



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK ENERJİLİ PROTONLARIN FOTOVOLTAİK
HÜCRELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**Damla Gül KELEŞ
172108005**

2021

GİRESUN

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

**DÜŞÜK ENERJİLİ PROTONLARIN FOTOVOLTAİK
HÜCRELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Damla Gül KELEŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.08.2021

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hande KARADENİZ

**Ağustos 2021
GİRESUN**

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK ENERJİLİ PROTONLARIN FOTOVOLTAİK
HÜCRELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Damla Gül KELEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez .././20.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

..... Dr.
.....
Jüri Başkanı

..... Dr.
.....
Üye

.... Dr.
.....
Üye

..... Dr.
.....
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.

Damla Gül KELEŞ

...../...../2021

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında her türlü bilgiyi benimle paylaşan , kendisine ne zaman istesem ulaşabildiğim, samimiyetini ve güler yüzünü hiç esirgemeyen çok kıymetli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hande KARADENİZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Yine bu çalışma sırasında özellikle deney kısmında bilgi birikiminden faydalandığımız kıymetli hocam Prof. Dr. Serdar KARADENİZ' e teşekkür ederim.

Edindiği tecrübeleri her daim benimle paylaşan , bilgisini hiçbir zaman esirgemeyen ve gelecekte çok başarılı olacağına inandığım kıymetli arkadaşım Nur YILDIZ' a, bu çalışma sırasında motivasyonumu yükseltmek için ellerinden gelenin fazlasını yapan değerli arkadaşlarım Ali DEMİRCİ, Meryem KÜÇÜK, Berk YETİŞ, Onur KARAKUŞ, İsa GÜNEŞ'e şükranlarımı sunarım.

Destegini hiçbir zaman esirgemeyen , maddi ve manevi her zaman yanımda olan çok sevdiğim babannem ve dedeme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ.....	VI
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi.....	3
2.2. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi.....	4
2.2.1. Yarı iletkenlerde Katkılanma İşlemi	4
2.2.2. PN Eklemlerin Çalışma İlkesi.....	6
2.3. Güneş Pillerinin Özellikleri.....	8
2.4. Güneş Hücrelerinin Sınıflandırılması	9
2.4.1.Kristal Silisyum Güneş Hücresi	10
2.4.2. İnce Film Güneş Hücresi.....	14
2.4.3. Gelişen Hücre Teknolojileri.....	17
2.5. Güneş Hücresi Elektriksel Parametreleri	19
2.5.1. Açık Devre Gerilimi.....	19
2.5.2. Kısa Devre Akımı	20

2.5.3. Maksimum Güç	20
2.5.4. Dolum Faktörü	20
2.5.5. Verim.....	21
2.6. Radyasyon Etkileşmeleri.....	21
2.6.1. İyonlaşma	25
2.6.2. Atomik Yer Değiştirmeler.....	26
2.7. Silisyum Güneş Hücresi Hasarı Teorisi	27
2.8. Proton Enerjisinin Güneş Pili Bozulmasına Etkisi.....	27
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT	29
3.1. Solar Simülatör Cihazı	29
3.2. Srim – Trim Simülasyon Programı	33
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	36
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	46
 KAYNAKLAR.....	48
 ÖZGEÇMİŞ	50

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a-Si	Amorf Silisyum
CdTe	Kadmiyum Tellür
Cz	Chrozalski
GaAs	Galyum Arsenid
Gy	Gray
I	Akım
I_{maksimum}	Maksimum Akım
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
ISS	Uluslararası Uzay İstasyonu
P_{maksimum}	Maksimum Güç
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyumdioksit
T	Sıcaklık
μm	Mikrometre
V	Volt
V_{Maksimum}	Maksimum Gerilim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Güneş pilinin Çalışma İlkesi.....	4
Şekil 2. 2. N tipi katkılanma.....	5
Şekil 2. 3. P tipi katkılanma	6
Şekil 2. 4. PN eklem.....	7
Şekil 2. 5. PN eklemde difüzyon.....	7
Şekil 2. 6. PN eklemine elektrik alan oluşumu.....	8
Şekil 2. 7. Güneş hücresi çeşitleri	9
Şekil 2. 8. Chrozsalski kristal çekmenin genel görüntüsü	11
Şekil 2. 9. Tek kristalli (monokristal) güneş hücresi	12
Şekil 2. 10. Tek ve çok kristal hücrelerinin kesme ve çekme yöntemi	13
Şekil 2. 11. İnce film güneş hücresi paneli	14
Şekil 2. 12. Kadmiyum tellür güneş hücresi yapısı.....	16
Şekil 2. 13. Boya duyarlı güneş hücresi	19
Şekil 2. 14. İlk silisyum güneş pili	22
Şekil 2. 15. Manyetosferdeki elektron ve proton spektrumları.....	23
Şekil 2. 16. Manyetosferdeki elektron ve proton spektrumları	23
Şekil 2. 17. Proton ve elektronların durdurma gücü	26
Şekil 3. 1. Solar Simülatör Cihazı.....	30
Şekil 3. 2. Solar simülatör cihazı deney düzeneği	31
Şekil 3. 3. Solar simülatör cihazının dokunmatik ekranı	32
Şekil 3. 4. Işınlanmak üzere olan silisyum güneş hücresi	32
Şekil 3. 5. TRIM giriş ekranı	34
Şekil 3. 6. SRIM -TRIM simülasyon programının hesaplama ekranı.....	35
Şekil 4. 1. 0 Gy ışınlanmamış silisyum hücresinin akım-gerilim (I-V) grafiği.....	36
Şekil 4. 2. 0 Gy ışınlanmamış silisyum hücresinin akım - gerilim (I-V) grafiği	37
Şekil 4. 3. 0 Gy ışınlanmamış silisyum hücresinin gerilim-güç (V-P) grafiği.....	37
Şekil 4. 4. 395 Gy ile ışınlanmış silisyum hücresinin akım –gerilim (I-V) grafiği....	38

Şekil 4. 5. 395 Gy ile ışınlanmış silisyum güneş hücresinin gerilim- güç(V-P) grafiği	38
Şekil 4. 6. Silisyum hücresi aydınlık ortamdaki akım-gerilim eğrileri: radyasyon öncesi (mavi) 395 gy ışınlanmış (kırmızı)	39
Şekil 4. 7. Silisyum güneş hücresinin aydınlık ortamda gerilim-güç (V-P) grafiği ışınlanmamış (kırmızı) 395 Gy ışınlanmış (mavi)	40
Şekil 4. 8. İyon Menzilleri ve Geri Saçılan Atom Dağılımı Alanı.....	42
Şekil 4. 9. İyon ve geri tepen hedef atomdaki iyonlaşma	43
Şekil 4. 10.Toplam hedef yerdeğiştirme	44
Şekil 4. 11. İyondan Geri Saçılan Atomlara Aktarılan Enerji Alanı.....	45

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4. 1. Silisyum hücresi ışınlama öncesi ve sonrası elektriksel parametreler.....41



DÜŞÜK ENERJİLİ PROTONLARIN FOTOVOLTAİK HÜCRELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, proton demetine maruz bırakılan fotovoltaik hücrenin elektriksel parametreleri incelenmiştir. Proton radyasyonunun silisyum hücresinin elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Radyasyona maruz bırakılan silisyum hücresinin verimindeki değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır. Işınlanmamış silisyum hücresinin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiklerinden maksimum güç, kısa devre akımı, açık devre voltajı ve güç dönüşüm verimliliği hesaplanmıştır. Daha sonra 395 Gy ışınlama için aynı parametreler hesaplanmış ve ışınlama öncesi ve sonrası durumlar için kıyaslamalar yapılmıştır. Radyasyon kaynaklı yer değiştirme hasarının hücre performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek için SRIM/TRIM simülasyonu yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Proton, radyasyon, elektriksel parametreler.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LOW ENERGY PROTONS ON PHOTOVOLTAIC CELLS

ABSTRACT

In this thesis, the electrical parameters of the photovoltaic cell exposed to the proton beam were investigated. The effect of proton radiation on the electrical characteristics of the silicon cell was investigated. It is aimed to examine the changes in the efficiency of the silicon cell exposed to radiation. Maximum power, short-circuit current, open-circuit voltage and power conversion efficiency were calculated from the current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V) characteristics of the non-irradiated silicon cell. Then, the same parameters were calculated for 395 Gy irradiation and comparisons were made for the conditions before and after irradiation. SRIM/TRIM simulation was performed to analyze the effects of radiation-induced displacement damage on cell performance.

Keywords: Proton, radiation, electrical parameters.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Fotovoltaik güç sistemleri, etki ile elektrik üreten bir kaynak olarak uzun yıllardan itibaren önemi bilinmektedir. Fotovoltaik hücreler özellikle yüksek dönüşüm verimliliği ve düşük sıcaklık katsayısı gibi nedenlerden dolayı birincil enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Işık enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesindeki verimliliği artırmak için ve dolayısıyla fotovoltaik aygıtların kullanım alanına bağlı olarak performanslarını etkileyen parametreleri değişik şartlarda incelemek önemlidir.

Güneş pillerinin performansı uydu gibi uzay uygulamalarında önemli rol oynamaktadır. Monokristal silikon güneş pilleri en karmaşık yapıda olmalarının yanında düşük maliyet ve hafif malzeme olmaları sebebiyle genellikle dünyaya yakın uydularda kullanım alanlarına sahiptirler. Fakat uzun süreli güç kaynağı olarak güneş pilleri ile uyduların optoelektronik bileşenleri Dünya radyasyon kuşaklarındaki yüklü parçacıklar (protonlar, elektronlar vb.) tarafından ısıtılmaya maruz kalırlar. Güneş pillerine nüfuz eden uzay parçacıklarının neden olduğu yer değiştirme hasarı nedeniyle kusurlu alanlar oluşmaktadır. Oluşan hasarlar nedeniyle aygıtların performanslarında bazı değişimlere neden olurlar. Bu değişimler, kısa devre akımı, açık devre voltajı ve doldurma faktörü gibi bazı genel performans parametrelerinde görülür. Ayrıca fotovoltaik uygulamalarda genel anlamda önemli parametre olan güneş hücresi verimliliği, optimum akım ve optimum voltaj arasındaki değiş tokuş ile temsil edilir. En sık kullanılan malzeme olan silikon, özellikle en ileri teknolojisi sayesinde diğer fotovoltaik hücrelere göre daha yüksek verimliliklere ulaşmıştır. 1960'ların başında, silikondaki kusurların incelemesi ilk Watkins ve Corbett tarafından başlatıldı.

Bu tez çalışmasında, silisyum fotovoltaik aygıtın proton ışınlaması öncesi ve sonrası performans parametrelerinin karakteristikleri analiz edilmiştir. Protonlarla ısıtılan

silisyum hücrelerin elektriksel özelliklerindeki etkileri incelenerek güneş pillerinin performansları hakkında bilgi sağlanmıştır. Fotovoltaik hücre 395 Gy radyasyon dozu ile ışınlanmış ve akım-gerilim ile güç-gerilim karakteristikleri elde edilmiştir. Grafiklerin yardımıyla silisyum hücresinin radyasyon öncesi ve sonrası güneş pili parametrelerinin değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile yaklaşık 25 MeV enerjili proton demetinin güneş pili hücresinin temel parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, radyasyon kaynaklı hasarın hücre performansı üzerindeki etkileri SRIM/TRIM simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiştir.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik kelimesi ikiye ayrıldığında photo ve voltaik kelimelerinden meydana gelir. Photo kelimesi Yunanca da ışık anlamı taşırken Voltaik kelimesi Alessandra Volt'dan esinlenerek oluşturulmuştur. Ayrıca voltaik gerilim anlamına gelmektedir.

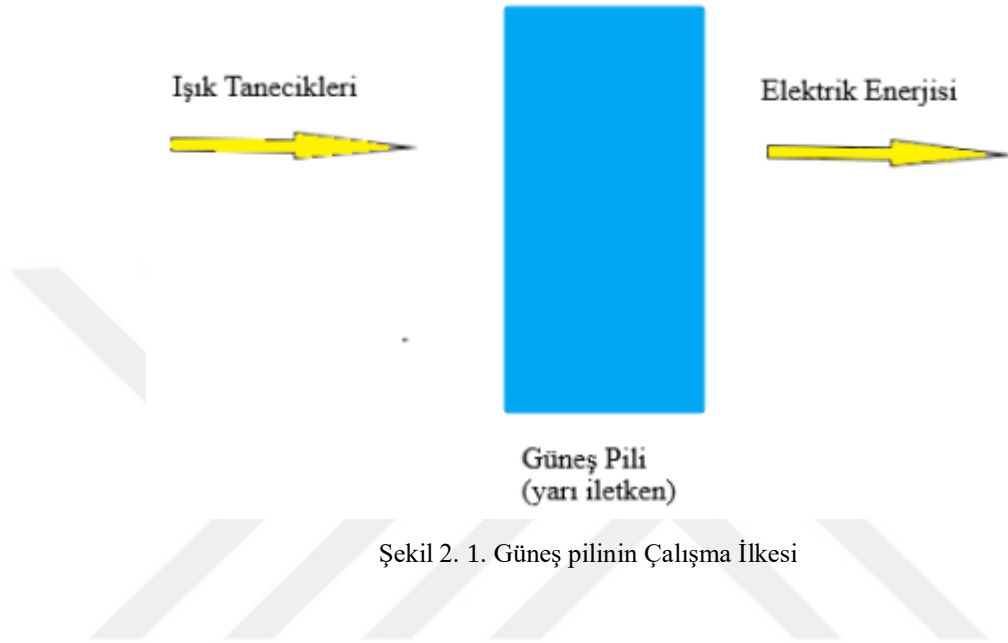
Güneş pillerini araştıran ilk kişi Fransız Fizikçi Henri Bequerel' dir. Bequerel bu araştırmalara 1839 yılında başlamıştır. H. Bequerel yaptığı deneyde öncelikle elektrolit içerisine elektrotları daldırdı. Daha sonra elektrotlar arasında meydana gelen gerilimin elektrolit üzerine düşen ışıkla bağlantılı olduğunu gözlemledi. Böylece fotovoltaik olayını keşfetti [1].

Katılarda buna benzer olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde uygulandı. Daha sonraki yıllarda ilerlemeler devam etti ve foto diyotlar fotoğrafçılık sektöründe ışık parametrelerinde kullanılmaya başlandı. Fotovoltaik diyotların verimlilikleri 1914'lü yıllarda artık %1 değerine ulaşmıştır. Asıl gelişme 1954 yılında güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirebilen ve bunu %6 verimlilikle sağlayan diyotlar geliştirildi. Bu gelişmeyi Chapin ve onun çalışma arkadaşları silikon kristali üzerinde ortaya çıkarmıştır. Bu durum güneş pilleri için tam bir dönüm noktası olmuştur [1].

İlerleyen yıllarda çalışmalar hız kesmeden devam etmiştir. Yapımında silikon kristaller bulunan pillerin verimliliği arttırılırken diğer taraftan yeni güneş pilleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde güneş pillerinin birçok çeşidi vardır. Bu güneş pilleri hesap makinesinden , uzay araçlarına kadar birçok farklı alanlarla kullanılmaktadır.

2.2. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi

Üzerine gelen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere güneş pilleri ya da diğer bir deyişle “ fotovoltaik piller ” denir. Güneş pilleri burada yarı iletken özelliği göstermektedir. Şekil 2.1’de güneş pilinin çalışma ilkesi gösterilmiştir.



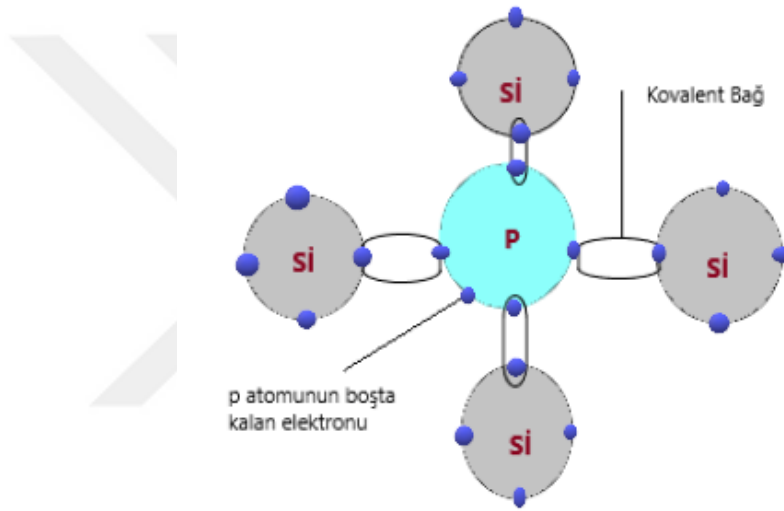
Şekil 2. 1. Güneş pilinin Çalışma İlkesi

Yarı iletken malzemenin güneş pili olarak çalışması için katkılanması gerekmektedir. Bu katkılanma n tipi ya da p tipi olabilir. Katkılanma işlemi için saf yarı iletken içerisine kontrollü bir şekilde istenilen katkı maddesi eklenir. Ortaya çıkan yarı iletkenin n ya p tipi olması ise katkı maddesine bağlıdır.

2.2.1. Yarı iletkenlerde Katkılanma İşlemi

Periyodik tablonun 5A grubunda bulunan elementlerden herhangi biri saf halde bulunan yarı iletken bir malzeme ile katkılanması durumunda N tipi yarıiletken meydana gelmektedir. Güneş pili olarak en yaygın silisyum elementi kullanılır. Bu silisyumdan n tipi silisyum meydana getirmek için periyodik cetvelin 5A grubundan bir element eklenir. Örneğin eklenen element fosfor (P) olsun. Silisyumun atom numarası 14’dür ve son yörüngesinde 4 elektronu bulunur. Fosforun atom numarası 15’dir ve son yörüngesinde 5 elektronu bulunur. Silisyumun son yörüngesinde

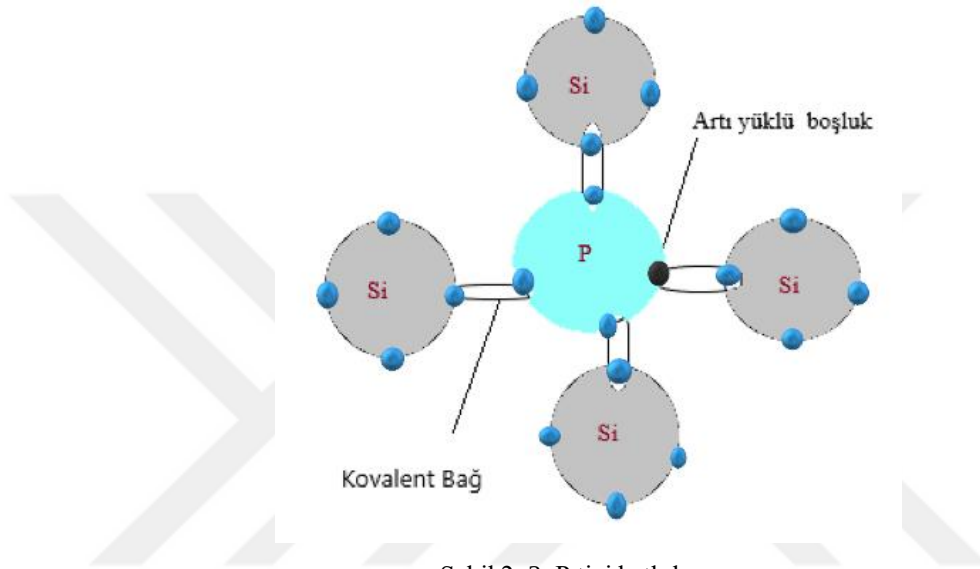
bulunan 4 elektron ile fosforun son yörüngesinde bulunan 4 elektron birbirine çekme kuvveti uygular. İşte bu çekme kuvveti sonucu kovalent bağ oluşur. Katkılanma için kullanılan fosfor elementinin son yörüngesinde 1 elektronu boşta kalır. Silisyum elementi ile bağ kuramayan boşta kalan 1 elektron iletkenliği artırır. Böylece n tipi katkılanmada elektron fazlalığı ortaya çıkar. Elektron fazlalığına sebep olan bu katkı maddelerine “n tipi” veya verici madde denir [2]. Şekil 2.2’de N tipi katkılanma gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. N tipi katkılanma

Periyodik tablonun 3A grubunda bulunan elementlerin herhangi biri saf halde bulunan yarıiletken malzeme ile katkılanması durumunda P tipi yarıiletken meydana gelmektedir. P tipi bir silisyum meydana gelmesi için periyodik tablonun 3A grubundan bir element eklenir . Örneğin eklenen element bor (B) olsun. Silisyumun atom numarası 14’tür ve son yörüngesinde 4 elektronu bulunur. Bor elementinin atom numarası 5’tir ve son yörüngesinde 3 elektronu bulunur. Silisyum elementinin son yörüngesinde bulunan 4 elektron ile bor elementinin son yörüngesinde bulunan 3 elektron arasında bir çekme kuvveti meydana gelir. İşte bu çekme kuvveti kovalent bağdır. Silisyum elementinin son yörüngesinde 1 elektronu boşta kalır ve bağ yapamaz. Bu elektron boşluğu “hol” veya boşluk olarak isimlendirilir. Bu boşluklar

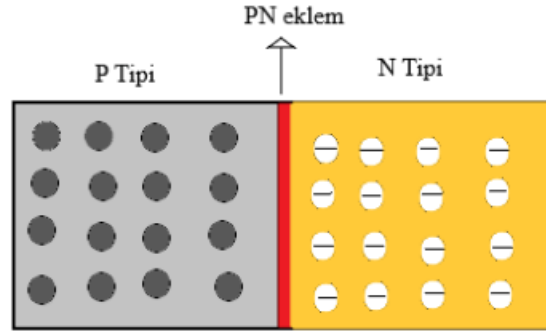
pozitif yüklü kabul edilir her zaman elektron çekmeye hazır durumdadır. Boşluk yönünden zengin olan katkı maddelerine “p tipi” veya alıcı madde denir. Şekil 2.3’de p tipi katkılanma gösterilmiştir.



Şekil 2. 3. P tipi katkılanma

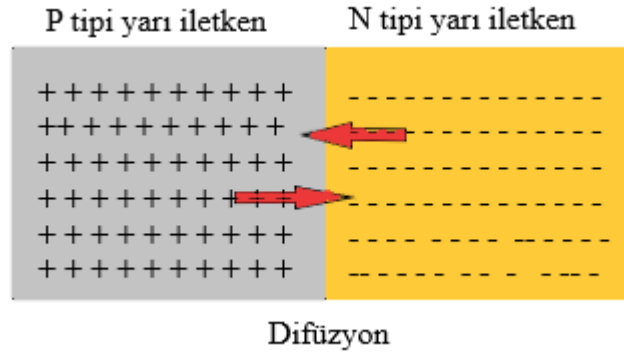
2.2.2. PN Eklemlerin Çalışma İlkesi

P tipi malzeme ile N tipi bir malzemenin bir araya gelmesiyle PN eklem meydana gelir. Bu PN eklem bir diyottur ve elektroniğin en temel devre elemanıdır. Bu diyotun P tipi kısmı anot (+) N tipi kısmı ise katot (-) olarak isimlendirilir. P tipi malzeme ile N tipi malzemenin birleşmesi sonucu yük akışı meydana gelir. Bu birleşim noktası ise temas yüzeyi olarak isimlendirilir [3]. Şekil 2.4 ’de P tipinde boşluklar N tipinde ise elektron fazlalıkları gösterilmiştir.



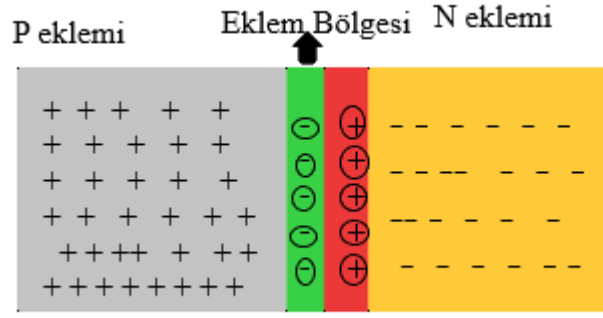
Şekil 2. 4. PN eklem

P tipi yarı iletken ve N tipi yarı iletken birbirlerine eklendiğinde n tipi yarı iletkende bulunan elektronlar, p tipi yarı iletken tarafına doğru akmaya başlar. P tipi yarı iletkende bulunan boşluklar ise n tipi yarı iletken tarafına akmaya başlar. N tipi bölgesinde ayrılan elektronlardan geriye (+) yükler kalır. P tipi bölgesinden ayrılan boşluklar yerine ise (-) yükler kalır. Geriye kalan (+) ve (-) yükler arasında elektriksel alan meydana çıkar. Yarı iletken ve yarı iletkenlerin katkılanmasına göre bu elektriksel alan büyüklüğü değişkenlik gösterir. Şekil 2.5’de PN eklem difüzyonu gösterilmiştir.



Şekil 2. 5. PN eklemde difüzyon

N bölgesine gelen boşluklar eklem bölgesinin yakınındaki elektronlar ile birleşir. P bölgesine giren elektronlar ise eklem bölgesi yakınındaki elektronlar ile birleşir. İşte bu olay “difüzyon” olarak adlandırılır [4]. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi P eklemi negatif (-) N eklemi ise pozitif (+) yüklerle yüklenir.



Şekil 2. 6. PN ekleminin elektrik alan oluşumu

Yarı iletkenler, bir yasak enerji aralığı ile ayrılan iki enerji bandından meydana gelir. Bu bandlar iletkenlik ve valans bandı olarak isimlendirilir. Yasak enerji aralığına eşit ya da büyük enerjiye sahip foton yarı iletken tarafından soğurulduğu vakit enerjisini valans banttaki bir elektrona aktararak, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Bu sayede elektron-boşluk çifti meydana gelir. Bu olay PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde ortaya çıkmışsa elektron-hol çiftleri birbirinden ayrılır. Bu olay tekrardan bir fotonun güneş pili yüzeyine çarpması ile devam eder. Bu sayede güneş pillerinin uçlarında bir elektrik çıkışı ortaya çıkar.

2.3. Güneş Pillerinin Özellikleri

Güneş pillerinin şekilleri birbirinden farklı olabilir. Kare, dikdörtgen, daire şeklinde tasarlanabilirler. Bu güneş pillerinin alanları 100 cm^2 , kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasında değişkenlik gösterir. Güneş enerjisi, güneş pillerinin yapısına da bağlı olarak %5 - %20 arasında bir verimlilikle elektriğe dönüştürülebilir. Laboratuvar ortamında bu verim değerleri değişkenlik gösterir. Öyle ki verim %10 - %30 arasındadır. Uygulamada ise verim % 5 - % 20 arasında değişkenlik gösterir. Çok sayıda güneş pilini paralel veya seri bağlayarak bir yüzey üzerine yerleştirilirse güç çıkışının artırılması sağlanmış olunur. Bu şekilde oluşturulmuş yapılara fotovoltaiik modül denir. Modüllerin seri ve paralel bağlanması sonucu Watt'tan megawatt'lara kadar değişen güç sistemleri tasarlanır.

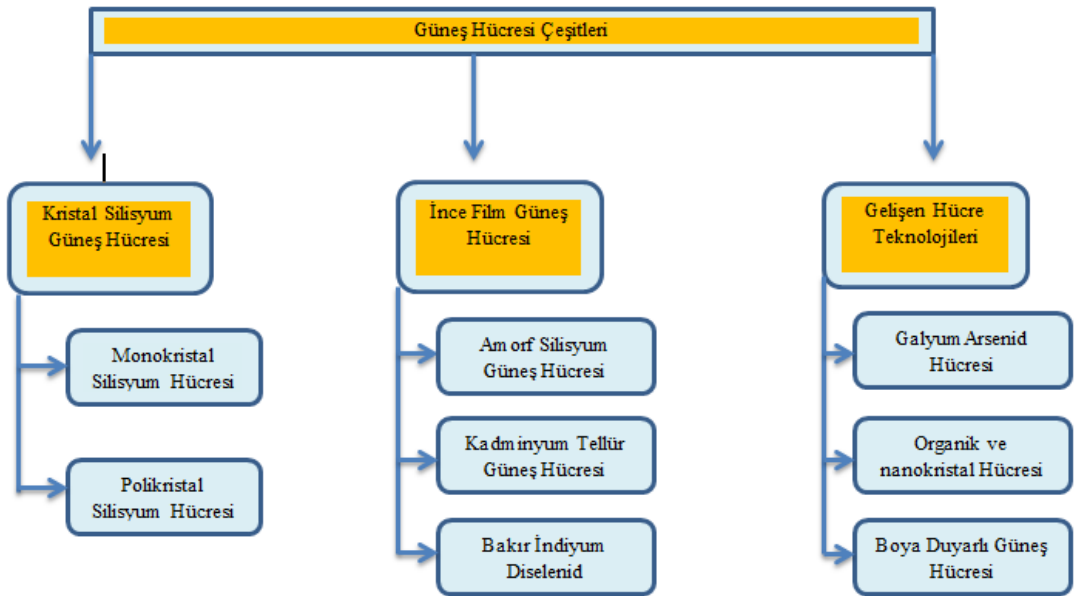
Güneş pillerinin yapımında şu maddeler kullanılır.

- 1- Kristal silisyum
- 2- Amorf silisyum
- 3- Galyum arsenik
- 4- Kadmiyum tellür
- 5- Bakır indium diselenid
- 6- Optik yoğunlaştırmalı hücreler

Günümüzde en çok tercih edilen güneş hücreleri tek ve çok kristalli silisyum pilleridir. Bunun nedeni silisyumun iyi bir yarı iletken olmasıdır [1].

2.4. Güneş Hücrelerinin Sınıflandırılması

Günümüzde güneş pillerinde kullanılan malzemeler ve bu güneş pillerinin yapım teknikleri oldukça gelişmiştir. Böylece birçok farklı güneş hücresi ortaya çıkmıştır. Güneş hücrelerini 3 ana başlığa ayırabiliriz. Şekil 2.7’de güneş hücresinin çeşitleri gösterilmiştir. Şimdi bu güneş hücre çeşitlerini detaylı bir şekilde irdeleyelim.



Şekil 2. 7. Güneş hücresi çeşitleri

2.4.1. Kristal Silisyum Güneş Hücresi

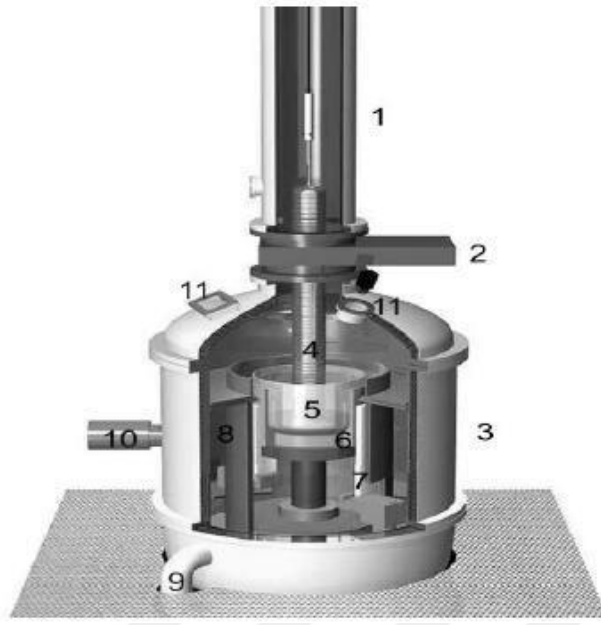
Silisyum güneş pili yapımında en çok tercih edilen yarı iletkenidir. Tercih edilmesinin 2 ana nedeni vardır. Bunlardan ilki ekonomik olarak oldukça uygun olması, ikincisi ise teknolojik üstünlüğüdür. Monokristal (tek kristal) , polikristal (çok kristalli) ve yarı kristalli olmak üzere birçok türü mevcuttur. Ayrıca silisyum hücresi dayanıklı bir yapıya sahiptir [5]. İlk silisyum güneş hücresi ise 1954 Bell laboratuvarında Chapin ve arkadaşları tarafından ortaya çıkmıştır [6].

Uzay araştırmalarında en kullanılan güneş hücresi çeşidi silisyumdur. Örneğin Uluslararası Uzay İstasyonunun (ISS) güneş panellerinde % 14,2 verimle çalışan yaklaşık 262.400 silisyum hücresi vardır. ISS'nin güneş hücreleri yaklaşık 120 kilowatta kadar güç üretebilmektedir [7].

Silisyum dioksit (SiO_2) halde bulunan kumdan silisyum elde edilir. Saf silisyum elde edilmesi için silisyum oksidin grafit ile beraber elektrikli fırınlarda indirgenme işlemine maruz kalması gerekir.

2.4.1.1. Tek Kristal (Monokristal) Silisyum Güneş Hücresi

Tek kristal silisyum güneş hücresinin rengi koyu mavidir. Ağırlığı ise 10 gram'dan daha azdır. Fotovoltaik endüstride en çok kullanılan teknik Chrozsalski kristal çekme tekniğidir. Bu yöntem tek kristal elde etmede çok kullanılır. Bu teknik ile öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit (SiO_2) termal ve kimyasal reaksiyonlara maruz kalarak saf silisyum elde edilir. Daha sonra eriyik halde bulunan silisyum çekirdek denen tek kristal yapıya sahip silisyum parçası batırılır. Eriyikten çekirdek çıkarıldığı zaman üzerinde silisyum eriyiği külçe halinde yıkılmış olur. Silisyum hücre ilk önce dikdörtgen şeklinde bloklara ayrılır daha sonra ayrılan bu bloklarda dilimlere ayrılarak güneş hücresi elde edilir. Şekil 2.8.' de CZ genel şekli verilmiştir.



Şekil 2. 8.Chroalski kristal çekmenin genel görüntüsü [8]

Şekil 2.8’de 1 numara üst hazneyi, 2 numara izolasyon valfini, 3 numara alt hazneyi, 4 numara büyüyen kristali, 5 numara silika potayı, 6 numara grafit dönüştürücüyü, 7 numara ısıtıcıyı ,8 numara izolasyonu, 9 numara vakum borusu, 10 numara ısıtıcı piometre borusunu, 11 numara ise operatör kamera penceresini göstermektedir.

Bu güneş hücrelerinin verimleri % 15 - % 18 arasında değişkenlik gösterir. Verimlerinin bu denli yüksek olması uzun süreleri yatırımlarda idealdir. Daha sonra yapılan çalışmalarda laboratuvar da verimlilikleri arttırılmış öyle ki % 24 e kadar çıkmıştır. Tek kristal güneş hücresinin dezavantajı ise yapımı sırasında malzeme kayıpları olmasıdır [8]. Şekil 2.9 ’da tek kristalli güneş hücresi gösterilmiştir.



Şekil 2. 9. Tek kristalli (monokristal) güneş hücresi [8]

2.4.1.2. Çok Kristalli (Polikristal) Güneş Hücresi

Çok kristalli silisyum güneş hücreleri tek kristalli silisyum güneş hücrelerine göre daha az maliyetlidir. Bunun sebebi üretiminin daha kolay olmasıdır. Çok kristalli güneş hücresi üretiminde en çok kullanılan teknik “ dökme” dir. Çok kristalli silisyum güneş hücresi tıpkı tek kristalli silisyum güneş hücresi gibi en başta hazırlanır. Daha sonra erimiş silisyum kalıplara aktarılır. Kalıplara aktarılan silisyum soğuma için bırakılır. Soğuyan çok kristalli silisyum hücresi bloklar halini alır. Bloklar halindeki silisyum kare şeklinde kesilir. Bu çok kristalli güneş hücrelerinin verimleri tek kristallere göre daha düşüktür. Bu hücrelerin verimleri % 18 - % 20 arasında olabilmektedir [9]. Şekil 2.10’da Tek ve çok kristal hücrelerinin kesme ve çekme yöntemi gösterilmektedir.



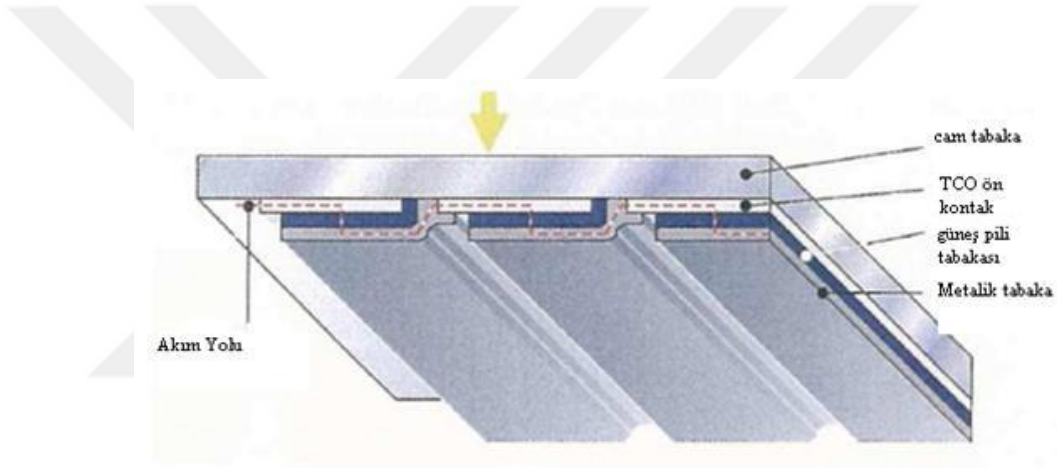
Şekil 2. 10. Tek ve çok kristal hücrelerinin kesme ve çekme yöntemi [10]

2.4.2. İnce Film Güneş Hücresi

Bu güneş pilleri ışığı geçiren kaplama malzemesi olarak kullanıldığı gibi ayrıca enerji üreten bir ürün olarak da kullanılır. İnce film güneş hücrelerinin üretiminde aşağıda verilen teknikler kullanılır.

1. Katot tonlaması
2. Püskürtmeli
3. Buharlı çöküntü

Şekil 2.11’de bir ince film güneş hücresinin panel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2. 11.İnce film güneş hücresi paneli [10]

Tek ve çok kristalli silisyum hücreleri madde kirliliğine oldukça hassasken ince film güneş hücrelerinde bu durum daha azdır. Ayrıca sıcaklık artışı diğer güneş hücrelerinin verimi düşürerek etkilerken ince film güneş hücrelerini daha az etkilemektedir. İnce filmlerin bir diğer avantajı ise düşük ışıнімda dahi akım üretmesidir. İnce film üretiminde bakır indiyum, kadmınyum tellür ve amorf silisyum kullanılmaktadır.

2.4.2.1. Amorf Silisyum Güneş Hücresi

Kararlı kristal yapıya sahip olmayan katılara “amorf yapı” denir. Diğer bir adı ise şekilsiz katıdır. Amorf katıların gelişigüzel yapıları vardır. Amorf katılara cam ve plastik örnek olarak verilebilir. Amorf katıları katı halden sıvı hale geçişini gözlemlediğimizde ani bir faz geçişi yaptığına şahit oluruz. Fakat ısıtıldıklarında yavaş bir şekilde faz değişimi gözlenir. Fiziksel özelliklerini incelediğimiz zaman ise herhangi bir eksen boyunca tüm özellikleri aynıdır. Bu durumda amorf katıların izotropik bir yapıda olduğunu söyleyebiliriz [11].

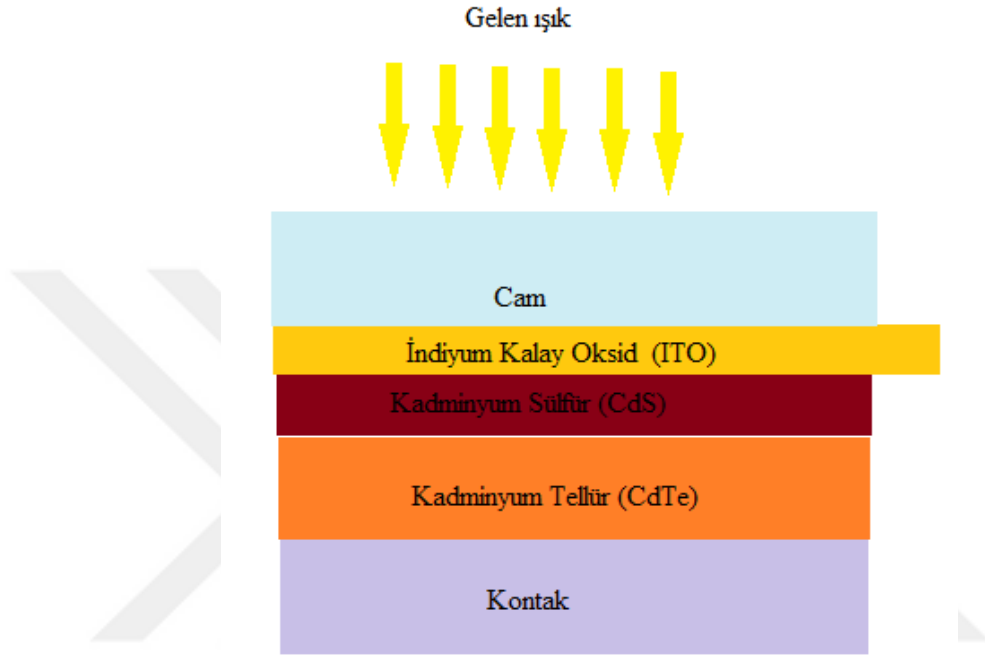
Amorf silisyum hücreleri eskiden elektriksel özelliği yalıtkan olarak adlandırılmıştır. Fakat daha sonra yapılan çalışmalar neticesinde amorf silisyumun fotovoltaiik hücrelerde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

2.4.2.2. Kadmiyum Tellür Güneş Hücresi

Kadmiyum elementi periyodik tablonun B grubu elementleri arasında yer alır ve atom numarası ise 48 dir. Tellür elementi 6A grubunda grubunda yer alır ve atom numarası ise 52 dir. Bu iki elementin bir araya gelmesiyle kadmiyum tellür (CdTe) oluşur. Oluşan bu bileşiğin yasak enerji aralığı 1.5 eV’tur. Ortaya çıkan bu değer güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere yakındır [12]. Kadmiyum Tellür (CdTe) elementi Kadmiyum sülfür (CdS) ile bir araya gelerek heteroeklem diyot üretimi sağlanır [13].

Kadmiyum tellürde bulunan band aralığı güneş enerjisi dönüşümü için en ideal aralıktır. Bu güneş hücrelerinin üretimi de oldukça kolaydır. Kadmiyum tellür güneş hücresi, cam yüzeyi üzerine saydam kontak oluşturulması ile ortaya çıkar. Saydam olan bu kontak üzerine n tipine sahip kadmiyum sülfür tabakası giydirilir. Daha sonra bu n tipi malzemenin üzerine p tipi olan CdTe soğurucu tabaka giydirilir. Bu yarıiletken tabakalara buharlaştırma yöntemi uygulanır. Bu yöntem ile 600 °C de uygulanır. Alt tabakada bulunan cam ise 500 °C’de ısıtılır. Daha sonra bu cam tabaka buhara maruz bırakılarak yarı iletken bir malzeme ile kaplanır. Bu aşamadan sonra

püskürtme işlemi uygulanır. Kadmiyum tellür ve kadmiyum sülfür 400 °C ‘de klorlu bir ortamda yumuşatılarak (tavlanarak) aktif hale getirilir. Böylece kadmiyum tellür ve kadmiyum sülfür tabakası yeniden kristalleşir [10]. Şekil 2.12.’de kadmiyum tellür güneş hücresinin yapısı görülmektedir.



Şekil 2. 12. Kadmiyum tellür güneş hücresi yapısı

Kadmiyum tellür güneş hücrelerinin verimleri laboratuvar ortamında % 16 civarındayken ticari uygulamalarda % 7-8’dir [14].

2.4.2.3. Bakır İndiyum Diselenid Güneş Hücresi

Bakır indiyum diselenid güneş hücresi oldukça dayanıklı ve kusursuz kararlılığa sahiptir. Bu bileşiğin soğurma katsayıları oldukça yüksektir. Buna ilaveten yasak band genişliği güneş spektrumuna oldukça uyumludur ve ayarlanabilir. Bir diğer özelliği ise hem p tipi hem de n tipi olacak şekilde ayarlanabilir. Soğurma

katsayısının yüksek oluşu bakır indiyum diselenid güneş hücrelerinin çok ince tasarlanmasına olanak sağlar [9].

Bakır indiyum diselenid hücrelerinin yüzeylerinin geniş olması için ve verimlerinin yüksek olması için çeşitli kaplama yöntemleri araştırılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları: püskürtme, spreyleme, ısısal buharlaştırma, selenizasyon, elektro kaplamadır. Bu tekniklerin çoğu uzay dışında kullanılan güneş hücrelerinin kaplanması için kullanılmaktadır [15].

2.4.3. Gelişen Hücre Teknolojileri

Teknolojinin gelişmesi beraberinde yeni güneş hücrelerinin de oryaya çıkmasını sağlamıştır. Galyum arsenid güneş hücreleri, organik güneş hücreleri, boya duyarlı güneş hücreleri örnek verilebilir.

2.4.3.1. Galyum Arsenid Güneş Hücreleri

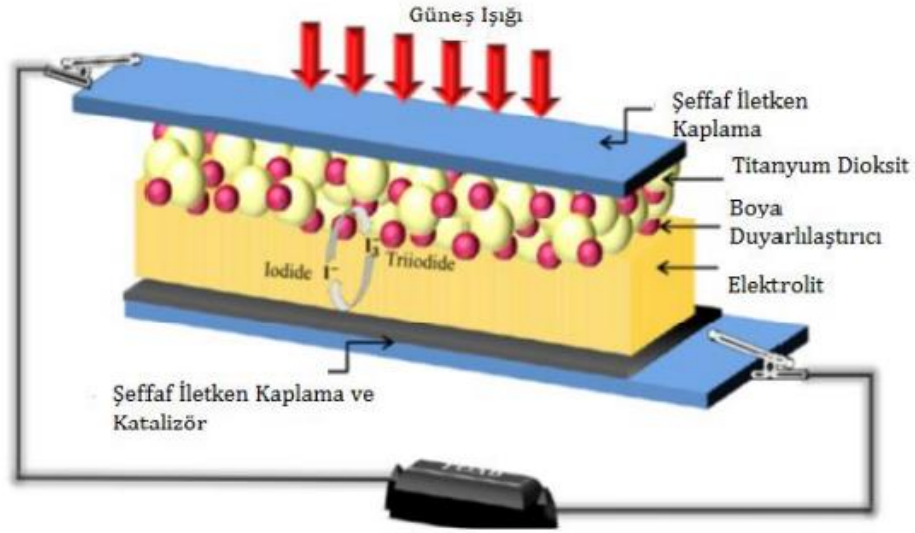
Galyum ve arsenik elementlerinin birleşmesi sonucu GaAs meydana gelir. Bu hücre çeşidi polikristal bir yapıya sahiptir. Kristal yapısı incelendiğinde silisyuma benzediği görülür. Ancak silisyumdan yapılan güneş hücresinin açık devre gerilimine baktığımızda galyum arsenid hücresinden daha fazla olduğu gözlemlenir. Bu durumun sonucu ise silisyum hücresinin galyum arsenide oranla daha fazla tercih edilmesini ortaya çıkarmıştır. Galyum arsenid çok geniş frekanslarda bulunan ışığa karşı duyarlıdır. Bu güneş pillerinin verimleri % 25 - % 30 arasında değişiklik gösterir. Galyum Arsenid diğer yarı iletkenlerle birleştirildiğinde ise verimlilikleri % 30'a kadar çıkabilir. Bu hücrelerin kullanım alanları daha çok uzay uydu çalışmalarıdır. Çünkü bu hücreler radyasyona karşı oldukça dayanıklıdır. Dezavantajı ise doğada az miktarda bulunmasıdır [10].

2.4.3.2. Organik Güneş Hücreleri

Organik güneş hücrelerinin verimleri yüksek olmasına karşın maliyetleri fazladır. Bunun sonucu olarak daha düşük maliyetler için organik güneş pilleri için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların sonucunda gün geçtikçe organik pillerin verimleri artmaktadır.

2.4.3.3. Boya Duyarlı Güneş Hücreleri

Bu güneş hücreleri görünür haldeki ışığı elektrik enerjisine çeviren gelişen hücre teknolojileri arasında yer alır. Boya duyarlı güneş hücrelerini yapay fotosentez olayına benzetebiliriz. Boyaya karşı hassaslaştırılmış güneş hücreleri 1991 yılında Graetzel ve Brian tarafından keşfedilmiştir. Hatta bu hücreler Graetzel hücresi olarak da adlandırılmıştır. Işığa duyarlı anot ile elektrolit ve fotoelektro kimyasal sistem arasında yarı iletken dayanmaktadır. Boya duyarlı güneş hücrelerinin birçok avantajı vardır. Yarı esnek yapıya sahiptir ve yarı saydam özelliği vardır. Şekil 2.13.'de boya duyarlı güneş hücresinin yapısı gösterilmiştir [16].



Şekil 2. 13.Boya duyarlı güneş hücresi [16]

2.5. Güneş Hücresi Elektriksel Parametreleri

Güneş hücresi parametreleri açık devre gerilimi, maksimum güç, dolum faktörü ve verimden oluşur.

2.5.1. Açık Devre Gerilimi

Bir güneş hücresinde hücre içerisinde geçen akımın sıfır olması durumunda ölçüle değere açık devre gerilimi denir. Buna ek açıklama olarak şöyle denebilir: Panelin artı ve eksi uçları arasında hiçbir şekilde yük olmaması durumudur. Açık devre geriliminin formülü denklem 2.1 'de ifade edilmiştir.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \times \ln \left(\frac{I_{sc} + I_0}{I_0} \right) \quad (2.1)$$

Bu denklemdeki parametrelerin açıklamaları ise şöyledir:

n= Diyot faktörü

I_{sc} = Kısa devre akımı (mA)

T = Mutlak sıcaklık (K)

k = Boltzmann sabiti ($1.380 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

q = Elektron yükü ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

I_0 = Ters sızıntı akımı (mA)

2.5.2. Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı sıfır gerilimde ve aydınlık ortamda hücreden geçen akımdır. Sembolü ise I_{sc} şeklindedir.

2.5.3. Maksimum Güç

Maksimum gücü bulmak için maksimum gerilim ile maksimum akımı çarpmak gerekir. Maksimum gücün birimi Wattır. Kısa devre akımı ile açık devre geriliminin kesiştiği yerde güç sıfırdır.

$$P_{\text{maksimum}} = I_{\text{maksimum}} \times V_{\text{maksimum}} \quad (2.2)$$

2.5.4. Dolum Faktörü

Bir güneş hücresinin maksimumum halde bulunan çıkış gücünü, açık devre ve kısa devre akımına bağlı olarak açıklamak için kullanılan bir parametredir. Dolgu faktörü FF şeklinde ifade edilir. İdeal bir güneş hücresinde istenilen dolgu faktörünün 1 olmasıdır. Bu sebeple güneş hücresinin dolgu faktörünün 1'e yakın olması istenilen durumdur. Bir güneş hücresinde dolum faktörü denklem 2.3'deki gibi bulunur.

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{\text{max}} \times I_{\text{max}}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.3)$$

$P_{\max}$ =maksimum güç

$V_{\max}$ = maksimum gerilim

V_{oc} = Açık devre gerilimi

I_{sc} = Kısa devre akımı

2.5.5. Verim

Güneş hücresinin verim parametresi bulunurken çıkış gücünü giriş gücüne oranlarız. Güneş hücrelerinin verimlilikleri farklılıklar gösterir. Verimi % 10'un altında kalmış güneş hücreleri pratikte verimli ve ekonomik değildir. Ayrıca laboratuvar koşullarında güneş hücrelerinin verimlilikleri % 10 - % 30 arasında değişirken uygulamada bu verimlilikler % 5 - % 20 arasındadır. Genelde verimi % 15 olan güneş hücreleri iyi olarak nitelendirilir [1].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{\text{Güneş Radyasyonu} \times \text{Hücre Alanı}} \quad (2.4)$$

bu denkleme ek olarak ;

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{\text{Güneş Radyasyonu} \times \text{Hücre Alanı}} \quad (2.5)$$

Bu denklemlerdeki parametrelerin açıklaması aşağıdaki gibidir.

P_{in} = Giriş gücü

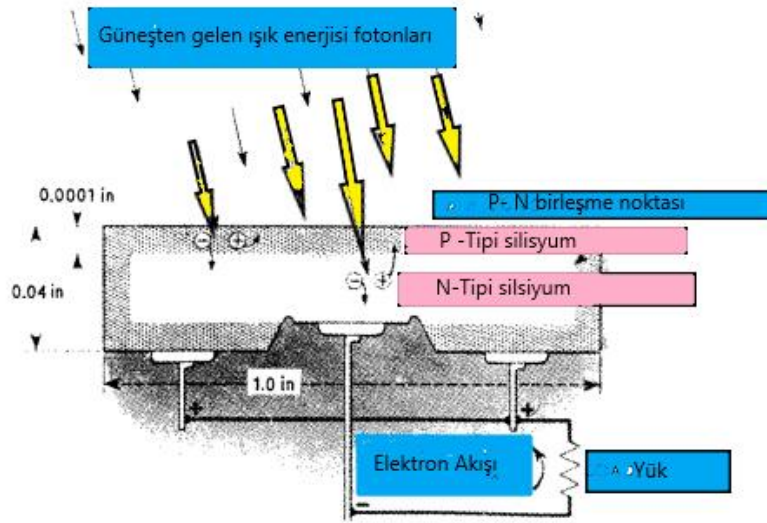
V_{oc} = Açık devre gerilimi

I_{sc} = Kısa devre akımı

FF= Dolum faktörü

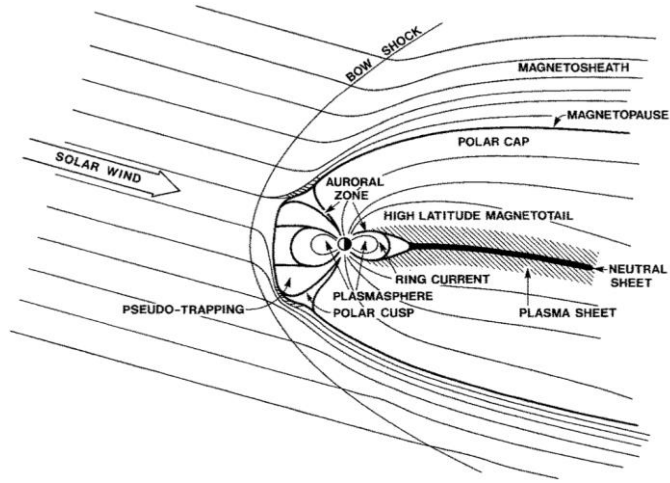
2.6. Radyasyon Etkileşmeleri

Fotovoltaik hücre çalışmalarının geçmişi çok eski tarihlerde başlamasına rağmen, ilk pratik yarıiletken cihazın üretimi 1950'lerin başında Bell Laboratuvarları'nda Chapin, Fuller ve Pearson'a atfedilir [17]. Şekil 2.14'de ilk silisyum güneş pili görülmektedir.

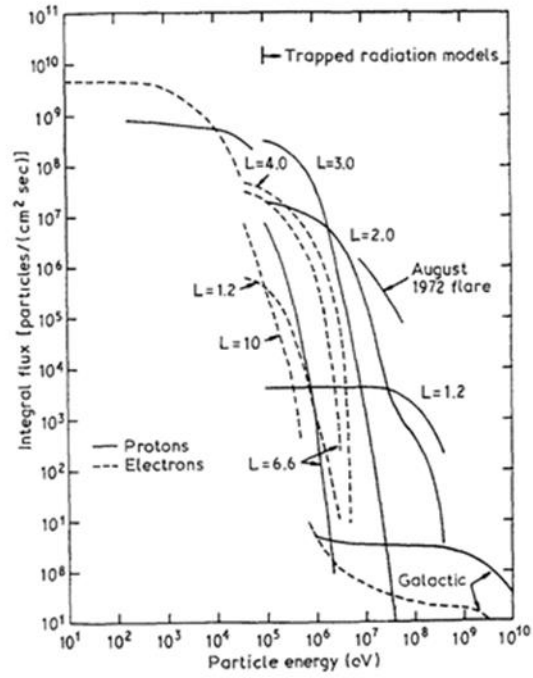


Şekil 2. 14. İlk silisyum güneş pili

Bu cihazlar n tipi silisyum yapı ile % 6'lık bir verimliliğe sahipti. İlerleyen yıllarda güneş pilleri güç sistemleri olarak uydularda kullanılmaya başlandı. Uydularda kullanılmaya başlanmasıyla radyasyon hasarı sorunu ortaya çıktı. Bir uydu üzerinde bulunan güneş pili dünyanın elektromanyetik alanına hapsolmuş elektronlar ve protonların yüksek enerjili aktivitesi nedeniyle bu parçacıklar tarafından bombardımana tutulur [18]. Şekil 2.15'de ve Şekil 2.16'da manyetosferdeki elektron ve proton spektrumları gösterilmiştir.



Şekil 2. 15. Manyetosferdeki elektron ve proton spektrumları [20]



Şekil 2. 16. Manyetosferdeki elektron ve proton spektrumları [20]

Radyasyonun malzemeler ve aygıtlar üzerindeki bozma etkisinin sebebi, enerjik ve hızlı kütleli parçacıklardan dolayı meydana gelir. Bu parçacıklar elektronlar, nötronlar, protonlar ve iyonlardır. Bu parçacıkların kaynağı, parçacık hızlandırıcıları, doğal uzay radyasyonu, nükleer reaksiyonlar, radyoaktif kaynaklar veya gama ışınları tarafından üretilen elektronlar gibi ikincil mekanizmalar olabilir. Bu parçacıklar kütle, enerji ve yüke sahip oldukları için malzemelerle çeşitli etkileşime girebilirler. Bu etkileşimlerden baskın olanları şunlardır: Atomik elektronlarla esnek olmayan çarpışmalar, atomik çekirdekli elastik olan çarpışmalar ve atomik çekirdekli esnek olmayan çarpışmalardır [19].

Atomik elektronlarla esnek olmayan çarpışma, bu tür çarpışmalarda genellikle enerjik yüklü bir parçacık bir soğurucuda kinetik enerjisini kaybeder. Bu çarpışma sonucunda elektronlar uyarılmış (uyarılma) bir duruma ya da bağlanmamış (iyonlaşma) bir duruma geçiş yapar.

Atomik çekirdekli elastik olan çarpışmalar, bu çarpışmada ise enerjik yüklü parçacıklar Rutherford saçılımı yoluyla atom çekirdeğinin pozitif yükü ile Coulomb etkileşimine sahiptirler. Bazı durumlarda atoma aktarılan enerji miktarı onu kristal bir kafes içindeki konumundan çıkaracaktır. Yer değiştirmiş bu atom daha sonra malzemenin diğer atomları ile benzer çarpışmalara girebilir.

Atomik çekirdekli esnek olmayan çarpışmalar, radyasyon hasarı için önemli birkaç süreci içerir. Oldukça yüksek enerjili protonlar atom çekirdeği ile esnek olmayan çarpışmalar meydana getirir. Bu süreçte enerjiye sahip proton, çekirdek ile etkileşime girer ve çekirdeği uyarılmış ya da aktive edilmiş bir duruma getirir. Uyarılmış çekirdek enerjik nükleonlar yayar ve geri tepen çekirdek kafes bölgesinde yer değiştirir. Geri tepilen bu çekirdek daha fazla yer değiştirmeye neden olur. Bu süreç dökülme olarak da adlandırılır. Termal enerjinin nötronları ve çekirdekler arasındaki çarpışmalarda bu gruba dahil edilebilir. Ancak bu çarpışmalar güneş dizisi için çok az öneme sahiptir. Güneş hücrelerini ilgilendiren başlıca radyasyon hasarı türleri iyonlaşma ve atomik yer değiştirmedir.

2.6.1. İyonlaşma

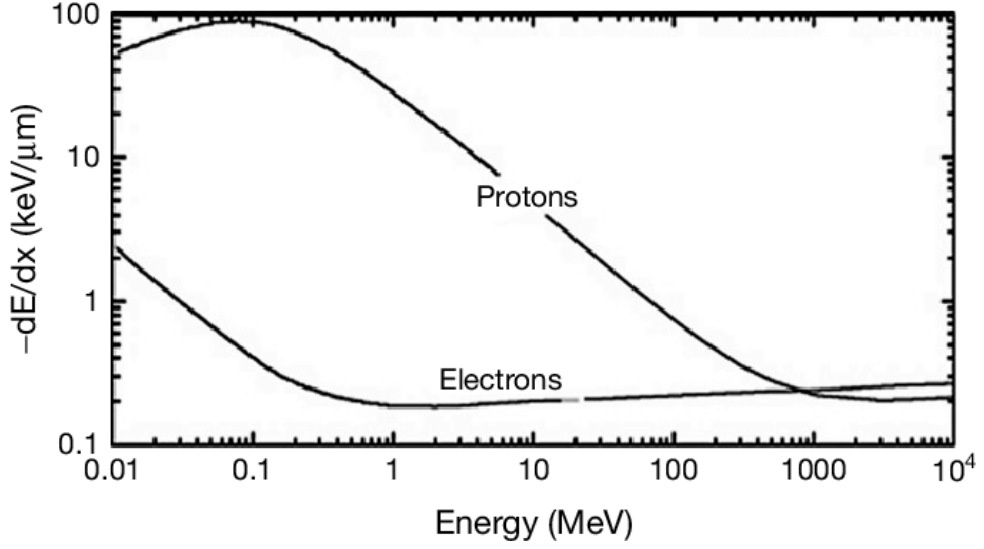
Bir atom veya molekülü iyonla dönüştürme sürecine iyonlaşma ya da iyonizasyon denir. Bu durum elektron alıp verme ile sağlanır. İyonlaştırıcı radyasyon yoğunluğunun ölçü birimi röntgendir. Bu radyasyon miktarı havada 2.58×10^{-4} coulomb / kilogram yüke neden olacaktır. Bu birim kütle başına absorbe edilmiş enerjidir. Yakın zamanda ise kabul edilen birim SI sistemine göre 1 joule / kg 'dir. Bu 1 Gray (Gy) 'e karşılık gelir [21].

$$1 \text{ Gray (Gy) } = 1 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} \quad (2.6)$$

Absorbe edilmiş doz kavramının kullanılmasıyla, çeşitli radyasyon riskleri ilgili malzemedeki iyonlaşma hasarının derecesini yansıtacak şekilde absorbe edilmiş doz birimlerine düşürülebilir. Bu kavram tüm elektron, gama ve x- ışını radyasyonlarına uygulanabilir. Elektron için aşağıdaki denklemden hesaplama yapılabilir [22].

$$\text{Doz} = 1.6 \times 10^{-8} \frac{dE}{dX} \left(\frac{\text{MeV-cm}^2}{\text{gm}} \right) \varphi \left(\frac{e}{\text{cm}^2} \right) \quad (2.7)$$

Burada $\frac{dE}{dX}$ durdurma gücüdür. Bu uygulama proton ışınlamalarında uygulanırken dikkatli olunmalıdır. Bazı malzeme türlerinde ağır partiküllerin neden olduğu iyonlaşmanın etkileri partikül yolunun çevresiyle sınırlıdır. Söz konusu soğurucu malzemede protonlar tarafından homojen iyonlaşma üretilirse, proton akışları soğurulmuş dozlara dönüştürülebilir ve diğer radyasyonlardan alınan dozlarla toplanabilir[22].Çeşitli enerjilerin protonları için durdurma gücü ve menzilin varyasyonları. Şekil 2.17 'de gösterilmiştir. Buradaki veriler silisyum içindir.



Şekil 2. 17. Proton ve elektronların durdurma gücü

Radyasyon, güneş pilleri malzemelerini iyonizasyonla ilgili çeşitli etkilerle etkileyebilir. Bu duruma örnek olarak, güneş pillerinin camlarında zamanla geçirgenlik azalır ve bu radyasyonun bir etkisidir. Ayrıca cam ya da oksit malzemelerde koyulaşma meydana gelir. Radyasyon, organik maddelerde iyonizasyonla ilgili birçok etki yaratır. Bu değişikliklerin tümü iyonların, serbest elektronların ve serbest radikallerin üretiminden kaynaklanır. Bu eylemlerin bir sonucu olarak, şeffaf polimerler koyulaşır ve ana zincir elemanları arasındaki çapraz bağlanma, mekanik özellikleri büyük ölçüde değiştirebilir. Güneş hücrelerinde polimerik malzemelerin kullanımı, bu malzemelerdeki iyonizasyonla ilişkili radyasyon etkileri hakkında bilgi sahibi olmasını gerektirmektedir [19].

2.6.2. Atomik Yer Değiştirmeler

Çarpışmanın neden olduğu hızlı elektron ve protonlardan kaynaklı enerji kaybı bir absorbe edicinin veya hedef malzemenin elektronlarıyla yapılan işlemler, harcanan enerjinin büyük bir bölümünü oluşturur. 0.1 - 10 MeV arasındaki elektron ve protonlar için bu elektron çarpışmaları bir soğurucudaki parçacık aralığını belirler. Bu gerçeğe rağmen, uzay ortamında silisyum güneş pillerini kalıcı olarak bozan

hasarın temelinde farklı tipte bir çarpışma yatmaktadır. Bu hasarın ana sebebi, silisyum atomlarının kristalinin soğurucudaki hızlı parçacıklar tarafından kafes bölgelerinden yer değiştirmesidir. Bu yer değiştiren atomlar ve bunlarla ilişkili boşluklar başka reaksiyonlara girer ve son denge taşıyıcı konsantrasyonlarında ve azınlık taşıyıcıların ömründe önemli değişikliklere neden olan kararlı kusurlar oluşturur.

Enerjik protonlar tarafından silikonda yer değiştirme hasarının üretimi, önemli ölçüde farklıdır. Çünkü yer değiştirme enine kesitleri, hızlı elektronlar için olanlardan birkaç kat daha büyüktür ve proton enerjisi ile hızla değişir [19].

2.7. Silisyum Güneş Hücresi Hasarı Teorisi

Temel güneş pili denklemleri ışınlama sırasında meydana gelen değişiklikleri tanımlamak için kullanılabilir. Bu yöntem ile üretilen ışık, seri direnç, şönt direnci v , doyma akımı, ve diyot faktörünün temel diyot parametrelerindeki değişikliklerle ilgili verileri gerektirir. Bu yöntem mantıksal bir analiz olsa da, çoğu araştırma , yukarıdaki parametrelerdeki varyasyonları belirlemek için yeterli veri yoktur. Güneş pili hasarını, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğundaki değişiklikler açısından karakterize etmek de mümkündür. Difüzyon uzunluğu deneysel olarak ölçülebildiğinden ve güneş pilinin tabanındaki yer değiştirme hasarının miktarının bir ölçüsü olduğundan, bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu şemanın birkaç pratik ve temel sınırlanması vardır. En ciddi sınırlamalar, düşük enerjili proton hasarının difüzyon uzunluğu açısından değerlendirilmesini içerir. Çok düşük enerjili protonlar, bir güneş hücresinin bağlantı alanı şarj bölgesinde önemli yer değiştirme hasarı verir. Bu hasar azınlık difüzyonla ilgili olmayan mekanizmalarla diyot doygunluk akımını (I_0) ve kalite faktörünü (n) artırır. Bu hasar, hücre difüzyon uzunluğunu değiştirmeden güneş pili Voc'ta ciddi azalmaya neden olabilir. Bu problemlerden dolayı güneş pilindeki radyasyon etkilerini ortak parametreler açısından değerlendirmek için yöntemler geliştirilmiştir [19].

2.8. Proton Enerjisinin Güneş Pili Bozulmasına Etkisi

1 MeV elektron akısına eşdeğer hasar kavramı, proton ışınlanmasının etkilerine kadar genişletilebilir. Proton enerjisinde sorun daha karmaşıktır. Çünkü 5 MeV'nin altındaki proton aralığı etkisi normal güneş pili kalınlığından daha azdır. Bu nedenle düşük enerjili protonlar tek tip olmayan hasar üretir. Bu durum proton enerjisi azaldıkça birim yol uzunluğu başına üretilen hasarın artmasıyla daha da karmaşık hale gelmektedir. Sonuç olarak güneş enerjisindeki düşük enerjili bir proton durdurulduğunda proton yolunun sonunda büyük miktarda hasar meydana gelir. 5 MeV'den daha büyük enerjilere sahip protonlar söz konusu olduğunda güneş pillerine verilen hasar nispeten aynıdır. Bu yüksek enerji aralığında, genel eşdeğerlik doğrudan uygulanabilir. Daha düşük proton enerjilerinde, genel eşdeğerlik kavramı uygulanamaz fakat sınırlı bir şekilde kullanılabilir [19].

Energileri yaklaşık 10 MeV' den daha az olan uzay protonlarının işlenmesinde sınırlı nüfuz etmeleri ve artan hasar üretimleri nedeniyle iki sorun ortaya çıkar. Silisyum güneş hücresi I_{sc} , V_{oc} ve P_{max} ' a dayanan bağıl hasar sabitlerinin farklı olması ve düşük proton enerjilerinden uzaklaşması bir problemdir. İkinci sorun düşük enerjili proton hasarının deneysel olarak sadece normal radyasyon ışıması için karakterize edilmesidir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu tez araştırmasında çok kristalli silisyum hücresi ile çalışmalar yapılmıştır. Çok kristalli silisyum hücresinin radyasyona maruz bırakılmadan önce elektriksel değişkenleri incelenmiştir. Daha sonra aynı çok kristalli silisyum hücresi proton ışınlanmasına maruz bırakılarak tekrar elektriksel değişkenler incelenmiştir. Çok kristalli silisyum hücresinin önce aydınlık ortamda solar simülatör cihazı yardımı ile akım, gerilim ve güç değişkenleri ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda ortaya çıkan veriler ile akım-gerilim (I-V) ve güç - gerilim (P-V) eğrileri çizilmiştir. Bu işlem karanlık ortam için de tekrarlanmıştır.

Aynı çok kristalli silisyum hücresi bu kez Proton Hızlandırıcı Tesisi 'nde 395 Gy dozunda proton ışınlanmasına maruz bırakılmıştır. Işınlamaya maruz bırakılan çok kristalli silisyum hücresi daha sonra solar simülatör cihazında aydınlık ve karanlık ortamlardaki akım, gerilim ve güç değişkenleri ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda ortaya çıkan veriler ile akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P - V) eğrileri çizilmiştir. Bu işlemler sonucunda çok kristalli silisyum hücresinin radyasyon öncesi ve sonrası ortaya çıkan değişimler karşılaştırılmıştır.

3.1. Solar Simülatör Cihazı

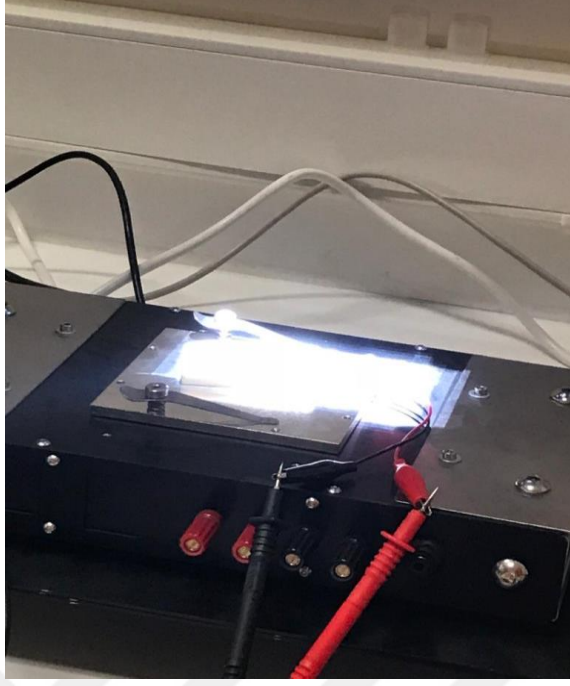
Yapılan bu tez araştırmasında SL - 60A - WS solar simülatör cihazı kullanılmıştır. Simülatör cihazı güneş ışığına en yakın aydınlatmayı sağlar. Bu sebeple yapay güneş olarak da adlandırabiliriz. SL serisinin maksimum hedef alanı 60 mm × 60 mm 'dir. Cihaz Giresun Üniversite Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve Araştırma Merkezinde bulunur ve Mühendislik Fakültesine aittir. Solar simülatör cihazı temelde 3 ana ekipmandan meydana gelir. Bunlar: ışık kaynağı ve ilgili güç kaynağı, sınıflandırma gereksinimini karşılamak için optik ve filtre, simülatörü çalıştırmak parlaklığı

ayarlamak için bilgisayar destekli ünite. Şekil 3.1’de laboratuvarıda bulunan solar simülatör cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Solar Simülatör Cihazı

Şekil 3.2’de solar simülatör cihazına silisyum güneş hücresi yerleştirilmiş ve ölçümler alınmıştır.



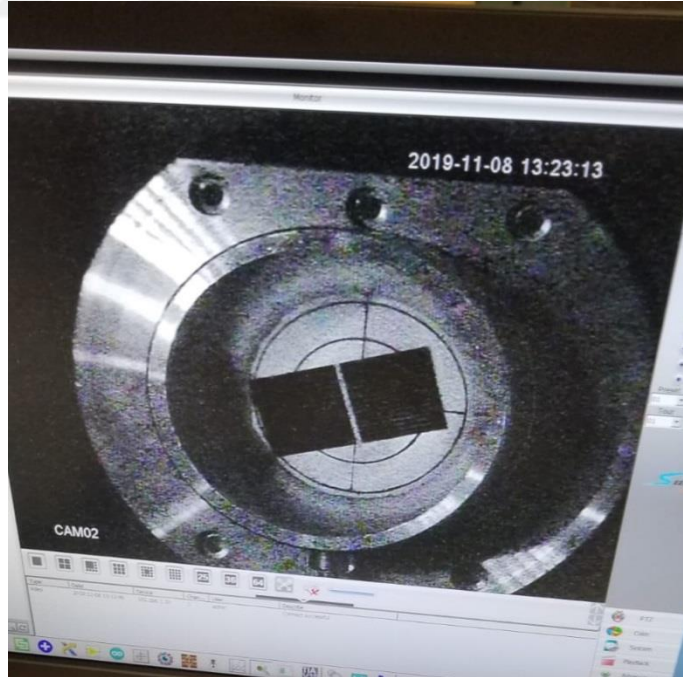
Şekil 3. 2. Solar simülatör cihazı deney düzeneği

Şekil 3.3 'de solar simülatör cihazının kontrol ekranı gösterilmiştir. Bu ekranda fanı ve lambayı açma-kapama bölümü yer almaktadır. Ayrıca deney sırasında kullanılacak ışığın şiddeti de yine bu alandan ayarlanır.



Şekil 3. 3. Solar simülatör cihazının dokunmatik ekranı

Şekil 3.4’de ışınlanmak üzere olan hücre gösterilmiştir.

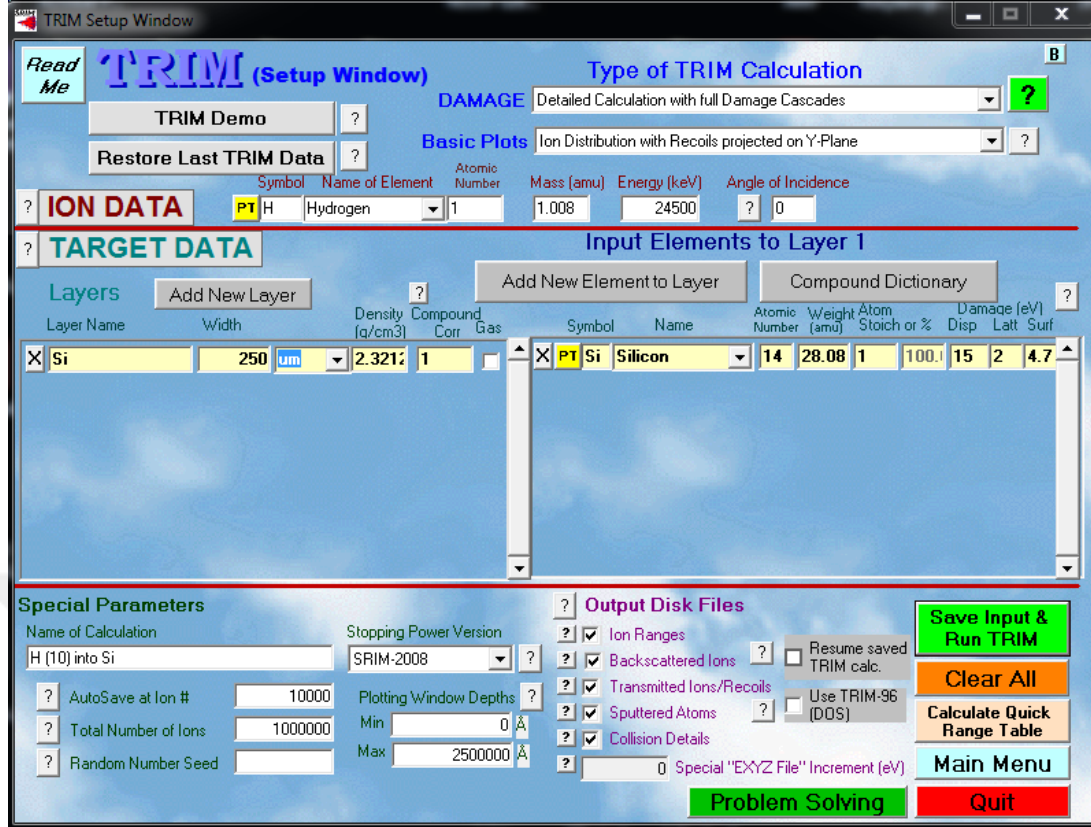


Şekil 3. 4. Işınlanmak üzere olan silisyum güneş hücresi

3.2. Srim – Trim Simülasyon Programı

SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) madde ile iyon etkileşmelerini incelemek için kullanılır. Simülasyon programının amacı madde içerisindeki iyonların menzili ve durdurulmasını sağlar. SRIM programının çekirdeğini ise TRIM programı oluşturur. TRIM ise madde içindeki iyonların geçişini inceler. Bu iyonların hedef madde içerisindeki geçişi aşamasında gerçekleşen etkileşimlerinin sonuçlarını grafikler ve sayısal verilerle ifade eder. Bu iki programı 1990 yıllarında James F. Ziegler ve Jochen P. geliştirmişlerdir. SRIM Monte Carlo simülasyon programından yararlanarak almıştır. İyon tipleri 10 eV ve 2 GeV arasında enerjiye sahip ve bir ya da birkaç materyal hedef katman seçilirse, iyonun katı içinde dağılımını üç boyutlu bir şekilde gösterir. Buna ek olarak iyon menzilin, iyonun yaptığı ışımaları, hedef atom içerisindeki çarpışmaları ve bu çarpışma sonunda ortaya çıkan boşlukları detaylı bir şekilde gösterir. Bu tez çalışmasında TRIM simülatör programından yararlanılmıştır. Şekil 3.5’de TRIM programının ana giriş ekranı görülmektedir. Bu ekranda (add new element to layer) girdisinden malzemenin türüne göre periyodik tablo aracılığıyla element seçilir. Malzeme olarak silisyum hücresi kullanıldığı için periyodik tablodan silisyum elementi seçilmiştir. Daha sonra proton ışınlamasına maruz bırakılacak bu hücre için Ion Data kısmından Hidrojen atomu seçilir ve diğer tüm veriler girildikten sonra hesaplamalar başlatılır.

TRIM (Transport of Ions in Matter), sadece iyonların madde içindeki aralığını değil, aynı zamanda yavaşlama sürecinde hedefe verilen hasarın diğer birçok yönünü de detaylandıran çok karmaşık bir programdır. Simülasyon ile hedefe nüfuz eden iyonları görmenizi sağlar. Ayrıca geri tepme kaskadlarını ve birbirine karışan hedef atomları gösterir. İyon ve hedef atom arasındaki her etkileşme fizikinin değerlendirmelerini yapmak için her seferinde bir iyon için hesaplama yapar. Hesaplama için doğruluk iyon sayısı ile belirlenir.

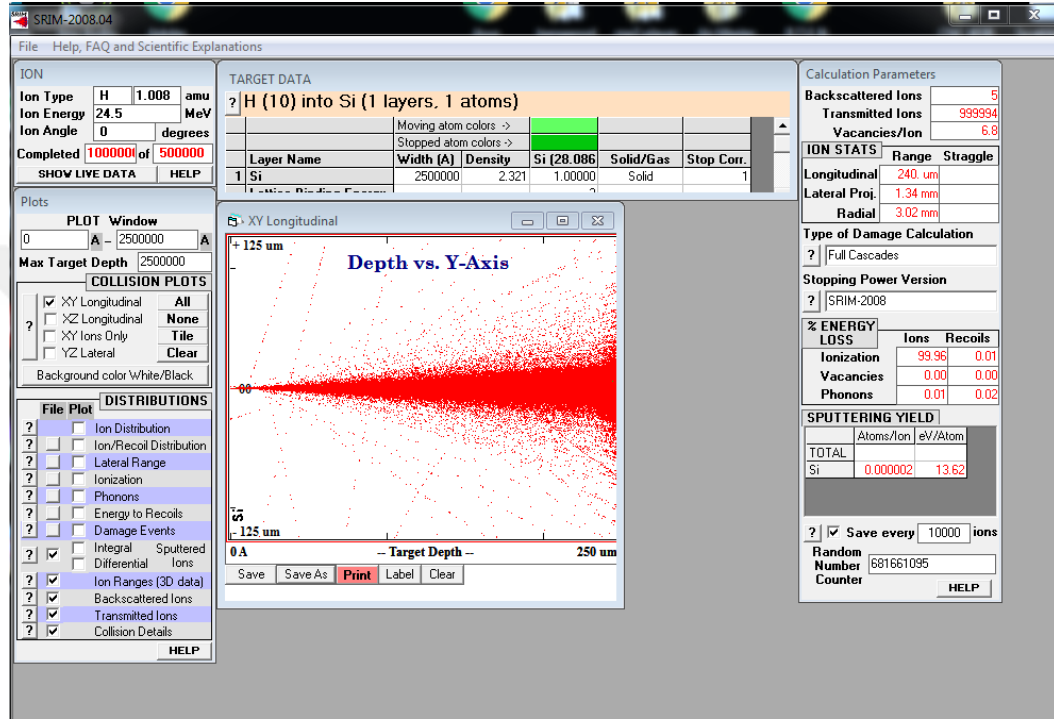


Şekil 3. 5.TRIM giriş ekranı

İyon izi, iyonun boşluk oluşturduğu yerleri (bir silikon atomunu kafes bölgesinden uzaklaşması) ve silikon atomlarının geri tepmesinin neden olduğu boşlukları gösterir. İyon sürekli olarak hedef üzerinde hasar oluşturur (kırmızı noktalar). Ayrıca geri tepme silisyum atomlarının geri tepme kaskadına neden olduğu kümelerde oluşur.

İyon / hedef atom kütleleri oranı, hedef atoma aktarılan enerji değerini etkiler. İyon / hedef atom kütleleri oranı çok farklıysa, hedef atoma aktarılan enerji çok daha az olur. Proton bir silikon atomuna her sert çarptığında, protonun kütlesi ve silisyum atomunun kütleleri oranından dolayı, enerjisinin büyük bir bölümünü aktaracaktır.

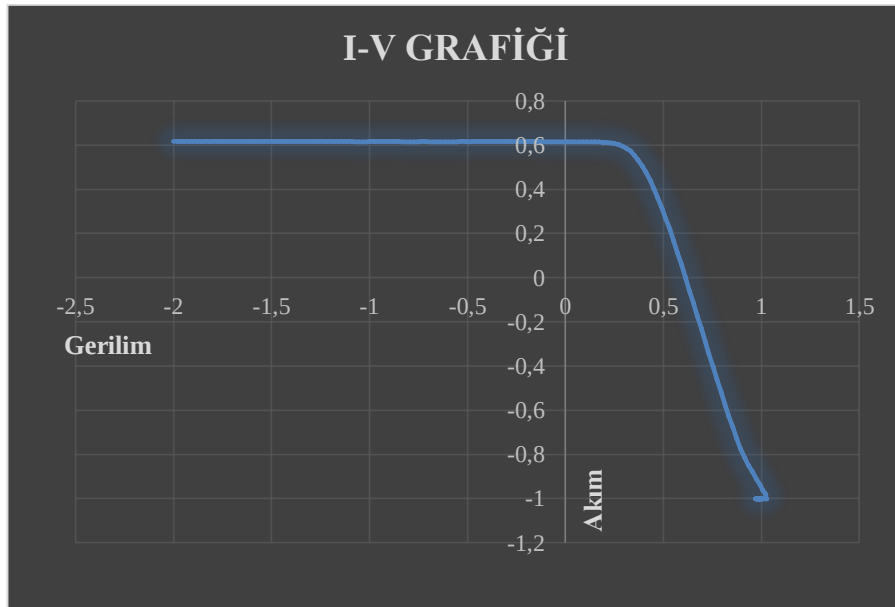
Kırmızı noktadan görüldüğü gibi, iyonun çarpışmasında bir hedef atomla oluşturulan bir boşluk vardır. Hedef atom daha sonra geri teper ve boşluklara neden olan çarpışmaları meydana getirir. Şekil 3.6'da SRIM-TRIM simülasyon programının hesaplama ekranı gösterilmektedir.



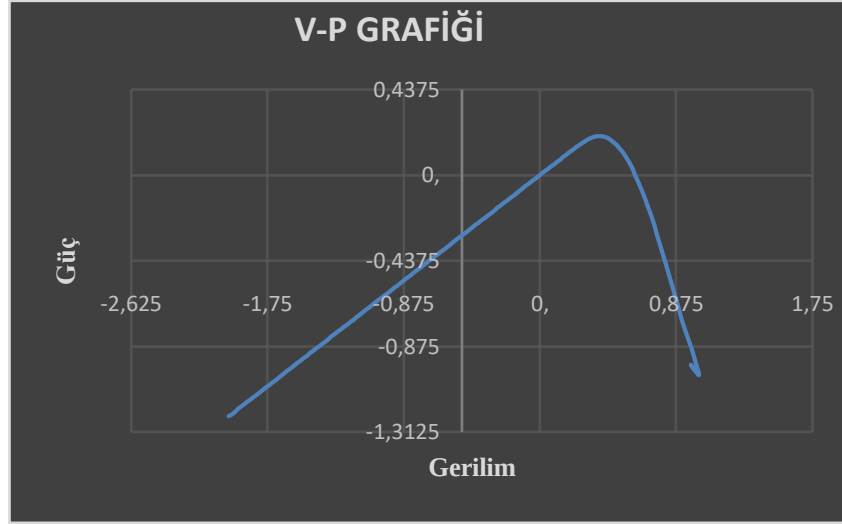
Şekil 3. 6. SRIM -TRIM simülasyon programının hesaplama ekranı

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

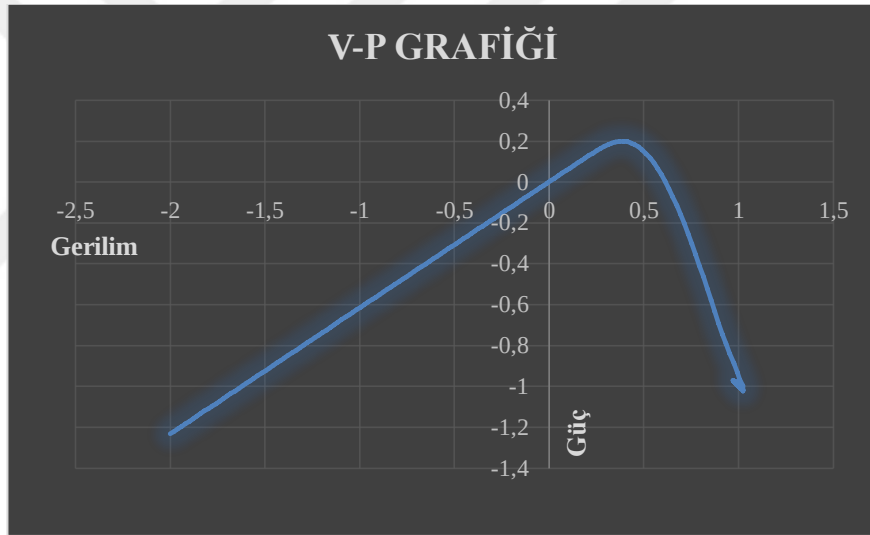
Şekil 4.1. ve 4.2.'de silisyum hücresinin ışınlanmadan önce (radyasyona maruz kalmadan) aydınlık ortamda I - V ve V - P grafikleri gösterilmektedir. Akım-gerilim grafiği incelendiğinde silisyum hücresinin kısa devre akımının (I_{sc}) 615,960 mA olduğu görülmektedir. Açık devre gerilimi (V_{oc}) ise yine aynı grafikten 613,035 mV olarak belirlenir. Güç- gerilim grafiğinden maksimum akım değeri (I_{MP}) 534,102 mA ve maksimum gerilim değeri (V_{mp}) 371,855 mV olarak bulunmuştur. Maksimum akım ve maksimum gerilimin çarpımı sonucu maksimum güç ortaya çıkar. Denklem (2.2) 'den maksimum güç 198,609 mW olarak hesaplanmıştır. Işınlanmamış silisyum hücresinin verimi denklem (2.4) 'den % 15,59 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 1. 0 Gy ışınlanmamış silisyum hücresinin akım-gerilim(I-V) grafiği



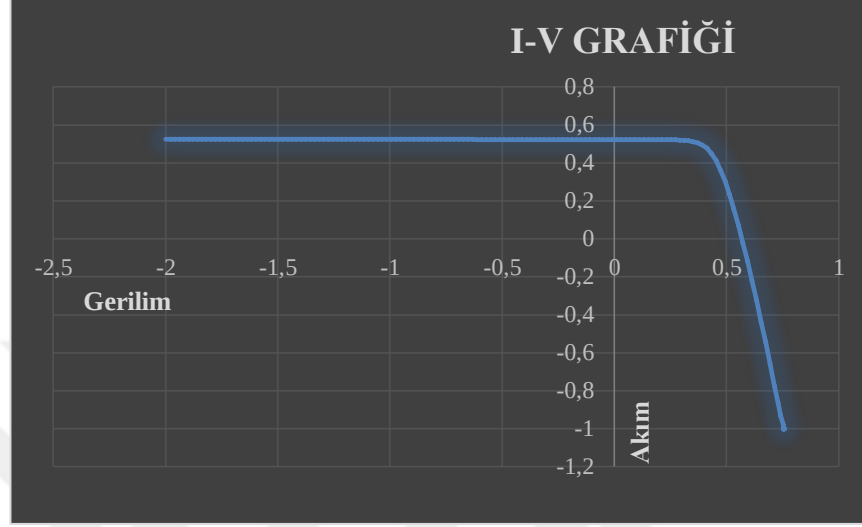
Şekil 4. 2.0 Gy ışınlanmamış silisyum hücresinin akım - gerilim (I-V) grafiği



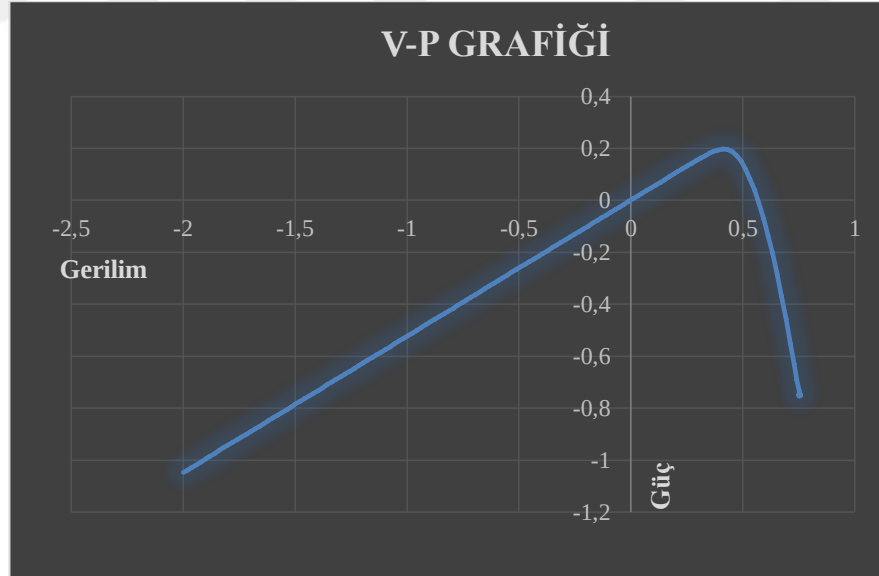
Şekil 4. 3. 0 Gy ışınlanmamış silisyum hücresinin gerilim-güç (V-P) grafiği

Şekil 4.3'de 395 Gy ışınlanmış silisyum hücresinin aydınlık ortamda akım - gerilim (I-V) ve Şekil 4.4 'de gerilim - güç (V-P) grafiği gösterilmiştir. Akım-gerilim grafiği incelendiğinde silisyum hücresinin kısa devre akımının (I_{sc}) 522,334 ve açık devre geriliminin (V_{oc}) 572,947 mV olduğu görülmektedir. Şekil 4.4' deki grafikten ise maksimum akım (I_{MP}) değerinin 475,622 mA olduğu maksimum gerilimin ise 412,062 mV olduğu görülmektedir. Maksimum akım ve maksimum gerilimin

arpımı sonucunda bulunan maksimum g değeri ise 195, 986 mW 'dır. Işınlanmış silisyum hresinin verimi denklem (2.4) kullanılarak % 15,08 olarak hesaplanmıştır.

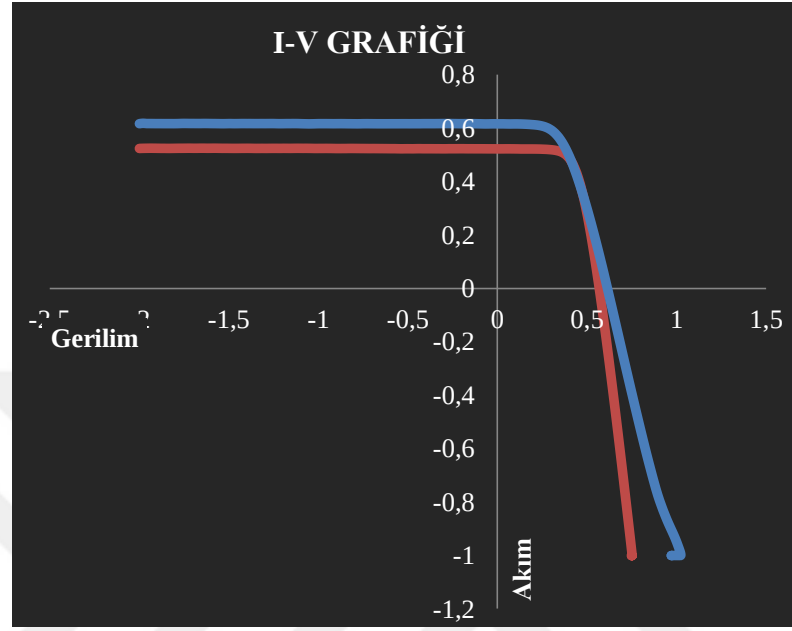


Şekil 4. 4.395 Gy ile ışınlanmış silisyum hresinin akım –gerilim (I-V) grafiği

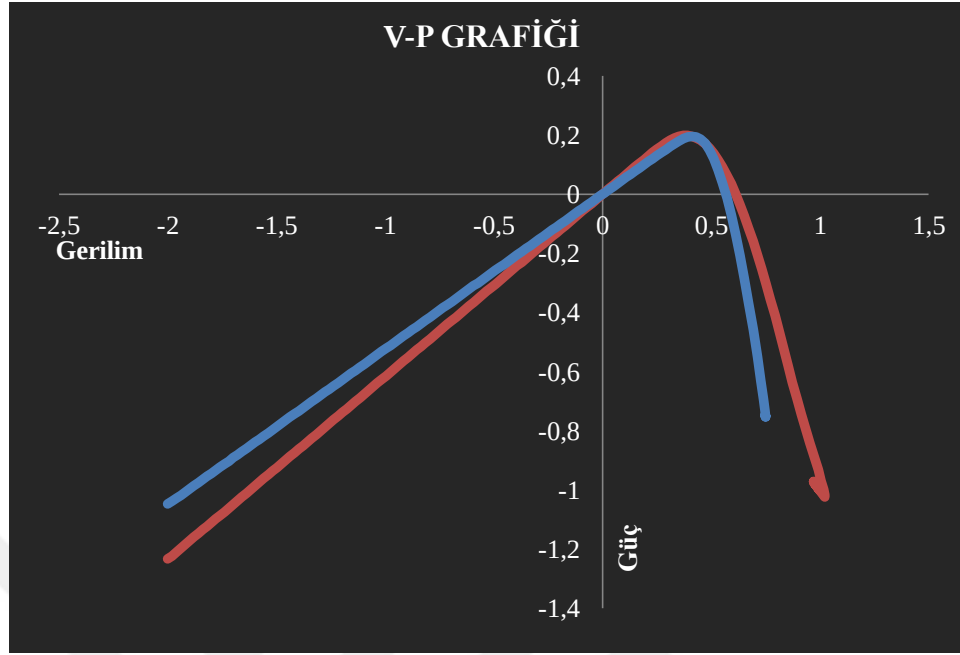


Şekil 4. 5. 395 Gy ile ışınlanmış silisyum gneş hresinin gerilim- g (V-P) grafiği

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 'de silisyum hücresinin radyasyon öncesi - sonrası için I-V ve V-P grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4. 6. Silisyum hücresi aydınlık ortamdaki akım-gerilim eğrileri: radyasyon öncesi (mavi) 395 gy ışınlanmış (kırmızı)



Şekil 4. 7.Silisyum güneş hücresinin aydınlık ortamda gerilim-güç (V-P) grafiği ışınlanmamış (kırmızı) 395 Gy ışınlanmış (mavi)

Grafik incelendiği zaman ışınlama öncesi silisyum hücresinin kısa devre akım (I_{sc}) değeri 615,960 mA bulunmuştur. 395 Gy ışınlanmış silisyum hücresinin kısa devre akımında 93,626 mA lik bir azalma söz konusudur ve ışınlanmış silisyum hücresinin kısa devre akımı 522, 334 mA olarak bulunmuştur. Bu azalma, proton radyasyonu bant aralığında ortaya çıkan yeni enerji seviyeleri azınlık taşıyıcılarının sayısını azaltmış olmasından dolayıdır.

Şekil 4.5.'de görülen grafiğe bakıldığında ışınlanmamış silisyum hücresinin açık devre gerilimi (V_{oc}) 613,035 mV olarak görülmektedir. 395 Gy ışınlanmış silisyum hücresinin açık devre gerilimi ise 572,947 mV olarak ölçülmüştür. Bu durumda 40,088 mV'luk bir azalma olduğu görülmektedir. Silisyum hücresine uygulanan proton ışınlaması sonucunda ortaya çıkan radyasyon yeniden birleşme merkezlerinin sayısını arttırarak açık devre geriliminde azalmaya sebep olmuştur.

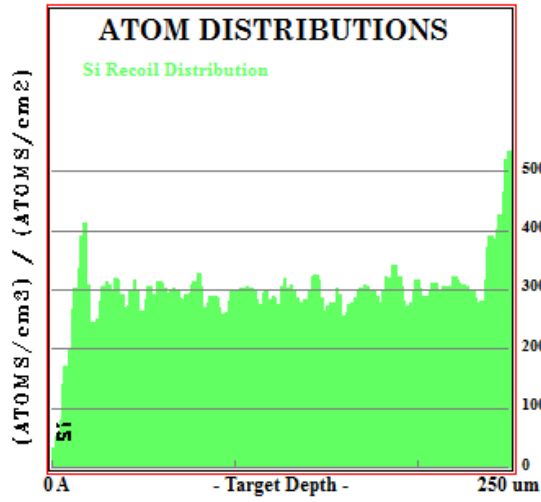
Şekil 4.6.'da ışınlanmamış silisyum hücresinin maksimum gücü (P_{max}) 198,609 mW olarak bulunmuştur. 395 Gy ışınlanmış silisyum hücresinin maksimum 195, 986 mW olarak ölçülmüştür. Bunun sonucunda maksimum güçte 2,623 mW değerinde bir azalma söz konusudur. Derin seviyelerdeki azınlık taşıyıcıları kısa ömürlü olduklarından yapının çıkış terminallerine yetişmeden yeniden birleşme merkezleri tarafından tuzaklanmış ve güneş pilinin güç parametresi gibi diğer performans değerlerini de azaltmıştır. Tablo 4.1'de ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Silisyum hücresi ışınlama öncesi ve sonrası elektriksel parametreler

Uygulanan Doz (Gy)	Alan (cm ²)	V _{oc} (mV)	(I _{sc}) (mA)	P _{max} (mW)	η (%)
0 Gy	13	613,035	615,960	198,609	15,27
395 Gy	13	572,947	522,334	195,986	15,08

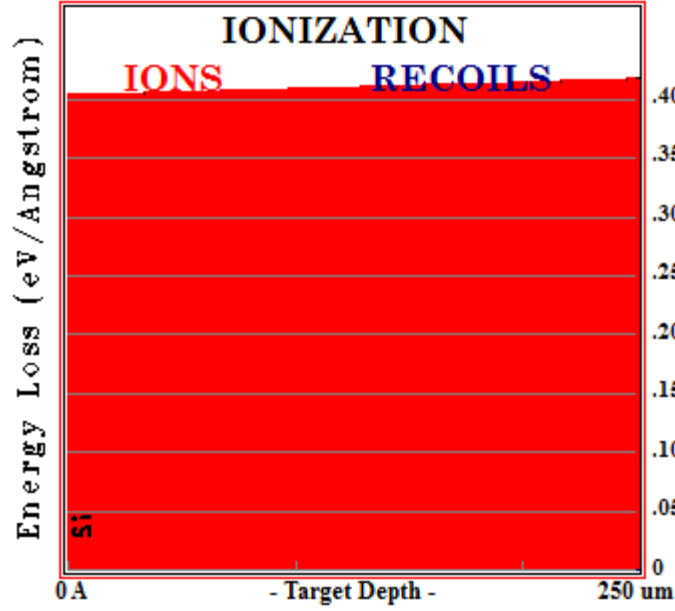
SRIM / TRIM simülasyon programı ile bir iyonun, karışık yapıdaki hedefin içine yönlendirilmesiyle iyonun son dağılımı belirlenebilir. Tez çalışmasında, proton demetiyle etkileşen silisyum hücrenin yapısındaki değişime bakarak, belirli bir derinlik ve konsantrasyonda atomları bir hedefe implante ederek gereken iyonların enerjisi ve dozunu hesapladık. Silisyum hücrenin yüzeyinin yaklaşık 253.80 mikrometre altında tepe konsantrasyon derinliğine sahip olduğu hesaplanmıştır. Bu değere karşılık gelen proton enerjisi 5,5 MeV'dir.

İyon/geri tepme dağılımına baktığımız zaman Şekil 4.8'de silisyum geri tepme dağılımı hesaplanmıştır. Silisyum atomlarının boşluk oluşturduğu durum yani hedefe verilen hasar katkısı grafik üzerinde görülmektedir. Silisyum geri tepme dağılımının zirvesine yakın değeri $0,5 \times 10^3$ 'tür. Silikonun yoğunluğu yaklaşık $4,977 \times 10^{22}$ atom cm³'dür. Şekil 4.8'de 10^{20} proton atom/cm² lik bir doz için, hasar dağılımının tepe değerindeki hedef atom başına ortalama yer değiştirme görülmektedir.



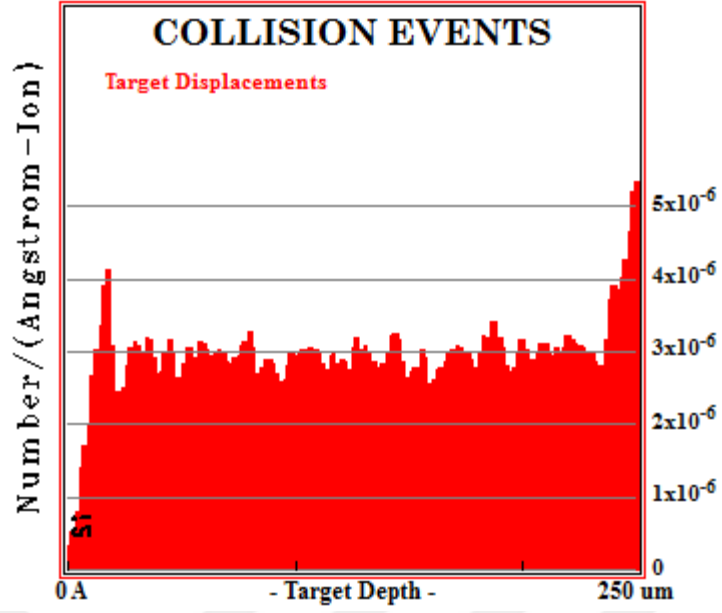
Şekil 4. 8.İyon Menzilleri ve Geri Saçılan Atom Dağılımı Alanı

İyonlar hedef maddenin içinden geçtiği zaman hızlı bir şekilde maddenin elektronlarıyla etkileşirler. Bu etkileşim normalde çok karmaşıktır. SRIM/TRIM simülasyon programı bu olayı ayrıntılı bir şekilde incelememize yardımcı olur. Şekil 4.9'da gelen iyonlardaki ve geri tepme yapan hedef atomlardaki iyonlaşmayı gösterir. İyonlar geri tepen silikon hedef atomlarından çok daha hızlı hareket ederler, bu nedenle iyonlar hedef elektronlardan daha fazla enerji kaybeder. Hedef elektronlar ile etkileşim sırasında iyon enerji kaybına uğrar. Bu enerji kaybı Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Enerjinin bu şekilde kaybolması hedef madde içinde hasar oluşmasına neden olur. Hedef madde içerisindeki yüzeyde mikroskobik hasarlara neden olmasının yanı sıra atomun geri saçılmasına neden olur. Tüm bunların sonucunda ise hedef madde içerisinde elektronlar kayıplar oluşturur.



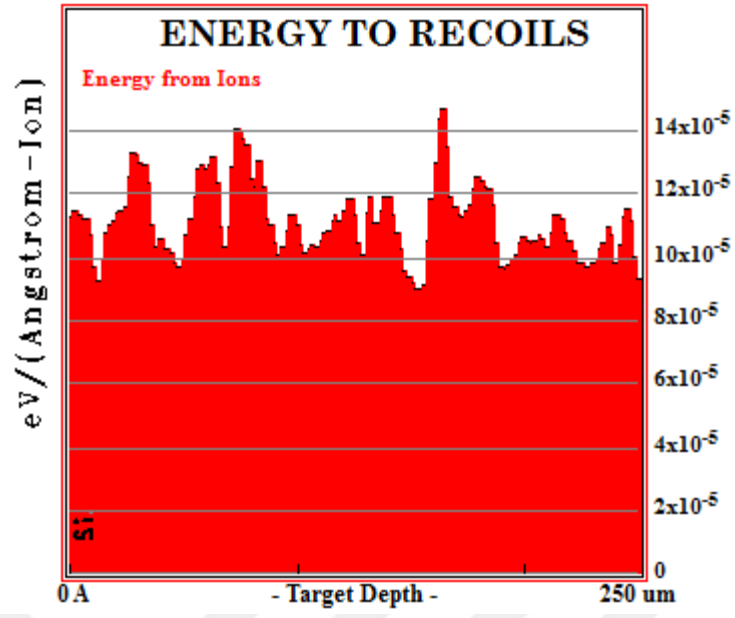
Şekil 4. 9.İyon ve geri tepen hedef atomdaki iyonlaşma

Hedef çekirdek ile iyon çarpıştığı zaman atoma enerji kazandırılır. Bu enerji atomu bulunduğu noktadan hareket ettirmek için minimum enerji miktarının belirtir. Bu enerji çarpışan atoma transfer edilir ve hedef atom bulunduğu bölgenin dışına itilmiş olur. Bu durumda itilen atomun yerinde bir boşluk meydana gelir ve bu boşluk hemen eski haline dönemez . Fakat atoma aktarılan enerji yer değiştirme enerjisinden daha az olursa atomun fononuna transfer ettiği geri saçılma enerjisi bulunduğu alana geri dönmesini sağlar. TRIM programı tarafından her bir atom için yer değiştirme enerjisi ve hedef madde içerisindeki boşluklar ayrı ayrı hesaplanır. Oluşan boşlukların sayısı her hedef atom için belirlenen yer değiştirme enerjisine bağlıdır. Eğer aktarılan enerji yer değiştirme enerjisinden daha büyük ise o zaman aktarılan enerji geri saçılma enerjisi olarak kullanılır. Şekil 4.10'da çarpışan iyonlar tarafından oluşturulan yeri değişmiş hedef atomların sayısını gösterir. Bu grafikte sadece iyonların çarpışması sonucu meydana gelen yeri değişmiş hedef atomların sayısı değil aynı zamanda geri saçılan hedef atomlarda hesaba katılmıştır. Toplam hedef yer değiştirmeleri hedef kafes bölgesinden kopan atomların sayısını belirler.



Şekil 4. 10. Toplam hedef yerdeğiştirme

Hedef hasarın nasıl oluştuğunu gösteren diğer bir grafik geri tepme enerjisidir. Geri tepme enerjisi olarak iyonlardan gelen enerji Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Hedef atomlara aktarılan enerji, 250 mikrometre’ye kadar oldukça sabittir. Geri tepme kaskadlarına ne kadar enerji aktarıldığını bulmak için, “ % Enerji Kaybı” değerlerine baktığımızda, geri tepmelerin biriktirdiği enerjiyi toplayabiliriz: $\sim \%0,02 + \%0,02 = \%0,04$. Böylece iyon, enerjisinin $\%99,96$ ’sını doğrudan hedefe bırakır ve $\%0,04$ ’ünü geri tepme kademelerine bırakır.



Şekil 4. 11.İyondan Geri Saçılan Atomlara Aktarılan Enerji Alanı

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, silisyum hücresinin proton demetiyle ışınlaması öncesi ve sonrası elektriksel karakterizasyonları değerlendirilmiştir. Silisyum hücresi yaklaşık 25 MeV enerjili proton demetiyle ışınlanmış ve elde edilen değerler yardımıyla radyasyon sonrası fotovoltaiik hücrenin elektriksel parametrelerdeki değişimleri incelenmiştir. Ayrıca SRIM/TRIM programı ile protonun silisyum hücresi üzerindeki meydana getirdiği hasar ile ilgili hesaplamalar yapılmış ve grafikler oluşturulmuştur. Radyasyon öncesi silisyum hücrenin kısa devre akımı 615,960 mA, açık devre gerilimi 613,035 mV, maksimum gerilim 371,855 mV ve maksimum akım değeri 534,103 mA olarak bulunmuştur. Maksimum güç değeri 198,609 mW olarak hesaplanmıştır. Buradan bu değer %15,59 hücre verimine neden olmuştur.

Yaklaşık 25 MeV'lik proton enerjisi ile ışınlanan silisyum hücreye 395 Gy'lik doz uygulanmıştır. Işınlama sonrası silisyum hücrenin kısa devre akımı 522,334 mA, açık devre gerilimi 572,947 mV, maksimum gerilim 412,062 mV ve maksimum akım 475,622 mA olarak hesaplanmıştır. Maksimum güç değeri 195,986 mW olarak hesaplanmıştır. Bu değer %15,08 hücre verimine neden olmuştur.

Işınlama öncesi ve sonrası silisyum hücrelerinin parametreleri kıyaslandığı zaman radyasyon dozu açık devre geriliminde azalmaya neden olmuştur. Işınlama sonrası radyasyon yeni enerji seviyeleri meydana getirmiş ve azınlık taşıyıcılarının sayısını azaltmıştır. Dolayısıyla açık devre akımı da azalmıştır. Uygulanan radyasyon yeniden birleşme merkezleri sayısını arttırmış ve dolayısıyla açık devre voltaj değerinde azalma meydana gelmiştir.

395 Gy proton demeti radyasyon dozu silisyum hücrenin maksimum güç değerine etki yaptığı gözlenmiştir. Radyasyonun açık devre gerilimi ve kısa devre akımında meydana getirdiği değişiklikten dolayı hücre veriminde %0,51 azalma meydana gelmiştir.

Proton demeti ile ışınlanan silisyum hücrede, radyasyon tarafından üretilen derin arayüze enerji seviyeleri, azınlık taşıyıcılarını tuzaklar ve ömürlerini azaltır. Elektrotlara ulaşmalarına engel olur. Bundan dolayı silisyum hücrenin elektriksel parametrelerini etkilemiştir.

SRIM/TRIM simülasyon programı, iyonların hedef içerisinde meydana getirdiği hasarın belirlenebilmesini sağlar. Proton demetiyle etkileşen silisyum hücrenin yapısındaki değişim ile belirli bir derinlik ve konsantrasyonda atomları bir hedefe implante ederek iyonların enerjisi ve dozu hesaplanmıştır. Silisyum hücrenin yüzeyinin yaklaşık 253,80 mikrometre altında tepe konsantrasyon derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Hedef atomu yeterince uzağa, hemen geri dönmemesi için kafes bölgesinden uzaklaştıran, fırlatmak için gereken minimum enerji yerdeğiştirme enerjisidir. Bu minimum enerji, bir iyonun neden olduğu en temel hasar türü olan tek bir boşluk ve yakındaki bir arayer atomu üretir. Bu değere karşılık gelen proton enerjisi 5,5 MeV olarak hesaplanmıştır.

Protonun 10^{20} atom/cm²'lik bir doz için hasar dağılımının tepe değerindeki hedef atom başına ortalama yer değiştirme değeri $0,5 \times 10^3$ 'tür.

Çarpışan iyonlar tarafından oluşturulan yeri değişmiş hedef atomların sayısının 220 mikrometre kalınlıktaki silisyum hücre için sabit olduğu görülmektedir. Protonun silisyum hücresinde hasar oluşturduğu görülmüştür. Çarpışma olay grafiğinde görüldüğü gibi taban bölgesinde yer değiştirme yoğunluğu orta bölgeye göre daha fazladır. Protonlar çarpışmada yer değiştirme üreterek enerjilerini kaybettiklerinde iyonlaştırıcı olmayan enerji kaybı artar. Bundan sonra daha fazla enerji kaybederler ve sonuç olarak enerjilerini kaybedene kadar sonraki çarpışmalarda daha fazla hasar üretirler. Başka bir deyişle, protonların penetrasyon derinliğinin daha büyük olduğunu söyleyebiliriz.

KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, H.H., Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, İstanbul, 56-58, 2008.
- [2] Delebe, E., Elektronik Devre Elemanları, Kodlob Yayınları, İstanbul, 131-133, 2016.
- [3] Doğan, İ., Güneş Enerjisi Uygulamaları, Bileşim Yayınları Teknik Kitaplar, İstanbul, 94-95, 2006.
- [4] Türköz, M.S., Temel Elektronik, Birsen Yayınevi, İstanbul, 102-103, 2004.
- [5] Akman, E., Akın, S., Karanfil, G., Sönmezoğlu, S., Organik Güneş Pilleri, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14, 8-9, 2013.
- [6] Ünal, O., Güneş Pilleri , Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [7] www.bilimgenc.tubitak.gov.tr, Erişim Tarihi: 31.03.2021
- [8] Karamanav, M., Güneş Enerjisi ve Pilleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [9] Oktik, Ş., Güç Elektrik Dönüşümleri: Fotovoltaik Güneş Gözelleri ve Güç Sistemleri, Temiz Enerji Vakfı, Ankara, 90-91, 2001.
- [10] Ardağ, Y., Güneş Pili Karakteristiklerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [11] Yapıcı, C., Aslantaş, N., Amorf Malzemeler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 1-2, 2008.
- [12] Boz, O.H., Günümüz Alternatif Enerji Kaynakları: Fotovoltaik Güneş Pilleri, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, 2011.
- [13] Çubukçu, M., Gökçeada'da Şebekeden Bağımsız Bir Fotovoltaik Güç Sistemi Benzetimi ile Karşılaştırılmalı Gerçek Performans İncelemesi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 201-208, 2011.
- [14] www.module.com, Erişim Tarihi: 04.03.2021

- [15] Küpeli, A. ., Güneş Pilleri ve Verimleri Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi , 2005.
- [16] Can, C., Boya Duyarlı Güneş Pilleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [17] Gülmen, M., Medikal Alanda Kullanılan Lif: Mg, Ti (TLD-100)'nin Dozimetrik  zelliklerinin İncelenmesi,Çukurova Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [18]  ahin, L., Parçacıklar ve Radyasyonun Madde ile Etkile mesi, İstanbul Üniversitesi, Fizik Bölümü , Doktora Tezi, 2013
- [19] Carter, J.R., Tada, Y., Solar Cell Radiation Book, Jet Propulsion Laboratory, ABD, 452-453, 1973.
- [20] Sawyer, D.M., Chan, K.W., Teaque,M.J., SchoField, N.J., in Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington D.C, 545,1978.
- [21] Rae, A., Kuantum Mekaniği , Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 76-79, 1990.
- [22] Krane, K.S., Nükleer Fizik, Palme Yayınevi, Ankara, 2, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim, ortaöğretim ve lise eğitimini Artvin’de tamamladı. 2013 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünü kazandı. Eğitimini Haziran 2017’de bölüm üçüncüsü olarak tamamladı. 2017 yılında yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında Giresun Üniversitesinden pedagojik formasyon eğitimi aldı. Aynı yıl C sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlığı kursunu tamamladı.