



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK HÜCRELERLE ELEKTRİK
ÜRETİMİNDE RADYASYON-ENERJİ
DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

Nur YILDIZ

162108008

Ocak 2019

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK HÜCRELERLE ELEKTRİK
ÜRETİMİNDE RADYASYON-ENERJİ
DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nur YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hande KARADENİZ

Ocak 2019

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK HÜCRELERLE ELEKTRİK
ÜRETİMİNDE RADYASYON-ENERJİ
DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nur YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 18/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İlker TÜRK GAKIR Prof. Dr. Ahmet BOCKURT Dr. Öğr. Üyesi
Jüri Başkanı Üye Üye
Houde KARADENİZ

Doç. Dr. Bahadır KOZ

Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Nur YILDIZ

18 /01 /2019

TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup bana yardımcı olan ve tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sırasında değerli bilgilerini paylaşan bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan danışman hoca statüsünü hakkıyla yerine getiren Dr. Öğr. Üyesi Hande KARADENİZ’e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Deneyleşimin yapılması sırasında bana yardımcı olan bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan kıymetli hocam Prof. Dr. Serdar KARADENİZ’e şükranlarımı sunuyorum.

Bu tez çalışmasında bilgi ve birikimlerinden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. İlkay TÜRK ÇAKIR’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ali DEMİRCİ ve Mikail YAĞIZ’a teşekkürler ederim.

Her zaman yanımda olan ve beni her konu da destekleyen annem Ayşe YILDIZ’a ve nişanlım Mehmet Kağan ASLANTAŞ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Yarıiletkenler.....	4
2.1.1. Yarıiletkenlerde Katkılama	8
2.1.2. PN Eklemler ve Çalışma Prensibi	9
2.2. Güneş Hücresi Tanımı	11
2.3. Güneş Pillerinin Sınıflandırılması.....	12
2.3.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri	12
2.3.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri	15
2.3.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri.....	15
2.4. Silisyum Güneş Hücresinin Yapımı ve Çalışma Prensibi.....	16
2.5. Güneş Pili Eşdeğer Devresi.....	20

2.6. Fotovoltaik Hücre Parametreleri	21
2.7. Radyasyonun Madde İle Etkileşimi	24
2.8. Gama Radyasyonunun Maddeyle Etkileşmesi.....	25
2.8.1. Fotoelektrik Etki	26
2.8.2. Compton Olayı (Elektron-Foton Saçılması)	27
2.8.3. Elektron-Pozitron Çift Oluşumu	30
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Sciencetech / (SL-60A-WS) Solar Simülatör Cihazı.....	31
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	34
 BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
 KAYNAKLAR	48
 ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	Alfa parçacığı
a-Si	Amorf Silisyum
c	Işık hızı
Co-60	Kütle numarası 60 olan Kobalt
e^-	Elektron
e^+	Pozitron
eV	Elektonvolt
FF	Doluluk faktörü
γ	Gama ışını
Ge	Germanyum
Gy	Gray
h	Planck sabiti
I	Akım
I_{max}	Maksimum akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
N	Nötron
P_{in}	Gelen ışığın güç yoğunluğu
P_{max}	Maksimum güç

Se	Selenyum
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyumdioksit
V	Gerilim
V_{max}	Maksimum gerilim
V_{oc}	Açık devre gerilimi
λ	Dalga boyu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için enerji band aralıkları	6
Şekil 2.2. Germanyum (Ge) atomu	7
Şekil 2.3. Silisyum (Si) atomu	7
Şekil 2.4. N-tipi katkılama.	8
Şekil 2.5. P-tipi katkılama.	9
Şekil 2.6. PN eklemi.	10
Şekil 2.7. PN eklemdedeşikler ve elektronlar.	10
Şekil 2.8. PN ekleminde elektrik alan oluşumu.	11
Şekil 2.9. Tek ya da çok kristal Silisyum hücresinin üretimi	14
Şekil 2.10. NREL (National Renewable Energy Labrotory) 2010 yılı verilerine göre kristal Silikon hücrelerinin verimleri	14
Şekil 2.11. Güneş hücrelerinin verim grafikleri	16
Şekil 2.12. Saf Silisyuma Bor katkılanması.....	17
Şekil 2.13. Eriyen ve Bor ile karışan Silisyum görüntüsü	18
Şekil 2.14. Blokların kesilmesi	18
Şekil 2.15. Basit güneş hücre yapısı	19
Şekil 2.16. Güneş pili çalışma prensibi	20
Şekil 2.17. Güneş pili eşdeğer devresi	21
Şekil 2.18. Fotovoltaik hücre dönüşüm verimi.	23
Şekil 2.19. Üç γ – ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu bölgeler	25
Şekil 2.20. Fotoelektrik etki şeması.	26
Şekil 2.21. Foton elektron saçılması.	27
Şekil 2.22. Çift oluşumu ve çift yok oluşu.....	30
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan solar simülatör cihazı.....	32
Şekil 3.2. Solar simülatör cihazının dokunmatik kontrol ekranı.....	32

Şekil 3.3. (a) Solar simülatör deney düzeneği, (b) aydınlık ölçümü ve (c) karanlık ölçümü.....	33
Şekil 4.1. Fotovoltaik hücrenin radyasyon öncesi aydınlık akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) ve doluluk oranı eğrisi.....	34
Şekil 4.2. 10 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) ve doluluk oranı eğrisi.....	35
Şekil 4.3. 30 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) ve doluluk oranı eğrisi.....	36
Şekil 4.4. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim eğrileri: Radyasyon öncesi (kırmızı), 10 kGy (siyah) ve 30 kGy (mavi).....	36
Şekil 4.5. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortamda güç-gerilim (P-V) eğrileri.....	38
Şekil 4.6. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam güç-doz eğrileri.....	39
Şekil 4.7. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam açık devre gerilimi-doz değişimi.....	40
Şekil 4.8. Fotovoltaik hücrenin kısa devre akım yoğunluğunun doza bağlı değişimi.....	41
Şekil 4.9. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortamda doluluk faktörü (FF)-doz arasındaki değişimi.....	42
Şekil 4.10. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam verim-doz değişimi.....	43

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Güneş hücresi çeşitleri	12
Tablo 4.1. İyonize edici foton uygulanmamış (0 kGy) Silisyum hücresinden elde edilen sonuçlar.	43
Tablo 4.2. İyonize edici foton uygulanmış (10 kGy) Silisyum hücresinden elde edilen sonuçlar.	44
Tablo 4.3. İyonize edici foton uygulanmış (30 kGy) Silisyum hücresinden elde edilen sonuçlar.	44

FOTOVOLTAİK HÜCRELERLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE RADYASYON-ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında Co-60 radyoizotop kullanılarak gama ışınlarına maruz bırakılan fotovoltaiik hücrenin elektriksel karakteristikleri incelenmiştir. Gama radyasyonunun polikristal Silisyum hücresinin elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu tez çalışmasının amacı radyasyona maruz bırakılan polikristal Silisyum hücresinin verimindeki değişiklikleri incelemektir. Başlangıçta ışınlanmamış (0 kGy) olan Silisyum hücresinin karanlık ve aydınlık ortamlarda ölçülen akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) karakteristiklerinden maksimum güç (P_{max}), doluluk faktörü (FF), kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), güç dönüşüm verimliliği(η) hesaplanmıştır. Daha sonra sırasıyla 10 kGy ve 30 kGy ışınlamalar için karanlık ve aydınlık ortamlarda elde edilen sonuçlarla aynı parametreler hesaplanmış ve ışınlanmadan önce ve sonraki durumlar için birbirleriyle kıyaslamalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaiik hücre, gama ışını, elektriksel karakteristikler

INVESTIGATION OF RADIATION-ENERGY TRANSFORMATION IN ELECTRICITY GENERATION BY FOTOVOLTAIC CELLS

SUMMARY

In this thesis, the electrical characteristics of the photovoltaic cell exposed to gamma rays by using Co-60 radioisotope were studied. The effects of gamma radiation on the electrical characteristics of the polycrystalline silicon cell were investigated in detail. The aim of this thesis is to investigate the changes in the efficiency of polycrystalline silicon cells exposed to radiation. Initially non-irradiated (0 kGy) silicon cell in dark and light conditions measured current-voltage (I-V), power-voltage (P-V) characteristics of the maximum power (P_{max}) filling factor (FF), short-circuit current (I_{sc}) open circuit voltage (V_{oc}), power conversion efficiency (η) were calculated. Then, for the 10 kGy and 30 kGy irradiations, the same parameters were calculated with the values measured in the dark and light environments and compared with each other for the situations before and after the irradiation.

Keywords: Photovoltaic cell, gamma ray, electrical characteristics

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi enerji kaynaklarına olan ihtiyacı da beraberinde getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisinin önemi her geçen gün artmaktadır. Güneş pillerinin elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik çalışmalar 1954’lerde başlamıştır. Ülkemizde de güneş hücresi veya güneş pilleri olarak adlandırılan fotovoltaiik hücreler güneş enerjisinden elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Bu kapsamda günümüzde, silikon güneş pilleri ile ilgili yoğun araştırma, geliştirme ve ticari alanlardaki çalışmalar fotovoltaiik hücrelerin önemini göstermektedir. Farklı olarak yapılan, biriktirme veya kristal büyüme süreç seçimi ve imalat teknikleriyle çok çeşitli silikon fotovoltaiik yapılar karşımıza çıkmaktadır. Güneş pillerinde; monokristal, çoklu kristal, mikrokristal, amorf ve gözenekli gibi çeşitli silikon türleri kullanılır. Silisyum elementi fotovoltaiik hücrelerin ana malzemesidir ve üzerine gelen güneş fotonlarını direkt elektrik enerjisine çevirme gibi çok önemli özelliğe sahiptir. Bu tez çalışmasında çoklu kristal silikon kullanılmıştır.

Becquerel 1839 yılında elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaiik olayını bulmuştur [1]. Fotovoltaiik etki, farklı iki malzemenin ara bölgesinin foton radyasyonu ile aydınlatılması sonucu bu iki malzeme arasında oluşan elektriksel potansiyeldir. Fotovoltaiik hücreler yarıiletken malzemelerden meydana gelir ve güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. Güneş hücrelerinin performansını karşılaştırmak için kullanılan en genel parametre verimliliğidir. 1914 yılında yapılan çalışmalarla fotovoltaiik hücrelerin verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda ilk kez 1954 yılında güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren silikon kristalli fotovoltaiik hücrelerde %6 verimlilik gerçekleştirilmiştir [2].

Tüm yarıiletken devre elemanları gibi güneş pilleri de iyonize radyasyona duyarlıdır. Uygulanan radyasyon dozuna bağlı olarak fotovoltaiik hücrelerin verimlerindeki değişim olumlu ya da olumsuz olarak gözlenebilmektedir. Khuram ve arkadaşları 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada Co-60 radyoizotopu kullanarak gama radyasyonunun, monokristal Silisyum hücresinin elektriksel özelliklerine etkisini incelemiştir [3]. Bu çalışmalarında akım-gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) grafiklerine bakarak monokristal Silisyum hücresinin elektriksel özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Khuram ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalar neticesinde radyasyona maruz kalan monokristal Silisyum hücresinin açık devre gerilimi, kısa devre akımı, doluluk faktörü (FF) ve verim değerlerinde azalma meydana geldiğini gözlemlemiştir.

Tobnaghi ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış oldukları çalışmalarında gama ışınının monokristal Silisyum güneş hücrelerinin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir [4]. Bu çalışmalarında monokristal Silisyum hücreleri Co-60 radyoizotopu kullanarak gama ışınına maruz bırakılmıştır. Standart şartlar altında (1000 W/m^2 , AM 1.5, 25°C) yaptıkları bu çalışmalarında monokristal Silisyum hücresine 1 kGy, 5 kGy, 10 kGy ve 20 kGy gama ışını uygulamışlardır. Daha sonra Silisyum hücresinin radyasyon öncesi ve sonrası elektriksel özelliklerini incelemiştir. Tobnaghi ve arkadaşları bu çalışmalarında, Silisyum hücresinin elektriksel özelliklerinin radyasyon dozu arttıkça azaldığını gözlemlemişler, açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum akım (I_{max}), maksimum gerilim (V_{max}) ve verim (η) parametreleri sürekli azalırken doluluk faktörünün, 5 kGy radyasyondan sonra arttığını gözlemlemiştir.

Bu tez çalışmasında, iyonize edici fotonlara maruz bırakılan Silisyum fotovoltaiik hücrelerin radyasyon sonrası elektriksel parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Bunun için hücreler 10 kGy ve 30 kGy dozlarda ışınlanmış olup, oda sıcaklığında aydınlık akım-gerilim ve güç gerilim karakteristikleri elde edilmiştir. Bu eğriler yardımıyla yapıların radyasyon öncesi ve sonrası güneş pili parametreleri tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımıyla iyonize edici fotonların güneş pili hücresinin temel parametreleri üzerinde nasıl bir etkisi olduğu araştırılmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda monokristal ve ince filmler üzerine gama ışını uygulanmış olup hücrelerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Bu tez çalışmasında ise gama ışınının polikristal Silisyum hücre performansı üzerindeki etkileri incelenmiş olup literatüre bu yönden katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yarıiletkenler

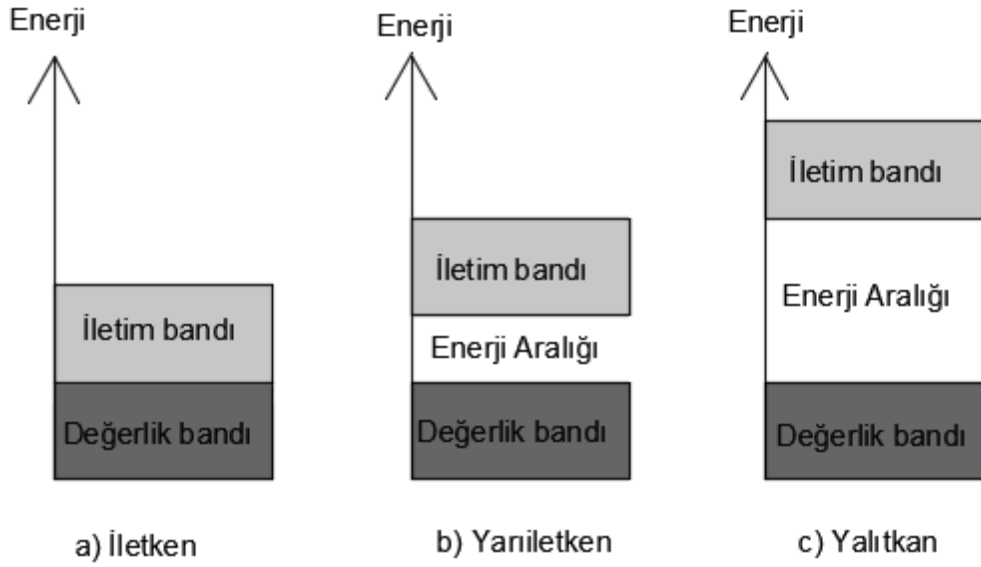
Yarıiletken maddeler iletkenlik bakımından iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer almaktadır. Maddelerin iletkenliğini atomlarının son yörüngesindeki elektron sayıları belirlemektedir ve son yörüngedeki elektronlar valans elektronları olarak adlandırılır [5]. Elektrik akımını ileten maddelerin valans elektron sayıları 4'ten küçüktür ve iletken maddeler olarak adlandırılır [6]. İletken maddelerin son yörüngelerindeki valans elektron sayıları 1, 2 ve 3 olabilir. Yalıtkan maddeler ısıyı ve elektriği iletmezler bunun nedeni ise elektron almaya ve vermeye yatkın olmamalarıdır. Yalıtkan maddeler son yörüngelerinde 5, 6, 7 ya da 8 elektron bulundurabilir. Normal şartlarda yalıtkan özelliğine sahip yarıiletken maddelerin son yörüngelerindeki elektron sayısı ise 4'tür. Yarıiletken maddelere dışarıdan elektriksel (gerilim, akım) veya fiziksel etki (ışık, basınç, sıcaklık) uygulandığında son yörüngede bulunan elektronlar serbest duruma geçer. Yani yarıiletken maddenin iletkenlik özelliği aktif duruma gelir. Fiziksel veya elektriksel etki kalktığında ise tekrar yalıtkanlık özelliğine dönerler. İletken, yalıtkan ve yarıiletken maddelerin enerji aralıkları birbiri ile kıyaslandığında yarıiletken maddelerin enerji band aralığı yalıtkan maddelere göre daha küçük, iletken maddelere göre daha büyüktür [5].

Elektronik cihazların yapımında yarıiletken maddeler kullanılır. Yarıiletken maddelerin tercih edilmelerinin nedeni üzerinden geçen akımın kontrol edilebilir olmasıdır. İletken maddelerin üzerinden geçen akım kontrol edilemez. Yarıiletken maddeler kristal yapıya sahip olduğundan kristal yapı analizlerinde de kullanılmaktadır [7]. Yarıiletkenler bileşik veya element halinde bulunabilir. Bileşik yarıiletkenlere Galyum Arsenik (GaAs), Kurşun Sülfür (PbS), Bakır İndiyum

Diselenid (CuInSe_2) örnek verilebilir. Elementlere ise Silikon (Si), Germanyum (Ge) ve Selenyum (Se) örnek olarak verilebilir. Fotovoltaik hücre, transistor, diyot üretiminde en çok Germanyum ve Silisyum elementleri tercih edilmektedir. Katıların Band Teorisi, yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerini büyük bir başarı ile açıklar. Yarıiletken katılarda elektronlarla dolu banda **değerlik bandı** ve onun üstündeki boş banda **iletim bandı** denir. Yarıiletken maddelerde bu iki band enerji bandı ile birbirinden ayrılmaktadır [8].

Enerji bantları iletkenlerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların sınıflandırılmasında önemlidir. Şekil 2.1. (a)'da iletkenler için değerlik bandı ile iletim bandının üst üste olduğu görülmektedir. Değerlik bandında bulunan elektronlar iletim bandına çok az enerjiyle geçebilirler. Bundan dolayı iletkenler elektrik akımını kolaylıkla iletirler. Şekil 2.1. (b)'de yarıiletkenler için değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında bir enerji aralığı bulunmaktadır [9]. Değerlik bandı içerisinde bulunan elektronlar dışarıdan bir etki uygulandığında iletim bandına geçebilirler. Dış etki uygulanmadan önce yalıtkan olan madde dış etki uygulandığında iletken özelliği kazanmaktadır. Yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı genellikle 2 eV'dan küçük olduğundan dolayı oda sıcaklığında uyarılan elektronların sayısı yeterli düzeye çıkmakta ve cisim yarıiletken olmaktadır [8].

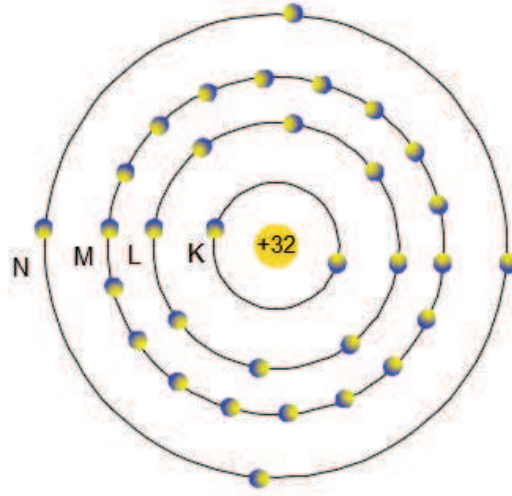
Şekil 2.1. (c)'de ise değerlik bandıyla iletim bandı arasındaki enerji bant aralığı yarıiletkene göre daha fazladır. Değerlik bandında bulunan elektrona yeteri kadar enerji verilmezse elektron iletim bandına geçemez. Bu durumda elektriksel iletim sağlanamayacağından malzeme yalıtkan olarak davranmaktadır.



Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için enerji band aralıkları

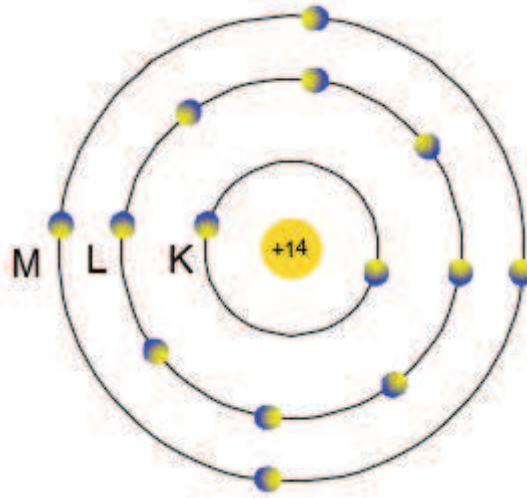
Güneş hücrelerinde Germanyum ve saf Silisyum en çok tercih edilen elementlerdir. Silisyum ve Germanyum elementlerinin son yörüngelerinde 4'er elektronları vardır. Fakat toplam elektron sayılarına bakıldığında Silisyumun 14, Germanyumun ise 32 elektronu bulunur. Elektron sayısı az olan malzeme, atomun çekim kuvvetinden daha fazla etkilenir. Elektron sayısı fazla olan malzeme ise çekim kuvvetinden daha az etkileneceğinden dolayı küçük bir etki ile iletken olabilir [9].

Şekil 2.2.'de Germanyum (Ge) atomunun içten dışa doğru olan yörüngelerinde 2, 8, 18 ve son yörüngesinde 4 olmak üzere 32 elektrona sahip olduğu görülmektedir. Yarıiletkenler son yörüngelerinde bulunan elektronları 8'e tamamlama eğilimindedirler. Başka atomlarla kovalent bağ yaparak kararlı duruma geçmek isterler.



Şekil 2.2. Germanyum (Ge) atomu

4A grubu elementi olan Silisyumun doğada kum veya kuartz şeklinde bol miktarda bulunması ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olması nedeniyle kullanılan yarıiletkenlerin başında gelir. Şekil 2.3.'de gösterilen Si atomunun yörüngelerinde içten dışa doğru 2, 8 ve son yörüngesinde 4 elektron bulunmaktadır.

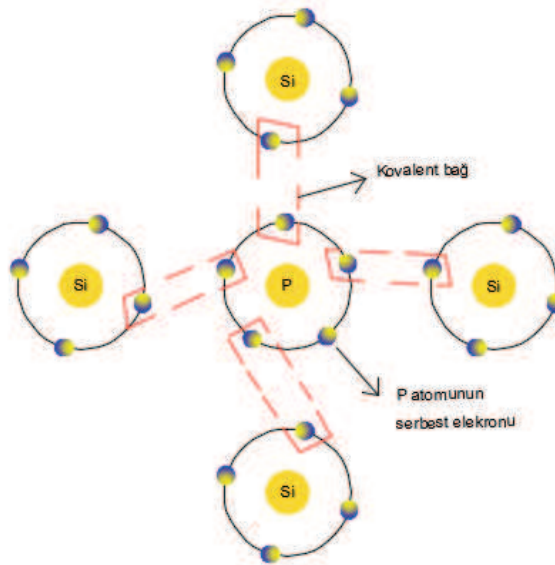


Şekil 2.3. Silisyum (Si) atomu

2.1.1. Yarıiletkenlerde Katkılama

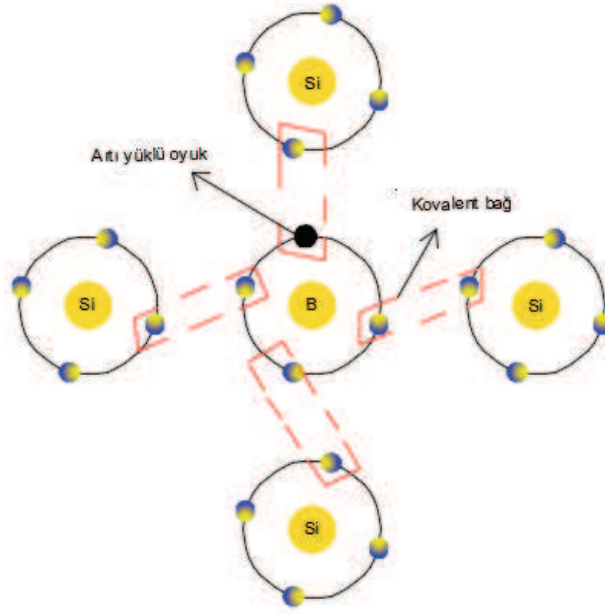
Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) elementlerinin iletkenliği kontrollü olarak artırılabilir. İletkenliği kontrollü olarak arttırmak için saf yarıiletkenlere katkı maddesi eklenir bu işleme “**doping**” denir [10].

Saf bir yarıiletken malzemeye, periyodik tablonun V. sütununda bulunan elementlerden biri katkılanırsa **N-tipi yarıiletken** oluşmaktadır. Saf Silikon veya Germanyumun iletkenlik bandındaki elektronları artırmak için son yörüngesinde 5 elektron bulunan maddeler katkılanır. Bu katkılamaya **N-tipi katkılama** adı verilir [11]. N-tipi katkı olarak kullanılan atomlar Fosfor (P), Bizmut (Bi) veya Arsenik (As)’tir. Şekil 2.4.’de Silisyum atomuna Fosfor atomu katkılanmış ve kovalent bağ yapıları gösterilmiştir. Silisyum elementinin son yörüngesinde bulunan 4 elektron ile Fosfor atomunun son yörüngesinde bulunan 4 elektronu kovalent bağ yapmaktadır ancak Fosfor katkı maddesinin son yörüngesinde 5 elektron vardır ve Silisyum atomuyla kovalent bağ yaparken 1 elektronu açıkta kalır ve bağ yapacak Silisyum elektronu bulamaz. Elektron bulamadığı için açıkta kalan Fosfor atomunun 1 elektronu iletkenliği artırır ve bu N-tipi katkılamada elektron fazlalığı vardır. Elektron çoğalmasına neden olan bu katkı maddelerine **verici (donör)** adı verilmektedir [6].



Şekil 2.4. N-tipi katkılama.

Saf bir yarıiletken malzemeye, periyodik tablonun III. sütununda bulunan elementlerden biri katkılanırsa **P-tipi yarıiletken** oluşmaktadır [11]. Şekil 2.5.'te gösterilen P-tipi katkılama işleminde Silisyum atomuna Bor elementi katkılanmış ve kovalent bağ yapıları gösterilmiştir. Silisyum atomunun son yörüngesindeki 4 elektronu Bor atomunun son yörüngesinde bulunan 3 elektronu ile bağ yapar ve bu katkılama işleminde Silisyum ve Bor atomlarının 3'er elektronları arasında kovalent bağ oluşur [6]. Silisyum elementinin son yörüngesinde bulunan 1 elektron ise Bor atomunun kovalent bağ yapacak elektronu kalmadığından dolayı açıkta kalır. Şekil 2.5.'te Silisyum atomunda gösterilen siyah daire boşluğu ifade eder [12]. Bu boşluk katkılamalar da deşik olarak da adlandırılmaktadır ve bu deşik elektron çekmeye çalışır. P-tipi yarıiletken katkılar **alıcı (akseptör)** olarak adlandırılır [13].

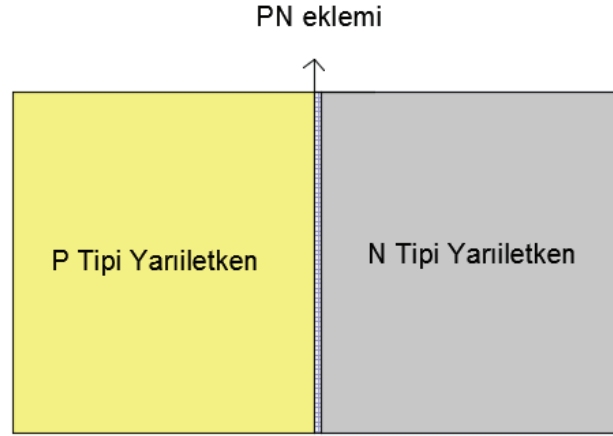


Şekil 2.5. P-tipi katkılama.

2.1.2. PN Eklemler ve Çalışma Prensibi

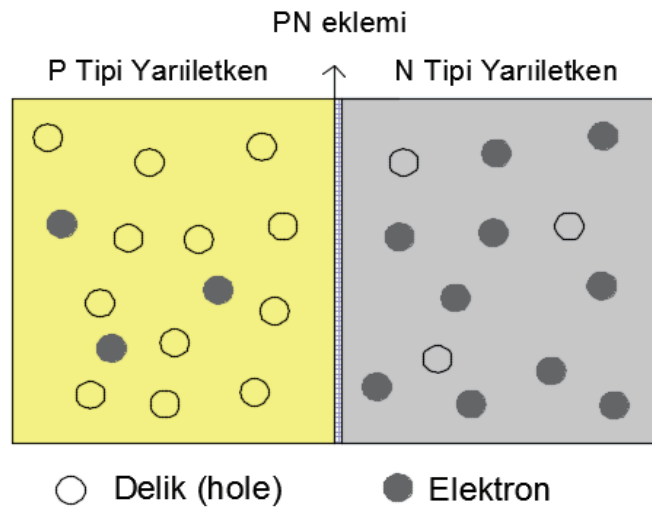
Elektronik devrelerin temelini oluşturan PN eklemler P ve N yarıiletkenlerin bir araya gelmesiyle oluşur. PN birleşmesiyle elektrik akımını tek yönde ileten diyotlar oluşmaktadır. Diyot oluşturmak için P tipi yarıiletkenle N tipi yarıiletken birleştirilir. Bu birleştirmede bir yük akışı meydana gelir. P ve N tipi yarıiletkenlerin birleştiği

noktaya **PN eklem** veya **temas yüzeyi** denir [12]. Şekil 2.6.'da PN eklemi gösterilmiştir.



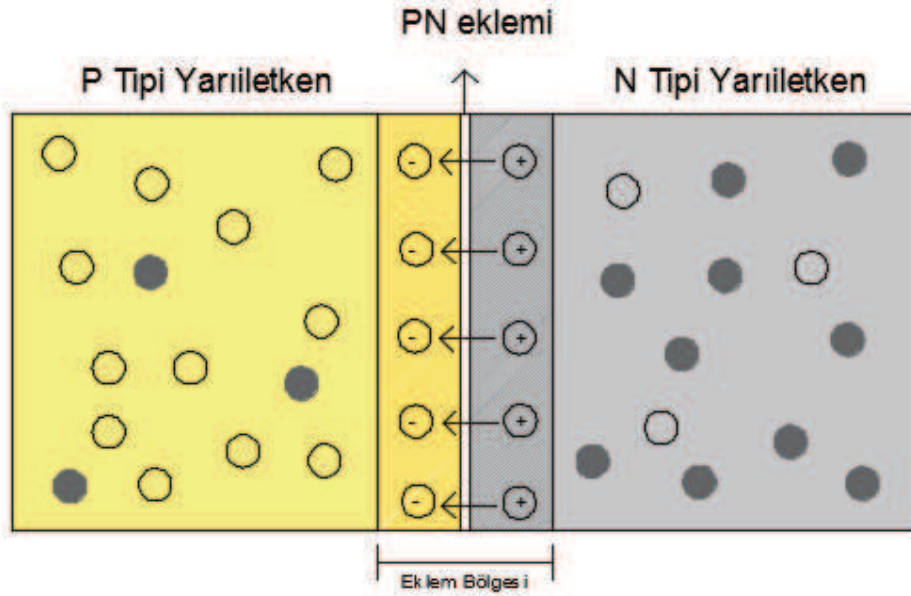
Şekil 2.6. PN eklemi.

P-tipi yarıiletken maddelerde deşikler diğér bir ifadeyle oyukların fazlalığı bulunmaktadır. Bu nedenle P-tipi yarıiletkenlerde azınlık taşıyıcılar elektronlar olup, çoğunluk taşıyıcılar deşiklerdir. N-tipi yarıiletken maddelerde ise elektronların fazla olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle N-tipi yarıiletken maddede azınlık taşıyıcı deşikler, çoğunluk taşıyıcı ise elektronlardır [14]. Şekil 2.7.'de deşikler ve elektronlar gösterilmektedir.



Şekil 2.7. PN eklemde deşikler ve elektronlar.

P-tipi yarıiletken maddede fazla bulunan deşikler, N-tipi yarıiletken maddede deşiklerin az olması sebebiyle N-tipi yarıiletken maddeye doğru hareket ederler. N bölgesinde fazla bulunan elektronlar ise P bölgesine doğru hareket eder. N bölgesine giren deşikler eklem bölgesi yakınında bulunan elektronlar ile birleşir. P bölgesine giren elektronlar ise eklem bölgesi yakınındaki deşikler ile birleşirler. Bu olaya **difüzyon** adı verilmektedir [15]. Difüzyon çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama geçiş anlamına gelmektedir. Şekil 2.8.'de görüldüğü gibi Eklem bölgesinin P kısmı negatif N kısmı ise pozitif yükle yüklenir. Bu hareketlenme termodinamik denge kuruluncaya kadar devam eder [7].



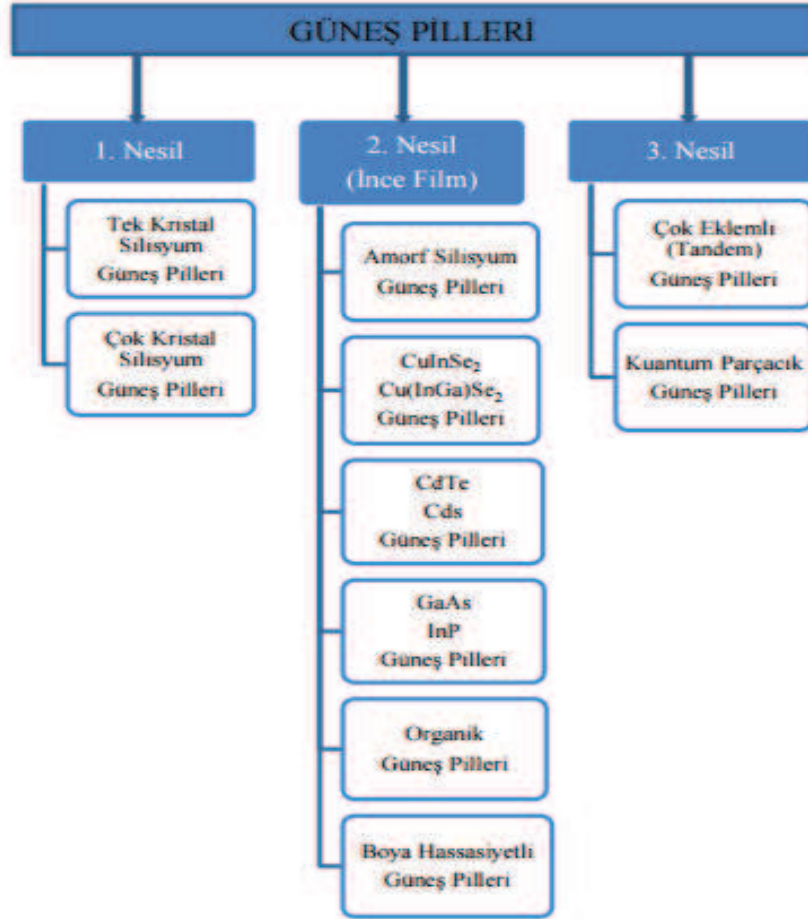
Şekil 2.8. PN eklemine elektrik alan oluşumu.

2.2. Güneş Hücresi Tanımı

Güneşten gelen fotonları elektrik enerjisine çeviren güneş pilleri fotovoltaik çalışma ilkesine göre hareket eden yarıiletken aygıtlardır. Üzerlerine gelen güneş ışınları nedeniyle uçları arasında voltaj farkı meydana gelmektedir. İlk güneş hücresi Selenyum (Se) ve Bakır Oksit (Cu_2O) kullanılarak yapılmıştır [16].

2.3. Güneş Pillerinin Sınıflandırılması

Güneş pilleri günümüzde 3 nesil olarak incelenmektedir. Tablo 2.1.'de güneş pillerinin çeşitleri verilmiştir.



Tablo 2.1. Güneş hücresi çeşitleri

2.3.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri

Birinci nesil güneş pilleri yapımında en fazla kullanılan malzemeler Silisyum ve Galyum Arsenik (GaAs)'tir [17]. Silisyumun dayanıklı kristal yapıya sahip olması elektriksel ve optik özelliklerinin kalıcı olmasını sağlamıştır [16]. Silisyum kökenli güneş pillerinin verimi laboratuvar ortamında %26-%30 civarındadır. Silisyum elementi doğa da SiO₂ (Silisyumdioksit) şeklinde bulunmaktadır [18]. Saf Silisyum elde etmek için yapılan çalışmalar maliyetlidir. Bu nedenle bu hücrelerin verimleri

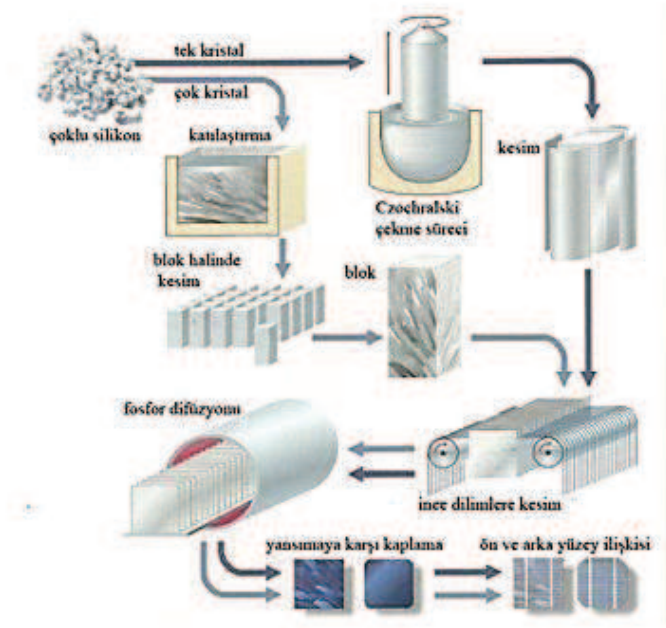
yüksek olmasına rağmen ekonomik dezavantajından dolayı başka hücre arayışları ortaya çıkmıştır. Birinci nesil güneş pillerine monokristal Silisyum güneş pilleri ve polikristal Silisyum güneş pilleri örnek verilebilir. Şekil 2.10.'da kristal Silisyum hücrelerin verim kıyaslamaları verilmiştir.

Birinci nesil güneş pillerinin başında yer alan monokristal Silisyum hücresi güneş hücresi üretiminde en pahalı ve en eski yöntemdir. Bu hücre koyu mavi renktedir. Kalınlıkları genellikle 0,5 mm civarında ağırlıkları ise 10 g'dır. Bu hücrenin verimi yüksek olmasına rağmen saf Silisyum üretim aşaması maliyetlidir ve %15 civarında verimleri vardır.

Khuram ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında birinci nesil güneş hücreleri içerisinde olan monokristal Silisyum hücresini incelemişlerdir. Co-60 radyoizotopu kullanarak gama radyasyonunun, monokristal Silisyum hücresinin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir [3].

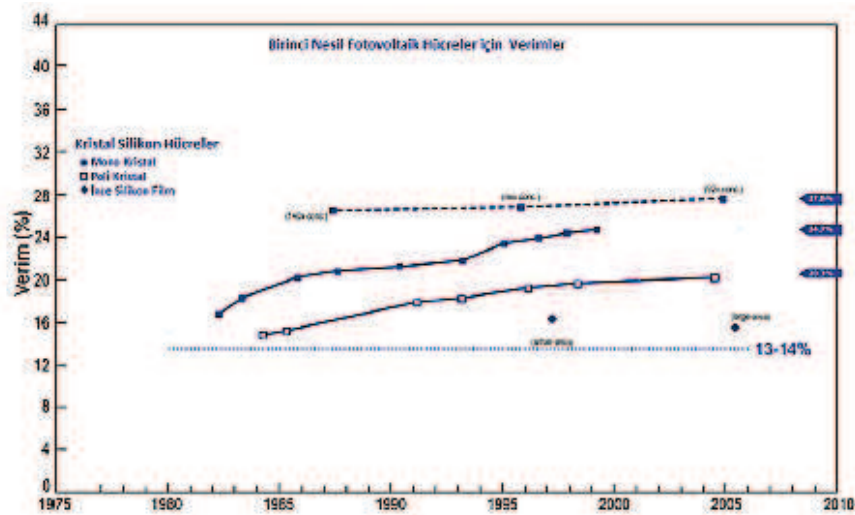
Tobnaghi ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmalarında monokristal Silisyum hücresini kullanmışlardır. Monokristal Silisyum hücresini Co-60 radyoizotopu kullanarak gama ışınlarına maruz bırakmakta olup bu hücrenin radyasyon öncesi ve sonrası elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. [4].

Polikristal Silisyum güneş pilleri verimleri (laboratuvar ortamında %18-%20) monokristal Silisyum hücrelerinden daha düşük olmasına rağmen üretim maliyeti monokristal hücrelere göre daha azdır. Bu hücrelerin renkleri mavi veya grimsi olabilir. Kristaller homojen olmayan kısımlarında görülebilir. Şekil 2.9.'da monokristal ve polikristal Silisyum hücrelerinin üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Tek ya da çok kristal Silisyum hücresinin üretimi [19].

Şekil 2.10.'da birinci nesil fotovoltaiik hücrelerin verimleri gösterilmiştir. NREL (National Renewable Energy Labrotory) 2010 yılı verilerine göre kristal silisyum hücreleri içinde yer alan ve bu tez çalışmasında kullanılan polikristal Silisyum hücresinin verimi ikinci sırada yer almaktadır.



Şekil 2.10. NREL (National Renewable Energy Labrotory) 2010 yılı verilerine göre kristal Silikon hücrelerinin verimleri [20].

2.3.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri

Güneş hücrelerinin kullanımının artması nedeniyle hücre yapımında kullanılan yarıiletkenlere olan ihtiyaç da doğru orantılı şekilde artma göstermiştir. Birinci nesil güneş hücreleri yerine farklı güneş hücreleri arayışına girilmiş ve ince film teknolojisi keşfedilmiştir. İkinci nesil güneş pillerinin verimi birinci nesil güneş pillerine göre düşük olmasına rağmen maliyetlerinin düşük olması avantajı olmuştur. İkinci nesil güneş pillerinde kullanılan malzeme miktarı da birinci nesil güneş pillerine göre daha azdır [10, 11].

İkinci nesil güneş pilleri, amorf Silisyum güneş Pilleri, CuInSe_2 , Cu(InGa)Se_2 Güneş Pilleri, CdTe , Cds güneş pilleri, GaAs ve InP 'dir. Bunlardan en fazla bilineni (a-Si) amorf Silisyumdur [17].

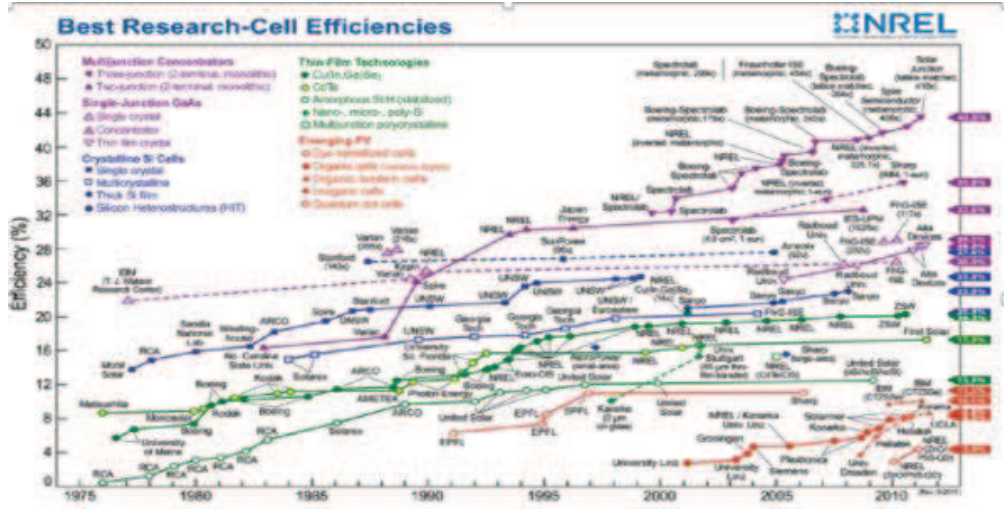
2.3.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

Üçüncü nesil güneş hücrelerinin birinci ve ikinci nesil güneş hücrelerine göre en önemli farkı P-N eklemi içermemesidir. Katkılama olmamasından dolayı kullanılan malzemenin azalması ve hücre veriminin artması beklenmektedir. Üçüncü nesil güneş pillerini araştırma ve geliştirmeler devam etmektedir. Üçüncü nesil güneş pillerine örnek olarak tandem (Çok Eklemlı), kuantum parçacık güneş pilleri verilebilir.

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi (C.Ü) 2011 yılında Türkiye'nin ilk üçüncü nesil güneş pili üretim çalışmalarına başlamıştır. Bu çalışmadaki amaçları ise Silikon tabanlı olarak kullanılan hücrelerinin verimleri %20 civarındayken bu değeri üçüncü nesil güneş pilleriyle %40'a kadar çıkartmak olmuştur [21].

Cumhuriyet Üniversitesi'nin hazırladığı güneş hücresi çeşidi tandem hücredir. Bu hücreyle 3 katmanda 3 farklı enerji elde etmek amaçlanmıştır. Birinci nesil güneş hücrelerinde tek bir dalga boyunda gelen fotondan elektrik enerjisi üretilirken tandem de farklı dalga boylarındaki foton üç ayrı bölgede elektrik enerjisine çevrilmektedir [22].

Şekil 2.11.'de 1976-2010 yılları arasında NREL tarafından yapılan çalışmalar doğrultusunda birinci nesil güneş hücreleri, ikinci nesil güneş hücreleri ve üçüncü nesil güneş hücrelerinin verim değerleri tek bir grafikte gösterilmiştir. Geçmişten bugüne üretilen değişik tip güneş pillerinin, yıllar içinde verimlerindeki gelişmeler güneş pillerinin türlerine göre verilmiştir.



Şekil 2.11. Güneş hücrelerinin verim grafikleri [20].

2.4. Silisyum Güneş Hücresinin Yapımı ve Çalışma Prensibi

Yarıiletkenlerde en çok kullanılan madde Silisyum'dur. Silisyum doğada saf halde bulunmamaktadır. Doğada Silisyum en çok kumda bulunur. Kum SiO_2 formundadır yani Silisyum ve Oksijenden oluşmaktadır. Yarıiletkenlerde saf Silisyum kullanıldığından Oksijenden ayrışması gerekmektedir.

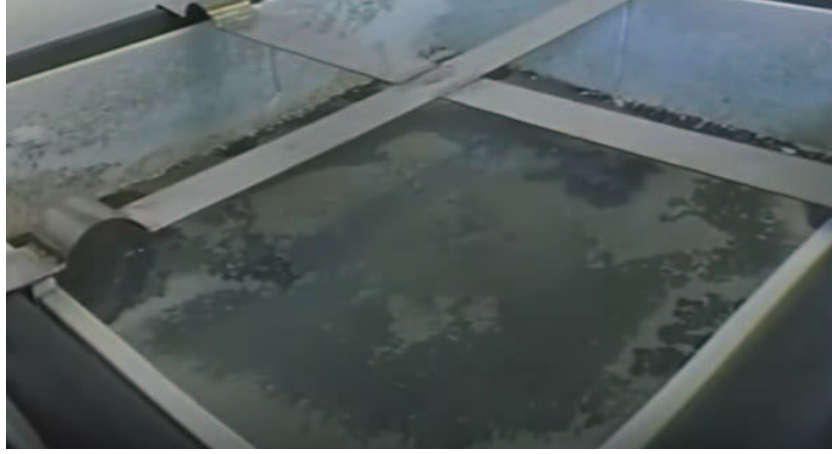
Kuvars (kumsaldaki kum), odun kömürü (mangal kömürü) ile karıştırılır. Bu karışım elektrik ark ocağın da 1800-1900 derecede yakılarak kumun içerisindeki Oksijen yanma sırasında kullanılmış olunur. Kuvars Oksijenden ayrılır bu işleme **indirgeme (reduction)** adı verilmektedir [23].

Yarıiletken üretiminde Silisyumdaki kirlilik oranı milyarda bir olmalıdır. Bu nedenle oluşturulan saf Silisyumun tamamen temizlenmesi için saf Silisyum ile gaz formunda bulunan hidroklorik asit reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda 31° C’de buharlaşan triklorsilan ve Hidrojen ortaya çıkar. Oluşan triklorsilan ve Hidrojenden saf Silisyum üretilmesi için Siemens işlemi yapılmaktadır. Bu işlem kimyasal buhar çökeltimi metodudur. Kimyasal buhar çökeltimi ile triklorsilan ve Hidrojenden ultra saflıkta Silisyum üretilir [11, 19]. Elektriğin oluşması için saf Silisyuma Bor atomu katkılanır. Bu işleme doping denilmektedir. Şekil 2.12.’de Silisyuma Bor katkılanmaktadır.



Şekil 2.12. Saf Silisyuma Bor katkılanması [23].

Bu iki karışım yüksek ısıda eritilir. Şekil 2.13.’te eriyen ve Bor ile karışan Silisyum gösterilmiştir. Bu erime işleminde su açığa çıkar ve Silisyum blokları oluşur. Oluşturulan Silisyum blokları cam kesitin üzerine yapıştırıcı sürülerek oturtturulur ve bu şekilde makinaya yerleştirilir. Makina blokları ince tabaka haline getirmek amacıyla dizayn edilmiştir. Şekil 2.14.’te Silisyum bloklarının ince tabaka haline getirilmesi işlemi gösterilmektedir.



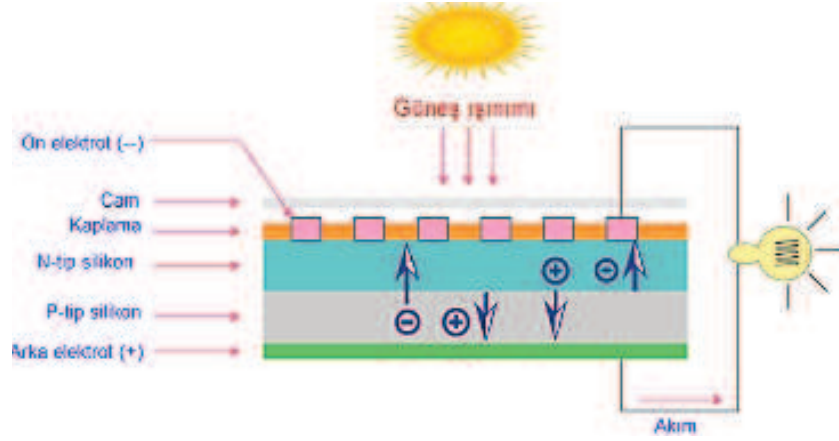
Şekil 2.13. Eriyen ve Bor ile karışan Silisyum görüntüsü [23].



Şekil 2.14. Blokların kesilmesi [23].

İnce tabaka oluşturulduktan sonra ikinci katkılama yapılır bu katkılama Fosfor kullanılır. Fosfor ile katkılanmış ince tabakalar robotlar yardımıyla rafa yerleştirilir. Raflar ince tabakalar ile dolduğunda üzerlerine anti reflektif kaplama yapılması için tekrar makineye yerleştirilir. Bu kaplamanın yapılmasındaki amaç güneş ışınlarının geri yansımalarını önlemek ve tabakaların mümkün olduğu kadar ışık almasını sağlamaktır. Anti-reflektif kaplama nedeniyle hücrelerin üst kısımları mavi görünmektedir. Son aşama bağlantı tellerini yerleştirmektedir.

Şekil 2.15.'te gösterilen basit bir Silisyum güneş pili yapısında ön elektrot, cam, kaplama, N-tipi Silisyum, P-tipi Silisyum ve arka elektrot bulunmaktadır.



Şekil 2.15. Basit güneş hücre yapısı [24].

Soğurucu Kaplama: Bu tabaka güneş hücresi üzerine gelen fotonun yansımısını önleyerek hücrenin verimini artırır.

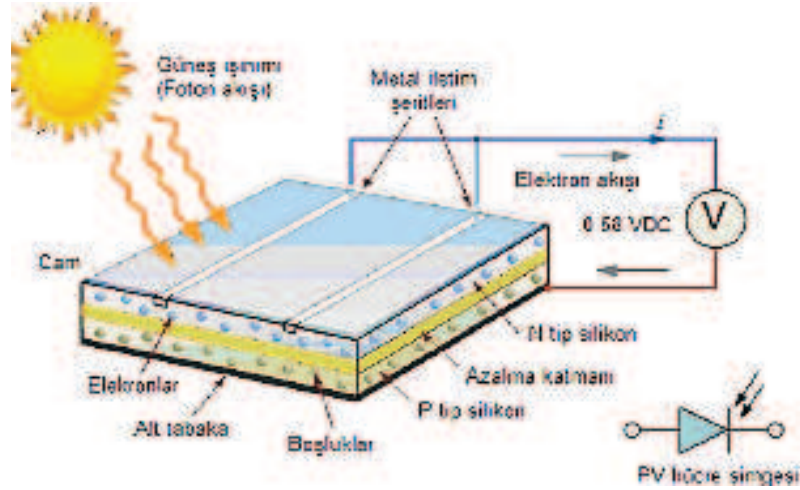
Ön Elektrot: Genellikle bakırdan imal edilen bu kontak pilin üst yüzeyinde oluşan akımı toplamaktadır. Bunlar negatif kontak görevi görmektedir.

N Katmanı: Fosfor atomları eklenmiş Silisyumdan oluşan ve pilin negatif tarafını oluşturan katmandır. Çoğunluk taşıyıcı elektronlardır.

P Katmanı: Bor atomları eklenmiş Silisyumdan oluşmuştur. Hücrenin pozitif tarafıdır. Çoğunluk taşıyıcı deşiklerdir.

Arka Elektrot: Hücrenin arka kısmını kapatır. Güneş hücresini dış etkilere korur ve elektronların giriş yaptığı ve pozitif kontak görevi gören kısımdır [25, 26].

Güneş pillerinin en küçük yapısına hücre denilmektedir. Hücre üzerine düşen ışığın elektrik enerjisine çevrilmesinde Silisyumun etkisi oldukça fazladır. Hücrelerin yapısında bulunan Silisyum yarıiletken özelliğinde olduğundan dolayı son yörüngelerinde 4 elektron bulundurulur. Bu 4 elektron gevşek bağlıdır ve kopmaya meyillidirler. Son yörüngedeki elektronlar üzerlerine ışık düştüğünde hareketlenerek elektrik akımını oluştururlar [27].

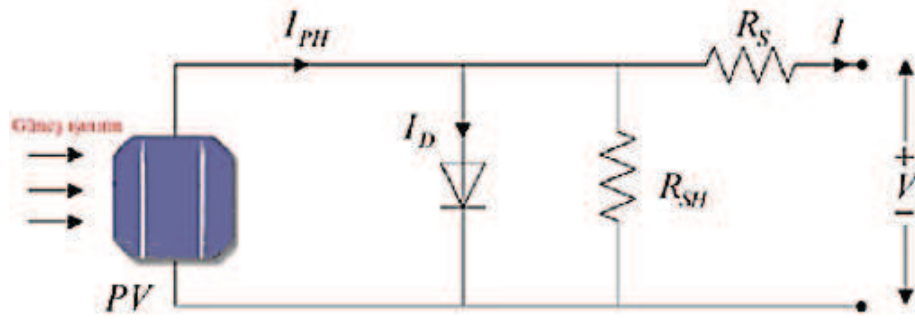


Şekil 2.16. Güneş pili çalışma prensibi [24].

Güneşten gelen ışınların (fotonların) bir kısmı hücrenin yüzeyine çarparak yansırken bir kısmı güneş hücresi tarafından soğurulur bir kısmı ise güneş hücresinin içinden geçebilir. Güneş hücrelerinden verim elde edebilmek için güneşten gelen ışınların güneş hücresi tarafından soğrularak hücrede gerilim ve akım oluşturması gerekir (Şekil 2.16.). Işınlar güneş hücresinin yüzeyine çarparak atomdan elektronların serbest bırakılmasını sağlarlar. Fotonların enerjisi yarıiletkenin değerlik bandında bulunan elektronlara aktarılır bunun sonucunda ise değerlik bandından iletim bandına elektronlar geçerek elektron-deşik çifti meydana gelir. Bunlar P-N eklem bölgesinde bir potansiyel fark meydana getirirler ve elektrik alan sayesinde hızlanıp devre boyunca akım sağlarlar ve DC güç meydana getirirler [28].

2.5. Güneş Pili Eşdeğer Devresi

Güneş pilleri p-n ekleminden oluşan ve p-n eklemi ışığa maruz kalan bir yarıiletken devre elemanıdır [29]. Fotovoltaik hücrelere güneş ışığının yani fotonun çarpması ile hücrede, foto akım ve foto gerilim oluşur [30]. Şekil 2.17.'de fotovoltaik güneş pilinin genel eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.17. Güneş pili eşdeğer devresi [24].

Burada R_s , seri direnç, I_D diyot akımı, R_{SH} paralel (şönt) direnç ve I yük akımıdır. Güneş pilinde oluşan aydınlık elektrik akımı denklem (2.1)'de verilmiştir [31].

$$I = I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - I_{ışık} \quad (2.1)$$

Burada

I_o = Ters doyma akımı,

V = Yapıya uygulanan gerilim,

R_s = Seri direnç,

n = Diyodun ideallik faktörü,

K = Boltzmann sabiti,

T = Mutlak sıcaklık,

$I_{ışık}$ = Işığın yarattığı akımdır.

2.6. Fotovoltaik Hücre Parametreleri

Fotovoltaik hücrenin verimi, I-V (akım-gerilim) eğrisi ile belirlenir. I-V eğrisi hücrenin verim (η), açık devre gerilimi (V_{oc}), doluluk faktörü (FF), kısa devre akımı (I_{sc}) gibi parametreleri belirlemek için çok önemlidir.

Maksimum güç (P_m), hücre tarafından üretilen güç olup birimi Wattır. Fotovoltaik hücrenin maksimum gücünü hesaplamak için hücrenin çıkış gerilimi ile çıkış akımı gereklidir [32]. Maksimum akım ve maksimum gerilim hücrenin P-V (güç-gerilim) eğrisine bakılarak hesaplanabilir.

$$P_m = V_m \times I_m \quad (2.2)$$

$$P_{\max} = \text{Maksimum güç} \quad V_{\max} = \text{Maksimum gerilim} \quad I_{\max} = \text{Maksimum akım}$$

Açık devre gerilimi ve kısa devre akımının olduğu yerde güç sıfırdır. Maksimum güç yine bu iki değer arasında yer alır.

Açık devre gerilimi, bir fotovoltaiik hücrenin açık devre gerilimi olup hücreden geçen akımın sıfır olduğu durumda ölçülen gerilimdir. Devrede $I=0$ durumu kabul edilerek bulunan gerilime **açık devre gerilimi** denir [12].

Açık devre gerilimi;

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \times \ln \left(\frac{I_{sc} + I_o}{I_o} \right) \quad (2.3)$$

ifadesi ile verilir [27, 33].

Burada;

$$\begin{aligned} n &= \text{Diyot faktörü} & k &= \text{Boltzmann sabiti } (1.38 \times 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}) \\ I_{sc} &= \text{Kısa devre akımı (mA)} & q &= \text{Elektron yükü } (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \\ T &= \text{Mutlak sıcaklık (K) ,} & I_o &= \text{Ters sızıntı akımı (mA)} \end{aligned}$$

Kısa devre akımı, aydınlatma altında ve sıfır gerilimde hücreden geçen akımdır [34].

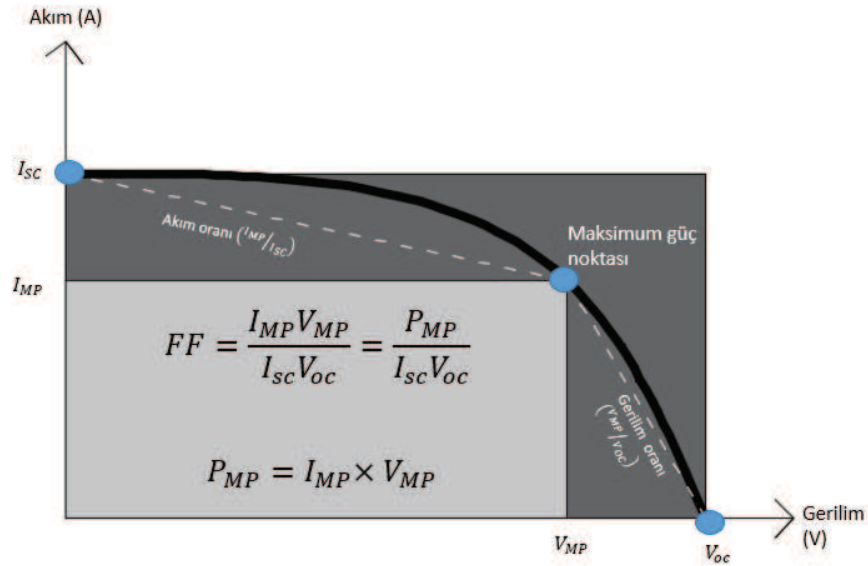
Doluluk faktörü, hücrenin kalitesini ifade eden bir parametre olup,

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir.

$V_{\max}$ = Maksimum gerilim, $I_{\max}$ = Maksimum akım
 V_{oc} = Açık devre gerilimi, I_{sc} = Kısa devre akımı

Doluluk faktörü güneş hücresinin verimini etkilemekte olup, hesaplanmasında maksimum gerilim, maksimum akım, kısa devre akımı ve açık devre gerilim parametrelerine ihtiyaç vardır [27]. Hücrelerin paralel veya seri bağlanması doluluk faktörüne etki etmektedir. İdeal bir güneş hücresinde doluluk faktörü 1'dir [24, 26, 35].



Şekil 2.18. Fotovoltaik hücre dönüşüm verimi.

Güneş hücresinin verim parametresi, güneş hücresinden elde edilen çıkış gücünün ($P_{\max}$), giriş gücüne (P_{in}) oranıdır. Giriş gücü ise hücre üzerine gelen ışık şiddetinin (W/m^2) hücrenin alanına (cm^2) bölünmesiyle elde edilir [33]. Fotovoltaik hücre verimi,

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{\text{Güneş radyasyonu} \times \text{Hücre alanı}} \quad (2.5)$$

veya

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{\text{Güneş radyasyonu} \times \text{Hücre alanı}} \quad (2.6)$$

P_{in} = Giriş gücü,

FF = Dolgu faktörü

V_{oc} = Açık devre gerilimi ,

I_{sc} = Kısa devre akımı

denklemleriyle ifade edilir [36].

2.7. Radyasyonun Madde İle Etkileşimi

Radyasyonun algılanması, ölçülmesi, zırhlanması radyasyon güvenliği ve biyolojik etkilerinin incelenmesi, radyasyonun madde ile etkileşimi konusudur. Maddeyle etkileşen radyasyon malzemede değişikliklere yol açabileceği gibi radyasyonun enerjisinde de değişim olabilmektedir. Radyasyon türleri parçacık tipi radyasyon ve elektromanyetik radyasyonlarda madde etkileşimleri farklıdır. Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimi sahip oldukları elektrik yüklerinden dolayı malzeme elektronları ile yaptıkları coulomb etkileşimi sonucunda meydana gelmektedir. Elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşimi coulomb etkileşimiyle olmamaktadır. Bunun nedeni elektromanyetik dalgaların elektrik yükleri olmamasıdır. Bu sebeple yüksüz olan fotonların ve nötronların madde ile etkileşimi farklı şekilde değerlendirilir [37].

Radyasyonun madde ile etkileşmesinde gelen parçacığın çeşidine ve enerjisine ayrıca girdiği ortamın atom numarasına ve yoğunluğuna bağlı olarak etkileşim mekanizması değişmektedir. Radyasyonun madde ile etkileşiminde elektromanyetik biçimde ve parçacık biçiminde olan radyasyon geçtiği madde de uyarılma ve iyonlaşma oluşturur. Elektromanyetik ışınların kütleleri yoktur. Madde içerisinde ilerleyen elektromanyetik radyasyonlar kütsüz olduklarından dolayı parçacık biçimindeki radyasyonlara göre madde içerisinde daha fazla yol alırlar.

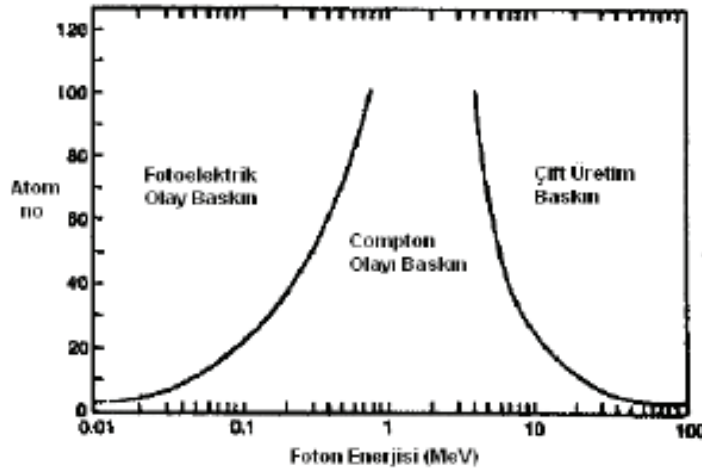
Yarıiletken malzemeler yüksek enerjiye sahip foton veya parçacıklara maruz kaldığında malzemelerde farklı şekillerde kusurlar oluşturarak enerjilerini kaybeder. Foton ve parçacıkların oluşturdukları zararlar malzemenin performansının azalmasına ve iyileşme göstermeyen hasarlar oluşmasına neden olur. Yarıiletken malzemede

biriktirilen enerji miktarı hedef malzemenin kütlesine, hedef atomlarının numarasına, parçacık kütlesine ve parçacık enerjisine bağlıdır.

2.8. Gama Radyasyonunun Maddeyle Etkileşmesi

Gama radyasyonu radyoaktif bozunma sonucu meydana gelmektedir. Gama radyasyonu salınımında elementin atom numarası ve kütle numarası değişmez. Işık hızıyla hareket eden gama ışınının kütlesi yoktur. Gama radyasyonunun madde ile etkileşimleri sonucu ya tam saçılma ya da tam soğurma meydana gelir [38].

Gama ışını elektromanyetik dalgalar (foton adı verilen kütlesiz enerji paketçikleri) olması nedeniyle maddeyle etkileşimini soğurucu maddenin atom numarası veya enerjileri belirler. Gama radyasyonlarının maddeyle etkileşerek enerjilerini kaybettikleri farklı olaylar vardır. Foton enerjilerinde sırasıyla $\sim 0,01$ MeV 'den $\sim 0,5$ MeV 'e kadar fotoelektrik olay, $\sim 0,1$ MeV 'den ~ 10 MeV 'e kadar compton olayı veya elektron saçılması baskındır. Çift oluşumu için fotonun enerjisi 1.02 MeV değerinden başlar ve daha yüksek gama enerjisiyle devam eder (Şekil 2.19) [37].



Şekil 2.19. Üç γ – ışını etkileşme işlemi ve bunların baskın olduğu bölgeler [39].

İyonize edici fotonların madde ile etkileşimi üç şekilde olur. Bunlar, fotoelektrik etki, compton olayı ve elektron-pozitron çift oluşumu şeklindedir.

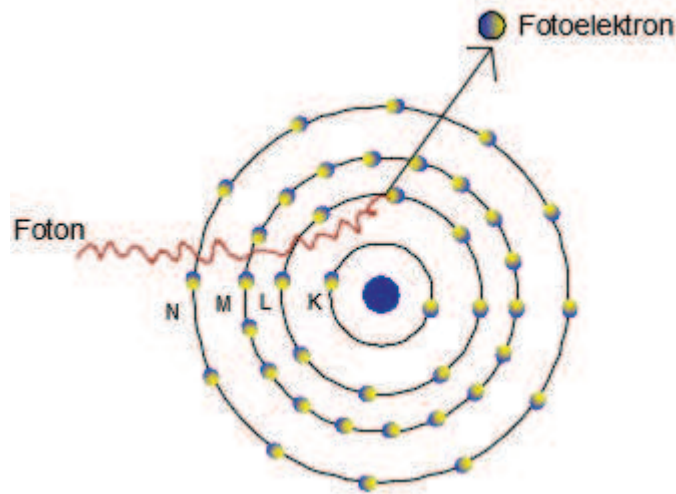
2.8.1. Fotoelektrik Etki

Enerjisi E olan bir gama ışınının metal ile etkileşmesi sonucu gama soğrulmaktadır. Gelen foton atomun bir elektronuna çarpar. Çarpma sonucu tüm enerjisini bu elektrona aktararak elektronun atomdan fırlatılmasını sağlar (Şekil 2.20.) [40]. Foton enerjisinden dolayı fırlayan bu elektrona “fotoelektron” denir. Gelen fotonun enerjisinin bir kısmı elektronu atomdan koparabilmek için harcanır, geriye kalan foton enerjisi ise atomdan koparılan elektrona kinetik enerji olarak aktarılmaktadır. Bu süreç düşük foton enerjilerinde baskındır [41].

$$E_{\text{gelen,f}} = E_{\text{bağlanma}} + E_{\text{kinetik}} \quad (2.7)$$

$E_{\text{gelen,f}}$ = Gelen fotonun enerjisi, $E_{\text{bağlanma}}$ = Elektronun bağlanma enerjisi
 E_{kinetik} = Fotoelektronun enerjisidir.

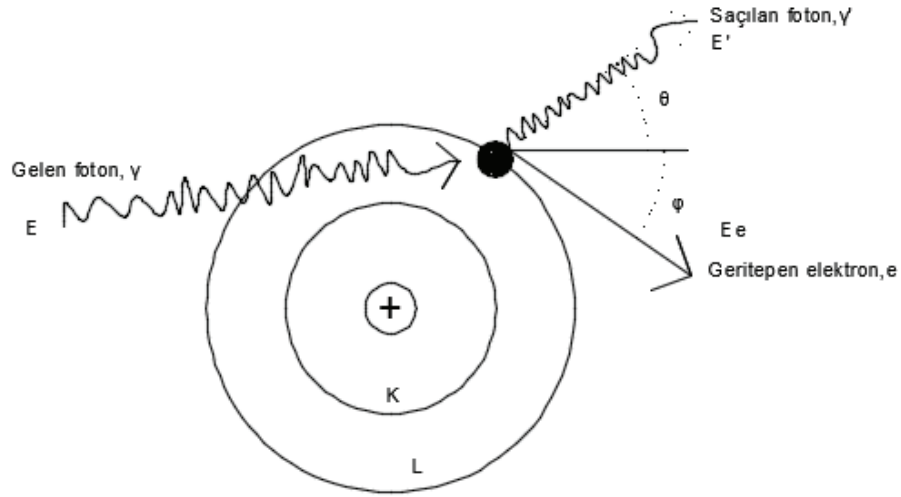
Fotoelektronun fırlatılmasından sonra dış yörüngede bulunan bir elektron yörüngede oluşan boşluğa geçer ve bu geçiş sırasında x-ışınları yayınlanır.



Şekil 2.20. Fotoelektrik etki şeması.

2.8.2. Compton Olayı (Elektron-Foton Saçılması)

1923 yılında A. Holly Compton ışığın foton adı verilen ve enerjisi $E=h\nu$ olan parçacıklar olduğunu savundu. Karbon atomlarıyla yaptığı deneylerde atomun serbest elektronlarına x-ışınları göndererek foton ve serbest elektronun birbirinden farklı yönlere doğru saçıldığını gözlemledi (Şekil 2.21.). 1927 yılında bu çalışmasıyla Nobel ödülü almıştır. Bu deney sonucunda fotonlarında momentumu olduğu ortaya çıkmıştır. Gelen fotonun enerjisi 0,5 MeV'den büyük ise elektronlarla esnek çarpışma yapar. Elektronu bir doğrultuda fırlatırken kendisi de herhangi bir doğrultuda saçılır [40]. Bu esnek çarpışmada foton enerjisinin ve momentumunun bir kısmını elektrona verir ve daha düşük enerjili foton olarak başka doğrultuda saçılır. Bu olaya Compton olayı veya elektron-foton saçılması denir [42].



Şekil 2.21. Foton elektron saçılması.

Compton Olayında;

- Foton çarpışma sonucunda soğrulmaz.
- Çarpışma esnektir. Esnek çarpışmada çarpışan tanecikler birbirinden bağımsız hareket ederler. Enerji ve momentum korunmaktadır. Gelen foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır geriye kalan enerjisiyle kendisi saçılmaktadır.

$$E = E' + E^e \quad (2.8)$$

E = Gelen foton enerjisi , E' = Saçılan foton enerjisi

E^e = Geri tepen elektronun enerjisidir.

Enerjinin korunum denklemine (2.8) bakıldığında gelen fotonun enerjisinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Gelen gama ışınının enerjisi frekansa bağlı olarak yazılırsa;

$$h \cdot \nu_{\text{gelen}} = h \cdot \nu_{\text{saçılan}} + E^e \quad (2.9)$$

ifadesi elde edilir.

ν_{gelen} = Gelen fotonun frekansı, h = Planck sabiti

$\nu_{\text{saçılan}}$ = Saçılan fotonun frekansıdır.

Bu durumda gelen fotonun frekansı saçılan fotonun frekansından daha büyüktür $\nu_{\text{gelen}} > \nu_{\text{saçılan}}$ olarak yazılabilir. Enerji

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.10)$$

c = Işık hızı, ν = Frekans, λ = Å cinsinden dalga boyudur.

şeklinde ifade edilir.

(2.10) eşitliğinde görüldüğü gibi frekans ile dalga boyu ters orantılı olup, $\lambda_{\text{saçılan}} > \lambda_{\text{gelen}}$ olarak yazılır. Bu olayda momentum korunmuştur. Gelen fotonun momentumu saçılan fotonun momentumundan büyüktür [39].

$$\vec{P}_{\text{gelen}} = \vec{P}_{\text{saçılan}} + \vec{P}_{\text{elektron}} \quad (2.11)$$

Fotonun dalga boyundaki değişim

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{saçılan}} - \lambda_{\text{gelen}} = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos\theta) \quad (2.12)$$

ile verilir.

$\Delta\lambda$ = Saçılan ve gelen fotonun dalga boyları arasındaki fark

m_e = Elektronun kütlesi, θ = Fotonun saçılma açısı

$\lambda_{\text{saçılan}}$ = Saçılan fotonun dalga boyudur.

Gelen fotonun enerjisi ile saçılan fotonun enerjisi arasındaki bağıntı,

$$E' = \frac{0.51}{1 - \cos\theta + \frac{0.51}{E}} \quad (2.13)$$

ile verilir. Fotonun saçılma açısı $\cos\theta = 1$ olması durumunda; gelen fotonun enerjisi yaklaşık olarak saçılan fotonun enerjisine eşit olmaktadır.

$$E \cong E' \quad (2.14)$$

Burada;

E = Gelen fotonun enerjisi, E' = Saçılan fotonun enerjisidir.

Fotonun saçılma açısının 90° olması durumunda $\cos 90 = 0$ olacağından;

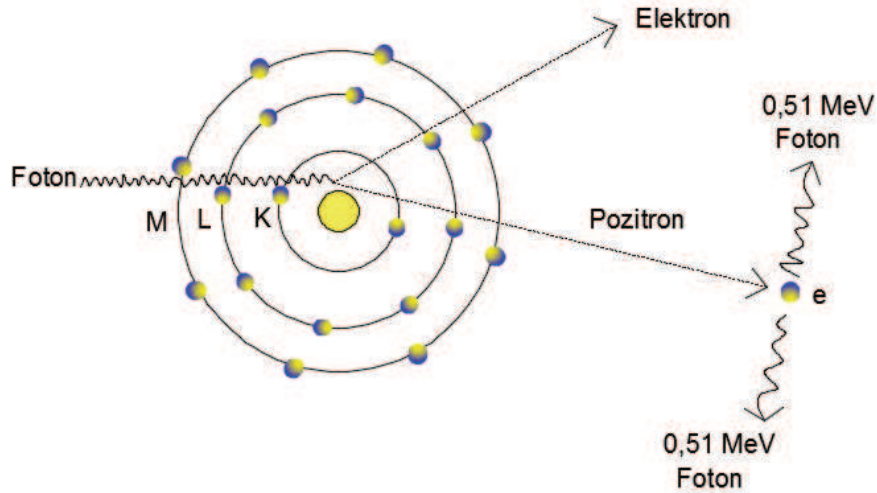
$$E' = \frac{0.51E}{E + 0.51} < 0.51 \text{ MeV} \quad (2.15)$$

olur. (2.15) eşitliğinden anlaşılacağı üzere saçılan fotonun enerjisi 0.51 MeV'den küçüktür.

2.8.3. Elektron-Pozitron Çift Oluşumu

Gelen fotonun enerjisi yüksek ise ve gelen foton çekirdeğin yakınından geçerse çift oluşumu gerçekleşir. Çift oluşumunda kütlesi olmayan fotondan, kütlesi olan elektron ve pozitron olmak üzere iki parçacık oluşmaktadır. Bu durum Einstein'ın $E=mc^2$ formülüyle açıklanır burada enerjinin kütleye dönüşümü söz konusudur. Oluşan elektronun ve pozitronun enerjisi mc^2 olduğundan gelen gama ışınının da en düşük $2mc^2$ enerjiye sahip olması gerekir. $2mc^2$ 'den düşük enerjili iyonize edici fotonlar elektron ve pozitron oluşturamaz yani çift oluşumu söz konusu olamaz. Çift oluşumunda foton soğrulur yani enerjisinin tamamı tükenmektedir [39].

Çift oluşumunda Compton olayında olduğu gibi enerji ve momentum korunmaktadır. Momentumun korunmasından dolayı, elektron ve pozitronun birbirinden bağımsız yönlerde hareket ettiği görülür. Pozitron, orbital elektronu ile birleşerek yok olur. Bu olaya çift yok oluşu denilmektedir. Çift yok oluşunda kütlelerin enerjiye dönüşümü söz konusudur. Kütlelerin enerjiye dönüşümünde 0.51 MeV enerjilerine sahip iki foton oluşur ve bu fotonlar birbirlerine zıt yönde hareket ederler. Şekil 2.22.'de çift oluşumu ve çift yok oluşu sonucu oluşan fotonlar gösterilmiştir [37].



Şekil 2.22. Çift oluşumu ve çift yok oluşu.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında polikristal silisyum hücreleri kullanılmış olup, bu hücrelerin radyasyon öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri incelenmiştir. Bunun için oda sıcaklığında karanlık ve aydınlık akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri bir solar simülatör cihazı yardımıyla elde edilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen veriler kullanılarak güneş pili parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra hücreler iyonize edici foton kullanılarak 10 kGy ve 30 kGy dozlarında ışınlanmıştır. Işınlama sonrası hücrelerin elektriksel karakterizasyon işlemleri tekrarlanmış olup, güneş pili parametrelerindeki radyasyon öncesi ve sonrası değişimler tartışılmıştır. Kullanılan ışık şiddeti standart şartlar altında (1000 W/m^2 , AM 1.5 ve 25°C) olarak seçilmiştir.

3.1. Sciencetech / (SL-60A-WS) Solar Simülatör Cihazı

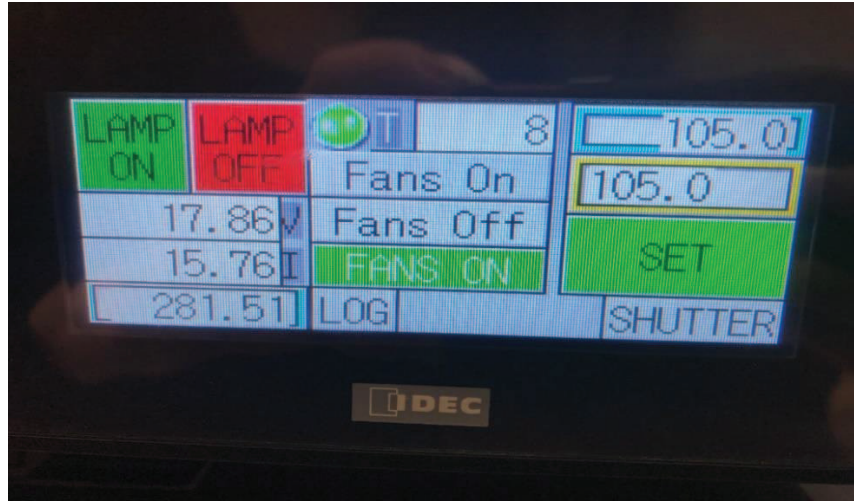
Yapay güneş veya solar simülatör olarak da adlandırılan güneş simülatörleri güneş ışığına yakın aydınlatma sağlayan özel cihazlardır. Solar simülatör cihazının özelliği deneyi yapılacak malzemeye laboratuvar koşullarında kontrol edilebilir ortam hazırlamaktır. Bu tez çalışmasında kullanılan polikristal Silisyum fotovoltaiik hücrelerin elektriksel karakterizasyonları Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve Araştırma Merkezinde (GRÜMLAB) bulunan ve Mühendislik Fakültesine ait olan solar simülatör cihazı kullanılarak yapılmıştır. Hücrelerin ışınlama işlemleri ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumun'dan hizmet alımı yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.1.'de güneş pili parametrelerinin tayin edildiği SL-60A-WS model solar simülatör cihazı görülmektedir. Simülatör; güç kaynağı, filtre tutucusu, ark lambası ve bilgisayar kontrollü akım-gerilim ünitelerinden oluşmaktadır.



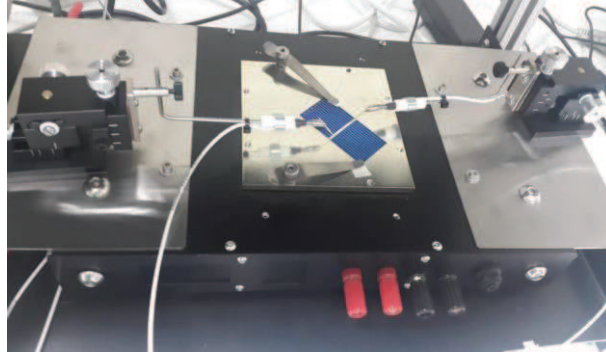
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan solar simülatör cihazı.

Şekil 3.2.'de simülatör cihazının dokunmatik kontrol ekranı gösterilmiştir. Bu dokunmatik ekran üzerinden simülatörün lambasının ve fanının açılıp kapanması, ışık şiddeti ayarı gibi özellikler kontrol edilebilmektedir.

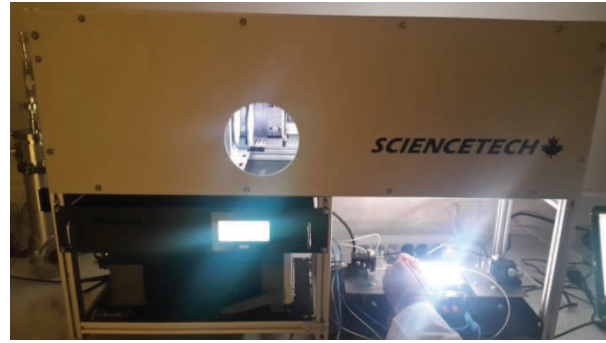


Şekil 3.2. Solar simülatör cihazının dokunmatik kontrol ekranı.

Şekil 3.3.'de fotovoltaiik hücrelerin karakteristiklerini elde etmek için kullanılan aydınlık ve karanlık ortam solar simülatör deney düzeneği gösterilmiştir.



(a)



(b)



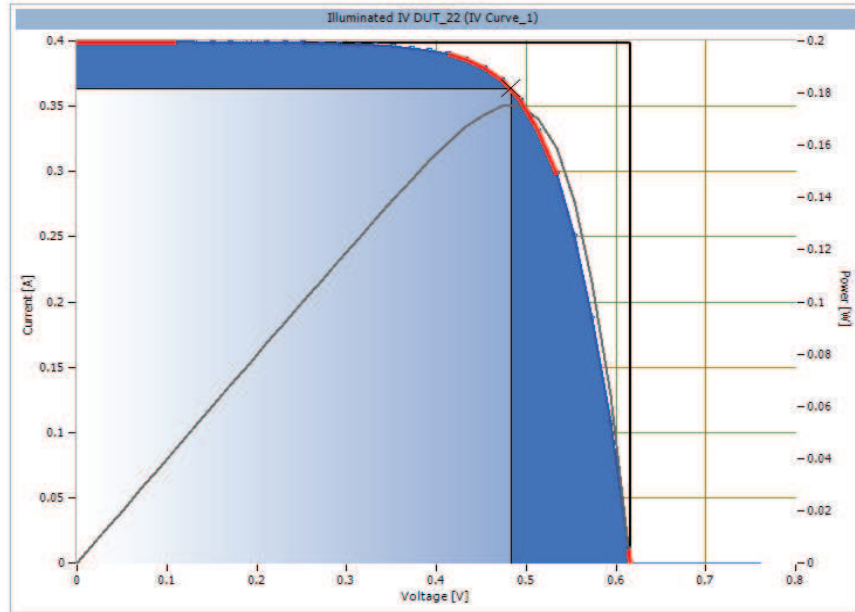
(c)

Şekil 3.3. (a) Solar simülatör deney düzeneği, (b) aydınlık ölçümü ve (c) karanlık ölçümü.

Bu deney düzeneği kullanılarak hücrelerin I-V ve P-V verilerinden yararlanılarak bölüm 2’de bahsedilen maksimum güç (P_{max}), doluluk faktörü (FF) ve verim (η) değerleri elde edilmiştir.

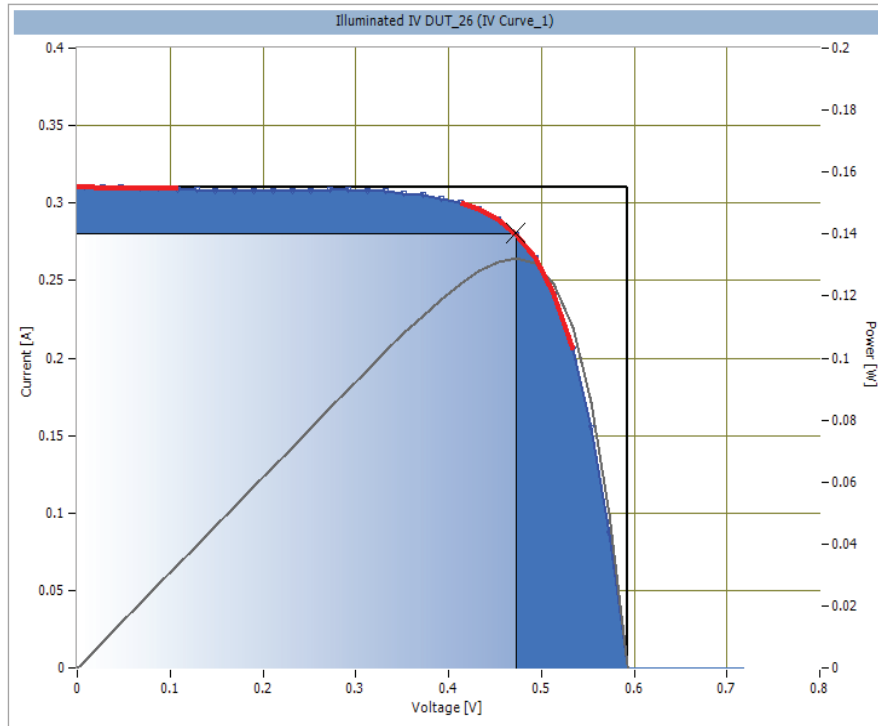
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Şekil 4.1.'de fotovoltaik hücrenin radyasyon öncesi aydınlık ortamda akım-gerilim (I-V) grafiği, güç-gerilim (P-V) grafiği ve doluluk faktörü gösterilmektedir. Akım-gerilim (I-V) grafiğine bakıldığında hücrenin kısa devre akım (I_{sc}) değeri 398,71 mA ve açık devre gerilimi (V_{oc}) 616,00 mV değerlerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca hücrenin güç-gerilim (P-V) grafiğine bakıldığında maksimum akım (I_{mp}) değeri 363,06 mA ve maksimum gerilim değeri ise (V_{mp}) 483,3 mV değerindedir. Doluluk faktörü ise (FF) Denklem (2.4) kullanılarak %71,45 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Fotovoltaik hücrenin radyasyon öncesi aydınlık akım-gerilim (I-V) , güç-gerilim (P-V) ve doluluk oranı eğrisi.

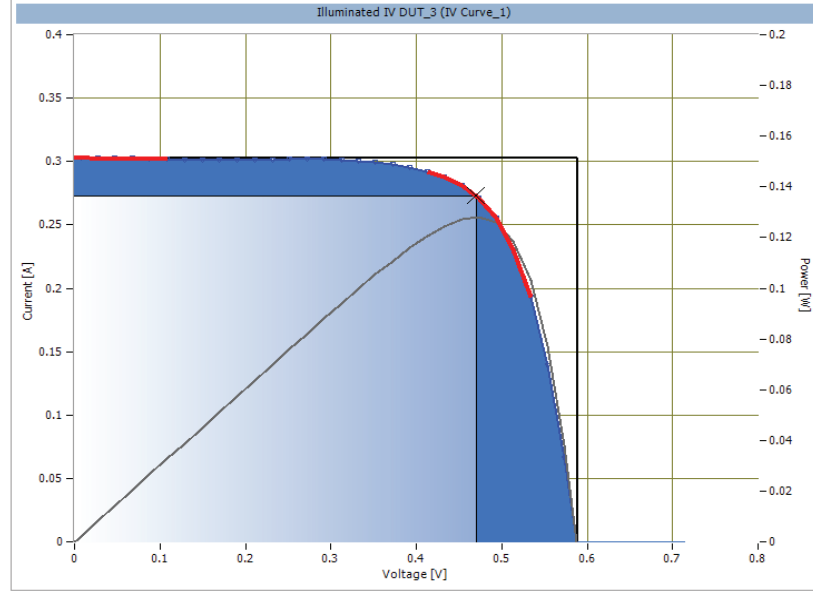
Şekil 4.2.'de 10 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim (I-V) grafiği, güç-gerilim (P-V) grafiği ve doluluk faktörü gösterilmektedir. Akım-gerilim (I-V) grafiğine bakıldığında hücrenin kısa devre akımı (I_{sc}) değeri 310,17 mA ve açık devre gerilimi (V_{oc}) 593,30 mV değerlerinde olduğu görülmektedir. Güç-gerilim (P-V) grafiğine bakıldığında maksimum akım (I_{mp}) değeri 279,88 mA ve maksimum gerilim değeri (V_{mp}) 472,90 mV değerindedir. Doluluk faktörü ise (FF) Denklem (2.4) kullanılarak %71,92 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. 10 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) ve doluluk oranı eğrisi.

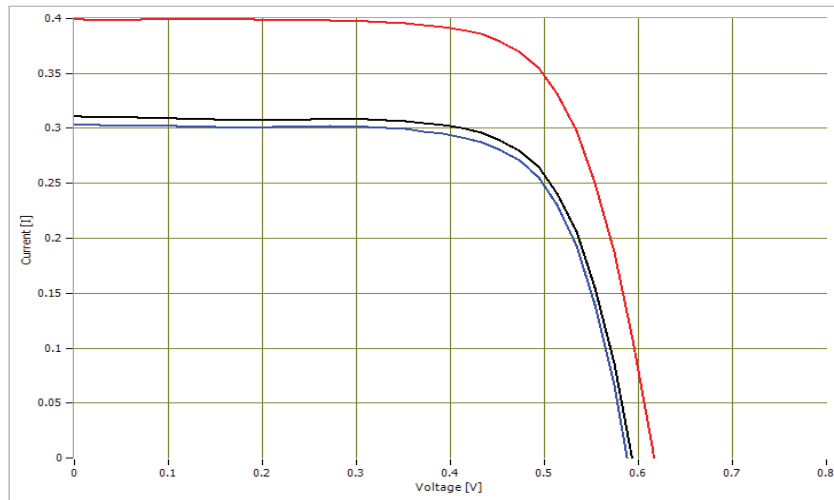
Şekil 4.3.'de 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim (I-V) grafiği, güç-gerilim (P-V) grafiği ve doluluk faktörü gösterilmektedir. Akım-gerilim (I-V) grafiğine bakıldığında hücrenin kısa devre akım (I_{sc}) değeri 303,02 mA ve açık devre gerilimi (V_{oc}) 589,00 mV değerlerinde olduğu görülmektedir. Güç-gerilim (P-V) grafiğine bakıldığında maksimum akım (I_{mp})

değeri 272,47 mA ve maksimum gerilim değeri ise (V_{mp}) 470,40 mV değerindedir. Doluluk faktörü ise (FF) Denklem (2.4) kullanılarak %71,81 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim (I-V), güç-gerilim (P-V) ve doluluk oranı eğrisi.

Şekil 4.4.'de fotovoltaiik hücrenin radyasyon öncesi ve sonrası aydınlık ortamda akım-gerilim (I-V) eğrileri gösterilmektedir.

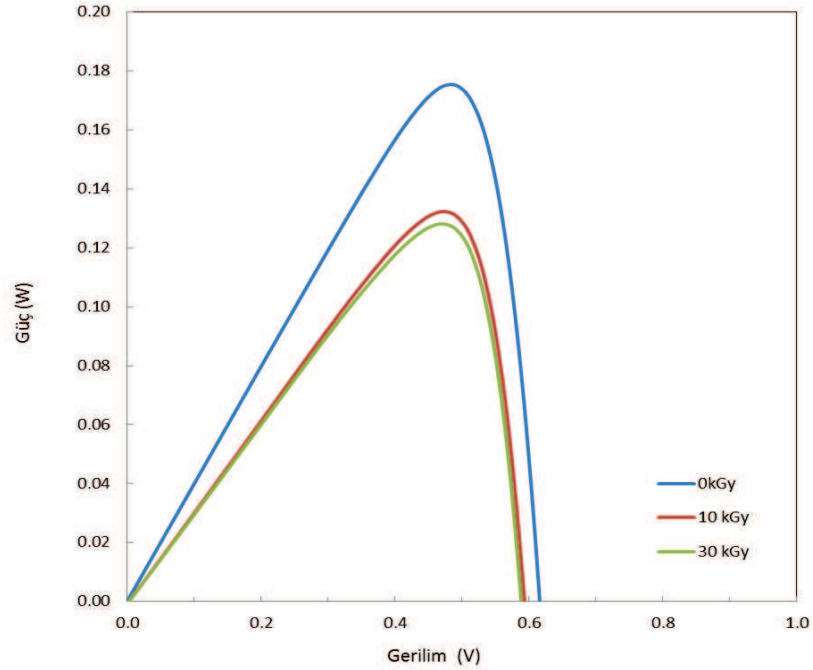


Şekil 4.4. Fotovoltaiik hücrenin aydınlık ortam akım-gerilim eğrileri: Radyasyon öncesi (kırmızı), 10 kGy (siyah) ve 30 kGy (mavi).

Grafiğe bakıldığında ışınlanmamış fotovoltaiik hücrenin kısa devre akım (I_{sc}) değeri 398,71 mA değerinde iken 10 kGy ışınlama hücrenin kısa devre akımında 88,54 mA değerinde bir azalma meydana getirmiş ve 10 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin kısa devre akım (I_{sc}) değeri 310,17 mA değerinde ölçülmüştür. 30 kGy ışınlama ise hücrenin kısa devre akımında 95,69 mA değerinde bir azalma meydana getirmiş ve 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin kısa devre akım değeri 303,02 mA değerinde olduğu görülmektedir. 10 kGy ve 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücreler kıyaslandığında kısa devre akım değerinde 7,15 mA azalma meydana gelmiştir. Radyasyon tarafından bant aralığında meydana getirilen yeni enerji seviyeleri azınlık taşıyıcılarının sayısının azaltmış ve bunun sonucunda da kısa devre akımında bir azalmaya sebep olmuştur.

Hücrelerin açık devre gerilimine bakıldığında ise ışınlanmamış hücrenin açık devre gerilimi (V_{oc}) 616,00 mV değerinde olduğu görülmektedir. 10 kGy ışınlama hücrenin açık devre geriliminde 22,70 mV değerinde bir azalma meydana getirmiş ve 10 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin açık devre gerilim (V_{oc}) değeri 593,30 mV değerinde ölçülmüştür. 30 kGy ışınlama ise hücrenin açık devre geriliminde (V_{oc}) 27,00 mV değerinde bir azalma meydana getirmiş ve 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücrenin açık devre gerilim değeri 589,00 mV olarak ölçülmüştür. 10 kGy ve 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücreler kıyaslandığında açık devre gerilim değerinde 4,30 mV azalma meydana gelmiştir. Yapıya uygulanan iyonize radyasyon, yeniden birleşme merkezlerinin sayısını arttırarak açık devre gerilim değerinde azalmaya sebep olmuştur.

Şekil 4.5.'de fotovoltaik hücrelerin radyasyon öncesi ve sonrası aydınlık ortamda güç-gerilim (P-V) grafiği görülmektedir.

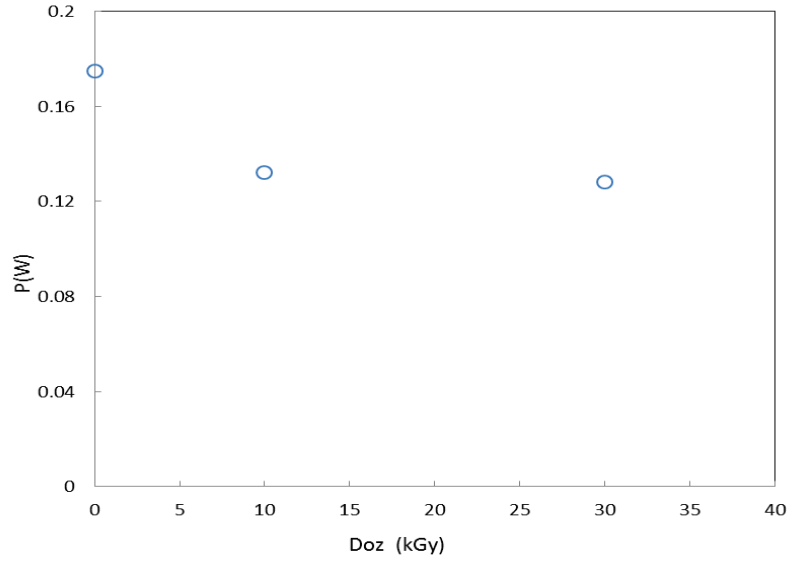


Şekil 4.5. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortamda güç-gerilim (P-V) eğrileri.

Şekil 4.5.'den görüldüğü üzere ışınlanmamış fotovoltaik hücrenin maksimum güç değeri (P_{max}) 175,46 mW'dır. 10 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin maksimum güç değeri (P_{max}) 132,35 mW değerinde olduğu görülmektedir. 30 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin maksimum güç değeri (P_{max}) ise 128,17 mW'tır. Derin seviyelerdeki azınlık taşıyıcıları kısa ömürlü olduklarından yapının çıkış terminallerine yetişmeden yeniden birleşme merkezleri tarafından tuzaklanmış ve bu durum güneş pilinin güç parametresi gibi diğer performans değerlerini de azaltmıştır.

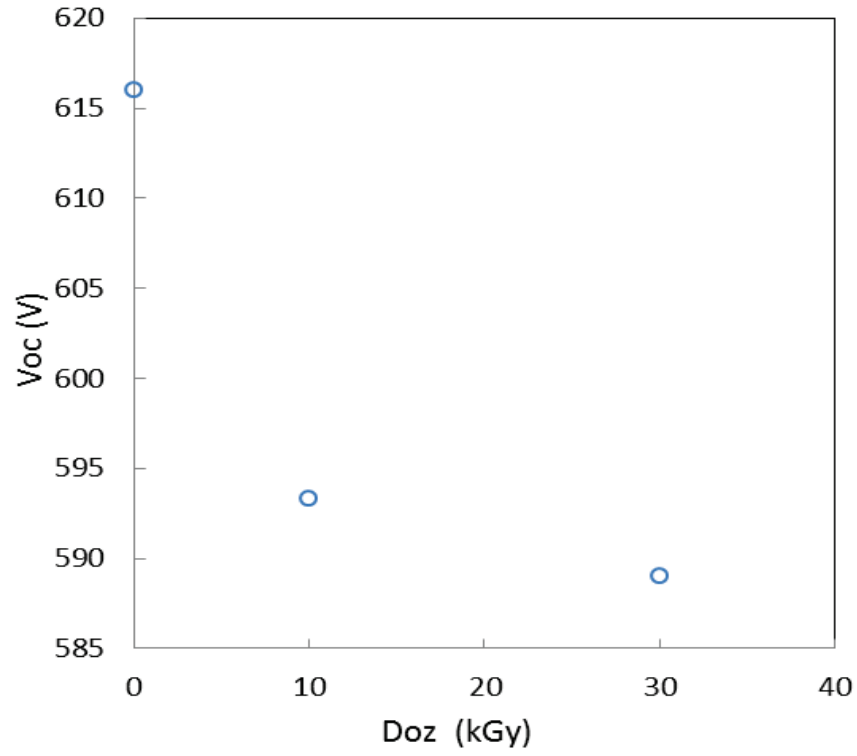
Şekil 4.6.'da fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam güç-doz grafiği görülmektedir. Işınlanmamış fotovoltaik hücrenin maksimum güç değeri (P_{max}) 175,46 mW değerinde iken 10 kGy ışınlama fotovoltaik hücrenin maksimum güç değerinde 43,11 mW azalma meydana getirmiş ve 10 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin maksimum güç değeri 132,35 mW değerinde ölçülmüştür. 30 kGy ışınlama ise

hücresinin maksimum gücünde 47,29 mW değerinde bir azalma meydana getirmiş ve sonuç olarak 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücresinin maksimum güç değeri 128,17 mW değerinde ölçülmüştür. 10 kGy ve 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücreler kıyaslandığında maksimum güç değeri 4,18 mW azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.



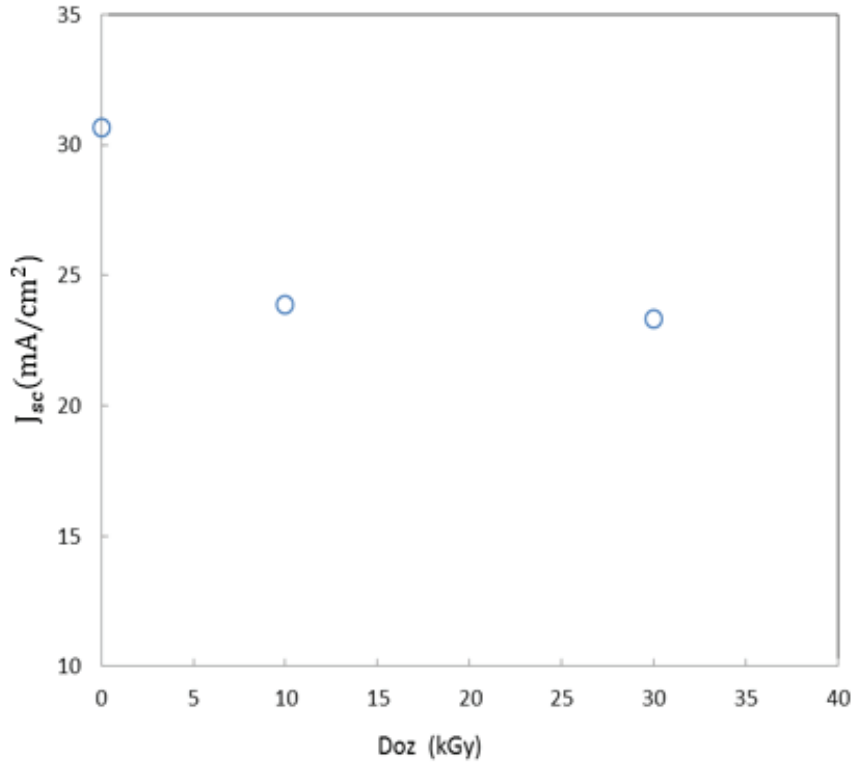
Şekil 4.6. Fotovoltaiik hücresinin aydınlık ortam güç-doz eğrileri.

Şekil 4.7.'de fotovoltaiik hücresinin açık devre gerilim-doz grafiği gösterilmektedir. Işınlanmamış hücresinin açık devre gerilimi 616,00 mV değerinde olduğu görülmektedir. 10 kGy ışınlama hücresinin açık devre geriliminde 22,70 mV değerinde bir azalma meydana getirmiş ve 10 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücresinin açık devre gerilim değeri 593,30 mV değerinde ölçülmüştür. 30 kGy ışınlama ise hücresinin açık devre geriliminde 27,00 mV değerinde bir azalma meydana getirmiş ve 30 kGy ışınlanmış fotovoltaiik hücresinin açık devre gerilim değeri 589,00 mV olarak ölçülmüştür. İyonize radyasyon tarafından üretilen derin arayüzey enerji seviyeleri, yeniden birleşme merkezleri olarak azınlık taşıyıcılarını tuzaklayarak ömürlerini azaltmış ve bu suretle elektrotlara yetişmelerine mani olarak yapının açık devre geriliminde bir azalmaya neden olmuştur.



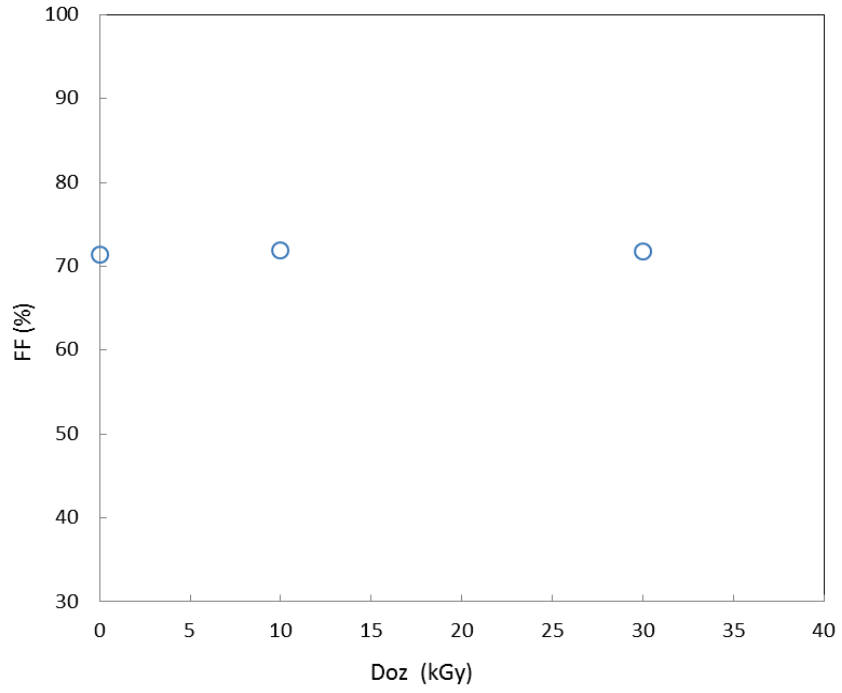
Şekil 4.7. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam açık devre gerilimi-doz değişimi.

Şekil 4.8’de fotovoltaik hücrenin kısa devre akım yoğunluğu-doz değişim grafiği verilmiştir. Grafiğe bakıldığında ışınlanmamış fotovoltaik hücrenin kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) $30,67 \text{ mA/cm}^2$ değerinde olduğu görülmektedir. 10 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin kısa devre akım yoğunluğu $23,86 \text{ mA/cm}^2$ değerindedir. 30 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin kısa devre akım yoğunluğu ise $23,31 \text{ mA/cm}^2$ değerinde olduğu görülmektedir. İyonize edici fotonların enerji dağılımı atomları bulunduğu kafesten çıkararak kusurların veya tuzak merkezlerinin oluşmasına sebep olur. Bu kusurların çoğu elektriksel olarak aktiftir ve yük taşıyıcılarını tuzaklayarak taşıyıcı konsantrasyonunu etkiler [43].



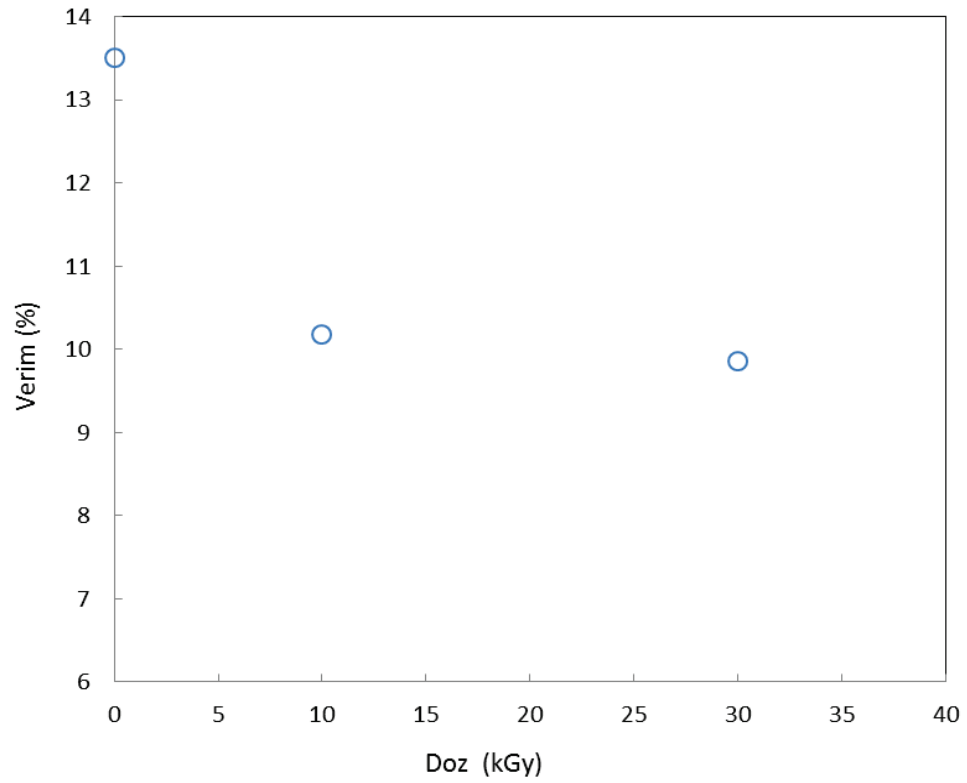
Şekil 4.8. Fotovoltaik hücrenin kısa devre akım yoğunluğunun doza bağlı değişimi.

Şekil 4.9.'da fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam doluluk faktörü-doz grafiği gösterilmektedir. Işınlanmamış hücrenin doluluk faktörü (FF) %71,45 değerinde olduğu görülmektedir. 10 kGy ışınlamış fotovoltaik hücrenin doluluk faktörü %71,92 olup, 30 kGy ışınlamış fotovoltaik hücrenin doluluk faktörü ise %71,81 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9.'dan görüldüğü üzere doluluk faktörü değerlerinde nispeten önemli bir değişim olmamış olup, bu durum diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir [4].



Şekil 4.9. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortamda doluluk faktörü (FF)-doz arasındaki değişimi.

Şekil 4.10.'da fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam verim-doz grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.10.'dan görüldüğü üzere ışınlanmamış hücrenin verimi %13,50 değerindedir. 10 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin verimi %10,18 iken 30 kGy ışınlanmış fotovoltaik hücrenin verimi ise %9,86 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. Fotovoltaik hücrenin aydınlık ortam verim-doza değişimi.

Tablo 4.1.'de radyasyon öncesi polikristal Silisyum hücresinin solar simülasyon cihazından alınan parametre değerleri verilmiştir. Ayrıca (2.2), (2.4) ve (2.5) denklemleri kullanılarak fotovoltaik hücrenin parametreleri hesaplanmıştır. Solar simülasyon cihazından alınan değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1. İyonize edici foton uygulanmamış (0 kGy) Silisyum hücresinden elde edilen sonuçlar.

	Uygulanan Doz (kGy)	Alan (cm ²)	V _{oc} (mV)	I _{sc} (mA)	P _{max} (mW)	FF (%)	η (%)
Simülasyon	0	13,00	616,00	398,71	175,43	71,45	13,50
Teorik	0	13,00	614,13	398,75	175,02	71,47	13,46

Tablo 4.2.'de 10 kGy ışınlanmış polikristal Silisyum hücresinin solar simülatör cihazından alınan parametre değerleri verilmiş olup, aynı parametre değerleri denklem (2.2), (2.4) ve (2.5) kullanılarak hesaplanmıştır. Solar simülatör cihazından alınan değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2. İyonize edici foton uygulanmış (10 kGy) Silisyum hücresinden elde edilen sonuçlar.

	Uygulanan Doz (kGy)	Alan (cm^2)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	P_{max} (mW)	FF (%)	η (%)
Simülatör	10	13,00	593,30	310,17	132,35	71,92	10,18
Teorik	10	13,00	593,02	310,40	132,36	71,90	10,17

Tablo 4.3.'de 30 kGy ışınlanmış polikristal Silisyum hücresinin solar simülatör cihazından alınan parametre değerleri ve denklem (2.2), (2.4) ve (2.5) kullanılarak elde edilen teorik parametre değerleri hesaplanmıştır. Solar simülatör cihazından alınan değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3. İyonize edici foton uygulanmış (30 kGy) Silisyum hücresinden elde edilen sonuçlar.

	Uygulanan Doz (kGy)	Alan (cm^2)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	P_{max} (mW)	FF (%)	η (%)
Simülatör	30	13,00	589,00	303,02	128,17	71,81	9,86
Teorik	30	13,00	588,13	303,04	128,12	71,81	9,85

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında aynı boyutlara sahip polikristal silisyum hücreleri kullanılmış olup, bu hücrelerinin radyasyon öncesi ve sonrası elektriksel karakterizasyonları standart şartlar altında (1000 W/m^2 , AM 1.5, 25°C) solar simülatör cihazı kullanılarak yapılmıştır. Hücreler 10 kGy ve 30 kGy dozlarında iyonize edici fotonlar kullanılarak ışınlanmış olup, elde edilen veriler yardımıyla radyasyon sonrası fotovoltaiik hücrelerin elektriksel parametrelerindeki değişimler incelenmiştir.

Radyasyon öncesi polikristal Silisyum hücresinin kısa devre akımı 398,71 mA, kısa devre akım yoğunluğu $30,67 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi 616,00 mV, maksimum gerilim 483,30 mV ve maksimum akım 363,06 mA olarak bulunmuştur. Silisyum hücresinin maksimum güç değeri 175,43 mW, doluluk faktörü %71,45 olarak hesaplanmış olup, bu değerler %13,50'lik bir hücre verimine neden olmuştur.

10 kGy'lik iyonize edici fotonlar ile ışınlanan polikristal Silisyum hücresinin kısa devre akımı 310,17 mA, kısa devre akım yoğunluğu $23,86 \text{ mA/cm}^2$, açık devre gerilimi 593,30 mV, maksimum gerilim 472,90 mV, maksimum akım 279,88 mA olarak hesaplanmıştır. Maksimum güç değeri 132,35 mW, doluluk faktörü %71,92 olarak hesaplanmış olup, bu değerler %10,18'lik bir hücre verimine neden olmuştur.

İşinlanmamış ve 10 kGy'lik iyonize edici fotonlar ile ışınlanmış polikristal Silisyum hücrelerinin elde edilen parametre değerleri birbiriyle kıyaslandığında, alınan radyasyon dozu açık devre geriliminde ve kısa devre akım yoğunluğunda azalmaya sebep olmuştur. Işınlama sonrası bant aralığında yeni enerji seviyeleri meydana gelmiş bu durum azınlık taşıyıcılarının sayısının azaltmış ve sonuçta kısa devre akımı azalmıştır. Diğer taraftan yapıya uygulanan iyonize radyasyon, yeniden birleşme merkezlerinin sayısını arttırarak açık devre voltajında azalmaya sebep olmuştur.

10 kGy'lık iyonize edici fotonlar hücrelerin maksimum güç değerlerine etki ettiği gözlemlenmiş olup, maksimum gücün, açık devre gerilimi ve kısa devre akımına oranı olarak hesaplanan doluluk faktöründe değişim çok fazla gözlemlenmemiş, ancak radyasyonun açık devre gerilimi ve kısa devre akımında meydana getirdiği değer düşüklüğünden dolayı hücre veriminde %3,32 azalma meydana gelmiştir.

30 kGy'lık iyonize edici fotonlara maruz bırakılan polikristal Silisyum hücresinin grafikleri elde edildikten sonra, kısa devre akımı 303,02 mA, kısa devre akım yoğunluğu 23,31 mA/cm² açık devre gerilimi 589,00 mV , maksimum gerilim 470,40 mV , maksimum akım 272,47 mA ve maksimum güç 128,17 mW olarak hesaplanmıştır. Ayrıca doluluk faktörü %71,81 olup, %9,86'lık bir hücre verimine neden olmuştur.

Işınlanmamış ve 30 kGy'lık iyonize edici fotonlara maruz kalmış polikristal Silisyum hücresinin elektriksel parametre değerleri birbiriyle kıyaslandığında alınan radyasyon dozu açık devre gerilim ve kısa devre akım yoğunluğu değerlerinin azalmasına sebep olmuştur. Artan radyasyon dozu ile güneş pili elektriksel parametrelerin azalması, yeniden birleşme noktalarının artması sonucu azınlık taşıyıcı tuzak konsantrasyonunun artması ve böylece azınlık taşıyıcı ömürlerinin azalmasına atfedilmiştir. Diğer taraftan doluluk faktörü değerinde önemli bir değişim gözlenmezken hücre veriminde %3,64 azalma meydana gelmiştir.

İyonize radyasyon tarafından üretilen derin arayüzey enerji seviyeleri, yeniden birleşme merkezleri olarak azınlık taşıyıcılarını tuzaklayarak ömürlerini azaltmış ve bu suretle elektrotlara yetişmelerine mani olmuştur. Bu durum güneş pilinin elektriksel karakteristiklerini ve dolayısıyla performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Arayüzey merkezlerindeki bu artış azınlık taşıyıcıları sayısında, kısa devre akımında, açık devre voltajında bir azalmaya sebep olmuştur. Kısa devre akımı ve açık devre voltajının azalmasıyla orantılı olarak güneş pili verimi de azalma göstermiştir.

Bu çalışma fotovoltatik hücreler gibi opto-elektronik devre elemanlarının iyonize radyasyon dedektörü ve dozimetrik uygulamalarda kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Fotovoltatik hücrenin veriminin geliştirilmesi için gelecekte yapılacak tez ve araştırmalarda aşağıdaki noktalar göz önünde bulundurulabilir:

- a. Gama ışınının farklı dozları uygulanarak fotovoltatik performansa etkisi incelenebilir ve doz değerlerinden biri düşük, diğeri yüksek (1 Gy-10 kGy gibi) dozda deneyler yapılarak kıyaslamalar yapılabilir.
- b. Gama ışını dışında proton, elektron ve nötron gibi yüksek seviyeli radyasyon kullanılarak güneş hücreleri ve benzer yapılar üzerindeki etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Arı, M., Bilgin, G. ve Özcan, O., Alternatif Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisinin Günlük Hayatta Kullanılabilirliği ve Güneş Enerjisi İle Çalışan Piknik Sepeti Tasarımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 163–171, 2017
- [2] Goetzberger, A., Luther, J., Willeke, G., Solar cells: past, present, future. Solar energy materials and solar cells, 74, 1-11, 2002
- [3] Khuram, A., Khan, S. A and MatJafri, M., ^{60}Co γ -irradiation Effects on Electrical Characteristics of Monocrystalline Silicon Solar Cell. International Journal of Electrochemical Science, 8, 7831–7841, 2013.
- [4] Tobnaghi, D. M., Rahnamaei, A., and Vajdi, M., Experimental Study of Gamma Radiation Effects on the Electrical Characteristics of Silicon Solar Cells. International Journal of Electrochemical Science, 9, 2824–2831, 2014.
- [5] Durlu, T. N., Katıhal Fiziğine Giriş, 3. baskı, Bilim Yayıncılık, Ankara, 1992.
- [6] Morgül, A., Elektronik Devre Elemanları, Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul, 2012.
- [7] Serin, N., Entegre devreler, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, Döner Sermaye Yayınları, 1990.
- [8] Dikici, M., Katıhal Fiziği, 3. baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2013
- [9] Demirel, H., Elektronik 1, Birsen yayınevi, İstanbul, 2014.
- [10] Luque, A., Hegedus, S., Handbook of photovoltaic science and engineering, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, pp 1162, 2011.
- [11] Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of semiconductor devices. Third Edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- [12] İbrahim, D., Güneş enerjisi uygulamaları, 1. baskı, Bileşim yayınları, İstanbul, 2006.
- [13] Köksal, A., Selçuk, A., Özdemir, S., Yıldız, Ş. K. and Bulu, G., Elektronik Cihazlar ve Devre Teorisi, 10. baskıdan çeviri, Palme Yayıncılık, Ankara, 2011.

- [14] Altaş, İ. H., Fotovoltaik Güneş Pilleri : Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, Enerj. Elektr. Elektromekanik-3e, Bileşim Yayıncılık, İstanbul, 47, 66–71, 1998.
- [15] Türköz, M. S., Temel Elektronik, Birsan yayınevi, İstanbul, 2004.
- [16] Akman, E., Akın, S., Karanfil, G. ve Sönmezoğlu, S., Organik Güneş Pilleri, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(1), 1–30, 2013.
- [17] Akova, İ., Yenilenebilir Enerji Kaynakları. 1. Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 224, 2008.
- [18] Kronik, L., Cahen, D., and Schock, H. W., Effects of Sodium on Polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ and its Solar Cell Performance, Advanced Materials, 10(1), 31–36, 1998.
- [19] www.solar-academy.com/menu_detay.asp?id=494. [Erişim tarihi: 13.12.2018].
- [20] 2010 Solar Technologies Market Report, Energy Efficiency & Renewable Energy, 2011.
- [21] www.kimyahaberleri.com/cumhuriyet-universitesi-nanoteknoloji-merkezinde-turkiyede-ilki-uretilecek-olan-ucuncu-nesil-gunes-pili-calismalari-yapiliyor/. [Erişim tarihi: 03.02.2019].
- [22] www.star.com.tr/guncel/turkiyenin-ucuncu-nesil-gunes-pili-sivasta-uretilecek-haber-791075/. [Erişim tarihi: 03.02.2019].
- [23] www.youtube.com/watch?v=asCcW7hiBj0. [Erişim tarihi: 25.12.2018].
- [24] Öztürk, H., Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, Emo.org.tr.
- [25] Blakers, A. W., Wang, A., Milne, A. M., Zhao, J. and Green, M. A., 22.8% Efficient Silicon Solar Cell, Applied Physics Letters, 55(13), 1363–1365, 1989.
- [26] Öztürk, H. H., Kaya, D., Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji, Umutepe Yayınları, İstanbul, 2013.
- [27] Şahin, M., Okumuş, H. Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu, Emo Bilimsel Dergi, 3(5), 17–25, 2013.
- [28] Hu, C. C., White R. M., Solar Cells-From Basics to Advanced Systems, McGraw-Hill College, New York, 1983.

- [29] Villalva, M. G., Gazoli, J. R. and Filho, E. R., Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, IEEE Transactions on power Electronics, 24(5), 1198–1208, 2009.
- [30] Yavuz, A., Başol, D., Ertay, M. M., Yücedağ, İ., Güneş Pili Modelleri Eğitim Seti, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2(2), 14–21, 2013.
- [31] Kuwano, Y., Tsuda, S. and Ohnishi, M., Energy Conversion Process of p/i/n Amorphous Si Solar Cells, Japanese Journal of Applied Physics, 21(2), 235-241, 1981.
- [32] Toprak, A., Kılıç, H. Ş., Toprak, A. ve Kepçeoğlu, A., Güneş Pili Tek Diyot Rs Model Parametrelerinin Hesaplanması ve I-V İle P-V Karakteristiklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 2016.
- [33] Nelson, J., The physics of solar cells, Imperial College Press, London, United Kingdom, 2003.
- [34] Yıldırım, N., Durumlu, E., Ag/Azure A /n-Si Schottky Diyodun Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin Araştırılması, Türk Doğa ve Fen Dergisi, 6(1), 1–6, 2017.
- [35] Demir, O., Çok Cidarlı Karbon Nanotüp ve TiO₂ Tabaka İlavesinin P3HT:PCBM Organik Güneş Pillerinin Performansına Etkileri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [36] Chander, S., Purohit, A., Sharma, A., Arvind, Nehra, S. P. and Dhaka, M. S., A Study on Photovoltaic Parameters of Mono-Crystalline Silicon Solar Cell with Cell Temperature, Energy Reports, vol. 1, 104–109, 2015.
- [37] Williams, W. S. C., Nuclear and Particle Physics, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2014.
- [38] Aygün, E., Zengin, M., Atom ve Molekül Fiziği, 5.baskı Bilim Yayıncılık, 2009.
- [39] Krane, K. S., Introductory Nuclear Physics ,(Çeviri Editörü: Başar Şarer), Nükleer Fizik 1. Cilt , Palme Yayıncılık, Ankara, 2000.
- [40] Şahin, Y., Kurucu, Y., Atom Fiziği, Pegem A Yayıncılık, Ankara. 2005.
- [41] Bransden, J., Joachain, B. H., Atom ve Molekül Fiziği (Çeviri Editörü: Prof. Dr. Fevzi KÖKSAL, Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ), Bilim Yayıncılık, Samsun, 15-18, 1999

- [42] Köksal, F., Köseoğlu, R., Kuantum mekaniği. Nobel yayıncılık, Ankara, 2006.
- [43] Srivastava, P. C., Pandey, S. P. and Asokan, K., A Study on Swift Heavy Ion Irradiated Crystalline Si-Solar Cell. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 244(1), 166-170, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

06.06.1993 yılında Sivas'ta doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 2012 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünü kazandı. Mühendislik bölümünden Haziran 2016 yılında fakülte üçüncülüğü ile mezun oldu. 2016 yılında Yüksek lisansa başladı. 2017 yılında İş Sağlığı ve Güvenliği (C) Uzmanlığını aldı.