



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİP GÜNEŞ PİLİ HÜCRELERİNİN
KAPASİTE GERİLİM SPEKTROSKOPİSİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

Meryem KÜÇÜK
172108007

2021

GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TİP GÜNEŞ PİLİ HÜCRELERİNİN
KAPASİTE GERİLİM SPEKTROSKOPİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Meryem KÜÇÜK
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.08.2021

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Serdar KARADENİZ

Ağustos 2021
GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİP GÜNEŞ PİLİ HÜCRELERİNİN KAPASİTE GERİLİM SPEKTROSKOPİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meryem KÜÇÜK

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez ../07/2021 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.

Meryem KÜÇÜK

12/08/2021

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını yaparken gerek verilerin toplanması kısmında gerek düzen ve ilerleme kısmında değerli bilgilerini benimle paylaşan ve bana yararlı olabilmek adına elinden gelen her türlü desteği esirgemeyen çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Serdar KARADENİZ' e teşekkürlerimi borç bilirim.

Yüksek lisans süresince ve tez çalışmam süresince hep yanımda olan annem, babam, kardeşlerim ve eşime teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince her ihtiyaç duyduğumda yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım Damla Gül KELEŞ' e teşekkür ederim.

Bu süreçte her konuda desteğini esirgemeyen ve hep yanımda olan ablam Gülsün Gündüz'e ve ağabeyim Çağdaş GÜNDÜZ' e teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX

BÖLÜM 1.GİRİŞ	1
1.1. Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemeler	1
1.2. Fotovoltaik Piller.....	1
 BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1.Güneş Enerjisi Nedir?	3
2.1.1.Güneş Enerjisinin Avantajları.....	3
2.1.2. Güneş Enerjisinin Dezavantajları	4
2.1.3. Güneş Enerjisinin Kullanıldığı Alanlar	4
2.2. Güneş Pilleri	5
2.2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi	7
2.2.2.Güneş Pillerinin Kullanım Alanları	9
2.2.3. Türkiye’de Yapılan Güneş Pili Uygulamaları	12
2.2.4.Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi	12
2.3. Güneş Pilleri ile İlgili İstatistiksel Bilgiler	13
2.4. Fotovoltaik Güneş Pilleri	14
2.4.1. Tek Kristal SilikonGüneş Pili	14
2.4.3. İnce Film Güneş Pilleri	16
2.4.4. Amorf Silisyum Güneş Pilleri	18
2.4.5. Çok kristalli ince film güneş pilleri	22
2.4.6. Bakır indiyum diseleneid güneş pili	22
2.4.7. Kadmiyum tellür ince film güneş pilleri	24

2.5. Güneş Pili Karakteristikleri	27
2.5.1. Açık devre gerilimi (V_{oc}).....	27
2.5.2. Kısa devre akımı (I_{sc}).....	27
2.5.3. Doluluk faktörü (FF).....	28
2.5.4. Güç dönüşüm verimi (η).....	28
2.5.5. Güneş pillerinin verim ölçümleri	31
2.5.6. Seri direnç (R_s).....	31
2.5.7. Şönt direnç (R_{sh}).....	31
2.6. Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	32
2.7. Kapasite-Gerilim Karakteristikleri.....	37
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	 40
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	 41
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	 56
 KAYNAKLAR	 57
 ÖZGEÇMİŞ	 60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CdTe	: Kadmiyum Tellür
CuInSe ₂	: Bakır İndiyum Diselenid
FF	: Dolgu Faktörü
GaAs	: Galyum Arsenik
I _o	: Ters Sızıntı Akımı (mA)
I _{sc}	: Kısa Devre Akımı
K	: Boltzmann Sabiti
N	: Diyot Faktörü
P _{max}	: Maksimum Güç
R _s	: Seri Direnç
R _{sh}	: Şönt Direnç
T	: Mutlak Sıcaklık (T)
V _{oc}	: Açık Devre Gerilimi
µm	: Mikrometre
η	: Verimlilik
q	: Elektron Yüğü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Güneş pilinin genel bir gösterimi	5
Şekil 2. 2. Çatısı güneş pili kaplı ev.....	10
Şekil 2. 3. Solar I merkezi alıcı güneş ısı elektrik santrali (İspanya).....	10
Şekil 2. 4. Güneş pillerinin karayollarında kullanımı.....	10
Şekil 2. 5. Güneş pilleri ile sokak aydınlatması.....	11
Şekil 2. 6. 1971-2001 yılları arasındaki dünyadaki fotovoltaiik gelişim grafiği.....	13
Şekil 2.7. 1992-2003 yılları arası toplam fotovoltaiik güç üretimindeki değişim (MW)	14
Şekil 2. 8. İnce film güneş pilinin panel yapısı.....	17
Şekil 2. 9. Amorf silisyum bağların güneş pillerinde alt katman olarak kullanımının yapısı.....	19
Şekil 2.10. CdTe tabanlı güneş pillerinin şematik yapısı.....	25
Şekil 2.11. Çeşitli pil verimlilikleri ve yıllara göre değişimi.....	30
Şekil 2.12. (a) FV pil panelinin doğrudan ayarlanabilen bir yüke bağlanması (b) FV pillerin seri-paralel bağlanması ile oluşturulan FV güneş pili paneli.....	32
Şekil 2.13 FV pil panelin akım gerilim (I-V) karakteristiğinin yükle değişimi.....	33
Şekil 2. 14 FV pilin I-V ve P-V karakteristikleri.....	34
Şekil 2.15. FV güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün sıcaklıkla değişimi.....	35
Şekil 2.16. FV güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün ışık şiddetiyle değişimi.....	36
Şekil 2.17. FV pilin maksimum çıkış gücü ve bu güce karşılık gelen gerilim ve akımın (a) sıcaklıkla (b) ışık şiddetiyle değişimi.....	37
Şekil 3.1. Kapasite ve iletkenlik ölçümlerinde kullanılan Keysight E4990 A empedans analizatörü.....	41

Şekil 4. 1. Güneş pili hücrelerinin C-V ve G-V eğrileri (a) monokristal (b) polikristal.....	42
Şekil 4. 2. Güneş pili hücrelerinin frekansa bağlı C-V ve G-V eğrileri : (a) ve (b) monokristal, (c) ve (d) polikristal.....	44
Şekil 4. 3. Güneş pili hücrelerinin uygulanan voltaja bağlı $1/C_2$ eğrileri (a) monokristal (b) polikristal.....	48
Şekil 4. 6. Güneş pili hücrelerinin frekansa bağlı R_s -V karakteristikleri (a) monokristal (b) polikristal.....	50
Şekil 4. 7. Monokristal güneş pili hücrelerinin düzeltilmiş (a) C-V (b) G-V eğrileri.....	52
Şekil 4. 8. Polikristal güneş pili hücrelerinin düzeltilmiş (a) C-V (b) G-V eğrileri..	53
Şekil 4. 9. Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin ara yüzey durumlarının enerji dağılım profili.....	55

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Güneş pillerinin tarihsel süreci.....	8
Tablo 2.2. Türkiye’deki güneş pili uygulamalarından faydalanan kurumlar	12
Tablo 2. 3. Amorf yarı iletkenlerin laboratuvar düzeyindeki verimleri.....	22
Tablo 2. 4. CIGS pil ve modüllerin verimi.....	23
Tablo 2.5. 0,5 m ² 'den küçük CdTe modüllerin üretim teknikleri.....	25
Tablo 2.6. Güneş pilleri verimlilikleri.....	29
Tablo 4.1. Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin C ² -V eğrilerinden elde edilen elektriksel parametreleri.....	49

FARKLI TİP GÜNEŞ PİLİ HÜCRELERİNİN KAPASİTE-GERİLİM SPEKTROSKOPİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında silisyum monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin elektriksel parametreleri incelenmiştir. Bunun için güneş pili hücrelerinin karanlık ortamda kapasite - gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçümler yardımıyla her iki güneş pilinin de engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_d), taşıyıcı yoğunluğu (N_a), maksimum elektrik alan (E_m) ve tüketme tabakası genişliği (W_D) gibi elektriksel parametreleri tayin edilmiştir. Seri direncin ölçüm parametreleri üzerindeki etkileri çıkarılmış ve arayüzey durumlarının enerji dağılım profilleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve birbirleriyle kıyaslamalar yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik hücre, monokristal, polikristal, kapasite-gerilim

CAPACITANCE-VOLTAGE SPECTROSCOPY OF DIFFERENT TYPES OF SOLAR CELLS

ABSTRACT

In this thesis, the electrical parameters of silicon monocrystalline and polycrystalline solar cell cells were investigated. For this aim, the capacity - voltage (C-V) and conductivity - voltage (G-V) measurements of the solar cell cells were carried out in dark environment. With the help of obtained measurements, the electrical parameters such as barrier height (Φ_B), diffusion potential (V_d), carrier density (N_a), maximum electric field (E_m) and depletion layer width (W_D) of both solar cells were determined. The effects of the series resistance on the measurement parameters were extracted and, the energy distribution profiles of the interface states were obtained. The results that obtained were discussed and comparisons were made with each other.

Keywords: Photovoltaic cell, monocrystalline, polycrystalline, capacitance-voltage

BÖLÜM 1.GİRİŞ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji kullanımı her gün artarken enerji kaynakları ise tükenmektedir. Kömür, petrol, doğal gaz gibi kaynakların uzun yıllar boyu devam etmeyeceği öngörüldüğü için enerji alanında yapılan çalışmalar yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymıştır [1].

1.1. Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemeler

Güneş pilleri, üstüne ışık düştüğünde uçları arasında elektrik gerilimi oluşturarak, güneş ışığını direkt olarak elektrik enerjisine çeviren yarı iletkenlerdir. Güneş panellerinde hücre veriminin yanı sıra modüldeki en dış katmanda bulunan camın veriminin de çok iyi olması gereklidir. Camın yüzeyi gelen ışığı çok iyi tutmalı ve geri yansıtmamalıdır. Bu verim üretici firmaya göre değişmektedir [1].

1.2. Fotovoltaik Piller

Silisyum, galyum arsenit, germanyum ve bunlar gibi yarı iletkenlerin kullanılmasıyla oluşan ve yüzeyine gelen ışığı doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir [2].

Güneş pili sistemleri elektriğe ihtiyaç olan her alanda kullanılabilirler. Kullanım durumuna göre yeterli sayıdaki güneş pili modülü gerekli olan enerjiyi sağlar. Gece veya güneşin yetersiz olduğu zamanlarda kullanılmak üzere akülerde depolanırlar [2].

Bir güneş pilindeki akımın ve gerilimin yükten etkileniş biçimi, pilin özelliklerini (elektriksel özellikler) belirler. Gün içindeki belli saat dilimlerinde değişken değerler

(sıcaklık, gün ışığı) en az olduğu kabul edilerek, yükün açık konumundan uçların kısa devre olduğu konuma ayarlanırken kaydedilen akım ve gerilim değerlerine göre grafik çizilir ve I-V karakteristiği oluşturulur [2].

Bu karakteristikler incelendiğinde sıcaklık PV güneş pillerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklığın artışı çıkış gerilimini ve gücünü azaltmaktadır. Bu sonuçlara göre pv panellerde en önemli enerji kaynağı ışık şiddetidir. Yani pv güneş pilleri için en uygun olan ortamlar soğuk ve güneşli ortamlardır [2].

Bir güneş pilinin verimi, pilin maksimum gücünün pil yüzeyine gelen maksimum güce oranıdır. Pildeki verimi açık devre voltajı, kısa devre akımı ve doluluk faktörü belirler. Fotoakım ve açık devre geriliminin olabildiğince büyük karanlık akımın da olabildiğince küçük olması, verimi arttırabilmek adına istenen durumlardır [2].

Bu tez çalışmasındaki amaç dünyaya yenilenebilir bir enerji olan güneş enerjisinin, elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan güneş pillerinin kapasite-gerilim karakteristiklerini incelemektir. Bunun için monokristal ve polikristal silisyum güneş pili hücreleri kullanılmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek adına ilk olarak güneş enerjisi, güneş enerjisinin avantaj ve dezavantajları, kullanım alanları incelenmiştir. Daha sonra güneş pilleri ve bunların tarihsel gelişimi, kullanım alanları gibi konulara değinilerek, güneş pili çeşitlerinden bazıları araştırılmıştır. Pillerin verimlilikleri, karakteristikleri ve verime etki eden etmenler de ele alınarak açıklanmıştır. Son olarak çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılmış ve öneriler sunulmuştur [2].

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Güneş Enerjisi Nedir?

Füzyon süreci ile açığa çıkan, güneşin çekirdeğinde yer alan ışıyım enerjisidir Güneş enerjisi çeşitli termonükleer tepkimeler sonucunda, hidrojenin üç atom ağırlığındaki helyum izotopları ile dört atom ağırlığındaki orijinal helyuma dönüşmesiyle oluşmaktadır. Güneşte her bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmektedir. Bu dönüşüm sırasında kaybolan 4 milyon ton kütleden ise 38×10^{22} kJ enerji açığa çıkmaktadır [3].

2.1.1.Güneş Enerjisinin Avantajları

Güneş enerjisinin avantajları şunlardır:

- Bitmeyen enerji türüdür.
- Toz, karbon, kükürt, gaz, duman gibi zararlı maddeler içermediği için temiz bir enerji türüdür.
- Taşıma ve ulaştırma giderleri olmaksızın her yerde ulaşılabilir bir enerjidir. Fakat güneşi az veya çok gören yerlerde verim farklılık gösterir.
- Karmaşık bir teknoloji gerektirmediği için çoğu ülke kendi sanayi kuruluşları ile bu enerjiden kolaylıkla faydalanabilirler [2].

2.1.2. Güneş Enerjisinin Dezavantajları

Güneş enerjisinin dezavantajları şunlardır:

- Şiddeti az ve sürekli olmadığı için istenilen zamanda, istenilen miktarda bulunmayabilir.
- Depolanamaz bir enerji kaynağıdır.
- Şimdiki teknolojik aşamada, güneş enerjisinden yararlanmak için kullanılan sistemlerin yatırım giderleri yüksektir [2].

2.1.3. Güneş Enerjisinin Kullanıldığı Alanlar

Güneş enerjisi birçok değişik alanda kullanılan bir enerjidir. Teknolojinin gelişmesiyle enerjiye olan ihtiyaç da artmış ve bu sebeple güneş enerjisi, enerji üretiminde alternatif bir yöntem haline gelmiştir. Güneş enerjisi; [4].

Kullanılan suların ısıtılması

Yüzme havuzlarının ısıtılması

Bitkisel ürünlerin kurutulması

Su damıtma sistemleri

Yapılardaki aktif durumda olan ve pasif durumda olan ısıtma sistemleri ve iklimlendirme sistemleri

Sanayide yapılan işlemlerde gerekli olan ısının sağlanması

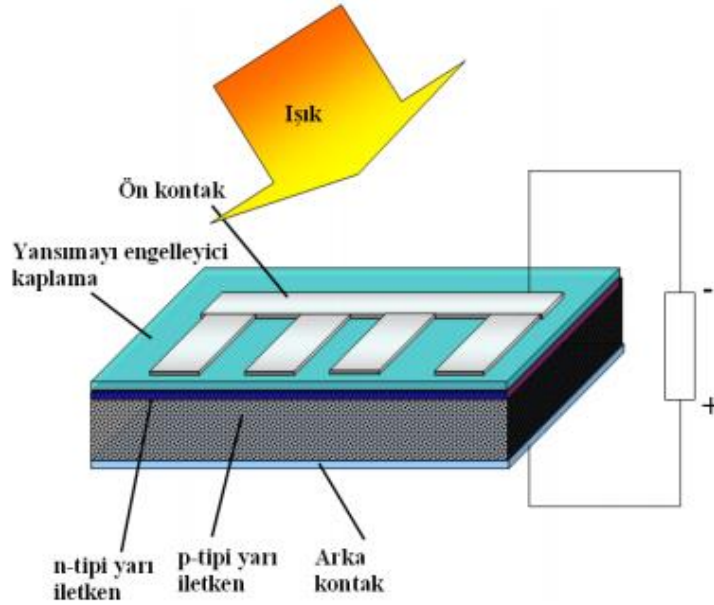
Elektriksel ya da termodinamik sistemli sulama sularının pompalanması

Toplu yaşam yerlerinde çeşitli şekillerde ısı üretimi ve elektrik üretimini sağlamak

Şebekeye bağlı elektrik üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

2.2. Güneş Pilleri

Güneşten aldığı enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlere güneş pilleri denir. Güneş pillerini (fotovoltaik piller) araştıran ilk kişi, 1839 yılında Becquerel'dir. Hareketli mekanik parçaları olmayan, güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürebilen, kolayca bakımı yapılabilen ve uzun vadede kullanılabilecek olan elektronik sistemlerdir. Güneş pillerinin tasarımları yapılırken, üzerine düşen güneş ışığını direkt elektriğe çeviren yarıiletkenler kullanılır. Alanları genellikle 100cm^2 civarında, kalınlıkları 0,2-0,4 mm olan bu piller, çeşitli geometrik şekilleri olan yüzeylere sahiptirler [5]. Şekil 2.1'de güneş pilinin genel bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 1. Güneş pilinin genel bir gösterimi [6]

Güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülmesi, pilin sahip olduğu yapıdan dolayı %5 ile %20 değerleri arasında değişir. Güneş pillerinin uygulamada verimli ve ekonomik olması için, verimlerinin %10'un altında olması gerekir. Yarıiletken güneş pillerinde

verim; uygulamada %5-20, laboratuarda ise %10-3- arasında değişir. Güneş pilinin iyi olarak değerlendirilmesi için uygulama koşullarında verimin %15 olması gerekir.

Güneş pili modüllerinde veya fotovoltaiik (Pv) modüllerde birçok güneş pilinin birbirine paralel şekilde veya seri şekilde bağlanmasıyla güç çıkışı arttırılır. Modüllerin birbirine paralel veya seri bağlanması güç gereksinimine bağlı olarak değişir. Böylece güçleri değişen sistemler oluşturulur. Fotovoltaiik paneller, optik özelliklerinin dönüşümüne ve elektrik özelliklerinin dönüşümüne göre seçilen yarıiletken malzemelerden oluşturulur. Bu pillerin yapımında en çok kullanılan malzemeler şunlardır.

Amorf silisyum

Kristal silisyum

Galyum arsenik (GaAs)

Kadmiyum tellür (CdTe)

Bakır indiyum diselenid($CuInSe_2$)

Optik yoğunlaştırıcı hücreler

Tek kristalli ve çok kristalli silisyum hücreler, bu zamanda en çok tercih edilen güneş pilleridir. Teknolojik önemi sebebi ile en iyi bilinen yarıiletken malzemelerden biri silisyumdur. Güneşten gelen ışınlardan enerjinin elde edilmesi, fotovoltaiik sistemlerin çoğunda modüller sayesinde olur. Kimyasal enerjiye dönüştürülerek, sonraki zamanlarda kullanılmak için akülerde depo edilir. PV uygulama sistemlerinde modülün tipi, modülün sayısı, modüldeki bağlantı şekilleri ve akü sayısı istenilen enerji miktarına bağlı olarak belirlenir. Öncelerde açık alanlardaki güneş santrallerinde elektrik üretimi amacıyla kullanılan pv paneller, sonralarda binalarda kullanılmaya başlanmıştır.

Güneş pilleriyle enerji üretiminin olumlu ve olumsuz sonuçları vardır. Olumlu sonuçları şöyle sıralayabiliriz.

- Enerji üretiminde herhangi bir fosil yakıt kullanılmaz.
- Enerjinin kullanımı için para ödenmez.
- Kurulumun ardından, uzunca bir süre problem olmadan çalışabilir.
- Sistemde bulunan aktif parçaların az olması sebebiyle, bakıma olan ihtiyaçları da azdır.
- Yapılan sistemlerin dayanıklılığı iklim ve doğal koşullara karşı fazladır.
- Enerjinin ihtiyaç duyulan yerlerde üretilmesi, enerji kaybı ve enerjinin iletilmesindeki maliyetini ortadan kaldırır.
- Sistem elemanlarının kolay bir şekilde arttırılabilmesi, modüler yapıda olmalarından kaynaklanır. Buda artan enerji gereksinimi için önemlidir [4].

Olumsuz sonuçlar ise,

- Enerjinin kullanılabilir düzeyde üretilebilmesi için, geniş alıcı yüzeylere ihtiyaç duyulur.
- Yaz aylarında enerji kazanımı yeterlidir. Fakat kış aylarındaki enerji kazanım seviyesi düşüktür ve geceleri ise hiçbir kazanım yoktur.
- Güneş ışınımının sabit ve her zaman olmaması nedeniyle, depolanabilecek bir alana ihtiyaç vardır.
- Başlangıçta ekonomik bir uygulama olarak görülmeyebilir çünkü ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- Sistem çevresinin açık olması ve gölge oluşmaması, güneş ışınımından sürekli olarak yararlanabilmek adına önemlidir.

şeklinde sıralanabilir [4].

2.2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Güneş pili uygulamalarının tarihsel gelişimi Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Güneş pillerinin tarihsel süreci [4]

Tarih	Uygulama
1839	Becquerel, elektrolit içine batırılmış elektrotların arasında oluşan gerilimin, elektrolitin üzerine gelen ışığa bağlı olduğunu inceleyerek fotovoltaik olayı bulmuştur.
1876	İlk olarak selenyum kristalleri üzerinde, katılardakine benzer bir şekilde, D.W Adams ve R.E Day tarafından gösterilmiştir.
İzleyen yıllar	Fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde, bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların yaygın olarak kullanılması çalışmaların devamını getirmiştir.
1914	Fotovoltaik diyotların değeri %1 değerine ulaşmıştır.
1954	%6 verimlilikle güneş enerjisini elektriğe dönüştüren fotovoltaik diyotlar gerçek anlamda ilk kez 1954 yılında, Chapin ve çalışma arkadaşları tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu tarih, fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilir.
İzleyen yıllar	Uzay araçlarında kullanılacak güç sistemlerine yönelik ilk araştırmalar ve tasarımlar yapılmıştır.
1960	1960'ların başlarından beri uzay çalışmalarında güvenilir bir enerji kaynağı olarak fotovoltaik güç sistemleri kullanılmaktadır.
1970	1970'li yılların başlarına kadar, güneş pili uygulamaları ile sınırlı kalmıştır.

2.2.2.Güneş Pillerinin Kullanım Alanları

Yakıtın jeneratöre taşınmasının zor olduğu ve taşıma maliyetinin fazla olduğu zamanlarda, yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesinin bulunmadığı yörelerde PV sistemler kullanılır. Elektriğe ihtiyaç olunan bütün uygulamalarda güneş pilleri kullanılabilir. Güneş pili sistemlerinin;

Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri

Petrol boru hatlarının katodik koruması

Metal yapıların (köprüler, kuleler vb.) korozyondan korunması

Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler

Meteorolojik gözlem istasyonları

İç ve dış aydınlatma uygulamaları

Dağ evleri veya yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde tv, radyo, buzdolabı, gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması

Tarımsal sulama veya ev kullanımı amacıyla su pompajı

Orman gözetleme kuleleri

Deniz fenerleri

İlkyardım, alarm ve güvenlik sistemleri

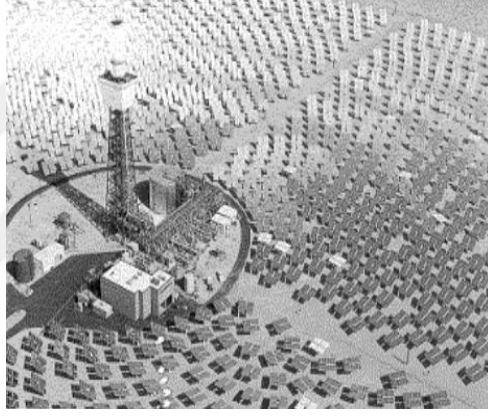
Deprem ve hava gözlem istasyonları

İlaç ve aşı soğutma

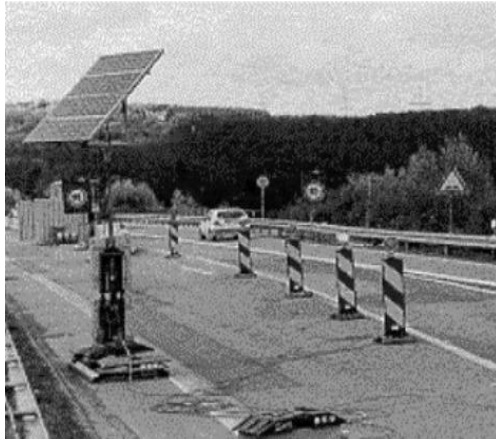
gibi uygulamalar şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı başlıca alanlardır [3]. Güneş pillerinin çatılarda kullanımı Şekil 2.2’de solar I merkezi alıcı güneş ısı elektrikli santrali Şekil 2.3’te karayollarında güneş pillerinin kullanımı Şekil 2.4’te güneş pilleri ile sokak aydınlatması ise Şekil 2.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Çatısı güneş pili kaplı ev [7]



Şekil 2. 3. Solar I merkezi alıcı güneş ısı elektrik santrali (İspanya) [7]



Şekil 2. 4. Güneş pillerinin karayollarında kullanımı [7]



Şekil 2. 5. Güneş pilleri ile sokak aydınlatması [7]

Şebekeye bağlı olan sistemler, hem dağıtık PV güç sistemleri hem de PV santralleri şeklinde olabilir. Güneş pili sistemlerinin, şebekeye bağlı olanları santral boyutundaki güçleri yüksek sistemler gibi de olabilir. Binalardaki küçük güç gerektiren uygulamalar için, genelde bu tip sistemler kullanılır. Böyle sistemlerde bir konutun ihtiyacı olan elektrik karşılanırken, fazla üretilen enerji elektrik şebekesine fiyatı karşılığında verilir. Enerjinin yeterli üretilmediği durumlarda ise elektrik şebekesinden enerji alınır. Bu sistemlerde enerji depolanmasına ihtiyaç duyulmamasının sebebi, üretilen elektriğin DC' den AC' ye çevrilmesinin ve bu elektriğin şebekeye uyumlu olmasının yeterli olmasıdır [4].

Yapılar için güneş pillerinin oluşturduğu şebekeye bağlı olan PV güç sistemleri;

Akım isteği ve gerilim isteğine göre yapılmış PV modüller

DC elektriğin AC elektriğe dönüştürülmesini sağlayan çevirici

Yük ve ışıınının değişik şartlarına adapte olmasını sağlamak amacıyla elektronik kontrol alt sistemi gibi sistemlerden oluşur. Şebekeye verilen ve şebekeden alınan elektrik, farklı iki sayaç ile belirlenir. PV sistemde oluşabilecek arızalardan şebekeye bağlı diğer üyelerini etkilememesi için, gerilim frekans değerlerinde sıkıntı çıkması

halinde sistemi koruyan emniyet cihazları ve kontrol cihazları gereklidir. PV sistemler, daha çok elektrik ulaşmayan yerlerde kullanılmaktadır [4].

2.2.3. Türkiye’de Yapılan Güneş Pili Uygulamaları

Teknolojiyi takip etmek amacıyla 2 Haziran 1998’de Türkiye’de ilk defa EİE İdaresi Genel Müdürlüğü Didim Güneş ve Rüzgâr enerjisi Araştırma Merkezi’nde 4,8 kw’lık Ankara’da ise 1,2 kw’lık şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri kurmuştur. Bununla birlikte kurum ve kuruluşların birçoğu güneş pili uygulamalarından yararlanmaktadır. Türkiye’de güneş pili uygulamalarından faydalanan kurumlar ise tablo 2.2’ de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Türkiye’deki güneş pili uygulamalarından faydalanan kurumlar [7]

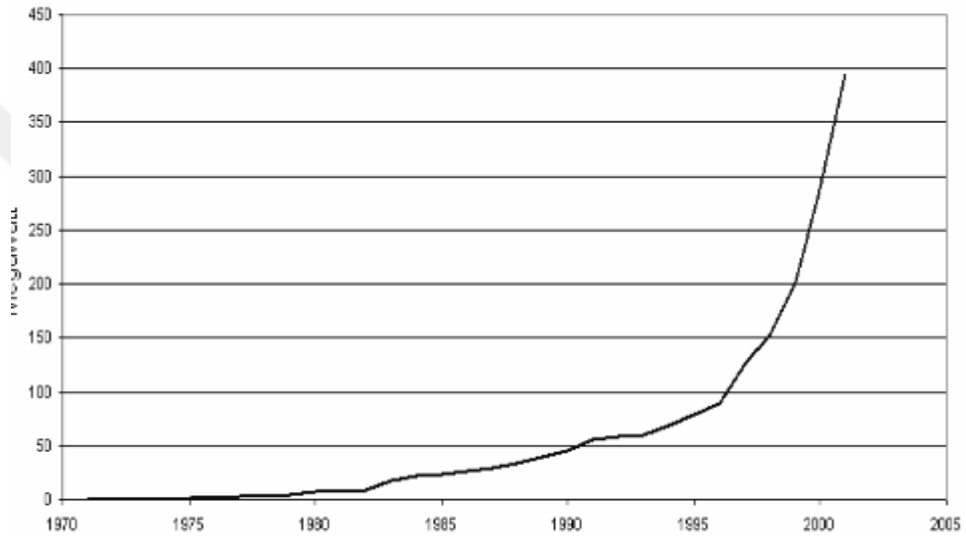
Kurum	Üretilen Güç
Orman Bakanlığı (Gözetleme istasyonları)	175 kW
Türk Telekom (Aktarma istasyonları)	135 kW
Karayolları imdat telefonları	150 kW
EİE demonstrasyon uygulamaları ve çeşitli araştırma kurumlarında	350 kW

2.2.4. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi

Üzerine güneş ışığı düştüğünde, bu enerjiyi doğrudan elektriğe çeviren düzeneklere güneş pilleri denir. Bu sistemde, herhangi bir aktif parça bulunmaz [8].

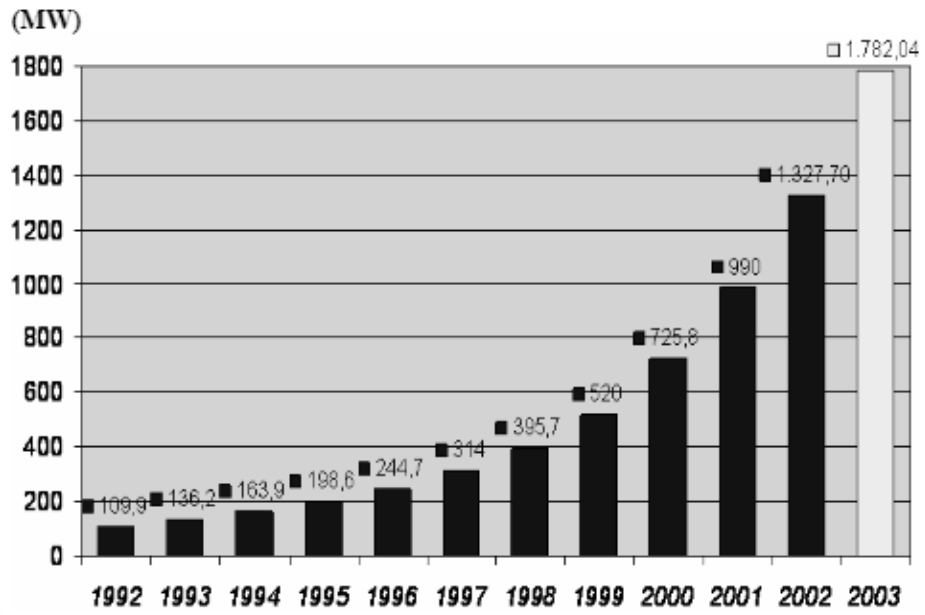
Güneş pillerinin uçlarındaki elektrik gerilimi yüzeylerine ışık düştüğünde oluşur. Üzerine düşen güneş enerjisi, pilin verdiği elektriğin kaynağıdır. Yarıiletken maddeler içinde güneş pili yapımı için en uygun olan maddeler; silisyum, galyum, arsenit, kadmiyum tellürdür [8].

2.3. Güneş Pilleri ile İlgili İstatistiksel Bilgiler



Şekil 2. 6. 1971-2001 yılları arasındaki dünyadaki fotovoltaik gelişim grafiği [7]

1971-2001 yılları arasındaki dünyadaki fotovoltaik sistemlerdeki gelişim şekil 2.6’ da fotovoltaik güç üretiminin 1992-2003 yılları arasındaki değişimi ise şekil 2.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. 1992-2003 yılları arası toplam fotovoltaiik güç üretimindeki değişim (MW) [7]

2.4. Fotovoltaiik Güneş Pilleri

2.4.1. Tek Kristal SilikonGüneş Pili

Güneş pili üretimi için kullanılan malzemelerden biridir. Fakat üretim maliyeti yüksektir. Bu nedenle başka bir seçenek olarak çok kristalli malzeme kullanımı geniş ölçeklerde olmuştur. Silisyum, güneş pili teknolojisinde yaygın olarak kullanılır. Bunun başlıca nedenleri; silisyum üretim teknolojisinde önemli başarılar elde edilmesi ve silisyumun yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin uzun süre değişmemesidir.

Saf tek kristalli silikon güneş pili üretimi pahalı ve güç bir teknolojiyi ister. Oksijen elementinin yeryüzünde bulunmasına en yakın silisyum elementi olup, kum ve kuvars en fazla olan biçimdir. Kumun saflık derecesinin düşük olması kullanıma uygunluğunu olumsuz etkiler. Fakat kuvarsın %90'lık bir bölümü silisyumdur.

Kuvars işlenir ve %99 saflıkta silika oluşturulur. Sonrasında, silikadan metalürji değerinde silisyum oluşturulur. Sonraki aşama olarak yarıiletken özelliğinde çok kristalli silisyum oluşturmak amacıyla silisyum saflaştırılır. Oldukça yoğun ve maliyeti yükselten işlemler sonucunda çok kristalli silisyum elde edilir. Çekirdekler, oldukça düşük hızla zevceban edilmiş silisyum banyosundan alınır. Böyle yapılarak, ince tek kristalli yüzeylerin büyümesi sağlanmış olunur. Büyüme sırasında silisyum, üretici firmanın yapımına göre, n tipi veya p tipi olarak katkılanır. Hemen hemen 0,5 mm kalınlığında olan silisyum katmanları elde edildikten sonra, mesela p tip katkılanmışsa üzerinde 1nm n tipi üst tabakası oluşturularak eklem diyot tasarımılanır.

Ön tarafta bulunan yüzeyine metal ağ kontak, arka tarafta bulunan yüzeyine ise metal kontak konulmasının ardından, yansıtıcı özellikte olmayan bir malzemeye ön taraftaki yüzey kaplanır ve fotovoltaik diyotun yapımı tamamlanmış olur. Başlıca tek kristal silikon bir pv hücre katmanları şöyledir.

Üst yüzeyinde bulunan iletici ızgara

Yansıtımayan kaplama ya da işlem görmüş yüzey katman

Topaç diye isimlendirilen ve yaklaşık 1 µm kalınlığında oldukça ince olan ve genellikle n tipindeki silikon katmanı

Akım üretmesine fırsat veren ve birleşme yerinde bulunan, oldukça dar olan elektrik alanı bölümü

Topala zıt bir durumda katkılanmış ve genelde p tipi silikondan olan taban katmanı

Alt kontak elektrot

2.4.2. Çok Kristalli Silisyum Güneş Pili

Çok kristalli maddenin; yapısal özellikleri, optik özellikleri ve elektriksel özellikleri birdir. Kristaldeki damarların büyüklükleri ve kristalin kalitesi birbiriyle doğru orantılıdır. Özellikle elektriksel yükü taşıyanların iletilmesinde, damarlar arasındaki süreksizlik önemli derecede engelleyici olur. Ulaşılabilecek verimin tek kristalle karşılaştırıldığında, küçük olmasındaki neden çok kristalli malzemede damar büyüklüğünün küçülmesi ile ilişkili olarak elektriksel özellikler de bozulur. Çok kristalli silisyumun üretim teknolojileri kolay ve enerji yoğunlukları azdır. Yani çok kristalli silisyumda maliyet büyük ölçüde düşüktür [9].

Dökme yöntemi çok kristalli silisyum üretimi için yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Çok kristalli silisyum elde edebilmek için istenilen saflık derecesi, yaklaşık bir değerde olan, tek kristalli silisyumda olduğu gibi bir malzeme hazırlanır. Kalıplara dökülüp soğuması için bırakılan erimiş yarı iletken silisyum, soğuduktan sonra oluşan bloklar kare olacak şekilde kesilir. Böyle teknolojiyle maliyet önemli ölçüde azalmakla birlikte üretilen güneş pillerinin verimleri daha düşüktür [1].

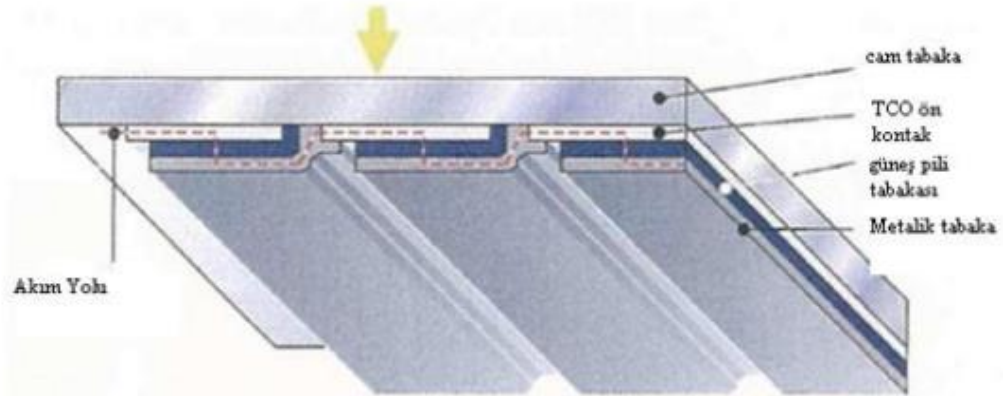
2.4.3. İnce Film Güneş Pilleri

Çok az materyal gerektiren ince film pv cihazlar, üretim kolaylığı açısından da üstünlüklere sahiptir. Aşırı derecede ince yarıiletken katmanların üst üste yerleştirilmesiyle ince film güneş pilleri oluşur. Birçok değişik malzemeden de yapılabilen ince film hücreler, ticari anlamda birçok alanda kullanılır ve amorf silikon malzemeden yapılır [4].

Farklı çökertme yöntemleri olan ince film teknolojisinde yöntemlerin hepsi, kristal silikon için gerekli külçe geliştirme teknolojilerinden önemli düzeyde daha ucuzdur. 2x2 inç boyutlarındaki hücreler, çökeltme işlemleri ile elde edilebilir. Katmanlar, kolay şekillendirilebilen plastik esaslı malzemeler veya maliyeti düşük olan camlar

üzerine çöktülebilir. Tek ünite şeklinde yapılan ince film cihazlara karşın, tek kristalli silikon, tek tek birbirine bağlanarak modülün içerisinde tasarlanırlar. İletken olan oksit katmanlar ve yansıtma yapmayan kaplamalar, arkadaki elektrik kontaklarına ve yarıiletken malzemeye eklenir. Bireysel hücreler, her bir katman lazer ışını ile oluşturularak şekillendirilir [4].

İnce film cihazların başlıcalarında elektrik kontağı için, tek kristal hücrelerin çoğunda olduğu gibi metal ızgara kullanılmaz. Bunun yerine, ince bir şeffaf iletken oksit katmanı kullanılır. Çok şeffaf ve çok iyi elektrik iletken özellikteki kalay oksit, indiyum kalay oksit ve çinko oksit gibi oksitler hücrenin en üst tarafından akımı etkili bir biçimde toplar. Kayıplar direnç nedeniyle en düşük düzeydedir. Genellikle çok kristalli malzemeler olan ince film pv malzemelerin damarlarının büyüklükleri bir milimetrenin binde bir kısmından milyonda bir kısmına kadar değişir [4]. İnce film güneş pilinin panel yapısı Şekil 2.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. 8. İnce film güneş pilinin panel yapısı [1]

Optik özellikleri bakımından en benzeri belirlenen bir yarı iletken üründe mikron değerindeki kalınlık içerisinde bulunan güneş ışınlarının neredeyse tamamına yakını soğurulabilir. Bu sebeple, silisyum yüzeyinde yapılan pillerin kalınlığına göre ince film fotovoltaiik malzemede bulunan kalınlık daha azdır. Laboratuvar koşullarında

etkinlikleri %18 düzeylerine kadar çıkmış olan ince film güneş pilleri arasında üç önemli grup yer alır.

Amorf silisyum güneş pilleri: Birleşik yarıiletken; amorf ve silisyum elementlerinden meydana gelir.

Kadmiyum tellür ince film güneş pilleri: Birleşik yarıiletken; kadmiyum elementi ve tellür elementinden oluşur.

Bakır indiyum diselenid güneş pilleri: Birleşik yarıiletken; bakır, indiyum, selenyum elementlerinin bir ağırlığıdır [4].

2.4.4. Amorf Silisyum Güneş Pilleri

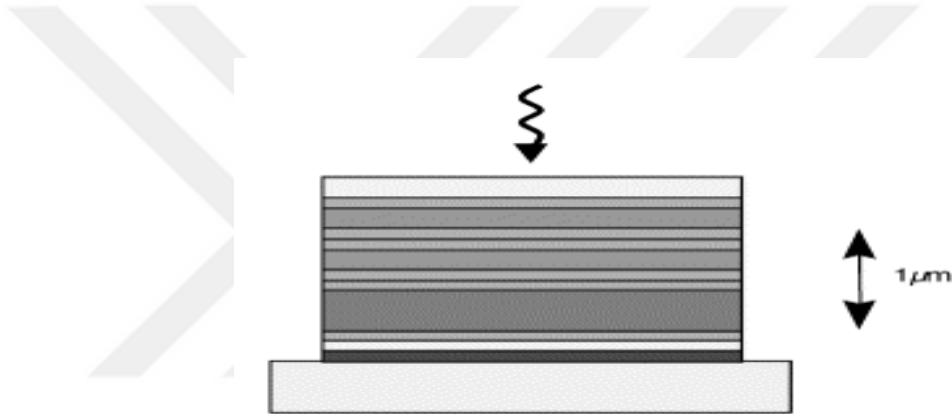
Çok sayıda yapısal ve bağlanma hataları içeren aynı zamanda kristal yapı oluşturmeyen cam gibi yapısı amorf olan katı haldeki maddelerin atomları, herhangi özel bir sırada sıralanmazlar [1].

Şimdilerde güce az ihtiyaç duyan cihazlar için yaygın olarak amorf silikon kullanılır. Malzeme özelliklerini değiştirmek, bant boşluğu ve işlevleri fazla olan cihazları daha fazla geliştirmek adına; amorf silikon alaşımlarının kalay elementi, germanyum elementi, karbon elementi ve azot elementinden yapılanları kullanılır. Amorf silikondan tasarımılanan pv hücrelerin laboratuvar koşullarındaki etkinliklerinin %13 den daha fazla olduğu belirtilmektedir. Galyum arsenit gibi ince film materyallerin, yoğunlaştırılmamış ışık koşullarında etkinliklerinin %24 den daha yüksek olduğu belirlenmiştir[4].

Amorf silikonun güneş ışınımını soğurumu, tek kristal silikondan 40 kez daha etkin bir şekilde olur. Sadece yaklaşık 1µm kalınlığındaki filmin yararlı güneş enerjisinin %90'ını soğurabilmesi bu hücrelerin düşük maliyetli olmasını etkileyen en önemli

özelliktir. Sıcaklığın düşük olduğunda da üretilebilir olması ve maliyeti az olan ürünler üzerinde biriktirilebilmesi diğer başlıca ekonomik özelliklerdir. Çok kristalli silikon veya kristal silikon gibi tekdüze bir yapıya sahip değildir[4].

Amorf silikon pv hücrelerin dizaynı, kristal silikon pv hücrelerin tasarımındaki p-n bağlantı dizaynından bir hayli farklıdır. Hidrojenlenmiş amorf silikon kristal hücrelerin katmanları şu şekilde tasarımlanır [4]. Aşağıdaki Şekil 2.9'da amorf silisyum bağların güneş pillerinde alt katman olarak kullanımının yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2. 9. Amorf silisyum bağların güneş pillerinde alt katman olarak kullanımının yapısı [10]

p^+ üst katman: Kalınlığı oldukça az (0,008 μm) ve çok katlıdır.

Orta katman: Daha kalın (0,5-1 μm) ve katsızdır.

n^+ alt katman: Oldukça fazla incedir (0,02 μm).

En üst katman, ince ve kısmen geçirgen özellikte tasarımlanır. Böylece, gelen ışınının çoğu bu katmandan geçerek, elektron boşluğu çifti oluşturmak için, katkısız orta katmana ulaşır [4].

En üstteki p^+ ve en alttaki n^+ katmanlar, kristal silikon pv hücresinin p-n bağlantısındaki elektrik alanı indüksiyonuna benzer şekilde, orta katmanın tamamında bir elektrik alanı meydana getirirler [4].

Amorf silikonun bant boşluk enerjisi, yaklaşık 1,7 eV değerindedir. Bu değer, bant boşluk enerjisi 1,1 eV olan kristal silikonunkinden daha yüksektir. Bir pv hücrenin ürettiği gerilim, onun bant boşluğunun büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, amorf silikondan yapılan pv hücrelerin ürettiği gerilim, kristal silikondan yapılan pv hücrelerinkinden daha yüksektir. Amorf silikon tarafından soğurulmayan düşük foton enerjilerini, gerilimin yüksek olması dengeler [11].

Esas olarak, hidrojenlenmiş amorf silikon p-i-n hücre tasarımı, dokuma olan şeffaf iletken kalay-oksit film katmanında, p^+ katman biriktirme ile başlar. Bu işlemi, orta(i)ve ince n^+ katmanlar izler. Daha sonra, dip kısım genellikle, alüminyum veya gümüş gibi bir yansıtıcı malzeme ile kaplanır. Dokuma şeffaf iletken oksit madde ve yansıtıcı pv hücrenin mümkün olabilen en yüksek düzeyde ışınım tutmasına yardımcı olur [4].

Sıcak boşaltımlı çökeltme yöntemi, etkin bir amorf silikon pv hücre tasarımı için uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemin yaygın olarak uygulanan şeklinde, SiH_4 ve H gazı akımı, kutupsallığı yüksek frekansta ters çevrilmiş olan elektrot çifti arasından geçirilir. Böylece, elektrotlar arasında enerjistik elektronların salınımı hızlandırılır. Elektronlar SiH_4 ile çarpışır. SiH_3 ve H oluşur. Bu durumda SiH_3 kararsız yapıda olur ve tekrar kararlı hale gelebilmek için elektrotlardan birinin üstündeki maddeye bağlanır. Daha sonra H serbest bırakılır. Amorf silikon film, yaklaşık %10 oranında H serbest bırakır. SiH_4 , B_2H_6 veya PH_3 ile katkılanabilir. Ticareti yapılan amorf silikon pv modüller, bu yöntemle üretilir [4].

Amorf silisyumun emme katsayısı oldukça büyük olup, 250°C civarındaki sıcaklıklarda geniş alanlı yüzeylere oldukça iyi kaplanabilmektedir[8].Kristal silisyum ve amorf silisyumun malzemelerini birbirinden farklı kılan özellik, malzeme içinde bulunan silisyum atomlarının düzenlerinin gelişigüzel olmasıdır. Amorf silisyumun elektriksel iletim kalitesi, malzeme içerisindeki yapı taşlarının gelişigüzel dizilmesinden dolayı düşer. Elektriksel olan özelliklerin fotovoltaik çevrime göre olan seviyede tutulabilmeleri için yarıiletken içerisine %5-10 oranında H katılarak yapılabilir [4].

Akkor boşalma teknolojisi, amorf silisyum üretimi için yaygın olarak kullanılır. Elektronların işaretlerinin yüksek frekanslarda değiştirilmesi için, akkor boşalma tekniğiyle, SiH_4 gazı ve hidrojen karışımı çift elektrotların ortasından geçirilir. Bunun sonucunda SiH_4 parçalanarak, kararsız durumda SiH_3 oluşturur. Kararsız SiH_3 elektrotlardan birine bağlanarak kararlı hale gelir. Sonrasında, H yüzeyden ayrılır ve silisyum ortamda kalır. Bu durumda yüzeyin silisyum kaplanması yapılmış olur. Elektrot yüzeyinde büyümekte olan silisyum gazının içine bor veya fosfor eklenerek n veya p tip oluşturulabilir [1].

Son yıllarda amorf silisyumun verimliliği laboratuvar koşullarında %15 değerinin üzerine çıkarılmıştır. Fakat amorf silisyum pillerinin büyük ölçekli güç üretiminde tasarım dışı bırakılmasının sebebi, güneş altında verimliliklerinin hızla düşmesi olmuştur.

1980'li yılların başlarında, kararlı verim değeri ancak %3,5 civarında olabilirken, günümüzde bu değer %6-6,5 civarlarına çıktığı belirtilmektedir. Böyle problemler için, amorf silisyum pillerin gözde güç kaynağı olarak kullanıldığı yerler, küçük ölçekli güç gerektiren (saat pilleri, hesap makineleri gibi) uygulamalardır [1].Tablo 2.3'te amorf yarıiletkenlerin laboratuvar düzeyindeki verimleri gösterilmiştir.

Tablo 2. 1. Amorf yarı iletkenlerin laboratuvar düzeyindeki verimleri [10]

Pil Tipi	Verim (ilk / sonraki,%)	Üretici
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	15,6/13.0	United Solar
a-Si/ μ c-Si	13,1/10.7	IMT Neuchatel

2.4.5. Çok kristalli ince film güneş pilleri

Çok kristalli ince film hücreler, yarıiletken maddelerin oldukça küçük olan kristal şeklindeki taneciklerinden meydana gelir. Böyle hücrelerde silikondan farklı özelliklere sahip malzemeler kullanılır. Bu hücrelerde, iki farklı yarıiletken arasında oluşan ara yüzey sayesinde elektrik alanı oldukça kolay bir şekilde yaratılabilir[4].

Başlıca çok kristalli ince bir filmde, pencere diye adlandırılan çok ince ($0,1\mu\text{m}$ ' den de az) bir kalınlıkta üst katman vardır. Pencere bloğunun görevi, spektrumun sadece yüksek olan enerjiyi taşıyan kısmından gelen ışınım ile olan enerjiyi soğurmaktır. Gerekli olduğu kadar bir bant boşluğuna ($2,8\text{ eV}$ veya daha yüksek) sahip olabilmesi için bu katmanın yeterince ince olması gerekir. P tip katkılı olan ve pencerenin altında olan soğurucu katmanın yüksek akım sağlayabilmek için soğurganlığı yüksek olmalıdır. Ayrıca yeterli gerilim sağlayabilmek için yeterli bant boşluğuna sahip olmalıdır. Bu katmanın kalınlığı esas olarak $1-2\mu\text{m}$ arasında değişir[12].

2.4.6. Bakır indiyum diselenid güneş pili

Yasaklı olan enerji aralıkları güneş spektrumuyla en iyi şekilde uyuşmasına göre ayarlanabilen, periyodik çizelgenin 1.3. ve 6. grubundaki elementlerin üçünün veya daha çok elementin toplanmasıyla oluşan, birleşik yarıiletkenin emme katsayıları bir hayli yüksek olan hücrelerdir[1]. Bakır indiyum diselenid (CuInSe_2 veya CIS) güneş pili; yarıiletken malzeme olan, indiyum elementi, bakır elementi ve selenyum elementinin birleşmesiyle yapılır. CIS oldukça yüksek emme gücüne sahiptir. Gelen ışınımın %99'u, malzemenin ilk $1\mu\text{m}$ kalınlığındaki katmanında soğurulur. CIS

güneş pillerinin ticarete daha çok tercih edilmesi için önemli bir özellik olan, malzemenin dış ortam testlerindeki kararlılığı çok iyidir. Kadmiyum tellür (CdTe) ile en iyi rakip olarak CIS güneş pilleri olarak durmaktadır. CIS hücrelerin laboratuvar koşullarındaki etkinlikleri %14'den daha yüksektir. Ga elementinin CIS ince film güneş pillerine katılması ile daha yüksek verim elde edilir. Gerekli teknoloji ve malzeme özelliklerinin denetiminin karmaşık duruma gelme sebebi, yarıiletkeni oluşturan element sayısının artmasıdır. Laboratuvar koşullarındaki küçük pillerin verimi %18 değerine kadar yükselirken, yüzeyindeki alanı 900cm² olan modüllerin verimi en fazla %15 dolaylarındadır [1]. CIGS pil ve modüllerin verimi Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2. 4. CIGS pil ve modüllerin verimi [10]

Süreç	Laboratuvar pil verimi (%)	Modül verimi (%) alan (cm ²)	Şirket
Metal film göstergecin selenizasyonu	>16	12,1/1x4ft	Siemens, pilot üretim
Birlikte buharlaşma	-	14,7/18	-
Sıralı buharlaşma	18,8	-	NREL
	17,2	13,9/90	IPE
	16,2		ZSW, laboratuvar üretimi;
	-	9,6/135	Würth Solar, pilot üretim
	11,5	5,6/240	EPW
	-	16,8/19	Global Solar
	>11	8/74	Angstrom Solar Center
Vakumsuz süreç			ISET, Unisun

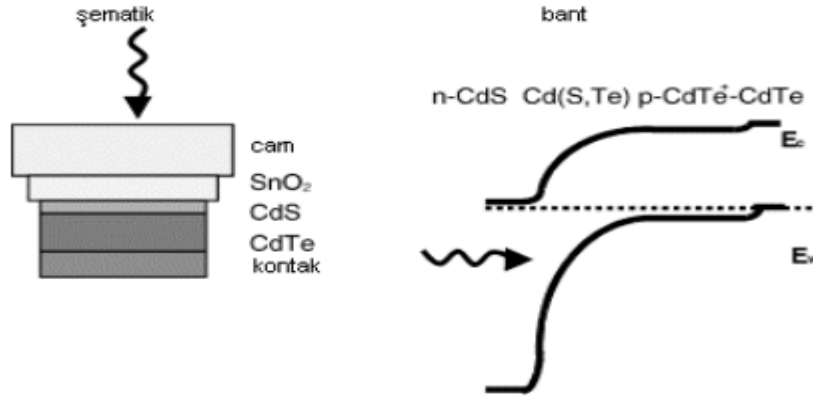
CIS cihazların pencere katmanı yaygın olarak sülfitten (CdS) yapılır. Geçirgenliği arttırmak için bazı durumlarda çinko eklenir. Soğurucu özellikteki CIS tabakaya çok az miktarda galyum eklenerek, CIS' in bant boşluğu artırılır. Bu durumda gerilim, yani cihazın etkinliği artar. Değişik endüstrilerde ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılan yöntemler, CIS hücrelerindeki malzeme katmanlarının birkaç farklı yöntemle tasarlanabilmesi sonucu ortaya çıkar. Elementlerin aynı anda vakumda buharlaştırılması ve bazı yöntemlerle büyütülen bakır-indiyum ince film alaşımının gerekli şartlardaki ortamda selenyum ile reaksiyona sokulması, CIS güneş pili üretimi için yaygın olarak uygulanan teknolojilerdir. Her iki yöntemde de emme

görevinde olan CIS yarıiletken, CdS ile birleştirilerek hetero eklem diyot meydana getirilir. CdTe tabaka üretiminde olduğu gibi, CdS tabaka üretiminde uygulanan yöntem, kimyasal banyo yöntemidir. CIS katmanı; bakır, selenyum ve indiyum olmak üzere üç farklı elementten yapılır. Buharlaştırma yöntemi CIS katmanı hazırlamak için yaygın olarak uygulanır. Atomların buharlaştığı noktalarda, her elementin çok az miktarı elektriksel olarak ısıtılır. Daha sonra bu maddeler, CIS katmanı oluşturmak üzere soğumuş madde üzerinde yoğunlaşır. Püskürtme piroliz yöntemi, malzeme üzerinde bakır-indiyum- diseleneid çökeltmek için etkin olarak uygulanan diğer bir yöntemdir. Bu yöntemde, gerekli elementlerin tuz çözeltisi, sıcak materyal üzerine püskürtülür. Bunlar belirli sıcaklıklarda, gerekli CIS katmanı oluşturmak üzere tepkimeye girerler. Çözücü ise buharlaşır. Yüksek enerjili iyonlar, hedef malzemenin atomlarını dışarı iterek yüzeye etki eder. Dışarıya itilen bu atomlar, ince bir katman oluşturmak üzere yüzey üzerinde yoğunlaşır.

Mücevher işlemede olduğu gibi, elektro-çökeltme yöntemi uygulanarak da CIS katmanı oluşturulabilir. İyonların çözelti dışındaki elektrot üzerine çökmesi, gerekli elementlerin iyonlarını içeren çözelti içerisinde elektrik geçirilmesi durumunda gerçekleşir. Bu yöntemlerden birisi, sadece bakır ve indiyumu çökeltmek, CIS katmanı oluşturmak için uygulanabilir. Bundan sonraki işlem aşamasında, selenyuma hidrojen seleneid gazı uygulanır. Bu yaklaşım daha çok ticari CIS üretiminde dikkate alınır.

2.4.7. Kadmiyum tellür ince film güneş pilleri

Önemli birçok kristal ince film malzeme olan kadmiyum tellür (CdTe) periyodik tablonun 2. grubunda bulunan kadmiyum elementi (Cd) ve 6. grubunda bulunan Tellür (Te) elementinin birleşmesiyle oluşan birleşik bir yarıiletkenidir. Soğurganlığı çok yüksek olan kadmiyum tellürün, bant boşluğu yaklaşık ideal durumdadır. (1,44eV) [4]. CdTe tabanlı güneş pillerinin şematik yapısı Şekil 2.10 da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. CdTe tabanlı güneş pillerinin şematik yapısı[10]

Oda sıcaklığında yasak enerji aralığı, güneş spektrumundan en yüksek dönüşüm sağlamak için ihtiyaç duyulan değere bir hayli yakındır. İnce film yapısını büyütme yöntemlerinin birçoğu ile kolay bir şekilde üretilebilen kadmiyum tellür, yüksek soğurganlık özelliğinin yanında, geniş yüzey alanlı güneş pili üretimi amacıyla da öne çıkmasını sağlamıştır. CdTe, pv cihazlarda alaşımsız bir şekilde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, özelliklerini farklılaştırmak amacıyla, çinko ve cıva gibi bazı elementlerle alaşım haline getirilerek de kullanılabilir[1]. Tablo 2.5'te 0,5m²'den küçük CdTe modüllerin üretim teknikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.2. 0,5m²'den küçük CdTe modüllerin üretim teknikleri [10]

Üretim tekniği	Şirket
Kapalı süblimasyon	Üretimi First Solar başlattı ANTEC,Matsushita
Takviyeli kapalı süblimasyon Elektroçökme	BP Solar firması tarafından Multimegawattlık deneme üretimi planlanmıştır
Ekran yazdırma	Matsushita

CdTe, genellikle kadmiyum sülfür (CdS) ile birleştirilerek hetero-eklem diyot üretimi yapılır. Yasaklı olan enerji aralığı yaklaşık 2,4 eV olan CdS yarıiletkeni, oldukça ince olacak şekilde bir tabaka olarak uygulanır[1]. CdTe hücreler de CIS hücreler gibi, karma birleşim ara yüzey gibi kullanılır. Güneşten gelen ışınların büyük bir kısmını geçiren CdS hetero eklem, ince pencere katmanı gibi işlev görür. Yansıtmayan kaplama ve şeffaf iletken oksit olarak kalay-oksit kullanılır. CIS film üretiminde kullanılan elektro-çökeltme ve püskürtme yöntemleriyle düşük maliyetle CdTe filmler üretilir. CdTe ince film üretimi için, üç çeşit teknoloji vardır. Bu teknolojilerden ilki olan süblimleşme yöntemi ile en üst kalitedeki CdTe malzeme üretimi yapılmaktadır. Süblimleşme yönteminde, filmin büyütüldüğü yüzey ve aralarındaki sıcaklık farklılığı olabildiğince az olan kaynak birbirlerine en yakın olacak şekilde tutularak malzeme büyütülmeye çalışılır [4].

Elektro-çökeltme (elektrotta biriktirim) yöntemi, CdTe büyütme işlemi için ikinci yöntemdir. Bu yöntemde CdTe yarıiletkeninin katot üzerinde büyümesini sağlamak için kadmiyum ve tellür iyonu taşıyan elektrolitten akım geçirilir. Bu yöntem çok ucuzdur. Fakat büyütülen malzemenin kontrolü süblimleşmede olduğu gibi kolay değildir.

CIS piller, p tip olarak kolay bir şekilde hazırlanabilmesine karşın, CdTe piller için durum böyle değildir. CdTe filmler, elektriksel olarak yüksek dirençli olmaya eğilimli olduklarından iç kayıplar yüksek olabilir. Alt elektrik kontağında bazı bozulmalar olduğu için kararlı özellikte alt elektrik kontağı yapmak zordur. Bu nedenle CdTe katman p tip katkılanmaz. CdTe katman, orta katman (doğal, p tip veya n tip) olarak tasarımlanır. Daha sonra kadmiyum tellür ve alt elektrik kontağı arasına, p tip çinko tellür katmanı yerleştirilir. Kadmiyum sülfür ve p tip çinko tellür ayrılmasına rağmen, ortadaki kadmiyum tellür katmanından geçerek elektrik alanı oluştururlar. Bu tip PV hücreler, 3000 bin saatten fazla denenmiş ve herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir [10].

2.5. Güneş Pili Karakteristikleri

Akım-voltaj (I-V) ölçme yöntemi, güneş pillerinde elektriksel davranış analizini yapmada en genel kullanılan yöntemdir. Yapılan bu yöntemle güneş pili hakkındaki önemli veriler elde edilmiş olunur [1].

2.5.1. Açık devre gerilimi (V_{oc})

Bir diyotun iki ucu arasında olan direnç değerinin sonsuz büyüklükte olduğu zamandaki kaydedilen gerilim değeridir [13]. Bu gerilimin denklem 2.1 ile verilir [14,15].

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

V_{oc} = Açık devre gerilimi, I_{sc} = Kısa devre akımı,

I_0 = Ters sızıntı akımı, n = Diyot idealitefaktörü,

T = Mutlak sıcaklık, k = Boltzmann sabiti ($1,380 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$)

q = Elektronik yük ($1,6 \times 10^{-19} \text{C}$)

2.5.2. Kısa devre akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı, güneş pili boyunca voltaj sıfır olduğunda (yani, güneş pili kısa devre olduğunda) güneş pili içinden geçen akımdır. Genellikle I_{sc} olarak ifade edilir [16].

2.5.3. Doluluk faktörü (FF)

Doldurma faktörü temel olarak hücrenin kalitesinin ölçüsü olarak ifade edilebilir. Dolgu faktörü güneş hücresinin verimini etkilemekte olup, hesaplanmasında maksimum gerilim, maksimum akım, kısa devre akımı ve açık devre gerilim parametrelerine ihtiyaç vardır [14].

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.2)$$

P_{max} = Maksimum güç, V_{max} = maksimum gerilim,
 I_{max} = maksimum akım

2.5.4. Güç dönüşüm verimi (η)

Hücrelerin verimlilikleri, performanslarına göre belirlenir. Bu da güç çıkışının, güç girişine olan oranı şeklinde belirlenir. Buna göre güç dönüşümü verimi denklem 2.3 ile verilir [15].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (2.3)$$

P_{in} = Giriş gücü

Giriş gücü ve P_{max} denklem 2.4 ve 2.5 ile ifade edilir.

$$P_{in} = P_{güneş} A \quad (2.4)$$

$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (2.5)$$

$P_{\text{güneş}} = \text{Güneşten gelen ışık şiddeti,}$ $A = \text{Hücrenin aktif alanı}$

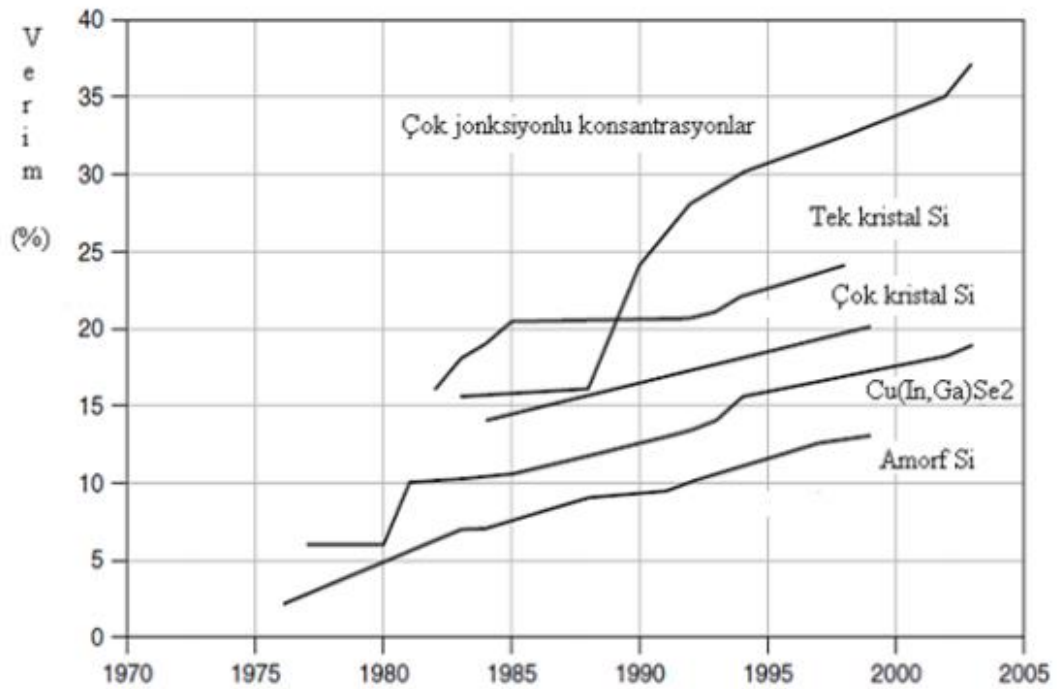
Güneşin enerji dönüşüm verimlilikleri hesaplanırken, güneşten gelen gerçek ışık spektrumlarından farklı birçok çeşit ışık kullanılır. Bu sebepten dolayı kaynaklardaki güneş enerjisi verimliliklerinin karşılaştırılması oldukça zordur. Buradaki tutarsızlık referans olan hücrenin ve incelemede olan materyalin soğurma spektrumlarındaki ölçümlenmiş spektral etkiye sahip olan silikon bir diyottur. En doğru yol, ölçümü güneşin sürüm spektrumuna ve yoğunluğuna(standart AM1.5G) olan benzerliği en fazla olan solar simülatör altında yapmaktır. Bu yapıldığında verimlilik, ölçülen AM1.5 güneş enerjisi dönüşüm verimliliği olarak adlandırılabilir. Bu, AM1.5 aydınlatması altında cihazın açık devre voltajı ve doldurma faktörünün yaklaşık olarak tahmin edilmesini sağlar. AM1.5 koşulları altındaki akım, monokromatik olay fotonundan, genellikle harici kuantum verimleri olarak adlandırılan mevcut verimliliklere kadar ölçülür.

AMD1.5 emisyon spektrumunun verilerle entegrasyonu, AMD1.5 aydınlatması altında tahmini kısa devre akım yoğunluğunu verir. Ölçülen doldurma faktörü ve açık devre voltajıyla birleştirildiğinde bu, tahmini bir AMD1.5 güneş enerjisi dönüştürme verimliliği sağlar. Verimliliği belirlemek için kullanılan gerçek yöntem gösterilerek uygun bir karşılaştırmaya izin verilir. Tablo 2.6'da güneş pillerinin verimlilikleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Güneş pilleri verimlilikleri [1]

Güneş Pilleri	Alan (cm^2)	Verimlilik (Laboratuvar) %	Verimlilik (Kullanım) %
Tek Kristalli Silisyum	4,00	18-24	12-15
Çok Kristalli Silisyum	21,2	18,6	11-14
Amorf Silisyum	1	14,7	6-7
Kadmiyum Tellür	1	15,8	7-8
Bakır İndiyum Diselenid	0,4	17,7	14,1

Yarıiletken güneş pillerinin verimini etkileyen etmenler kendiliğinden olan etmenler ve teknoloji ile ortaya çıkan etmenler olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Doğal etmenler; soğurma işleminin tam olarak gerçekleşmemesi, foton enerjisinin, elektron-boşluk çifti oluşturmak için tam olarak kullanılamaması, p-n eklemine uygulanabilir en fazla gerilim değerinin eklemeye engel yüksekliğine eşit olmaması ve pil yapımında uygun yasak enerji aralığına sahip yarıiletken veya uygun katkı yoğunlaşmalı malzemelerin kullanılmaması gibi sayılabilir. Teknolojik etmenler ise; güneş pili seri iç direncinin yüksek olması, toplama kayıpları ve yansıma kayıpları olarak sıralanabilir. Çeşitli pil verimlilikleri ve yıllara göre değişimi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Çeşitli pil verimlilikleri ve yıllara göre değişimi [1]

2.5.5.Güneş pillerinin verim ölçümleri

Referans pil yöntemi, güneş pillerindeki verimin ölçülmesinde kullanılan yöntemdir. Bu pil hava geçirmeyecek biçimde hazırlanmıştır ve test edilecek pil ile yapım malzemesi aynı olacak şekilde ikisi de aynı tepkiyi vermelidir. Pil sıcaklığının 28 ± 2 °C ve pillerin üzerine düşen ışıma şiddetinin 100 W/m^2 olduğu koşullar, test koşullarının standart olduğu koşullardır. Bu testte ölçüm aletleri çok küçük hataları da belirleyebilmelidir.

Bir pil için ölçüm yapılacağı zaman, uygun koşullarda akım ve gerilim değerleri kayıt altına alınır. Bu değerlerin kullanılmasıyla güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği çizilir. Bu I-V eğrisindeki güneş pili verim değerleri alınarak, verim hesabı yapılır [3].

2.5.6. Seri direnç (R_s)

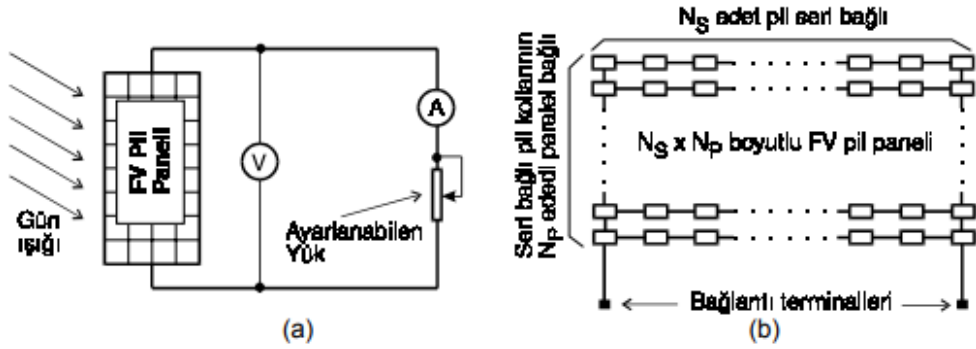
Seri direncin meydana gelişi, bir yarı iletken materyaldeki yük transferi direnci ile güneş pili hücresindeki kontakt dirençte oluşur. Güneş pili hücresindeki dolgu faktörünün azalmasına sebep olan bu seri direncin varlığı, aygıttaki maksimum güç çıkışına da etki eder. Öte yandan kısa devre akımının azalmasındaki sebep, seri direnç değerinin büyümesidir. Fakat açık devredeki voltaj bundan etkilenmez.

2.5.7.Şönt direnç (R_{sh})

Foto-akım için ek bir akım yolu oluşturan düşük şönt direnci, aygıtta güç kaybı yaşanmasına sebep olur. Bu durumun pil başarımını doğrudan etkilemesi, dolgu faktörünün azaltılıp, açık devre voltajının düşürülmesiyle oluşur. Kısa devre akım değerinin çok düşük olmaması durumunda şönt direncinden etkilenmez.

2.6.Akım-Gerilim Karakteristikleri

Bir pilin akım ve geriliminin yükten etkileniş biçimi gözlemlenerek, güneş pilinin elektriksel özellikleri belirlenebilir. Bunu şekil 2.12a’ daki gibi gösterebiliriz. Ampermetrenin seri bağlı olduğu ve devrede, ampermetre üzerinden ayarlanabilen bir yük, fotovoltaik pil paneli doğrudan bağlanmıştır. Ortam sıcaklıklarındaki değişmelerinin ve gün ışığının göz ardı edilebilecek kadar az olduğu varsayılarak, günün belirli saatlerinde, açık konumdaki yükün uç kısımlarının kısa devre konumuna ayarlanırken voltmetre ve ampermetredeki veriler bütün yük kademeleri adına kayıt altına alınıp grafik şeklinde çizilecek olursa şekil 2.13’teki akım gerilim(I-V) karakteristiği ortaya çıkar [1].



Şekil 2.12. (a) FV pil panelinin doğrudan ayarlanabilen bir yüke bağlanması (b) FV pillerin seri-paralel bağlanması ile oluşturulan FV güneş pili paneli [1]

Fotovoltaik güneş pili paneli yapılırken, yeteri kadar kol (örneğin N_s tane pil seri bağlarken, gerekli akımın oluşturulabilmesi için de pillerin seri bağlanmasıyla oluşan yeteri kadar, örneğin N_p tane) birbirine paralel bağlanarak, gerekli çıkış gerilimi elde edilmeye çalışılır. Bu durum Şekil 2.12 b’de gösterilmiştir. Bundan dolayı fotovoltaik pil panelinin akım ve gerilimini, Şekil 2.12a’daki bağlantı devresi ve fotovoltaik pil panelinin kullanılmasıyla yapılan ölçümler verir. Panel akımı I_{panel} , gerilimi V_{panel} ile gösterilirse, paneldeki pillerin akım ve gerilimi sırasıyla 2.6 ve 2.7denklemleri yardımıyla belirlenir [1].

$$I_{pil} = \frac{I_{panel}}{N_p} \quad (2.6)$$

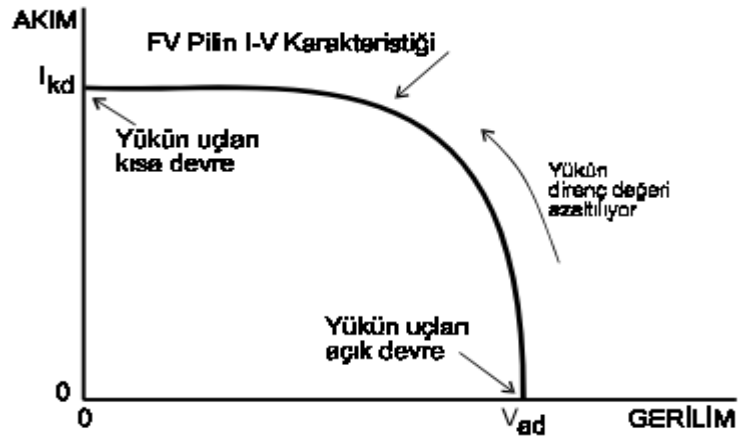
$$V_{pil} = \frac{V_{panel}}{N_s} \quad (2.7)$$

Panelin çıkış gücü 2.8denklemleri ile elde edilir.

$$P_{panel} = V_{panel} I_{panel} \quad (2.8)$$

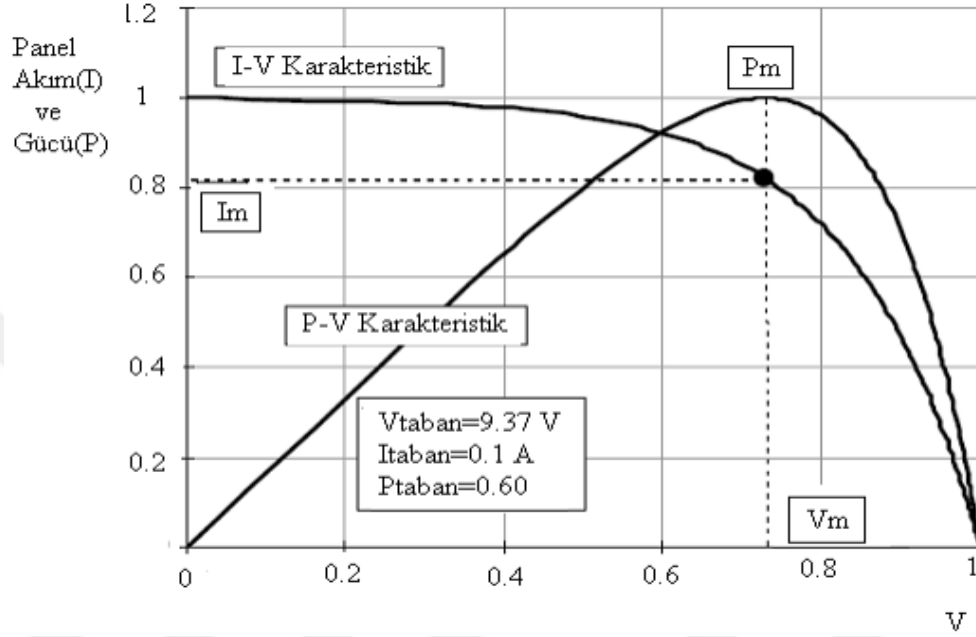
Tek bir pilin gücü ise 2.9 denklemleri ile hesaplanır.

$$P_{pil} = V_{pil} I_{pil} = \frac{V_{panel}}{N_s} * \frac{I_{panel}}{N_p} = \frac{P_{panel}}{N_s * N_p} \quad (2.9)$$



Şekil 2.13 FV pil panelin akım gerilim (I-V) karakteristiğinin yüklerle değişimi [1]

Bir fotovoltaik pil veya panelin, çıkış gücünün sıfır olması, akım ve gerilimden herhangi biri veya ikisinin birden sıfır olmasına bağlıdır. Bu sebeple çıkış gücünün değişimi şekil 2.14'deki gibi olur [1].



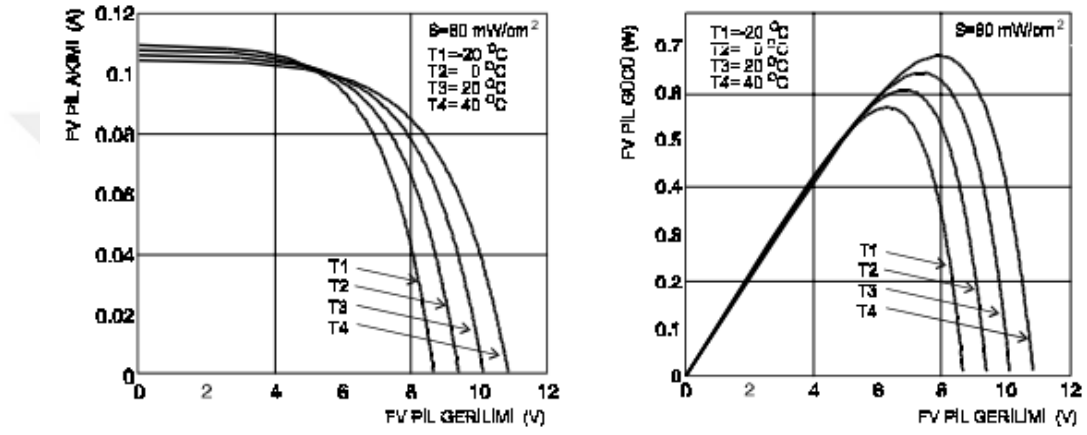
Şekil 2.14 FV pilin I-V ve P-V karakteristikleri [17]

Şekil 2.14'de de görüldüğü gibi akım ve gerilimin bazı değerlerinde çıkış gücü en fazla olmaktadır. Bir fotovoltaik pil veya panelde maksimum çıkış gücü, çalışma sıcaklığı ve üstüne düşen gün ışığı seviyesine bağlıdır. Dolayısıyla panelin çıkış gücünü mümkün olduğunca yüksek değerde tutmak, kurulan bir fotovoltaik panelden yüksek verim almak adına önemlidir.

Şekil 2.14'de verilen karakteristikler 20°C'lik çalışma sıcaklığı ve 80 mW/cm² lik gün ışığı şiddeti varken hesaplanan sonuçlardır. Akım, gerilim ve güç değerlerinin değişmesi, bu değişkenlerle ilgilidir.

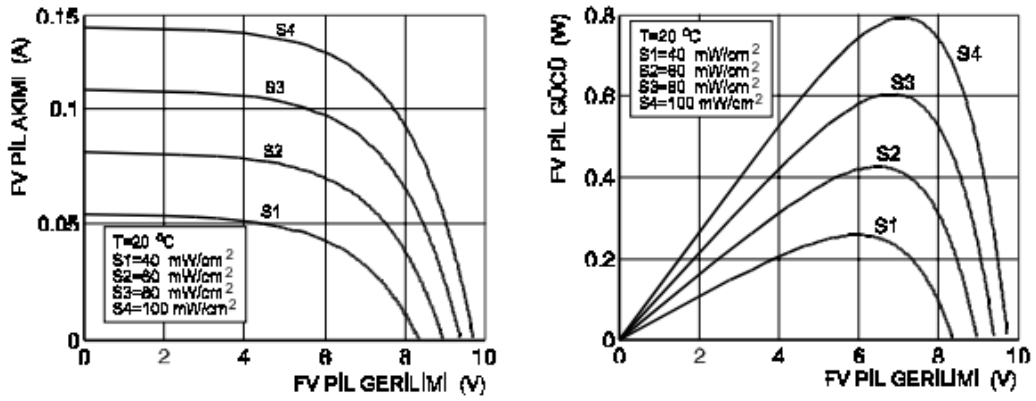
I-V ve P-V karakteristiklerine çalışma sıcaklığı değişiminin etkilerini şekil 2.15'de gün ışığı şiddetindeki değişimin etkilerini ise şekil 2.16'da görebiliriz. Çalışma

sıcaklığının artması akımı etkilediği gibi çıkış gerilimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak asıl etkisi pilin çıkış gerilimi üzerinde görülmektedir. Soğuk ortamlar fotovoltaik piller için daha uygundur. Çünkü yüksek ortam sıcaklığı, pilin çalıştığı sıcaklığı da yükseltir. Benzer etkilere çıkış gücünde de rastlanmaktadır. Çıkış gücünü çalışma sıcaklığındaki artışın olumsuz etkilemesindeki neden, gerilimdeki azalmanın doğrudan güce yansımastır.



Şekil 2.15. FV güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün sıcaklıkla değişimi [1]

Fotovoltaik pilin çıkış akımını olumlu etkileyen veri gün ışığı şiddetindeki artışlardır. Sıcaklığın akımda meydana getirdiği artışa göre ışık şiddetinin etkisiyle olan artış oldukça yüksektir. Pil çıkış akımındaki ve pil çıkış gerilimindeki artışın sebebi olan ışık şiddetinde, akımdaki artış gerilimdeki artıştan daha büyüktür. Işık şiddetindeki artışın, fotovoltaik pilin gücünü arttırdığı grafik şekil 2.16b’de gösterilmiştir. Hem akım hem de gerilimdeki artış, güçteki artışın kaynağıdır [1].

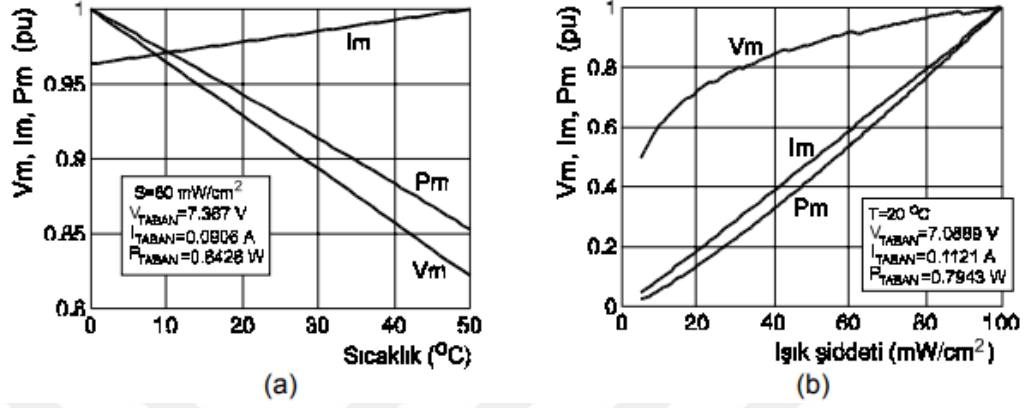


Şekil 2.16. FV güneş pilinin akım, gerilim ve gücünün ışık şiddetiyle değişimi [1]

Şekillerdeki eğriler incelendiğinde, sıcaklığın düşük, ışık şiddetinin yüksek olduğu ortamlarda, fotovoltaik güneş pillerinin performanslarının daha iyi olduğu görülmektedir. Fotovoltaik pilin maksimum çıkış gücü ve P-V grafiğinde çalışma sıcaklığının artışı güce karşılık gelen gerilimi azaltmaktadır. Fotovoltaik pilin maksimum çıkış gücünü arttıran bir diğer etmenler ise güneş radyasyonu ya da ışık şiddeti seviyesinin artmasıdır. Fakat ışık şiddetinin artışı bu güce karşılık gelen pil akımını ve pil gerilimini de arttırır. Bu durum Şekil 2.17a ve b’de gözlemlenebilir. Sıcaklığın ışık şiddetinde meydana getirdiği artışın belirgin bir şekilde görülmesine karşın, akımda bu artış daha azdır. Şekil 2.17’de birim değerler (perunits-pu) cinsinden gösterilmiştir. Gerilim, akım ve gücün gerçek değerleri, ilgili taban değerlere bölünmesiyle bu sonuçlara ulaşılmıştır. Buradaki değerlerin gerçek değerlerini bulmak için verilen ilgili taban değerler ile çarpmak gerekmektedir. Işık şiddetindeki değişim miktarı, sıcaklık, fotovoltaik pilin yapımında kullanılan yarıiletken malzemenin türü gibi nedenler bu eğrilerde bazı değişimlere yol açabilirler.

Fotovoltaik güneş pillerinin karakteristiklerine bakıldığında, I-V ya da P-V ilişkileri, bilinen doğru akım kaynaklarınınkine benzemediği görülür. Doğrusallıktan oldukça uzak olan bu karakteristikler maksimum akım, gerilim, çıkış gücü değerlerinde değil, I-V karakteristiğinin diz bölümü seviyesindedir. Ayrıca sıcaklıktan olumsuz anlamda

etkilenen fotovoltaik güneş pilleri için soğuk ve güneşli ortamlar daha uygun ortamlardır.



Şekil 2.17. FV pilin maksimum çıkış gücü ve bu güce karşılık gelen gerilim ve akımın (a) sıcaklıkla (b) ışık şiddetiyle değişimi [1]

2.7.Kapasite-Gerilim Karakteristikleri

Güneş pillerinde, p-tipi ve n-tipi bölgedeki pozitif ve negatif yüklerin meydana getirdiği eklem bölgesi paralel levha kondansatörü gibi davranır. Ekleme ters beslem uygulandığında yük değişimlerinin meydana gelmesi sonucu tüketme tabakası genişler. Bu durum güneş pili eklem kapasitesinin değişmesine neden olur. Kapasite-gerilim tekniği kullanılarak birçok önemli aygıt parametreleri elde edilir. Diğer taraftan, kapasite-gelim tekniği kristal kusurları, sığ ve derin seviye arayüzey durumları gibi aygıt içerisindeki tuzak merkezlerinin de belirlenmesinde faydalı bir metottur[18,19,20]. PN eklemlerde kapasite analizlerinde belirli bir eklem bölgesi sınırları içerisinde serbest yük taşıyıcılarının bulunmadığı varsayılır. Bu varsayımla eklem bölgesi genişliği uygulanan harici beslemle değişir ve yük yoğunluğu sabittir. P-tipi veya n-tipi bir yarıiletken birim alan başına yük yoğunluğu 2.10 ifadesi ile verilir.

$$Q = qN_{a,d}W_D = \sqrt{2\varepsilon_s q N_{a,d}(V_d \mp V)} \quad (2.10)$$

Q = yarıiletkende oluşmuş yük yoğunluğu,

q = Elektronik yük, V_d = Difüzyon potansiyeli,

V = Harici beslem, W_D = Tüketme bölgesi genişliği

ε_s = Yarıiletken dielektrik sabiti,

$N_{a,d}$ = Taşıyıcıların yük yoğunluğu (p-tipi veya n-tipi için)

Güneş piline harici bir ters beslem uygulandığında eklem bölgesindeki değişen yük miktarları sonucu bir diferansiyel kapasite oluşur. Oluşan bu kapasite, tüketme bölgesi diferansiyel kapasitesi olup 2.11 denklemi ile verilir.

$$C = A \left(\frac{qN_{a,d}\varepsilon_s}{2} \right)^{1/2} \left(\Phi_B - V_{p,n} + V_R - \frac{kT}{q} \right)^{-1/2} \quad (2.11)$$

A = kontak alanı, V_R = Harici ters beslem,

Φ_B = Engel yüksekliği,

$V_{p,n}$ = Fermi seviyesi ile yarıiletkenin değerlik (p-tipi için) veya iletkenlik (n-tipi için) bandı arasındaki fark

Görüldüğü gibi eklem kapasitesi taşıyıcı yoğunluğu ile doğru orantılı olup, uygulanan harici beslem ile ters orantılıdır. Eğer taşıyıcı yoğunluğu oranı artarsa eklem kapasitesi de artacaktır. 2.11 denkleminin tersi ve sonra da karesi alınırsa 2.12 denklemi elde edilir.

$$C^{-2} = \left(\frac{2}{A^2 q N_{a,d} \epsilon_s} \right) \left(\Phi_B - V_{p,n} + V_R - \frac{kT}{q} \right) \quad (2.12)$$

Bu ifade yardımıyla elde edilen $C^{-2} - V_R$ grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan $(\Phi_B - V_p - kT/q)$ terimi ve buna bağlı olarak da 2.13denkleminde edilir.

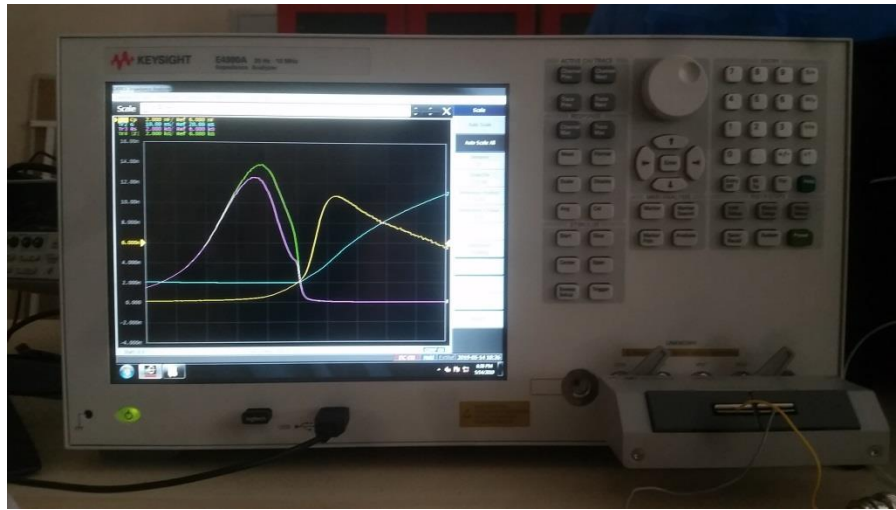
$$\Phi_B = V_o + V_{p,n} + \frac{kT}{q} \quad (2.13)$$

V_o = Gerilim ekseninin kesim noktası, k = Boltzman sabiti,

T = Kelvin cinsinden sıcaklık,

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Güneş pili hücrelerinin karakterizasyonları için 6,5x2,1cm boyutlarında monokristal ve polikristal güneş pili hücreleri satın alındı. Bu pillerin kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri geniş bir frekans aralığında (20Hz - 10MHz) ve -2 ile +2 volt aralığında yapıldı. C-V deneysel ölçümlerinden elde edilen $1-C^{-2}$ eğrileri yardımıyla hücrelerin engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_d), taşıyıcı yoğunluğu (N_a), maksimum elektrik alan (E_m) tüketme tabakası genişliği (W_D) gibi pillerin elektriksel parametreleri tayin edilmiştir. Seri direncin kapasite ve iletkenlik parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu parametrelerden seri direnç etkisi çıkarılarak bu parametreler tekrar elde edilmiştir. Bir başka parametre olan ve aygıt parametrelerine önemli derecede etki eden arayüzey durumları (D_{it}), güvenilir bir teknik olan Hill-Collemanb [21] metodu ile hesaplanmış ve bunların enerji dağılım profilleri elde edilmiştir. Ölçümler Keysight E4990A marka impedans analizatörü kullanılarak yapılmıştır (Şekil. 3.1.). Tüm ölçümler karanlık ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

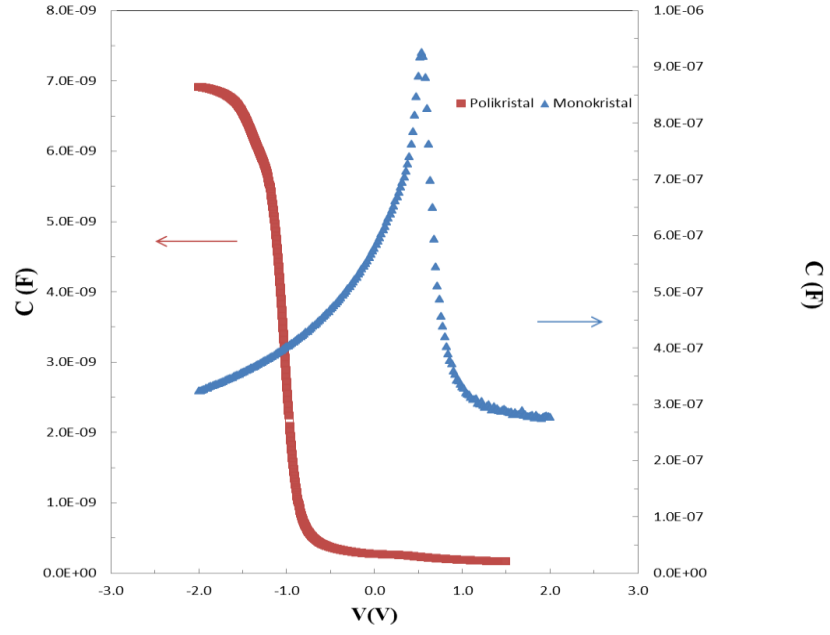


Şekil 3. 1 Kapasite ve iletkenlik ölçümlerinde kullanılan Keysight E4990 A impedans analizatörü

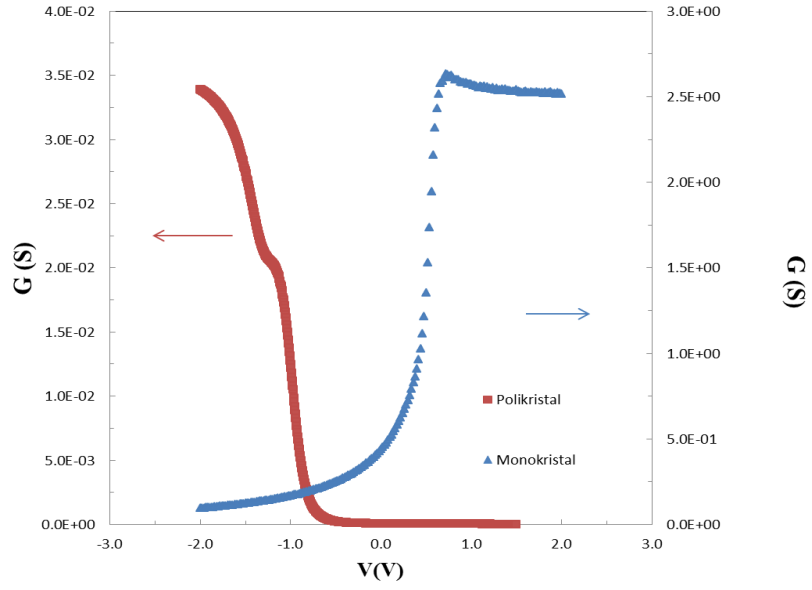
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri yarıiletken bir aygıtın elektriksel parametreleri hakkında önemli bilgiler verir. Şekil 4.1(a) ve (b)'de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin deneysel C-V ve G-V karakteristikleri verilmiştir. Genelde C-V ve G-V karakteristikleri ideal durumda frekanstan bağımsızdır[22-27]. Diğer taraftan bu ideal durum, bir arayüzey tabakasının varlığından, kontakt malzemelerinden ve arayüzey durumlarından etkilenir. C-V eğrilerinde anormal piklerin oluşumları bazı araştırmacılar tarafından da incelenmiştir [28].

Bu pikler arayüzey durum yoğunluğu, seri direnç ve arayüzey tabakası kalınlığı gibi birçok parametreye bağlıdır. Şekil 4.1(a) ve (b)'den görüldüğü üzere, C-V ve G/w-V eğrilerinin her ikisi de biriktirme, tüketme ve ters çevrilme olmak üzere 3 farklı bölgesi vardır. Ayrıca C-V eğrilerinde tüketme bölgesinde pikler mevcuttur. Kapasite eğrilerindeki böyle bir davranış arayüzey durumlarının belli bölgelerde lokalize olmasına atfedilebilir. Bu yüzden tüketme bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı fazladan bir kapasite meydana gelir.



(a)

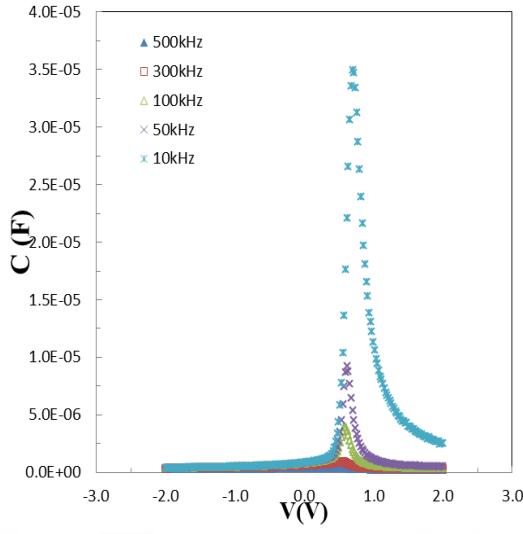


(b)

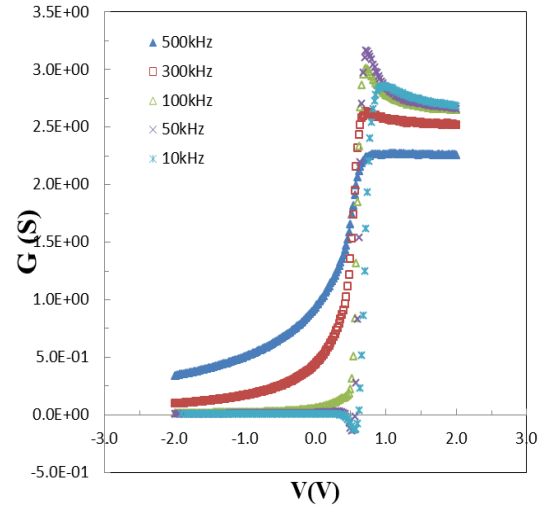
Şekil 4. 1. Güneş pili hücrelerinin C-V ve G-V eğrileri (a) monokristal (b) polikristal

Şekil 4.2(a) - (d)'de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin frekansa bağlı deneysel C-V ve G-V karakteristikleri verilmiştir. Şekil 4.2.'den görüleceği üzere, monokristal ve polikristal hücrelerin her iksinde de düz beslem bölgelerinde anormal tepeler gözlenmiştir. Tepe pozisyonları artan frekansla yüksek düz beslem bölgelerine doğru kayma eğilimindedir. Aynı zamanda kapasite tepeleri azalan frekansla artmaktadır. Alçak frekanslarda yüzey durumları uygulanan ac sinyali kolayca takip edebilir ve mevcut kapasiteye katkıda bulunabilir [29,30]. Ancak yüksek frekans bölgesinde arayüzey durumları uygulanan ac sinyali takip edemez [31]. Bunlara ilaveten Şekil 4.2a ve c'de frekansa bağlı dağılımlar oluştuğu ve bu dağılımların akümülayon bölgesinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan, arayüzey durumlarının tüm frekans bölgesinde dominant olduğu görülmektedir. Bu yüzden akümülayon ve tüketme bölgelerindeki arayüzey durumları katkılarının çıkarılmalıdır [32].

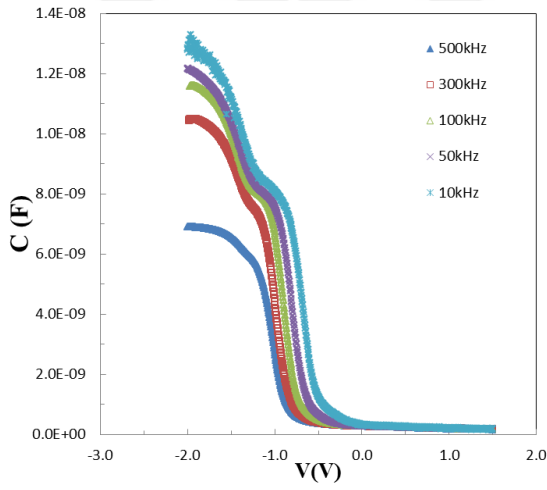
Şekil 4.2b ve d'de iletkenliğin frekans ve uygulanan voltaj ile değişimi görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere, daha büyük düz beslemlere doğru gidildikçe, akümülayon bölgesindeki iletkenlik değerleri tüketme bölgesindekinden daha büyük olduğu görülmüş ve bu değerler artan frekanslarda doyuma ulaşmıştır. G/w değerleri aynı zamanda azalan frekansla artmıştır. C-V ve G/w-V karakteristiklerinin frekansa olan bu bağımlılığı yüzey durumları ile ilişkilidir [22, 23].



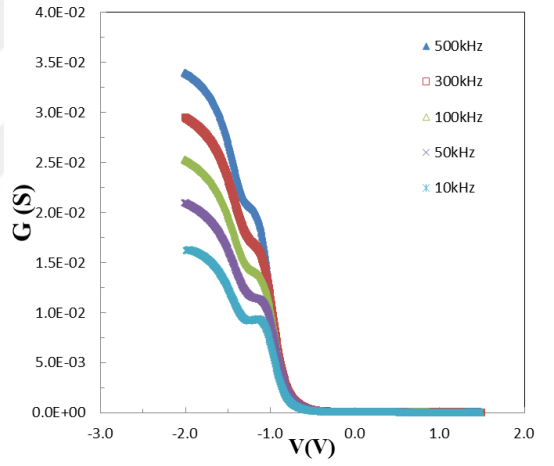
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. 2. Güneş pili hücrelerinin frekansa bağlı C-V ve G-V eğrileri : (a) ve (b) monokristal, (c) ve (d) polikristal.

Güneş pili hücrelerinin elektriksel parametrelerinin elde edilmesi için, deneysel C-V karakteristikleri aşağıdaki 4.1 denklemi yardımıyla analiz edilebilir [23].

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{A^2 \epsilon_s \epsilon_0 q N_a} \quad (4.1)$$

A = Efektif diyet alanı, V_d = Difüzyon potansiyeli, V = Uygulanan harici voltaj

ϵ_s = Yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti

N_a = Taşıyıcı konsantrasyonu, q = Elektronik yük

Şekil 4.3.(a) ve (b)'de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin uygulanan harici voltaja bağlı $1-C^{-2}$ eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerin voltaj eksenini kesiminden difüzyon potansiyeli, eğimlerinden ise taşıyıcı konsantrasyonları elde edilmiştir. N_a 'lar p tipi bölgedeki iyonize alıcı tuzaklar gibi davranan taşıyıcı konsantrasyonları olup, monokristal ve polikristal güneş pili hücreleri için $1,95 \times 10^{15}$ ve $1,51 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Güneş pillerinin engel yükseklikleri (Φ_B) Şekil 4.3.(a) ve (b)'den ve aşağıdaki 4.2 ifadesi yardımıyla elde edilmiş [23] ve Tablo 4.1.'de verilmiştir.

$$\Phi_B = V_d + V_p - \Delta\Phi_B \quad (4.2)$$

Φ_B = Engel yüksekliği, V_p = Değerlik bandındaki Fermi enerji seviyesi

$\Delta\Phi_B$ = Görüntü yük engel alçalması

Değerlik bandındaki Fermi enerji seviyesi 4.3 denkelmi ile verilir.

$$V_p = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_v}{N_a} \right) \quad (4.3)$$

k = Boltzman sabiti, T = Kelvin cinsinden sıcaklık,

N_v = Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu

P tipi silisyum için N_v değeri $2,65 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'dür. Görüntü yük engel alçalması değerleri aşağıda verilen 4.4 denklemi ile elde edilmiş olup, Tablo 4.1'de verilmiştir.

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (4.4)$$

E_m = Maksimum elektrik alan

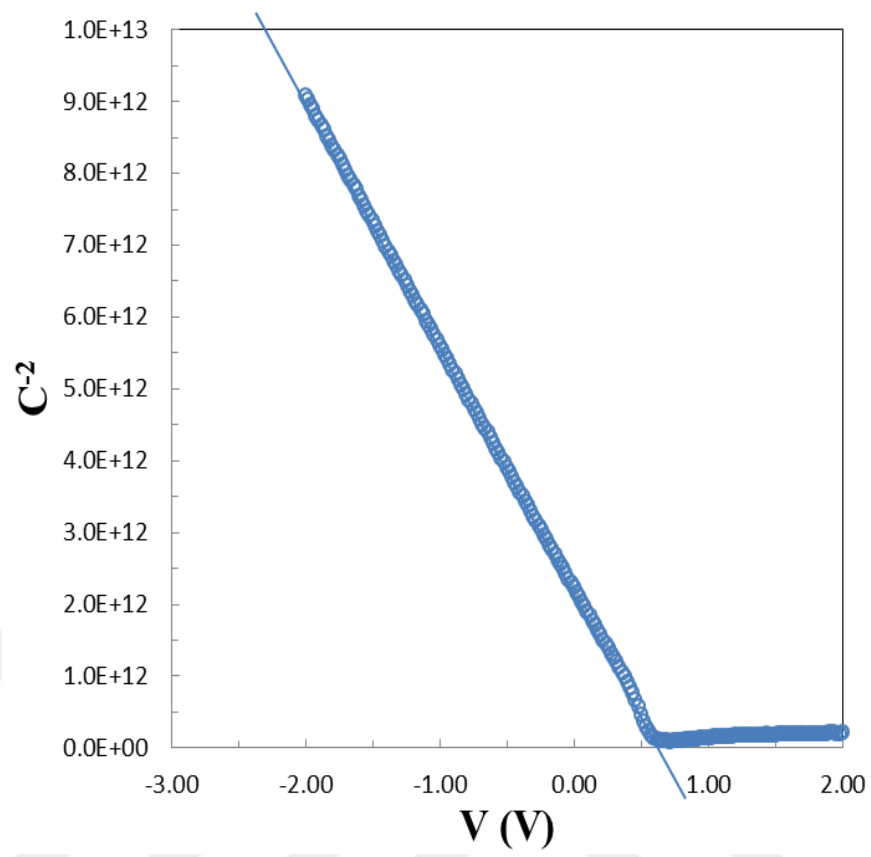
Maksimum elektrik alan değerleri aşağıdaki verilen 4.5 denklemi ile elde edilmiştir.

$$E_m = \sqrt{\frac{2qV_dN_a}{\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (4.5)$$

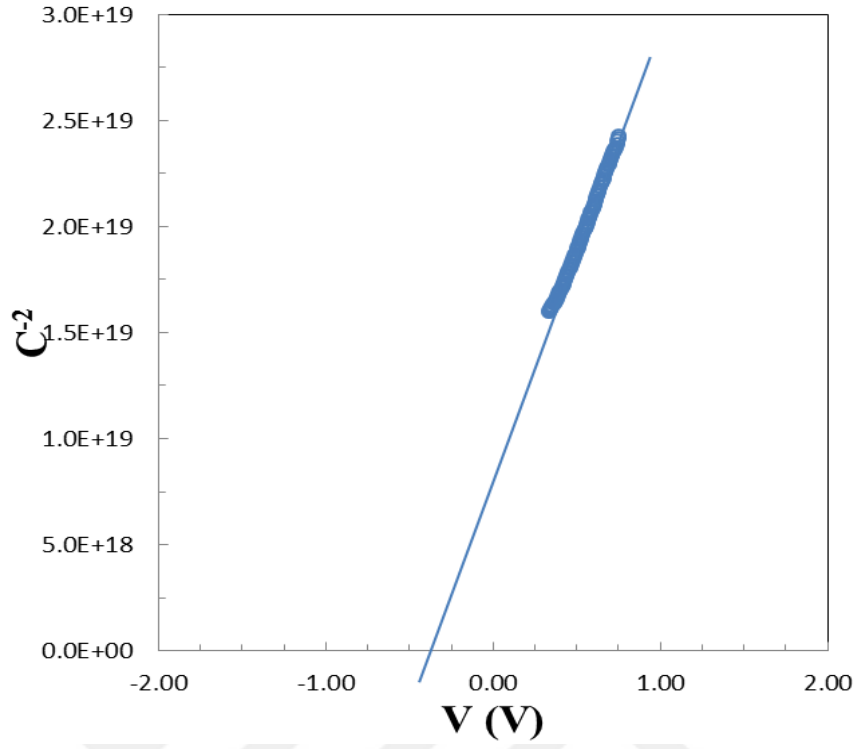
Güneş pili hücrelerinin tüketme bölgesi genişliklerini hesap etmek için aşağıdaki 4.6 denklemi kullanılmış olup elde edilen değerler Tablo 4.1'de verilmiştir.

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0V_d}{qN_a}} \quad (4.6)$$

W_D = Tüketme tabakası genişliği



(a)



(b)

Şekil 4. 3. Güneş pili hücrelerinin uygulanan voltaja bağlı $1/C^2$ eğrileri (a) monokristal (b) polikristal

Tablo 4. 1. Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin C^2 -V eğrilerinden elde edilen elektriksel parametreleri

Pil hücresi	V_d (V)	N_a (cm^{-3})	E_m (V/cm)	Φ_B (eV)	W_D (μm)	D_{it} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$)	R_s (Ω)
Monokristal	0,661	$1,95 \times 10^{15}$	$1,98 \times 10^4$	0,882	0,652	$1,23 \times 10^{11}$	0,35
Polikristal	0,480	$1,51 \times 10^{15}$	$1,48 \times 10^4$	0,708	0,627	$4,11 \times 10^{11}$	19,35

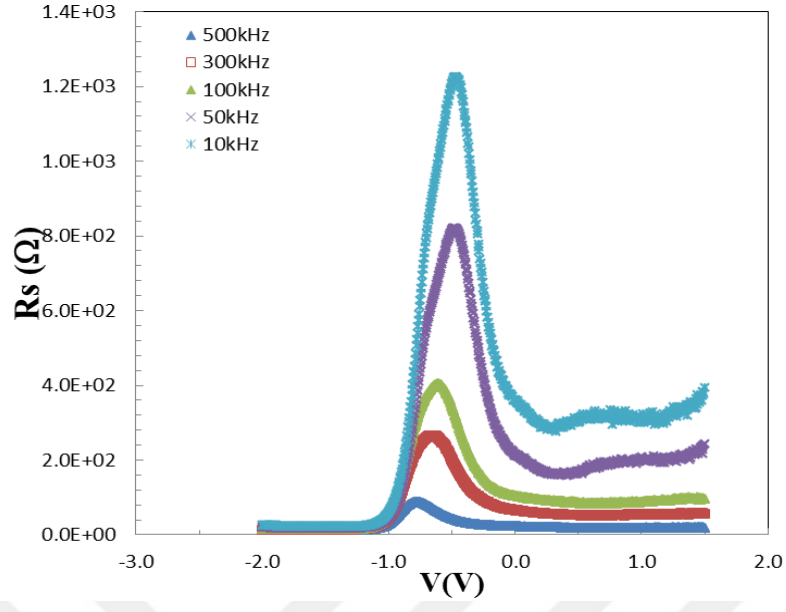
Şekil 4.2a – d’de elde edilen ve ideal olmayan kapasite ve iletkenlik davranışları, diyota uygulanan voltaj ve frekansın değiştirilmesi sonucu meydana gelen seri direnç (R_s) ve yüzey durumlarına (D_{it}) bağlı olan etkilerdir [33, 34]. Bu parametrelerin etkisi altındaki diyota uygulanan düz beslem gerilimi birkaç şekilde sınıflandırılabilir. Bu gerilim, belli kapasiteye sahip olan arayüzey tabakası, arayüzey tabakası direnci, tüketme bölgesi ve seri direnç (iç direnç) üzerine düşer [35]. Arayüzey tabakasının etkileri D_{it} değerleri hesaplanarak değerlendirilebilir. Fakat R_s direnci, omik ve doğrultucu kontakt oluşumundan, diyottaki kontakt arayüzeylerinden ve homojensizliklerden kaynaklanmaktadır [36,37]. G-V eğrilerindeki piklerin olmaması, seri direncin baskın bir şekilde meydana getirdiği kayıpları ve arayüzey tuzak kayıplarını maskeleyesindendir [38].

Uygulanan harici gerilime bağlı olan R_s değerleri yeterli yüksek frekansta güçlü akümülyasyon bölgesinde tayin edilebilir. Bunun için arayüzey tabakası kapasitesinden gelen katkıyı değerlendirmek için diyotun en yüksek kapasite değeri kullanılır. Bu metoda göre, aşağıdaki denklem yardımıyla R_s değerlerini elde etmek mümkündür [39].

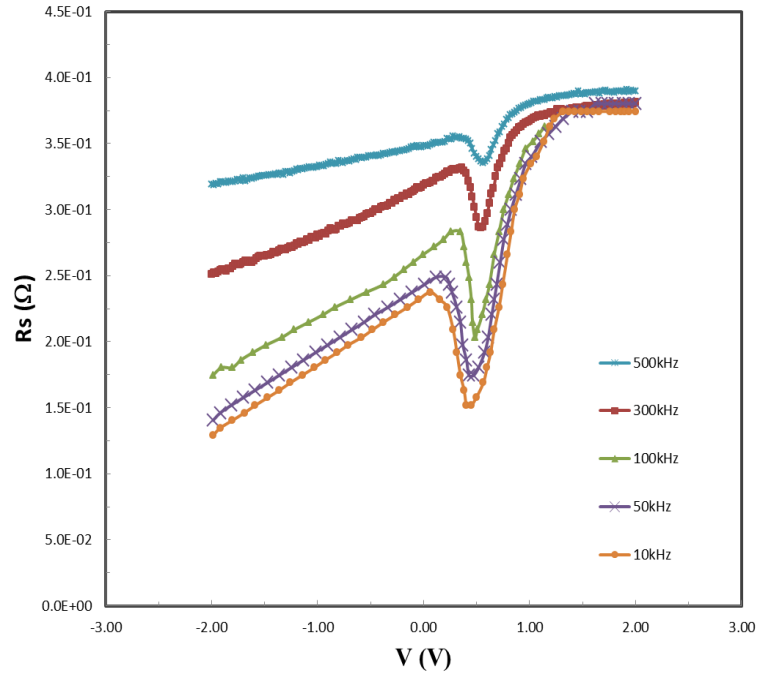
$$R_s = \frac{G_{m,acc}}{G_{m,acc}^2 + (wC_{m,acc})^2} \quad (4.7)$$

w = Açısal frekans, $G_{m,acc}$ = Akümülyasyon bölgesindeki ölçülmüş iletkenlik,

$C_{m,acc}$ = Akümülyasyon bölgesindeki ölçülmüş kapasite



(a)



(b)

Şekil 4. 4. Güneş pili hücrelerinin frekansa bağlı R_s -V karakteristikleri (a) monokristal (b) polikristal

Şekil 4.4a ve b’de 4.7 denklemi yardımıyla monokristal ve polikristal güneş pili hücreleri için elde edilen R_s değerleri uygulanan harici gerilimin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, R_s ’deki voltaj ve frekansa bağlı olan azalma davranışı C-V ve G-V grafiklerinde de açıkça görülmektedir. Seri dirençteki bu azalma arayüzey tuzaklarının boşalması sonucu meydana gelmiştir. Diğer taraftan, seri direnç değerlerinde tepe bölgeleri gözlenmiştir. Bu tarz bir davranış eklem bölgesinde belirli bir yerde lokalize olmuş yüzey durumlarına atfedilebilir. Monokristal ve polikristal güneş pili hücreleri için elde edilmiş seri direnç değerleri sırasıyla 0,35 ve 19,5 Ω ’dur. Bu değerler kapasite ve iletkenlik değerlerini düzeltmek için kullanılmışlardır. Şekil 4.4.’den elde edilen R_s değerlerinden bazıları kasitif ve iletkenlik etkilerini baskılayabilecek kadar büyük çıkmıştır. Seri direnç güneş pilleri için önemli bir performans parametresi olup, büyüklüğü aygıt üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bu yüzden deneysel olarak elde edilen kapasite ve iletkenlik değerleri düzeltilmelidir. Bu işlem, aşağıdaki 4.8 ve 4.9 denklemleri yardımıyla kapasiteden seri direnç ve buna eşdeğer iletkenlik değerleri çıkarılarak yapılabilir [38,40].

$$C_c = \frac{(G_m^2 + w^2 C_m^2) C_m}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.8)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + w^2 C_m^2) a}{a^2 + w^2 C_m^2} \quad (4.9)$$

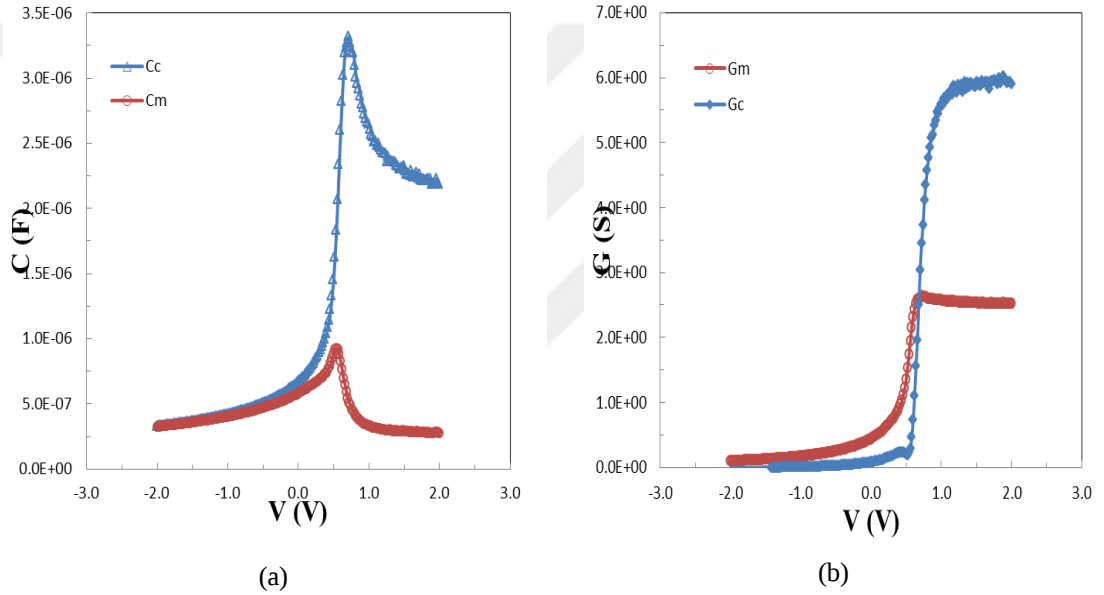
C_c = Düzeltilmiş kapasite, C_m = Ölçülmüş kapasite, G_m = Ölçülmüş iletkenlik

Burada a bir parametre olup, aşağıdaki 4.10 denklemi ile verilir.

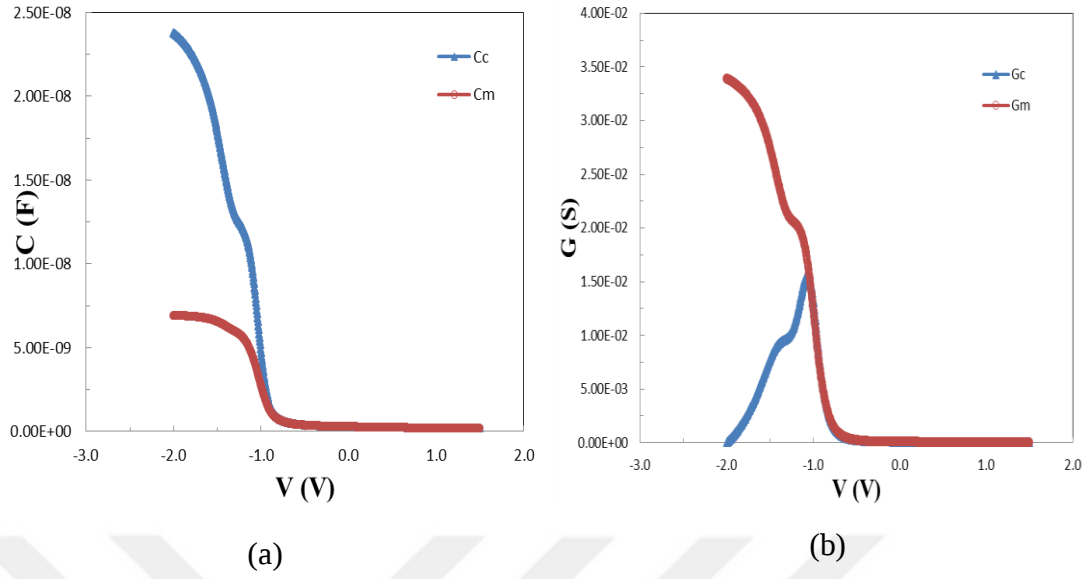
$$a = G_m - (G_m^2 + w^2 C_m^2) R_s \quad (4.10)$$

R_s = Seri direnç

Bu denklemler yardımıyla monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin düzeltilmiş C_c -V ve G_c -V eğrileri Şekil 4.5.a ve b ve Şekil 4.6.a ve b’de verilmiştir. Kapasite ve iletkenlik değerlerinde her ne kadar belirgin bir azalma eğilimi beklense de seri direnç etkisini tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir [38]. Şekil 4.5b ve Şekil 4.6b’den görüldüğü üzere, G_c değerleri önceki değerlere göre daha azalmıştır. Aynı zamanda G_c -V grafiğinde bir pik meydana gelmiştir. Bu pik pil hücresinin tüketme bölgesine karşılık gelir ve arayüzey durumlarının varlığını doğrular [21,42].



Şekil 4. 5. Monokristal güneş pili hücrelerinin düzeltilmiş (a) C-V (b) G-V eğrileri



Şekil 4. 6. Polikristal güneş pili hücrelerinin düzeltilmiş (a) C-V (b) G-V eğrileri.

Aygıt üzerine uygulanan harici voltaj ve frekans ile kapasite ve iletkenlik değerlerinde gözlenen değişimler yarıiletken yüzeyindeki istenmeden oluşan doğal oksit tabakasına ve arayüzey bölgesine atfedilebilir. Her iki durumda da, metal ve yarıiletken arasındaki arayüzde bulunan yalıtkan/oksit tabakası ve yarı iletkenin bant boşluğundaki arayüzey durumları (D_{it}) dağılımı pilin elektriksel özelliklerini yönlendiren anahtar işlevlerdendir. D_{it} 'in R_s değerleri üzerindeki etkisine ek olarak C ve G değerlerinin frekansın artması ile azalmasının yanında gerilime bağlı değişimlerinin de katkısı vardır. Buna göre C - V ve G - V grafiklerinin yardımıyla pil hücrelerindeki D_{it} seviyelerini iyi bilinen, hızlı ve güvenilir bir yöntem olan Hill-Coleman metodu ile elde etmek mümkündür [21]. Tek bir frekans yaklaşımında uygulanan bu metot G-V ölçümlerinden arayüzey durumlarının elde edilmesine imkân sağlar. Bu yöntemle göre D_{it} üzerindeki frekans etkisi aşağıdaki 4.11 ifadesi ile verilir.

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \left(\frac{(G/w)_{maks.}}{((G/w)_{maks.} C_i)^2 + (1 - C_{maks.}/C_i)^2} \right) \quad (4.11)$$

$(G/w)_{\text{maks.}}$ = Maksimum iletkenlik,

$C_{\text{maks.}}$ = Maksimum kapasite,

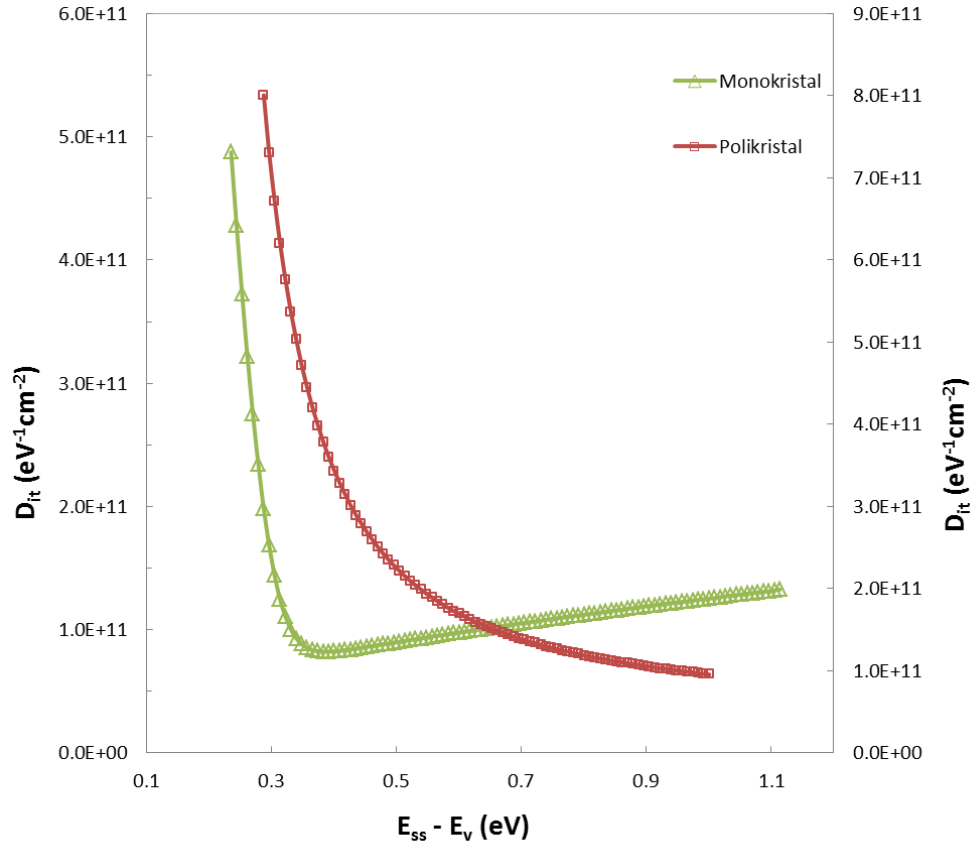
C_i = Biriktirme bölgesindeki kapasite

Bu denklem yardımıyla deneysel olarak elde edilmiş iletkenlik ve kapasite değerlerinden maksimum iletkenlik değeri ve buna karşılık gelen maksimum kapasite değerleri kullanılarak aynı zamanda her frekansta arayüzey tuzak yoğunluğunu tayin etmek mümkündür. Burada C_i , aynı zamanda arayüzey tabakasının etki ettiği tüketme kapasitesine bağlı bir kapasite olup, aşağıdaki 4.12 ifadesi ile verilir [23].

$$C_i = C \left(1 + \left(\frac{G}{wC} \right)^2 \right) \quad (4.12)$$

4.12 denklemi yeterince yüksek frekanslarda geçerli olup, iletim yöntemiyle yakalanan yüklerin neredeyse tamamının uygulanan ac sinyalinin takip edemediği varsayılarak güçlü akümülayon bölgesi için formüle edilmiştir [21,43-45].

Şekil 4.7’de monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin arayüzey durumlarının enerji dağılım profilleri verilmiştir. Bu metoda göre monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin ortalama arayüzey durumları yoğunluğu sırasıyla $1,23 \times 10^{11}$ ve $4,11 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.7’den görüldüğü üzere, her iki pil hücresinin arayüzey durum yoğunlukları değerlik bandının üst kısmına doğru eksponansiyel olarak artmaktadır. Bu durum yüzey durumlarının sürekliliğini göstermektedir. Böyle bir davranış arayüzey oksit tabakası ile ilişkilendirilebilir [23,28,46]. Diğer taraftan, belirli bir enerji bölgesinde monokristal pil hücresinin arayüzey dağılım profili polikristal hücreye nazaran daha düşük çıkmıştır. Bu durum monokristal pil hücresinin daha kalın bir oksit tabakasına sahip olmasına atfedilebilir.



Şekil 4. 7. Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin ara yüzey durumlarının enerji dağılım profili.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında günümüzde solar panel üretimlerinde yaygın olarak kullanılan silisyum monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin karanlık ortam elektriksel karakteristikleri incelenmiştir. Bunun için pil hücrelerinin voltaja bağlı kapasite ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Voltaja bağlı kapasite ve iletkenlik eğrilerinde biriktirme, tüketme ve ters çevrilme olmak üzere 3 farklı bölge gözlenmiştir. Pillerin her ikisinin de frekansa bağlı kapasite-gerilim ve iletkenlik-gerilim eğrilerinde düz beslem bölgelerinde tepeler gözlenmiştir. Bu durum arayüzey durumlarının uygulan sinyali takip ederek aygıtın elektriksel karakteristiklerine katkıda bulunmasına atfedilmiştir. Diğer taraftan frekansın artmasıyla iletkenlik değerlerinin artması yüzey durumları ile ilişkilendirilmiştir.

Monokristal güneş pili hücrelerinin iç direnç değeri polikristal tipi güneş pili hücrenin iç direnç değerinden daha küçük çıkmıştır. Bu durum p ve n tabakalarının direnci ile aktif bölge üzerindeki geçirgen tabakanın direncine atfedilmiştir. Diğer taraftan bazı güneş pillerinde akımı toplamak üzere farklı şekillerde metal kontakt oluşturulması sonucu da seri direncin azalmasına atfedilebilir. Seri direnç değerlerindeki frekansa bağlı olan azalma ise arayüzey tuzaklarının boşalması ile ilişkilendirilmiştir.

Monokristal ve polikristal güneş pili hücrelerinin değerlik bandına doğru eksponansiyel olarak artan arayüzey durum dağılımları her iki pildeki oksit tabakasına atfedilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Ardağ, Y., Güneş Pili Karakteristiklerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [2] Korun, M., Farklı Yarı İletken Malzemelerle Üretilmiş Güneş Pillerinde Verim Analizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [3] Küpeli, A.Ö., Güneş Pilleri ve Verimleri, Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [4] Öztürk, H.H., Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsan Yayınevi, İstanbul, 52-54, 2008.
- [5] Öztürk, D. H., Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Teknik Yayınevi, Ankara, 2008.
- [6] Bedeloğlu , A. Demir, A. Bozkurt, Y., Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller, Tekstil Teknolojileri Dergisi 4(2), 43-58, 2010.
- [7] Karamanav, M., Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [8] Boz, O.H., Günümüzün Alternatif Enerji Kaynağı: Fotovoltaik Güneş Pilleri, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [9] Demir, O. Güneş Pilleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Seminer, 2002.
- [10] Yüksek, O.Ü., Güneş Pilleri, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [11] Tercan, M.B., Güneş Pili Karakterizasyon Yöntemleri, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2000
- [12] Oğuz, Y. Karakan, A. Uslu, B., Afyonkarahisar’da Kurulu Olan Monokristal, Polikristal ve İnce Film Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği, 149,2015.
- [13] Arora, N.D. Hauser, J.R., Temperature dependence of silicon solar cell characteristics, Solar Energy Materials, 6, 151–158, 1982.
- [14] Şahin, M., Okumuş, H., Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu, Emo Bilimsel Dergi, 3(5), 17–25, 2013.
- [15] Nelson, J., Thephysics of solar cells, ImperialCollegePress, London, United Kingdom, 15-19, 2003.
- [16] 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.
- [17] Altaş, İ.H., Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 47, 1998.

- [18] Nicollan, E.H. Goetzberger, A., Mos conductane techique for measuring surface states parameters, Applied Physics Letters, 7(8), 1965.
- [19] Kar, S. Varma, S., Determination of silicon-silikon dioxide interface state propertiensfrom admittancemeasurements underillumination, Journal of Applied Physics, 58 (11), 4256, 1985
- [20] Kalleje, E., Cristoloveanu, S., Zaslavsky., Solid States Elektroniks, Springer,Almanya, 605-610, 1976.
- [21] Hill, W.A. Coleman, C.C., A single-frequency approximation for interface-state density determination, Solid-StateElectronics, 23(9), 987-993, 1980
- [22] Sze, S.M., Physics of SemiconductorDevices, Wiley, New York, 13-17,1981.
- [23] Rhoderick, E.H. Williams, R.H., Metal–SemiconductorContacts, Oxford Press, Clarendon, 67, 1988.
- [24] Nicollan, E.H.,Goetzberger, A., The si-si interface electrical properties as determined by the metal insulator silicon conductance technique, The Bell System Technical Journal, 46(6) , 97, 1967.
- [25] Singh, A. Solid-StateElectron. 28, 233, 1985
- [26] Evangelou, E.K. Konofaos, N. Craven, M.R. Cranton, W.M. Thomas, C.B. Characterisation of the BaTiO₃/p-Si interface and applications, Applied Surface Science, 166(1), 504-507, 2000
- [27] Castagne, R. Vapaille, A., Description of the SiO₂ interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements, Surface Science, 28(1), 157-193, 1993
- [28] Chattopadhyay, P. Daw, A.N. Solid-StateElectron. 29(5), 555, 1986.
- [29] Yıldız, D.E. Altındal, Ş. Tekeli, Z. And Özer, M., The effects of surface states and series resistance on the performance of Au/SnO₂/n-Si and Al/SnO₂/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes, Materials Science in Semiconductor Processing, 13, 34, 2010
- [30] Yıldız, D.E, Altındal, Ş., On the temperature dependence of series resistance and interface states in Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes, Microelectronic Engineering 85, 289, 2008.
- [31] Karatas, S. andTürüt, A., The frequency-dependent electrical characteristics of interfaces in the Sn/p-Si metal semiconductor structures, Microelectronics Reliability, 50(3), 351, 2010
- [32] Arslan, E., Bütün, S., Safak Y, and Özbay, E, Leakage current by Frenkel-Poole emission in Ni/Au Schottky contacts on Al_{0.83}In_{0.17}N/AlN/GaN heterostructures Journal of Electronic Materials 39, 2681, 2010
- [33] Yildiz, D.E, Dokme, I., Frequency and gate voltage effects on the dielectric properties and electrical coductivity of Al/SiO₂ /p-Si metal-insulator-semiconductor Schottky diodes, Journal of Applied Physics 110(1), 014507, 2011

- [34] Yıldız, D.E, Yıldırım, M, Gökçen, M., Investigation on dielectric properties of atomic layer deposited Al_2O_3 dielectric films, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 32(3), 031509, 2014
- [35] Sharma, B.L. *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press, MA: Springer ABD, 1984.
- [36] Gullu, H.H, Bayraklı Surucu, O., Terlemезoglu, O., Yıldız, D.E., Parlak, M., Frequency effect on electrical and dielectric characteristics of In/Cu₂ZnSnTe₄-Si/Ag diode structure, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30, 9814–9821, 2019.
- [37] Gullu, H.H, Yıldız, D.E, Analysis of forward and reverse biased current–voltage characteristics of Al/Al₂O₃/n-Si Schottky diode with atomic layer deposited Al₂O₃ thin film interlayer, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30, 19383–19393, 2019.
- [38] Turut, A, Karabulut, A, Ejderha, K, Bıyıklı, N Capacitance–conductance–current–voltage characteristics of atomic layer deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS structures, *Materials Science in Semiconductor Processing* 39, 400–407, 2015.
- [39] Brews, J.R, Nicollian, E.H, Improved MOS capacitor measurements using the Q-C method, *Solid State Electronics*, 27(11), 963–975, 1984
- [40] Tanrıkuş, E.E, Yıldız, D.E, Günen, A, Altındal, S., Frequency and voltage dependence of electric and dielectric properties of Au/TiO₂/n-4H-SiC (metal-insulator-semiconductor) type Schottky barrier diodes, *Physica Scripta* 90(9), 095801, 2015
- [41] Dakhel, A.A, Correlated structural and electrical properties of thin manganese oxide films, *Thin Solid Films* 496(2), 353–359, 2006
- [42] Konofaos, N., Electrical characterisation of SiON/n-Si structures for MOS VLSI electronics, *Microelectronics Journal*, 35(5), 421–425, 2004
- [43] Sze, S.M, Kwok, K.Ng., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, Hoboken, 755–800, 2007
- [44] Popescu, M, Bunget, I. *Physics of Solid Dielectrics*, Elsevier, Amsterdam, 19, 443, 1984
- [45] Aydın, S.B.K, Yıldız, D.E, Kanbur Cavus, H, Sahingöz, R., ALD TiO₂ thin film as dielectric for Al/p-Si Schottky diode, *Bulletin of Materials Science*, 37, 1563–1568, 2014
- [46] Karadeniz, S. Tuğluoğlu, N. Serin, T. Substrate temperature dependence of series resistance in Al/SnO₂/p-Si (111) Schottky diodes prepared by spray deposition method, *Applied Surface Science*, 233(1–4), 5–13, 2004

ÖZGEÇMİŞ

Meryem KÜÇÜK İlk, orta ve lise eğitimini Artvin’de tamamladı. 2013 yılında Artvin Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2013 yılında başladığı Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nü 2017 yılında bitirdi. 2017 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

