



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BATMAN'DA KURULU ÇOK KRİSTALLİ SİLİSYUM PV
MODÜLLÜ SİSTEMİN 2014-2024 YILLARI ARASINDAKİ
PERFORMANS ANALİZİ**

Emre GÖKTAŞ

**Haziran-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BATMAN'DA KURULU ÇOK KRİSTALLİ SİLİSYUM PV
MODÜLLÜ SİSTEMİN 2014-2024 YILLARI ARASINDAKİ
PERFORMANS ANALİZİ**

Emre GÖKTAŞ

**Danışman
Prof. Dr. Osman PAKMA**

Diğer Jüri Üyeleri

**Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ Prof. Dr. Osman PAKMA
Doç. Dr. Şadan ÖZDEN**

**Haziran-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Emre Göktaş tarafından hazırlanan “Batman’da Kurulu Çok Kristalli Silisyum PV Modüllü Sistemin 2014-2024 Yılları Arasındaki Performans Analizi” adlı tez çalışması 25/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

.....

Danışman

Prof. Dr. Osman PAKMA

.....

Üye

Doç. Dr. Şadan ÖZDEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Emre GÖKTAŞ
Tarih: 25.06.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BATMAN'DA KURULU ÇOK KRİSTALLİ SİLİSYUM PV MODÜLLÜ SİSTEMİN 2014-2024 YILLARI ARASINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Emre GÖKTAŞ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Osman PAKMA

2025, 78 Sayfa

Batman ili merkezinde çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş 2,145 kWp güce sahip fotovoltaik sistemin (PV) 2014 ile 2024 yılları arasında aylık toplam üretilen güç miktarları karşılaştırılarak performans değerlendirilmesi amaçlanmıştır. 11 yıllık periyotta piranometre ve sıcaklık sensörü yardımıyla Batman ili için anlık yatay yüzeye gelen güneş ışınım ve ortam sıcaklık değerleri de ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler ve sistemin teknik değerleri bilgisayar benzeşim paket yazılımı yardımıyla her yıl için üretim hesaplaması yapılmıştır. Hesaplanan bu değerler ile kurulu sistemin üretmiş olduğu toplam enerji üretim değerleri kıyaslanmıştır. Sonuç olarak çok kristalli silisyum modüllerden kurulu PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasındaki kayıplar da dikkate alınarak performans analizleri yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, güneş enerjisi, kristal, silisyum.

ABSTRACT

MASTER THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF A POLYCRYSTALLINE-Si PV MODULE SYSTEM IN BATMAN BETWEEN 2014 AND 2024

Emre GÖKTAŞ

Batman University Graduate Education Institute

Department of Renewable Energy Systems

Advisor: Prof. Dr. Osman PAKMA

2025, 78 Pages

It is aimed to evaluate the performance of a 2,145 kWp photovoltaic system (PV) consisting of polycrystalline silicon modules in the center of Batman province by comparing the total monthly generated power between 2014 and 2024. During the 11-year period, instantaneous solar radiation and ambient temperature values were also measured for Batman province with the help of pyranometer and temperature sensor. These measured values and the technical values of the system were calculated for each year with the help of computer simulation package software. These calculated values were compared with the total energy production values produced by the installed system. As a result, the performance analysis of our PV system installed with polycrystalline silicon modules is interpreted by taking into account the losses between 2014 and 2024.

Keywords: Crystalline, photovoltaic, silicon, solar energy.

ÖN SÖZ

Öncelikle, bu tezin hazırlanmasında katkıda bulunan, değerli danışmanım Prof. Dr. Osman PAKMA 'ya, bilimsel rehberliği ve sürekli desteği için teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmamın hazırlanmasında Osman Hocamın desteği önemli ölçüde rol oynamıştır. Ayrıca, yüksek lisans eğitimim sürecinde dersime giren, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan tüm değerli hocalarıma da teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleştirilmesinde destek veren aileme ve bu çalışmama zaman ayırmama yardımcı olan tüm mesai arkadaşlarıma da en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların anlayışı ve motivasyonu, bu zorlu süreçte benim için büyük bir güç kaynağı olmuştur.

Emre GÖKTAŞ
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Güneş Hücrelerine Giriş	5
2.1.1. n-tipi yarıiletken.....	5
2.1.2. p-tipi yarıiletken.....	6
2.1.3. pn-eklem olarak güneş hücresi diyot	8
2.1.4. Bir güneş hücresini akım-gerilim (I-V) karakteristikleri	9
2.1.5. Bir fotovoltatik (PV) dizinin I-V karakteristikleri	10
2.2. Güneş Hücresi Tarihçesi	17
2.3. Güneş Enerjisinin Maliyeti	19
2.4. Güneş Hücresi Maliyetini Etkileyen Faktörler	20
2.5. PV Uygulamalar	23
2.6. Silisyum Wafer Plaka Üretimi	24
2.6.1. Karbotermik arıtma süreci	24
2.6.2. Silisyumun ultra iyileştirilmesi	26
2.6.3. Siemens Süreci.....	29
2.6.4. Akışkan yataklı reaktör süreci	30
2.6.5. Tek kristalli silisyum üretimi	31
2.6.6. Çok Kristalli Silisyum (MS-Si)	34
2.6.7. Silisyum son işlem	38
2.7. PV Sistemler	41
2.7.1. Şebekeden bağımsız PV sistemler	41
2.7.2. Şebeke bağlantılı PV sistemler	42
2.7.3. Hibrit sistemler	42
2.8. PV Sistem Elemanları	43
2.8.1. PV Modüller	43
2.8.1.1. PV hücre türleri.....	43
2.8.2. Eviriciler	44
2.8.3. Kablo.....	45
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	47
3.1. Meteorolojik Sistem.....	47
3.1.1. Sıcaklık ölçümü	48

3.1.2. Güneş ışıınım ölçüm sistemi.....	48
3.2. PVsyst Paket Yazılım Programı	50
3.3. Çok Kristalli PV Sistem.....	51
3.3.1. Çok kristalli Si PV modüller.....	51
3.3.2. Evirici.....	52
3.3.3. PV üretim değerlerini kaydetme	54
3.3.4. Çok kristalli silisyum PV sistem.....	55
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	57
4.1. Meteorolojik Değerler.....	57
4.2. Benzeşim Analizleri.....	61
4.3. Üretim Sonuçları.....	64
4.4. Performans Analiz	66
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR	75

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Çeşitli güneş enerjisi teknolojilerinde araştırma hücreleri için doğrulanmış en yüksek dönüşüm verimliliği. (Veri Kaynağı: NREL, 2023).....	4
Çizelge 2.1. Cz ve yüzme bölgesi metodunun karşılaştırması.....	33
Çizelge 3.1. Kipp&Zonen CMP11 modelli piranometre özellikleri	49
Çizelge 3.2. Çok kristalli silisyum modüllerin standart test koşullarındaki (STC) teknik değerleri.....	51
Çizelge 3.3. DC-AC altında SunString5000 eviricine ait teknik değerler	52
Çizelge 4.1. 2014 ile 2024 yılları arasında Batman ili merkezinde ölçülmüş ortalama sıcaklık değerleri (°C).....	57
Çizelge 4.2. 2014 ile 2024 yılları arasında Batman ili merkezinde ölçülmüş yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük güneş ışınım şiddeti değerleri (kWh/m ² .gün).....	58
Çizelge 4.3. 2014 ile 2024 yılları arasında Batman ili merkezinde ölçülmüş yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük güneş ışınım şiddeti değerlerinin 25° eğime göre şiddet değerleri (kWh/m ² .gün).....	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. n-tipi yarıiletken atom düzeni	6
Şekil 2.2. p-tipi yarıiletken atom düzeni	7
Şekil 2.3. pn-eklem diyotu olarak güneş hücresi	8
Şekil 2.4. Bir güneş hücresinin I-V grafiği	9
Şekil 2.5. PV modülünün I-V karakteristiği	10
Şekil 2.6. Güneş hücresi I-V eğrisi: (a) karanlıkta, (b) ışık altında, (c) daha şiddetli ışık altında ve (d) güneş hücre eğrisi geleneksel olarak ters çevrilmiştir(Honsberg ve Bowden, 2019).....	12
Şekil 2.7. Güneş hücresinin karakteristik direnci	15
Şekil 2.8. Seri direnç	16
Şekil 2.9. Şönt direnci.....	16
Şekil 2.10. Silisyum güneş hücreleri için üretim maliyetlerinin NREL analizi (https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-manufacturing-cost.html).21	21
Şekil 2.11. Metalurjik silisyum rafinasyonunun karbotermik süreci (Alami ve ark., 2023)	25
Şekil 2.12. Kumdan yüksek saflıkta silisyuma (Alami ve ark., 2023).....	26
Şekil 2.13. Yüksek saflıkta güneş enerjisi sınıfı ve yarıiletken sınıfı silisyum elde etmek için CVD kurulumu (Alami ve ark., 2023).....	27
Şekil 2.14. Çoklu silisyum saflaştırma ve arıtma için Siemens süreci (a) Siemens odası veya çanı ve (b) silisyum parçalarını ayırmaya çoklu silisyum çubuklar (Alami ve ark., 2023).....	29
Şekil 2.15. Akışkan yataklı bir reaktör aracılığıyla silisyum saflaştırma ve rafine etme sürecinin şeması (Alami ve ark., 2023).....	30
Şekil 2.16. Czochralski silisyum metoduyla tek kristalli silisyum oluşturma süreci.....	31
Şekil 2.17. Tek kristalli Si elde etmek için yüzey bölge yöntemine dahil edilen çeşitli aşamalar (Alami ve ark., 2023).....	32
Şekil 2.18. (a) Yüzme bölgesinin yakın çekimi ve (b) dökme silikon külçenin etrafındaki indüksiyon bobininin resmi (Alami ve ark., 2023).....	33
Şekil 2.19. Yönlü katılaştırma (Alami ve ark., 2023).....	34
Şekil 2.20. (a) Tel şerit yöntemi ile çoklu kristal Si üretimi ve (b) sabun köpüğünün filamentlere yapışmasının benzerliği (Alami ve ark., 2023).....	35
Şekil 2.21. Çok kristalli silisyum elde etmek için şerit büyütme yöntemi, burada VR hareketli alt tabakanın hızıdır(Alami ve ark., 2023).....	36
Şekil 2.22. Süreç karşılaştırma: (a) Yığın silisyum gofret üretimi ve (b) şerit veya levha büyütme (Alami ve ark., 2023).....	37
Şekil 2.23. Yığın silisyum ve şerit levha üretim aşamaları.....	37
Şekil 2.24. Yığın silisyum üretiminden gofret üretiminin aşamaları (Alami ve ark., 2023).....	38
Şekil 2.25. (a) İç testere kullanımı kırık kenarları azaltır ve kesim üzerinde daha iyi kontrol sağlar ve (b) elmas kaplı çelik teller dilimleme işleminden daha az atık çıkmasını sağlar (Alami ve ark., 2023).....	39
Şekil 2.26. Gofrete farklı özellikler eklemek, katkılama durumunu ve açıkta kalan kristalografik düzlemleri ayırt eder (Alami ve ark., 2023).....	39
Şekil 2.27. Şematik gofret aşındırma gösterimi	40
Şekil 2.28. Şebekeden bağımsız PV sistem.....	41
Şekil 2.29. Şebekeye bağlı PV sistem.....	41
Şekil 2.30. Hibrit enerji santrali örneği	42
Şekil 2.31. PV diziyne bağlanan bir evirici.....	44

Şekil 2.32. Modüller arası bağlantı kabloları.....	45
Şekil 3.1. Meteoroloji sistem (Batman).....	46
Şekil 3.2. HMP60 Vaisala sıcaklık sensörü ve radyasyon kalkanı	47
Şekil 3.3. Kipp&Zonen CMP11 modeli piranometre yapısı	48
Şekil 3.4. A-B Termo-çifti.....	48
Şekil 3.5. PVsyst V8.0 paket yazılım programı giriş arayüzü görüntüsü.....	49
Şekil 3.6. Batman Gültepe Simya Koleji bina çatısına kurulu fotovoltaik sistem.....	50
Şekil 3.7. Çok kristalli silisyumlu PV sistemde kullanılan SunString5000 eviricisi.....	52
Şekil 3.8. PV sistemimiz tarafından üretilen güç değerlerini kaydeden SUNlogXL cihazı.....	53
Şekil 3.9. Çok kristalli silisyum modüllerden elde edilmiş PV sistemimiz (ortada).....	54
Şekil 3.10. Çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş PV sistemimizin tasarım düzeni.....	55
Şekil 4.1. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş güneş ışınım ve ortam sıcaklığı değerleri referans alınarak PVsyst 8.0 paket yazılımı ile sistemimizin benzeşim yoluyla hesaplanmış yıllık toplam enerji değerleri	61
Şekil 4.2. Benzeşim yoluyla PVsyst 8.0 paket yazılımı ile gerçekleştirilerek hesaplanmış sistemimizin 2024 yılına ait sistemimizin enerji kayıpları	62
Şekil 4.3. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş çok kristalli-Si PV sistemimizin ürettiği toplam enerji değerleri	64
Şekil 4.4. Batman ili merkezinde 2014 ile 2024 yılları arasında 2,145 kWp güce sahip çok kristalli-Si modül teknolojisinden oluşan sistemimizin benzeşim yoluyla hesaplanmış ve gerçekte üretilen enerji değerleri	64
Şekil 4.5. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş günlük yatay ve eğimli yüzeye (25°) hesaplanmış ışınım şiddeti değerleri	67
Şekil 4.6. Batman ili merkezinde çok kristalli Si modüllerinden oluşmuş 2,145 kWp güce sahip PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında üretilen yıllık toplam güç miktarı ve ortalama günlük sıcaklık değerleri.....	68
Şekil 4.7. Batman ili merkezinde çok kristalli Si modüllerinden oluşmuş 2,145 kWp güce sahip PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında üretilen günlük toplam güç ve ortalama günlük sıcaklık değerleri	68
Şekil 4.8. Batman ili merkezinde çok kristalli Si modüllerden oluşan 2,145 kWp güce PV sistemimizin yıllara göre verimlilik oranları (%).....	69
Şekil 4.9. Yıllara göre çok kristalli Si PV sistemimizin analizlenmiş ve değerleri	70
Şekil 4.10. PV sistemin 2014-2024 yılları arasındaki performans oranları	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

a-Si	:	Amorf Silisyum
AC	:	Alternatif Akım
AM	:	Hava Kütlesi
Ah	:	Amper Saat
cm	:	Santimetre
DC	:	Doğru Akım
DMT	:	Dünya Meteoroloji Teşkilatı
E _{şebeke}	:	PV modülü ile şebeke verilen enerji
E _g	:	Yasak Enerji Aralığı
FF	:	Doluluk Faktörü
G	:	Global Işınım
G _{sc}	:	Güneş Sabiti
GES	:	Güneş Enerji Sabiti
H _β	:	Eğimli yüzey üzerinde birim alana gelen ışınım enerjisi
I	:	Devre üzerine düşen akım
J	:	Joule, Enerji birimi
K	:	Kelvin, Enerji birimi
kWh	:	Kilo watt saat
MW	:	Mega Watt
N _{OCT}	:	Nominal çalışma koşullarında hücre sıcaklığı
PV	:	Fotovoltaik (Photovoltaic)
PR	:	Performans oranı
R _p	:	Paralel Direnç
R _s	:	Seri Direnç
STC	:	Standart Test Koşulları Altında
T	:	Sıcaklık
T _{atm}	:	Atmosferin geçirgenliği
V	:	Devre üzerine düşen Voltaj
V _{OC}	:	Güneş Hücresi Açık Devre Gerilimi
W _{p,e}	:	Fotovoltaik Örgünün STC altındaki kurulu güç değeri
WRC	:	Dünya ışınım merkezi
W _p	:	Maksimum güç
W	:	Güç
I _{SC}	:	Güneş hücresi kısa devre akımı
η	:	Verimlilik
η _{ref}	:	STC altında maksimum güneş hücresi verimliliği
G _{STC}	:	STC altında tanımlanan ışınım gücü (1000W/m ²)
P _{SVS}	:	Sistem çıkış gücü
β	:	Modüllerin eğim açısı
μm	:	Mikro metre
U _D	:	Diyot gerilimi
U	:	Fotovoltaik hücre bağlantı gerilimi
I _D	:	Diyot akımı
m	:	Diyot faktörü
s	:	Işınım katsayısı

η_{η}	:	Anma verimi
U_L	:	Kayıp katsayı
$^{\circ}\text{C}$	:	Santigrad
T_{α}	:	Modül soğurma katsayısı
T_{α}	:	Ortam Sıcaklığı
Y_f	:	Sistem enerji üretimi
m/s	:	Rüzgar hızı
$H_{\beta,g}$	:	PV örgü üzerine birim alana düşen günlük ışıınım enerjisi
$\eta_{sys,\alpha}$	:	Aylık ortalama günlük sistem verimliliği
L_n	:	elektronların difüzyon uzunluğu
L_p	:	boşlukların difüzyon uzunluğu
NREL	:	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
CVD	:	kimyasal buhar biriktirme

1. GİRİŞ

Çevre dostu enerji seçenekleri arayışında, etkili ve umut vaat eden seçeneklerden biri güneş enerjisidir. Farklı teknolojiler geliştirilmiş, çeşitli uygulamalar sunulmuş ve güneş enerjisinin ısıtma, soğutma, kurutma, elektrik ve su arıtma gibi çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılama konusundaki uyarlanabilirliği vurgulanmıştır. Güneş fotovoltaik (PV) teknolojisi, sürdürülebilir enerji arayışında olağanüstü bir çözümdür. PV etkisi gösteren yarıiletken malzemeler kullanarak güneş ışığının gücünü elektrik enerjisine dönüştürür (Dale ve Scarpulla, 2023; Oteng ve ark., 2021). Bu teknoloji, sürdürülebilir enerji alternatiflerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çoğu güneş PV modülü, ana bileşeni olarak silisyum bazlı hücrelere dayanmaktadır. Bu tasarım, fotonların kullanımıyla atom yörüngelerinden elektronları serbest bırakarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlar.

Güneş PV, yenilenebilir enerji sektöründe hızla ilerlemiştir (Creutzig ve ark., 2023). 2022 yılında 270 TWh üretimle önemli bir rekor kırarak %26'lık önemli bir artış göstermiştir (Solar-IEA, 2023). Bu gelişme, güneş PV'yi rüzgar enerjisinin önüne geçirmiş ve güneş PV'nin elektrik enerjisi üretimindeki büyüme açısından rüzgar enerjisini ilk kez geride bırakmıştır. Güneş PV teknolojisi şu anda küresel yenilenebilir enerji üretimine en büyük katkı sağlayan üçüncü kaynak konumundadır. Güneş PV, 2022 yılında dünya toplam elektrik üretiminin %4,5'ini oluşturarak hidroelektrik ve rüzgar enerjisinin ardından üçüncü sırada yer almıştır (Solar-IEA, 2023). Çin pazarı, küresel güneş PV teknolojisini domine etmekte olup, 2022 yılında dünya güneş PV potansiyelinin %38'ini sağlamaktadır (Chadly ve ark., 2024; Solar-IEA, 2023; Wang ve ark., 2021). Ayrıca, hem Amerika Birleşik Devletleri hem de Avrupa Birliği güneş PV endüstrisinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. Aslında, bu iki ülke birlikte dünya kapasite artışının sırasıyla %15 ve %17'sini oluşturmaktadır (Solar-IEA, 2023). Ayrıca, 2022'nin sonunda, dünya çapında güneş enerjisi PV kurulumları 1047 GW'yi aştı. Daha önceki istatistikler, 2010'dan itibaren bu teknolojinin kullanımında yaklaşık 26 katlık önemli bir artış olduğunu göstermektedir (International Renewable Energy Agency, 2025).

PV teknolojisinin verimliliği, 1954 yılında %6 olan başlangıç verimliliğinden (Chapin ve ark., 1954) son yıllarda önemli ilerleme kaydetmiştir. Şu anda araştırmacılar,

güneş hücrelerinin üretiminde büyük ilerlemeler kaydetmekte ve Shockley-Queisser sınırı olarak bilinen teorik sınıra yaklaşan yüksek verimlilik seviyelerine ulaşmaktadır. Bu başarılar önemlidir ve bu alanda kaydedilen önemli ilerlemeyi göstermektedir.

Güneş hücreleri, özelliklerine ve teknik gelişmelere göre üç nesle ayrılır. 1. nesil güneş hücreleri, yaygın olarak baskın tip olarak kabul edilen tek kristal ve çok kristal varyasyonlarını içerir. Bununla birlikte, bu hücreler, artan maliyetleri ve çok düşük verimlilikleri açısından önemli bir dezavantaja sahiptir. 2. nesil, a-Si, CdTe ve CIGS gibi birçok türü içeren ince film teknolojisini içerir. Birinci nesil hücrelere göre verimliliği daha düşük olmasına rağmen, ikinci nesil hücreler maliyet açısından etkili olarak kabul edilmektedir (Kibria ve ark., 2023). Üçüncü nesil, en yeni ve teknolojik olarak en gelişmiş kategori olarak kabul edilir. Mevcut nesil, hibrit, organik, inorganik yarıiletkenler ve nanoyapılı güneş hücreleri dahil olmak üzere çok çeşitli teknolojilerden oluşur (Kim ve ark., 2014; Stranks ve ark., 2013). Çizelge 1.1’de bu tarihe kadar elde edilen en yüksek güneş hücreleri verimliliklerini göstermektedir.

Silisyum (Si), ticari güneş hücrelerinin çoğunda kullanılır ve PV endüstrisinin %90’ından fazlasına katkıda bulunur. Oldukça pahalı olmalarına rağmen, birinci nesil PV hücreler yüksek verimlilik sağlar (Soonmin ve ark., 2023). Bu hücrelerde en yaygın olarak kullanılan iki tür, tek (mono) kristal ve çok (poly) kristaldir. Çok kristalli silisyuma kıyasla tek kristalli silisyum daha verimlidir, ancak üretimi daha pahalıdır.

Tek kristalli silisyum hücreler tek bir silisyum kristalinden oluşur ve tek bir kristal hacmi oluşturur. Bu hücre ticari değeri yüksektir ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek kristalli silisyum güneş hücrelerinin kullanımı birçok avantaja sahiptir; diğer hücrelere göre daha yüksek verimlilikleri sayesinde daha az yer kaplarlar. Üreticiler ayrıca mükemmel garantilerini vurgular ve genellikle 25 yıl garanti sunar. Bu hücreler düşük güneş ışığında iyi çalışır, bu da onları bulutlu koşullar için ideal hale getirir. Ancak, birçok müşteri yüksek fiyatları nedeniyle bu ürünleri satın alamamaktadır. Sıcaklık, performanslarını etkiler, ancak diğer güneş hücreleri kadar değildir. Ayrıca, silisyum üretimi çok fazla atık üretir (Kant ve Singh, 2022).

İlk halka açık çok kristalli silisyum güneş pilleri 1981 yılında ortaya çıkmıştır. Bu hücreler, tek kristalli silisyum hücrelerinden ayıran benzersiz bir özelliğe sahiptir: dört kenarından kesilmeye gerek yoktur. Bunun yerine, prosedür silisyumun eritilmesini ve ardından eşit boyutlarda kalıp boşluklarına dökülmesini içerir, bu da arka arkaya mükemmel şekilde şekillendirilmiş dikdörtgen hücrelerin oluşturulmasına yol açar. Çok kristalli silisyum güneş hücreleri, tek kristalli silisyum güneş hücrelerine kıyasla üretim

maliyetlerinin daha düşük olmasıyla bilinir ve bu da onları daha uygun maliyetli bir seçenek haline getirir (Kant ve Singh, 2022). Tek kristalli silisyum hücrelere kıyasla, bu hücrelerin maliyeti daha ucuzdur; ancak performans oranı ve verimliliği daha düşüktür. Ayrıca, çok kristalli silisyum modüller, sıcaklık artışının daha yüksek olması nedeniyle tek kristalli silisyum modüllere kıyasla daha fazla ısı kaybına sahiptir (Baghel ve Chander, 2022).

2005 yılında Amonix, güneş hücre geliştirme sürecinin ticarileştirme aşamasına geçerek, işleme sürecini kolaylaştırmış, verimi artırmış, maliyetleri düşürmüş ve performansı iyileştirmiştir. Bu yenilikçi ve ucuz yöntemle üretilen güneş hücreleri, bağımsız laboratuvarlarda değerlendirilmiş ve 92,3x konsantrasyona tabi tutulduğunda %27,6 verimlilik elde ettiği tespit edilmiştir (Slade ve Garboushian, 2005).

Bu tez çalışmasında; 2012 yılında Dicle Kalkınma Ajansı katkılarıyla Batman ili merkezinde çok kristalli silisyum modüllerden kurulu 2,145 kWp güce sahip PV sistemin 2014 ile 2014 yılları arasındaki üretim verileri dikkate alınarak performansı değerlendirilmiştir. Aynı şekilde ilgili yıllarda Batman ili merkezinde sıcaklık ve yatay yüzeye gelen güneş radyasyon şiddeti değerleri de ölçülmüştür. Ölçülmüş bu değerler ve çok kristalli Si modüllerden oluşmuş PV sistemin üretim değerlerinin analizleri yapılarak; sistemin performans değerleri kıyaslanmıştır. Sonuçlar literatür dikkate alınarak yorumlanmış ve Batman ili için çok kristalli Si modüllerinin kullanılabilirliği tartışılmıştır.

Çizelge 1.1. Çeşitli güneş enerjisi teknolojilerinde araştırma hücreleri için doğrulanmış en yüksek dönüşüm verimliliği. (Veri Kaynağı: NREL, 2023)

Güneş Hücre Tipi	En İyi Verimlilik (%)	Şirket/Kurum
Kristalli Silisyum (Tek)	26,1	Institute for Solar Energy Research Hamelin
Tek Kristalli Konsantrasyon	27,6	Amonix
Silisyum Heteroeklem	27,3	LONGi
Çok Kristalli	24,4	Helmholtz-Zentrum Berlin
İnce Film Kristal	21,2	Solexel
Perovskit Hücre	26,95	University of Science and Technology China
Organik Güneş Hücreleri	19,2	Shanghai Jiao Tong University
Organik Tandem Hücreleri	14,2	Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences
Kuantum Nokta Hücreler	19,1	Ulsan National Institute of Science & Technology
CZTSSe Hücreler	14,9	Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences
Boya Duyarlı Güneş Hücreleri	13	École polytechnique fédérale de Lausanne
Amorf Si:H	14	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
İnce Film CdTe	23,1	First Solar
İnce Film CIGS	23,6	Evolar/Uppsala University
CIGS Konsantrasyon	23,3	National Renewable Energy Laboratory
Tek-Eklem GaAs (Konsantrasyon)	30,8	National Renewable Energy Laboratory
Perovskit/CIGS Tandem	24,6	Helmholtz-Zentrum Berlin
Perovskit/Si Tandem	34,6	LONGi
Perovskit Tandem	30,1	Nanjing University and Renshine Solar
Perovskit/Organik Tandem	23,4	Solar Energy Research Institute of Singapore
III-V/Si Tandem	36,1	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems and Dutch research institute

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Güneş Hücrelerine Giriş

Güneş hücreleri, güneş enerjisini (güneş ışığı) doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu dönüşüm, güneş ışığına maruz kaldığında iki yarıiletken malzeme katmanı (zıt tipe sahip) arasındaki elektrik akımının akışı nedeniyle doğru akım (DC) gerilimin üretildiği fotovoltaiik etki prensibine dayanmaktadır. Güneş hücresi, bir pn-eklem diyotundan oluşan bir tür fotoelektrik hücredir. Güneş hücrelerine fotovoltaiik (PV) hücreler de denir. Silisyum (Si) veya germanyum (Ge) gibi içsel (saf veya katkısız) bir yarıiletken malzeme herhangi bir serbest yük taşıyıcısı içermez. En dış kabuklarında dört elektron içerirler ve sadece direnç gibi davranırlar. Bu tür içsel yarıiletkenlerin iletkenliği, kristal kafesi içine belirli safsızlıklar eklenerek geliştirilebilir. Bu işleme katkılama denir.

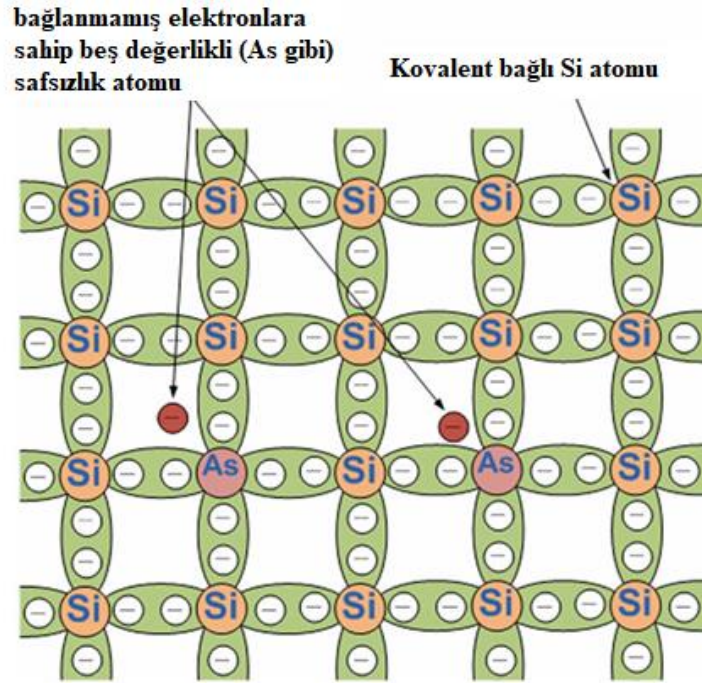
$$\text{Safsızlıklar} + \text{İçsel Yarı İletken} = \text{Dışsal Yarı İletken}$$

2.1.1. n-tipi yarıiletken

Kristal yapısını değiştirmeden içsel yarıiletkene çok düşük konsantrasyonda beş değerlikli safsızlık (en dış kabuklarında 5 elektron bulunan atomlar) eklendiğinde, n-tipi bir yarıiletken oluşur. Arsenik (As) ve antimon (Sb) beş değerlikli safsızlıklara birkaç örnektir. Şekil 2.1, beş değerlikli safsızlık atomunun eklenmesiyle silisyum kristalinin değişimini göstermektedir. İçsel bir yarıiletkene beş değerlikli bir safsızlık eklendiğinde, aşağıdaki değişiklikler meydana gelir:

- İçsel yarıiletken n-tipi yarıiletkene dönüşür.
- Safsızlık atomunun (pentavalent) ekstra elektronları kovalent bağa girmez.
- Beş değerlikli safsızlık atomları yarıiletkene fazladan bir elektron bağışlar. Bu nedenle donör atomlar olarak adlandırılırlar.
- Bağışlanan elektronlar kristal yapı içinde serbestçe hareket edebilir. Böylece, n-tipi yarıiletkenler serbest elektronlar içerir.
- Elektriksel olarak, n-tipi bir yarıiletken doğası gereği nötrdür.

- n-tipi bir yarıiletkende bir elektronu değerlik bandından iletim bandına taşımak için 0,7 eV enerji gerekir.
- n-tipi bir yarıiletken, kendisine uygulanan enerjinin yalnızca 0,005 eV'sini iletebilir.
- n-tipi bir yarıiletkende elektronlar çoğunluk taşıyıcıları, boşluklar ise azınlık taşıyıcılarıdır.
- İçsel yarıiletkene eklenen donör atomların miktarı, yapısındaki çoğunluk yük taşıyıcılarını belirler.
- n-tipi bir yarıiletkendeki elektrik akımı çoğunluk taşıyıcıları (elektronlar) üzerinden iletilir.
-

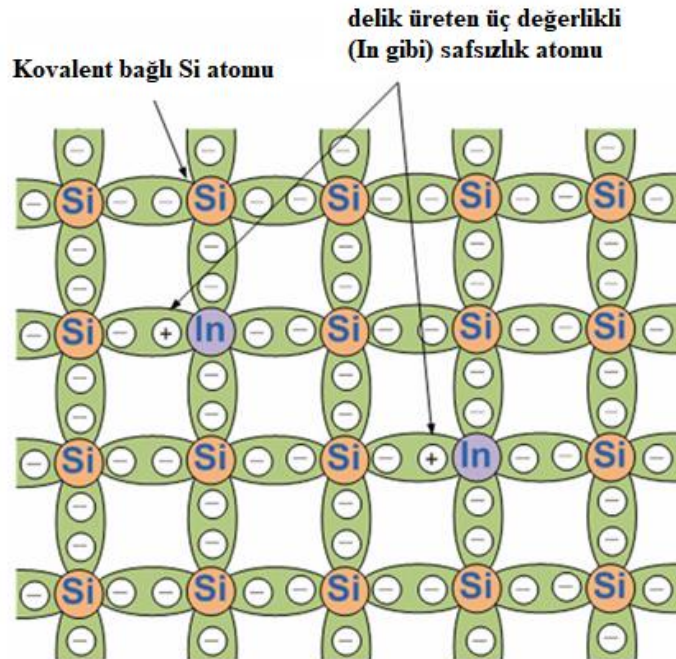


Şekil 2.1. n-tipi yarıiletkende atom düzeni

2.1.2. p-tipi yarıiletken

Kristal yapısını değiştirmeden içsel bir yarıiletkene çok düşük konsantrasyonda üç değerlikli safsızlık (en dış kabuklarında 3 elektron bulunan atomlar) eklendiğinde, p-tipi yarıiletken oluşumuna neden olur. En yaygın kullanılan iki üç değerlikli safsızlık indiyum (In) ve galyumdur (Ga). Şekil 2.2, üç değerlikli safsızlık atomunun eklenmesiyle silisyum kristalinin değişimini göstermektedir. İçsel bir yarıiletkene üç değerlikli bir safsızlık eklendiğinde aşağıdaki değişiklikler meydana gelir:

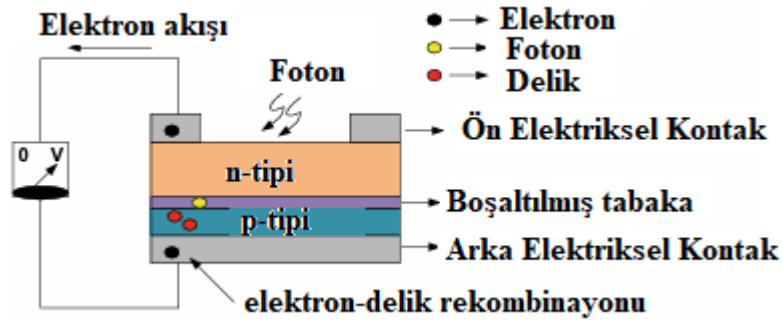
- p-tipi bir yarı iletken oluşur.
- Üç değerlikli bir atom sadece üç elektron içerir ve yarıiletkende bir boşluk oluşturan bir elektron eksiktir.
- p-tipi yarıiletkendeki boşluk pozitif yüklüdür.
- Kovalent bağı kırmak için çok düşük enerji gerektiğinden, komşu atomdan gelen bir elektron boşluğu doldurabilir.
- Elektronun boşluğa aktarıldığı bağlanmış bölgede yeni bir delik oluşturulur. Sonuç olarak, yarıiletken içinde boşlukların hareketi gerçekleşir.
- Tipik olarak, bir p-tipi silisyum yarıiletkende, üç değerlikli safsızlığın 1×10^6 'sı malzemeye katkılanır. Sonuç olarak, p-tipi silisyum, bir silisyum yarıiletkendeki elektron-boşluk çiftlerine kıyasla daha fazla sayıda boşluğa sahip olacaktır.
- Oda sıcaklığında, p-tipi bir yarıiletkenin iletkenliği neredeyse saf bir yarıiletkene benzer.
- Elektriksel olarak, p-tipi bir yarıiletken nötrdür.
- p-tipi bir yarıiletkende boşluklar çoğunluk taşıyıcıları, elektronlar ise azınlık taşıyıcılarıdır.
- Bir p-tipi yarıiletken, uygulanan enerjinin sadece 0,05 eV'si ile iletkenlik gösterebilir.



Şekil 2.2. p-tipi yarıiletkende atom düzeni

2.1.3. pn-eklem olarak güneş hücresi diyot

Bir güneş hücresinin işlevi temelde bir pn-eklem diyota benzer. Ancak, yapılarında büyük bir fark vardır. Bir güneş hücresinin yapısı çok basittir. İnce bir p-tipi yarıiletken katman, kalın bir n-tipi katmanın üzerinde biriktirilir. Her iki katmandan elektrotlar kontak yapmak için geliştirilir. p-tipi yarıiletken tabakanın üstünde ince bir elektrot oluşturulur. Bu elektrot ışığın ince p-tipi katmana ulaşmasını engellemez. Böylece, p-tipi katmanın hemen altında bir pn-eklem oluşturulur. Benzer şekilde, n-tipi katmanın alt kısmında bir akım toplama elektrodu oluşturulur. Tüm düzenek daha sonra güneş hücresi herhangi bir mekanik şoktan korumak için ince bir camın içine yerleştirilir. Şekil 2.3, temel pn-eklem diyot güneş hücresinin yapısal ayrıntılarını göstermektedir.



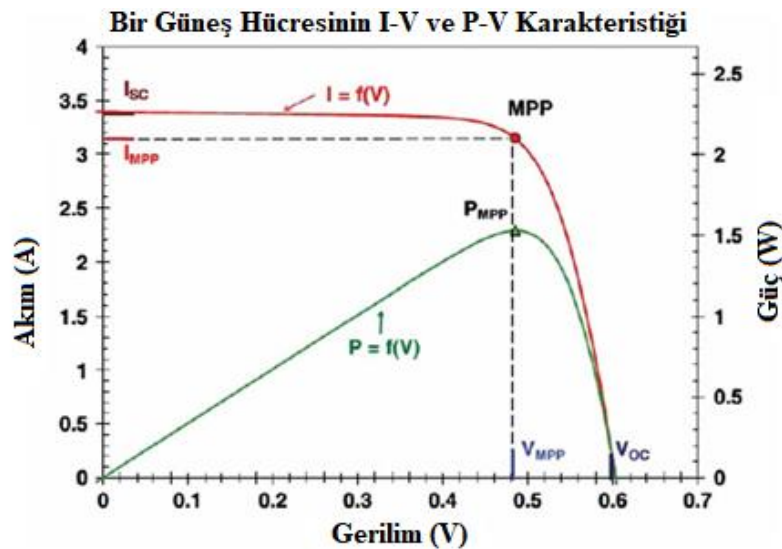
Şekil 2.3. pn-eklem diyotu olarak güneş hücresi

Bir güneş hücresine ışık geldiğinde, son derece ince n-tipi katmandan pn-ekleme kolayca girebilir. Fotonlar, birleşimin termal dengesini bozmak için yeterli enerji içerir ve böylece boşaltılmış veya tükenme bölgesinde birçok elektron-boşluk çifti oluşturur. Elektronlar birleşimin n-tipi tarafına doğru hareket eder ve boşluklar birleşimin p-tipi tarafına doğru hareket eder. Kavşağı geçtikten sonra, elektronlar ve boşluklar, kavşakta potansiyel bir bariyer oluşması nedeniyle tükenme katmanına geri dönemezler. Elektronların ve boşlukların konsantrasyonu kendi taraflarında artmaya başladıkça, pn-eklemi bir pil hücresi gibi davranmaya başlar. Bağlantı noktasına bağlanan harici bir yük üzerinden küçük bir akım akar. Normal bir güneş hücresi 0,5 V gerilim üretir. Bir güneş modülünün yapı taşıdır ve tek bir güneş modülü oluşturmak için yaklaşık 36-60 güneş hücresi 9-10 sıra halinde düzenlenir. Bir güneş modülü 2,5-4 cm kalınlığındadır ve hücre

sayısı arttıkça çıkış watt değeri de artar. Ticari amaç için, yaklaşık 72 güneş hücresi sıralar ve sütunlar halinde düzenlenir.

2.1.4. Bir güneş hücresini akım-gerilim (I-V) karakteristikleri

Belirli bir güneş hücresi, dizisi veya modülü için akımın gerilime karşı grafiğinin çizilmesine akım-gerilim (I-V) özellikleri denir. I-V özellikleri kullanılarak bir güneş hücresinin verimliliği ve enerji dönüştürme kabiliyeti hesaplanır. Bir güneş hücresi veya panelinin maksimum güç (P_{max}) değeri bilinerek, cihazın performansı ve güneş verimliliği belirlenebilir. Bir güneş hücresinde üretilen akım, radyasyon yoğunluğu ile doğru orantılıdır ve fotoelektrik etki tarafından yönetilir, yani yoğunluk arttıkça akım da artar. Bununla birlikte, güneş hücresinin sıcaklığındaki bir artış gerilimi düşürür. Bir güneş hücresinin I-V karakteristikleri aslında belirli bir sıcaklıkta ve radyasyon yoğunluğunda güneş hücresinin akımı ve gerilim arasında çizilen grafiklerdir. I-V karakteristik eğrileri, bir güneş modülünün maksimum tepe güç noktası (MPP) olarak bilinen optimum kapasitesinde performans gösterebileceği çalışma koşulları hakkında bilgi sağlamaya yardımcı olur. Şekil 2.4 bir güneş hücresinin temel I-V karakteristiklerini göstermektedir. Verilen güç, güneş hücresinin akım ve geriliminin çarpımına eşittir. Belirli bir radyasyon yoğunluğu için, Şekil 2.4'te gösterilen güç eğrisi, hem kısa devre hem de açık devre koşulu için noktadan noktaya karşılık gelen akımlarla tüm voltajların çarpılmasıyla elde edilebilir.

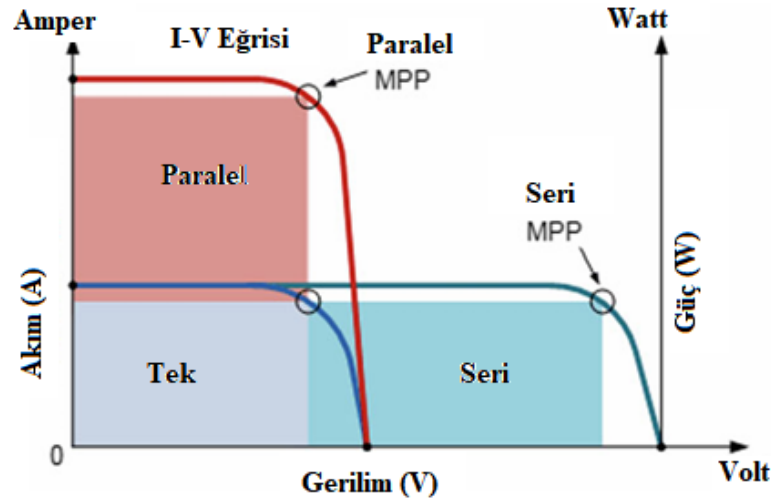


Şekil 2.4. Bir güneş hücresinin I-V grafiği

Güneş hücresi açık devre durumundayken (yüksüz), akım minimum ve gerilim maksimum olacaktır. Bu gerilim güneş hücresi açık devre gerilimi (V_{OC}) olarak bilinir. Ancak, kısa devre durumunda, gerilim minimum ve akım maksimum olacaktır. Bu akım güneş hücresi kısa devre akımı (I_{SC}) olarak bilinir. Bu nedenle, bir güneş hücresinde açık devre koşulu için maksimum gerilim mevcuttur ve kısa devre koşulu için maksimum akım mevcuttur. Ancak, bu iki koşul altında hücrede hiçbir güç üretilmediğine dikkat etmek önemlidir. Bir güneş hücresi, maksimum güç noktası (MPP) olarak bilinen bu iki uç nokta arasındaki bir noktada maksimum güç üretir. MPP'de, akım (I_{MP}) ve gerilim (V_{MP}) güneş hücresinde maksimumdur. Bir I-V eğrisi üzerinde MPP, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi virajın yakınında yer alır. Bir güneş hücresinin çıkış gerilimi ve akımı sıcaklığa bağlı olduğundan, gerçek çıkış gücü ortam sıcaklığındaki değişikliklere göre değişecektir.

2.1.5. Bir fotovoltaiik (PV) dizinin I-V karakteristikleri

Bir fotovoltaiik (PV) dizi, çeşitli güneş hücrelerinin birbirine bağlanmasıyla oluşturulur ve daha sonra verimliliğini ve diğer parametrelerini belirlemek için I-V karakteristikleri çizilir. Şekil 2.5 bir PV dizisinin I-V karakteristiklerini göstermektedir. Hücrelerin birbirine bağlanabileceği iki olası kombinasyon vardır, yani seri ve paralel. Hücreler seri bağlandığında gerilim, paralel bağlandığında ise akım artar. Ancak, her iki kombinasyonda da Watt (W) cinsinden üretilen güç yine de $P = V \times I$ denklemi kullanılarak hesaplanır. Seri ve paralel kombinasyonlarda MPP'nin konumu Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. PV modülünün I-V karakteristiği

Işık, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi bir güneş hücresinin I-V eğrisini 4. çeyreğe kaydırır. Aydınlatma olmadan, güneş hücresi ileri öngerilim koşulu altında normal bir p- n bağlantı diyotu ile aynı özelliklere sahiptir. Bu akım karanlık akım olarak bilinir. Bununla birlikte, güneş ışığı güneş hücresi üzerinde parladığında, I-V eğrisi dördüncü çeyreğe kaymaya başlar, böylece güç üretir ve güneş ışığının yoğunluğu arttıkça dördüncü çeyreğe doğru kayma da artar. Bir hücrenin aydınlatılması, diyottaki normal “karanlık” akımlara eklenir, böylece diyot yasası olur (Arya and Mahajan, 2023):

$$I = I_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{nkT} \right)} - 1 \right] - I_L \quad (2.1)$$

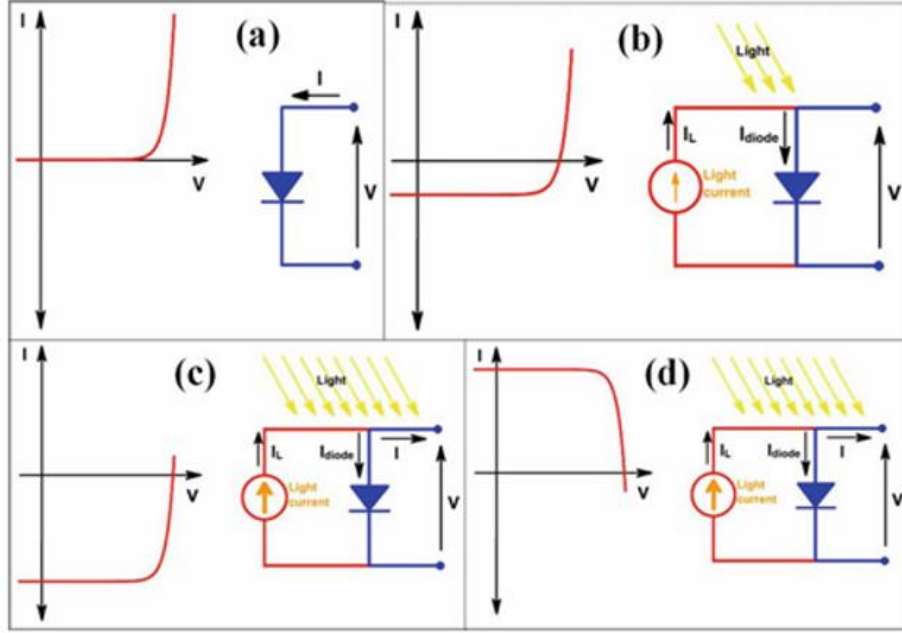
Burada I_L güneş ışığı nedeniyle oluşan akımdır. Yukarıdaki denklem sadece 4. kadrantındaki I-V eğrisi için geçerlidir. Birinci kadrantındaki I-V eğrisi için denklem şöyle olur

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

<100 mV gerilimler için, üstel terimin değeri çok büyüktür ve daha düşük gerilimlerde I_L terimi baskındır. Bu nedenle, -1 terimi denklemde ihmal edilebilir,

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{nkT} \right)} \right] \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemin grafiğe geçirilmesi, eğri üzerindeki ilgili noktalarla birlikte Şekil 2.6'da gösterildiği gibi I-V eğrisini verir.



Şekil 2.6. Güneş hücresi I-V eğrisi: (a) karanlıkta, (b) ışık altında, (c) daha şiddetli ışık altında ve (d) güneş hücre eğrisi geleneksel olarak ters çevrilmiştir (Honsberg ve Bowden, 2019)

I-V karakteristiklerini anlamadan önce aşağıdaki parametrelerin bilinmesi çok önemlidir:

Kısa Devre Akımı (I_{SC})

Hücre üzerinde gerilim olmadığında bir güneş hücresinden geçen akıma kısa devre akımı denir. Başka bir deyişle, güneş hücresi kısa devre durumunda olduğunda, hücreden akan akım kısa devre akımı (I_{SC}) olarak adlandırılır. Işık tarafından üretilen taşıyıcıların oluşturulması ve toplanması, bir güneş hücresinde kısa devre akımının akışına neden olur. İdeal bir güneş hücresi için ışıqla üretilen akım ve kısa devre akımı aynıdır. Bu nedenle, bir güneş hücresinden elde edilebilecek en büyük akım kısa devre akımıdır. Kısa devre akımı aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Güneş hücresi alanı: Bir güneş hücresinin alanı kısa devre akımını güçlü bir şekilde etkiler. Bu nedenle, bu bağımlılığı ortadan kaldırmak için, çoğunlukla kısa devre akımı yerine kısa devre akım yoğunluğunu (J_{SC}) kullandık. J_{SC} 'nin birimi mA/cm²'dir.
- Foton sayısı: Bir güneş hücresinden elde edilen I_{SC} , ışığın yoğunluğu ile doğru orantılıdır.
- Gelen ışığın spektrumu: AM1.5 spektrumu güneş hücresi ölçümleri için standart olarak kabul edilir.

Aynı malzemeden yapılan güneş hücreleri karşılaştırılırken en önemli parametreler yüzey pasivasyonu ve difüzyon uzunluğudur. Düzgün üretim ve mükemmel pasivasyona sahip bir güneş hücresi için J_{SC} şu şekilde hesaplanabilir:

$$J_{SC} = qG(L_n + L_p) \quad (2.4)$$

burada “G” üretim hızıdır ve L_n ve L_p sırasıyla elektronların ve boşlukların difüzyon uzunluğudur. J_{SC} ve I_{SC} arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$I_{SC} = J_{SC} \times A \quad (2.5)$$

dolayısıyla I_{SC} , J_{SC} çarpı hücre alanına eşittir.

Açık Devre Gerilimi (V_{OC})

Bir güneş hücresinde sıfır akımda mevcut olan maksimum gerilime açık devre gerilimi (V_{OC}) denir. Bir güneş hücresindeki V_{OC} , hücreye uygulanan ileri öngerilim miktarına bağlıdır. Güneş hücresi denkleminde sıfıra eşit akım kullanıldığında, V_{OC} için denklem aşağıdaki gibidir (Fonash, 2012):

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemden, V_{OC} doğrudan sıcaklığa bağlıdır, yani sıcaklık arttıkça V_{OC} artar. Ancak, gerçekte, V_{OC} sıcaklıktaki artışla azalır ve bunun nedeni sıcaklıktaki artışın I_0

değerini de artırmaktadır. Sıcaklıkla birlikte I_0 'daki artış daha hızlıdır ve sonuç olarak, bir güneş pilinin V_{OC} 'si sıcaklıkla birlikte azalır.

Dolum Faktörü (FF)

Dolum faktörü (FF) bir güneş hücresinden elde edilebilecek maksimum gücü belirler. V_{OC} ve I_{SC} 'ye bağlıdır çünkü bu iki koşulda güneş hücresinden hiçbir güç üretilmez. Dolum faktörü (FF), güneş hücresinden elde edilen maksimum gücün V_{OC} ve I_{SC} 'nin çarpımına oranı olarak tanımlanır ve şu şekilde verilir (Neville, 1995):

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2.7)$$

$$FF = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}}$$

Dolum faktörü güneş hücresinin “kareliğini” ölçer ve bir güneş hücresinin I-V eğrisine sığabilecek en büyük dikdörtgenin alanından da hesaplanabilir. Eşitlik 2.7'den, daha büyük V_{MP} 'ye sahip hücre daha yüksek FF değerine sahip olacaktır.

Verimlilik (η)

Bir güneş hücresinin verimliliği, güneş hücresi tarafından sağlanan enerji çıkışının, bu çıkış için alınan enerji girişine oranıdır. Ancak, verimlilik sadece enerji girişi ve çıkışına bağlı değildir. Güneş hücresinin sıcaklığına, ışığın spektrumuna ve radyasyonun yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle, verimliliği hesaplamadan önce bu parametrelerin kontrol edilmesi gerekir. Örneğin, karasal güneş hücresi için verimlilik AM1.5 koşulları altında 25 °C sıcaklıkta hesaplanır. Matematiksel olarak, bir güneş hücresinin verimliliği (η), maksimum güç çıkışının güç girişine oranıdır (Neville, 1995):

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (2.8)$$

burada $P_{max} = V_{OC} \times I_{SC} \times FF$. Verimlilik hesaplamaları için giriş gücü 1 kW/m² veya 100 mW/cm²'dir. Dolayısıyla, 100 × 100 mm² hücre için giriş gücü 10 W ve 156 × 156 mm² hücre için 24,3 W'tır.

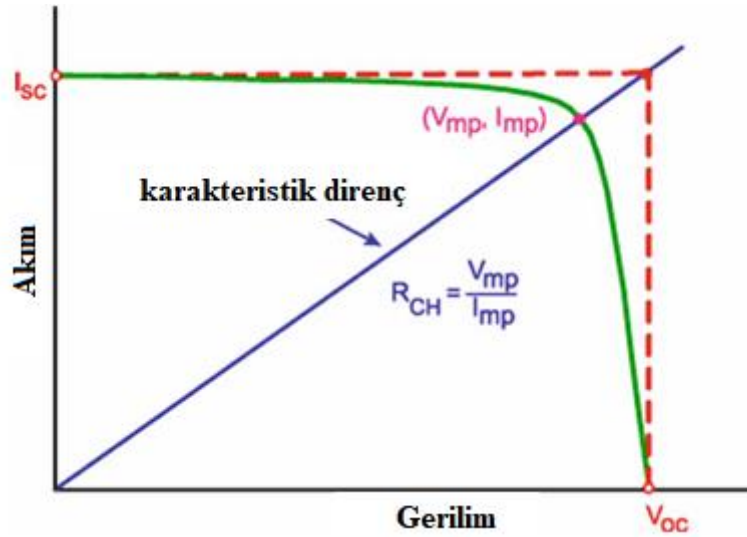
Karakteristik Direnç (R_{CH})

Bir güneş hücresinin MPP'deki çıkış direncine karakteristik direnci (R_{CH}) denir. Başka bir deyişle, bir güneş hücresi, karakteristik direnci (R_{CH}) yük direncine (R_L) eşit

olduğunda MPP'sinde çalışır. Bir güneş hücresindeki parazit kayıp mekanizmasını anlamak için R_{CH} önemli bir parametredir. R_{CH} , bir güneş hücresinin I-V eğrisinin eğiminin tersine eşittir ve şekil 2.7'de gösterilmiştir. Çoğu hücre için R_{CH} şuna eşittir (Neville, 1995):

$$R_{CH} = \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \approx \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (2.9)$$

burada R_{CH} , I_{MP} veya I_{SC} kullanıldığında Ω (ohm) cinsinden, J_{MP} veya J_{SC} kullanıldığında ise $\Omega.cm^2$ (ohm.cm²) cinsinden ifade edilir.



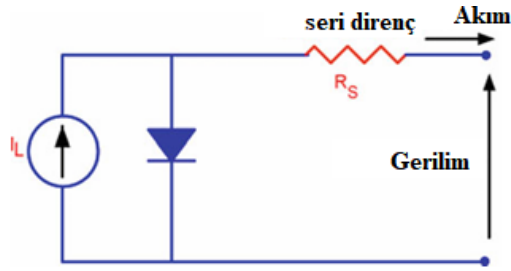
Şekil 2.7. Güneş hücresinin karakteristik direnci

Seri Direnç (R_S)

Bir güneş hücresinin azaltılabilen ancak tamamen ortadan kaldırılamayan özelliklerinden biri de seri dirençtir (R_S). Çoğunlukla bir güneş hücresinin FF değerini düşürür. Bununla birlikte, seri direncin yüksek değeri I_{SC} değerini de düşürebilir. Seri direnç bir güneş hücresinde üç ana nedenden dolayı mevcuttur: baz ve emitör arasındaki akım geçişi, üst ve arka metal kontaklardan kaynaklanan direnç ve silikon ile metal arasındaki kontaktaki direnç. Şekil 2.8 seri dirençli bir güneş hücresinin şemasını göstermektedir. Seri direnç varlığında güneş hücresi denklemi şöyledir:

$$I = I_L - I_0 e^{\left(\frac{q(V+IR_S)}{nkT}\right)} \quad (2.10)$$

burada “ I_L ” ışıkla üretilen akım, “ q ” ve “ k ” sabitler, “ V ” hücre üzerindeki gerilim, “ R_S ” hücrenin seri direnci, “ T ” sıcaklık ve “ n ” idealite faktörüdür. R_S 'nin V_{OC} 'deki bir güneş hücresinin I-V özellikleri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir, ancak V_{OC} 'ye yakın bölgedeki I-V eğrisini güçlü bir şekilde etkiler. Bu nedenle, I-V eğrisinde V_{OC} 'deki eğimi hesaplamak en basit yöntemdir.



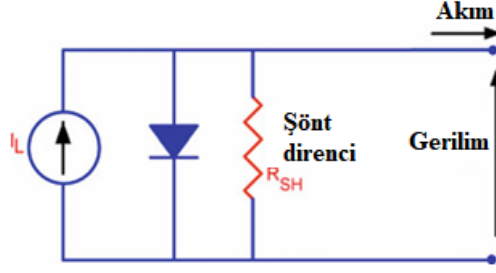
Şekil 2.8. Seri direnç

Şönt Direnç (R_{SH})

Şönt direnç (R_{SH}), bir güneş hücresinin verimliliğini azaltır ve ışık tarafından üretilen akım akışına alternatif bir yol sağlayarak önemli güç kaybına neden olur. Sonuç olarak, güneş hücresi bağlantısından daha az akım geçer ve bu da güneş hücresinden elde edilen çıktıyı azaltır. Şekil 2.9 şönt dirençli bir güneş hücresinin devre şemasını göstermektedir. Şönt dirençli güneş hücresi denklemi aşağıdaki gibi verilir (Neville, 1995):

$$I = I_L - I_0 e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - \frac{V}{R_{SH}} \quad (2.11)$$

burada “ I ” çıkış akımını, “ I_L ” ışıkla üretilen akımı, “ q ” ve “ k ” sabitleri, “ n ” idealite faktörünü, “ V ” hücre boyunca gerilimi, “ T ” sıcaklığı ve “ R_{SH} ” şönt direncini temsil eder.



Şekil 2.9. Şönt direnci

2.2. Güneş Hücresi Tarihçesi

1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre-Edmond Becquerel, fotovoltaiik (PV) etkiyi tanımlayan ilk kişi oldu. Belirli malzemelerin ışııkla aydınlatıldığında küçük elektrik akımları ürettiğini buldu. Heinrich Hertz 1870 yılında bu etkiyi ilk olarak selenyum (Se) üzerinde çalışmış ve böylece “Se” güneş hücresi teknolojisinde kullanılan ilk malzeme olmuştur (Bergesen ve ark., 2014). Ancak, Se-güneş hücrelerinin verimi çok düşüktü, yani %1-2. 1940'lı ve 50'li yıllarda, Czochralski (CZ) işlemi ile saf silisyum kristallerinin üretilmesi sayesinde güneş hücrelerinin ticarileştirilmesinde büyük bir patlama yaşandı. Bell Laboratuvarları 1954 yılında %4 verimliliğe sahip silisyum bazlı güneş hücresini geliştirmiştir. Silisyum güneş hücreleri en büyük uygulamasını ünlü ABD Uzay programı ile almış ve ABD Vanguard Uydusunda radyoya güç sağlamak için kullanılmıştır. O zamandan beri, güneş hücreleri çeşitli uzay programlarının hayati bileşenleri olarak kullanılmaktadır. Bunlar savunma, iletişim, araştırma vs. gibi her türlü uyduda kullanılmaktadır. Bilgisayar endüstrisi, özellikle de yarıiletken teknolojisi, güneş hücresi teknolojisinin gelişimine büyük katkıda bulunmuştur. Hem güneş hücreleri hem de transistörler aynı malzemeden yapılır ve aynı fiziksel mekanizma üzerinde çalışırlar. Sonuç olarak, bir alandaki ilerlemeler diğer teknolojinin yararına yeni bilgiler sağlamıştır.

Tüm bu gelişmelere ve teknolojiye rağmen, güneş hücrelerinin hala çok pahalı olduğu görülmüştür. Ancak 1970'lerde dünyada yaşanan petrol krizi dünyayı şaşırttı ve şirketler güneş hücresi teknolojisini daha uygun fiyatlı hale getirmeye başladı. O zamandan beri güneş hücresi teknolojisi sürekli gelişme yolundadır. Bu teknolojiye milyonlarca dolar yatırıldı ve daha iyi verimliliğe sahip çeşitli umut verici malzemeler tanıtıldı (Sahu, 2015). Örneğin, çok kristalli kadmiyum tellürid (CdTe), kristal olmayan (amorf) silisyum, galyum arsenid (GaAs), bakır indiyum diselenid vb. son yıllarda

tartışma konusu olan malzemelerden bazılarıdır. Güneş hücreleri tarihindeki önemli kilometre taşlarına genel bir bakış aşağıdaki gibidir:

- Fotovoltaik etkinin keşfi (1839): Fransız fizikçi Alexandre-Edmond Becquerel, güneş pillerinin arkasındaki ilke olan fotovoltaik etkiyi ilk kez 1839 yılında gözlemledi. Belirli malzemelerin ışığa maruz kaldığında küçük elektrik akımları ürettiğini keşfetti (Amalathas ve Alkaisi, 2019).
- Selenyum fotovoltaik etkisi (1876): 1876'da İngiliz elektrik mühendisi William Grylls Adams ve öğrencisi Richard Evans Day, selenyumun ışığa maruz kaldığında elektrik ürettiğini gözlemledi. Bu, fotovoltaik etkinin ilk pratik uygulaması olmuştur (Paul ve ark., 2021).
- İlk güneş hücresi (1883): Amerikalı bir mucit olan Charles Fritts, 1883 yılında ilk gerçek güneş hücresini yapmasıyla tanınır. Kaba bir fotovoltaik cihaz oluşturmak için ince bir selenyum tabakasını son derece ince bir altın tabakasıyla kaplamıştır (Giuliano ve ark., 2021).
- Albert Einstein'ın fotoelektrik etkiyi açıklaması (1905): Albert Einstein'ın 1905'te fotoelektrik etki üzerine yaptığı çalışma, ışığın doğası ve malzemelerle etkileşimi hakkında daha fazla bilgi sağlamıştır. Araştırmaları, fotovoltaik etkinin daha iyi anlaşılması için temel oluşturdu (Ji ve ark., 2020).
- İlk silisyum güneş hücresi (1954): 1954 yılında Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson liderliğindeki Bell Laboratuvarları araştırmacıları ilk pratik silikon bazlı güneş pilini geliştirdi (Day ve ark., 2019). Bu hücre, önceki versiyonlara kıyasla önemli bir gelişme olan yaklaşık %6'lık bir verimlilik elde etti.
- Uzay uygulamaları ve büyüme (1958-1970'ler): Güneş hücresi uzay araştırmalarında erken uygulamalar buldu. 1958 yılında Vanguard 1 uydusu küçük bir güneş hücre dizisi ile fırlatıldı. Daha sonra, güneş hücreleri uydulara ve uzay görevlerine güç sağlamada çok önemli bir bileşen haline geldi (Li ve ark., 2020).
- Verimlilikte artış ve yaygın benimseme (1980'ler-2000'ler): On yıllar boyunca, malzeme bilimi ve üretim süreçlerindeki ilerlemeler güneş hücresi verimliliğinde önemli gelişmelere ve üretim maliyetlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu durum, konut ve ticari güneş modülleri de dahil olmak üzere çeşitli karasal uygulamalar için güneş hücrelerinin benimsenmesini sağlamıştır (Mulvaney, 2019).

- İnce film güneş hücreleri ve konsantre fotovoltailer (CPV): 1970'lerde araştırmacılar, daha az malzeme gerektiren ve geleneksel silisyum hücrelerden daha esnek olan ince film güneş hücreleri geliştirmeye başladılar. Ayrıca, güneş ışığını küçük, yüksek verimli güneş hücrelerine odaklamak için lensler veya aynalar kullanan konsantre fotovoltailer sistemler ortaya çıktı (Mazzarella ve ark., 2019).
- Üçüncü nesil güneş hücreleri: Bu güneş hücreleri yirminci yüzyılda geliştirilmiştir ve organik güneş hücreleri, DSSC ve QD güneş hücrelerini içerir. Bu hücreler, geleneksel silisyum tabanlı hücrelerin sınırlamalarının üstesinden gelmeyi ve verimliliği artırmak için yeni malzemeler ve teknolojiler keşfetmeyi amaçlamaktadır (Cheng ve ark., 2020).
- Güncel gelişmeler: Eylül 2021'deki son güncellemem itibariyle, güneş hücresi teknolojisi, verimliliği artırmaya, yeni malzemeler keşfetmeye ve güneş hücrelerini binaya entegre fotovoltailer (BIPV) ve güneş enerjisiyle çalışan araçlar gibi çeşitli yenilikçi uygulamalara dahil etmeye odaklanan araştırmalarla ilerlemeye devam etti (Peng ve Zou, 2019).

Güneş hücrelerinin tarihi, insan yaratıcılığının ve yenilenebilir enerji üretimi için güneşin gücünden yararlanma kararlılığının bir kanıtıdır. Teknoloji ilerlemeye devam ettikçe, güneş hücrelerinin dünyanın enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir bir şekilde karşılamada giderek daha hayati bir rol oynaması muhtemeldir.

2.3. Güneş Enerjisinin Maliyeti

Güneş enerjisinin maliyeti yıllar içinde istikrarlı bir şekilde düşerek onu en uygun maliyetli ve rekabetçi yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline getirmiştir. 1980'lerin başında güneş modüllerinin maliyeti watt başına yaklaşık 20 dolardı. 2021 yılına gelindiğinde, ortalama maliyet watt başına 1 doların altına düşmüştür; bu da güneş modül fiyatında zaman içinde önemli bir düşüş olduğunu göstermektedir. Swanson yasası, yarıiletken endüstrisindeki Moore yasası'na benzer şekilde, güneş fotovoltailer (PV) modüllerinin fiyatı ile kümülatif sevkiyat hacmi arasındaki ampirik ilişkiyi tanımlamaktadır (Hu ve ark., 2014). Kümülatif sevkiyat hacminin her iki katında, güneş PV modüllerinin maliyetinin yaklaşık %20 oranında azaldığını belirtmektedir. Bu gözlem, güneş enerjisi endüstrisi için nispeten geçerli olmuş ve maliyet düşüşlerinin arkasındaki itici güç olmuştur. Devlet desteği ve teşvikleri, güneş enerjisi maliyetinin

düşürülmesinde hayati bir rol oynamıştır. Birçok ülke güneş enerjisinin benimsenmesini teşvik etmek için vergi kredileri, hibeler, tarife garantileri ve yenilenebilir enerji zorunlulukları gibi politikalar uygulamıştır. Bu teşvikler, tüketiciler ve işletmeler için ön maliyetleri azaltmaya yardımcı olarak güneş enerjisini finansal açıdan daha cazip hale getirmektedir. Güneş hücre teknolojisindeki sürekli araştırma ve geliştirme, daha yüksek verimlilik ve daha düşük üretim maliyetleri sağlamıştır. Malzemeler, hücre yapıları ve üretim süreçlerindeki ilerlemeler, güneş modüllerinin genel performansını iyileştirirken üretim giderlerini de azaltmıştır (Razykov ve ark., 2011). Ayrıca, güneş enerjisi pazarının büyümesi ve güneş modüllerine olan talebin artması ölçek ekonomilerine yol açmıştır. Daha büyük üretim hacimleri, üreticilerin hammaddeler üzerinde daha iyi anlaşmalar yapmasını ve üretim süreçlerini kolaylaştırmasını sağlayarak maliyet tasarrufu sağlar.

Güneş hücresi tasarımı ve malzemelerindeki yenilikler, daha yüksek dönüşüm verimliliğine ve daha düşük maliyetlere katkıda bulunmuştur. Kadmiyum tellürid (CdTe) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) güneş hücreleri gibi ince film güneş teknolojileri, geleneksel kristalli silisyum güneş hücrelerine alternatif olarak ortaya çıkmış ve belirli uygulamalar için maliyet avantajları sunmuştur. Silisyum, çoğu güneş modülünde temel bir bileşendir. Güneş enerjisi endüstrisi büyüdükçe silisyum üretimi artmış ve bu da fiyatının düşmesine yol açmıştır. Silisyum fiyatlarındaki bu düşüş, güneş modüllerinin genel maliyetinin düşmesine katkıda bulunmuştur. Gelişmiş inovasyonlarla yeni yol haritalarının dahil edilmesi nedeniyle, silisyum güneş hücrelerinin maliyetinin önümüzdeki yıllarda daha da düşmesi beklenmektedir. Güneş enerjisinin giderek daha fazla benimsenmesi, güneş enerjisi üreticileri ve kurulumcuları arasındaki rekabeti artırmıştır. Bu rekabet, şirketlerin müşteri çekmek için çabalamasıyla birlikte fiyatların düşmesine ve hizmetlerin gelişmesine yol açmıştır.

Güneş enerjisinin giderek daha fazla benimsenmesi, güneş enerjisi üreticileri ve kurulumcuları arasındaki rekabeti artırmıştır. Bu rekabet, şirketlerin müşteri çekmeye çalışmasıyla birlikte fiyat indirimlerine ve hizmetlerin iyileştirilmesine yol açmıştır.

2.4. Güneş Hücresi Maliyetini Etkileyen Faktörler

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), güneş enerjisi teknolojisinin maliyetini ve sorunlarını izleyen bir kuruluştur ve Şekil 2.10'da silisyum güneş hücrelerini üretimi için farklı aşamalar gösterilmektedir. NREL'in analizi çoğunlukla tabandaki çeşitli bileşenlerin maliyetinin tedarik zincirleriyle birlikte analiz edildiği

aşağıdan yukarıya maliyet modellerine dayanmaktadır. NREL analizi aşağıdakilere dayanmaktadır:

- Minimum sürdürülebilir fiyatlar (MSP'ler)
- Adım adım üretim maliyeti
- Üretim sürecinin maliyetini azaltmaya yönelik yollar.



Şekil 2.10. Silisyum güneş hücreleri için üretim maliyetlerinin NREL analizi
(<https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-manufacturing-cost.html>)

Aşağıdan yukarıya modelde, üretimin her adımında kullanılan ekipman, enerji, malzeme, işçilik ve tesis maliyeti hesaplanır ve modellenir. Bu, her bir adımın maliyetinin ve fiyatı etkileyen olası etkenlerin tam olarak tahmin edilmesine yardımcı olur. Yukarıdaki tüm örneklere rağmen, güneş enerjisi maliyetini etkileyen diğer temel faktörler aşağıdaki gibidir:

- Teknolojik Gelişmeler: Güneş hücresi teknolojisi ve üretim süreçlerindeki ilerlemeler, daha verimli güneş modüllerine yol açarak üretilen elektriğin watt başına maliyetini düşürebilir.
- Güneş Modülü Verimliliği: Daha yüksek verimli güneş modülleri aynı miktarda güneş ışığından daha fazla elektrik üretebilir, böylece genel sistem boyutunu ve ilgili maliyetleri azaltır.
- Ölçek Ekonomileri: Güneş enerjisi endüstrisi büyüdükçe ve daha fazla güneş modülü üretildikçe, ölçek ekonomileri devreye girerek üretim maliyetlerinin düşmesine yol açar.
- Hammadde Fiyatları: Güneş modüllerinde kullanılan silisyum, alüminyum ve diğer yarıiletken malzemeler gibi malzemelerin maliyeti, güneş enerjisinin genel maliyetini etkileyebilir.

- Kurulum Maliyetleri: Güneş enerjisi sistemlerinin kurulum maliyeti, işçilik maliyetleri, izin gereklilikleri ve sahaya özgü hususlar gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir.
- Finansman ve Teşvikler: Devlet teşvikleri, vergi kredileri, hibeler ve indirimler, güneş enerjisi sistemleri kurmanın ön maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca, güneş enerjisi kiralama ve güç satın alma anlaşmaları (PPA) gibi yenilikçi finansman modelleri güneş enerjisini daha erişilebilir ve uygun fiyatlı hale getirebilir.
- Bölgesel Güneş Potansiyeli: Bir bölgenin aldığı güneş ışığı miktarı güneş modüllerinin enerji çıktısını ve dolayısıyla güneş enerjisi kurulumları için yatırım getirisini doğrudan etkiler.
- Enerji Depolama Entegrasyonu: Aküler gibi enerji depolama çözümlerinin dahil edilmesi, bir güneş enerjisi sisteminin toplam maliyetini artırabilir, ancak enerji depolama ve şebeke dengelemesini sağlayarak ek değer de sağlayabilir.
- Yerel Düzenlemeler ve İzinler: İzin süreçleri ve yerel düzenlemeler, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumunun genel maliyetini ve zaman çizelgesini etkileyebilir.
- Şebeke Bağlantısı ve Altyapı: Bir güneş enerjisi sistemini elektrik şebekesine bağlamanın maliyeti, şebeke bağlantı noktasına olan mesafeye ve gerekli altyapı yükseltmelerine bağlı olarak değişebilir.
- Güneş Enerjisi Pazarındaki Rekabet: Güneş modülü üreticileri ve güneş enerjisi kurulum şirketleri arasındaki rekabet düzeyi fiyatlandırmayı ve ödeme gücünü etkileyebilir.
- Döviz Kurları: Uluslararası ticareti yapılan güneş enerjisi bileşenleri için, döviz kurlarındaki dalgalanmalar farklı ülkelerdeki güneş enerjisi maliyetini etkileyebilir.
- Bakım ve İşletme Maliyetleri: Güneş modülleri düşük işletme maliyetlerine sahip olsa da, optimum performans için periyodik bakım gereklidir ve bakımla ilgili maliyetler güneş enerjisinin genel ekonomisini etkileyebilir.

Güneş enerjisi teknolojisi gelişmeye devam ettikçe ve yenilenebilir enerjiye yönelik küresel talep arttıkça, bu faktörler etkileşime girmeye ve güneş enerjisi maliyetini şekillendirmeye devam edecektir. Ayrıca, enerji depolama çözümlerinin ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonun devam eden gelişimi, güneş enerjisi sistemlerinin genel maliyetini ve rekabet gücünü daha da etkileyebilir.

2.5. PV Uygulamalar

Güneş hücreleri, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürme yetenekleri nedeniyle çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalar güneş enerjisinin temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir doğasından yararlanır. İşte güneş hücrelerinin bazı önemli uygulamaları:

- Konut Güneş Enerjisi: Evlerin çatılarına kurulan güneş modülleri, ev tüketimi için elektrik üretir. Fazla enerji şebekeye geri beslenebilir veya daha sonra kullanılmak üzere depolanabilir, böylece elektrik faturaları ve yenilenemeyen enerji kaynaklarına bağımlılık azaltılabilir.
- Ticari Güneş Enerjisi: İşletmeler ve endüstriler, enerji maliyetlerini dengelemek ve karbon ayak izlerini azaltmak için tesislerine güneş panelleri kurarlar. Güneş enerjisi, bir şirketin sürdürülebilirlik hedeflerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir.
- Kamu Hizmeti Ölçeğinde Güneş Enerjisi Santralleri: Geniş güneş modülü dizilerine sahip büyük güneş enerjisi çiftlikleri, yerel topluluklara sağlanabilecek veya şebekeye entegre edilebilecek önemli miktarda elektrik üretir.
- Uzaktan Güç Üretimi: Güneş hücreleri, geleneksel elektrik altyapısının mevcut olmadığı veya pratik olmadığı uzak ve şebeke dışı konumlara güç sağlar. Uygulamalar arasında uzaktan izleme istasyonları, iletişim kuleleri ve araştırma karakolları bulunmaktadır.
- Uzay Araçları ve Uydular: Güneş hücreleri uzay araçları ve uydular için birincil güç kaynağıdır ve çeşitli işlevleri ve bilimsel görevleri desteklemek için uzay boşluğunda güvenilir bir şekilde çalışır.
- Ulaşım: Güneş hücreleri, bataryaların şarj edilmesine yardımcı olmak ve aracın menzilini uzatmak için elektrikli araçlara (EV'ler) entegre edilebilir. Elektrikli araçlar üzerindeki güneş modülleri, park halindeyken veya hareket halindeyken güneş ışığını yakalayıp enerji verimliliğine katkıda bulunur.
- Tarım ve Sulama: Güneş enerjisiyle çalışan su pompaları ve sulama sistemleri, ekinlerin sulanması ve tarım topluluklarının güvenilir su kaynaklarına erişiminin sağlanması için sürdürülebilir bir çözüm sunar.
- Su Tuzdan Arındırma: Güneş enerjisiyle çalışan tuzdan arındırma tesisleri, deniz suyunu arıtmak için güneş enerjisini kullanır ve taze içme suyu üreterek kıyı bölgelerindeki su kıtlığını giderir.

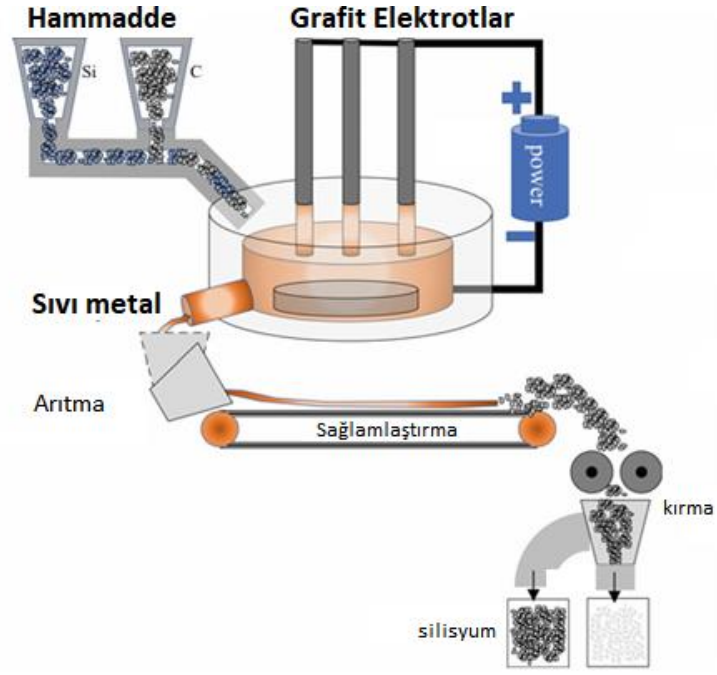
- Acil Durum ve Afet Yardımı: Taşınabilir güneş kitleri, acil durumlar ve doğal afetler sırasında gerekli gücü sağlayarak etkilenen bölgelerde iletişimi, tıbbi ekipmanı ve aydınlatmayı destekler.
- Dış Aydınlatma: Güneş enerjisiyle çalışan sokak lambaları, bahçe lambaları ve yol aydınlatmaları, harici güç kaynaklarına ihtiyaç duymadan kamusal alanlarda güvenliği ve görünürlüğü artırır.
- Eğitim Araçları: Güneş hücreleri, öğrencilere yenilenebilir enerji kavramlarını ve fotovoltaik teknolojinin ilkelerini öğretmek için eğitim ortamlarında kullanılır.
- Hibrit Enerji Sistemleri: Güneş hücreleri rüzgar veya hidroelektrik gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ve enerji depolama çözümleriyle birleştirilerek sürekli güç kaynağı sağlayan hibrit sistemler oluşturulabilir.
- Gelişmekte Olan Ülkeler: Güneş hücreleri, gelişmekte olan ülkelerdeki uzak ve yetersiz hizmet alan topluluklara elektrik sağlanmasında, yaşam kalitesinin iyileştirilmesinde ve ekonomik kalkınmanın desteklenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır.
- Yeşil Mimari: Bina tasarımına entegre güneş modülleri, sürdürülebilir mimariye katkıda bulunarak bir binanın enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltır.
- Araştırma ve İnovasyon: Güneş hücresi teknolojisi, daha verimli malzemeler, üretim teknikleri ve esnek ve şeffaf güneş panelleri gibi uygulamalar üzerine devam eden araştırmalarla ilerlemeye devam etmektedir. Güneş hücrelerinin çeşitli uygulamaları, enerji sistemlerini yeniden şekillendirme, çevresel sürdürülebilirliği sağlama ve dünya çapında çeşitli sektörlerde dayanıklılığı artırma potansiyellerinin altını çizmektedir.

2.6. Silisyum Wafer Plaka Üretimi

2.6.1. Karbotermik arıtma süreci

Silisyum, silika veya silisyum oksit (SiO_2) formunda bulunduğu için yer kabuğunda en bol bulunan elementlerden biridir. Saf silisyumun endüstrilerde kullanılabilmesi için oksit formundan çıkarılması (indirgenmesi) ve ardından ultra-rafine edilmesi gerekmektedir. Güneş enerjisi sınıfı silisyum üretimine ek olarak, metalürjik sınıf silisyum, hiper saf (%99,9999999'dan fazla saf) silisyum formunun elde edilmesiyle elde edilir. Hiper saf form, silikon tanesine bağlı olan oksijen atomlarının çıkarılması için

işleme teknolojileri geliştirilerek elde edilir. Bu, yaklaşık %96 saflıkta “metalik silisyum” olarak bilinen forma ulaşılmasını sağlar. Silisyumun daha da rafine edilmesi, elektrik ve elektronik davranışını kontrol etmek için seçilen elementlerle katkılanmasına izin verir. Metalürjik sınıf silisyum elde etmek için silisyum arıtma işlemi karbotermik bir işlemle gerçekleştirilir. Bu işlem, SiO_2 malzemesinin uyumlu bir kuvars potaya yerleştirilmesini ve Si/O bağlarını kırmak için enerjiye maruz bırakılmasını içerir (Alami ve ark., 2023). Isı şeklinde enerji sağlamak SiO_2 bağlarının kırılmasına yardımcı olur, ancak ısı miktarının 159,8 J/g (silisyumun erime noktası) aralığında olması gerekir ki bu da önemli ve sağlanması zordur. Bu nedenle, Si/O bağının kırılmasını sağlayan boksitten (alüminyum oksit cevheri) alüminyum elde etmek için kullanılabilecek benzer yenilikçi bir yöntem kullanılmaktadır. Araçla yapılan termik işlem SiO_2 bağlarını kırar ve böylece bir indirgeme reaksiyonu gerçekleşirken, karbon atomları O_2 atomlarıyla bağ kurarak silisyumun yerini alır ve şekil 2.11'de gösterildiği gibi elementel Si elde edilir. SiO_2 içeren bir pota, hem elektrik iletkeni hem de reaksiyon için saf karbon kaynağı olarak işlev gören geri çekilebilir grafit elektrotlarla bir ark fırını içine yerleştirilir. Elektrik devresi kapatıldıktan sonra grafit elektrotlar (pozitif terminal) silisyum oksit ve karbon hammaddelerine doğru yeterince indirilir ve bir ark oluşturulur. Bu ark, reaksiyonun devam etmesi için gereken karbonun yanı sıra enerjiyi de sağlar. “Ark fırını” adının arkasında yatan sebep budur. Fırın aynı zamanda başlangıçta karbonu ısıtmak (yaklaşık 1500-2000 °C), ardından SiO_2 bağlarını kırmak için elektrik arkı yoluyla gerekli miktarda enerji sağlamak için kullanılır.



Şekil 2.11. Metalurjik silisyum rafinasyonunun karbotermik süreci (Alami ve ark., 2023)

Aşağıdaki kimyasal reaksiyon karbotermik süreci temsil etmektedir:



SiO_2 bağının kırılmasından sonra elementel silisyumun elde edildiği, karbondioksitin yanı sıra ısının da ortaya çıktığı açıktır. Silisyum potadan sıvı halde çıkar, ancak döküldükten ve ezildikten sonra %96 saflık seviyesinde metalik Si parçaları elde edilir.

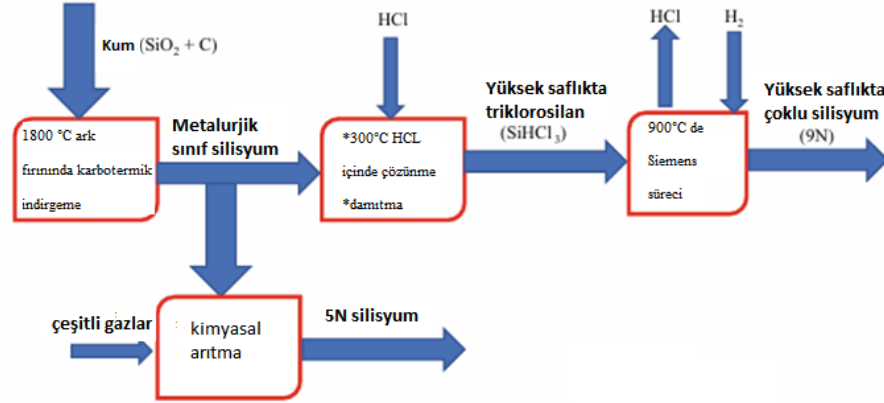
2.6.2. Silisyumun ultra iyileştirilmesi

Silisyumun daha da iyileştirilmesi, güneş enerjisi sınıfı silisyum (SOG-Si) üretimine yol açar. Sonuç olarak, Si'nin saflık seviyesi %96'dan %99,99999'a (ondalık noktayı takip eden 5-7 dokuz) yükselmelidir. Böyle bir saflığa ulaşmak için, bozulmamış çevre kontrolü altında özel süreçler kullanılmalıdır. Genel olarak, silisyum saflaştırma ve ultra saflaştırma işlemlerini gerçekleştirmek için iki yol vardır:

- (i) Siemens reaktöründe triklorosilan veya akışkan yataklı reaktörde silan ile kimyasal metalurjik saflaştırma ve

- (ii) kuvarsın florür içinde çözünmesini ve Si'nin üç katmanlı elektro-rafinasyonunu içeren elektrokimyasal saflaştırma.

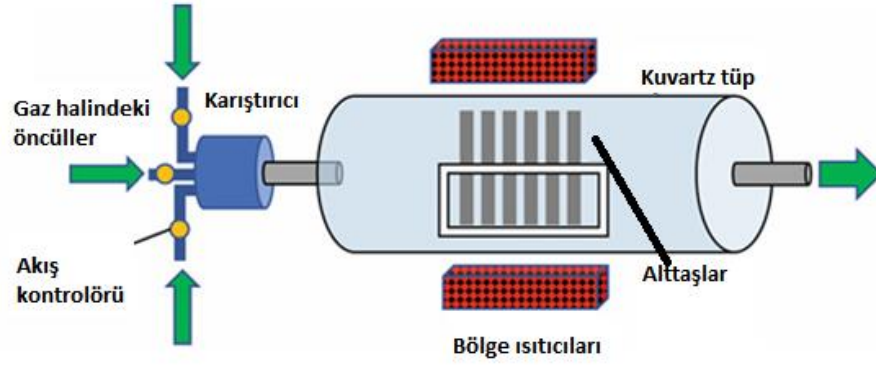
Her iki durumda da, metalik silisyum parçaları kimyasal olarak bir gaza sindirilir ve ardından “tohum kristali” adı verilen tek kristal silisyum malzemeden yapılmış bir alt tabaka üzerinde biriktirilir. Bu yaklaşım, benzer malzemeler arasındaki güçlü kohezif kuvvetlerden faydalanır. Silisyum üretimi şekil 2.12'de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Kumdan yüksek saflıkta silisyuma (Alami ve ark., 2023)

Kimyasal yol, silisyum malzemeyi taşımak ve tohum kristali üzerinde ayrıştırmak (biriktirmek) için triklorosilan (SiHCl_3) gazı kullanır. Gaz, hidrojen varlığında silisyum parçaları ve hidroklorik asit arasındaki kimyasal reaksiyondan kaynaklanır. Silan gazı (SiH_4) da kullanılabilir, ancak HCl ile reaksiyondan klor eklendiğinde daha az reaktiftir. Silan, diklorosilan veya triklorosilan daha sonra Siemens sürecinde veya akışkan yataklı reaktörde silisyum biriktirmek için kullanılır. Bu iki süreç oldukça gelişmiştir ve tarihsel olarak özellikle PC endüstrisi için mikroçipler ve mikroişlemciler için ultra saf silisyum üretmek için kullanılmıştır. Bu süreçler, güneş hücresi yapımı için gerekli olan bir süreç sınıfı olan kimyasal buhar biriktirme (CVD) şemsiyesi altına girmektedir. Yüksek kaliteli ve yüksek performanslı katı malzemeler üreten kimyasal bir süreçtir.

CVD sürecinin girdileri, silisyumu alt tabakalara taşıyacak olan taşıyıcı gazlar da dahil olmak üzere gazlardır. Silisyum parçaları önce hidroklorik asit (HCl) ile çözülür ve hidrojen tarafından ısıtılmış alt tabakalara taşınır. Alt tabakalar, şekil 2.13'te gösterildiği gibi kuvarsdan oluşan tüplere eklenir ve ısıtılır. Kuvars, aynı zamanda şeffaf ve ısıya dayanıklı olan çok sert bir malzemedir; bu nedenle, tüpün belirlenmiş malzemesi olarak kullanılması önerilir.



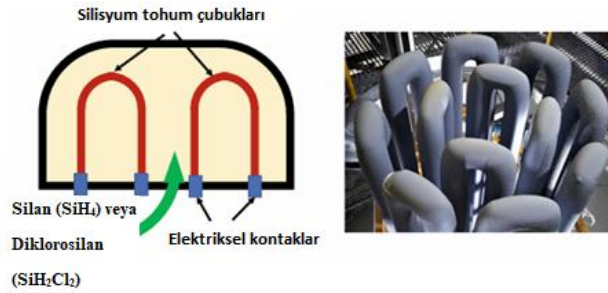
Şekil 2.13. Yüksek saflıkta güneş enerjisi sınıfı ve yarıiletken sınıfı silisyum elde etmek için CVD kurulumu (Alami ve ark., 2023)

Hidroklorik asit silisyumu çözerek diklorosilan (SiH_2Cl_2) veya triklorosilan (SiHCl_3) gazlarının oluşmasını sağlar. Hidrojen, SiHCl_3 gazını tüpün içinden alttaşlara taşır. Gazlar daha sonra tüpün içine yerleştirilen ısıtılmış alt tabakalarla temas eder ve gazlar ayrışarak alt tabakaları silisyumla kaplar. Daha sonra, klorür ile bağ kurmak için tüpün içinden bir hidrojen akışı geçirilir. Bu da HCl gazı üretir ve bu gaz toplanabilir, geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir. Genel olarak, CVD süreci tüpten geçen herhangi bir sayıda gazı içerebilir ve gazlar birbirleriyle ve silisyumla etkileşime girer. Silisyum daha sonra bir taşıyıcı gaz tarafından alt tabakalara taşınır. Alt tabakalar başlangıçta rafine silisyum elde etme sürecini başlatan tohum parçacığı olarak hareket eden saf silisyumdan yapılmıştır. Taşınan silisyum ve gazlar daha sonra silisyum alt tabakalar üzerinde ayrıştırılır. Ekstra hidrojen, klorür ile reaksiyona girmek ve saf silisyum alt tabakalar üzerinde bırakmak için tüpten geçer. Hidrojen ve klorür arasındaki etkileşim HCl gazı üretimiyle sonuçlanır. Saf silisyumdan oluşan tohum parçacığı elle ya da özel bir işlemle üretilebilir. Çevre bilinci açısından, SiO_2 bağını kırmak için ark fırınında üretilen CO_2 miktarı ve kullanılan enerji yüksektir. Ayrıca, yüksek oranda rafine edilmiş silisyum üretimi sadece büyük miktarda enerji değil, aynı zamanda aşırı miktarda HCl asidi de gerektirir. Böylece, her 4 ton asit 1 ton silisyum üretir. Dolayısıyla, su, enerji ve asitlerin yoğun kullanımının güneş hücresi üretimini engellediği açıktır. Asıl sorun, güneş hücrelerinin yapımında kullanılan enerji miktarı ile hücreler tarafından üretilen enerji arasındaki farkta yatmaktadır. Modülün yaklaşık 25 yıllık ömrü boyunca ürettiği enerji miktarının, onları inşa etmek için harcanan enerji miktarını karşılamayacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle, PV modülleri üretmek için hem çevre dostu hem de enerji yoğun

olmayan daha verimli yolların araştırılması gerekmektedir. PV modülleri üretmek için kullanılan mevcut süreçler enerji yoğun, savurgan, aşırı miktarda CO₂ emisyonu üreten ve kimyasalların ve asitlerin kullanımını içeren süreçlerdir.

2.6.3. Siemens Süreci

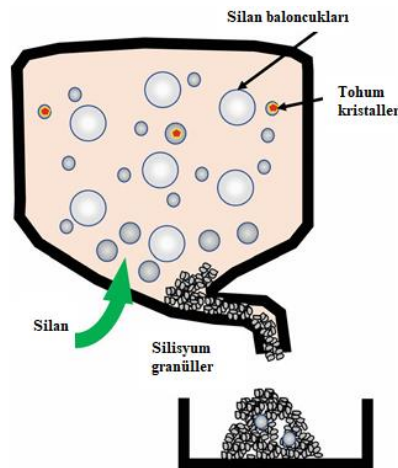
En eski silisyum üretim tekniklerinden biri olan bu teknik, temelde bir CVD tekniğidir. Ark fırınından giriş malzemesi olarak %96 saflıkta metalürjik silisyum ile başlar ve ultra saf silisyum ile sona erer. Silisyumu çözmek için hidroklorik (HCl) asit enjekte edilerek triklorosilan (SiHCl₃) gazı üretilir. Bu süreç boyunca, yüksek saflıkta silisyumdan oluşan tohum silisyum çubuklar alttaş olarak eklenir. SiHCl₃ gazındaki klorür ile etkileşime girmek ve silisyumu izole etmek için hidrojen eklenir, bu da HCl gazının oluşmasına neden olur. Silisyum, silisyum tohum çubuklarının üstünde birikir. İşlem sona erdiğinde, biriken Si çıkarılır ve toplanır. Şekil 2.14'te Siemens'in silisyumu saflaştırma süreci gösterilmektedir. Aşağıdaki kimyasal reaksiyonlar önce silisyumun HCl ile çözülmesi, ardından SiHCl₃ gazının ve fazla hidrojenin elde edilmesi sürecini temsil etmektedir. Kimyasal reaksiyon ayrıca SiHCl₃ ve hidrojen gazlarının saf silisyum ve fazla HCl gazı ürettiğini göstermektedir.



Şekil 2.14. Çoklu silisyum saflaştırma ve arıtma için Siemens süreci (a) Siemens odası veya çanı ve (b) silisyum parçalarını ayırmaya çoklu silisyum çubuklar (Alami ve ark., 2023)

2.6.4. Akışkan yataklı reaktör süreci

Siemens sürecine ek olarak, kimyasal metalürjik silisyum rafinasyonu akışkan yataklı reaktör (FBR) ile de gerçekleştirilebilir. FBR, reaktörün altından enjekte edilen silan gazı ile reaksiyona girmek için büyük miktarlarda hidrojen veya HCl gazı kullanmayan eski bir süreçtir. FBR prosesinin Siemens sürecinin dezavantajlarını telafi ettiği görülmüştür. Siemens süreci, saf silisyum toplamak ve elde etmek için sürecin sürekliliğini bozan sürekli olmayan bir süreçtir. Buna karşılık FBR süreci, üretilen silisyumu toplamak için durması gerekmeyen sürekli bir süreçtir. Saf silisyum elde etmek için, silisyum parçacıkları ve hidrojen içeren silan (SiH_4) gazı, şekil 2.15'te gösterildiği gibi reaktörden kolayca enjekte edilebilir. Siemens sürecinin aksine, FBR süreci başlangıçta SiHCl_3 gazını elde etmek için silisyumun HCl ile çözülmesini gerektirmez, bunun yerine silisyum partikülleri içeren silan gazı doğrudan reaktöre sokulabilir. Gaz içeri girer girmez, saf silisyumdan yapılmış küçük tohumlar üzerinde ayrışır. Tohumlar üzerinde yeterince silisyum toplandığında, daha büyük granüller oluşur ve reaktörün dibine çöker, burada düzenli olarak işlemden çıkarılırlar. Sonuç olarak, herhangi bir olayda süreci durdurmaya gerek kalmadan silisyum elde edilir. Geleneksel çubuklu reaktörle (Siemens süreci) karşılaştırıldığında, FBR eşleşen bir çıktı için %10 kadar az elektrik tüketir. Elektrik kullanımındaki azalma, ısıtılmış gaz/soğuk silisyum tohum yüzeyi arayüzey reaksiyonu nedeniyle ısı kaybının bypass edilmesine bağlanmaktadır. Dahası, FBR süreci daha az pahalı çoklu silisyum üreterek hızla genişleyen PV endüstrisine uygundur.



Şekil 2.15. Akışkan yataklı bir reaktör aracılığıyla silisyum saflaştırma ve rafine etme sürecinin şeması (Alami ve ark., 2023)

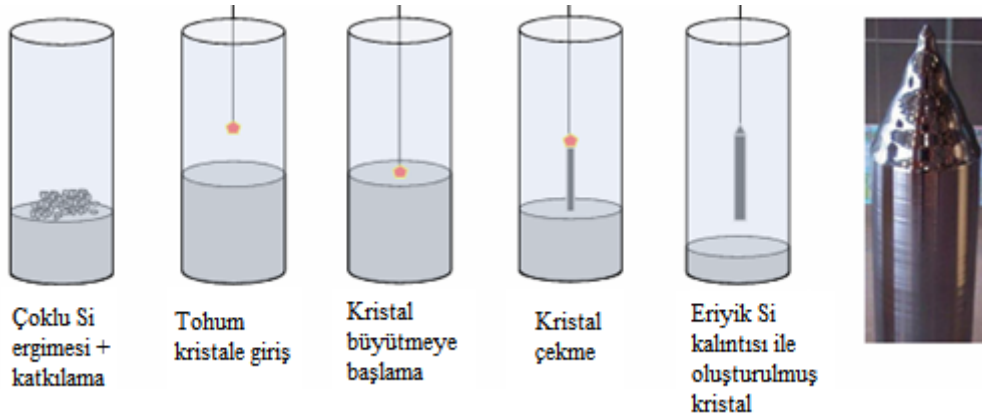
2.6.5. Tek kristalli silisyum üretimi

Siemens ve FBR süreçleri, düzensiz şekillere sahip yüksek saflıkta silisyum taneciklerinin elde edilmesine yardımcı olur. Ancak bu şekiller güneş hücreleri yapımında kolayca kullanılmaya uygun değildir. Silisyum tanelerinin eritilmesi ve silisyum yonga yapım sürecini kolaylaştırmak için tekrar katılaştırılması gerekir. Saf silisyum taneleri, belirli işlemlerden geçirilerek tek kristalli veya çok kristalli silisyum gofretler haline getirilebilir. Tek kristalli silisyumun ultra saf külçelerinin üretimi için iki süreç kullanılmaktadır. Bu işlemler:

- (i) Czochralski (Cz) işlemi ve
- (ii) yüzdürme bölgesi (Fz) işlemidir.

Czochralski Süreci

Polonyalı bir bilim adamı olan Jan Czochralski, 1916 yılında metallerin kristalleşme hızlarının farklılığını incelerken kendi adını taşıyan “Czochralski Süreci” tekniğini icat etti. Bu süreç, yarıiletkenlerin, metallerin ve tuzların tek bir kristal “monokristalini” üretmek için kullanılır. Bu süreç, silisyum gibi yarıiletkenlerin kristalleşme oranlarını kontrol etmedeki basitliği nedeniyle günümüzde de kullanılmaktadır. Cz-Si, tek kristalli silisyum üretmeye başlayan Czochralski-Silisyum sürecidir ve bunları üretmek için yönlü katılaşma ve sabırlı işçiler gerektirdiğinden, çok kristalli silisyumdan hala daha pahalıdır. Süreç, ilk olarak yüksek saflıkta, yarıiletken dereceli silisyum parçalarının genellikle kuvarsdan yapılmış 1425 °C'de bir potada eritilerek homojen erimiş silisyum haline getirilmesiyle gerçekleştirilir. Bor ve fosfor gibi hassas miktarlarda katkılayıcı safsızlık atomları eklenerek, üretilen silisyum, çeşitli elektronik özelliklere sahip sırasıyla p veya n tipi olacak şekilde değiştirilebilir. Daha sonra, hassas bir şekilde yönlendirilmiş bir çubuk üzerine monte edilmiş bir tohum kristali erimiş silisyumun içine daldırılır. Silisyum tohum kristali etrafında kristalleşmeye başladığında, çubuk kontrollü bir şekilde dışarı çekilir ve yükselişi boyunca daha fazla silisyum toplamak için döndürülür. Sıcaklık gradyanları, çubuk çekme hızı ve dönme hızı, büyük bir tek kristalli silindirik silisyum külçesini çıkarmak için hassas bir şekilde kontrol edilir. Olgunlaşmamış kristalleşme ve tane sınırlarının oluşması gibi sorunları önlemek için, işlem argondan oluşan inert bir atmosferde veya kuvarsdan yapılmış inert bir odada gerçekleştirilir. Şekil 2.16'da Czochralski silisyum yönteminin tek kristalli silisyum elde etme süreci gösterilmektedir.



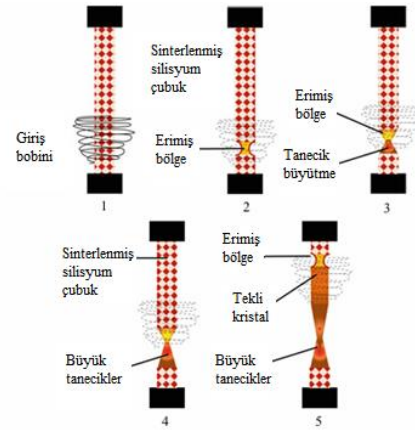
Şekil 2.16. Czochralski silisyum metoduyla tek kristalli silisyum oluşturma süreci

Cz-Si süreci oksijen açısından zengin silisyum gofretlerle sonuçlanır. Oksijen safsızlıkları sonuçta azınlık taşıyıcı ömrünü düşürür ve güneş hücrelerinin voltajını, akımını ve verimliliğini azaltır. Atmosfer küresi ve tohum kristali gibi çeşitli oksijen safsızlık kaynakları vardır. Ayrıca, oksijen safsızlıkları yüksek sıcaklıklarda aktiftir, bu da sıcaklığa duyarlı gofretlerle sonuçlanır ve sonraki işlemlerin kalitesini engeller. Bu sorunu ele almak için alternatif bir yöntem olan yüzdürme bölgesi yöntemi tanıtılmıştır.

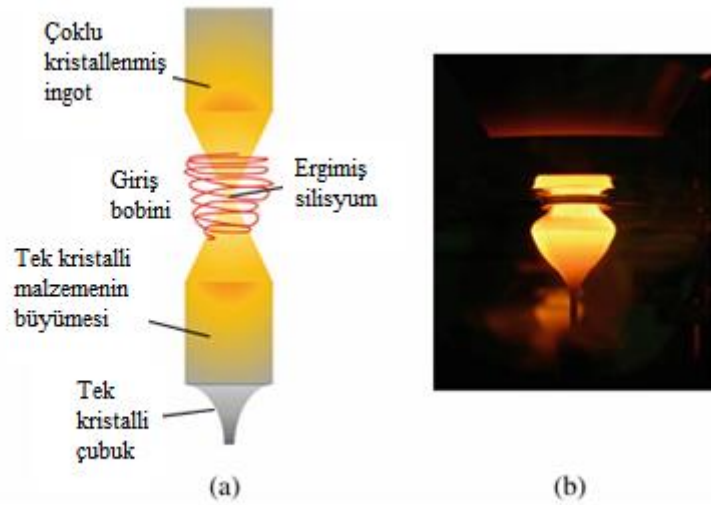
Yüzdürme Bölgesi Süreci

Yüzdürme bölgesi (Fz-Si), tek kristal yapımı için Cz yöntemine bir alternatiftir. Süreç, son derece düşük oksijen ve karbon safsızlık konsantrasyonlarına sahip yüksek saflıkta silisyum gofretler üretir. Bununla birlikte, yüzdürme bölgesi yöntemi, mikro kusurları kontrol etmeye yardımcı olmak için kasıtlı olarak eklenen yüksek konsantrasyonlarda nitrojen safsızlıklarına sahiptir. En önemlisi, azot safsızlıkları silisyum gofretlerin mekanik mukavemetini arttırmak için eklenir. Yüzdürme bölgesi yöntemi Cz-Si sürecine benzer; ancak tohum kristalini çekmez, bunun yerine erimiş silisyumun dökülmesini ve ardından külçe içinde ısıyı indüklemek için güçlü bir manyetik alan uygulanmasını içerir. İndüksiyon bobini hareketlidir ve ingotun etrafına sarılırken ya yukarı ya da aşağı hareket eder. Manyetik etkiler ısıyı indükler ve dökülmüş silisyum bölgelerine veya bölgelere uygulanır, bu da birden fazla erimiş bölge ile sonuçlanır. İndüksiyon bobini yukarı hareket ettikçe, bu bölgeler safsızlıkları taşır ve aynı anda yukarı hareket ederek geride büyük bir tek kristal aralık taneciği bırakır. Yukarı doğru bobin hareketinin devam etmesiyle tek kristalin aralık eş zamanlı olarak genişler.

İşlemin sonunda, erimiş bölgeler ve safsızlıklar da dahil olmak üzere dökülen silisyumun tüm fazla parçaları kesilir ve geride son derece düşük safsızlıklara sahip bir tek kristalli silisyum gofret bırakılır. Yüzdürme bölgesi yönteminde, silisyumun yüzey gerilimi tek kristal gofretlerin boyutlarını sınırlar. Tek kristal gofretlerin çoğu 20 cm'yi geçmez. Ek olarak, tek kristalin şekli şamandıra bölgesi ve bobin boyutundan büyük ölçüde etkilenir. Örneğin, şamandıra bölgesi veya bobin boyutu arttıkça, dökülen silisyumun çoğu erimeye başlar ve sonuç olarak tek kristal şekil oluşturulamaz. Şekil 2.17, tek kristalli silisyum üretimi için şamandıra bölgesi yöntemiyle ilişkili çeşitli aşamaları detaylandırmaktadır. Şekil 2.18'de sürecin yakın çekimi ve bobinin çalışırken çekilmiş bir resmi gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Tek kristalli Si elde etmek için yüzer bölge yöntemine dahil edilen çeşitli aşamalar (Alami ve ark., 2023)



Şekil 2.18. (a) Yüzme bölgesinin yakın çekimi ve (b) dökme silikon külçenin etrafındaki indüksiyon bobininin resmi (Alami ve ark., 2023)

Hem Cz hem de Fz süreçlerinin kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Her bir süreç için kalite ve mevcut bütçe önemli seçim parametreleridir. Her birinin artı ve eksilerinin bir özeti çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Cz ve yüzme bölgesi metodunun karşılaştırması

Cz metodu		Yüzme bölgesi metodu
Avantajları	Büyük kristal çapına izin veriyor (~ 46 cm)	Düşük safsızlık konsantrasyonu
	Düşük üretim maliyeti	Nihai kristaldeki katkı konsantrasyonu homojendir
Dezavantajları	Kuvartz ve grafit potalardan yüksek safsızlıklar (oksijen ve karbon)	Cz ye oranla oldukça pahalıdır
	Salınımlar nedeniyle aksenel ve radyal katkı konsantrasyonlarının düşük homojenliği	Kristal çapı sınırı ~ 20 cm

Cz-Si süreci ve yüzdürme bölgesi yönteminin her ikisi de tek kristalli silisyum kristalleri üretir. Tek kristal silisyum, yüksek verimliliği nedeniyle üretilmekte ve imal edilmektedir; ancak oldukça pahalıdır. Öte yandan, çok kristalli silisyumun üretimi daha uygun maliyetlidir; ancak, üretilen çok kristalli silisyumların çoğu düşük verimliliğe ve oldukça görünür tanelere ve tane sınırlarına sahiptir.

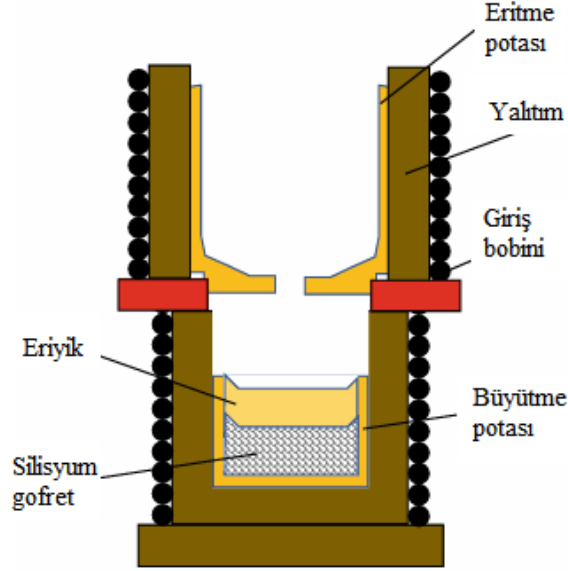
2.6.6. Çok Kristalli Silisyum (MS-Si)

Çok kristalli silisyumun üretim süreçleri:

- yönlü katılaştırma veya
- şerit büyütme olmak üzere iki süreçle üretilir.

Yönlü katılaştırma: Bu işlem, bir potadaki silisyum eriyiğinden ısı kaybının yönünü kontrol eder. Başlangıçta kuvarsdan yapılmış silisyum nitrat (Si_3N_4) kaplı bir potaya yüksek saflıkta silisyumun yerleştirilerek gerçekleştirilir. Saf silisyumdan oluşan bir tohum kristali içeren iki filament potaya daldırılır. Filamentlerin dış duvarları etrafında biriken silisyumu elde etmek için filamentler geri çekilir. Çok kristalli silisyum elde edildikten sonra, silisyum bloğu metalik bir tel ile kesilir, ardından doğranır ve ince

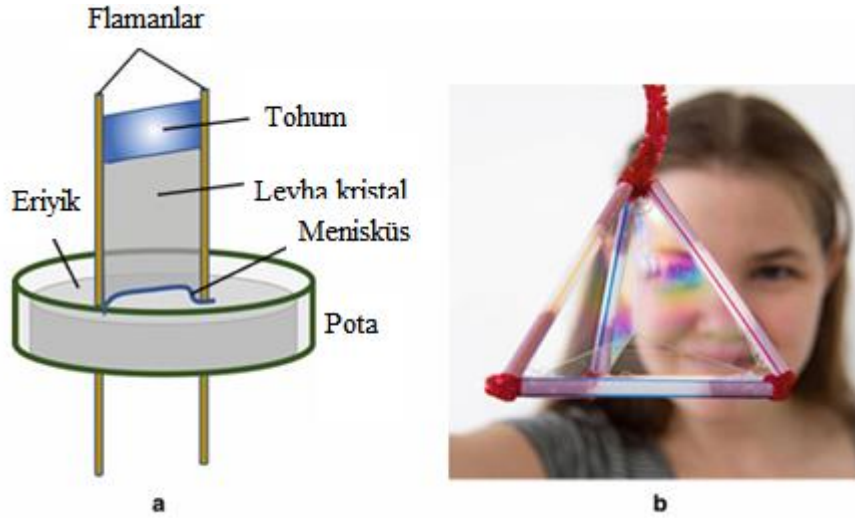
gofretler halinde dilimlenir. İnce silisyum gofretler elde edildikten sonra, gofretler uygun şekilde yıkanır ve hazırlanır. Toplam büyüme süreleri 20 ila 30 saat arasında değişmekte ve yarım tonluk büyük külçeler üretilmektedir. Şekil 2.19, çok kristalli silisyum üretimi için yönlü katılaştırma sürecini göstermektedir.



Şekil 2.19. Yönlü katılaştırma (Alami ve ark., 2023)

Tel Şerit Süreci

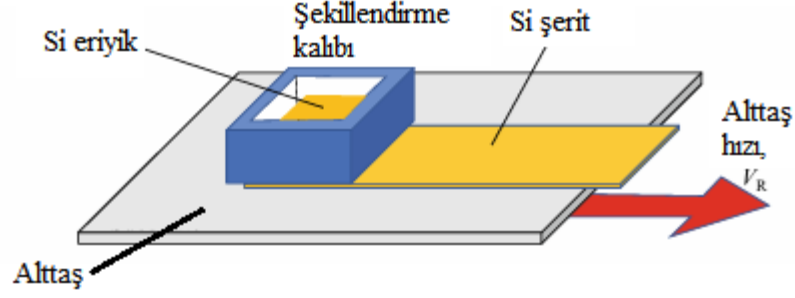
Bu işlemde, yönlü katılaştırma tekniğinde olduğu gibi çift pota kurulumu yoktur. Tel şeritli bir tohum kristali Şekil 2.20a'da gösterildiği gibi kuvarsdan yapılmış erimiş bir silisyum potaya daldırılır. Kohezif kuvvetlere ve yüzey gerilimine bağlı bir süreçte, özel bir çerçeve üzerinde sabun köpüğü oluşumuna benzer şekilde ince bir silisyum tabaka oluşur (bkz. Şekil 2.20b). Bu yöntem, gofret gerekli boyutlarda üretildiği için işlem sonrası adımlardan tasarruf sağlar, ancak yavaştır ve karmaşık kontrol, yoğun işgücü katılımı ve eğitim gerektirir.



Şekil 2.20. (a) Tel şerit yöntemi ile çoklu kristal Si üretimi ve (b) sabun köpüğünün filamentlere yapışmasının benzerliği (Alami ve ark., 2023)

Şerit Büyütme Tekniği

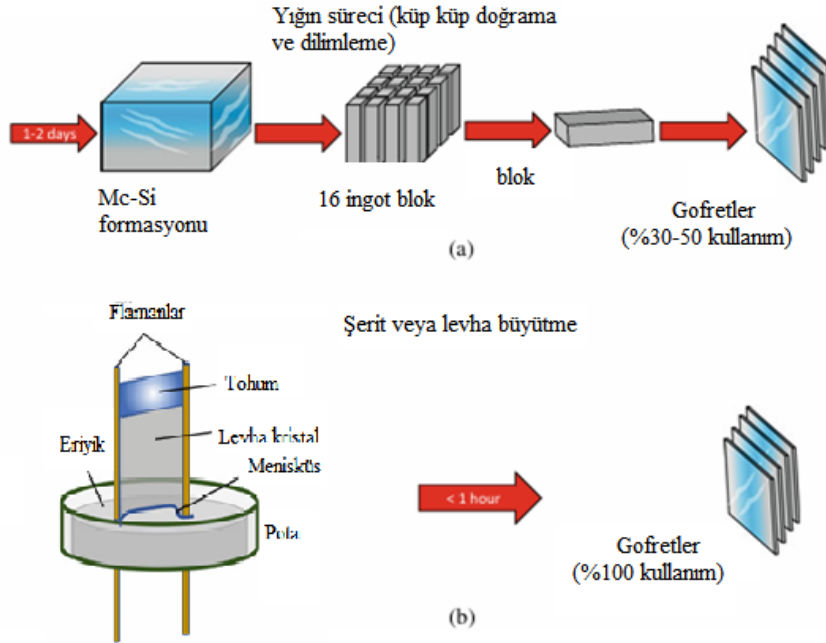
Yönlü katılaştırmanın aksine, şerit büyütme, tıpkı tel şerit işleminde olduğu gibi, dilimleme ve doğrama gibi işlem sonrası adımlardan kaynaklanan atıkları azaltır. Şerit büyütme, erimiş silisyumdan bir saatten daha kısa sürede çok kristalli silisyum gofretler üretmek için başka bir alternatiftir. Bu yöntemde, erimiş silisyum bir boya içine dökülür. Çok kristalli silisyum gofretin kalınlığını şekillendirmek için boyanın altına bir alt tabaka yerleştirilir. Bu nedenle, üretilen çok kristalli silisyumun kalınlığı hareketli alt tabakanın hızına bağlıdır. Şerit büyütme, gofretleri dilimlemeye veya kesmeye gerek kalmadan ince çok kristalli gofretler üretir; bu da atıkları azaltır. Bununla birlikte, temizleme ve parlatma gibi diğer işlem sonrası adımlar hala gereklidir. Üretilen çok kristalli gofretler katkılı silisyumdan yapılmıştır; dolayısıyla son derece kırılğan olma eğilimindedirler. Bu nedenle, gofretlerin cam gibi yalıtkan, yansıma önleyici bir malzeme içinde bulunması gerekir, bu da gofretleri su, nem veya diğer kirliliklerden korur. Şekil 2.21'de şerit büyütme yöntemi kullanılarak çok kristalli silisyum gofretlerin üretimi gösterilmektedir. Süreç, sıcak termoplastik boyanın sıcak boyayı tutan şekillendirici bir boya ile bir makine aracılığıyla uygulandığı ve bir boya açıklığının boyanın boyutuna ve hızına bağlı olarak homojen bir boya kalınlığı uyguladığı yol işaretleme tekniğine benzer.



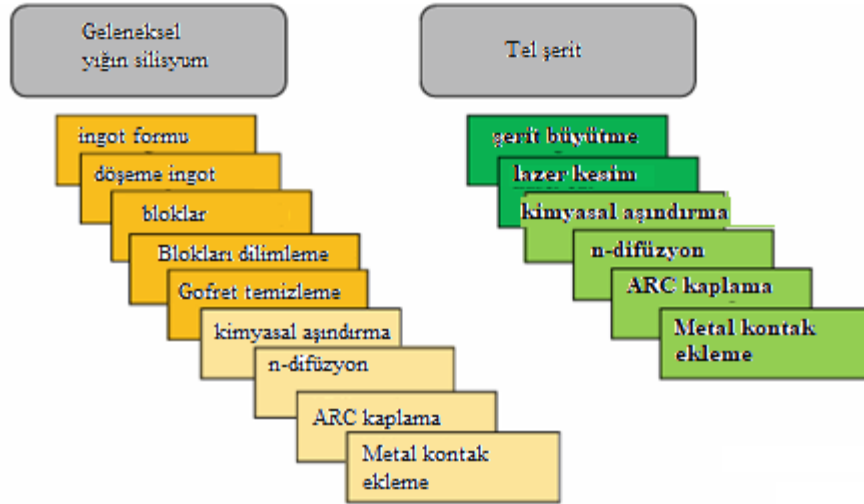
Şekil 2.21. Çok kristalli silisyum elde etmek için şerit büyütme yöntemi, burada V_R hareketli alt tabakanın hızıdır (Alami ve ark., 2023)

Yığın Süreci ve Şerit Büyümesi Arasındaki Karşılaştırma

Genel olarak, toplu işlemler neredeyse geri dönüştürülemeyen malzemeden çok fazla atık üretir. Şekil 2.22'den de görülebileceği gibi, yığın silisyum işleme, başlangıçtaki ultra saf silisyumun %30-50'sini kullanan gofretler üretmeye başlamak için 1-2 gün gerektirir. Geri kalanı bir kez daha arıtma sürecinden geçmelidir. Öte yandan, şerit veya telle yetiştirilen silisyumun ilk gofreti ortaya çıkarması için bir saatten az bir süre gerekir. Ancak süreç yavaştır ve yoğun eğitilmiş işgücü müdahalesi gerektirir. Şekil 2.23, her bir işlem için (yığın ve şerit) ana adımları listeler, ikincisi için daha az adım vardır.



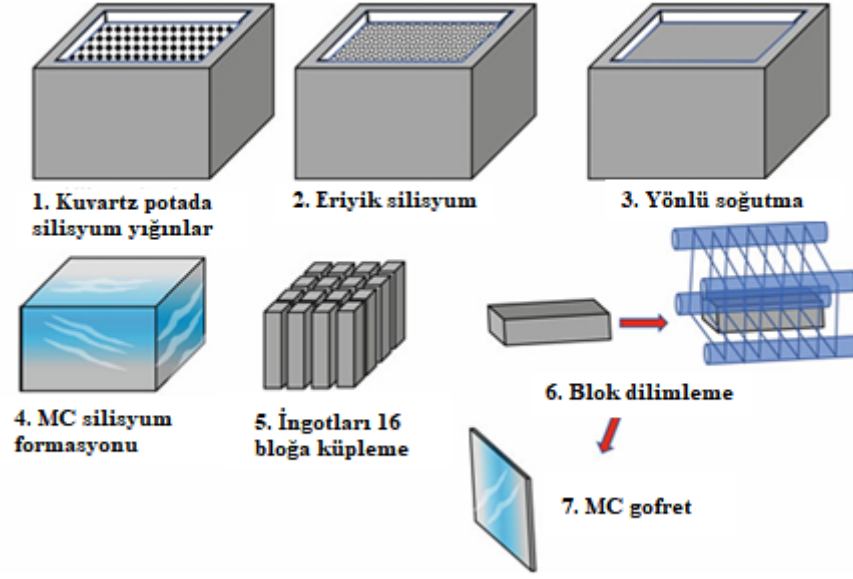
Şekil 2.22. Süreç karşılaştırma: (a) Yığın silisyum gofret üretimi ve (b) şerit veya levha büyütme (Alami ve ark., 2023)



Şekil 2.23. Yığın silisyum ve şerit levha üretim aşamaları

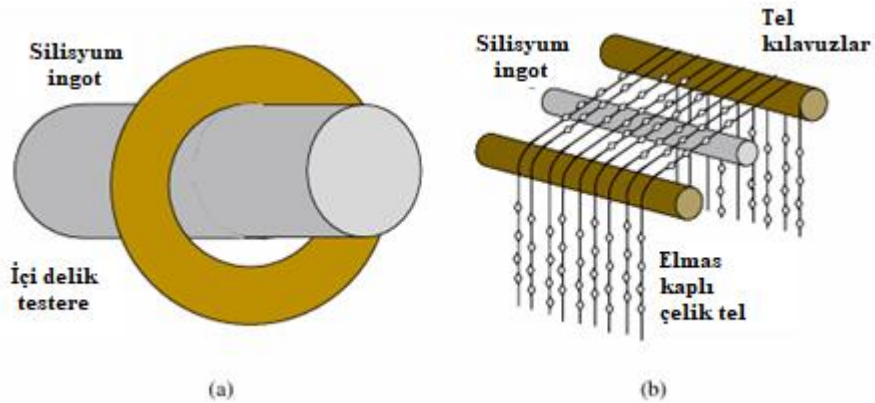
2.6.7. Silisyum son işlem

CZ veya yüzme bölge yöntemlerinden üretilen külçelerin son işlemde geçirilmesi hem zaman alıcı hem de son derece israflıdır. İngotların sonradan işlenmesi, tekli kristal silisyum ince tekli veya çoklu-kristalin gofretlere dönüştürmek için gerçekleştirilir. Şekil 2.24, ya bir Cz tekli kristalin külçe ile ya da bir kuvars potadaki silisyum eriyiğinden bir MS-Si olarak başlayan gofrete ulaşmak için gereken adımları göstermektedir. Silisyum katılaşmaya bırakılır (MS-Si'ye), bloklar halinde kesilir (16 geleneksel bir sayıdır); daha sonra gofretlerin üretilmesi için testere veya elmas uçlu metalik tel ile dilimlenir (tıpkı köy ekmeğinin dilimler halinde kesilmesi gibi).



Şekil 2.24. Yığın silisyum üretiminden gofret üretiminin aşamaları (Alami ve ark., 2023)

Cz'den gelen silisyum silindirler şeklinde gelir. Bu silindirler ya bir iç çap testeresi ya da bir tel testeresi ile kesilir. Şekil 2.25a'da görülebileceği gibi, gofret, dairesel bıçağın kesici kenarının elmas kıymıklarla gömülü olduğu bir iç çap testere tekniği kullanılarak dilimlenir. Daha iyi bir fikir, yonga levhayı birkaç paralel telle kesen bir tel testere kullanmaktır. Bu, şekil 2.25b'de gösterildiği gibi kesmeden kaynaklanan atıkları en aza indirecektir. Bir pastayı kesmek için bıçak kullanmak yerine kokusuz diş ipi kullanmayı deneyin ve atığının (bıçağa yapışmış) ne kadar az olduğunu takdir edeceksiniz. Tel, 100-200 µm çapında ve 10 m/s hızında çelikten yapılmıştır.



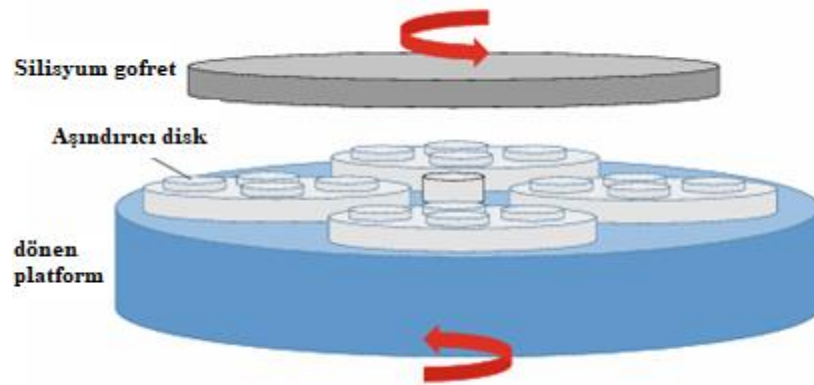
Şekil 2.25. (a) İç testere kullanımı kırık kenarları azaltır ve kesim üzerinde daha iyi kontrol sağlar ve (b) elmas kaplı çelik teller dilimleme işleminden daha az atık çıkmasını sağlar (Alami ve ark., 2023)

İlk adım, külçelerin daha işlenebilir hale getirilmesi ve daha kısa silindirler halinde kesilmesi amacıyla CZ veya FZ yöntemi kullanılarak çaplarının küçültülmesini içeren taşlamadır. Taşlama ayrıca p-tipini n-tipi malzemeden ayırmak için oluşturulan silindirlere belirli özellikler ekler. Bu şekil 2.26'da gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Gofrete farklı özellikler eklemek, katkılama durumunu ve açıkta kalan kristalografik düzlemleri ayırt eder

Gofretler dilimlendikten sonra, dilimleme işleminin bir sonucu olarak kırılmış olabilecek yüzey kalıntılarını ortadan kaldırmak ve gofreti istenen kalınlığa inceltmek için her iki taraftan alıştırılır. Şekil 2.27'de bir yonga plakası alıştırma makinesinin şematik görünümü gösterilmektedir. Gerekli kalınlıkta ince gofret elde edildikten sonra, hasarlı yüzeyleri gidermek için KOH (bir baz) veya HNO₃/HF (bir asit) kullanılarak aşındırılır.



Şekil 2.27. Şematik gofret aşındırma gösterimi

Daha sonra gofretler üzerinde kalan fazla asitleri/bazları temizlemek için gofretler parlatılır. Parlatma işleminden sonra minimum yüzey pürüzlülüğüne sahip süper düz,

aynalı yüzeyli gofretler elde edilir. Gofretler parlatıldıktan sonra, parlatma maddelerinden kurtulmak ve gofretlerin herhangi bir kalıntı içermemesini sağlamak için ultra saf kimyasallarla bir temizleme işleminden geçerler. Aşındırma, parlatma ve temizleme, gofretlerin gelen güneş radyasyonu ile etkileşim türünü belirtmek için gofretlerin yüzeyine küçük özellikler eklemekten sorumlu olan son işlem süreçleri olarak kategorize edilir.

2.7. PV Sistemler

2.7.1. Şebekeden bağımsız PV sistemler

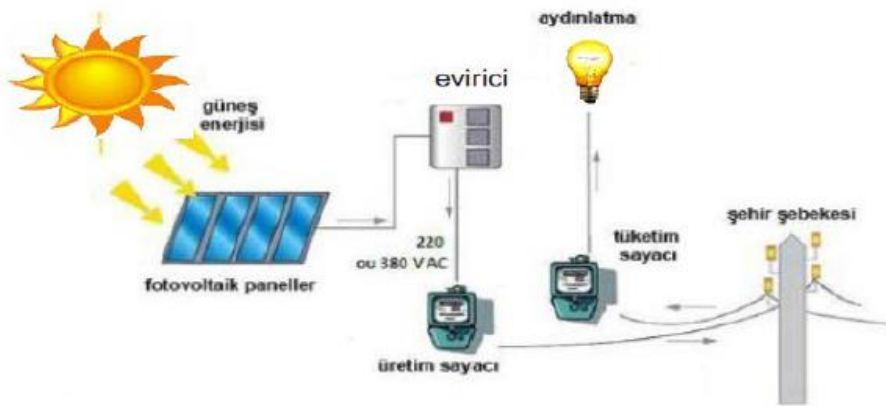
Şebekeden bağımsız PV sistemler yerleşim yerlerinde olabileceği gibi elektrik şebekesinin olmadığı köyler, bağ evleri, hobi bahçeleri ve tarlalar gibi yerlerde kullanılır. Şebeke bağlantısı olmayan bağımsız olarak kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerde yaygın olarak geceleri de fayda sağlaması için aküler kullanılır. Şekil 2.28’de şebekeden bağımsız PV sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.28. Şebekeden bağımsız PV sistem

2.7.2. Şebeke bağlantılı PV sistemler

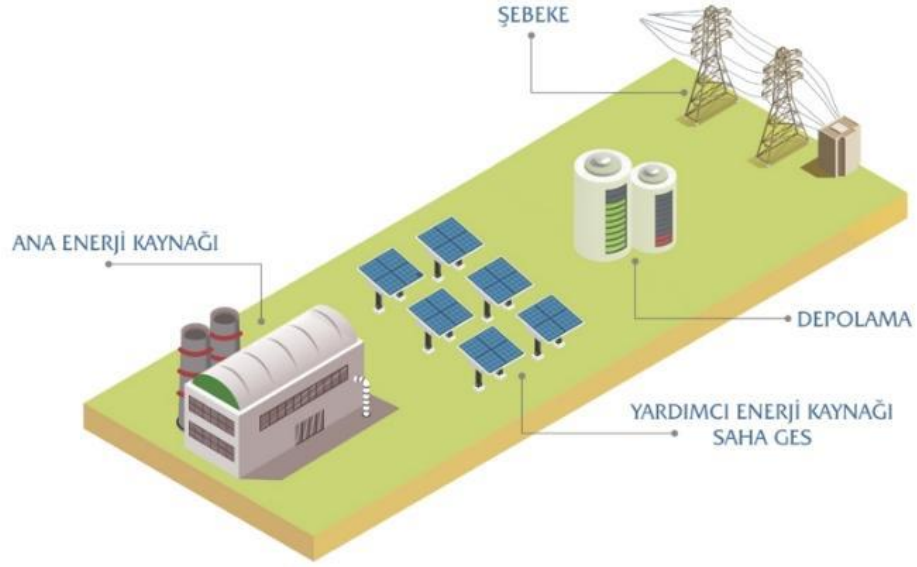
Şebeke bağlantılı PV sistemler doğrudan elektrik şebekesine bağlı olan sistemlerdir. Bu sistemlerin kullanımı şöyle faydalıdır: güneş ışığının yetersizliği durumunda elektrik enerjisi ihtiyacı şebekeden sağlanır, diğeri de güneş ışınlarının daha çok yoğunlaştığı anlarda fazla üretimden kaynaklanan elektrik şebekeye aktarılarak ekonomik olarak kazanç elde edilir. Şekil 2.29'sa şebeke bağlantılı PV sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Şebekeye bağlı PV sistem

2.7.3. Hibrit sistemler

Hibrit sistemler diğr yenilenebilir enerji kaynakları yanında güneş enerjisi ile birlikte çalışan sistemlerdir. Bu sistemde PV modüllerin yanı sıra ortama göre rüzgar, jeotermal enerji vb. gibi çalışabilen sistemler hibrit sistemlere örnek teşkil eder. Şekil 2.30'da hibrit güneş enerji sistemine örnek görebilirsiniz.



Şekil 2.30. Hibrit enerji santrali örneği

2.8. PV Sistem Elemanları

PV sistem kurulum analizinde güneş modüllerinin yanında ana ve ara parça olarak dahil olan tüm bileşenlerin analiz edilmesi gerekir. PV modüllerin örgü yapıları, kontrol üniteleri, eviriciler, akü ve elektronik yük üniteleri sistemin unsurlarıdır. Bu sistemlerin verimli çalışabilmesi için bütün unsurların beraber çalışıp denge halinde işlemesi gerekir.

2.8.1. PV Modüller

PV modüller üzerine düşen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken tabanlı yapılardır. PV modülleri meydana getiren hücreler, yapılarındaki yarıiletken malzemelerin elektriksel ve optiksel değişkenleri sayesinde enerji dönüşümü yapabilen devre elemanlarıdır.

2.8.1.1. PV hücre türleri

Çeşitli PV hücre tipi vardır. En yaygın olanları aşağıda sıralanmıştır.

Silikon Bazlı Güneş Hücreleri:

- *Kristal Silisyum (c-Si) Güneş Hücreleri:* Kristal bazlı silisyum güneş hücreleri, silisyum kristallerin tek yada çoklu kristal yapıda düzenlenmesiyle oluşturulur. Tek kristalli silisyum hücrelerinin verimi iyi olmasına rağmen maliyetleri daha yüksektir. Çok kristalli silisyum hücreler ise daha az maliyetlidir, fakat bir miktar verimlilik kaybı yaşanabilir.
- *İnce Film Silisyum (a-Si, μ c-Si) Güneş Hücreleri:* İnce film silisyum güneş hücreleri, çok ince bir tabaka halinde silisyum tabakaların bir yüzeye uygulanmasıyla oluşturulur. Amorf silisyum (a-Si) ve mikrokristalin silisyum (μ c-Si) gibi farklı silisyum yapıları kullanılabilir. İnce film silisyum hücreler, daha esnek ve daha hafiftirler, ancak genellikle kristal silisyum hücrelerine göre daha düşük verimliliğe sahiptirler.

İnorganik İnce Film Güneş Hücreleri:

- *Kadmiyum Tellür (CdTe) Güneş Hücreleri:* CdTe güneş hücreleri, kadmiyum tellür ve ince bir katman halinde bir arka metal elektrot içeren bir alttaş üzerine yapılan ince bir film tabakasıyla oluşturulur. CdTe güneş hücreleri, ticari olarak mevcut olan en düşük maliyetli güneş hücrelerinden biridir.
- *CIGS Güneş Hücreleri:* CIGS güneş hücreleri, bakır, indiyum, galyum ve selenyum elementlerinden oluşan ince bir film tabakası ile oluşturulur. CIGS güneş hücreleri, yüksek verimlilik potansiyeline sahiptirler ve ince film güneş hücreleri arasında önemli bir yer tutarlar.

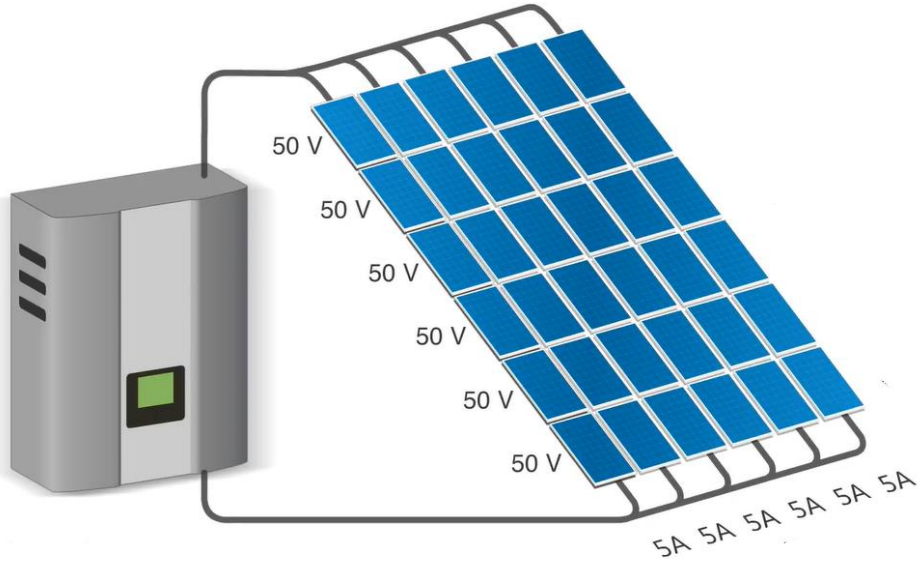
Organik Fotovoltaik (OPV) Güneş Hücreleri:

- *Organik PV güneş hücreleri:* Organik polimerler veya organik küçük moleküller gibi karbon bazlı malzemeler kullanılarak üretilir. OPV hücreleri, esnek ve hafif olmaları nedeniyle esnek elektronik cihazlar için ideal bir seçenek olabilirler. Ancak, genellikle düşük verimlilikle sınırlıdır.

2.8.2. Eviriciler

PV modüller vasıtasıyla üretilen elektrik enerjisi doğru akımdır (DC). Evlerde ve sanayide kullandığımız elektrik enerjisi ise çoğunlukla alternatif akımdır (AC). Bu nedenle bu tip yerlerde güneş modüllerinden üretilen enerjiyi doğru akımdan alternatif

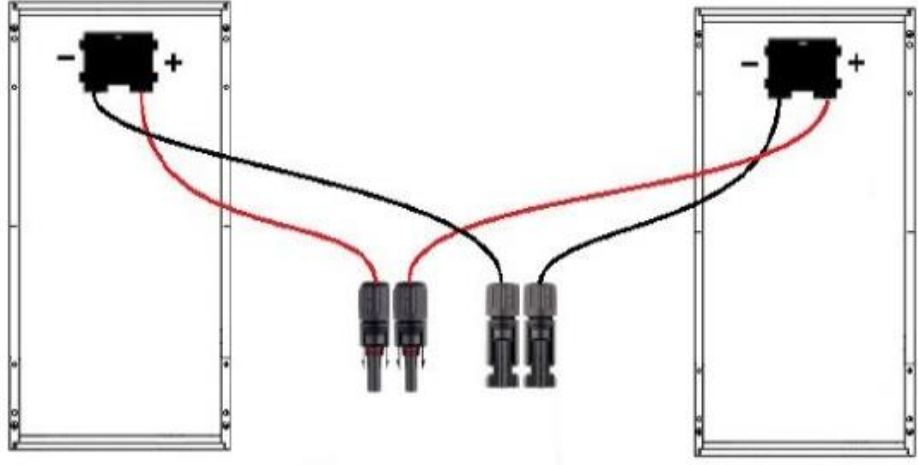
akıma çevirebilen cihazlara gereksinim vardır. Bu cihazlarda eviricilerdir. Kullanım amacına göre farklı evirici türü vardır. Eviriciler çıkış sinyaline göre sınıflandırılır. Bunlar kare, sinüs, sinüs benzeşimli ve tam sinüs dalga çıkışlı eviriciler olarak sıralanabilir. PV sistemlerinde en çok tercih edilen evirici sinüs dalga çıkışlı olan eviricidir. Şekil 2.31’de bir sinüs dalga eviricisi görülmektedir.



Şekil 2.31. PV diziye bağlanan bir evirici

2.8.3. Kablo

PV sistemlerinde elektrik devrelerinde olduğu gibi en önemli elamanlarından bir tanesi kablolardır. PV sistemleri uzun süre çalışabilen sistemlerdir. Bu sistemlerin uzun bir dönem çalışabilmesinin bir faktörü de uygun ve kaliteli kablolardır. PV sistemlerinde amacına uygun üç farklı kablo kullanılır. Modüllerin birbiri ile bağlanmasını sağlayan ara kablolar, sistemden eviricilere doğru giden akıma uygun doğru akım kabloları, DC/AC çeviren eviriciler ile şebeke arasındaki bağlantısı sağlayan AC kablolardır. Bu kablolardan modüller arasındaki kablolar ayrı bir yer tutar. Ara mesafeler yakın olduğu için meydana gelebilecek kısa devreleri önlemek için kırmızı ve siyah renkte kablolar kullanılır ve kabloların artı ucu ile eksi ucu birbirinden ayrı olacak şekilde bağlanır. Kabloların dezenformasyonlarını engellemek için yüksek sıcaklıktan, yüksek enerjili ışınlardan ve mevsimsel değişkenlerden korunması gerekir. Şekil 2.32’de PV sistemlerinde kullanılan kablolar gösterilmiştir.



Şekil 2.32. Modüller arası bağlantı kabloları

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Meteorolojik Sistem

Sistemimizin kurulu olduğu Batman’da 2014 ile 2024 yılları arasında anlık olarak ölçülen sıcaklık ve güneş ışı nımı değ erleri meteorolojik sistem ile yapılmıştır. İlgili yıllar arası tüm günlerde beş dakikalık süre ile tüm ölçümler kayıt altına alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri radyasyon kalkanı içerisinde yer alan sensör ile, güneş ışı nım değ erleri de tüm dünya tarafından kabul gören piranometre vasıtasıyla elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Meteoroloji sistem (Batman)

3.1.1. Sıcaklık ölçümü

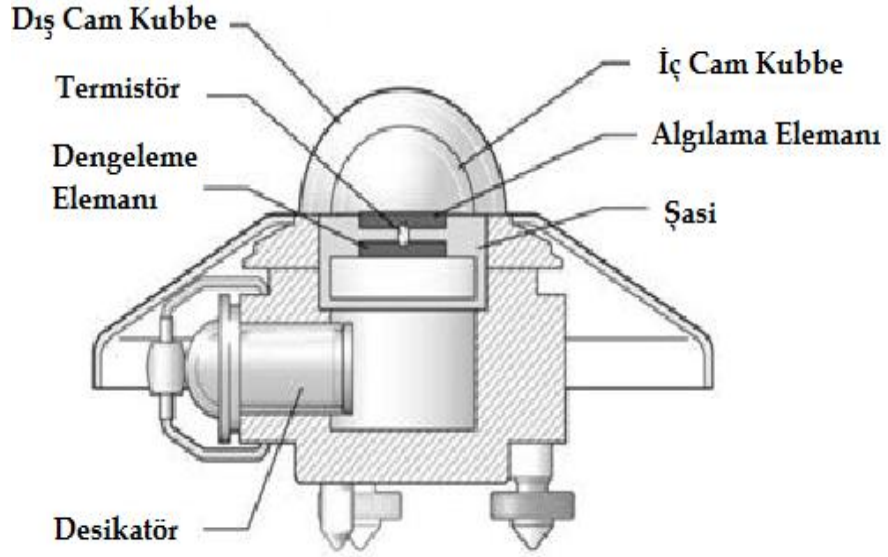
2014 ile 2024 yılları arasında Batman’da ölçülmüş günlük sıcaklık verileri HMP60 Vaisala INTERCAP sıcaklık sensörü vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Görüldüğü gibi sıcaklık sensörünün güneş ve diğer etkenlerden etkilenmemesi için radyasyon kalkanı kullanılmıştır.



Şekil 3.2. HMP60 Vaisala sıcaklık sensörü ve radyasyon kalkanı

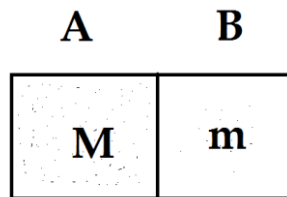
3.1.2. Güneş ışıının ölçüm sistemi

2013 ile 2024 yılları arasında Batman’da anlık olarak ölçülmüş güneş ışıının verileri Dünya Meteoroloji Teşkilat (WMO) tarafından da önerilen Kipp&Zonen CMP11 modelli piranomet vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3’de Kipp&Zonen CMP11 modelli piranometrenin yapısı yer almaktadır. Günlük beş dakika ara ile ölçülen veriler fotovoltaiik hücre bağılı batarya yardımıyla veri depolayabilen CR800 dataloggera ile sağlanmıştır. Tüm ölçülmüş veriler belli günlerde RS232 arayüzey yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Çizelge 3.1’de Kipp&Zonen CMP11 modelli piranometrenin teknik ayrıntıları verilmektedir.



Şekil 3.3. Kipp&Zonen CMP11 modelli piranometre yapısı

Üstünde bulunan yarı küre cama gelen güneş ışınımını ölçen piranometre termopile dayanır. Küre yüzeyine düşen güneş ışınımı ile termopil ısınır ve termopilde oluşan elektrik potansiyel farkı ile ölçümler alınır. Şekil 3.4'te de görüldüğü üzere A ve B termo elektrik çiftin elektromotor kuvveti bu metal çiftin elektron yoğunluğu farkından dolayı oluşur ve sıcaklıkla orantılıdır. A ve B termo elektrik çiftte cm^3 başına oluşan serbest elektron sayısına M ve m dersek, bu A ve B çiftin birbiri ile teması durumunda elektron akışı olacaktır. Şayet M'deki elektron sayısı m'den fazla ise A'dan B'ye elektron akışı olacaktır. B'ye geçen elektronlardan dolayı negatif yükleme etkisiyle ve negatif yük fazlalığından dolayı diğer tarafa akmak isteyen elektronlara etkiyen kuvvet, elektron hızlarını azaltacaktır. Denge halinde elektron kaybeden A pozitif, elektron kazanan B negatif olacaktır. Bu durumda A ve B metal çiftinde potansiyel fark meydana gelecektir (Masalcı, 2000). Meydana gelen bu potansiyel farkın anlamı sorulan güneş ışınımının bir değeridir.



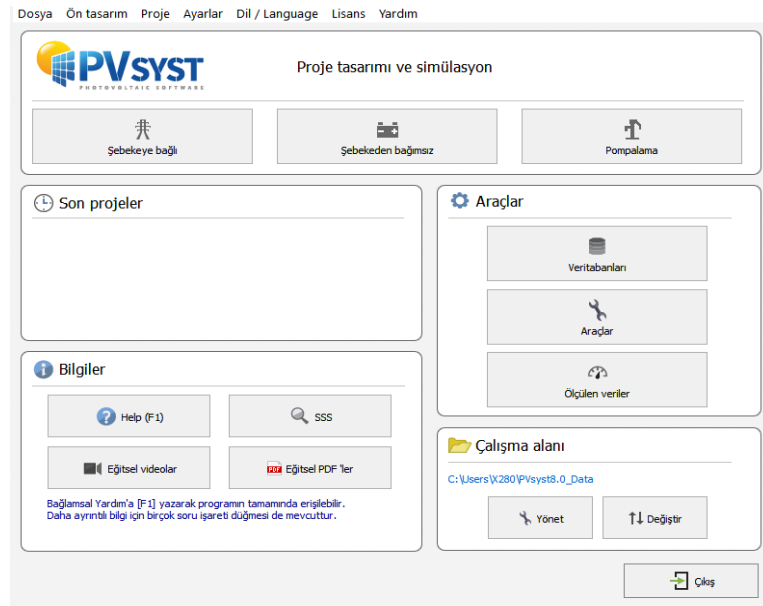
Şekil 3.4. A-B Termo-çifti

Çizelge 3.1. Kipp&Zonen CMP11 modelli piranometre özellikleri

Spektrum aralığı	305-2800 nm (50% nokta)
Duyarlılık	4-6 $\mu\text{V/W/m}^2$
Empedans	700-1500 Ω
Tepki zamanı (95%)	15 saniye
Yüzdesel sapma	$< \pm 0.6 \%$ ($< 1000 \text{ W/m}^2$)
Sıcaklığa duyarlılık	$< \pm 1 \%$ (-10 dan 40 °C)
Doğrudan hata	$< \pm 10 \text{ W/m}^2$ (1000 W/m^2 ışıymında)
Çalışma sıcaklığı	-40 °C den 80 °C
Ağırlık	850 gram
Kablo uzunluğu	10 m
Boyutlar	150.0 mm x 91.5 mm

3.2. PVsyst Paket Yazılım Programı

Kurulumu yapılacak fotovoltaik (PV) sistemlerin kurulumu öncesi analizlerinin yapılması önemlidir. Bunun için çeşitli paket yazılım programları mevcuttur. Bunlardan bir tanesi de PVsyst paket yazılım programıdır. PVsyst paket yazılım programı kurulum öncesi PV sistemleri benzeşim yolu ile rapor sunabilen ücretli bir yazılımdır. PVsyst V8.0 paket yazılım programının arayüzü şekil 3.5’te verilmektedir.



Şekil 3.5. PVsyst V8.0 paket yazılım programı giriş arayüzü görüntüsü

3.3. Çok Kristalli PV Sistem

Batman Gültepe Simya Koleji binasının çatı katında (enlem: 37,921; boylam: 41,144) 2012 tarihinde DİKA'nın katkılarıyla kurulan fotovoltaiik sistemimiz Şekil 3.6'ta görülmektedir. Ortadaki modüller çok kristalli Si teknolojisine sahip 2,145 kWp sistemimizdir.



Şekil 3.6. Batman Gültepe Simya Koleji bina çatısına kurulu fotovoltaiik sistem

3.3.1. Çok kristalli Si PV modüller

Tez çalışmamızda yer alan çok kristalli silisyum modüller fotovoltaiik sistemimizde 11 tane bulunmaktadır. Almanya'da Sunset bünyesinde üretilmiş Sunset PX 195-50 kodlu çok kristalli Si modüllerin standart test koşulları altındaki teknik özellikleri çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çok kristalli silisyum modüllerin standart test koşullarındaki (STC) teknik değerleri

Üretici Firma	Sunset
Kod	PX 195-50
Teknoloji	Çok kristalli silisyum
Maksimum güç noktası $P_{max}(W)$	195
Maksimum güç noktasındaki akım $I_{mpp}(I)$	7,7
Maksimum güç noktasındaki gerilim $V_{mpp}(V)$	25,2
Kısa devre akımı $I_{sc}(A)$	8,5
Açık devre gerilim $V_{oc}(V)$	31
NOCT(°C)	51
Alan (m ²)	1,32
$\beta(^\circ/\text{°C})$	-0,35
$\alpha(^\circ/\text{°C})$	+0,055
$\gamma(^\circ/\text{°C})$	-0,36

3.3.2. Evirici

Çok kristalli silisyum modüllerden oluşan 2,145 kWp güce sahip PV sistemimiz tarafından üretilen gücün doğru akım (DC)- alternatif akım (AC) dönüşümünü meydana getiren eviricimiz Sunset firma bünyesine ait SunString5000 modelli eviricidir (Şekil 3.7). Sistemimizde faydalanan SunString5000 evirici bünyesinde:

- Tek fazlı şebek kontrol
- Sıcaklık kontrolü sağlama
- AC ve DC tarafında yüksek gerilim saptayıcı
- Sıcaklık kontrolü
- Meydana gelebilecek şebeke arıza durumlarından korumak için EMW filtresi

bulunmaktadır.



Şekil 3.7. Çok kristalli silisyumlu PV sistemde kullanılan SunString5000 eviricisi

SunString5000 eviricisine ait AC-DC altındaki teknik değerler Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. DC-AC altında SunString5000 eviricine ait teknik değerler

DC Değerler		AC Değerler	
Nominal Güç	500 W	Nominal Güç	4600 W
Minimum Çalışma Gerilimi	125 V	Minimum Performans	5060 W
Maksimum Çalışma Gerilimi	400 V	Çıkış Gerilimi	190-264 V
Tahrip Sınırı	500 V	Şebeke Frekansı	50 Hz
Maksimum Akım	43 A	Maksimum Şebeke Akımı	22 A
Minimum Önerilen Kablo Kesiti	4 mm	Nominal Performansta Kıvrım Faktörü	% 3
Gündüz Enerji Sarfıyatı	5 W	Maksimum Verimlilik	% 94,5
Gece Enerji Sarfıyatı	0 W	Euro Verimlilik	% 93,3

3.3.3. PV üretim değerlerini kaydetme

Çok kristalli silisyum PV sistemimiz tarafından üretilen güç verileri 15'er dakikalık süre zarfında Sunset firmasına ait SUNlogXL dataloggeri vasıtasıyla kaydedilmiştir (Şekil 3.8). SUNlogXL dataloggera ait teknik veriler:

- Tam süreli saat
- 8 Analog giriş
- Çipli 8*10 – bit Analog/Dijital dönüştürücü
- DIN 43 864'e göre SO kesit yeri olan 2 impuls girişi
- Tamponlanmış 128 Kbyte EEPROM
- RS232 portlu 2 seri kesit yeri
- Veri değerleri için 128 kbyte Ram
- İşletme yazılımı için 8 bit mikro kontrolör
- 0(4) – 20 mA aktif veya pasif bağlantı girişi



Şekil 3.8. PV sistemimiz tarafından üretilen güç değerlerini kaydeden SUNlogXL cihazı

PV sistemimiz sürekli olarak şu değerleri kaydetmiştir:

- PV sistemimiz üzerinden şebekeye aktarılan güç değeri (W)
- PV sistemimiz aktif olduğu andan itibaren üretilen toplam enerji miktarı değeri (Wh)
- PV sistemimizin aylık ürettiği toplam güç değeri (kWh)
- PV sistemimizin anlık ürettiği toplam güç değeri (kWh)

3.3.4. Çok kristalli silisyum PV sistem

Çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş PV sistemimiz şekil 3.9'ta görülmektedir (ortadaki modüller). Sunset PX 195-50 çoklu kristal silisyum modüllerinden 11 adeti birbiri ile seri bağlanarak 2.145 kWp gücünde bir örgü elde edilmiştir.



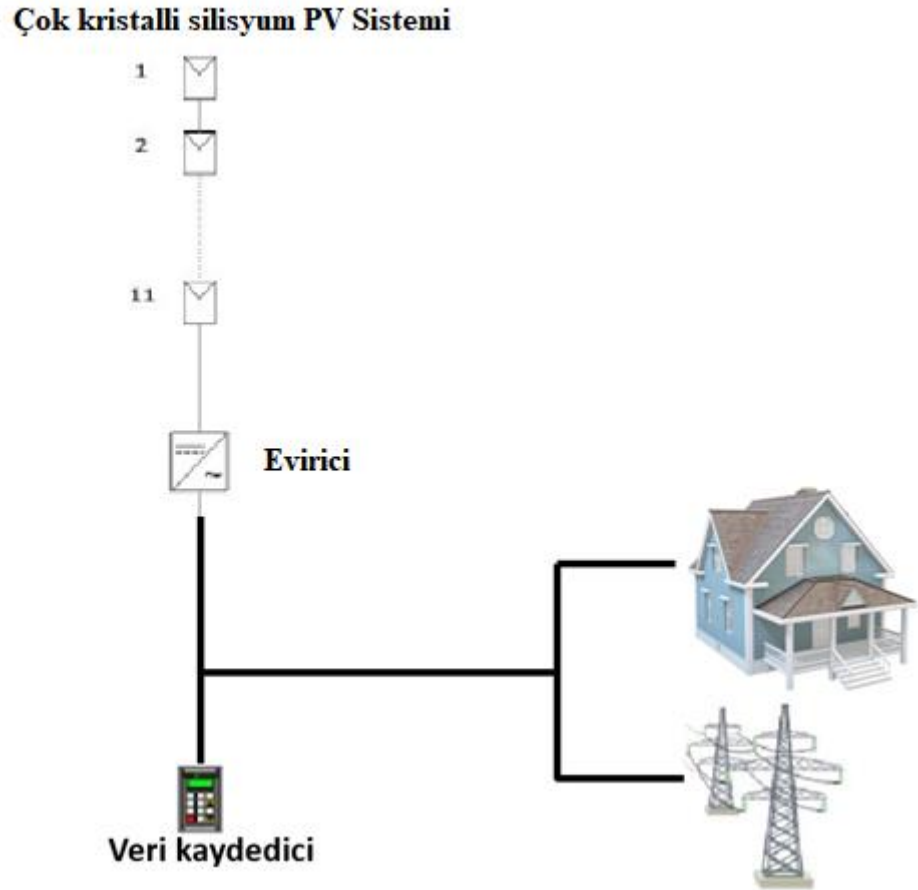
Şekil 3.9. Çok kristalli silisyum modüllerden elde edilmiş PV sistemimiz (ortada)

Çok kristalli silisyum modüllerden elde edilmiş 2,145 kWp güçlü PV sistemimizde 5000 W'lık güce dayanan evirici kullanımı tercih edilmiştir. Eviricimizi çevreden oluşabilecek nem, ısı ve benzeri koşullardan etkilenmemesi için kurulumu gerçekleşen binanın bodrum katında bulunan AC akım panolarının yakınına kurulumu gerçekleştirilmiştir. Ana elektrik panosuna $3 \times 4 \text{ mm}^2$ antigron kablo ile alternatif akımı taşıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yine koruma için 25 A'lık sigortalar bağlanmıştır. Kullanılan eviricileri maksimum kapasiteyle çalışması hedeflenmiş ve %96'lık performansa kadar çıkabilmesi için alüminyum soğutucu kasa kullanımı tercih edilmiştir.

Modül ayakları çok kristalli silisyum modüller için 25 derece açı ile montajlanmış ve modülleri saran alüminyum profiller saf alüminyumdan olup eklemler kaynak yapılmadan cıvatalı şekilde tasarlanmıştır. Cıvatalar metrik8 A2 kromdur. Çünkü sistemin en az 25 yıl boyunca erozyona dayanıklı olması tasarlanmıştır. DC kablolar RNF

07F Solar 6 m² çift izoleli 200 °C sıcaklığa dayanıklı alüminyum kablolar olup bağlantı arasındaki mesafe artışında ısı ve enerji kaybını en aza indirir. İlgili çok kristalli silisyum sistemi için 80 metrede kablo kullanılmıştır.

Bina içerisinde kullanılan elektronik cihazları korumak için bina topraklaması harici bağımsız PV sisteme ait ilave topraklama da yapılmıştır. Güneş ışınımının olmadığı gece saatlerinde SunString5000 eviriciler otomatik olarak kapatıldığından ilave kapatıcıya gerek duyulmamıştır. Tez çalışmamızda yer alan ölçüm ve analizler Ocak 2014 ile Aralık 2024 yılları arasında kapsamaktadır. Çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş PV sistemimizin kurulum tasarımı şekil 3.10'ta verilmektedir.



Şekil 3.10. Çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş PV sistemimizin tasarım düzeni

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1. Meteorolojik Değerler

Batman (37.79 enlem; 41.06 boylam) ili merkezinde 2014 ile 2024 yılları arasında anlık olarak ölçülmüş sıcaklık ve güneş ışıınım şiddeti değerleri analiz ve karşılaştırmalar için teorik hesaplamalarda kullanılmıştır. Çizelge 4.1 ve 4.2’de 2014 ile 2024 yılları arasında sıcaklık sensörü ve piranometre ile ölçülmüş; aylık ortalama günlük sıcaklık ve yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük ışıınım şiddeti değerleri verilmiştir.

Çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş 2,145 kWp kurulu gücümüzdeki her bir modül eğimi 25° olarak sabitlenmiştir. Bundan dolayı piranometre ile ölçülmüş yatay yüzeydeki aylık ortalama günlük güneş ışıınımı şiddeti değerleri bu eğime göre yeniden hesaplanarak çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.1. 2014 ile 2024 yılları arasında Batman ili merkezinde ölçülmüş ortalama sıcaklık değerleri (°C)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
OCAK	2,8	3,2	1,8	2,6	3,8	5,1	4,4	5,3	4,5	4,8	6,5
ŞUBAT	6,3	5,1	8,8	7,2	8,4	6,4	4,5	8,2	9,2	3,1	8,1
MART	10,7	10,6	11,1	11,3	15,5	9,1	11,9	9,7	7,7	14,3	10,4
NİSAN	15,3	14,9	16,6	15,8	17	12,9	14,7	17,8	19,5	16,9	19,2
MAYIS	20,3	20,7	20,9	20,1	18,2	21,8	20,5	24,4	20,7	21,2	20,9
HAZİRAN	28,2	27,6	27,2	27,9	27,6	29,8	27,2	28,5	30,2	29,6	30,1
TEMMUZ	33,2	32,2	31,8	32,4	31,9	30,6	31,7	32,6	33,1	33,3	32,1
AĞUSTOS	33,1	32	32,9	32,1	32,3	31,7	30,4	31,8	33,5	32,8	31,9
EYLÜL	28,8	28,8	25,6	26,9	27,7	26,4	28,7	26,2	28,8	28,9	26,3
EKİM	21,7	20,2	20,2	21,2	20,8	21,2	21,1	20,7	22,3	22,9	19,1
KASIM	11,8	11,2	9,7	11,2	10,9	11,3	12	13,4	12,4	12,7	10,8
ARALIK	6,5	4,8	3,8	5,6	8	8,3	5,7	6,1	7,6	8,3	4,3

Çizelge 4.2. 2014 ile 2024 yılları arasında Batman ili merkezinde ölçülmüş yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük güneş ışınım şiddeti değerleri (kWh/m².gün)

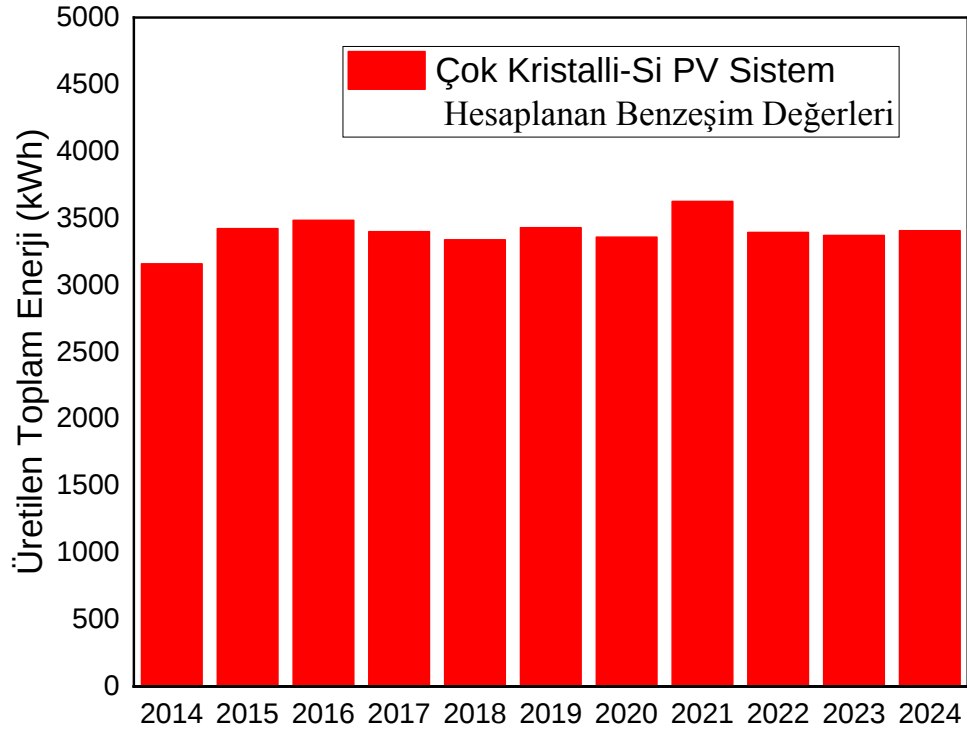
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
OCAK	48,52	57,85	57,72	65,71	62,75	60,26	63,47	73,04	56,95	69,92	45,6
ŞUBAT	94,63	66,38	88,78	82,52	78,25	84,72	71,58	94,66	94,69	63,59	87,2
MART	120,56	114,25	129,97	119,55	110,18	110,40	109,54	129,50	107,15	100,96	123,6
NİSAN	166,85	178,25	185,51	174,52	187,1	146,43	164,21	184,21	178,65	160,42	152,22
MAYIS	200,58	218,88	204,70	210,25	202,54	224,65	213,01	236,54	215,89	217,55	216,66
HAZİRAN	230,62	231,71	234,75	236,45	241,57	236,62	242,67	257,61	243,21	247,25	251,71
TEMMUZ	236,09	248,77	244,45	249,45	251,48	255,02	237,51	250,71	256,74	248,54	249,68
AĞUSTOS	207,89	227,89	209,18	224,44	211,54	227,53	224,37	218,70	228,03	223,58	231,15
EYLÜL	160,21	166,40	174,40	170,12	174,62	184,50	173,68	187,21	182,67	178,14	177,91
EKİM	113,03	110,94	133,89	124,45	124,88	133,62	139,26	134,68	122,99	121,25	138,66
KASIM	67,98	90,07	93,06	82,25	87,52	95,74	74,75	76,46	67,55	87,54	82,01
ARALIK	40,04	77,41	53,27	52,55	41,62	46,85	56,72	57,90	58,46	67,25	54,41

Çizelge 4.3. 2014 ile 2024 yılları arasında Batman ili merkezinde ölçülmüş yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük güneş ışınım şiddeti değerlerinin 25° eğime göre şiddet değerleri (kWh/m².gün)

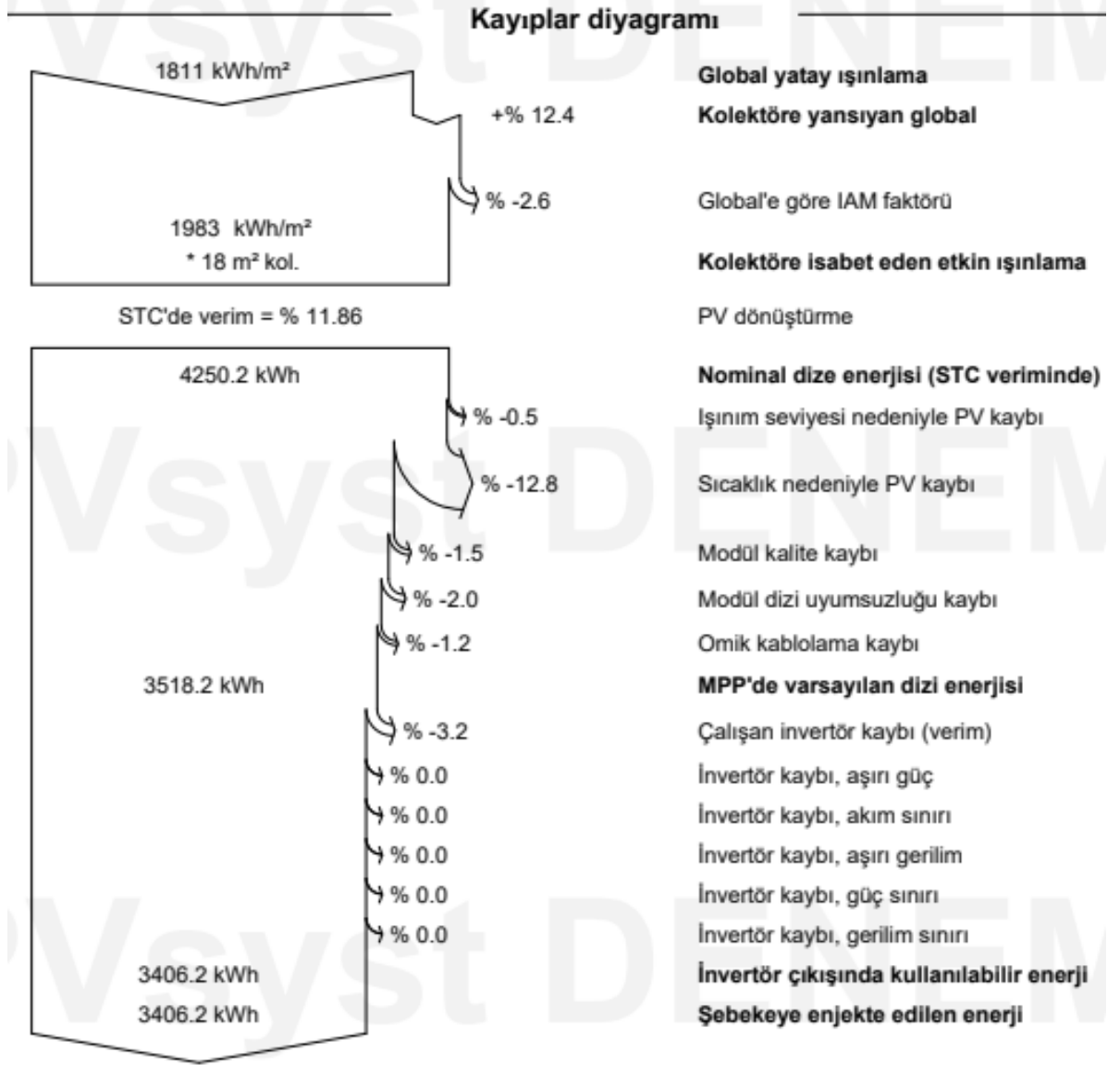
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
OCAK	67,0	84,0	83,7	95,6	88,8	84,9	90,0	111,0	82,3	103,6	60,7
ŞUBAT	129,8	82,9	118,3	108,4	100,9	112,6	91,9	129,0	130,1	77,6	115,0
MART	141,4	131,4	154,3	138,7	127,2	126,3	126,5	154,8	122,9	116,3	147,4
NİSAN	180,5	195,6	203,9	190,1	205,9	157,0	178,7	202,1	195,9	172,7	162,5
MAYIS	201,4	220,2	205,3	210,1	203,1	226,6	213,9	237,9	216,3	218,8	217,5
HAZİRAN	222,6	222,9	226,0	227,5	232,4	227,7	233,3	246,5	233,9	237,3	241,7
TEMMUZ	232,1	243,7	240,0	244,5	246,4	249,6	233,4	245,8	251,5	243,3	244,6
AĞUSTOS	219,3	241,7	220,6	237,7	223,1	241,3	237,8	231,4	241,4	237,1	244,7
EYLÜL	186,0	194,8	205,9	199,9	206,2	220,0	205,5	223,0	217,1	211,2	211,4
EKİM	145,6	143,1	181,2	165,0	165,3	180,3	190,1	182,6	163,6	158,2	189,3
KASIM	95,5	138,1	143,1	122,1	131,6	149,1	108,2	114,0	96,3	133,0	121,4
ARALIK	54,5	130,1	78,6	76,7	54,1	65,4	85,7	86,1	87,0	107,0	78,9

4.2. Benzeşim Analizleri

Çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş 2,145 kWp lik güce sahip sistemimizin yıllara göre üretebileceği toplam güç değeri PVsyst 8.0 paket yazılım programı ile hesaplanmıştır. Bunun için yazılım arayüzeyinde sistemimizi meydana getiren çok kristalli silisyum modüllerimizin teknolojik verilerini barındıran Sunset PX 195-50 kodlu teknik değeri aktarılmıştır. Aynı biçimde sistemde var olan DC/AC eviricimiz SunString 5000'in teknik verileri de yazılım da tanıtılmıştır. Sistemde olduğu gibi yazılım içerisinde tasarım aynı şekilde gerçekleştirilmiş olup 11 adet çok kristalli silisyum modüller seri halde birbirine bağlanmıştır. Piranometre ve sıcaklık sensörü yardımıyla 2014 ile 2024 yılları arasında ölçölmüş güneş ışıını şiddeti ve sıcaklık değeri ortalama aylık olarak yazılıma aktarılmıştır. Yine dikkat ettiğimiz noktalardan bir tanesi de modöl eğimlerini 25° olarak sabitlemek olmuştur. Bu şekilde PVsyst 8.0 paket yazılımı ile sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında üretebileceği toplam enerji değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan değeri incelendiğinde sistemimizin beklenen üretebileceği yıllık toplam enerji değeri 3159,1 kWh ile 3625,3 kWh arasındadır.



Şekil 4.1. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş güneş ışınlam ve ortam sıcaklığı değerleri referans alınarak PVsyst 8.0 paket yazılımı ile sistemimizin benzeşim yoluyla hesaplanmış yıllık toplam enerji değerleri



Şekil 4.2. Benzeşim yoluyla PVsyst 8.0 paket yazılımı ile gerçekleştirilerek hesaplanmış sistemimizin 2024 yılına ait sistemimizin enerji kayıpları

Şekil 4.1'deki grafikte yer alan enerji değerleri PVsyst 8.0 paket yazılımı tarafından analizi gerçekleştirirken kayıp faktörleri ilave edilerek hesaplanmıştır. Şekil 4.2'den de görüleceği üzere sistemimizin 2024 yılına ait hesaplamalarda enerji kayıpları:

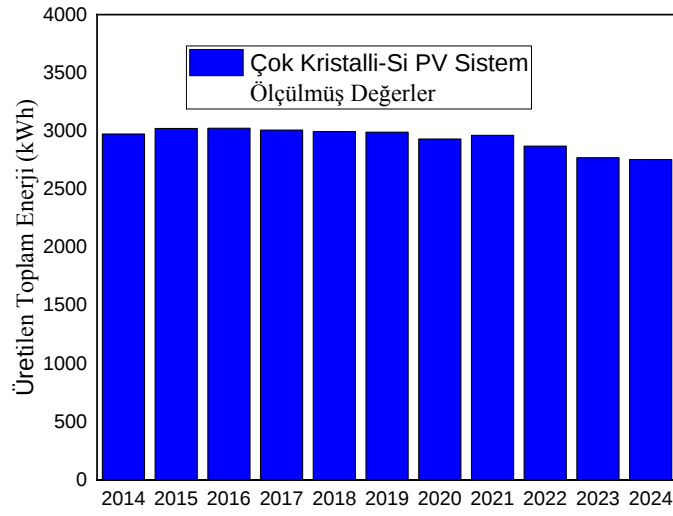
- ✓ % -2,6 yatay ışınlama göre IAM faktörü
- ✓ % -0,5 ışınlım seviyesi sebebiyle fotovoltaiik kayıp
- ✓ % -12,8 sıcaklık sebebiyle fotovoltaiik kayıp
- ✓ % -1,5 modül kalite kaybı
- ✓ % -2,0 modül dizi uyumsuzluğu kaybı

- ✓ % -1,2 omik kablolama kaybı
- ✓ % -3,2 çalışan evirici kaybı (verim)

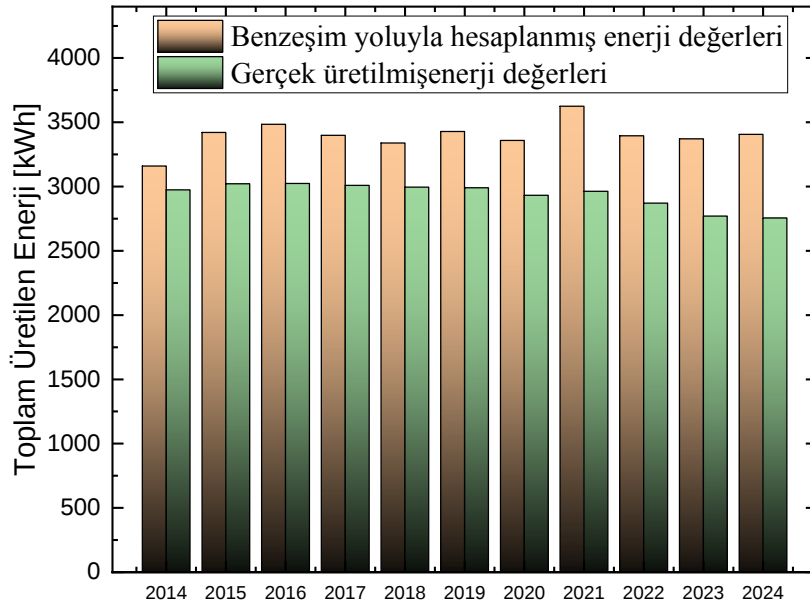
şeklindedir. Şekil 4.2’de de görüleceği üzere 2024 yılında sistemimizin üretmesi gereken toplam enerji değeri 4250,2 kWh olması gerekirken; yaklaşık % 24 gibi kayıplar da ilave edilerek 3406,2 kWh olarak hesaplanmıştır. 840 kWh toplam enerji değeri kayba uğraması gerekmektedir.

4.3. Üretim Sonuçları

Çok kristalli silisyum modüllerden oluşan 2,145 kWp güce sahip PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş yıllık toplam enerji üretim değerleri şekil 4.3’te gösterilmektedir. Grafikten de görüleceği gibi 2024 ile 2024 yılları arasındaki üretilen yıllık toplam enerji değerleri 2754.74 kWh ile 3023,48 kWh arasında değişmektedir. Sistemimiz 11 yıllık süre zarfında toplam 32301 kWh enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Sistemimizin hesaplanmış benzeşim değerleri ve ürettiği toplam enerji değerleri birlikte şekil 4.4’te görülmektedir. Şekil 4.4 dikkatlice incelenirse, yıllık simüle edilmiş ve ölçülmüş gerçek güç değerleri arasında fark vardır. Bunun nedeni simüle edilmiş değerleri ilave olarak daha fazla kayıpların yaşanmasıdır. Örneğin sistemimizde kullanılan kablo uzunlukların fazla olması, belli günlerde modül yüzeylerin kirli olması ve ortam gölgelemelerinin farklı olması gibi etmenleri sıralayabiliriz. Dikkat çeken önemli bir diğer husus ise son yıllarda aradaki farkın belirli bir şekilde artmasıdır. Bunun nedeni de belli süre geçtikçe modülümüz yaşlanmaktadır. Yazılım ile gerçekleştirilen işlemlerde bu husus dikkate alınmamaktadır.



Şekil 4.3. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş çok kristalli-Si PV sistemimizin ürettiği toplam enerji değerleri



Şekil 4.4. Batman ili merkezinde 2014 ile 2024 yılları arasında 2,145 kWp güce sahip çok kristalli-Si modül teknolojisi ile oluşan sistemimizin benzeşim yoluyla hesaplanmış ve gerçekte üretilen enerji değerleri

4.4. Performans Analiz

Fotovoltaik sistemlerde kurulum öncesi sistemin performans değerlendirme analizi yapılması önemlidir. Buna göre bir sistemin ayda ürettiği enerji fonksiyonu;

$$E_{AC,m} = \int_0^{t_s} P_{AC} \cdot dt, \quad (4.1)$$

şeklinde verilir. İfade de dt zamanı, P_{AC} sistemimizin alternatif güç değerini ve t_s entegrasyon süresini vermektedir. Sistemdeki anlık sistem verimliliği ($n_{syst,inst}$) analiz değerlendirmesinde önemli bir parametredir. Sistemde yer alan modüllerin boyutuna göre bir metrekaarelik alan için güç dönüşüm verimi, alternatif güç (P_{AC}) ve güneş ışıyım şiddeti (G_{opt})

$$n_{syst,inst} = \frac{P_{AC,inst}}{S \times G_{opt}} (\%), \quad (4.2)$$

ile ifade edilir. Buradaki eviricimizin çıkış gücü $P_{AC,inst}$, S çok kristalli silisyum modül dizilerinin alanını (m^2) ve anlık güneş ışıyım şiddeti değeri (W/m^2) olarak G_{opt} ile ifade edilmektedir. Yine sistemimizin verimini aylık için modül yüzey oranına yansıyan güneş ışıyımına göre üretilen enerji durumuna göre de ifade edebiliriz.

$$n_{syst,m} = \frac{E_{AC,m}}{S \times G_{opt,m}} (\%), \quad (4.3)$$

Sistemimizin şebekeye aktardığı aylık güç miktarı $E_{AC,m}$ ve modül yüzeyine yansıyan aylık güneş ışıyım şiddeti değeri de (kWh/m^2) olarak $G_{opt,m}$ ile belirtilmektedir.

Şebeke bağlantılı PV sistemimiz için Y_R (reference yield), örgü yüzeyinin normalize edilmiş birim alanına düşen ışıyım enerjisinin G_{opt} (kWh/m^2), standart test koşulları altında örgü yüzeyinin tanımlı olan birim alandaki ışıyımına G_{STC} (W/m^2) normalize edilmesi olarak tanımlanır (Kymakis ve ark., 2009):

$$Y_R = \frac{G_{opt}}{G_{STC}}, \quad (4.4)$$

Burada Y_R (reference yield) birimi “ kWh/kWp ” dir. PV sistemimizin normalize edilmiş enerji üretimi Y_f ise, sistem çıktı enerjisinin evirici ile alternatif enerjiye dönüşümünden elde edilen enerji değerin E_{AC} , standart test koşulları altında verilen PV örgülerin kurulu güç değerine P_{STC} normalize edilmesi ile hesaplanır (Theristis ve ark., 2008):

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_{STC}}, \quad (4.5)$$

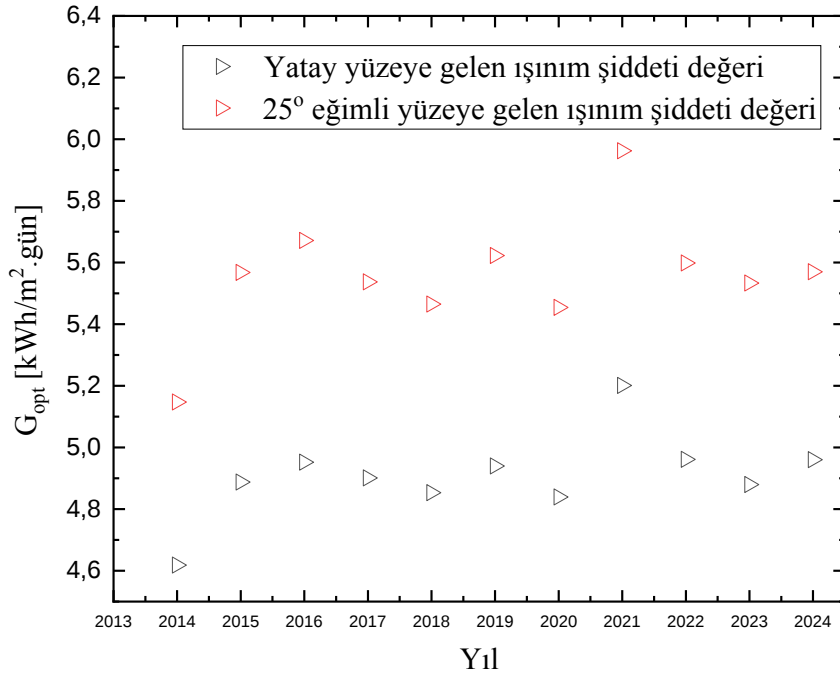
Buradaki Y_f birimi ise yine “ kWh /kWp ” dir. Sistem performans oranı PR ise normalize olmuş sistem enerji üretiminin, normalize olmuş PV örgü yüzeyi üzerine düşen güneş ışıyım enerjisine oranı olarak ifade edilir PR (Kymakes ve ark., 2009; Ayompe ve ark., 2011; Adaramola ve Vagnes, 2015; ; Theristis ve ark., 2018);

$$PR = \frac{Y_f}{Y_R} (\%) , \quad (4.6)$$

ile ifade edilir.

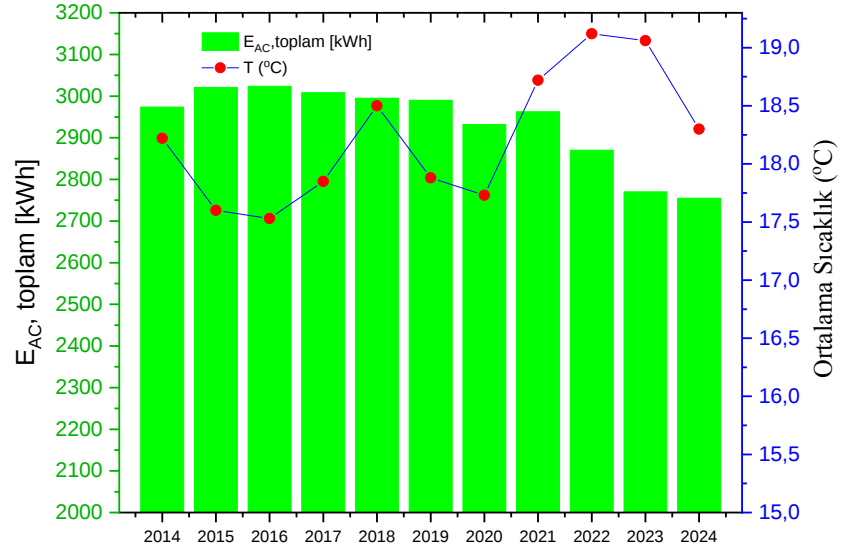
Batman ili merkezinde kurulu çok kristalli silisyum modüllerden oluşan 2,145 kWp güç değerine sahip PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasındaki sistem performansını değerlendirmek için ölçüm verileri kullanılarak bazı parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler; sistemin ürettiği toplam enerji E_{AC} , ay ve yıl bazında sistem verimliliği $n_{sys,m} - n_{sys,y}$, IEC 61724:1998 standartlarında ifade edilen kapasite faktörü CF ve sistemin performans oranı PR vs.

Yıl bazında günlük yatay ve eğimli yüzeye gelen güneş ışıyım şiddeti değerleri şekil 4.5’te verilmektedir. 2014 ile 2024 yılları arasında piranometre ile günlük ölçülmüş yatay yüzeye gelen toplam ışıyım şiddeti değerleri 4,61-5,20 kWh/m².gün arasında, 25° eğim için hesaplanan toplam ışıyım şiddeti değerleri de ile 5,14-5,96 kWh/m².gün arasındadır.

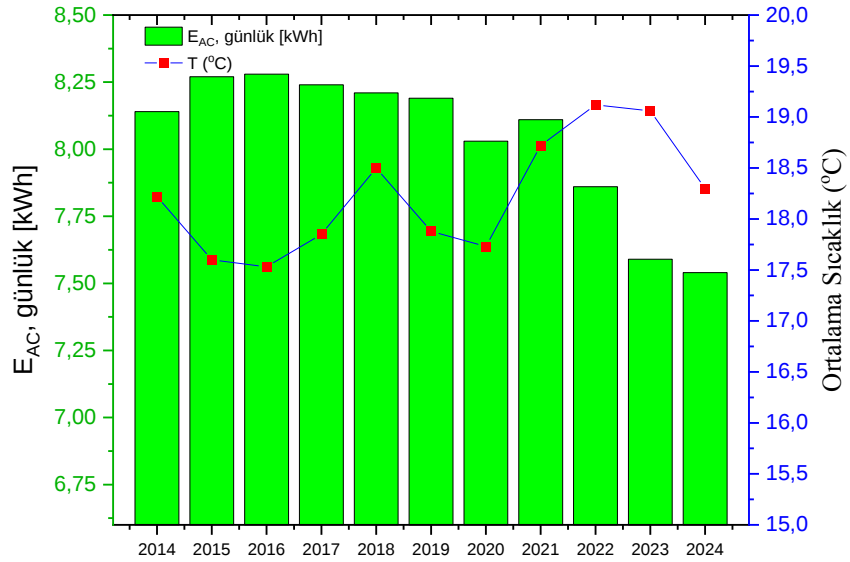


Şekil 4.5. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülmüş günlük yatay ve eğimli yüzeye (25°) hesaplanmış ışıınım şiddeti değeri

Sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında evirici çıkışında ölçülmüş aylık toplam güç değeri ve çevre ortalama günlük sıcaklık değeri şekil 4.6'ta verilmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 2014 ile 2021 yılları arasında Batman ili merkezinde ortalama günlük sıcaklık değeri düşük değerde iken, çok kristalli PV sistemimizin ürettiği toplam güç miktarı da yaklaşık 3 MWh düzeydedir. Fakat sistem kurulumu 9-10 yıl sonrası üretimde düşüş görülmekte olup, modüllerimizde yaşlanmaya tabi olarak verimlilik düşmesi gerçekleşmiştir. Yine dikkat çeken bir nokta Batman ili merkezinde ortalama sıcaklık değeri yükseliş görülmektedir.

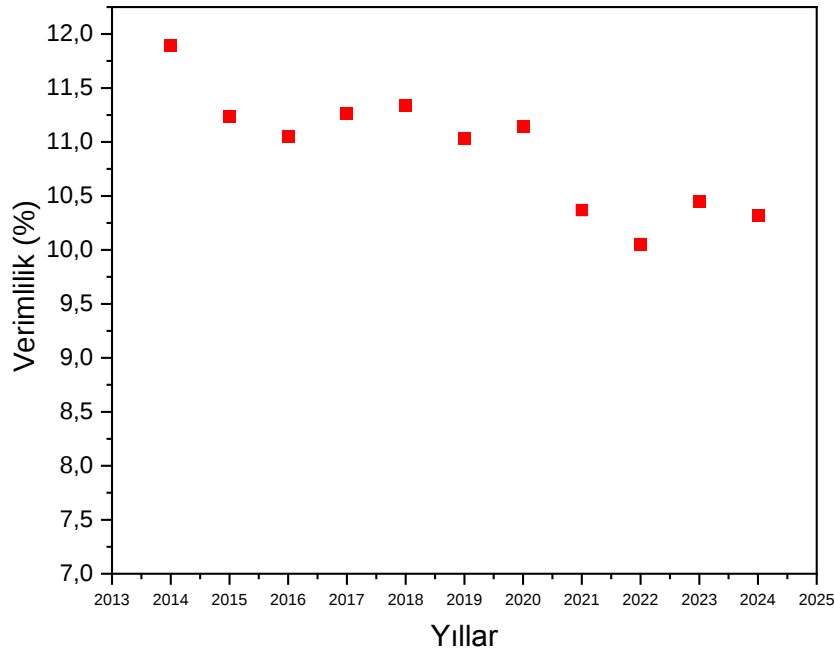


Şekil 4.6. Batman ili merkezinde çok kristalli Si modüllerinden oluşmuş 2,145 kWp güce sahip PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında üretilen yıllık toplam güç miktarı ve ortalama günlük sıcaklık değerleri



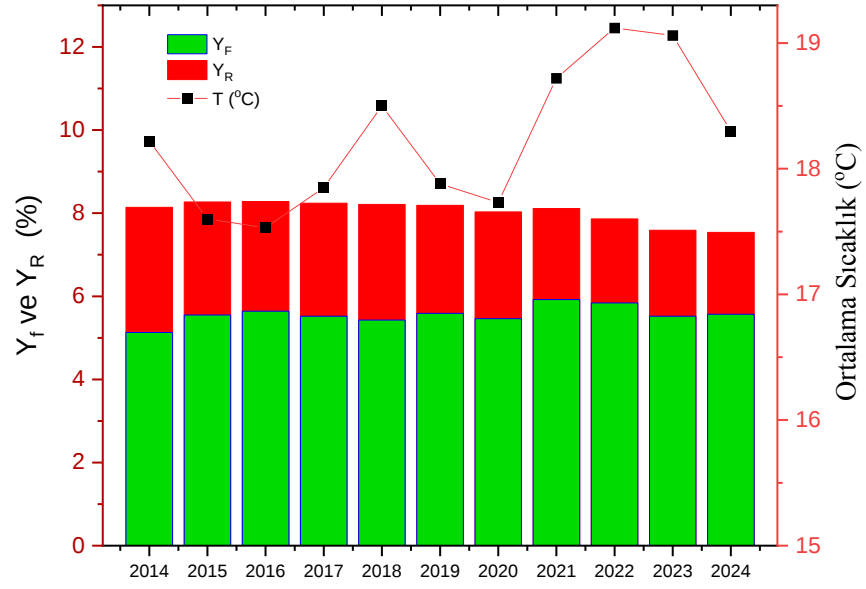
Şekil 4.7. Batman ili merkezinde çok kristalli Si modüllerinden oluşmuş 2,145 kWp güce sahip PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında üretilen günlük toplam güç ve ortalama günlük sıcaklık değerleri

Çok kristalli Si PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arasında aylık ürettiği toplam güç değerleri ve denklem (4.3) yardımıyla sistem verimlilik oranları hesaplanmış ve yıllara göre şekil 4.8’te verilmiştir. Çok kristalli Si modüllerimizin teknik verimlilik değeri % 13,28 dir, fakat şekil 4.8’te görüldüğü gibi verimlilik oranları %10,05-11,90 arasında değişmektedir.

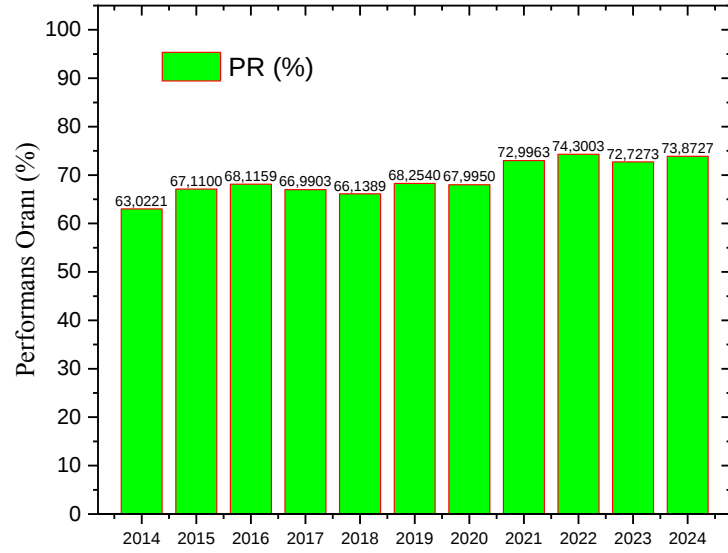


Şekil 4.8. Batman ili merkezinde çok kristalli Si modüllerden oluşan 2,145 kWp güce PV sistemimizin yıllara göre verimlilik oranları (%)

Şekil 4.8’de görüleceği gibi sistemimizin kurulumunun gerçekleştiği 2012 yılından sonra 9. yılında verimlilik oranlarında düşme yaşanmıştır. Yine şekil 4.9’ta analizlenmiş Y_f ve Y_R değerleri görülmektedir. Bu analizler yardımıyla çok kristalli Si modüllerden oluşmuş PV sistemimizin 2014 ile 2024 yılları arası performans oran değerlendirmeleri şekil 4.10’da görülmektedir.



Şekil 4.9. Yıllara göre çok kristalli Si PV sistemimizin analizlenmiş Y_f ve Y_R değerleri



Şekil 4.10. PV sistemin 2014-2024 yılları arasındaki performans oranları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Batman ili merkezinde kurulu çok kristalli silisyum modüllerden oluşmuş 2,145 kWp güce sahip fotovoltaik (PV) sistemin 2014 ile 2024 yılları arasında sistemin aylık toplam güç üretim değerleri kıyaslanarak sistem performansı değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

PV sistemin performans analizlerini değerlendirmek için öncelikle Batman ili merkezinde günlük anlık olarak piranometre yardımıyla yatay düzleme gelen güneş ışıını şiddeti değerleri ve sıcaklık sensörü yardımıyla da ortam sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Ölçülmüş olan güneş ışıını değerleri kurulu sistemde yer alan modüllerin eğim açısı olan 25 ° ye göre düzenlenmiştir. 2014 ile 2024 yılları arasında ölçülen günlük yatay yüzeye gelen toplam ışıını değerleri 4,61-5,20 kWh/m².gün; hesaplanan 25° eğimli yüzeye gelen toplam ışıını değerleri de 5,11-5,92 kWh/m².gün arası olarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış güneş ışıını değerleri ve kurulu PV sistemde kullanılan Sunset PX 195-50 kodlu modül ile Sunstring 5000 evirici teknik değerleri PvSyst 8.0 paket yazılım programına tanıtılmıştır. Kurulu sistemdeki modüllerin bağlantısı olan 11 adet modül birbiri ile seri bağlanmıştır. Paket yazılım programı 2014 ile 2024 yılları arasındaki 11 yıllık değerler göz önüne alınarak çalıştırılmış ve sistemin üretebileceği aylık toplam üretim güç değerleri benzeşim yoluyla hesaplanmıştır. Paket yazılım tüm kayıp varyasyonlarını dikkate alarak sistemin üretebileceği toplam değerleri hesaplamıştır. Buna göre hesaplanan değerler % 24 ortalama kayıplar göz önünde bulundurularak 2014 ile 2024 yılları arasında beklenen üretebileceği yıllık toplam enerji değeri 3159,1 kWh ile 3625,3 kWh arasındadır.

2014 ile 2024 yılları arasında PV sistemimizin üretmiş olduğu yıllık toplam enerji değerleri 2754.74 kWh ile 3023,48 kWh arasında değişmektedir. Teorik olarak ve ölçülmüş değerler karşılaştırıldığında belli farklar görülmektedir. Teorik olarak ilave edilen kayıp oranlarının biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedenleri arasında, sistemin kurulu olduğu zemin ile evirici arasında 2 kat bulunmaktadır ve kablo uzunlukları artmaktadır. Diğer taraftan belli zamanlarda modül yüzeylerinin kirlenmesi ve ortamdaki gölgelenmelerin oluşması gibi nedenleri sıralayabiliriz. Yine sistemimiz 2012 yılı sonlarında kurulmuş ve 2024 yılı sonu itibari ile kurulumdan 12 yıl geçmiş olup,

modüllerimizin kurulumundan itibaren 10 yılı aşmış ve modüllerimiz yaşlanmaya başlamıştır. Çalışmalar, dış ortam koşullarında farklı üreticilerin PV modüllerinin IEC standartlarında belirtilen %0,8/yıl oranından daha hızlı bozulduğunu göstermektedir (Jordan ve Kurtz, 2013). Sastry ve arkadaşları (Sastry ve ark., 2010), PV modül performansındaki bozulmanın beklenen seviyenin üzerinde olduğunu ve birkaç sertifikalı üreticinin PV modüllerinin gerçek saha koşullarında standart seviyenin üzerinde bozulma gösterdiğini bildirmiştir. Bir başka çalışmada Tamizh-Mani ve Kuitche, sıcak ve kuru iklimde 12-13 yıllık modüllerin, üreticiye bağlı olarak %0,6-2,5 oranında bozulma gösterdiğini bildirmiştir (Tamizh-Mani ve Kuitche, 2013). Theristis ve arkadaşları, 7 farklı üreticinin 13 modelinden oluşan 834 PV modülünün 5 yıldan fazla bir süre boyunca üç farklı iklim koşulunda çalıştırılması sonucu ortaya çıkan performans düşüşünü analiz etmiş ve ortalama güç düşüş oranının %0,62/yıl olduğunu, sistemlerin %26,1'inde ise bu oranın garanti sınırı olan %0,8/yıl'ın üzerinde olduğunu bildirmiştir (Theristis ve ark., 2023). Ndiaye ve arkadaşları, Senegal'in Dakar kentindeki tropikal ortamda 16-48 ay boyunca çalıştırılan 4 farklı üreticinin kristalli PV modülünün performans düşüşünü değerlendirmiş ve üreticiye bağlı olarak %0,22-2,96/yıl arasında güç düşüş oranları bildirmiştir (Ndiaye ve ark., 2014). Sonuç olarak PV sistemimizden ölçülen güç değerleri dikkate alınırsa son yıllarda düşüş olduğu görülmekte olup modüllerimizdeki yaşlanma ile açıklanabilir. Sıcaklık, ışıınım ve teknik değerler dikkate alınırsa modüllerin yaşlanmasıyla bozulmanın olduğu görülecektir.

Benzeşim ve kurulu PV sistemin çıktı raporları dikkate alınarak 2014 ile 2024 yılları arasındaki sistemin performansı değerlendirilmiş ve PV sistemin aylık ve yıllık sistem verimliliği $n_{sys,m} - n_{sys,y}$, üretilen toplam enerji E_{AC} ve performans oranı PR gibi etkenler de analiz edilmiştir. Sistemimiz tarafından 2014 ile 2024 yılları arasında üretilen çıktı değerleri dikkate alınarak sistem verimliliği hesaplanmıştır. Çok kristalli Si modüllerimizin teknik verimlilik değeri % 13,28 dir, fakat hesaplanan verimlilik oranları %10,05-11,90 arasında değişmektedir. Sistemimizin son 4 yıldaki verimliliğinde düşmeler görülmektedir. Yukarı da da değindiğimiz gibi modüllerde yaşlanmaya bağlı bozulmaların başladığı görülmektedir. Analizlere ilave Y_f ve Y_R değerleri de hesaplanmıştır.

2014 ile 2024 yılları arasında alınan sonuçlar dikkate alınarak şu değerlendirmeleri yapabiliriz:

- Çalışmamızın değerlendirmesi sistem seviyesinde kalmaktadır. Daha kapsamlı bir analiz için sistemdeki her bir bileşen için genel performans üzerindeki etkisi incelenerek analizlenmesi faydalı olacaktır.
- Çalışmamızda modül üzerindeki sıcaklıklar dahil edilmemiştir. Şayet modül sıcaklıkları da dikkate alınarak analizleme yapılması, modüller üzerindeki verim düşümlerine etkisini yorumlama da fayda sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Adaramola, M. S., & Vågnes, E. E. T. (2015). Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. **Energy Conversion and Management*, 90*, 458–465. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.009>
- Alami, A. H., Alasad, S., Aljaghoub, H., Ayoub, M., Alashkar, A., Mdallal, A., & Hasan, R. (2023). Silicon feedstock and ultra-refinement. In **Advances in science, technology and innovation** (Vol. Part F663, pp. 21–32). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37108-4_3
- Arya, S., & Mahajan, P. (2023). **Solar cells: Types and applications**. Springer.
- Ayompe, L. M., Duffy, A., McCormack, S. J., & Conlon, M. (2011). Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. **Energy Conversion and Management*, 52*(2), 816–825. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.038>
- Baghel, N. S., & Chander, N. (2022). Performance comparison of mono and polycrystalline silicon solar photovoltaic modules under tropical wet and dry climatic conditions in east-central India. **Clean Energy*, 6*(1), 165–177. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac004>
- Bergesen, J. D., Heath, G. A., Gibon, T., & Suh, S. (2014). Thin-film photovoltaic power generation offers decreasing greenhouse gas emissions and increasing environmental co-benefits in the long term. **Environmental Science & Technology*, 48*(16), 9834–9843. <https://doi.org/10.1021/es500731y>
- Chadly, A., Moawad, K., Salah, K., Omar, M., & Mayyas, A. (2024). State of global solar energy market: Overview, China’s role, challenges, and opportunities. **Sustainable Horizons*, 11*, 100108. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2024.100108>
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. **Journal of Applied Physics*, 25*(5), 676–677. <https://doi.org/10.1063/1.1721711>
- Cheng, M., Zuo, C., Wu, Y., Li, Z., Xu, B., Hua, Y., & Ding, L. (2020). Charge-transport layer engineering in perovskite solar cells. **Science Bulletin*, 65*(15), 1237–1241. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.008>
- Creutzig, F., Hilaire, J., Nemet, G., Müller-Hansen, F., & Minx, J. C. (2023). Technological innovation enables low cost climate change mitigation. **Energy Research & Social Science*, 105*, 103276. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103276>

- Dale, P. J., & Scarpulla, M. A. (2023). Efficiency versus effort: A better way to compare best photovoltaic research cell efficiencies? **Solar Energy Materials and Solar Cells*, 251*, 112097. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112097>
- Day, J., Senthilarasu, S., & Mallick, T. K. (2019). Improving spectral modification for applications in solar cells: A review. **Renewable Energy*, 132*, 186–205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.104>
- Fonash, S. J. (2012). **Solar cell device physics** (2nd ed.). Elsevier.
- Giuliano, G., Bonasera, A., Arrabito, G., & Pignataro, B. (2021). Semitransparent perovskite solar cells for building integration and tandem photovoltaics: Design strategies and challenges. **Solar RRL*, 5*(12), 2100702. <https://doi.org/10.1002/solr.202100702>
- Honsberg, C. B., & Bowden, S. G. (2019). **Photovoltaics education website**. <https://www.pveducation.org>
- Hu, Q., Wu, J., Jiang, C., Liu, T., Que, X., Zhu, R., & Gong, Q. (2014). Engineering of electron-selective contact for perovskite solar cells with efficiency exceeding 15%. **ACS Nano*, 8*(10), 10161–10167. <https://doi.org/10.1021/nm5036476>
- International Renewable Energy Agency. (2025). **Renewable power generation costs in 2025**. <https://www.irena.org>
- Ji, Y., Xu, L., Hao, X., & Gao, K. (2020). Energy loss in organic solar cells: Mechanisms, strategies, and prospects. **Solar RRL*, 4*(7), 2000130. <https://doi.org/10.1002/solr.202000130>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—An analytical review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21*(1), 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Kant, N., & Singh, P. (2022). Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. **Materials Today: Proceedings*, 56*, 3460–3470. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.260>
- Kibria, M. T., Ahammed, A., Saad, M., Sony, F., & Hossain, S. U. I. (n.d.). A review: Comparative studies on different generation solar cells technology. Retrieved October 9, 2023, from <http://www.altenergy.org/renewables/solar.html>
- Kim, H. S., Im, S. H., & Park, N. G. (2014). Organolead halide perovskite: New horizons in solar cell research. **The Journal of Physical Chemistry C*, 118*(11), 5615–5625. <https://doi.org/10.1021/jp501455p>
- Kymakis, E., Kalykakis, S., & Papazoglou, T. M. (2009). Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. **Energy Conversion and Management*, 50*(3), 433–438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.036>

- Li, W., Zheng, J., Hu, B., Fu, H. C., Hu, M., Veyssal, A., Zhao, Y., He, J. H., Liu, T. L., Ho-Baillie, A., & Jin, S. (2020). High-performance solar flow battery powered by a perovskite/silicon tandem solar cell. **Nature Materials*, 19*(12), 1326–1331. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0752-6>
- Mazzarella, L., Lin, Y. H., Kirner, S., Morales-Vilches, A. B., Korte, L., Albrecht, S., Crossland, E., Stannowski, B., Case, C., Snaith, H. J., & Schlattmann, R. (2019). Infrared light management using a nanocrystalline silicon oxide interlayer in monolithic perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells with efficiency above 25%. **Advanced Energy Materials*, 9*(14), 1803241. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803241>
- Mulvaney, D. (2019). **Solar power: Innovation, sustainability, and environmental justice**. University of California Press.
- Ndiaye, A., Kébé, C. M. F., Charki, A., Ndiaye, P. A., Sambou, V., & Kobi, A. (2014). Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment. **Solar Energy*, 103*, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.025>
- Neville, R. C. (1995). **Solar energy conversion: The solar cell**. Elsevier.
- Oteng, D., Zuo, J., & Sharifi, E. (2021). A scientometric review of trends in solar photovoltaic waste management research. **Solar Energy*, 224*, 545–562. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.075>
- Paul, K. K., Kim, J. H., & Lee, Y. H. (2021). Hot carrier photovoltaics in van der Waals heterostructures. **Nature Reviews Physics*, 3*(3), 178–192. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00258-1>
- Peng, M., & Zou, D. (2015). Flexible fiber/wire-shaped solar cells in progress: Properties, materials, and designs. **Journal of Materials Chemistry A*, 3*(41), 20435–20458. <https://doi.org/10.1039/C5TA05009B>
- Peter Amalathas, A., & Alkaisi, M. M. (2019). Nanostructures for light trapping in thin film solar cells. **Micromachines*, 10*(9), 619. <https://doi.org/10.3390/mi10090619>
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. **Solar Energy*, 85*(8), 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- Sahu, B. K. (2015). A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43*, 621–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.061>
- Sastry, O. S., Saurabh, S., Shil, S. K., Pant, P. C., Kumar, R., Kumar, A., et al. (2010). Performance analysis of field exposed single crystalline silicon modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94*(9), 1463–1468. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.025>

- Slade, A., & Garboushian, V. (2005). 27.6% efficient silicon concentrator solar cells for mass production. Retrieved October 23, 2023, from <https://www.researchgate.net/publication/267779112>
- Solar-IEA. (2023). *Solar PV*. Retrieved October 9, 2023, from <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- Soonmin, H., Nandi, P., Mwankemwa, B. S., Malevu, T. D., & Malik, M. I. (2023). Overview on different types of solar cells: An update. **Applied Sciences, 13*(4), 2051*. <https://doi.org/10.3390/app13042051>
- Stranks, S. D., Eperon, G. E., Grancini, G., Menelaou, C., Alcocer, M. J. P., Leijtens, T., et al. (2013). Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 μm in an organometal trihalide perovskite absorber. **Science, 342*(6156), 341–344*. <https://doi.org/10.1126/science.1243982>
- Tamizh-Mani, M. G., & Kuitche, J. (2013). Failure and degradation modes of PV modules in a hot dry climate: Results after 12 to 26 years of field exposure. **PV Module Reliability Workshop**, Golden, Colorado.
- Theristis, M., Stein, J. S., Deline, C., Jordan, D., Robinson, C., Sekulic, W., et al. (2023). Onymous early-life performance degradation analysis of recent photovoltaic module technologies. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 31*(2), 149–160*. <https://doi.org/10.1002/pip.3621>
- Theristis, M., Venizelou, V., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2018). Chapter II-1-B - Energy yield in photovoltaic systems. In S. A. Kalogirou (Ed.), **McEvoy's Handbook of Photovoltaics** (3rd ed., pp. 671–713). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00014-5>
- Wang, Y., He, J., & Chen, W. (2021). Distributed solar photovoltaic development potential and a roadmap at the city level in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141**, 110772. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110772>