarak deneysel ortamda test edilmiştir. Deneyi İskenderun'a kurup sistemin optimum açısını 36° olarak ayarlanmıştır. Kurulan bu deney sonucunda güneş paneline ait verimin sıcaklık tarafından büyük oranda düştüğü vurgulanmıştır. Ayrıca güneş paneline ait verimin günün öğlen saatlerinde en yüksek seviyede olduğu belirtilmiştir (Celik & Acikgoz, 2007).
- 2006 yılında (De Soto vd., 2006) tarafından yapılan çalışmada foto-voltaik panellere ait gerçek çalışma koşullarında gösterdikleri performansı saptamak için panele ait matematiksel modeli tasarlamışlardır. Tasarlanan bu model deneysel sonuçlarla ve bu

alandaki diğer modeller ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmüştür. Oluşturulan bu modelin ismi beş parametre modelidir. Bu modelde kullanılan parametreler ışıının oluşturduğu akım değeri, sızıntı akım, güneş hücresine ait seri ve paralel dirençler ve idealite faktörüdür. Bu faktörler ve güneş panelinin fabrikasyon bilgileri ile güneş paneline ait akım-voltaj grafiğinin eğimini elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmayı farklı malzeme türleri içinde yaparak aynı sonuçları elde etmeyi başarmışlardır(De Soto vd., 2006).

- 2012 yılında (Lo Brano vd., 2012) tarafından yapılan çalışmada yapısında silikon malzeme bulunan foto-voltaik güneş panellerinin yeni tasarladıkları beş parametre modeli ile akım-voltaj eğrisini Matlab benzetim programında çizdirmiştir. Modelin doğru olduğunu kanıtlayabilmek için gerçek koşullar sağlanarak deneysel ortam tasarlanmıştır. PVsyst benzetim programı kullanılarak bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kurulan deneysel sistemde alınan sonuçlarda monokristal ve polikristal yapıya sahip güneş panellerine ait akım-voltaj grafiğindeki eğrileri çizilmiştir. Yapılan deneyde elde edilen değerlerden oluşturulan akım-voltaj eğrisi laboratuvar ortamında elde edilen eğriden daha hassas olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmada farklı değerlere sahip dirençler kullanılmıştır. Çalışma sonucundaki oluşturdukları modelin doğruluğu PVsyst yazılımı ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak test edilmiştir(Lo Brano vd., 2012).
- 2011 yılında (Ishaque vd., 2011) tarafından yapılan çalışmada foto-voltaik panele ait iki diyotlu model için geliştirdikleri bir modeli önermişlerdir. Bu çalışmadaki amaç daha önceki iki diyotlu modellerde kullanılan 5-6 parametrelerin bu modelde daha sade hale getirilerek 4 parametre ile denklemin daha sade hale gelmesini sağlamaktır. Ayrıca elektriksel sistemdeki seri ve paralel bağlı dirençlerin değerini basit ve hızlı bir yöntem kullanarak hesaplayabilmiştir. Önerdikleri modelin doğrulanması için üretici firmalardan alınan farklı tiplerdeki altı foto-voltaik sistem üzerinde test edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda iki diyot modelinin sonuçları tek diyot modeline göre daha başarılı olmuştur (Ishaque vd., 2011).
- 2011 yılında bir başka çalışma (Chatterjee vd., 2011) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada foto-voltaik modele ait katalog değerleri kullanılmasıyla bir model tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modelde foto-voltaik hücrenin tek diyot eşdeğer devre modelini kullanmıştır. Farklı sıcaklık ve ışıının değerleri ile değişen çıkış parametrelerin değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca foto-voltaik panelin farklı mevsim koşullarındaki maksimum güç noktası da saptanmıştır (Chatterjee vd., 2011).

- 2009 yılında (Bellini vd., 2009) tarafından yapılan çalışmada hiçbir sayısal model kullanmadan sadece foto-voltaik sistem üreticilerinin katalog değerlerini kullanarak gelişmiş bir foto-voltaik model tasarlamışlardır. Çalışma sonucunda tasarladıkları modeli benzer çalışmalardaki benzetim sonuçları ve deneysel ortamdaki değerler ile karşılaştırmışlardır. Aynı zamanda modele ait deneysel sistemin tasarımının doğruluğu foto-voltaik panelin gerçek değerlerini hesaba katarak uygun bir prosedür ile sunumu sağlanmıştır(Bellini vd., 2009).
- 2014 yılında (Amrouche, 2014) tarafından yapılan çalışmada foto-voltaik panelin oluşturulan gerçek ortam koşullarındaki Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) algoritma verimliliğinin karşılaştırılması amacı ile panele ait matematiksel model türetilmiştir. Foto-voltaik sistemler için önceden yapılan modellerin geliştirilmesi sağlanmış olup oluşturulan deneysel sistemlerin sonucunda alınan değerler ile türetilen modelin doğruluğu karşılaştırılmıştır. Türetilen bu modelin en önemli avantajı sade olması ve bütün bilgileri üreticinin sağladığı katalogdaki elektriksel parametrelerden almasıdır. Çalışmada ilk yapılan türetilmiş model ile yapısında çoklu kristal malzemeye sahip çok geniş bir veri tabanı karşılaştırması yapmış ve sonuçların uyumlu olduğu saptanmıştır. Türetilen bu modelin farklı ışıma değerleri farklı sıcaklık değerleri gibi çeşitli şartlar altında elektriksel çıkış değerleri bulunmuştur. Diğer taraftan oluşturulan çok geniş veri tabanı sayesinde yapısında diğer malzemeye sahip foto-voltaik sistemlerin akım, gerilim, güç gibi elektriksel değişkenlerin sonuçları da elde edilebilmektedir. Tüm bunlara ilave olarak foto-voltaik panellerin kurulum şeması da verilmiştir (Amrouche, 2014).
- 2014 yılında (Bellia vd., 2014a) tarafından yapılan çalışmada foto-voltaik sistemlerin elektriksel çıkış değişkenlerine ışıının ve sıcaklığın oluşturduğu etkileri geniş bir modelleme oluşturmuşlardır. Türetilen bu model yarıiletken temeline ve foto-voltaik hücre tekniğine uygun olacak şekilde yapılmıştır. Türetilen bu modelin hassas olabilmesi için tek diyotlu seri ve paralel direnç modelleri uygulanmıştır. Türetilen bu modele ait benzetim Matlab programı kullanarak yapılmıştır. Bu programı tercih edilmesinin sebebi ise literatürde sık olarak kullanılmasıdır.

Çalışmada hedeflenen amaç herhangi bir anda elde edilen verilerin deneysel sonuçlarda elde edilen verilere yakın olmasıdır. Farklı malzeme türündeki foto-voltaik sistemler için türetilen modelin kullanılabileceği farklı sıcaklık ve ışıma değerlerinin olduğu ortamlarda gerekli tüm değişkenler ile akım-voltaj (I-V) eğrisi ile güç-voltaj (P-V) eğrisinin saptanabileceğini göstermiştir(Bellia vd., 2014a).

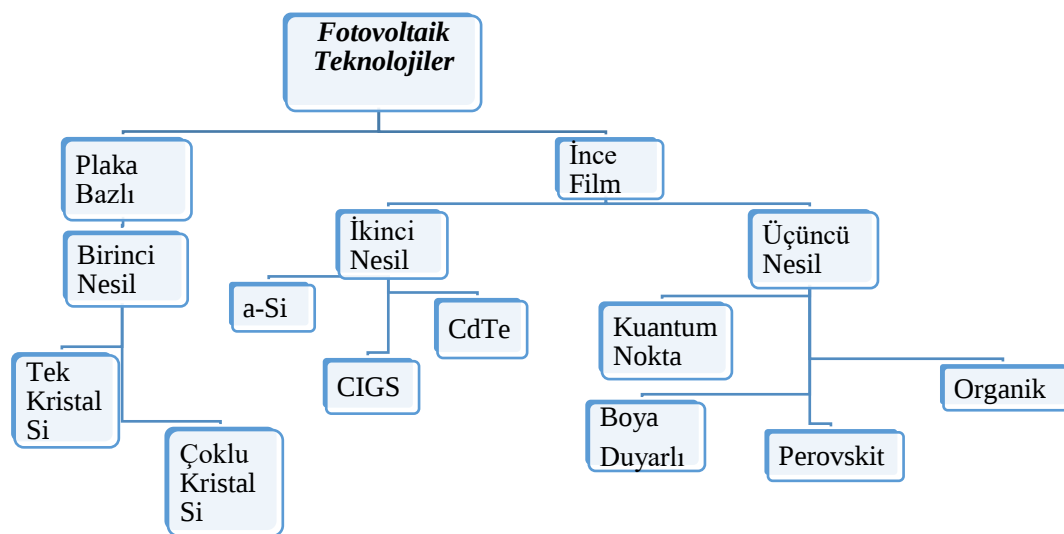
- Yine 2014 yılında (Ayaz vd., 2014) tarafından yapılan çalışmada gerçek şartlar altında foto-voltaik sistemi Matlab benzetim programında modellemesini yapıp önermişlerdir. Farklı yapıdaki malzemelerden oluşmuş foto-voltaik sistemlerin davranışını bu model ile kıyaslamışlardır. Bu çalışma İstanbul’da gerçekleşmiş ve İstanbul’a ait hava şartları geçerli olmuştur. Gerçek şartlar altında yapılan bu çalışmada foto-voltaik sistemin çıkışındaki güç direnç üzerinde oluşan yükten dolayı ölçülmüş ve ölçülen bu değer önerilen model ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonunda önerdikleri modelin tek kristal ve ince film foto-voltaik sistemler için daha uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Fakat türetilen modelin Polikristal yapıya sahip malzemeden üretilen foto-voltaik sistem üzerindeki iyi bir ilişki değerine sahip olunmadığı sonucuna varılmıştır(Ayaz vd., 2014).
- 2009 yılında Malezyda (Amin vd., 2009) tarafından yapılan çalışmada gerçek hava şartları altında farklı malzeme türlerine ait foto-voltaik sistemlerin performansını incelemek ve kıyaslamak adına açık alan da bir çalışma yapmışlardır. Açık alanda yapılan çalışmada tekli kristal, çoklu kristal, amorf silikon, CIS gibi dört farklı foto-voltaik sistem türü kullanılmıştır. Performans ile ilgili bazı parametre ile ilgili birkaç gün boyunca bilgiler alınıp kaydı yapılmış toplanan bu bilgiler ışığında foto-voltaik sistemin gerçek performansı ile ilgili ilk bilgiler ortaya çıkmıştır. Çalışma sonunda ışıyım altında tekli kristal ve çoklu kristal yapıları foto-voltaik sistemlerin daha iyi performans gösterdiği CIS ve amorf silikon yapıdaki foto-voltaik modelin bulutlu ve az ışıyım şartlarında daha verimli olduğu bilgisi ifade edilmiştir. Diğer taraftan hücre yapısı kristal silisyum şeklinde olan foto-voltaik sistemler sıcaklık şartlarından bir hayli etkilendiği belirtilmiştir. Malezya gibi sıcak mevsime sahip olan ülkelerde ince film foto-voltaik sistemlerin kullanılması verim değerini arttıracığı vurgulanmıştır(Amin vd., 2009).

- 2014 yılında (Bashir vd., 2014) tarafından yapılan çalışmada Pakistan'ın Taxila kentine ait iklim koşullarında monokristal polikristal ve tek jonksiyonlu amorf silikon yapıya sahip foto-voltaik sistemlerin performans bilgilerini karşılaştırmışlardır. Bu deney kış mevsiminin şartlarında gerçekleşmiştir. Her bir foto-voltaik sisteme ait verimlilik ve performans analizi yapılmış foto-voltaik sistemin sıcaklığı ile ışıınım şiddetinin sistem üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada foto-voltaik sistemin verilerini sıcaklık ve ışık şiddetinin yüksek oranda etkilediği belirtilmiştir. Yapılan deneyde monokristal ve polikristal yapıdaki foto-voltaik sisteminin ışık şiddetinin fazla olduğu durumda yüksek oranda verim elde edildiği ışık şiddetinin azalması durumunda ani enerji kaybı olduğunu ifade etmişlerdir. Fakat amorf silikon yapıdaki foto-voltaik sistemin ışığı yansıtması daha kötü olduğundan ışık şiddetinin azalması durumunda bile gösterdiği performans ortalamanın üzerinde olduğundan sistemin verimi düşük ışık şiddetinde bile ortalama değerin üzerinde olmaktadır. Yapılan bu çalışmada deneyin yapıldığı yer için monokristal yapıdaki foto-voltaik sistemin daha yüksek verim gösterdiği vurgulanmıştır. Diğer taraftan foto-voltaik sistemin verimliliği ve performans değerleri sistemin arka bölümündeki sıcaklık ve ışık şiddeti ile bir azalma gösterdiği ifade edilmiştir(Bashir vd., 2014).
- 2017 yılında Taşkent'in iklim koşullarında (Matchanov vd., 2017) tarafından yapılan çalışmada monokristal ve polikristal yapıdaki foto-voltaik sistemlerinin performans analizini yapmışlardır. Bu deneyde monokristal yapıdaki foto-voltaik sistemin ürettiği güç %30 polikristal sistemlerin ürettiği güç %28 değerinde azalma göstermiştir. Bunun sebebinin foto-voltaik sistemlerin sıcaklıktan etkilenmeleri olarak gösterilmiştir. Diğer taraftan bu iki farklı yapıya sahip malzemelerin oluşturduğu foto-voltaik sistemin verimi ortalama %13,3 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada polikristal yapıdaki foto-voltaik sistemin monokristal yapıdaki sistemden daha verimli olduğu belirtilmiştir (Matchanov vd., 2017).

- Bursa'nın hava şartlarında 2016 yılında (Taşçıoğlu vd., 2016) ve arkadaşları tarafından iki farklı yapıda foto-voltaik sistemin ayrı yüklerin etkisinde zaman parametresine bağlı olarak sistemden elde edilen elektrik değerlerini kıyaslamayı hedeflemişlerdir. Bu deneyde monokristal ve polikristal yapıya sahip sistemin verimlilik değerlerinin mevsim koşullarına bağlı olarak incelenmiştir. Deney sonucunda monokristal sistemin ortalama elektriksel enerji değeri 42,06Wh, polikristal sistemin ortalama elektriksel enerji değeri ise 39,8Wh olarak kaydedilmiştir. Yapılan deneyde maksimum değerde toplam ışık şiddeti altında monokristal sistemden anlık olarak 87,14 W güç elde edildiğini polikristal sistemde ise 80.17W güç alınmıştır. Bu deneyden elde edilen sonuçta Bursa ilinde monokristal yapıdaki foto-voltaik sistemler daha verimli olacaktır(Taşçıoğlu vd., 2016).

2.3.2. Birinci Nesil Güneş Pilleri

Güneş hücreleri tek bir ışık soğurabilen malzemelerden yapılabildiği gibi çeşitli soğurabilme ve yükleri ayrıştırma sistemlerinden faydalanarak da birden fazla yollar kullanılarak da yapılabilir. Foto-voltaik sistemler çoğunlukla üç nesil olarak sınıflandırılırlar (Mallahasan Hasan, 2022).



Şekil 12. Foto-voltaik cihazların sınıflandırılması

Foto-voltaik piyasasının en çok tercih edilen teknolojisi plaka tabanlı teknolojidir. Dünya piyasasının büyük bir kısmında bu tür cihazlar kullanılmaktadır. Silisyumun yeryüzünde çok sık bulunan ikinci element ve foto-voltaik cihazlar için en uygun element olmasından dolayı çok tercih edilmektedir.

Monokristal Silisyum: Ticari olarak üretilen ilk güneş pillerinde CHROZALSKI tekniği ile büyütme işleminde monokristal yapıli silisyum kullanılmıştır. Bu yöntemde ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli yöntemlerden geçirilerek saf halini alması sağlanır. Daha sonra eritilmiş olan silisyuma çekirdek olarak ifade edilen monokristal yapıli silisyum parçası daldırılır.

Bu çekirdek erimiş haldeki silisyumdan çıkarıldığında soğumuş olan erimiş halde ki silisyum monokristal yapıli silisyum parçası üzerinde külçe olarak yığılmış olur.

Külçe haline gelmiş silisyum iki aşamada dilimlere ayrılır. İlk aşamada külçe dikdörtgen bloklar halinde kesilir. Ardından bu bloklar güneş pili halinin alacak şekilde işlenmeye başlanır. Verimleri yaklaşık olarak %15 civarındadır. Üretimi sırasında çok fazla malzeme kaybı olması bu pillerin üretimini dezavantajlı hale getirmektedir(Karamanav, 2007).

Polikristal Silisyum: Dökme haldeki silisyum bloklarının dilimlenmeleri ile elde edilen polikristal silisyum güneş pillerinin üretim aşaması oldukça ekonomik olmakla birlikte verimi de oldukça düşüktür. Laboratuvar çalışmalarında verimleri yaklaşık olarak %21 ticari sistemlerde ise %14 dolaylarındadır(Koca Tevfik Fikret, 2019).

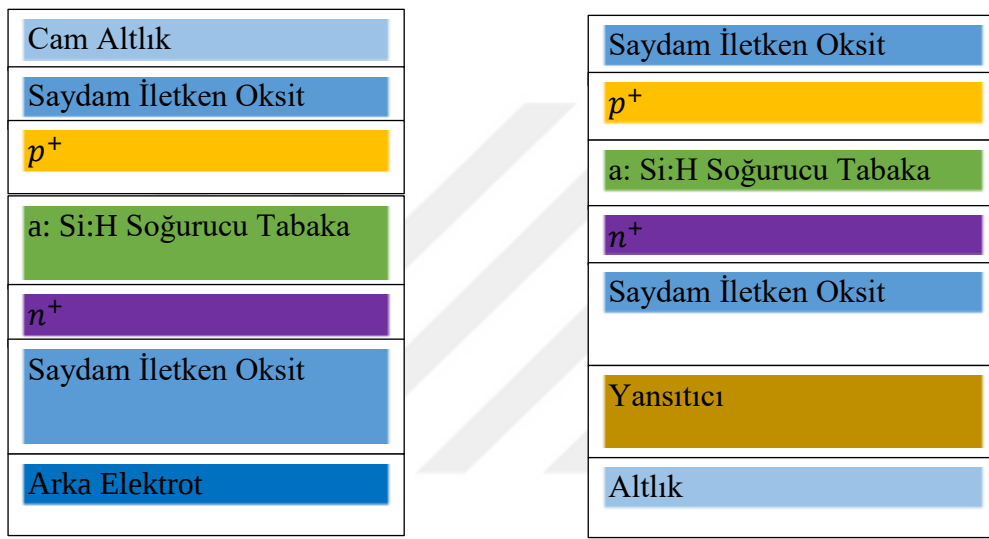
2.3.3. İkinci Nesil Güneş Pilleri

İnce film kullanılması sebebiyle daha az sayıda malzemeye ihtiyaç duyulması üretiminin kolay ve daha düşük sıcaklıklarda üretilmesi ikinci nesil güneş pillerini avantajlı hale getirmektedir. İkinci nesil güneş pillerinin birinci nesil güneş pilleri ile verim konusunda rekabet edebilir hale gelmesi ikinci nesil güneş pillerinin üretiminin ticari olarak yapılması sağlamıştır. Üretimlerinin daha ekonomik olmasına rağmen ömürleri birinci nesil güneş pillerine kıyasla daha düşüktür (Kaya İ.C., 2021).

Amorf Silisyum Güneş Pilleri (a-Si): Bu güneş hücresinde soğurucu olarak kullanılan ilk malzemelerden biri hidrojen katkılı amorf silisyum (a-Si: H)'dur. Kullanılan bu malzemenin yasak enerji aralığının değeri 1,7eV ile 1,8eV arasında bir değere sahiptir. Soğurma katsayısı ise yaklaşık olarak 10^4 cm^{-1} dir(Stuckelberger vd., 2017).

Bant aralığının geniş olmasından dolayı bu malzemeden üretilen güneş hücrelerinin açık kapı gerilimi yüksek olmaktadır. Ancak gelen ışınların küçük bir kısmını soğurmasından dolayı oluşan akım değeri küçük olmaktadır. Genel olarak üretimleri 300°C den daha düşük sıcaklıklarda kimyasal buharı plazma ile güçlendirerek yapılır(Alajlani vd., 2018).

Bundan dolayı polimer cam veya metal gibi farklı materyaller kullanılarak güneş hücresi oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Amorf silisyum güneş hücreleri n-i-p ya da p-i-n olarak oluşturulabilir.



Şekil 13. a) p-i-n yapılı a-Si:H hücresi

b) n-i-p yapılı a-Si:H hücresi

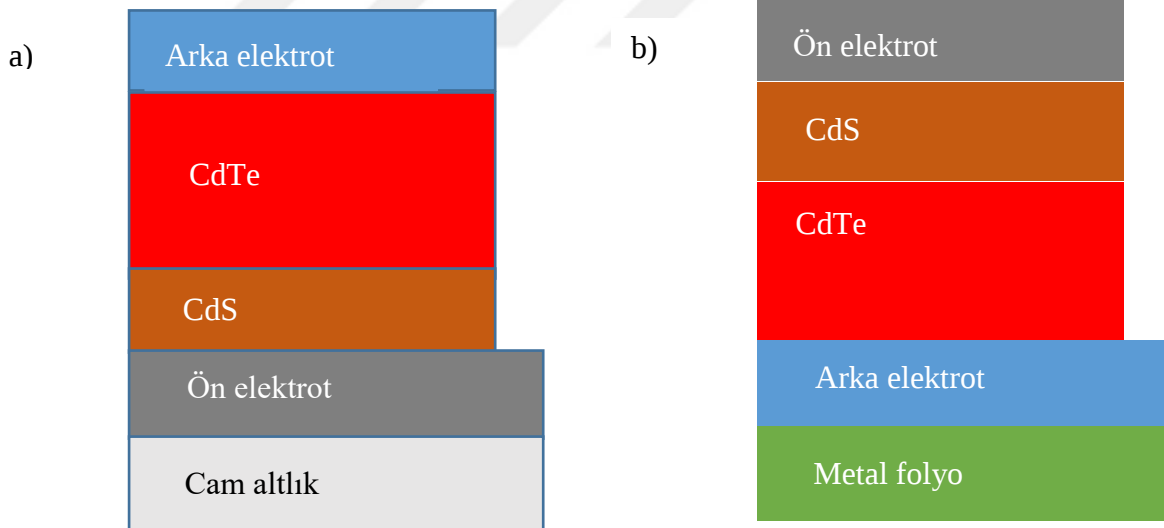
Yukarıdaki şekilde amorf silisyum hücresinin üretilen farklı konfigürasyondaki şemaları gösterilmiştir. Bu iki üretimde de ışık p tipi yarıiletken malzemenin olduğu bölgeden girmesi sağlanır bunun sebebi hareketliliği elektronlardan daha az olan hollerinde devreye daha aktif olarak katılmasını sağlamaktır(Stuckelberger vd., 2017).

Hidrojen ile katkılı amorf silisyum kullanılarak üretilmiş üretilen ilk güneş hücresi 1976 yılında kayıtlara geçmiştir(Carlson & Wronski, 1976). Bu hücre p-i-n yapılı olarak üretilmiş ve verimi ise %2,4'tür. Daha sonraki yapılan çalışmalarda bu verim değeri %10 değerlerine ulaşmıştır. Bu ürün için ilk ticarileşme çalışması hesap makinelerinde kullanılması ile oluşmuştur.

Laboratuvar ortamında ulaşılan verim değeri yaklaşık olarak %14'dür(NREL, 2020). Ayrıca uzun süre ışığa maruz kaldıklarında verimi düşmektedir. Bu nedenle günlük hayatta düşük enerjiye ihtiyaç duyulan kol saati bahçe aydınlatması gibi alanlarda kullanılmaktadır(Kaya İ.C., 2021).

Bakır indium galyum diselenit (CIGS): CIGS elektriksel ve optik özellikleri değiştirilebilen yarıiletken bir malzemedir. Bu değiştirme işlemini galyum ve indium miktarına bağlı olarak yasak enerji aralığı 1eV ile 1,7eV aralığında değiştirerek yapabiliriz(Mufti vd., 2020). Bu güneş hücresinin laboratuvar ortamında ulaşılan en yüksek verim değeri %23,4'tür(NREL, 2022). Oldukça verimli olmasına rağmen geniş bölgeler için üretilememesi ve kullanılan indium malzemesinin sınırlı olmasından dolayı ticarileşmesi zorlaşmıştır. Bu hücreler piyasadaki güneş hücrelerinin sadece % 2 sini oluşturmaktadır(Ramanujam & Singh, 2017).

Kadmiyum Tellür (CdTe): Kadmiyum tellürün yasak enerji aralığı yaklaşık olarak 1,5eV ve optik soğurma katsayısı ise yaklaşık $6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ve kolay üretilebilir gibi özelliklere sahip olması ince film güneş hücresinin önemli malzemelerinden biridir(Romeo, 2018).



Şekil 14. CdTe güneş hücre yapısının gösterimi

Yukarıda CdTe güneş hücresinin cam altlık ve metal folyo üzerinde üretilen yapısı gösterilmiştir. Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı gibi p tipi yarıiletken özelliğe sahip CdTe ve n tipi yarıiletken özelliğe sahip CdS nin birleşimi ile aslında bir PN eklem oluşturulmuştur.

Günümüze kadar ulaşan çalışmalarda birçok farklı çalışma bu hücrenin üretiminde kullanılmak üzere denenmiştir. Bu çalışmalar içerisinde iri taneli ve hata yoğunluğu az olan CdTe üretme imkânı veren kapalı alan benzetim tekniği yüksek verimli güneş hücrelerinin üretilmesine imkân vermiştir(Ramanujam vd., 2020).

Bu güneş hücresi ilk olarak 1972 yılında %6 verime sahip olacak şekilde kayıtlara geçmiştir(Bonnet & Rabenhorst, 1972). CdS ve CdTe için ilk yapılan üretim çalışmalarından günümüze kadar yapılan iyileştirmeler yapılmış ve bunun sonucunda %22,1'lik verim elde edilmiştir(NREL, 2022). Pazar payının yaklaşık %5'lik kısmını bu hücre oluşturmaktadır. Aynı zamanda ikinci nesil güneş hücreleri içinde birinci sırada yer almaktadır(Ramanujam vd., 2020). Kadmiyumun zehirli bir olması tellürün ise rezervinin az olması bu güneş hücrelerinin Si kullanarak yapılan hücrelerle rekabet etmesini zorlaştırmaktadır(Shi vd., 2015).

2.3.4.Üçüncü Nesil Güneş Hücreleri

Bu güneş hücreleri birinci ve ikinci nesil güneş hücrelerine alternatif olarak üretilmiş güneş hücreleridir. Bu nesil güneş hücreleri boya duyarlı, kuantum nokta duyarlı, organik ve perovskit güneş hücrelerinden oluşmaktadır(Buitrago vd., 2020). Boya duyarlı ve organik güneş hücreleri için ticari piyasada çalışması olmuşsa da anlamlı hale gelememiştir(Kumar vd., 2017).

Boya Duyarlı Güneş Hücreleri: İlk olarak 1991 senesinde O'Regan ve Grätzel tarafından üretilmiş ve bu hücreler foto-elektro-kimyasal hücreler olarak da adlandırılmıştı (O'Regan ve Grätzel, 1991). Bu tür hücrelerde boya soğurucu malzeme görevindedir.



Şekil 15. Boya duyarlı ve kuantum nokta duyarlı güneş hücrelerinin gösterimi(Kaya İ.C., 2021).

İyi bir performans gösteren bu hücrelerin kullanım aşamasında ortaya çıkan foto-bozulması, sıvı elektrolit sızıntısı, yarıiletken madde üstündeki boyanın çözülmesi ve elektrotun korozyona uğraması gibi sorunlar hala çözülememiştir(Karlı A., 2018).

Kuantum Nokta Duyarlı Güneş Hücreleri: Bu hücreler boya duyarlı hücreler ile benzer prensipte çalışmaktadır. Boya duyarlı hücrelerdeki boya yerine bu hücrelerde nano parçacıklar kullanılmaktadır. Bu nano parçacıklar yasak enerji aralığını kolayca değiştirebileceğimiz ve soğurma katsayısı fazla olan yarıiletkenlerdir(Kaya İ.C., 2021). Yapılan son çalışmalarda boya duyarlı hücrelerin verimi %13 kuantum nokta duyarlı hücrelerin verimi ise %18,1 seviyesinde ölçülmüştür(NREL, 2022).

Organik Güneş Hücreleri: Donör ve akseptör organik yarıiletkenlerin beraber soğurucu tabakada görev yaptığı hücreler organik güneş hücreleridir(Colsmann ve ark., 2020). Püskürtmeli baskı yöntemi ile esnek ve büyük alanlarda kolaylıkla üretilebiliyor olmaları bu hücrelerin en büyük avantajlarıdır(Kaya İ.C., 2021).



Şekil 16. Organik güneş hücrelerinin şema gösterimi

Yukarıdaki şekilde bu hücrelerin ışığı geçiren ve iletken altlık üzerinde üretilmekte ve soğurucu tabakaların elektron ve boşluk taşıyıcı tabakaların arasında yerleşmiş bir şekilde bulunmaktadır. Bu hücrelerin sağladığı en yüksek verim ifadesi %17,4'tür(Meng vd., 2018). Organik güneş hücrelerinin dezavantajların biri olan kararlılığın çözümü için günümüzde halen yoğun bir şekilde uğraşılmaktadır(Kaya İ.C., 2021).

Perovskit Güneş Hücreleri: Perovskit güneş hücreleri kristal yapıdaki organik inorganik metalin halojenür bileşiklerinin soğurucu tabaka olarak kullanılmasıyla oluşan hücrelerdir. Perovskit güneş hücrelerinin üretimine 2009 yılında başlanmıştır. Üretiminden itibaren ölçülebilmüş en yüksek verim değeri %25,7'dir(NREL, 2022). Perovskit güneş hücrelerinin yüksek verimli olması malzeme üretim maliyetinin az ve kolay olması bu hücrelerin ticari olarak gelecek vadetmesini sağlamaktadır(Kaya İ.C., 2021).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm iki ana başlıktan oluşmaktadır. İlk bölümde düz besleme altında olan bir PN eklem güneş piline ait nümerik ifadenin elde edilmesinin açıklamaları ile anlatılacaktır. Bu nümerik ifade güneş pilinin ışık altına oluşan akım değerinin hangi değişken parametrelere bağlı olduğunu ve ışık altında oluşan akım değerini nasıl etkilediğini gösterecektir. Bu nümerik ifadeleri elde etmemizin amacı, güneş piline ait akım gerilim grafiğini belirlemiş olduğumuz farklı parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiğini ve bu değişimden dolayı verimin nasıl etkilendiğinin belirlemektir. Bu sayede deneysel olarak yapılacak çalışmalara benzetim yöntemi ile yaptığımız çalışmayla ışık tutmuş olacağız.

İkinci bölümde ise birinci bölümden elde edeceğimiz nümerik ifadelerden oluşturduğumuz güneş piline ait akım gerilim grafiğini elde etmek için kullanacağımız Matlab benzetim programı hakkında bilgi verilecektir.

3.1. Güneş Pili, Akım Gerilim Karakteristiği

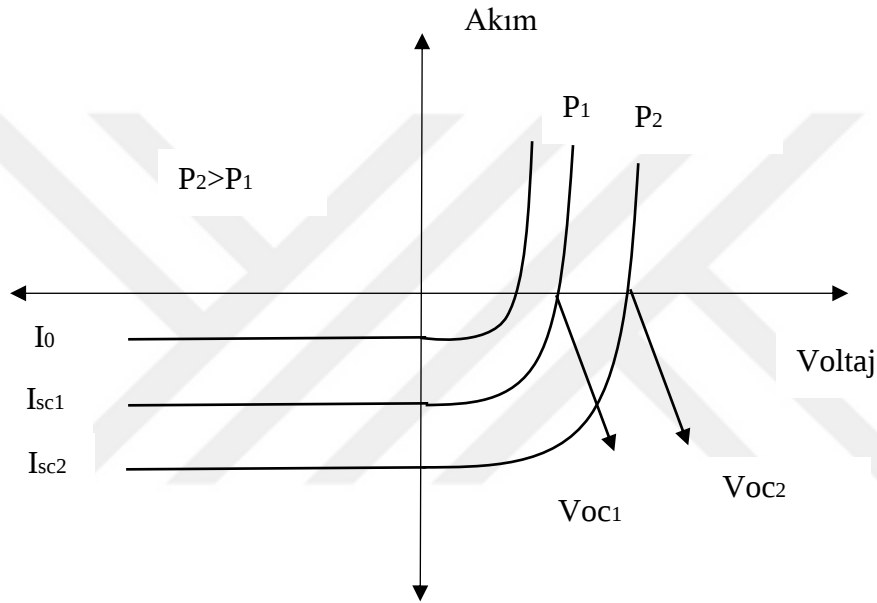
Güneş pili elektriksel olarak güç elde etmek için sıklıkla güneşten aldığı ışığı kullanır ve dış kaynaktan aldığı ışık ile yük üretimi sağlayan PN eklem olarak ifade edilir. Başka bir ifadeyle güneşten gelen ışık sayesinde elektrik enerjisi elde etmemizi sağlar. Bu enerjinin yüksek olabilmesi için birçok güneş pili oldukça fazla detay barındırmaktadır.

Oluşturulan PN eklem deplasyon bölgesine (geçiş bölgesi, uzay bölgesi) düşen ışığın enerjisi yasak enerji aralığına eşit ya da büyük ise elektronun sökülüp valans bandından iletkenlik bandına geçmesini sağlar. Bu durumda elektron-hol çifti oluşur. Sökülen elektronlar N bölgesine oluşan holler ise P bölgesine doğru sürüklenecektir. Bu sürüklenmenin sebebi ise PN eklem deplasyon bölgesindeki elektrik alanıdır.

Eğer PN eklem P bölgesi ve N bölgesine gerekli bağlantıları yaparsak bu duruma N bölgesinde bulunan elektronlar bu bağlantılar sayesinde P bölgesindeki holler ile birleşip yok olacaklardır. Bağlantıyı sağladığımız iletkenin direnç değerini sıfır kabul edersek bu durumda ölçülebilecek maksimum akım değerini ölçebiliriz. Bu akıma kısa devre akımı denir.

PN eklemnin deplasyon bölgesine düşen ışık şiddeti artarsa sökülecek elektron sayısı artacak ve bu durumda iletken üzerinde hareket edecek elektron sayısı artar bu olay kısa devre akımının artmasını sağlar.

PN eklemnin bağlantısını sağladığımız iletkenin direnci çok büyük ise iletken üzerinden geçen elektronlar azalır ve akım değeri azalacaktır. Akım değeri sıfır iken oluşan potansiyel farka ise açık kapı voltajı denir. Bu durumda iletken üzerinden akım geçmez. Artan ışık şiddeti ile kısa devre akımının artması ile açık kapı geriliminde artacaktır.(Khan Academy, 2020a).



Şekil 17. Güneş piline ait akım voltaj grafiği

Yukarıdaki grafikte güneş pili üzerine düşürülen ışıktan dolayı oluşan akım gerilim grafiği gösterilmektedir. Şekil 2.17'deki grafikte I_0 ifadesi güneş pili üzerine ışığın düşmediği durumda oluşan akımdır. Bu akımın adı ise sızıntı akım olarak ifade edilmektedir.

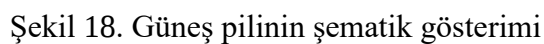
Bu akımın özelliği güneş pilinin kalitesi hakkında bilgi vermektedir. İdeal şartlar altında güneş pili karanlık ortamda akım üretmemelidir. Fakat gerçek hayatta güneş pilinin karanlıkta çok küçük de olsa akım ürettiği görülmüştür.

Güneş pilinin kalitesini değerlendirme yöntemlerinden biri de karanlık ortamda ürettiği akım miktarı ile belirlenir. Karanlık ortamda üretilen akım miktarı ne kadar fazla olursa güneş pilinin kalitesi o kadar azalmaktadır.

Grafikte ki I_{sc1} ifadesi ise güneş pili üzerine düşük şiddette ışık düşürülmesi ile oluşturulan akım ifadesidir. Diğer akım olan I_{sc2} ifadesi ise güneş pili üzerine şiddeti arttırılmış ışığın düşürülmesi ile oluşan akım değeridir. Bu grafikten de görüldüğü gibi güneş pili üzerine düşürülen ışık şiddeti artarsa oluşacak akım değeri de artacaktır.

Güneş pili üzerine düşen ışıktan dolayı alınan elektriksel güç ifadesinin düşük ışık şiddetindeki değeri P_1 yüksek ışık şiddetindeki değeri ise P_2 olarak ifade edilmiştir. Grafikte yüksek ışık şiddetinde oluşan elektriksel güç değeri düşük ışık şiddetindeki oluşan elektriksel güç değerinden daha fazla olduğunu gösterilmiştir.

Güneş pilinin çalışma prensibi deplasyon bölgesinde (geçiş bölgesinde) elde edilen elektron hol çiftinin eklemine elektrik alanı ile ayrılması ilkesine dayanır. Şekil 3.1'deki PN eklemi inceleyelim.



35

Bir yarıiletkenin zamanın bir değişkeni olarak elektron hol konsantrasyonunun analitik ifadesi

Elektronlar için:

$$n = n_0 + \tau G \quad (3.1)$$

Holler için:

$$p = p_0 + \tau G \quad (3.2)$$

Eklemden uzakta bir noktada N tipi bölgede zamanın bir değişkeni olarak hol konsantrasyonu

$$Pn(\infty) = p_0 + \tau G \quad (3.3)$$

PN eklemden olan N tipi bölgedeki elektrik alan olmadığını varsayarsak hollere ait akım yoğunluğu

$$j_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (3.4)$$

Olarak verilir. Bir boyutlu süreklilik denklemi ise

$$U_p = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \quad (3.5)$$

$$U_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \quad (3.6)$$

N tipi bölgeye ait hollerin kararlılık durumunda süreklilik eşitliğini kullanırsak aşağıdaki analitik ifadeyi elde ederiz. Kararlılık durumunda np ve pn sabittir dolayısıyla zamana göre değişimi sıfırdır.

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_{n(x)}}{\partial x} + (G_n - \cup n) = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_{p(x)}}{\partial x} + (Gp - \cup p) = 0 \quad (3.8)$$

Yukarıda verilen 3.8 ifadesi ile 3.5 ifadesi kararlılık durumu göz önünde bulundurarak birleştirdiğimizde aşağıdaki ifade elde edilir

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial j_{p(x)}}{\partial x} + \left(G - \frac{P_n - p_{n0}}{\tau_p}\right) = 0 \quad (3.9)$$

Yukarıda verilen 3.3 ifadesi ile 3.4 ifadesini 3.9 denkleminde yerine yazarsak

$$\frac{d^2 P_n}{dx^2} - \frac{\left(\frac{P_n - P_{n0}}{\tau_p} - G\right)}{Dp} = 0 \quad (3.10)$$

$$Lp = \sqrt{D_p \tau_n} \quad (3.11)$$

3.10 ifadesi bir diferansiyel denklemdir. Yukarıdaki 3.10 ifadesini 3.11 ifadesi göz önüne alınıp çözüldüğünde

$$P_n = P_{n_0} + \tau_p G + A \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) \quad (3.12)$$

$$L_p^2 \frac{d^2 P_n}{dx^2} = A \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) \quad (3.13)$$

olarak yazılır.

Yukarıda verilen 3.12 ifadesinde ki A ve B ifadeleri integral sabitleridir. Yukarıda verdiğimiz 3.3 ifadesini $x=\infty$ için sınır şartı olarak kullanırsak $A=0$ olarak bulunur. Az miktardaki enjeksiyon şartı kabul edildiğinde geçiş bölgesinin kenarındaki N tipi hol konsantrasyonu

$$p'_n(-l_p) = p_n(l_n) - p_{n_0} = p_{n_0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.14)$$

ile ifade edilir. Bulduğumuz bu ifadeyi 3.12 ifadesinde sınır şartı olarak kullandığımızda B integral sabitini bulmuş oluruz. Bu durumda B ifadesi

$$B = \frac{p_{n_0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] - \tau_p G}{\exp\left(-\frac{l_n}{L_p}\right)} \quad (3.15)$$

Benzer şekilde A integral sabitini de bulacak olursak

$$A = \frac{n_{p_0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] - \tau_n G}{\exp\left(-\frac{l_p}{L_n}\right)} \quad (3.16)$$

Bulmuş olduğumuz A ve B integral sabitlerini yukarıda belirttiğimiz 3.12 denkleminde yazdığımızda N tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıların (hollerin) konsantrasyonunu x 'in bir fonksiyonu olarak elde ederiz.

O halde

$$P_n = P_{n_0} + \tau_p G + \frac{p_{n_0} \left[\exp\left(\frac{qv_a}{kT}\right) - 1 \right] - \tau_p G}{\exp\left(-\frac{ln}{L_p}\right)} \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) \quad (3.17)$$

P tipi bölgedeki azınlık taşıyıcılar (elektronların) benzer yöntemle x 'in bir fonksiyonu olarak benzer şekilde $x < 0$ olacak şekilde bulunursa

$$n_p = n_{p_0} + \tau_n G + \frac{n_{p_0} \left[\exp\left(\frac{qv_a}{kT}\right) - 1 \right] - \tau_n G}{\exp\left(-\frac{lp}{L_n}\right)} \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right) \quad (3.18)$$

Bu durumda oluşacak toplam akım yoğunluğu

$$J = J_{n(-lp)} + J_{p(ln)} \quad (3.19)$$

Burada $x = ln$ 'da hol akım yoğunluğu ifadesi

$$J_p = \frac{qDp}{L_p} p n_0 \left[\exp\left(\frac{qv_a}{kT}\right) - 1 \right] - \tau_p G \quad (3.20)$$

Benzer çözümü elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu için yazarsak

$$J_n = \frac{qDn}{L_n} n p_0 \left[\exp\left(\frac{qv_a}{kT}\right) - 1 \right] - \tau_n G \quad (3.21)$$

Diyot üzerinde oluşan net akım ifadesi 3.20 ve 3.21 ifadelerinin toplamının diyota ait kesit alanının çarpımı ile bulunacaktır.

Bu durumda diyotta oluşan net akım ifadesi

$$I = A(J_p + J_n) \quad (3.22)$$

Burada G_n ifadesinin birim zamanda üretilen elektron sayısı G_p ifadesinin de yine birim zamanda oluşan hol sayısı olduğunu unutmayalım. Diyottan geçen akımı ifade edebilmek için 3.20 ve 3.21 ifadesini 3.22 ifadesinde yerine yazarsak

$$I = A_q \left(\exp\left(\frac{qv_a}{kT}\right) - 1 \right) \left(\frac{Dn}{L_n} np_0 + \frac{Dp}{L_p} pn_0 \right) - A_q G(\tau_n + \tau_p) \quad (3.23)$$

O halde ışığın geçiş bölgesinde sebep olduğu elektron-hol çiftlerinin oluşturduğu akım değerini hesaplamamız gerekmektedir. Oluşan bu çiftler geçiş bölgesinde oluşan elektrik alan tarafından süpürülür. Bu süpürülme olayı elektronlar için n tipi bölgeye holler için ise p tipi bölgeye doğru ivmeli hareket şeklindedir. Sonuç olarak elektron ve hollerin oluşturduğu akım için süreklilik denklemlerini çözmemiz gerekmektedir. Geçiş bölgesindeki rekombinasyonu ihmal ettiğimizde kararlı şartlar altında aşağıdaki analitik ifadeyi yazmamız mümkün olur.

$$\frac{dj_n}{dx} = -qG = -\frac{dj_p}{dx} \quad (3.24)$$

Deplasyon bölgesi (geçiş bölgesi) sınırlarında integral alırsak

$$J_n(l_n) = J_p(-l_p) = -q \int_{-l_p}^{l_n} G dx = J_n(-l_p) - qG(l_n + l_p) \quad (3.25)$$

Bundan dolayı geçiş bölgesinde ışıktan dolayı oluşan akım değeri aşağıdaki gibi olacaktır.

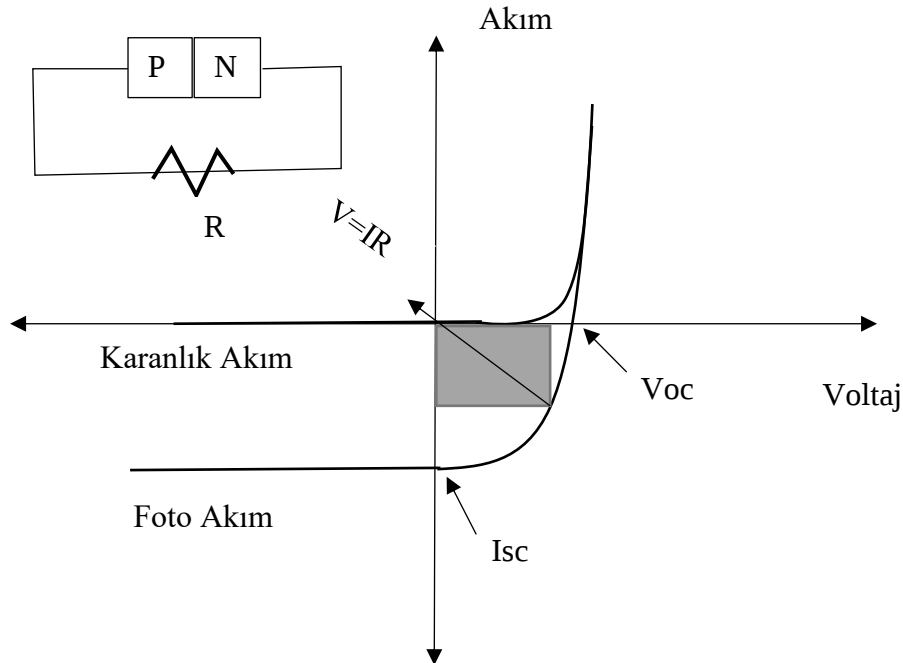
$$I_{Pt} = -qAG(ln + l_p) \quad (3.26)$$

Bulduğumuz bu akım değeri (3.23) ifadesinin eşitliğine eklediğimizde güneş piline ait akım-gerilim karakteristiği oluşur.

$$I = qA \exp\left(\frac{qv_a}{kT}\right) - 1 \left[\frac{Dn}{L_n} np_0 + \frac{Dp}{L_p} pn_0 \right] - qAG(ln + l_p + L_n + L_p) \quad (3.26)$$

Elde edilen son ifadeyi karanlıktaki diyot akımı ile karşılaştırsak ışık altındaki bir güneş pilinin karakteristiğinde üretimin olmasından dolayı karanlıktaki bir diyotun karakteristiğine göre $-qA \left(G(\tau_n + \tau_p) \right)$ kadar akımda bir kayma olacaktır.

$$I_L(v) = I_D(v) - qA \left(G(\tau_n + \tau_p) \right) \quad (3.27)$$



Şekil 19. Aydınlik ve karanlık ortamda güneş piline ait akım gerilim karakteristiği. Gri bölge pilden dolayı direnç üzerine sağlanan güçü temsil eder

Yukarıdaki şekilde güneş piline ait karanlık ve aydınlık ortamdaki akım gerilim karakteristiğini göstermektedir. İçerideki devre aydınlık ortamdaki güneş pilinin elektriksel gücünü dirence aktardığı devredir. Devreye ait çalışma noktası yük direnç eğrisi ile aydınlık ortamda bulunan bir güneş piline ait akım gerilim karakteristiğinin kesişimi ile verilir. Gri alan ise güneş pili tarafından yük direncine sağlanan gücü temsil etmektedir.

Güneş piline ait performansın iyileştirilmesi ışığın soğurulmasıyla ve yansıtıcı olmayan yüzeyler ile kaplanmasıyla olur. Yüksek kaliteye sahip bir yarıiletken materyal kullanımı, uzun ömürlü taşıyıcılar ve uygun direnç seçimi yüke aktarılan gücün maksimum olmasını sağlar. Bu durumda yukarıdaki grafikte ki gri alanın maksimum olması demektir.

Aydınlık ortamda bulunan güneş pilinin kısa devre akımını I_{sc} açık kapı gerilimini ise v_{oc} ile gösterilir. Yukarıdaki grafikte gri renkli bölge çizilen eğri ile eksenler arasında kalan akım gerilim grafiğinde en büyük alana sahip çizilen dikdörtgen olarak kabul edilir.

Bu durumda bu gri bölge aydınlık ortamdaki güneş pilinin sağlayacak olduğu en yüksek gücü temsil eder. Bu alanı S ile gösterirsek bu durumda dolma faktörü (FF) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$FF = \frac{S}{I_{sc}V_{oc}} \quad (3.29)$$

Dolum faktörü güneş piline ait fabrikasyon ve tasarım değişkenlerine bağlı olup devre elemanına ait enerjinin verim dönüşümünü arttırmak için en uygun hale getirilir(Collinge JP & Collinge CA, 2011).

Verimlilik kavramı güneş pillerinin kıyaslanmasını sağlayan önemli parametrelerden biridir. Bu ifade güneş pilinin çıkışındaki elektrik enerjisinin güneşten gelen enerjiye oranı olarak bilinir. Aslında verimlilik ifadesi sadece güneş pilinin performansını yansıtmasının dışında güneşten gelen ışığın yoğunluğuna (ışık şiddetine) ışığın sahip olduğu enerjiye ve güneş pilinin sıcaklığı gibi birçok değişkene bağlı karmaşık bir ifadedir. Bundan dolayı cihazlara ait verimlilik değerleri karşılaştırıldığında aynı koşullar altında olmasına dikkat edilir. Cihazın

çıkışından alınan maksimum güç ifadesi P_{max} olarak ifade edilir(R. A. Messenger ve J. Ventre,2004).

$$P_{max} = v_{OC}I_{sc}FF \quad (3.30)$$

Verimlilik hesaplamaları için giriş gücü ise P_{in} ifadesi ise yaklaşık olarak $100W/m^2$ olarak kullanılır(Küpel, 2005). Verimlilik ifadesi ile dolum faktörü arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olur (R. A. Messenger ve J. Ventre,2004).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{v_{OC}I_{sc}FF}{P_{in}} \quad (3.31)$$

3.3. Cihazın Nümerik Sonuçlarının Elde edilmesi

Bir güneş pilinin akım gerilim grafiğinin verimini etkileyen birçok faktör vardır. Bu çalışmada güneş piline etkileyen faktörler içerisinde ışık şiddeti, sıcaklık ve katkılama (doping) etkilerinin akım gerilim grafiğinde ve güç gerilim grafiğinde oluşacak değişimlerinin Matlab simülasyon programı yardımı ile incelenip literatürdeki çalışmalar ile doğrulanması sağlanacaktır. Matlab simülasyon programı ile kodlaması yapıp literatürde elde edilen denklemler yardımı ile grafik oluşturulacak ve bu grafiğin fiziksel anlamı hakkında bilgi verilmesi sağlanacaktır. Güneş pilinin ışık şiddetinin değişimi, sıcaklık değişimi ve katkılama ile akım gerilim ve güç gerilim grafikleri elde edilecektir. Elde edilen bu bilgiler ışığında güneş pilinin daha verimli kullanılabilmesi için görüş ve öneriler sunulacaktır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ise tez için oluşturduğumuz model ve bu modelin literatürdeki deneysel sonuçlar ile doğrulanması olacaktır. Ayrıca yapmış olduğumuz hesaplamaların benzetim sonuçları ile doğrulanması ve tartışma bu bölümde verilir.

4.1. Işık Şiddeti Etkisi

Güneş hücresinin üzerine düşen ışık şiddeti artarsa sökülen elektron sayısı artacaktır dolayısıyla güneş hücresine kontak yaparak bağlamış olduğumuz iletkenden geçen yük miktarı artacak ve bu durumda oluşan akım değerini arttıracaktır. Oluşan kısa devre akımı ışık şiddeti ile doğru orantılı olacak şekilde artacaktır. Bu durum oluşacak açık kapı gerilimini arttıracaktır fakat açık kapı gerilimi ışıma değerine logaritmik olarak bağlıdır(Erdoğdu E., 2011).

İşıma değerlerinin değişmesi oluşacak kısa devre akımı ve açık kapı gerilimi değerlerini de değiştirecektir. Açık kapı gerilimi güneş pilinin yüzey alanına bağlı bir büyüklük değildir sadece kullanılan materyale bağlıdır(Tercan M. B., 2000).

Güneş pilinde oluşan akım diyottaki akımın ters yönünde ilerler. Bu yüzden akım değeri negatif olarak ifade edilir. Yaptığımız çalışma sonucunda işlemleri kolaylaştırmak için akım değerini pozitif olarak alacağız.

Hollerin difüzyon uzunluğu L_p elektronların difüzyon uzunluğu ise L_n olarak ifade edildiğinde

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot T_p} \quad (4.1.1)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot T_n} \quad (4.1.2)$$

olarak ifade edilir. Burada D_p ve D_n ifadesi hol ve elektron difüzyon katsayısıdır. T_p ve T_n ifadesi ise hollerin ve elektronların yaşam süresidir.

$$T_p=T_n = 10^{-6}s, D_p=11,9 \frac{cm^2}{s}, D_n=35,8 \frac{cm^2}{s} \text{ olarak alınmıştır.}$$

Elektron ve hollerin etkin kütlesi ise sırasıyla m_e ve m_h olarak verilmiştir. Burada m_0 elektronun durgun kütlesidir değeri ise $m_0=9,11 \times 10^{-31}kg$ dır.

$$m_e = 0,12m_0 \quad (4.1.3)$$

$$m_h = 0,37m_0 \quad (4.1.4)$$

Asal taşıyıcı konsantrasyonunun ifadesi n_i^2

$$n_i^2 = N_C \cdot N_v \cdot \exp\left(-E_g \cdot \frac{q}{kT}\right) \quad (4.1.5)$$

Burada N_C iletkenlik bandındaki etkin hal yoğunluğu, N_v valans bandındaki hollerin etkin hal yoğunluğu olarak adlandırılır. $N_C = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

$N_v = 1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak alınmıştır. Yukarıdaki (4.5) ifadesinde

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ elektron yükü $T = 293^\circ \text{ K}$ sıcaklık ve $k = 1,3805 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ Boltzmann sabitidir.

E_g ifadesi ise silikonun bant aralığının değeridir. Bu değer 1,12eV olarak alınmıştır.

$$Q = \left(\frac{k \cdot T}{q}\right) \cdot \log\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (4.1.6)$$

PN eklemde yükün yer değiştirmesi sonucu oluşan eklem potansiyeline Q (iç potansiyel) olarak adlandırılır. N_a ve N_d akseptör ve donör atomlarının birim hacimdeki miktarıdır.

$N_a = N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak alınmış sabitlerdir.

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{(Q - V_a) \cdot N_d}{N_a \cdot (N_a + N_d)}} \quad (4.1.7)$$

$$l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{(Q - V_a) \cdot N_a}{N_d \cdot (N_a + N_d)}} \quad (4.1.8)$$

Yukarıdaki l_p ifadesi hollerin eklem bölgesindeki genişliği birimi cm, l_n ifadesi ise elektronların eklem bölgesindeki genişliği birimi cm olarak ifade edilmiştir. ϵ ifadesi ise silikona ait elektriksel geçirgenliktir. $\epsilon = 1,0359 \times 10^{-12}$ F/cm olarak alınmıştır.

$$\mu_n = \frac{q \cdot T_n}{m_e} \quad (4.1.9)$$

$$\mu_p = \frac{q \cdot T_p}{m_h} \quad (4.1.10)$$

Burada μ_n ve μ_p elektron ve hollerin mobiliteleridir birimi ise $\frac{cm^2}{V.s}$, dır.

$$j_S = \left(\frac{\mu_n \cdot k \cdot T \cdot n_{p0}}{L_n} + \frac{\mu_p \cdot k \cdot T \cdot p n_0}{L_p} \right) \quad (4.1.11)$$

Yukarıdaki 4.1.11 ifadesinde j_S doyum akım yoğunluğu olarak verilmiştir. n_{p0} ve $p n_0$ ifadeleri sırasıyla denge durumundaki p tipi bölgede ki elektron konsantrasyonu ve n tipi bölgedeki hol konsantrasyonlarıdır. $n_{p0} = 16 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, $p n_0 = 16 \text{ cm}^{-3}$ olarak alınmıştır.

İdeal bir PN eklemde oluşacak akım yoğunluğunu ifade edersek

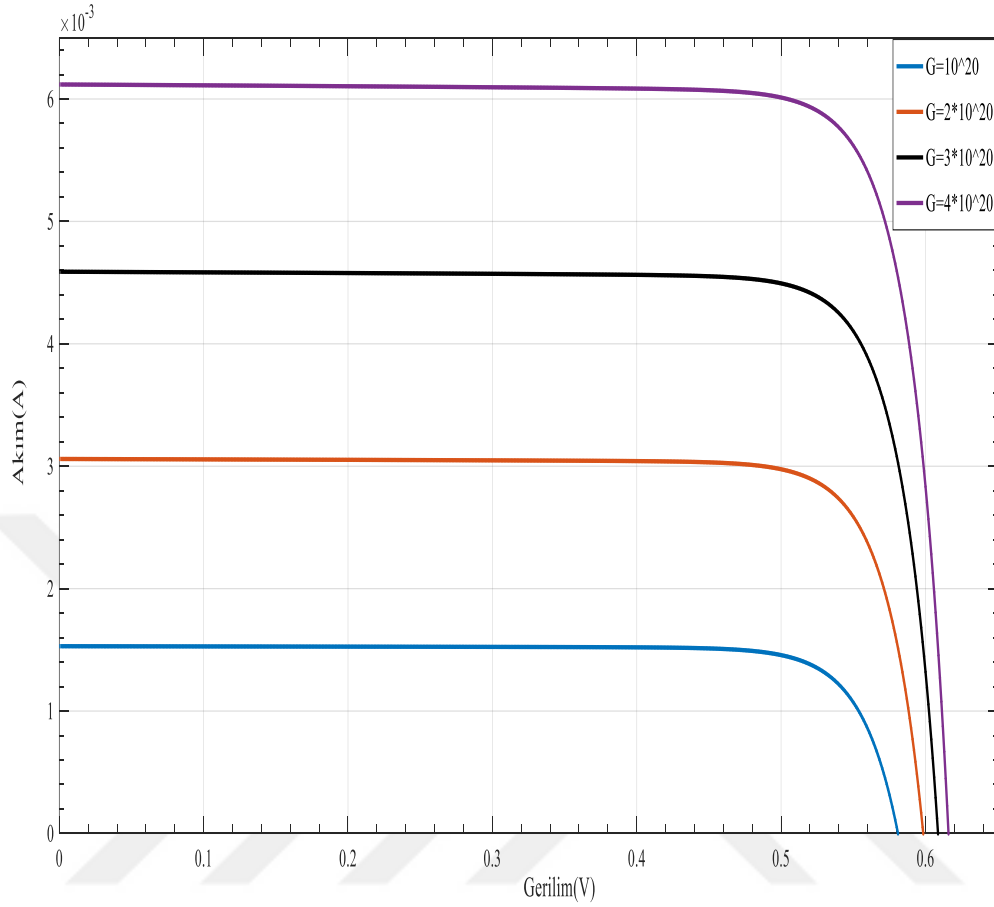
$$j = j_s \cdot \left(\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right) \quad (4.1.12)$$

olarak ifade edilir. Burada V_a ifadesi PN ekleme dışarıdan uygulanan gerilimdir.

Bir güneş pilinin çıkışından alınacak akım ifadesini yukarıda verilen bilgiler ışığında ifade ettiğimizde

$$I = j \cdot A - q \cdot A \cdot G \cdot (l_n + l_p + L_p + L_n) \quad (4.1.13)$$

olur. A PN eklem alanıdır ve değeri $0,01 \text{ cm}^2$ 'dir.



Şekil 20. Değişen ışık şiddeti altında güneş piline ait oluşan akım gerilim grafiği

Akım gerilim grafikleri, iletim mekanizmasını tanımlamanın yanı sıra hücre verimliliği, doldurma faktörü, karakteristik direnç ve akım gibi güneş pili parametrelerini değerlendirmede çok faydalıdır.

Güneş pili güneşten gelen ışığı herhangi bir hareketli bölümü olmadan direkt olarak elektrik akımına dönüştürür. Bu akım doğru akım şeklindedir. Fakat ideal güneş pili karanlık ortamda elektrik akımı üretmez iken üretilen güneş pillerinin karanlık ortamda az miktarda da olsa elektrik akımı ürettiğini gözlemliyoruz. Bu akıma sızıntı akım ismini veriyoruz.

Şekil 20'deki grafikteki G ifadesi birim zamanda üretilen elektron hol çiftidir. Bu grafikte 293°K sıcaklıkta silikon materyalinden üretilen güneş piline ait değerler kullanılmıştır.

Güneşten gelen ışığın şiddeti arttığında oluşacak elektron hol çifti de artacaktır. Bu durumda G değerinin artması ışık şiddetinin artması olarak düşünülebilir.

Işık şiddetinin artması ile akım gerilim grafiğinin altında kalan alan artacağından güneş piline ait verim değeri de artacaktır. Yaptığımız bu çalışma bu alanda literatürde bulunan (Sarkar, 2016a), (Nayan & Ullah, 2015), (Bellia vd., 2014b), (Galád & Špánik, 2014) çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

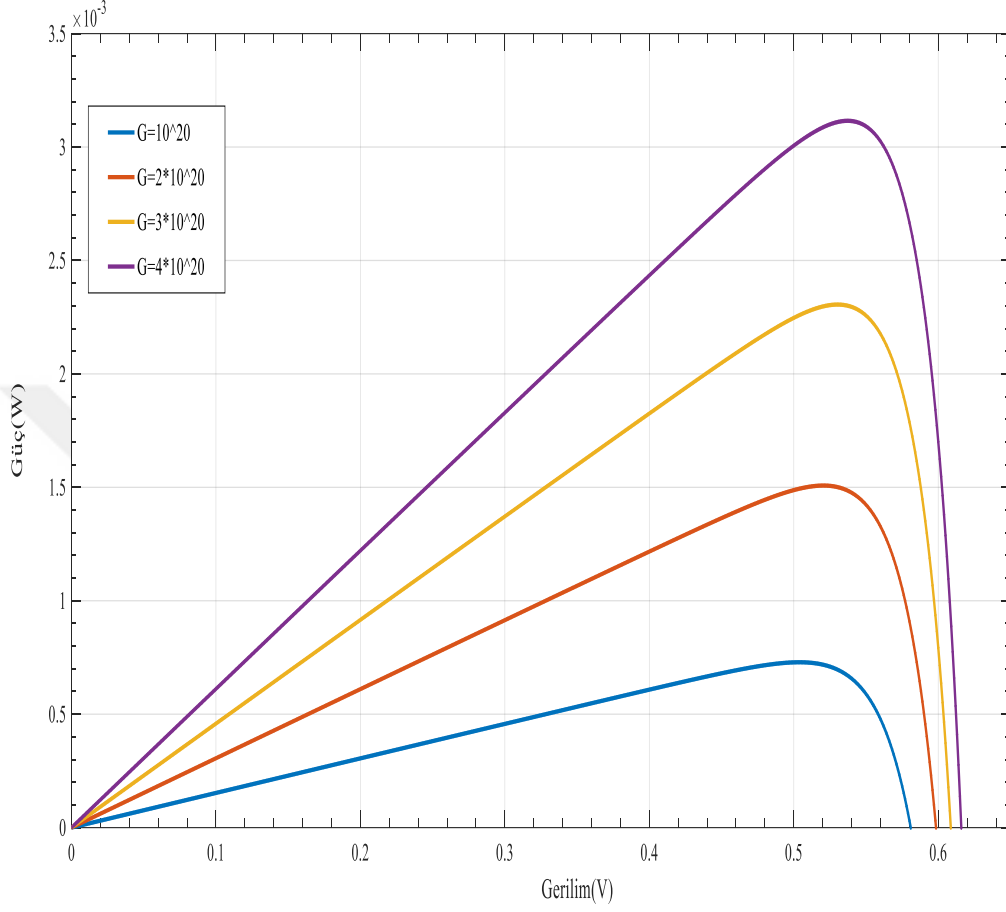
Bu durumdan yola çıkarak ışık şiddetinin artması güneş pilinin verimini arttıracakını söyleyebiliriz. Işık şiddetinin artmasıyla artan kısa devre akımı doldurma faktörünün artmasını sağlayacaktır(Sarkar, 2016).

Birim Üretilen Hol Çifti Değerleri	Zamanda Elektron G	Açık Kapı Gerilimi v_{oc} (V)	Kısa Devre Akımı I_{sc} (A)	Doldurma Faktörü (FF)	Verim $\eta(\%)$
	10^{20}	0.58	1.53×10^{-3}	0.8213	7.29
	2×10^{20}	0.60	3.06×10^{-3}	0,8235	15.08
	3×10^{20}	0.61	4.59×10^{-3}	0,8236	23.06
	4×10^{20}	0.615	6.12×10^{-3}	0,8278	31.16

Tablo 1. Şekil 20 de akım gerilim grafiği verilen güneş piline ait değerler

Şekil 20’de güneş piline ait akım gerilim grafiğindeki değerleri kullanarak açık kapı gerilimi, kısa devre akımı, doldurma faktörü ve verim ifadelerini her bir G değeri için tablo 1’de verilmiştir. Bu ifadeler hesaplanırken cihazın çalışma sıcaklığı $T=293^\circ\text{K}$ idealite faktörü $n=1$ ve giriş gücü ise $P_{in}=0.01\text{W}/\text{cm}^2$ olarak alınmıştır.

Tablo1’de görüldüğü gibi ışık şiddetinin artması durumunda açık kapı gerilimi kısa devre akımı doldurma faktörü ve verim değerleri artmaktadır. Işık şiddetinin artışını radyasyon değerinin artışı olarak da ifade edebiliriz.



Şekil 21. Değişen ışık şiddeti altında güneş piline ait güç gerilim grafiği

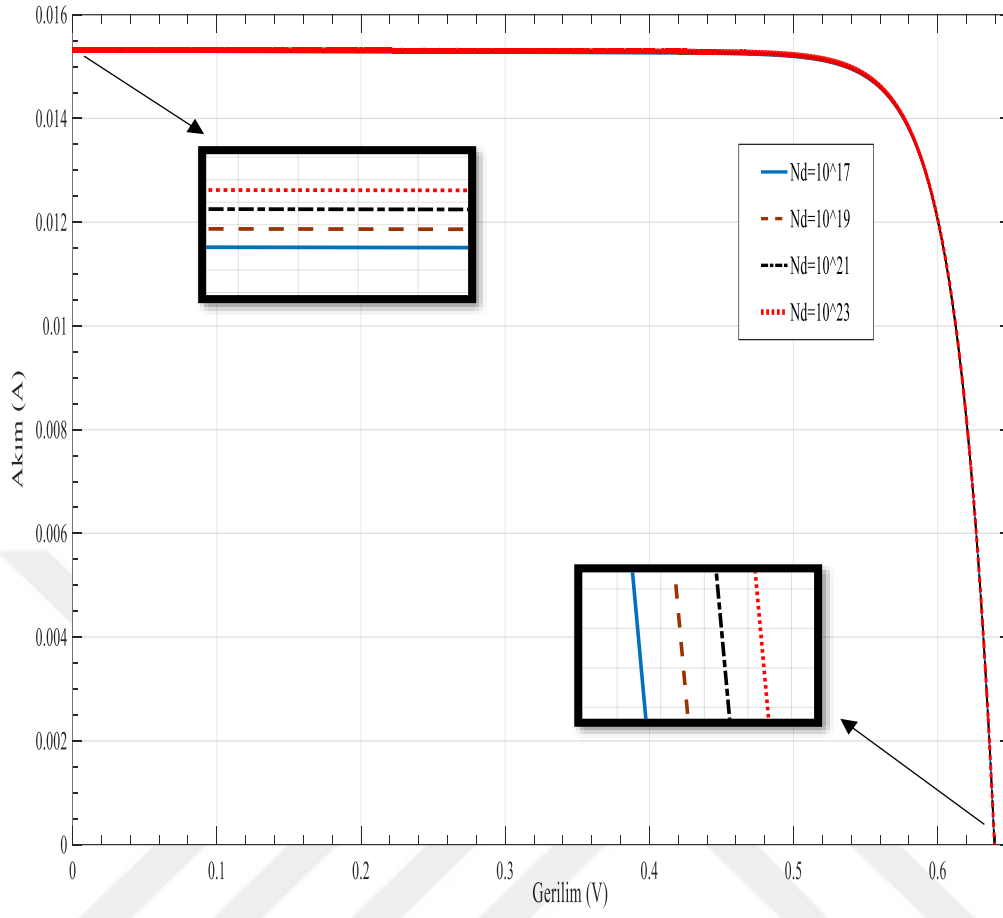
Güneş piline ait akım gerilim grafiğinin eğimi güneş piline ait direnç değerini göstermektedir. Grafikteki akım değerinin önce sabit kalıp sonra pozitif yönde artan eğim ile akım değerinin hızlıca değişmesinin sebebi güneş pili üzerindeki direnç değerinin düzgün bir şekilde artmasından kaynaklanmaktadır. Direncin artmasıyla güneş pili üzerinde potansiyel fark oluşmaktadır. Oluşan bu potansiyel fark direncin artması ile artış göstermektedir.

Işık şiddetinin değişimi ile güneş pilinin verimi arttığı gibi güneş pilinden elde edilecek çıkış gücü de artacaktır. Şekil 21’de değişen ışık şiddeti altında güneş piline ait güç gerilim grafiği gösterilmiştir. Grafik de güç eğrisinin hızlı bir şekilde yükselip maksimum noktaya ulaştıktan sonra tekrar hızlıca düşmesinin sebebi akımdaki oluşan değişimdir.

Güneş piline ait güç gerilim grafiğinde eğim ifadesi güneş pilinin üzerindeki akım değerini ve değişimini göstermektedir. Güneş pili üzerindeki akım ilk önce sabit sonra bir anda azalması ile güç ifadesi de önce düzgün olarak artıyor ve akımın azalması ile bir anda azalmaya başlıyor.

4.2 Katkılama Etkisi

Güneş pilinin katkılama işlemi elektron ve hol sayısının değiştirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Periyodik cetvelin 4A grubundaki atomlar ile 5A grubundaki atomlar ile katkılama yapıldığında N tipi bir malzeme oluşur. P tipi malzemeler ise periyodik cetvelin 4A grubundaki atomların 3A grubundaki atomlar ile katılanması sonucu oluşur. Yapmış olduğumuz bu katkılama işleminde donör atomlarının değerlerini arttırarak yani elektron sayısı arttırılarak N tipi yarıiletken haline getirmiş oluyoruz. Bu durumda arttırılan elektron sayısı yani katkılama işlemi akım ve gerilim değerinin artmasını sağlar. Güneş pilinin çıkışından alınabilecek güç değerinin artacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 22. Katkılama yapılan güneş piline ait akım gerilim grafiği

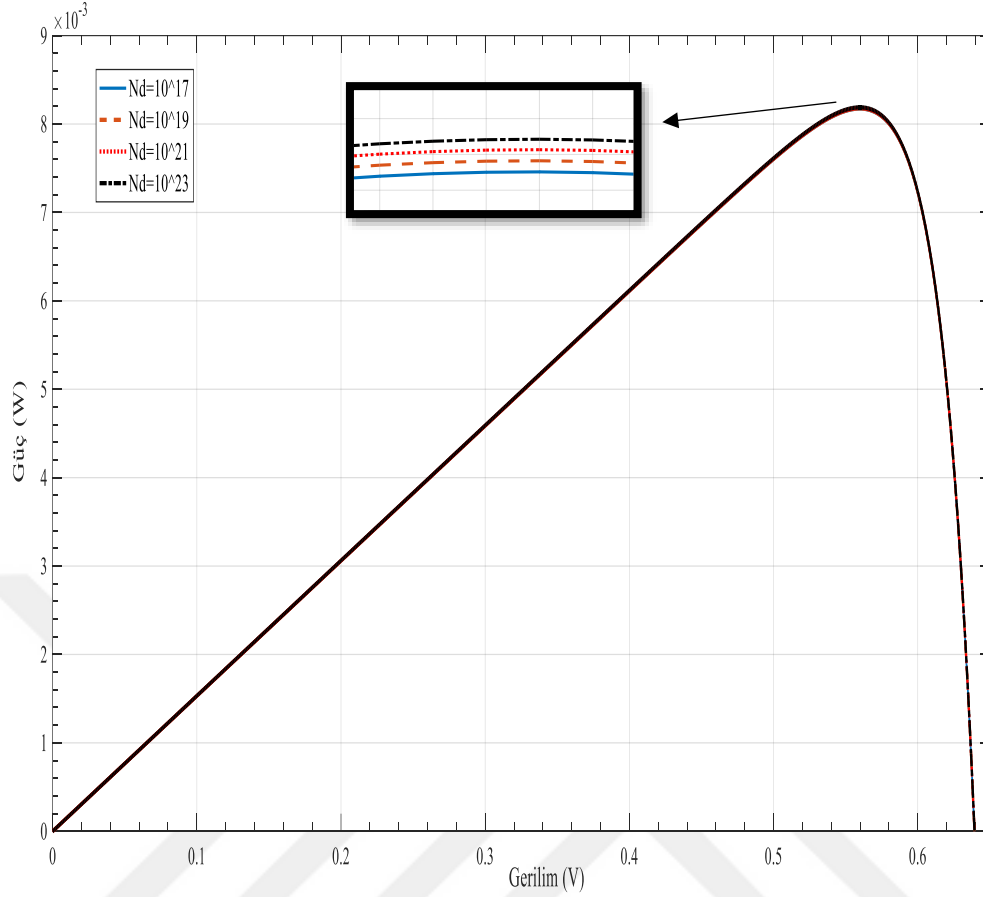
Sabit ışık şiddeti ve sıcaklık altında katkılama yapılan güneş piline ait akım gerilim grafiği şekil 22’de verilmiştir. Sıcaklık değeri $T=293^{\circ}\text{K}$ birim zamanda oluşturulan elektron hol çifti sayısı $G=10^{21}$, akseptör atomları yoğunluğu $N_a=10^{15}$ sabit olarak alınmıştır. Donör atomlarının yoğunluğu ise $N_d=10^{17}$, 10^{19} , 10^{21} , 10^{23} şeklinde değiştirilmiştir.

Birim Donör Atom Değerleri $Nd(cm^{-3})$	Hacimdeki Açık Kapı Gerilimi $v_{oc} (V)$	Kısa Devre Akımı $I_{sc}(A)$	Doldurma Faktörü FF	Verim $\eta(\%)$
10^{17}	0.639336	15.30×10^{-3}	0.83522	8.170
10^{19}	0.639355	15.31×10^{-3}	0.83526	8.176
10^{21}	0.639374	15.32×10^{-3}	0.83540	8.183
10^{23}	0.639392	15.33×10^{-3}	0.83545	8.188

Tablo 2. Şekil 22’de verilen akım gerilim grafiğine ait değerler

Güneş piline ait katkılama ifadesinin akım gerilim grafiği şekil 22’de ve bu grafiğinin değerleri tablo 2’de ifade edilmiştir. Grafikte akseptör atom konsantrasyonları sabit tutulup donör atom konsantrasyonları değiştirilmiştir. Tablo 2’ de de görüldüğü üzere donör atomları konsantrasyonlarının artması güneş pilinin kısa devre akımını ve kontak potansiyelini arttırmaktadır. Bu durum ise verimin ve dolum faktörünün artmasına sebep olur. Yapılan katkılama ile kısa devre akımını ve kontak potansiyelin artmasının sebebi yüklerin yeterli hareketliliğe sahip olmasıdır. Yüklerin hareketliliğini etkileyen faktörlerin başında sıcaklık ve ışık şiddeti gelmektedir. Eğer yükler yeterli ışık şiddeti ve sıcaklığa sahip olursa yapılacak katkılama ile güneş pilinin verimi arttırılabilir. Yapılan çalışma literatürde bulunan (Sachenko vd., 2015), (Kaustuv vd., 2021), (Khelifi vd., 2008) çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Katkılama işleminde ışık şiddeti için kullandığımız analitik ifadeleri kullanıp farklı Nd değerleri için bu sonuçları sağladık.



Şekil 23. Katkılama yapılan güneş piline ait güç gerilim grafiği

Güneş pilinin donör atomlarının konsantrasyon değerini değiştirip akseptör atomlarının konsantrasyon değeri, ışık şiddeti ve sıcaklık değerini sabit tutarak oluşturduğumuz güç gerilim grafiği şekil 23’de verilmiştir. Bu güneş pilinin iletimini elektron konsantrasyonunun değişimi ile nasıl değiştiğini kısa devre akımının değişimini gözlemleyerek ifade edebiliriz. Donör atomlarının konsantrasyon değerlerinin artması kısa devre akımının yeterli ışık şiddeti altında artması ile birlikte iletilen akım miktarının artması anlamına gelmektedir.

4.3 Sıcaklık Etkisi

Güneş pillerinin bulunduğu ortamın sıcaklığı helyumun sıvı olduğu sıcaklık olan $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ de uzayda ya da $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ den büyük sıcaklıklara sahip olan çöller de ki gibi çok geniş bir sıcaklık aralığına sahip olabilir. Dolayısıyla güneş pillerinin çalışmasına sıcaklığın etkisinin incelenmesi kaçınılmazdır.

Yarıiletkenin sıcaklığının artmasından dolayı bant aralığının azalmasını elektronların enerjisinin artması ile ilişkilendirilebilir. Sıcaklık arttırıldığında atomlar arasında ki mesafe artar ve bağ enerjisi azalır. Bundan dolayı atomların yarıiletkende maruz kalacakları periyodik potansiyelin sayısal değeri azalır ve bant aralığı azalır(Erol&Balkan, 2013).

Açık kapı geriliminin (V_{OC}) sıcaklığa bağlı olarak değişimi sızıntı akımına (I_{SC}) bağlıdır. Sızıntı akımının sıcaklığa bağlı olan değişimi açık kapı geriliminin değerini etkileyecektir.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada sızıntı akım ifadesi asal taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır. Sıcaklık değişimi ile en çok etkilenen parametre ise asal taşıyıcı yoğunluğudur.

Sızıntı akımın asal taşıyıcı yoğunluğuna bağlı ifadesi

$$I_{SC}=A \cdot q \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{Dn}{Ln \cdot N_A} + \frac{Dp}{Lp \cdot N_D} \right) \quad (4.3.1)$$

olarak ifade edilir. Analitik ifadelerin açıklamasını ışık şiddetini incelerken belirtmiştik. Burada ki asal taşıyıcı yoğunluğu olan n_i ifadesinin sıcaklıkla ilişkisini incelediğimizde sızıntı akımın sıcaklık ile nasıl değişeceği hakkında bilgi sahibi olacağız. Bölüm 4'te ışık şiddetini incelerken (4.1.5)'de ifade ettiğimiz analitik ifadesinde ki iletkenlik bandındaki etkin hal yoğunluğu olan N_C ve valans bandındaki hollerin etkin hal yoğunluğu olan N_V ifadesinin sıcaklık ile olan ilişkisi asal taşıyıcı konsantrasyonu için belirleyici olmaktadır.

$$N_C = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{3/2} (cm^{-3}) \quad (4.3.2)$$

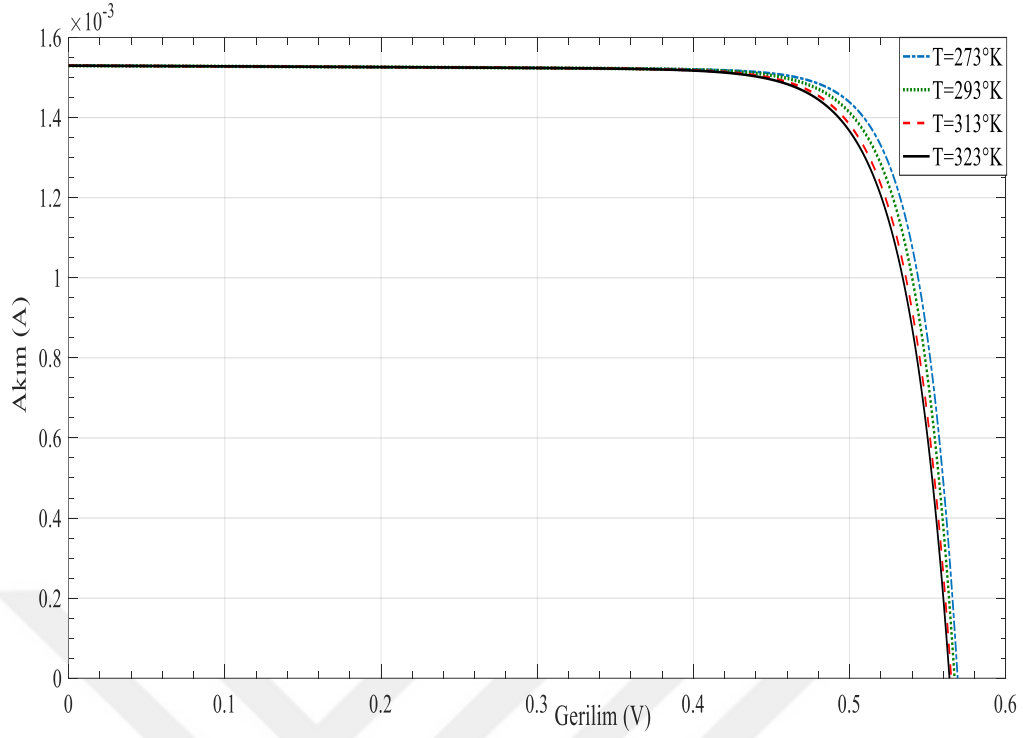
$$N_v = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_h \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{3/2} (cm^{-3}) \quad (4.3.3)$$

Yukarıdaki (4.1.5) ifadesindeki asal taşıyıcı yoğunluğu yerine (4.3.2) ve (4.3.3) ifadelerini yazıp sızıntı akım için düzenlediğimizde

$$n_i^2 = 32 \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot k^2 \cdot m_e \cdot m_h}{h^4} \right)^{3/2} \cdot T^3 \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{k \cdot T} \right) \quad (4.3.4)$$

Bu ifadeden asal taşıyıcı yoğunluğunun yarıiletkenin bant aralığına ve sıcaklık değerine eksponansiyel bağlı olduğu görülüyor.

Işıktan dolayı üretilen akımın sıcaklığın artması ile artmasının nedeni ise artan sıcaklık değeri ile yarıiletkenin bant aralığının azalması ve bu durumun sonucunda daha fazla elektron hol çifti oluşmasından dolayıdır.

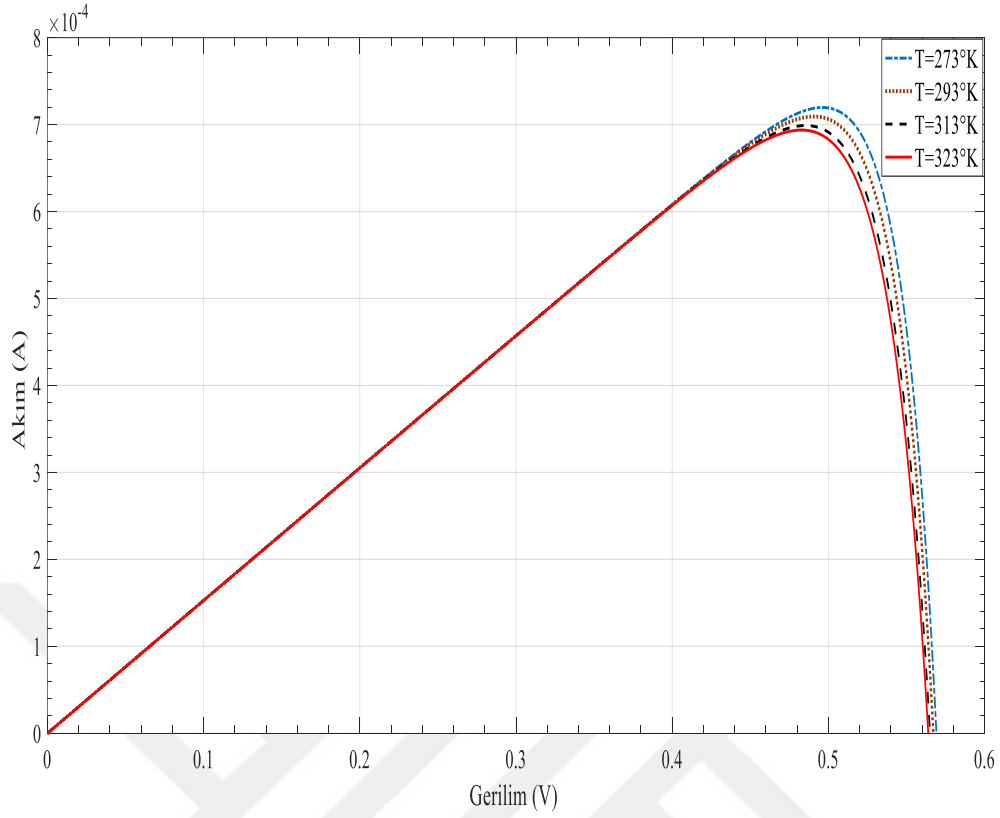


Şekil 24. Sabit ışınım ve konsantrasyon değerleri altında farklı sıcaklıklarda oluşan güneş pilinin akım gerilim grafiği

Yukarıdaki grafik $G=10^{20}$ olacak şekilde sabit ve $N_a=N_d=10^{15}/cm^3$ olacak şekilde denge durumunda farklı sıcaklık değerleri için oluşturulmuştur. Yapılan bu çalışmada güneş pilinin alanı $0.01 cm^2$, idealite faktörü $n=1$ ve giriş gücü ise $P_{in}=0.01 W/cm^2$ olarak alınmıştır.

Sıcaklık Değerleri $T(^{\circ}K)$	Açık Kapı Gerilimi V_{oc} (V)	Kısa Devre Akımı I_{sc} (A)	Doldurma Faktörü FF	Verim $\eta(\%)$
273	0.5689	1.52961×10^{-3}	0.8269	7.196
293	0.5696	1.52964×10^{-3}	0.8180	7.093
313	0.5647	1.52967×10^{-3}	0.8091	6.989
323	0.5635	1.52969×10^{-3}	0.8047	6.937

Tablo 3. Şekil 24’de verilen akım gerilim grafiğine ait veriler



Şekil 25. Sıcaklık değişimi ile oluşan güneş piline ait güç gerilim grafiği

Şekil 24’ de oluşturulan güneş piline ait akım gerilim grafiğinde kullanılan değerlerden oluşturulan güç gerilim grafiği şekil 25’ de verilmiştir. Sıcaklık değeri arttıkça güneş pili üzerindeki verim ve doluluk faktörü değerlerinin azaldığı tablo 3.4’de gösterilmiştir. Buna bağlı olarak sıcaklık arttırılırsa güneş pilinin çıkışından alınacak güç değeri de azalacaktır. Yapılan çalışmadan alınan sonuçların literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür (Galád & Špánik, 2014), (Rusirawan & Farkas, 2014), (Bellia vd., 2014b).

4.4 Yüzey Yüklerinin Etkisi

Bir güneş pili üzerine düşen ışık Fresnel Denklemi yardımıyla incelenmiş ve elektrik alan değeri hesaplanmıştır. Elde edilen ifadeden taşıyıcı konsantrasyon değeri de bulunabilir. Daha sonra Poisson Denkleminin çözümü ile yerleşik potansiyel bulunabilir. Bu modellemeyi kullanabilmemiz için sistemin denge durumunda olması gerekmektedir.

(Imran ve ark., 2021) yapmış olduğu çalışmada üç farklı dalga boyunda gelen ışıkların güneş pilinin içinde oluşturduğu elektrik alanın dağılım spektrumunu cihazın bölgelerine göre verilmiştir. Elektriksel alan spektrumundan elde edilen yerleşik potansiyeli alıcı ve verici atomların konsantrasyon değerlerine bağlıdır. Buna bağlı olarak denge halinde enerji band diyagramı çizilebilir. Taşıyıcı profili de hesaplama yöntemiyle çıkarılabilir.

Güneş pilinin yüzeyindeki taşıyıcıların birleşme ve ayrışma olayları cihazın verimliliğini etkileyen en önemli faktördür. Güneş pilinin verimliliğinin yüzey yüklerine, yüzey yük seviyelerine ve yüzey rekombinasyon hızlarına göre incelenebilir olarak öngörmekteyim. Bu elektron ve hollere ait farklı yüzey rekombinasyon hızlarının incelenmesi demektir. Oluşan elektron ve hollerin kutuplar arasındaki hareketleriyle tekrar birleşmeye kadar geçen sürenin artması yaşam sürelerinin artması anlamına gelir. Elektron ve hollerin tekrar birleşmesi olayının (rekombinasyon) artması yüzeyde oluşan rekombinasyon hızlarının azalmasına sebep olur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Foto-voltaik sistemlerde elektrik enerjisinin üretim veriminin artırılmasında coğrafi, iklimsel ve çevresel etkilerin önemi büyüktür. Bu sistemlerin kurulduğu bölgedeki şartlar göz önünde bulundurulmazsa kurulu olan foto-voltaik sistemlerde verimin düşmesi kaçınılmazdır.

Yapmış olduğumuz çalışmada foto-voltaik sistemlere etki eden faktörlerin değişimi incelenmiştir. Bu inceleme analitik olarak yapmış olduğumuz çalışmadaki sonucun nümerik ifadesinin MATLAB benzetim programında grafik çizimi ve grafik deki değişkenler çıkarılan nümerik ifade ile belirtilmiştir.

- Güneş pilinin bulunduğu ortamın sıcaklık değeri düşünüldüğünde bu durumun güneş pilinin verimine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde ettiğimiz nümerik ifade de ki sıcaklık değerinin artışı incelendiğinde kısa devre akımındaki küçük miktardaki artışa karşılık açık kapı geriliminde büyük düşüş görülmüştür. Bu düşüş güneş pilinin veriminin azalmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak foto-voltaik sistemlerin çıkışından alacağımız elektriksel güç değeri de azalttığı gözlemlenmiştir. Bu olayında literatürdeki diğer çalışmalar ile uygun olduğu görülmüştür.
- Güneş pili üzerine düşen ışık şiddeti foto-voltaik sistemlerin kurulum yapılacağı yer açısından büyük önem arz etmektedir. Çünkü foto-voltaik sistemler ışığı direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren ve enerjinin taşınmadan üretildiği yerde kullanımına olanak sağlayan sistemlerdir. İdeal güneş pili karanlık altında akım üretmez. Fakat piyasadaki güneş pillerinde karanlık altında bir miktar akım üretilmektedir. Bu akıma sızıntı akım olarak ifade edilir. Yaptığımız çalışmada sızıntı akımın fazla olması durumunda oluşacak verimin azalacağını gözlemledik. Işık şiddetinin değişimi incelendiğinde güneş pili üzerine düşen foton sayısı pil üzerinde oluşan kısa devre akımının ve açık kapı geriliminin arttığını göstermiştir. Bunun sonucunda ise artan yüzeye düşen foton sayısının artması ile birlikte hem güneş pilinin verimi artmakta hem de güneş pilinin çıkışından alacağımız elektrik enerjisinin değerinin artmakta olduğu yaptığımız çalışmada görülmüştür. Bu durum ise literatürdeki diğer çalışmalar ile uygundur.

- Foto-voltaik sistemlerin dış şartlardan bağımsız olarak verimini etkileyen faktörlerden biri de katkılama(konsantrasyon) işlemidir. Güneş pili üzerine yapılan konsantrasyon etkisi incelendiğinde donör atomlarının sayısı arttırıldığında açık kapı gerilimi ve kısa devre akımı artmaktadır.

Bunun sonucun da güneş piline ait verim değeri ve çıkıştan alacağımız elektrik enerji değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürdeki diğer çalışmalar ile uygundur.

Ülkemizin deprem kuşağı bölgesinde olması ülkemizin nükleer santralden enerji üretilmesi noktasında güvenlik açısından zafiyet oluşturmaktadır. Aslında bu durum yenilenebilir enerjinin önemini bir kez daha göstermektedir. Tabi bu durumda yenilenebilir enerjinin olabildiğince yüksek verimde olmasını zorunlu kılmaktadır.

Yapmış olduğumuz çalışmada güneş pilinin verimine etki eden değişkenlerin analitik olarak incelemesi yapılmıştır. Yapmış olduğumuz çalışmada güneş pilinin bulunduğu ortamın sıcaklığı önemlidir. Sıcaklık artışı verimi olumsuz etkilediğinden foto-voltaik sistemlerin kurulumu yapılırken ortam sıcaklığı ve sistemin soğutulması ve yöntemleri büyük önem arz etmektedir.

Foto-voltaik sistemlerin kurulumunun yapılacağı yerdeki güneş ışığı miktarı bu sistemin verimi açısından oldukça önemlidir. Sistemin maruz kaldığı ışık akısı ne kadar fazla olursa alınacak verim de o kadar fazla olacaktır. Dolayısıyla yüksek miktarda ışık alan ve gölgede kalmayacak şekilde olan bölgelere foto-voltaik sistemlerin kurulumu alınacak verim açısından önem taşımaktadır. Ayrıca sistemin zamanla kirlenmesini de göz önünde bulundurduğumuzda bu durum da soğurulan ışık miktarını azaltacaktır. Bu durumun verime olan etkisini azaltmak için kurulan sistemler belirli bir açı ile kurulabilir. Hem ışığın yüzeye daha dik gelmesi sağlanıp yansıyan ışık miktarı azalacaktır hem de yağmur suyu ile bu sistemlerin temizlenmesi de bu durumda mümkün olacaktır. Hatta foto-voltaik sistemlere güneş takibi yapan sistemler kurulup elde edilecek verim miktarı arttırılabilir.

Ülkemizin aldığı güneş ışığı miktarı diğer ülkeler ile kıyaslandığında oldukça iyi durumdadır. Bu durumdan daha fazla yararlanmak adına foto-voltaik sistemlerden enerji elde etmek için yatırım yapacak kişilere teşvik ve maliyetin düşürülmesi için vergi indirimi gibi kolaylıklar sağlanabilir.

Bu çalışmamızın benzeri literatürde daha önce yapılmıştır. Fakat yapılan çalışmalar genellikle güneş pilinin verimini etkileyen parametrelerin tek yönlü incelenmesi olmuştur. Biz bu çalışmamızda güneş pilinin üzerinde oluşan akım ve gerilim ifadesinin analitik ifadesinin elde edilmesini sağladık.

Ayrıca verimi etkileyen birden fazla parametreyi aynı anda inceleyip verime olan katkısını MATLAB benzetim programı kullanarak akım gerilim ve güç gerilim grafiklerindeki değişimler ile literatüre uyumlu olarak ifade ettik.



6. KAYNAKLAR

- Aladağ, İ., 2017. *Matlab/Simulink Programı Kullanılarak Örnek Bir Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi*. (Y. Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye
- Alajlani, Y., Alaswad, A., Placido, F., Gibson, D., & Diyaf, A. (2018). Inorganic Thin Film Materials for Solar Cell Applications. *Encyclopedia of Smart Materials*, 386-399. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10355-8>
- Amin, N., Lung, C. W., & Sopian, K. (2009). A practical field study of various solar cells on their performance in Malaysia. *Renewable Energy*, 34(8), 1939-1946. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.12.005>
- Amrouche, B. (2014). Improvement and experimental validation of a simple behavioural model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, 204-214. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2014.05.031>
- Ayaz, R., Nakir, I., & Tanrioven, M. (2014). An improved matlab-simulink model of pv module considering ambient conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/315893>
- Bashir, M. A., Ali, H. M., Khalil, S., Ali, M., & Siddiqui, A. M. (2014). Comparison of performance measurements of photovoltaic modules during winter months in Taxila, Pakistan. *International Journal of Photoenergy*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/898414>
- Bellia, H., Youcef, R., & Fatima, M. (2014a). A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/J.NRJAG.2014.04.001>
- Bellia, H., Youcef, R., & Fatima, M. (2014b). A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>
- Bellini, A., Bifaretti, S., Iacovone, V., & Cornaro, C. (2009). Simplified model of a photovoltaic module. *undefined*.
- Bonnet, D., & Rabenhorst, H. (1972). *New results on the development of a thin-film p-CdTe-n-CdS heterojunction solar cell*. In *Photovoltaic Specialists Conference*. 129-132.
- Buitrago, E., Novello, A. M., & Meyer, T. (2020). Third-Generation Solar Cells: Toxicity and Risk of Exposure. *Helvetica Chimica Acta*, 103(9), e2000074. <https://doi.org/10.1002/HLCA.202000074>
- Carlson, D. E., & Wronski, C. R. (1976). Amorphous silicon solar cell. *Applied Physics Letters*, 28(11), 671-673. <https://doi.org/10.1063/1.88617>
- Celik, A. N., & Acikgoz, N. (2007). Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy*, 84(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2006.04.007>
- Chatterjee, A., Keyhani, A., & Kapoor, D. (2011). Identification of photovoltaic source models. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(3), 883-889. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2159268>

- Collinge JP, & Collinge CA. (2011). *PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES* (Tüzemen Sebahattin & Tekmen Süleyman, Ed.; 1. bs). Nobel.
- Colsmann, A., Röhm, H., & Sprau, C. (2020). Shining Light on Organic Solar Cells. *Solar RRL*, 4(6), 2000015. <https://doi.org/10.1002/SOLR.202000015>
- De Soto, W., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), 78-88. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.06.010>
- Ding, K., Bian, X., Liu, H., & Peng, T. (2012). A MATLAB-simulink-based PV module model and its application under conditions of nonuniform irradiance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(4), 864-872. <https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2216529>
- Erdoğan E. (2011). *GÜNEŞ PİLLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ* [Yüksek Lisans]. Fen Bilimleri .
- Erol A, & Balkan N. (2013). *YARIİLETKENLER VE OPTOELEKTRONİK UYGULAMALARI* (1. bs). seçkin.
- Galád, M., & Špánik, P. (2014). Design of photovoltaic solar cell model for stand-alone renewable system. *10th International Conference, ELEKTRO 2014 - Proceedings*, 285-288. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2014.6848903>
- Imran, A., Sulaman, M., Song, Y., Eric, D., Zahid, M. N., Yousaf, M., Saleem, M. I., Li, M., & Li, D. (2021). Modeling and simulation of high-efficiency GaAs PIN solar cells. *Journal of Computational Electronics*, 20(1), 310-316. <https://doi.org/10.1007/s10825-020-01583-6>
- Ishaque, K., Salam, Z., & Taheri, H. (2011). Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 586-594. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2010.09.023>
- Karamanav, M. (2007). *GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ YÜKSEK LİSANS TEZİ*.
- Karlı A. (2018). *HİBRİT PEROVSKİTE GÜNEŞ PİLLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaustuv, D., Kaustuv, D., Soma, R., Soma, R., Anup, M., & Utpal, G. (2021). Performance analysis of crystalline-Si solar cell using MATLAB simulation. *Materials Today: Proceedings*, 39(P5), 1894-1898. https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202102254651538373
- Kaya İ.C. (2021). *ÇÖZELTİ VE VAKUM ESASLI YÖNTEMLER İLE PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU*.
- Khan Academy. (2020a, Aralık 18). *Solar cells - IV characteristics* . https://www.youtube.com/watch?v=9IGAeKzdJ_k&t=211s.
- Khan Academy. (2020b, Aralık 18). *Solar cells - working (and difference from photodiodes)*. https://www.youtube.com/watch?v=YSRs3PuYT_k&list=RDCMUCg4BkaHyyE_4-RvEMJ2PTtA&index=2.
- Khelifi, S., Burgelman, M., Verschraegen, J., & Belghachi, A. (2008). Impurity photovoltaic effect in GaAs solar cell with two deep impurity levels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(12), 1559-1565. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2008.07.003>

- Koca Tevfik Fikret. (2019). *Silisyum Güneş Pillerinin Fotovoltaik Özelliklerine Etkin Eden Çevresel Etkilerin Araştırılması*.
- Kumar, S., Nehra, M., Deep, A., Kedia, D., Dilbaghi, N., & Kim, K. H. (2017). Quantum-sized nanomaterials for solar cell applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 821-839. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.172>
- Küpeli, A. Ö., Lisans, Y., Fizik, T., & Dalı, A. B. (2005). *GÜNEŞ PİLLERİ VE VERİMLERİ*.
- Lo Brano, V., Orioli, A., & Ciulla, G. (2012). On the experimental validation of an improved five-parameter model for silicon photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 105, 27-39. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2012.05.028>
- Mallahasan Hasan. (2022). *PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRELERİ VERİMLİLİĞİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN SAYISAL MODELLEMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI*.
- Matchanov, N. A., Mirzabaev, A. M., Umarov, B. R., Malikov, M. A., Kamoliddinov, A. U., & Bobozhonov, K. A. (2017). Experimental studies of the monocrystal and polycrystal characteristics of silicon photovoltaic modules under environmental conditions of Tashkent. *Applied Solar Energy* 2017 53:1, 53(1), 23-30. <https://doi.org/10.3103/S0003701X17010108>
- Meng, L., Zhang, Y., Wan, X., Li, C., Zhang, X., Wang, Y., Ke, X., Xiao, Z., Ding, L., Xia, R., Yip, H. L., Cao, Y., & Chen, Y. (2018). Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency. *Science*, 361(6407), 1094-1098. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAT2612>
- Mufti, N., Amrillah, T., Taufiq, A., Sunaryono, Aripriharta, Diantoro, M., Zulhadjri, & Nur, H. (2020). Review of CIGS-based solar cells manufacturing by structural engineering. *Solar Energy*, 207, 1146-1157. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.07.065>
- Nayan, M. F., & Ullah, S. M. S. (2015, Kasım 2). Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters. *2015 International Conference on Green Energy and Technology, ICGET 2015*. <https://doi.org/10.1109/ICGET.2015.7315096>
- NREL. (2022). *Best Research Cell Efficiency*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- O'Regan, B., & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* 1991 353:6346, 353(6346), 737-740. <https://doi.org/10.1038/353737a0>
- Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., Artegiani, E., & Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, 110. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2019.100619>
- Ramanujam, J., & Singh, U. P. (2017). Copper indium gallium selenide based solar cells – a review. *Energy & Environmental Science*, 10(6), 1306-1319. <https://doi.org/10.1039/C7EE00826K>
- R. A. Messenger and J. Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering," 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, 2004. - References - Scientific Research Publishing. (t.y.). Geliş tarihi 16 Aralık 2022, gönderen [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=125677](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=125677)

- Romeo, A. (2018). CdTe Solar Cells. *McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 309-369. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00009-4>
- Rump, S. M. (2010). Verification methods: Rigorous results using floating-point arithmetic. *Acta Numerica*, 19, 287-449. <https://doi.org/10.1017/S096249291000005X>
- Rusirawan, D., & Farkas, I. (2014). Identification of model parameters of the photovoltaic solar cells. *Energy Procedia*, 57, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.006>
- Sachenko, A. V., Kostilyov, V. P., Gerasymenko, M. V., Korkishko, R. M., Kulish, N. R., Slipchenko, M. I., Sokolovskyi, I. O., & Chernenko, V. V. (2015). *Silicon solar cells efficiency analysis. Doping type and level optimization*. <https://arxiv.org/abs/1506.03132v1>
- Sarkar, Md. N. I. (2016a). Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40807-016-0035-3>
- Sarkar, Md. N. I. (2016b). Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40807-016-0035-3>
- Shi, D., Guo, Z., & Bedford, N. (2015). *Nanoenergy materials*. In: *Nanomaterials and Devices* (G. Z. B. N. Shi D, Ed.). Oxford: William Andrew Publishing.
- Siddharth, G., Singh, R., & Mukherjee, S. (2020). Modelling and Performance analysis of InGaN/GaN based Multiple Quantum Well solar cells. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2020-June*, 0098-0100. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300422>
- Stuckelberger, M., Biron, R., Wyrsh, N., Haug, F. J., & Ballif, C. (2017). Review: Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, C(76), 1497-1523. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.190>
- Taşçioğlu, A., Taşkin, O., & Vardar, A. (2016). A Power Case Study for Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Bursa City, Turkey. *International Journal of Photoenergy*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7324138>
- Tercan M. B. (2000). *Güneş Pili Karakterizasyon Yöntemleri* [Yüksek Mühendislik]. Fen Bilimleri.
- Tsai, H. L. (2010). Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. *Solar Energy*, 84(7), 1318-1326. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.04.012>
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>

7. ÖZGEÇMİŞ

