

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FTALOSİYANİN TABANLI MALZEMELER İLE BOYA
DUYARLI GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİM VE
KARAKTERİZASYONU

YUNUS YAVUZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FTALOSİYANİN TABANLI MALZEMELER
İLE BOYA DUYARLI GÜNEŞ HÜCRESİ
ÜRETİM VE KARAKTERİZASYONU

YUNUS YAVUZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF.DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE
2018

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

FABRICATION AND
CHARACTERIZATION OF DYE
SENSITIZED SOLAR CELLS BASED ON
PHTHALOCYANINE

YUNUS YAVUZ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE
2018

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 10/01/2018 tarih ve 2018/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/01/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Yunus Yavuz'un tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. SAVAŞ BERBER

ÜYE

: PROF. DR. AYŞEGÜL GÜREK

ÜYE

: YRD. DOÇ. DR. SADULLAH ÖZTÜRK

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez kapsamında, güneşi absorbe edici katman olarak ftalosiyanin kullanılan Boya Duyarlı Güneş Hücreleri üretilmiş ve sonuçları gözlenmiştir. Diğer güneş hücresi türleri ile rekabet edebilecek kadar yüksek verim değerleri sağlayabilen kimyasallar bulunmasına karşın, kolay sentezlenebilirliği, düşük maliyetleri ve geliştirilebilirliğe açık olması sebebi ile bu çalışmada, duyarlaştırıcı katman olarak ftalosiyanin tercih edilmiştir.

Çinko ftalosiyaninler üzerinde yapılan son yıllarda yeniden alevlendi ve tezimiz kapsamında ilk defa sentezlenen birçok ftalosiyanin türevinin literatürlerce kabul gören fabrikasyon yöntemleri ile üretilmiş hücrelerdeki verimi gözlemlendi. İlk bölümlerde yenilenebilir enerji çeşitleri ve uygulanma yöntemlerini içeren bilgilere ulaşabilirsiniz.

Çalışmalarımız Boya duyarlı güneş hücresi üzerine olduğu için, ilerleyen bölümlerde güneşten enerji eldesi yöntemleri irdelenmiş ve daha sornası boya duyarlı güneş hücreleri üzerine yoğunlaşmıştır. Boyar malzeme ve özellikleri ile ilgili daha detaylı bilgileri içeren ilerleyen bölümlerde, TiO_2 katmanının kalınlığının ve hücrelerin boya içerisinde bekletilme sürelerinin hücre verimine etkisinden de bahsedilmektedir. Boya duyarlı güneş hücrelerinde, verimi belirlemede en önemli basamak hücre fabrikasyon yöntemleri olduğu için, her üretim basamağı ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Boya Duyarlı Güneş Hücresi, Ftalosiyanin, Fotovoltaik, Güneş Hücresi.

SUMMARY

This master thesis based on application of Phthalocyanine derivatives as the sensitizing component of Dye sensitized solar cells (DSSCs). There are several chemical types, those have comparable efficiency values with other fabrication methods, however sub materials of those chemicals are so expensive or hard to find in nature. Phthalocyanine layered DSSCs are promising a valid alternative to using Ruthenium complexes included DSSCs, taking into account the cost in market and easy to synthesis.

Interest in Zinc Phthalocyanine DSSCs has risen in past 5 years and the studies in this thesis begins by synthesis of several type of Phthalocyanines and then represents fabrication methods and results.

In the first chapters, you will find basic informations and application diagrams about renewable energy sources. Since researches based on DSSC, following chapters presents deeply investigations about Solar Cell types and finally, Dye Sensitized Solar Cells. A more identified studies of the dye and its properties will be shown, including assessing of TiO_2 films thickness and dipping time into the dye, on DSSCs performance. Due to most common issues of DSSCs are fabrication methods; all production steps, layer coating methods, used materials are identified cautiously.

Key Words: DSSC, Phthalocyanine, Photovoltaic, Solar cell.

TEŞEKKÜRLER

Hem ders hem tez aşamasında benden destek, ilgi ve alakalarını bir an olsun eksik etmeyen danışmanlarım Sait Eren San’a, Savaş Berber’e ve kıymetli hocam Ayşe Gül Gürek’e,

Yüksek lisans çalışmalarımız vesilesi ile yollarımız kesişen, her zorluğa birlikte göğüs gerdiğim ve bana hayatı anlamlandıran ömür ortağım, ruhuma eş canıma canan kıymetlim Gülenay Tunç’a,

Hem karakterini hem de insanlığını kendime yıllar boyu rehber edindiğim değerli meslektaşım ve dayım sevgili Veysel hocama,

Tüm lisans ve yüksek lisans serüvenim boyunca her muhtaç olduğumda bana el uzatan kuzenim Ömür Akalın’a,

Son olarak, hayatım boyunca sevgi ve şefkatlerini esirgemeyen, yolumu aydınlatmaktan bir an olsun vazgeçmeyen, bir parçası olmaktan gurur duyduğum aileme, annem, babam ve kardeşime en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına verdiği maddi destekten dolayı Tübitak Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)’na (Proje no:114M488) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜRLER	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1.GİRİŞ	1
1.1. Yenilenebilir Enerjiye Neden İhtiyaç Duyuyoruz	1
1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	7
2. GÜNEŞ HÜCRELERİ	15
2.1. Güneş Hücresi Çeşitleri ve Uygulamaları	15
2.1.1 Amorf Silikonlu (A-Si) Güneş Hücreleri	16
2.1.2 Biohibrid Güneş Hücresi	17
2.1.3. Gömülü Kontakt Güneş Hücreleri	18
2.1.4. Kadmiyum Tellür Güneş Hücresi (CdTe)	20
2.1.5. Konsantre PV Hücresi (CVP ve HCVP)	21
2.1.6. Bakır İndiyum Galyum Selenit Güneş Hücreleri (CI (G) S)	23
2.1.7. Galyum Arsenik Germanyum Güneş Hücreleri (GaAs)	24
2.1.8. Hibrit Güneş Hücreleri	25
2.1.9. Lüminesans Güneş Hücresi (LSC)	26
2.1.10. a-Si/μc-Si Tabanlı Tandem Hücreler	27
2.1.11. Monokristal Güneş Hücresi (Mono-Si)	27
2.1.12. Multi-junction Güneş Hücresi (MJ)	28
2.1.13. Nanokristal Güneş Hücresi	30
2.1.14. Perovskite Güneş Hücreleri	31

2.1.15. Foto Elektrokimyasal Hücreler (PEC)	33
2.1.16. Polimer Güneş Hücreleri	34
2.1.17. Polikristal Güneş Hücresi (Multi-Si)	37
2.1.18. Quantum Dot Güneş Hücresi (CQD)	37
2.1.19. İnce Film Güneş Hücresi (TFSC)	39
2.1.20. Silikonlu Güneş Hücreleri	40
2.2. Boya Duyarlı Güneş Hücresi	42
2.2.1. DSSC'nin Avantajları	42
2.2.2. Temel Çalışma Prensibi	43
2.2.3. Uyarma	43
2.2.4. Enjeksiyon	44
2.2.5. TiO ₂ katman difüzyonu	44
2.2.6. İyot İndirgenmesi	45
2.2.7. DSSC'lerin Eşdeğer Devresi	45
3. LİTERATÜR ÖZETİ	47
3.1. Yarıiletkenler	47
3.1.1. Yüzey Yapısı	48
3.1.2. Yarı İletken Kalınlığı	49
3.1.3. Işık Saçılma Katmanı	49
3.1.4. Engelleme Katmanı	50
3.1.5. TiCl ₄ Katmanı	50
3.2. Boya	51
3.2.1. Yüksek verimli Fotosensitizer tasarımı	51
3.3. Elektrolit	52
3.4. Karşıt Elektrot	52
3.5. Alttaş	53
3.6. Işık Yoğunluğu ve Sıcaklık	53
4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	54
4.1.Güneş pili optimizasyon çalışmaları, DSSClerin üretimleri ve karakterizasyonları	54
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	68
5.1.DSSC üretimi için sentezlenen bileşiklerinin sentezi ve yapısal karakterizasyonları	68

5.2. DSSC'lerin Üretim ve Karakterizasyonu	69
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kısaltmalar

PV	: Fotovoltaik
CdTe	: Kadmiyum tellür
DSSC	: Dye-sensitized solar cell (Boya duyarlı güneş hücresi)
LUMO	: Lowest Unoccupied Molecular Orbital
HOMO	: Highest Occupied Molecular Orbital
CPV	: Konsantre Fotovoltaik
CIGS	: Bakır-İndiyum-Galyum-Selenit
TCO	: Şeffaf iletken oksit
OPV	: Organik Fotovoltaik
HRTEM	: High-Resolution Transmission Electron Microscopy
DMSO	: Dimetilsülfoksit
DCM	: Diklorometan
THF	: Tetrahidrofuran
RF	: Radyo Frekansı
IP	: İyonlaşma potansiyeli
SCE	: Doymuş kalomel elektrot
ITO	: Indium Tin oxide (İndiyum kalay oksit)
FTO	: Fluorine Doped Tin Oxide (Fluorin Doplulu Kalay oksit)
FF	: Fill Factor (Dolum faktörü)
I_{sc}	: Kısa devre akımı
V_{oc}	: Açık devre voltajı
N	: Verim
PN	: Fotonitril
UV-VIS	: Ultraviyole/Visible
FT-IR	: Fourier Transform Infrared
NMR	: Nükleer Magnetik Rezonans

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Fosil yakıtların çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri.	3
1.2: Başlıca hava kirliliği sebepleri.	4
1.3: Rüzgâr tribünü.	7
1.4: Atatürk barajı.	8
1.5: Aydınla yer alan pamukören jeotermal elektrik üretme tesisi.	9
1.6: Jeotermal enerji üretim tesisi çalışma diagramı.	9
1.7: Türkiye'nin ilk biyokütle enerji santrali.	10
1.8: Güneş yakıt eldesi.	11
1.9: Güneş enerjili ısıtma sistemi.	13
1.10: Parabolik aynalar yardımıyla enerji üreten termal güneş enerjisi	14
2.1: Amorf silikonlu güneş hücresi	17
2.2: Çok katmanlı biyohibrid güneş hücresi yapımı.	18
2.3: Gömülü kontakt güneş hücresi.	19
2.4: Konsantre PV hücresi (CVP ve HCVP).	22
2.5: CIGS güneş hücreleri yapısı.	23
2.6: Karbon nanotüp tabanlı güneş hücrelerinin yapısı.	26
2.7: Lüminesans güneş hücresi (LSC).	26
2.8: Monokristal güneş hücresi.	28
2.9: Multi-junction güneş hücresi (MJ).	29
2.10: Nonokristal güneş hücresi.	31
2.11: Perovskite güneş hücresi.	32
2.12: a) Fotoelektrokimyasal hücre b) İç yapısı.	34
2.13: Polimer güneş hücresi.	36
2.14: Solar paneller.	37
2.15: Quantum dots güneş hücresi.	39
2.16: İnce film güneş hücresi.	40
2.17: Siyah silikonun geleceği.	41
2.18: DSSC'lerin basit yapısı ve band diyagramı.	44
2. 19: DSSC'lerin eşdeğer devresi.	46
4.1: Güneş hücresi üretim basamakları 1-6.	54

4.2:	Güneş hücresi üretim basamakları 7-12.	55
4.3:	Üretilen hücrelerin şematik gösterimi.	56
4.4:	Keitley 4200 SCS karakterizasyon Cihazı.	58
4.5:	AY2 ile üretilen 5 farklı hücreye ait I-V grafiği	59
4.6:	AY2 ile üretilen 5 farklı hücreye ait I-V grafiği	59
4.7:	Güneş hücresi üretim basamakları 1-6.	60
4.8:	Güneş hücresi üretim basamakları 7-10.	61
4.9:	Güneş hücresi üretim basamakları 13-15.	62
4.10:	Hollanda da üretilen hücrelere ait I-V grafiği.	66
4.11:	Pc1a ile üretilen hücreye ait aydınlık ve karanlık ölçümler.	67
4.12:	DSSC üretimi için kullanılan ftalosiyeninler.	68
4. 13:	DSSC üretimi için kullanılan ftalosiyeninler.	69
4. 14:	Yüksek verime sahip hücrelere ait I-V grafiği.	70
4.15:	Üretilen diğer ftalosiyenlere ait I-V grafiği.	71

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Kullanılan iyonik sıvıların içerikleri.	57
4.2: Hollanda da Üretilen tüm hücrelere ait karakterizasyon tablosu.	65
5.1: Üretilen tüm hücrelere ait karakterizasyon tablosu.	70

1. GİRİŞ

Modern çağın teknolojik gelişmeleri karşısında, insanlığın devamı için “enerji” başlıca ihtiyaç kaynağı olmuştur. Hızla artan dünya popülasyonu, enerjiye olan bağlılığı da paralelinde arttırmıştır. Dünya genelindeki enerji sarfiyatı önümüzdeki 30 yıl içerisinde iki katına çıkması öngörülmektedir. Fosil yakıtların kısıtlı olması sebebi ile bu ihtiyacı karşılama noktasında yetersiz kalacağı aşıkardır. Nükleer kaynaklardan enerji üretimi her ne kadar büyük ölçekli elektrik üretim kapasitesine sahip olsa da güvenlik ve atık yönetimi konularında yetersizdir. Bu sebeplerden dolayı insanlık er ya da geç yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelecektir ve bu kuldardaki en önemli aday sonsuz kaynağı ile güneş enerjisinden elektrik üretimidir. Gezegenimizdeki diğer tüm temiz ve tükenmez enerji kaynakları arasında (örneğin güneş, rüzgâr, jeotermal enerjileri) güneş enerjisinin yeri oldukça önemlidir. Dünya yüzeyine yıllık ortalama gelen güneş ışını miktarı 3×10^{24} joule/yıl kadarlık bir enerjiye sahiptir ki bu miktar dünyadaki yıllık enerji tüketiminin 104 katına eşittir. Hazır elimizde hem temiz hem de sonsuz bir enerji kaynağı var iken, bu enerji kaynağından faydalanmak ve hayata entegrasyonunu sağlamak için pratik çalışmaların tasarlanması gerekmektedir.

1.1. Yenilenebilir Enerjiye Neden İhtiyaç Duyuyoruz

İnsanoğlu hayatını devam ettirebilmek için farklı enerji formlarına ve enerji kaynaklarına ihtiyaç duyar. Bir enerji kaynağının verimliliği;

- Birim kütlede veya hacimde sağlanan enerji miktarı,
- Elde edilirken karşılaşılan zorluklar,
- Elde edilen enerjinin dönüşüm,
- Depolanma ve aktarılma sırasındaki kayıplar
- Kaynağın sürekliliği ve habitatına etkileri

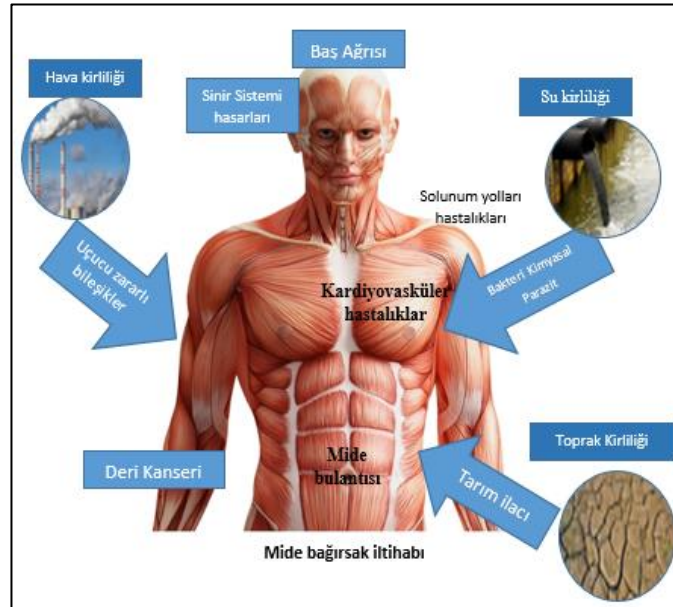
gibi bazı parametreler ile tayin edilebilir.

Enerji tüketiminin her geçen gün artışı, devletleri daha fazla enerji üretimine teşvik etmiştir. Ülkelerin enerji tüketimleri, iş hacmi ile doğru orantılıdır. Avrupada en yüksek enerji tüketimine sahip ülkelerin başında gelen Almanya'nın bu tüketimi endüstriyel gelişiminin bu denli fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Gelişmiş ülkeler son çeyrek asırdır çok yüksek oranlarda enerji tüketmektedir. Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkeler ise üretim-imalat hacminin fazla olmasından dolayı enerji sarfiyatını kısa zamanda 7 katına kadar çıkartmıştır. Ancak bilindiği üzere geleneksel enerji kaynaklarına dayalı üretim teknikleri hem çevreye zarar vermekte hem de tükenme riski bulunmaktadır. Yakın gelecekte temiz ve yenilenebilir/sürekliliği olan enerji kaynaklarına yönelim sağlanmalı ve hem gelecekte temin edilmesi güçleşecek hem de çevre kirliliğine neden olan konvansiyonel kirlletici yakıtlara olan bağımlılık azaltılmalıdır. Devletlerin yenilenebilir enerji kaynaklarına bu kadar yatırım yapmasının altında da bu gerçek yatmaktadır.

21. yüzyılın başlarında enerji üretimi konusunda fosil yakıtların kullanımı önemli bir rol oynamaktaydı. Şu anda üretilen toplam enerji miktarının %86,4 ünü fosil yakıtlar oluşturmaktadır. Bu payın %36'lık kısmı petrolden, %27,4'lük kısmı kömürden oluşmaktadır. Doğalgaz ise %23 lük bir yüzdeye sahiptir.

Fosil yakıtlar, yerkabuğunun derinliklerine gömülmüş ve burada ısı ve basınca maruz kalmış ölü organizmaların parçalanması ile oluşur. Fosil yakıtlar; kömür, petrol ve doğalgaz gibi yüksek karbonlu ve hidrojen yönünden zengin bileşikler içerirler. Metan gazı gibi düşük karbon-hidrojen oranına sahip uçucu bileşikler ise fosil yakıt rezervleri içerisinde petrol türevi şeklinde bulunabilirler [1]. Ancak, fosil yakıtların çıkartılması, nakliye edilmesi ve yanma işlemleri sırasında hem sağlık hem de çevre açısından birçok tehdit bulunmaktadır [2]. Bu tehditler birçok hayvan türünün yokolması kadar büyük boyutlara ulaşabilmektedir [3]. Bugün karşılaşılan birçok çevre sorununun temelinde fosil yakıtlara olan bağımlılık yatmaktadır. Bu sorunlar arasında küresel ısınma, hava kalitesinin bozulması, petrol sızıntıları ve asit yağmurları insanlığın etkisini yakın zamanda hissettiği sorunlardır. Ayrıca fosil yakıtların yanma reaksiyonu sonucu, reaksiyon çıktısı olarak karbonmonoksit salınımı da gözlemlenmektedir. Son 150 yılda fosil yakıtların atmosferdeki karbondioksit miktarını %25 oranında arttırıldığı öngörülmektedir [4]. Ayrıca atmosferdeki metan ve azot oksit miktarındaki artıştan da doğrudan olmasa da fosil yakıtlar sorumludur. Havadaki karbondioksit miktarının artması nedeni ile,

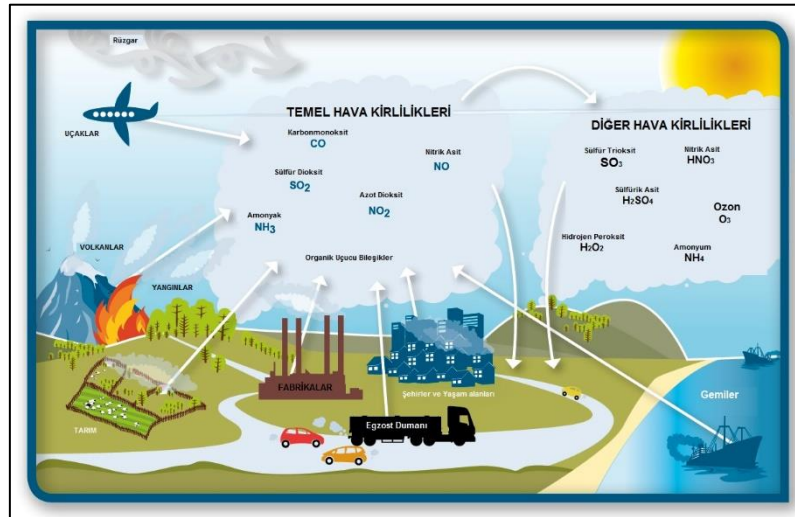
dünyanın küresel ortalama yüzey sıcaklığı 0.3 ile 0,6 derece artmıştır [2]. Bilim adamları, geçen yüzyıl boyunca gözlemlenen küresel ortalama sıcaklığın doğal kaynaklı olmadığını ve küresel iklim koşullarında insan etkisinin görüldüğü sonucuna varmışlardır. İklim bilimciler ayrıca, eğer karbon dioksit seviyeleri artmaya devam ederse, gezegenimizin önümüzdeki yüzyılda daha da sıcaklaşacağını öngörüyorlar. Tahmini sıcaklık artışı, muhtemelen çeşitli olumsuz etkilere neden olacaktır. Kıyı bölgelerinde, okyanusların ısınması ve buzulların erimesinden dolayı deniz seviyesinin yükselmesi, sulak alanların, nehir deltalarının ve hatta nüfusun yoğun olduğu alanların sel felaketi ile yüzyüze kalmasına neden olabilir. Değiştirilen hava koşulları daha büyük hava olaylarına ve tarım bölgelerinde kuraklık oranlarının artmasına neden olabilir [3]. İklimin değişimi havanın kalitesi ile doğrudan alakalıdır ve hava kalitesini düşüren gazların birçoğu fosil yakıt yakma yöntemiyle üretilir. (Karbon monoksit, azot oksitler, sülfür oksitler ve hidrokarbonlar) Buna ek olarak, havada asılı parçacıklar hava kirliliğine katkıda bulunurlar ve azot oksitler ve hidrokarbonlar atmosferde birleşerek sisin temel bileşeni olan “troposferik ozon” oluşturabilirler. Bu etkenler insan sağlığını birçok yönden kötü etkileyebilir.



Şekil 1. 1: Fosil yakıtların çevreye ve insan sağığına olan olumsuz etkileri.

Karbon monoksit, tüm fosil yakıtların yanma reaksiyonları sırasında yan ürün olarak oluşan bir gazdır. Karbon monoksite maruz kalma, baş ağrılarına neden

olabilir ve kalp rahatsızlığı olan kişilerde birtakım sorunlar yaratabilir. Günümüzde ulaşım araçları karbonmonoksit emisyonlarının birincil kaynağıdır. Yanma sırasında azot dioksit ve nitrik oksit oluşur. Azot oksitleri birçok şehir silüetinde sarımtırak kahverengi bulutlar olarak görebilirsiniz. Azotoksit solunduğu takdirde akciğerleri tahriş edebilir, bronşit ve pnömoniye neden olabilir ve solunum yolu enfeksiyonlarına karşı vücudumuzun direncini azaltabilirler. Ayrıca sis oluşumuna neden olurlar. Kükürt oksitler, bir bileşik içerisindeki mevcut kükürtün bir yakıtta oksitlenmesi ile üretilir. Elektrik üretmek için kömür kullanan enerji santralleri, bir ülkenin sülfür dioksit emisyonlarının üçte ikisini üretir. Azot oksitler ve sülfür oksitler asit yağmurunun önemli bileşenleridir. Bu gazlar bulutlarda su buharı ile birleşirler ve yağmur veya kar yağışı sırasında sülfürik ve nitrik asitler oluşturularak tekrar yeryüzüne inerler. Yağan asit miktarı arttıkça; birçok habitat (özellikle göller ve nehirler) bitki ve hayvan yaşamı için çok asidik hale gelir. Asit yağmuru aynı zamanda tarımsal mahsülleri ve yerleşik binaların dayanıklılığını da etkiler [4].



Şekil 1. 2: Başlıca hava kirliliği sebepleri.

Birçok şehirde özellikle soğuk mevsimlerde güneşin doğuşuna yakın saatlerde beyaz pus (troposferik ozon) ya da sis gözlemlemek mümkündür. Bu sis doğrudan havaya yayılmaz; Bunun yerine, ozon öncüllerinin, (başta metansız hidrokarbonlar ve azot oksitler) ısı ve güneş ışığının bulunduğu ortamda reaksiyona girmesi üzerine oluşur. Böyle bir bölgeye veya havaya uzun süre maruz kalmak nefes darlığından kalıcı akciğer hasarına kadar birçok hastalığa yol açabilir. Buna ek olarak,

tarlalardaki mahsül verimlerini düşürebilir. Ayrıca kömür madenciliği su kirliliğine de katkıda bulunur. Kömür maden ve yataklarının yakınlarında asidiklik gözlenir. Bir bölgede kömür madenciliği yapıldıktan sonra, lav edilmek istenir ise uygun üst toprak kullanılmalı ve özel tedbirler alınmalıdır. Aksi takdirde bu bölge asitten tamamen arındırılmamış olacaktır [5]. Kömür madenciliği sürecinde kömür dışında çıkarılan maddeler katı atık olarak tekrar toprağa bırakılır. Ayrıca işleme safhasında kömür temizlik maksatlı yıkandığında da atık madde bırakır. Son olarak, kömür yanarken geri kalan külleri de birer atık üründür [5]. Dolayısıyla yakın gelecekte artan enerji talebini karşılamak için alternatif enerji kaynakları aramak gerekmektedir. Önümüzdeki yıllarda 10 TW'lık temiz enerji üretimiyle mücadele edebilmek için üç seçeneğimiz mevcuttur. Bunlar arasında;

- Fosil yakıt (kirliliğin kontrolü ile kullanılması),
- Nükleer enerji
- Yenilenebilir enerji yer alır [6].

Fosil yakıtlar ile yıllık 10TW enerji üretimi düşünülürse, çevreyi olumsuz etkilememek adına yıllık 25 milyar metrik CO₂ saklayabileceğimiz bir teknoloji geliştirmemiz gerekir ki bu olası değildir [1].

Yakın geçmişte gelişen enerji ihtiyacının artması, petrol ve kömür gibi hızla azalan konvansiyonel kaynaklardan dolayı daha da karmaşık hale gelmiştir. Hindistan da dahil olmak üzere gelişmekte olan ülkeler tarafından karşılaşılan en büyük sorun artan enerji ihtiyacını karşılarken çevreye verilen zararı en aza indirmektedir. Hem enerji kaynaklarının tükenme noktasına gelmesi hem de çevreye verilen zararın en aza indirilme arzusu, araştırmacı ve üreticileri yenilenebilir enerji kaynaklarına itmiştir. Nükleer enerji de bu noktada uygulanabilirliği olan bir seçenektir. Ancak Nükleer tesislerin bir ömürleri olduğu ve bu ömrü doldurduğu zaman bertaraf edilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bu noktada tesis artık üretim yapmayacağı zamanki oluşacak enerji açığını kapatmak için her sene aktif santral sayısı kadar nükleer santral inşa edilmelidir [6]. Bir tesis kurulumunun maliyet ve termini düşünüldüğünde böyle bir yatırım mümkün değildir. Ayrıca nükleer enerji ile ilgili iki önemli çevresel endişe bulunmaktadır ve bunların ikisi de insan sağlığı için potansiyel tehdit oluşturmaktadır. Birincisi; nükleer fisyonlu güç reaktörleri tarafından üretilen yüksek derecede radyoaktif ürünler ve bertaraf sırasında ve

sonrasında reaktördeki radyoaktivite dikkatli bir şekilde yönetilmelidir. Diğer endişe ise nükleer bomba ya da çeşitli ulusların toplu imha silahlarını üretmek için nükleer güç kullanmasının önünü açmaktır. Çünkü nükleer silahlarda kullanılan işlenmiş plütonyum ve uranyum türevleri ancak nükleer tesislerde üretilir. Ayrıca nükleer yakıtlar elde edilirken, işlenirken ve dönüştürülmesi sırasında açığa çıkan kirliticilerin zararları da göz ardı edilemez [6]. Diğer enerji teknolojilerine kıyasla, nükleer enerji üretiminden doğan emisyonlar, yetersiz yönetildiğinde geri alınamaz kötü sonuçlara sahne olabilir. Halbuki o zaman bile, nükleer yıkımların etkileri, mevcut kömür teknolojileri ile üretim gücüne dahil olanlardan çok daha azdır. Çünkü fosil yakıtlar uzun tarihsel süreçler boyunca yavaş yavaş insan sağlığına etki etmiştir. Günümüzde görülen ve 200 yıl kadar öncesine kadar görülmeyen hastalıkların %95'i insanoğlunun enerji üretimi isteğinden doğan kirliliklerin sebep olduğu hastalıklardır. Ancak yine de nükleer santrallerin vereceği hasarı en aza indirgeyerek, nükleere dayalı enerji üretim mekanizmasının işletilmesi ve fosil yakıtlara bağımlılığın kaldırılması çok da uzakta değildir. Muhtemelen önümüzdeki 50 yıl içerisinde fosil yakıtlardan enerji üretimi rafa kalkacaktır [7]. Milyonlarca yılda oluşmuş fosil yakıtların bu denli kısa bir sürede tükenmesi insanlığı sonsuz kaynaklara itmiştir.

Yenilenebilir enerji tabiri, mevcutta bulunan ve sonunun olmadığı düşünülen enerji kaynaklarını ifade eder. Yenilenebilir kaynaklar kategorisinde; Güneş, rüzgâr, okyanus, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal kaynaklar ve biyoyakıtları düşünebiliriz. Yenilenebilir enerji kaynakları, sınırlı sayıda ülkede yoğunlaşan diğer enerji kaynaklarından farklı olarak, geniş coğrafi alanlarda mevcuttur. Öyleki dünyanın her yerinde güneş santrali kurulabilir, her yerde rüzgâr tribünü inşa edilebilir. Yenilenebilir enerjinin hızlı bir şekilde konuşlandırılması ve enerji kaynaklarının teknolojik olarak çeşitlendirilmesi insanlığa gerçekten önemli enerji güvenliği ve ekonomik faydalar sağlayacaktır.

1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

- Rüzgâr Enerjisi



Şekil 1. 3: Rüzgâr tribünü.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında Rüzgâr Enerjisi, en eski ve en popüler yenilenebilir enerji kaynağıdır. İlk kez 7000 yıl önce Nil nehrinde gemileri hareket ettirmek için rüzgârdan faydalanılıyordu. İnsanlık o zamanda bile rüzgârın fayda elde edilebilir bir doğa olayı olduğunun farkındaydı. Günümüzde hava akışları rüzgâr türbini çalıştırmak için kullanılmaktadır. Modern rüzgâr türbinleri, yaklaşık 600 kW ila 5 MW arası nominal güce sahiptir. Ancak nominal çıkışı 1,5-3 MW olan türbinler ticari olarak en yaygın kullanılan türbinlerdir. Rüzgârın gücü rüzgâr hızının küpünün bir fonksiyonudur, bu nedenle rüzgâr hızı arttıkça güç çıkışı belirli türbin için maksimum çıkışa kadar çarpıcı bir şekilde artar [8]. Rüzgârın daha güçlü ve daha sabit olduğu alanlar (açık deniz ve yüksek rakımlı alanlar) rüzgâr tarımı için en çok tercih edilen yerlerdir. Küresel olarak, rüzgâr enerjisinin uzun vadeli teknik potansiyelinin (ihtiyaç duyulan tüm pratik engellerin aşılması halinde) mevcut toplam elektrik enerjisi üretiminin beş katına eşit olduğu düşünülmektedir. Bu öngörünün gerçekleşmesi için ise mevcut türbin sayısı kadar da açık denizlere türbinler inşa edilmelidir. Rüzgâr gücünün en büyük avantajı yakıt maliyeti taşımamasıdır. Böylece rüzgâr enerjisinin fiyatı diğer herhangi bir enerji kaynağından daha kararlıdır. Ancak elektriğin rüzgârdan üretilmesi noktasında tek sakınca, rüzgâr enerjisinin çeşitli zaman aralıklarında değişken olmasıdır. Küresel

olarak yaklaşık yıllık 2-4 TW arası enerji sadece rüzgâr türbinleri ile üretilir [9].

- Hidroelektrik Enerji



Şekil 1. 4: Atatürk barajı.

Hidroelektrik enerji akan suyun gücünden faydalanarak enerji üretme prensibine dayalıdır. Buradan elde edilecek enerji miktarını, suyun boşaldığı yükseklik ve suyun debisi belirler. Örneğin büyük ırmaklarda debi büyük olacağından, üretilen enerji de o oranda çok olacaktır. Veyahut suyun kazanacağı ivme için ayrılan yükseklik çok ise yine kazanılan enerji miktarı fazla olacaktır. Temel prensipte borular yardımı ile büyük rezervuardan küçük rezervuara su aktarımı sırasında su, türbinlere doğru gelir ve su değirmeni gibi türbinleri çevirir. Türbinler de mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek şebekeye dahil eder veyahut stoklar. Hidroelektrik santrallerin başlıca avantajları şöyle sıralanabilir;

- Hidroelektrik kaynağında sadece sudan enerji elde edilir. Ek hiçbir kimyasala ek bir işleme tabi tutmaya gerek yoktur.
- İnsan sağlığına tehdit oluşturacak gaz-kimyasal salınımı yoktur.
- Tesis kurulumu oldukça kolaydır.
- İşletme ömrü uzundur ve yakıt masrafı bulunmamaktadır.
- İşletme bakım masrafları çok düşüktür.

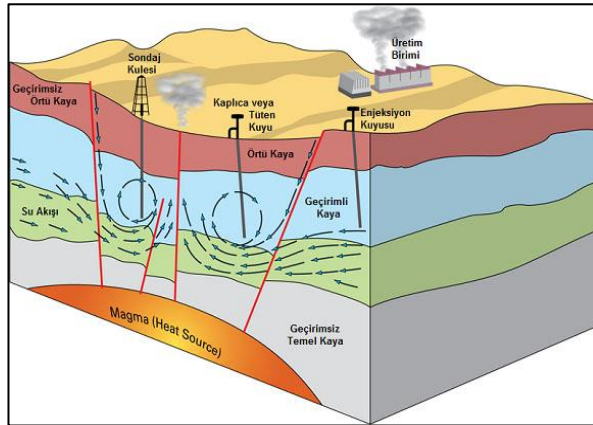
Hidroelektrik enerjinin tek dezavantajı kurulum ve işletme aşamasında maliyetlerinin fazla olmasıdır. Dünya genelinde hidroelektrik santraller sayesinde üretilen enerjinin 2-3 TW olduğu tahmin edilmektedir [10].

- Jeotermal Enerji



Şekil 1. 5: Aydıncık'ta yer alan pamukören jeotermal elektrik üretme tesisi.

Jeotermal enerjinin kaynağı, Dünya'da şimdiye kadar üretilen ve depolanan termal enerjidir. Maddenin sıcaklığını belirleyen enerji, termal enerjidir. Dünyanın jeotermal enerjisinin %20 si varoluşundan gelmektedir, %80'i ise minerallerin radyoaktif bozunumundan kaynaklanmaktadır [11]. Jeotermal enerji elde edebilmek için, Dünya'nın derinliklerine doğru inmek gerekir. Dünya'nın çekirdeğine yaklaşılarak sıcaklıktan faydalanıp enerji üretilmektedir.



Şekil 1. 6: Jeotermal enerji üretim tesisi çalışma diagramı.

Aşırı yüksek sıcaklık ve basınç, bazı kayaçların erimesine neden olur ve yaygın olarak magma olarak bilinir. Bu magma, kabuğun içinde kimi zaman 700 °F (371 °C) sıcaklığa kadar kaya ve suyu ısıtır [12]. Sıcak kaynaklardan elde edilen jeotermal enerji Paleolitik çağlardan beri banyo yapmakta ve antik Roma döneminden beri yerden ısıtma için kullanılmaktadır ancak başlıca kullanım alanı günümüzde elektrik enerjisi üretimidir. Tüm dünya üzerinde jeotermal santrallerde üretilen enerjinin yaklaşık 12 TW olduğu tahmin edilmektedir [13].

- Biyokütle ve Biyoyakıt



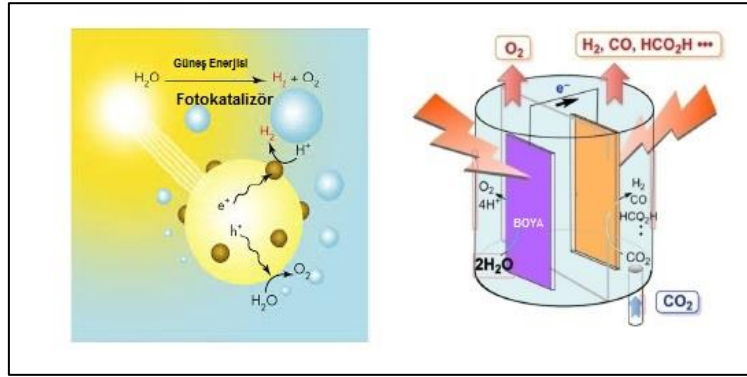
Şekil 1. 7: Türkiye'nin ilk biyokütle enerji santrali.

Biyokütle canlı organizmalardan veya yakın geçmişte yaşamış olan organizmalardan biyolojik olarak türetilmiş bir yakıt türüdür. Bu biyokütlenin enerjisi direkt olarak yanan veya dolaylı olarak biyoyakıt olarak adlandırılan bir yakıt biçimine dönüştürülerek elde edilebilir [14]. Odun, biyokütleden elde edilen en büyük enerji kaynağıdır. Ölü ağaçlar, ölü yapraklar, ağaç yongaları, okaliptüs, şeker kamışı, kenevir gibi bitkilerden çıkan atıkların değişik türleri de enerji üretimi için biyokütle olarak kullanılabilir. Bitki biyokütlesi, bir dizi kimyasal işlemle selülozdan glükoza dönüştürülebilir ve bu şekilde elde edilen şeker ilk kuşak biyoyakıt olarak kullanılabilir. Biyoyakıt katı, sıvı ve gaz formlarında olabilir. Sıvı biyoyakıtlar biyodizel ve bioetanol içerirken, gaz halindeki biyoyakıt biyogaz içermektedir. Biyoyakıtlar 2010 yılında dünyanın ulaşım yakıtlarının %2,7'sini sağlamıştır [15].

- Güneş Enerjisi

Tüm yenilenebilir enerji seçenekleri arasında, yılda 120,000 TW'lık bir enerji üretimiyle güneş enerjisi, enerji talebimizi karşılamak için en uygun seçenek olarak göze çarpıyor. Güneş enerjisinden yararlanabilmek için izlenilebilecek birçok yol vardır.

- Güneş Yakıtı



Şekil 1. 8: Güneş yakıt eldesi.

Bir doğa mucizesi olan fotosentez olayının suni olarak gerçekleştirilmesi amacı ile üretilmiş yakıtlardır. Yaprak üzerine gelen güneş ışığı çarptığı kimyasal yapıyı; hidrojen, karbondioksit ve organik bileşenlere indirger ve kimyasal bir enerji açığa çıkarır. Aynı prensibi kullanarak enerji üretebilmek için bir takım fotokatalistler geliştirilmiş ve hala geliştirilmeye devam edilmektedir. Burada enerji üretimi direk veya dolaylı yollar ile üretilebilir. Direk üretim arada hiç bir enerji türüne dönüşüm olmaksızın, güneşten gelen ışınların doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi temel prensibine dayanır. Dolaylı üretimde ise güneşten gelen ışınlar önce başka bir enerji biçimine (biyokütle, buhar v.b.) dönüştürülerek daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülür. Nocera ve arkadaşları tarafından geliştirilen “suni yaprak”, metal oksit bazlı katalizörler ile bir yarı iletken güneş pilinin, yalnızca ürün olarak oksijen ile güneş ışığı kullanarak enerji üretmesi prensibine dayalıdır [16].

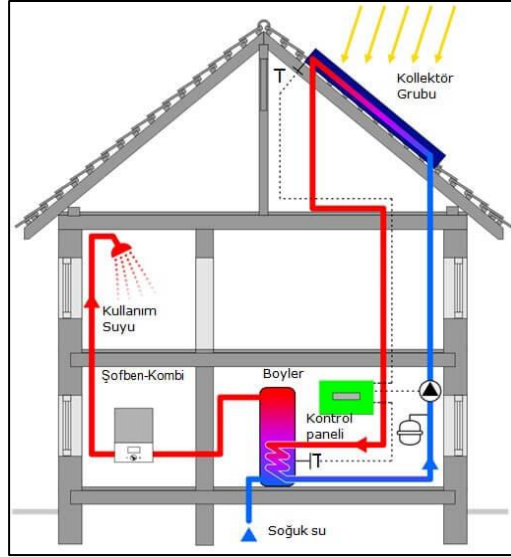
Fotosentez olayını ele alalım. Bitkiler, güneşten gelen ışınlar, havadaki karbondioksiti ve bir miktar suyu kullanarak kendilerine enerji sağlarlar. Bilim insanları da aynı mentalite ile bir enerji arayışına giriştiler. Bir takım canlı organizmalar yardımı ile doğanın sunduğu sınırsız kaynaklardan faydalanarak bir

enerji üretilebilir mi? Harvard Üniversitesi bünyesinde “biyonik yaprak” adını verdikleri bir nevi canlı bir pil üretimi gerçekleştirildi. Bu cihaz hidroliz yöntemi ile suyu hidrojen ve oksijene ayırabiliyor ve bu sırada gerekli olan enerjiyi güneş ışınlarından sağlıyor. Bünyesinde bulunan mikroorganizmaları beslemek için hidrojen atomları kullanılırken, geriye kalan oksijen ve dışarıdan temin edilen karbondioksit birleştirilerek bir tür alkollü yakıt elde ediliyor. Üretilen ilk biyonik yapraklar bir litre su içerisinde 216 mg alkol barındırıyordu. Ancak hidroliz yöntemi esnasında katalizör olarak nikel-molibden-çinko kullanılması mikropları zehirliyor ve bir süre sonra sistem işlemez hale geliyordu. Bu sebeple daha iyi bir katalizör arayışına girildi ve kobalt-fosfat alaşımlı bir malzeme geliştirildi. Bu katalizör yardımı ile güneş ışını panele geliyor ve burdan açığa çıkan enerji ile su, hidrojen ve oksijene ayrılabilir. Kobalt tabanlı katalizör hem doğa hem de sağlık dostu olduğu için, hem çevreye hem de barındırdığı mikroorganizmalara zarar vermiyor. Bu çalışma ekibinin başında bulunan Nocera “Tek besin kaynağı olarak hidrojen yiyen böcekleriniz var, hidrojen de güneş enerjisiyle atomlarına ayrılan sudan geliyor. Yani, yenilenebilir böcekleriniz ve onlara istediğinizi yaptırabilmenizi sağlayan sentetik biyolojiniz var.” diyor.

Biyonik yaprakların en büyük avantajı doğaya hiçbir zararı olmaması, aksine bitkiler gibi atmosferdeki karbondioksit miktarını azaltarak oksijen yayılımı yapmasıdır. Bununla ilgili olarak çalışmanın mimarı şöyle söylüyor; “Hava artı güneş ışığı artı suyu alıyorum ve bir şeyler yaratıyorum ve bunu doğadan 10 kat daha iyi yapıyorum. Bu beni iyi hissettiriyor.”

- Güneş Enerjili Isıtma ve Soğutma sistemleri

Ülkemizde de pek çok örneği bulunan sistemlerdir. Güneşten gelen ışınlar yardımı ile sıcak su eldesi veya alan ısıtma gibi temel ihtiyaçlara istinaden kullanılmaktadır. Bu sistemler yardımı ile doğalgaz ve elektrik kullanımına olan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Ayrıca montajı ve kullanılabilirliği oldukça basit ve uzun ömürlüdür. Güneşten gelen ışınlar kolektörlerde toplanır ve sahip olduğu ısıyı altından geçen borulardaki suya aktarır. Böylece su ısınmış olur [17].



Şekil 1. 9: Güneş enerjili ısıtma sistemi.

- Termal Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, ev ve işyerlerinde iki şekilde kullanılabilir. Bir önceki bölümde güneşten gelen ışınlar bir su ısıtıcısı gibi davranarak ihtiyaç duyulan sıcak suyu sağlamaktaydı. Termal güneş santrallerinde ise başlangıçta aynı mantık ile enerji dönüşümü yapılır. Güneşten gelen ışınlar ısı iletkenliği yüksek bir sıvıyı ısıtır. Isınan sıvının yaydığı buhar bir türbini döndürür ve dönen türbin elektrik üretimi sağlar. Geleneksel termal güneş santrallerinde içten yanmalı motorlar kullanılmakta idi. Ancak teknolojinin de gelişmesi ile “stirling dish” adı verilen ve piston hareketi için hidrojen dolu tüplerin ısıtılması mantığına dayanan türbinler kullanılmaya başlanmıştır [18]. Termal güneş santralleri, şu anda güneş enerjisini en verimli kullanma yöntemidir [19].



Şekil 1. 10: Parabolik aynalar yardımıyla enerji üreten termal güneş enerjisi santrali.

- Fotovoltaik Güneş Enerjisi

Fotovoltaik kelimesi Yunanca da ışık anlamına gelen $\phi\omega\varsigma$ (phōs) ve yine Yunan fizikçi Alessandro Volta'nın keşfi olan elektromotor kuvvet birimi Volt'tan gelmektedir. Fotovoltaik teriminin ilk olarak 1849 yılında kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Fotovoltaik aygıtlar güneşten gelen enerjiyi direkt olarak, başka hiçbir dönüşüme ihtiyaç duymadan elektrik enerjisine çevirebilen sistemlerdir. Fotovoltaik enerji üretimi, fotovoltaik malzeme içeren ve tek başına da pil etkisi gösterebilen bir dizi güneş pilinden oluşan güneş panelleri kullanılarak elektrik enerjisi üretimi prensibine dayanır. Bu tür aygıtlar geliştirilmeye çok açık, temiz ve kaynağı sonsuz olması sebebiyle son yılların en çok çalışma yapılan bilim dallarından arasında yer almaktadır [20]. Güneş ışığının doğrudan elektriğe dönüştürülmesi ve çalışma esnasında çevreyi olumsuz etkileyebilecek herhangi bir salınımı olmaması sebebiyle çevre dostudur. Bir fotovoltaik hücrenin çalışması için temel gereklilikler şunlardır:

- Güneş spektrumundaki absorpsiyon bandının geniş olması ve elektron-hole çiftlerinin üretimine uygun zemin sunabilmesi (excitonlar diyebiliriz)
- Oluşturulan excitonların ayrıştırılabilmesi
- Ayrıştırılan excitonların tekrar birleşmeden (rekombinasyon) tamamlayıcı devreye katılması beklenmektedir.

2. GÜNEŞ HÜCRELERİ

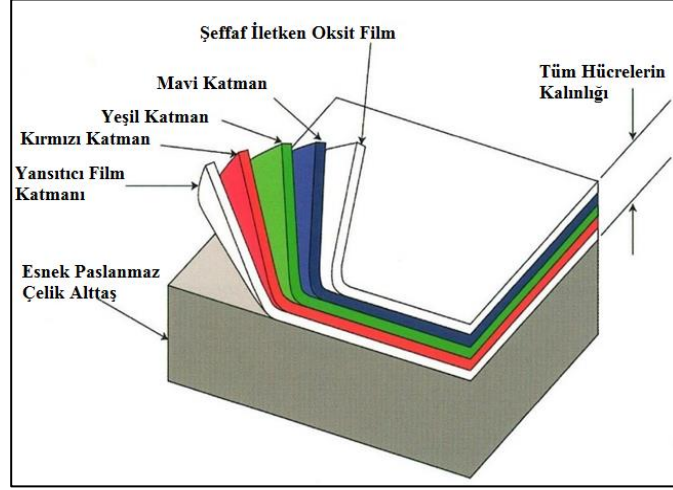
2.1. Güneş Hücresi Çeşitleri ve Uygulamaları

Güneş hücreleri genellikle isimlerini, üretildikleri yarı iletken malzemeden alırlar. Bu malzemelerin, güneş ışığını emmek için belirli özelliklere sahip olmaları gerekir. Bazı hücreler Dünya'nın yüzeyine ulaşan güneş ışığını işlemek üzere tasarlanırken, bir kısmı da uzay boşluğunda kullanım için optimize edilmiştir. Güneş hücreleri, çeşitli absorpsiyon ve yük ayırma mekanizmalarından yararlanmak için yalnızca bir ışık emici malzeme tabakasından (single-junction) veya çoklu fiziksel konfigürasyonlardan (multi-junction) üretilebilir. Güneş hücreleri birinci, ikinci ve üçüncü nesil hücreler olarak sınıflandırılabilir.

Geleneksel hücreler olarak da adlandırılan birinci nesil hücreler, ticari olarak baskın PV teknolojisi olan, polisilikon ve monokristal silikon gibi malzemeleri içeren kristal silikondan yapılmıştır. İkinci nesil hücreler, amorf silisyum, CdTe ve CIGS hücreleri içerir. Ticari olarak pazarda iyi bir potansiyele sahiptir. Üçüncü nesil güneş hücreleri, ince film güneş hücrelerine benzemekle birlikte çalışma prensibi noktasında çok farka sahiptir. Bu tür hücrelerin panelleştirilmesi ve ticari ürün olarak piyasaya sürülmesi için henüz çok erkendir ancak yapılan araştırma veya geliştirmeler neticesinde ilerleyen zamanlarda pazarın hâkimi olacağı öngörülmektedir. Birçok hücrede organik metaller, organometalik bileşikler ve inorganik maddeler kullanılmaktadır. Verimliliklerinin düşük olması ve güneş ışınlarını absorbe eden malzemenin kararsızlığı ticari kapıları şu anda kapalı tutsa da araştırmacılar için ileride gelecek vaadedeen bir alandır. Birinci nesil hücreler sınıfı silikon güneş hücrelerini içerir. Bunlar, tek bir silikon kristalden (mono-crystal) yapılabileceği gibi birçok kristalden (multi-crystal) oluşan bir silikon bloğundan da üretilebilir. İkinci nesil ince film güneş hücreleri, fabrikasyonu için az miktarda kimyasal malzeme gerektirdiğinden, üretim maliyetleri geleneksel silikonlu güneş hücrelerinden daha azdır. Adından da anlaşılacağı üzere ince filmler PV hücreleri, ince bir film tabakasının üzerinde bir takım fiziksel dönüşümler vasıtası ile elektrik akımı üretimi temeline dayalıdır. İkinci nesil hücreler diğer hücre türlerinden biraz daha az verime sahiptir. Bu sebeple, aynı miktarda enerji üretebilmek için daha fazla yüzey alanına ihtiyaç duyarlar [21].

2.1.1 Amorf Silikonlu (A-Si) Güneş Hücreleri

Amorf silikon (a-Si), silikonun kristal olmayan formudur. 15 yıldan uzun süredir piyasada olan ince film teknolojilerinin en gelişmiş ürünüdür. Cep telefonları, tabletler ve hesap makineleri gibi içerisinde mikroişleyici barındıran birçok teknolojik üründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu mucizevi malzeme aynı zamanda güneşten enerji üretimi için de kullanılmaktadır. United Solar Systems Corp. (UniSolar), amorf silikonlu güneş hücresi üretimine öncülük etti ve bugün Sharp ve Sanyo gibi önemli birçok teknoloji devi de hem AR&GE aşamasında hem de ticari ürün aşamasında bu teknolojiden faydalanmaktadır. Amorf silikonlu panellerin üretiminde ise cam ya da metal gibi bir alt katman kullanılır. Bu alttaş üzerinde ince bir silikon tabakası (yaklaşık 1 mikrometre) buharlaştırma yöntemi ile kaplanmaktadır. Bu teknolojinin uygulanabilmesi için yüksek sıcaklıklara da gerek yoktur. 75 derece gibi küçük bir sıcaklık değerinde buharlaştırma yapılabilir. En basit biçiminde, hücre yapısı tek katlı p-katmanlara sahiptir. Bununla birlikte, tek katmanlı hücreler, güneşe maruz bırakıldıklarında, güç çıkışlarında %15-35 aralığında önemli bir bozulma yaşar. Bu bozulma etkisi Staebler-Wronski etkisi olarak bilinir. Bozunmayı en aza indirgeyerek, hücrenin stabilliğini sağlamak için daha ince film katmanları kaplanması gerekmektedir. Ancak bu sefer de ışık Emilimi azalmaktadır. Işık Emiliminin azalması da hücrenin verimini doğrudan etkilemektedir. Bozunmayı azaltmak isterken verimin düşmesi araştırmacıları farklı bir yapı arayışına sürükledi. Böylelikle üst üste dizilen p-i-n hücreleri içeren tandem ve hatta üç katmanlı cihazlar geliştirilmeye başlandı. Amorf silikon teknolojisini geliştirmek için birtakım çalışmalar yürüten Uni-Solar Corp. Güneşten gelen ışınların Emilim yüzdesini arttırmak için optimize edilmiş üç katmanlı bir hücre tasarımı geliştirdiler.



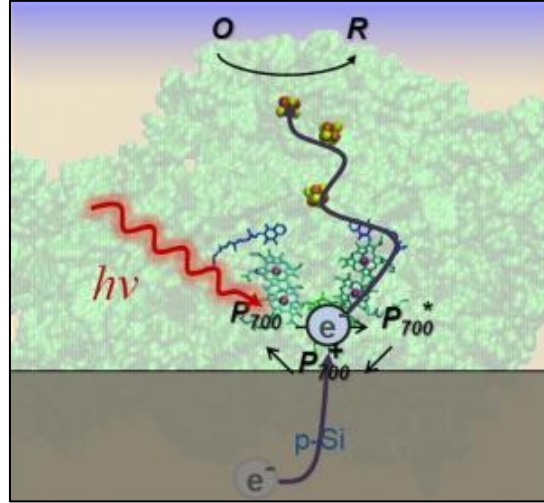
Şekil 2. 1: Amorf silikonlu güneş hücresi.

Resimde görüldüğü gibi, güneş hücresinin kalınlığı sadece 1 mikrondur. Şu anda kristal silikon yapıları güneş hücreleri yaklaşık yüzde 18’lik bir verim elde ederken, amorf güneş pillerinin verimliliği ise sadece yüzde 7 civarındadır. Staebler-Wronski etkisi sebebi ile verim %10 mertebelerinden %7 mertebelerine düşmüştür. Verim değerlerinin pazarda tutunma noktasında yetersiz olmasına rağmen düşük üretim maliyetleri sebebi ile amorf silikon güneş pillerinin birçok ticari uygulaması mevcuttur.

2.1.2 Biohibrid Güneş Hücresi

Biohibrid güneş hücreleri, organik madde ve inorganik madde kombinasyonu kullanılarak üretilir. Biohibrid güneş hücrelerinin doğuşu Vanderbilt Üniversitesi’nde gerçekleştirilen birtakım deneylere dayanmaktadır. Araştırma ekibi, güneş enerjisi dönüşümünde daha büyük bir etkinlik elde etmek için, fotosentezin doğal sürecini, laboratuvar şartlarında yeniden oluşturabilmek için birtakım kimyasallar (fotosentetik membranda bulunan bir fotoaktif protein kompleksi) kullanarak suni fotosentez ortamı yarattı [22]. Çoklu fotosel tabakaları güneş ışınlarından gelen fotonik enerjiyi toplar, onu kimyasal enerjiye dönüştürür ve hücreden geçen bir akım oluşturur. Hücrenin kendisi, güneş hücrelerinde bulunan birçok anorganik kimyasalı içinde barındırır ancak bunlara ek olarak bir de “fotosistem 1” adını verdikleri oluşturması günler süren bir katmana sahiptir [23]. Günler sonra “fotosistem 1” görünür hale getirilir ve ince yeşil bir film katmanı olarak görünür. Enerji dönüşümüne yardımcı

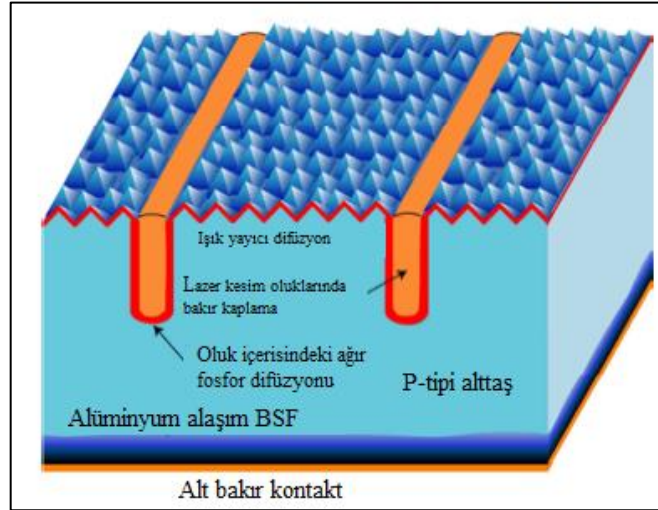
olan bu katman hala geliştirilme aşamasındadır. Vanderbilt Üniversitesi bünyesinde yürütülen çalışmalarda, fotosistem 1 proteinini daha etkin kullanabilmek adına gözler doğanın ta kendisine çevrilmişti. Proteinin güneş dönüşümünde ne kadar yaygın ve verimli olduğunu gördükten sonra, farklı teknolojileri birleştirmek ve geliştirmek için fotosentez yapabilme yeteneği yüksek bitkiler üzerinde yoğunlaşmaya başladılar. Yapılan denemeler sonucunda, fotosistem 1 kaynağı olarak ıspanak bitkisi kullanılmasına karar verildi. Tilakoid membranlar izole edildi ve ardından fotosistem I'i tilakoid membrandan ayırmak için bir saflaştırma işlemine girdi. Araştırmaları neticesinde, diğer güneş hücreleri tarafından elde edilene kıyasla önemli bir elektrik akımı değeri elde edildi. Şimdilerde ıspanağa alternatif ve daha yüksek verim değerleri sağlayabilecek çalışmalar üzerinde devam etmektedir.



Şekil 2. 2: Çok katmanlı biyohibrid güneş hücresi yapımı.

2.1.3. Gömülü Kontakt Güneş Hücreleri

Hücre alttaşı olarak kabul edilen malzemenin içerisine, lazer ile oluşturulan bir oluk açılır ve bu oyuğun içerisinde güneş hücresi büyütülür. Bu tür hücreler yüksek verimli ve ticari olarak da pazarda yerini almış güneş hücreleridir. Gömülü temas güneş pilinin bir şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2. 3: Gömülü kontakt güneş hücresi.

Gömülü kontakt güneş hücrelerinin verimlerinin yüksek olmasının sebebi, metalin silikon güneş hücre içindeki lazerle oluşturulmuş bir oluğa gömülü olmasıdır. Bilindiği gibi arıyan yükleri toplamak için iletken bir toplayıcı olmalıdır. Bu toplayıcının yüzey alanı elektronları toplayabilme yeteneğini arttırmak için geniş tutulur. Ancak bu sefer de güneş ışınlarının hücre içine girmesi zorlaşır. Gömülü hücrelerdeki metal kontakların boy oranı, üst yüzeyde geniş bir metal şeridine ihtiyaç duyulmadan üretim imkânı sağlar. Böylece güneş ışınlarının tamamı ayrışma bölgesine iletebilir. Örneğin, geniş alanlı bir cihazda, geleneksel bir güneş pilinin gölgelenmelerden dolayı kaybı %10 ila %15 arasında değişebilirken, gömülü bir kontakt yapısında gölgeleme kayıpları yalnızca %2 ila %3 arasında olacaktır. Bu daha düşük gölgelendirme kayıpları düşük yansıma ve dolayısıyla daha yüksek kısa devre akımlarına izin verir. Gömülü kontakt teknolojisi, iyi yansıma özelliklerine ek olarak, yüksek metal en/boy oranına, sahiptir dolayısıyla parazitlenme kaynaklı direnç kayıpları en aza indirgenmiş olur. Verici Direnç sayfasında gösterildiği gibi, verici direnç gömülü bir temas güneş pilinde azaltılır, çünkü daha dar parmak aralığı verici direnç kayıplarını önemli ölçüde azaltır. Genel olarak, bu düşük direnç kayıpları, yüksek FF'li geniş alanlı güneş pillerine izin verir. Gömülü kontakt güneş hücreleri, geleneksel hücreler ile kıyaslandığında, en büyük fark güneşten gelen ışınları soğurabilme yeteneğidir. Dirençli kayıpları en aza indirmek için, geleneksel hücrelerde donör bölgede farklı kimyasallar katkılanmıştır ve bu güneş hücresinin yüzeyinde “ölü” bir tabakaya neden olur. Gömülü bir hücre yapısında soğurma kayıpları düşük olduğundan, verime katkısı yüksek olan açık devre gerilimleri (Voc)

ve kısa devre akımları (I_{sc}) verimin artmasını sağlayacak değerlerde olurlar. Dahası, bu yapıdaki hücreler, kendiliğinden hizalanan, seçici bir donör yapı içerir; bu da rekombinasyonu azaltır ve böylelikle yüksek açık devre voltajlarının elde edilmesini sağlar. Gömülü kontakt teknolojisinin verimlilik avantajlarının yanı sıra, maliyet ve performans avantajları da sağlar. $\$/W$ paritesinde değerlendirmek gerekirse, gömülü bir kontak güneş hücresinin maliyeti, geleneksel güneş hücreleri ile aynıdır. Bununla birlikte, PV sisteminde belirli yüzey alana bağlılığın ve sabit maliyetlerin dahil edilmesi ile, daha yüksek verimi daha az maliyet ile sağlamış olurlar. Gömülü kontakt hücre teknolojisinin ek bir avantajı da konsantratör sistemleri için kullanılabilirleridir [24].

2.1.4. Kadmiyum Tellür Güneş Hücresi (CdTe)

Kadmiyum tellür (CdTe) fotovoltaiik (PV) teknolojisi, güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için tasarlanmış ince bir yarı iletken kadmiyum tellürün katman olarak kullanımına dayanmaktadır [29]. Kadmiyum tellür hücreler, çok kilovatlı sistemlerde kristal silikondan yapılmış geleneksel güneş pillerine göre daha düşük maliyetli ince film teknolojisidir [25]- [27]. CdTe hücreler, tüm güneş enerjisi teknolojilerinin arasında en küçük karbon ayak izi, en düşük su kullanımı ve maliyetini en kısa sürede karşılama gibi önemli özelliklere sahiptir [28]- [30]. CdTe hücreler ile kurulmuş bir tesisin kendi kurulum/üretim maliyetini bir yıldan daha kısa sürede karşılaması, daha hızlı karbon azaltımına olanak tanır. Ancak Kadmiyum elementinin doğası gereği toksik etkilere sahip olması, modüller ömrünü tamamladıktan geride çevresel bir endişe bırakması anlamına gelir. Bu sebeple bu teknolojiye yönelim noktasında çevresel tahribatın en aza indirgenmesi ve sonrasında ticari ürün niteliğinde sunulması beklenmektedir [31]. Ayrıca orta vadeli gelecekte kadmiyum temini de zorlaşacağından bu teknolojiye yapılan yatırım faaliyetleri günden güne azalmaktadır [16].

Dünya üzerindeki anyonik formda bulunan Tellür miktarı, platininkiyle karşılaştırılabilecek kadar azdır ve bu da modülün maliyetine önemli katkıda bulunur. [33]

CdTe fotovoltaiik, “**Topaz Güneş Enerjisi Çiftliği**” gibi dünyanın en büyük fotovoltaiik enerji santrallerinin bazılarında kullanılır. Dünya çapındaki PV

üretiminin %5,1'lik bir paya sahip olduğu CdTe teknolojisi 2013'te ince film pazarının yarısından fazlasına sahipti [34]. CdTe ince film teknolojisinin önde gelen üreticisi, Arizona merkezli First Solar şirkettir.

Kadmiyum bilinen en zehirli ve 6 elementten birisidir. Bununla birlikte, CdTe, elemental kadmiyumdan daha az toksiktir. Ama bu zararsız olduğunu göstermez. Kadmiyum tellur yutulursa, tozu solunursa veya deri ile temas eder ise hemen hastaneye gidilmelidir. Kadmiyum tellur'un Toksisitesi sadece kadmiyum içermesinden kaynaklanmaz. Yapılan araştırmalar, kadmiyum tellür kuantum noktalarının reaktif yüzeylere sahip olduğunu ve bu sebeple hücre zarında, mitokondride ve hücre çekirdeğinde reaktif oksijen hasarını tetiklemeye yol açtığını göstermiştir. Kadmiyum tellür imhası ve uzun vadede güvenli bir şekilde kullanılabilmesi üzerine birçok çalışma yapılmış, bu tehditi anlamak ve aşmak için ciddi çaba gösterilmiştir. ABD Enerji Bakanlığı'nın Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'ndan araştırmacılar, büyük ölçekli CdTe PV modüllerinin sağlık ve çevre için herhangi bir risk oluşturmadığını ve faydalı ömrünün sonunda modüllerin geri dönüştürülmesinin çevresel kaygıları ortadan kaldırdığını açıklamışlardır. Bu hücrelerden oluşturulan modüller çalışma sırasında herhangi bir kirlenici madde üretmez ve ayrıca fosil yakıtların yerini değiştirerek büyük çevresel faydalar sağlayabilirler ancak yine de kullanımı noktasında şüpheyle yaklaşılmaktadır. CdTe PV modülleri, Cd'nin mevcut diğer tüm kullanımlarından daha çevre dostudur. Avrupa Birliği ve Çin kadmiyum kullanımı konusunda temkinli davranmaktadır. AB'de Kadmiyum bileşikleri kanserojen madde olarak kabul edilirken, Çin'de de sadece ihraç edilmesi yasaldır. Ancak günümüzde en yaygın görüş, Kadmiyum Tellur tabanlı hücrelerin konut ve endüstriyel yapıların çatılarında kullanılmasının büyük bir çevresel problem oluşturmayacağıdır [35].

2.1.5. Konsantre PV Hücresi (CVP ve HCVP)

Bir Konsantre Fotovoltaik (CPV) sistemi, geleneksel fotovoltaik teknolojinin yaptığı gibi ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür ancak maksimum verim için her hücrenin üzerine geniş bir güneş ışığı alanını odaklamak için gelişmiş bir optik sistem kullanır. Bazen düşük konsantrasyon (LCPV) ve yüksek konsantrasyon (HCPV) gibi konsantrasyon faktörü ile farklılaşan farklı CPV tasarımları mevcuttur.

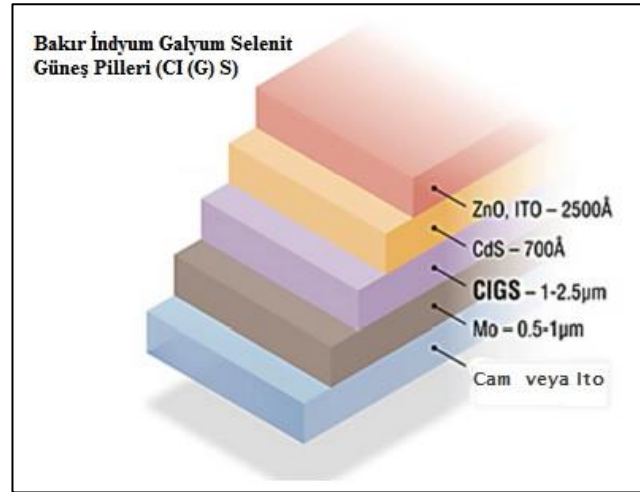
Konvansiyonel fotovoltaik sistemlerin aksine, güneş ışığını küçük ancak oldukça verimli, çok jonksiyonlu (Multi-Junction) güneş hücrelerine odaklamak için mercekler ve eğimli aynalar kullanılır. Buna ek olarak, CPV sistemleri genellikle verimliliklerini artırmak için güneş izleyicilerini (güneşin geliş açısına göre yönelimini değiştirmesini sağlayan sistemler) ve ısı kaynaklı direçleri ortadan kaldırmak için soğutma sistemi kullanır [36]. CPV teknolojisi 70'li yıllardan beri varolan ve son yıllarda hızla gelişen bir teknolojidir. Bu gelişmeler sayesinde, CPV ler canlılık kazanmış ve güneşli ancak kuru iklimlerle (çöl-kurak arazi gibi) dünyanın birçok bölgesinde boy göstermektedir. CPV sistemleri, birbirine seri ve/veya paralel bağlı olan bir dizi güneş hücresine önemli miktarlarda güneş ışığı "yoğunlaştırarak" optik bileşenlere sahiptir. Özellikle yüksek konsantrasyonlu fotovoltaik (HCPV) sistemler barındıran santraller yakın gelecekte pazarın büyük bir kısmına hâkim olma potansiyeline sahiptir. Mevcut tüm PV teknolojilerinin arasında en yüksek verimliliğine sahip hücrelerdir ve hücre sayısının az olması maliyeti de düşürmektedir [37]. Konsantre fotovoltaik (CPV) modüller, geleneksel PV modülleri ile aynı şekilde çalışır, ancak gelen ışınları güneş hücrelerine konsantre etmek için optik cihazlar kullanırlar. Bu yoğunlaşma faktörü (1100 keze kadar yoğunlaştırılabilir) gerekli yarı iletken miktarını önemli derecede azaltır ($<0,1\%$) ve verimlilik seviyeleri yüzde 41'in üzerinde olan çok yüksek performanslı hücreler üretimine olanak sağlar. Ancak bu PV lerin düzgün çalışabilmesi için yönelimleri çok önemlidir. Optik sistemler güneşe doğru bakacak şekilde konuşturılmalıdır. Bu nedenle, CPV modülleri, gün boyunca güneşi akıllıca ve otomatik olarak takip edebilen yüksek performanslı "güneş izleyiciler" ile birlikte kullanılır.



Şekil 2. 4: Konsantre PV hücresi (CVP ve HCVP).

2.1.6. Bakır İndiyum Galyum Selenit Güneş Hücreleri (CI (G) S)

Güneş ışınlarından enerji elde etme noktasında en ilginç ve tartışmalı materyallerden biri, Bakır-İndiyum-Galyum-Selenit veya kısaca CIGS'dir. Bir bakır indiyum galyum selenit güneş hücresi (veya CIGS hücresi, bazen CI (G) S veya CIS hücresi), güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan ince film güneş hücresidir. Bu tür hücreler, cam veya plastik alttaş üzerine ince bir bakır katmanı, indiyum, galyum ve selenit kaplayarak üretilirler. Akım toplamak için ön ve arka elektrotları bir devreyi tamamlayacak şekilde dizayn etmek yeterlidir. Malzeme yüksek soğurma katsayısına sahip olduğundan diğer yarı iletken malzemelerden çok daha ince bir film katmanı yeterli olabilir.



Şekil 2. 5: CIGS güneş hücreleri yapısı.

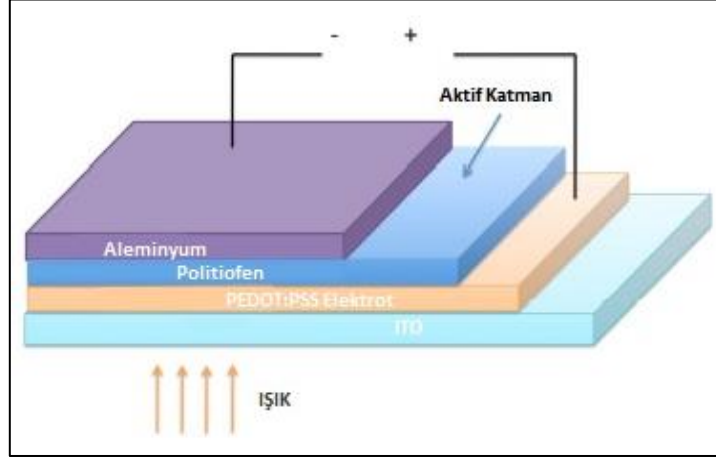
CIGS, Kadmiyum-Tellür ve amorf silikon güneş hücreleri ile beraber 3 temel ince film PV teknolojisinden birisidir. Bu malzemeler gibi, CIGS katmanları da çok ince olduğundan, esnek bir yapıya sahiptir. Ancak uygulama noktasında yüksek sıcaklara gereksinim duyulduğundan alttaşın da bu yüksek ısıya dayanabilecek bir malzeme olması gerekmektedir. Bu sebeple genellikle alttaş olarak yalıtkan ve ısıya dayanıklı olması sebebiyle cam tercih edilmektedir. CIGS hücrelerinin düşük sıcaklıkta kaplanması ile ilgili yapılan araştırmalar neticesinde katedilen yol CIGS tabanlı modülleri modern poli-silikon tabanlı hücrelerle yarışabilecek düzeye getirmiştir. Fotovoltaik endüstrisinde CIGS, en iyi ince film PV malzemesi olarak bilinir [38].

2.1.7. Galyum Arsenik Germanyum Güneş Hücresi (GaAs)

Galyum arsenit iki temel elementten oluşur; galyum ve arsenik. Bu iki element bağ yaptığında, birçok ilginç özelliğe sahip GaAs bileşimini oluştururlar. Galyum arsenitin doymuş elektron hızı ve elektron mobilitesi silikondan daha büyük olan bir yarıiletkenlerdir. Yarı iletkenlerin iletkenliği yalıtkanlık ve iletkenlik bandının arasında yer alır ve ortam sıcaklığı gibi parametreler ile iletkenlik kabiliyetleri değişim gösterir. Bu özelliği sayesinde birçok teknolojik gelişime katkı sağlamıştır. Çinko blend kristal yapısına sahiptir. Galyum arsenit, mikrodalga frekanslı entegre devreler, monolitik mikrodalga entegre devreler, kızılötesi ışık yayan diyotlar, lazer diyotları, güneş pilleri ve optik pencereler gibi cihazların imalatında kullanılır [39]. Silisyumdan daha büyük bir elektron mobilitesine sahip olması nedeniyle, silikonun yetersiz kaldığı gereksinimlerde oldukça iyi sonuçlar verebilmektedir. GaAs tabanlı Transistörler 250 GHz üzerindeki frekanslarda dahi efektif bir biçimde çalışabilirler. Daha düşük çalışma değerlerindeki transistörler dahi, silikon muadilleri ile aynı yüksek frekanslarda çalışırken daha az ses üretmektedir. Bu bile başlı başına bir tercih sebebidir. Ayrıca galyum arsenitin arıza voltajı silikon türevlerine göre daha yüksektir. Bu sebeplerden ötürü, galyum arsenit geleceğin teknolojisine yöne verebileceği düşünülen bir malzemedir. Bunlara örnek olarak hücresel telefonlar, uydular ve uydu iletişimi, mikro ve nano ölçekli yarıiletkenler, radar sistemleri ve hatta nano tabanlı güneş hücre üretimini içermektedir. Güneş hücresi uygulamalarında ise ışık, hücrenin ışık alan yüzeyine vurur ve ardından GaAs yarıiletkeninden üretilmiş emilim bölgesine geçiş yapar. Bu, absorbe edilen ışığın enerjisinin yarı iletkenlere, yani galyum arsenitime aktarıldığı anlamına gelir. Enerji, elektronları uyarır ve elektron salınımını sağlar böylece atom ile elektron arasındaki önceki bağlanma ortadan kalkmış olur. Böylelikle serbestçe akmalar meydana gelir. Fotovoltaik hücrede aynı zamanda bir elektrik alanı vardır. Bu alan, ışık emilimiyle serbest bırakılan elektronları belli bir yönde akmaya zorlar. Bu elektron akışı, hücrenin birbirini tamamlaması için gerekli elektriksel akımı sağlar. Bu akımın sağlanması için hücrenin üst ve altın katmanlarına iletkenliği yüksek metal plakalar kaplanır veya yerleştirilir. GaAs fotovoltaik hücre yaratmanın birçok yolu vardır. Ancak hepsinin temelinde GaAs kristali oluşturulması gerekmektedir. Aksi takdirde güneş hücresi üzerinden akım geçisi gözlenemez

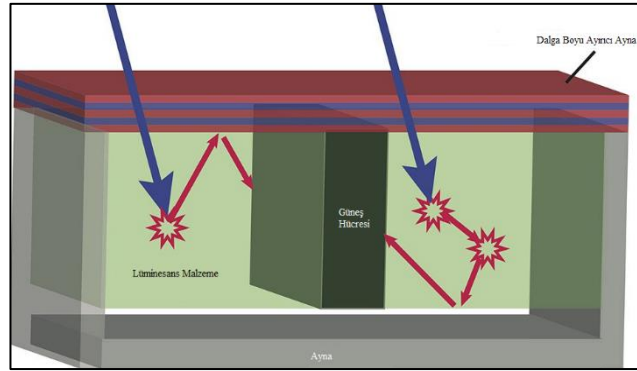
2.1.8. Hibrit Güneş Hücreleri

Hibrit güneş hücreleri hem organik hem de inorganik yarıiletkenlerin avantajlarını bir araya getirir. Hibrid fotovoltaiik hücreler donör ve aktarma delikleri olarak ışığı emen konjüge polimerlerden oluşan organik maddelere sahiptir [40]. Hibrit hücrelerdeki inorganik materyaller yapıdaki donör ve elektron transporter (alıcı ve elektron taşıyıcı) olarak kullanılır. Fotoaktif katmanı oluşturmak için ise organik malzeme elektron taşıyıcılığı yüksek bir malzeme ile karıştırılır [41]. İki malzemenin karışımı neticesinde, daha yüksek güç dönüştürme verimliliğine sahip olabilen bir hetero-junktion tipi yapı oluşturulur [42]. Malzemelerden biri foton absorbe edici ve eksiton(elektron-hole) verici gibi davranır. Elektron ve hole (boşluk) arasındaki kolombik etkileşmelerden dolayı eksitonları ayırmak güçtür. Tekrar rekombine olmayı engellemek için diğer malzemede faydalanılır. Eksitonlar oluşturulduktan sonra, yükler delokalize olmuş donör-akseptör kompleksi üzerinde akıma katkı sağlamak adına metal kontak noktasına transfer edilir [43]. Eksitonun ayrılması için gereken enerji, donörün ve akseptörün iletim bantları (LUMO'ları) arasındaki enerji kaymasıyla sağlanır [42]. Ayrışmadan sonra, yükler ilgili elektrotlara taşınır. Bir eksitonun, rekombinasyonla yok olma durumundan önce bir malzeme boyunca katedebileceği ortalama mesafe “eksitiyon difüzyon uzunluğu” olarak tanımlanır ve polimer tabanlı malzemelerde 5-10 nanometre düzeyindedir [44]. Ayrıca bozunum için zaman ölçeği 1 pikosaniyeden 1 nanosaniyeye kadardır [45]. Akseptöre yakın noktalarda üretilen excitonların foto-akıma katkıda bulunmaları kolaydır. Ancak uzak bölgelerde üretilen eksitonların, difüzyon uzunluğunun fazla olmaması sebebiyle rekombine olmasını engellemek adına, heterojunction yapılar geliştirilmiştir. Parçacıkların polimer matrisi boyunca dispersif hale getirilmesi, yük aktarımının gerçekleşmesi için daha büyük bir arayüz alanı oluşturulmasını ve rekombinasyon ihtimalinin en aza indirgenmesini sağlar.



Şekil 2. 6: Karbon nanotüp tabanlı güneş hücrelerinin yapısı.

2.1.9. Lüminesans Güneş Hücresi (LSC)



Şekil 2. 7: Lüminesans güneş hücresi (LSC).

Lüminesans güneş hücreleri, geniş alanlarda güneş ışınlarını absorbe etmeye yarayan ince katmanlardan yararlanır. Bu katmanlar genellikle organik boyalar, kuantum dot'lar veya nadir toprak elementleri/kompleksleri gibi parlak malzemeler ile katkılanmış bir polimerden (polimetilmetakrilat [PMMA gibi]) oluşur [46]. LSC lerin diğer hücre türlerine göre en büyük avantajı hem güneşten gelen ışınların hem de yansıma ışınlarının enerji üretimine katkı sağlayabilmesine olanak sağlamasıdır. Bu sebeple güneşin takip edilmesi, güneşin konumuna göre yönelim değiştirilmesine gerek duymaz. LSC lerin teorik verim değerleri oldukça yüksek değerlerdedir. Bu sebeple yoğun bir şekilde araştırmalar devam etmektedir. Spektrumdan etkin bir şekilde faydalanmak adına LSC lerden beklenenler, %100 ışık emisyonu ve uzun vadede kararlılığını koruyabilmesidir [47], [48].

2.1.10. a-Si/ μ c-Si Tabanlı Tandem Hücreler

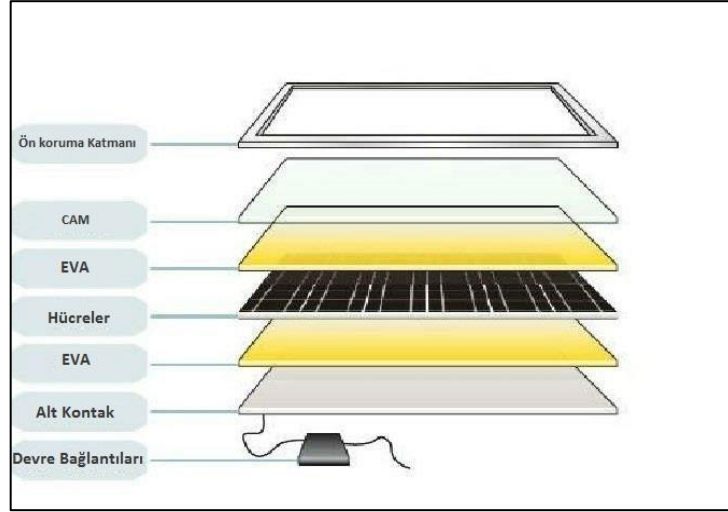
Tandem hücreler, üst üste istiflenmiş iki güneş hücresinden oluşan multi-junction mimarisine dayanan ince film güneş hücreleridir. İnce amorf silisyum üst katmanı mavi ışığı absorbe ederken, alt katman olarak kaplanmış kalın mikrokristalin silikon tabaka ise kırmızı ve yakın kızılötesi ışığı emer. Böylece güneş spektrumunun daha geniş bir bant aralığını soğurmuş olur. Mikrokristalin silikon alt katman ve amorf silikon üst katmandan oluşan "Micromorph" tandem güneş hücreleri, en çok umut vaadeden ince film silikon güneş hücresi olarak kabul edilir. Bu konuda yapılan araştırmalar ilerleyen zamanlarda daha düşük üretim maliyetleri ve aynı zamanda daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği elde edilebileceğini gösteriyor. Amorf Silikon (1.7eV) ve mikrokristalize Silikon (1.1eV) bant genişlikleri tandem güneş hücreleri için çok uygundur. Bu fabrikasyon yöntemi ile üretilen hücrelerin Shockley-Queisser sınırı %30'un üzerinde dönüşüm verimliliği sağlar. Ancak gerçekte bu sınıra ulaşamamıştır ve tipik kararlı verimler yaklaşık %9 (dünya rekoru%11,7) civarında seyretmektedir. Yine de mevcut tekniklerle dahi tek katmanlı geleneksel pillerin üzerinde bir verime sahiptir. Silikon ince film güneş hücrelerinin düşük maliyetinin nedeni, silikon wafer (200 μ m) ile karşılaştırıldığında çok düşük kalınlığı (2 μ m) olmasıdır. Fakat kırmızı ve kızılötesi dalga boyu aralığında 2 μ m silisyum tüm ışığı absorbe edebilmek için yeterli değildir ve bu nedenle ışığı hapsedecek başka yapılar gerekmektedir. Işığı hapsederek tamamen absorbe olmasını sağlayacak yapılar üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

2.1.11. Monokristal Güneş Hücresi (Mono-Si)

Monokristal silikon (veya "tek kristal silikon", "tek kristal Si" "mono c-Si" veya sadece mono-Si) bugün neredeyse tüm elektronik ekipmanlarda kullanılan silikon çiplerin temel maddesidir. Mono-Si, aynı zamanda, güneş pilleri üretiminde ışığa duyarlı malzeme olarak görev yapmaktadır. Yapının içindeki kristal örgüsünün kesintisiz, kenarları kırılmamış ve herhangi bir sınırı içermediği silikon katmandan oluşur. Mono-Si son derece saflaştırılmış silikon ile oluşturulabileceği gibi, eser miktarda yarıiletken özelliklerini değiştirebilecek diğer elementler ile katkılanmış yapıda da oluşturulabilir. Çoğu silikon monokristal, Czochralski prosesi ile üretilir.

Bu proses gereği 2 metreye kadar ve birkaç yüz kilogram ağırlığında külçe halinde silindirik kristal bir yapı üretilir. Bu silindir daha sonra birkaç yüz mikron kalınlığında ince levhalara dilimlenir [49].

Monokristal silikon teknolojisi, içinde bulunduğumuz çağa “silikon çağı” denmesinin en büyük sebebidir. Çünkü teknolojinin gelişiminin yanında yatırım ve uygulama maliyetlerinin düşürülmesi de şarttır.



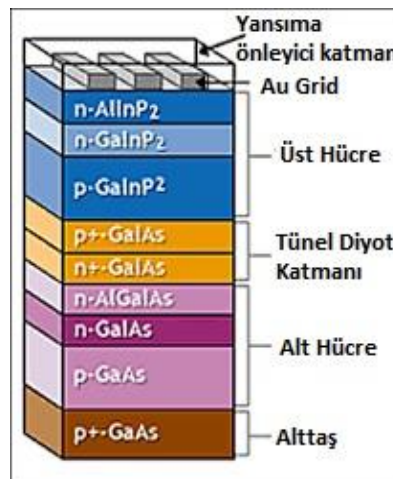
Şekil 2. 8: Monokristal güneş hücresi.

Monokristalin silikon gibi, amorf silikon ve küçük kristallerden oluşturulmuş polikristal silikonda ince film güneş hücresi üretiminde kullanılmaktadır.

2.1.12. Multi-junction Güneş Hücresi (MJ)

Çok bağlantılı (MJ) güneş hücreleri, farklı yarıiletken malzemelerden yapılmış birden fazla p-n kavşağına sahip güneş hücreleridir. Her malzemenin p-n birleşimi farklı ışık dalga boylarıyla etkileşime girerek elektrik akımı üretecektir. Çok sayıda yarı iletken malzemenin kullanılması, hücrenin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme verimliliğini artıran daha geniş bir dalga boyu aralığı absorbe edebilmesine izin verir. Geleneksel tek katmanlı hücrelerin teorik verimi %34'tür. Teorik olarak, son derece yoğun güneş ışığı altında sonsuz sayıda MJ hücreler %86,8'lik bir verim değerine ulaşabilirler [50]. Günümüzde, geleneksel kristal silikon güneş hücrelerinin en iyi laboratuvar örnekleri %20 ila %25 arasındaki verimlilik

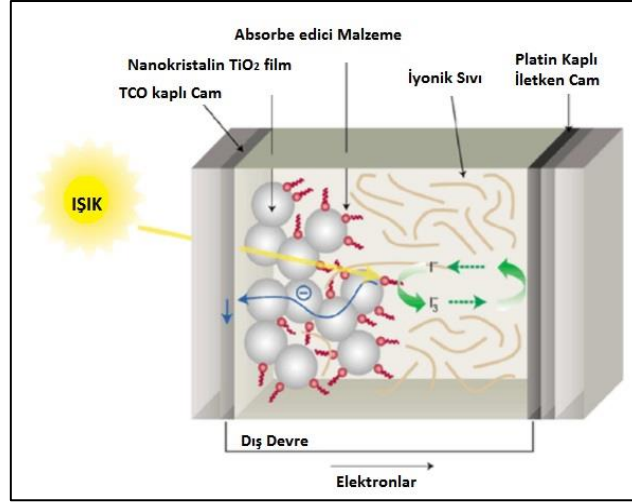
gösterirken çok bağlantılı (MJ) hücrelerin laboratuvar örnekleri %43'ün üzerinde performans göstermiştir. Tandem yapılarda, iki katmanlı hücrelerin ticari örnekleri, normal güneş ışığı altında %30 verimle çalışabilir ve yoğun güneş ışığı altında %40'a kadar yükselir. Bununla birlikte, bu verimlilik değerini elde edebilmek için çok daha karışık hücre tasarımı beraberinde kararlılığı sekteye uğratabilecek birçok etken doğurur. Ayrıca üretim maliyetleri de oldukça fazladır. Bugüne kadar, gerek maliyet/performans gerekse elde edilen güç/panel ağırlıkları sebebi ile kullanımları çok sınırlı kalmıştır. Karasal uygulamalarda maliyetinin fazla olması, havacılık/uzay uygulamalarında ise ağırlığının fazla olması sebebi ile pek tercih sebebi olmayı başaramamışlardır. Ancak mevcut hücre dizaynlarının performansını arttırmak için tandem üretim teknikleri kullanılmaktadır. Çok bağlantılı (MJ) güneş hücreleri, yüksek işletme verimliliklerinde elektrik üretmek için çoklu yarı iletken katmanlar (alt hücreler) kullanır. Her tabaka, güneş spektrumunun spesifik bir bölümünü verimli bir şekilde absorbe etmek için tasarlanmış benzersiz bir bant aralığına sahiptir. MJ yapılar tek katmanlı (SJ) cihazlara kıyasla iki önemli avantaja sahiptir: daha geniş bir yelpazedeki fotonların absorpsiyonu ve bu fotonlardan daha etkili bir enerji eldesi. Haliyle bir MJ hücresinin en düşük bant aralığı tipik bir SJ bant aralığından daha düşük olacaktır. Bu nedenle, MJ hücresi, SJ bant aralığından daha az enerjiye sahip ancak kendi en düşük bant aralığından daha büyük olan fazladan fotonları absorbe edebilir. MJ hücresinin, foton enerjisine daha yakın bant aralığına olması ısınmadan kaynaklı kayıpları azaltacağı için aynı fotonları daha verimli bir şekilde absorbe edebilmeyi sağlar.



Şekil 2. 9: Multi-junction güneş hücresi (MJ).

2.1.13. Nanokristal Güneş Hücresi

Nanokristal güneş pilleri adını nanokristallerle kaplanmış bir alttaşa sahip olmasından alır. Nanokristaller genel olarak silikon, CdTe veya CIGS bazlıdır ve altlıklar genellikle silikon veya çeşitli organik iletkenlerden oluşur. Boya duyarlı güneş hücreleri de bir nevi nanokristal güneş hücresi gibidir, ancak bu tür hücrelerde nano yapı, alttaşın bir parçasıdır. Nanokristal yapılarda önceki üretim yöntemleri, pahalı moleküler beam epitaksi süreçlerine dayanıyordu, ancak gelişen teknoloji sayesinde kolloidal sentez yöntemi, daha düşük maliyetler ile üretim imkânı sunmaktadır. Nanokristallerin ince film katmanı, "dönerek kaplama (spin-coater)" olarak bilinen bir işlemle elde edilir. Bu, bir miktar kuantum dot çözeltisini daha sonra hızlı bir şekilde döndürülen düz bir zemine yerleştirmeye dayanan kaplama yöntemidir. Solüsyon düzgün bir şekilde yayılır ve gerekli kalınlığa ulaşıncaya kadar alt tabaka döndürülür. Mevcut teknoloji ile nanokristal güneş hücresi üretiminin büyük ölçekli üretim ve uygulamalarda uygun olmadığı ileri sürülmektedir [51]. Yakın zamanda yapılan araştırmalar, ikinci nesil ince film güneş hücreleri üretiminde iyi bilinen kurşun selenit (PbSe) yarıiletkeni ve kadmiyum tellür (CdTe) ile denemiştir. Farklı malzeme arayışı da halen devam etmektedir. Silikon nanokristallerden yapılmış güneş hücreleri, yüksek verimli güneş hücrelerine yönelik diğer yaklaşımlara kıyasla maliyet açısından önemli bir avantaj sağlarlar. Örneğin gelişmiş "çok iletkenli" hücreler yüzde 40'dan fazla verimlilik göstermektedir. Fakat bunlar, güneş spektrumunun farklı bölümleri için optimize edilmiş pahalı yarıiletkenleri bir arada tutan karmaşık üretim süreçlerine sahip hücrelerdir. Buna karşın silikon nanokristaller, konvansiyonel güneş hücrelerindeki kimyasallar ile karşılaştırıldığında daha kolay temin edilebilen ve maliyeti daha düşük olan malzemelerdir. Hem maliyeti düşürmek hem de kolay bulunabilen malzeme kullanmak için en ideal yapı tek silikon kristallerinden oluşturulan yapıdır. Bu materyallerin bazıları kurşun veya kadmiyum gibi toksik elementleri içerir ve diğerleri sınırlı tedarikte olan indiyum gibi elementleri kullanır. Ancak silikon hem güvenli hem de bol miktarda bulunur. Ayrıca iyi verim değerleri de oldukça tatmin edicidir. Gerçekten de bu nedenlerden ötürü, silikon günümüzde güneş hücrelerinde kullanılan en yaygın malzemedir ve gelecekte fotovoltaiğin daha yaygın olarak kullanılması için temel yapı taşı olacağı öngörülmektedir.

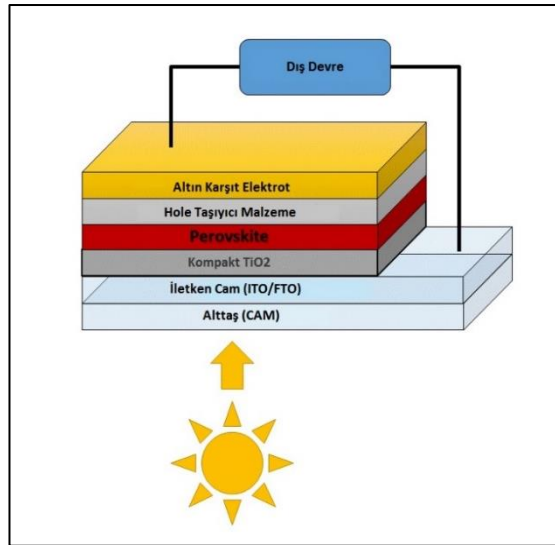


Şekil 2. 10: Nonokristal güneş hücresi.

2.1.14. Perovskite Güneş Hücreleri

‘Perovskite güneş hücresi’ adı, absorbans malzemelerinin ABX_3 kristal yapısından türemiştir ve bu yapıya perovskite yapı denmektedir. En yaygın olarak incelenen perovskite absorbe edici, içeriğine bağlı olarak 2.3 eV ile 1.6 eV arasında bir optik bant aralığına sahip metilamonyum kurşun trihalojenür ($CH_3NH_3PbX_3$, burada X: I-, Br-, Cl- gibi bir halojen iyonudur) ‘dür. Ayrıca Formamidinum kurşun trihalojenür ($H_2NCHNH_2PbX_3$), 2.2 eV ile 1.5 eV arasında bant genişliği ile de umut vaat edicidir [52]. Ortak endişe ise kurşun elementinin de perovskite materyalinin bileşeni olarak dahil edilmesidir [53]. Perovskite güneş hücreleri, geleneksel silikon güneş hücrelerinden daha basit bir şekilde üretilmektedir. Geleneksel silikon hücreler, yüksek saflıkta silikon wafer üretmek için özel temiz oda tesislerinde yüksek sıcaklık (1000°C ’den yüksek) ve vakum gerektiren pahalı, çok aşamalı süreçleri gerektirir. Bu teknikler maliyetli ve üretimi zahmetli tekniklerdir. Buna karşın organik-inorganik perovskite materyali geleneksel laboratuvar ortamında basit kimya ve işleme teknikleriyle üretilbilir [54]. Kurşun ve metilamonyum iyodür, çözücü içinde çözülüp bir altaşa spin coater yöntemi ile kaplanabilir. Kaplama sırasındaki buharlaşmalar ve malzeme içerisindeki kuvvetli iyonik etkileşimlere bağlı olarak iyi kristallenmiş bir perovskite tabakası elde edilebilir. (Ayrıca organik bileşen kristalleşme sıcaklığının düşürülmesine de yardımcı olur). Bununla birlikte, spin kaplama yöntemi tam manasıyla homojen katmanlar sağlamaz, çözeltinin içerisine DMSO ve toluen damlaları gibi diğer kimyasalların eklenmesi homojenliği

sağlamaya yardımcı olabilir [55]. Basit bir perovskite çözelti ile hazırlanan hücrelerde, tabakada boşluklar, kaymalar ve diğer kusurların varlığı gözlenir ve bu da bir güneş pilinin verimliliğini engeller. Bununla birlikte, oda sıcaklığında çözücü-çözücü ekstraksiyonu kullanan başka bir teknik, molekül veya atom boşluğu oluşturmada birkaç santimetre karelik alanlar üzerine 20 nanometre kalınlığındaki katmanlar şeklinde hassas ve kontrollü bir şekilde yüksek kaliteli kristalin filmler kaplayabilmektedir. Bu yöntemde perovskite öncülleri NMP (N-metil-2-pirolidon) denilen bir çözücü içerisinde çözülür ve bir substrat üzerine kaplanır Daha sonra tavlama yerine, substrat dietil eter içinde yıkanır, ikinci bir solvent de NMP çözücüsünü seçici bir şekilde kapar ve uzaklaştırır. Geride son derece pürüzsüz bir perovskite kristali filmi kalır.



Şekil 2. 11: Perovskite güneş hücresi.

Buhar yardımcı tekniklerle, spin kaplama yöntemi ile veya püskürtülerek kaplanacak kurşunun, yaklaşık 150 °C'lik bir sıcaklıkta metilamonyum iyodür ile tavllanır. Bu teknik, daha geniş alanlar üzerinde çok katlı ince filmlerin kaplanmasına olanak sağladığından, diğer tekniklere göre çok büyük bir avantaja sahiptir [56]. Bu, multi-junction hücrelerin üretimi için de geçerli olabilir. Buna ek olarak, buharla kaplanan teknikler, çözelti ile kaplanmış katmanlara göre daha az kalınlık değerlerinde kaplama imkânı sunar. Böyle bir kullanım alanı ve tasarım, mevcut perovskite ve boya duyarlı güneş hücreleri için ortak kullanılan yöntemlerdir. Perovskite hücrelerde üretim maliyeti ve karmaşıklığı, silikon güneş hücrelerinden

çok daha düşüktür. Buhar yardımcı kaplama teknikleri, çözücü kalıntısı riskini azaltan başka solventlerin kullanımına olan ihtiyacı azaltır bu sebeple çözelti kaplama (kullanılan çözelti miktarı azaldığından dolayı) daha ucuzdur. Ancak Perovskite hücrelerde kullanılan organik malzemenin çevre koşullarında bozulma olasılığının fazla olması ve bunun da verimlilikte düşüşe sebep olabileceği bilindiğinden, perovskit güneş hücreleri ile ilgili yürütülen araştırmalar genellikle hücre kararlılığı üzerindedir.

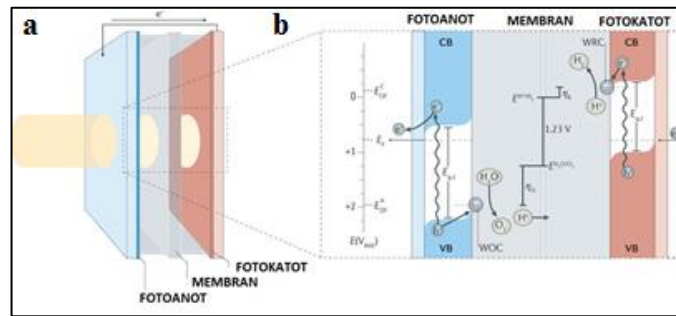
Perovskite güneş hücreleri 2012’de ortaya çıktı, ancak bu kadar kısa sürede %19’dan fazla verimlilik değerine ulaştı. Bu kadar kısa sürede bu denli hızlı bir gelişme hızının, güneş enerjisi araştırmalarında eşi benzeri görülmemektedir. İnorganik materyallerde olduğu gibi iyi verimliliklere sahip olan perovskitler, organik solar kimyasalların sprey gibi uygulanması ile de kaplanabilirler. Profesör David Lidzey'nin Sheffield Üniversitesi'ndeki grubu, tamamen likit formdaki perovskite çözeltisini bir substrat malzeme üzerine püskürterek kaplamanın da mümkün olabileceğini gösterdi. Bu araştırma, güneş hücrelerinin yüksek hacimlerde ve düşük maliyetle üretilmesinin mümkün olduğunu bir kez daha gösterdi. Kullanılan kimyasalın kurşun içeriğinin potansiyel çevresel etkileri ve üretimin ticari boyuta taşınabilmesi için maliyet-fabrikasyon teknikleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. Toksik etkilerden kurtulmak için (kurşun gereksinimini ortadan kaldırmak için) çalışmalar devam etmektedir. Organik güneş hücrelerinin genelinde olduğu gibi uzun vadede kararlı çalışması üzerine de çalışmalar devam etmektedir, çünkü perovskite hücrelerin neme karşı çok dayanıklı olmadıkları bilinmektedir (birkaç damla su, hücrenin etkinliğini tamamen yok edebilir). Atmosferik koşullarda yıllarca dayanabilecek bir güneş modülü üretebilmek şu an için hayal gibi dursa da ilerleyen teknolojik gelişmeler ve daha dayanıklı-toksik etki barındırmayan malzeme arayışı halen devam etmektedir.

2.1.15. Foto Elektrokimyasal Hücreler (PEC)

PEC hücreleri, “suyun hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) gazlarına ayrışması” kimyasal reaksiyonunu gerçekleştirmek için ışık enerjisini (fotonlar) kullanırlar. Bir elektrota batırılmış ve harici bir devreye bağlanmış bir anottan ve bir katottan oluşan hücrelerdir. Tipik olarak, anot veya katot, güneş ışığını emen bir yarıiletken oluşur ve diğer elektrot tipik olarak bir metaldir. Yarıiletken bant aralığından daha

büyük enerjilere sahip fotonlar, yarıiletken ile elektrolit arasındaki (şarj bölgesindeki) elektrik alan ile bölünen elektron-delik çiftleri oluşturarak yarı iletken tarafından absorbe edilebilir. Elektrik alan serbest taşıyıcıları uygun elektroda ulaştırmak için gereklidir. Fotoelektrokimyasal cihazların en büyük avantajları, yarı iletken-elektrolit birleşiminin oluşturduğu (yarıiletken basitçe elektrolitin içine daldırılmıştır) ince, polikristalin yarıiletken filmlerin, ciddi bir verim dönüşüm değer kaybı olmadan kullanılabilmesidir. Foto elektrokimyasal (PEC) hücreler doğrudan güneşten gelen fotonları enerjiye çevirir ve aynı zamanda bir hidrojen üretimi yöntemi sunar. Yapılan araştırmaların birçoğunun amacı, PEC uygulamaları için optimal iletim ve valans bandı kenar hizalamasına sahip olan korozyona dayanıklı yarı iletkenleri tanımlayarak ve uygun tasarım yaparak, PEC hücrelerinin verimliliğini arttırmaktır.

Hem fotoelektrokimyasal cihazların temel anlayışında hem de yüksek enerji dönüştürme verimliliği ve kararlılığı olan sistemlerin geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, fotoelektrokimyasal sistemler pratik güneş enerjisi modülleri için ciddi olarak düşünülmeden önce çok fazla araştırma ve geliştirme yapılmalıdır. Her ne kadar yüksek verimli PEC'ler geliştirilmiş olsa da üretim maliyetlerinin çok olması, kararlılığının hala istenilen düzeylere ulaşamaması ve verim değerlerinin düşük olması sebebi ile ticarileşmeleri yavaşlamıştır. [58], [59] PEC'ler esneklik ve doğrudan hidrojen üretme özelliği de dahil olmak üzere, silikon tabanlı cihazlara kıyasla birçok potansiyel avantaj sunar [57].

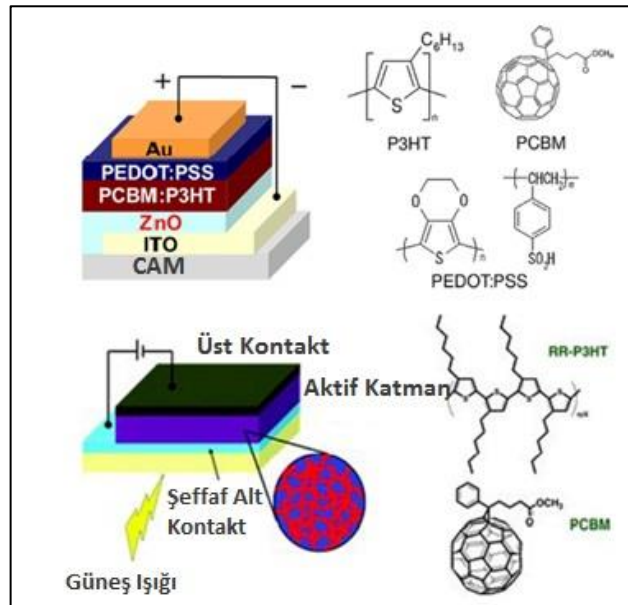


Şekil 2. 12: a) Fotoelektrokimyasal hücre b) İç yapısı.

2.1.16. Polimer Güneş Hücreleri

Polimer güneş hücresi; güneş enerjisinden fotovoltaiik etki ile elektrik üreten polimerlerle, tekrar eden yapısal birimlere sahip büyük moleküllerden yapılmış esnek bir güneş pildir. Ticari güneş pillerinin çoğu, entegre devrelerin ve bilgisayar yongalarının (silikon wafer) imalatında kullanılan malzemeye benzer şekilde istiflenmiş, yüksek oranda saflaştırılmış silikon kristalden üretilmiştir. Bu silikon güneş hücrelerinin yüksek maliyeti ve karmaşık üretim süreci, bilim insanlarının alternatif teknolojilere yönelmesini sağladı. Silisyum tabanlı cihazlara kıyasla, polimer güneş hücreleri potansiyel olarak daha hafif (küçük otonom sensörler için hafiflik çok önemlidir), imal edilebilecek, maliyeti daha düşük, esnek, moleküler düzeyde özelleştirilebilir ve daha az olumsuz çevresel etkiye sahiptir. Polimer güneş hücreleri ayrıca şeffaf fabrikasyon edilebilme özelliğine sahiptir; bu da gözlüklerde, pencerelerde, duvarlarda, vb. Uygulamalarda kullanılabilmesinin önünü açmaktadır. Organik güneş hücrelerinde güneş ışığını emmek için kullanılan malzeme, konjuge polimer gibi organik bir malzemedir. Bununla birlikte, polimer güneş pilinin ve diğer güneş pillerinin arkasındaki temel ilke önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi elektromanyetik radyasyon (ışık) şeklindeki enerjinin elektrik enerjisine (akım ve gerilim) dönüştürülmesi olayıdır. Bu enerji dönüşümü, yarı iletkenlerle mümkündür. Yarı iletkenler, yalıtkan ve iletken arasında bulunan bir grup malzemedir. Silikon, yarıiletkenliğin klasik bir örneğidir ve şu anda çoğu güneş pillerinde kullanılan bir malzemedir. Polimerlerin yarı iletkenler gibi davranabilmeleri, Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid ve Hideki Shirakawa'nın 2000 yılında Kimya'da Nobel Ödülünü aldığı bir buluştur. Buluşlarında yer alan birleşik polimerler, iyot ile elektronları aktarabilmeyi ve polimerlerden güneş pilleri hazırlamayı mümkün kıldı. Böylelikle yeni bir araştırma alanı doğdu. Ancak polimer güneş hücreleri, geleneksel güneş hücrelerinin yanında hem performans hem de istikrar açısından geride kalmışlardır. Bununla birlikte, her zaman çözeltiden üretilebilmek gibi önemli bir potansiyel avantaja sahiptirler. Bu, birinci nesil silikon güneş pillerinde olduğu gibi pahalı vakum kaplama sistemleri kullanmak yerine; baskıyla veya kaplama ile katman oluşturabilmek demektir. Günümüzde, polimer güneş hücreleri için %10'larda verim elde edilebilmektedir [60]. Keşfedildikleri zaman karşılaşılan en büyük sorun olan kararlılık da yapılan araştırma ve tasarım çalışmaları ile aşıldı. Yapılan çalışmalar

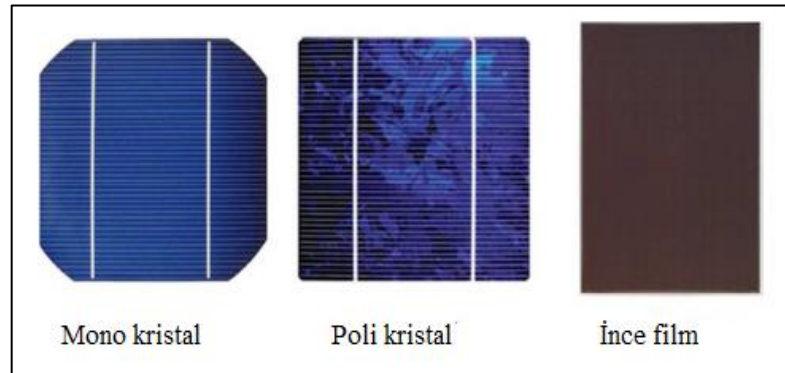
neticesinde birkaç yıl raf ömrüne sahip plastik güneş hücreleri üretildi [61]. Polimer güneş pillerinin avantajlarını saydığımızda kulağa çok cazip geliyor olabilir ancak, polimer güneş hücreleri birtakım dezavantajlara da sahiptir [62]. İlk olarak, inorganik silikon esaslı güneş pilleri 25 yıla kadar kararlı bir şekilde çalışabilirken; polimer esaslı cihazlarda 1-2 yıldan sonra verim kayıpları başlıyor. Verimlilik, bu teknolojinin diğer önemli dezavantajı olmaya devam ediyor. Polimer güneş hücreleri ile elde edilen verimlilik değerleri hala geleneksel teknolojilerle yarışabilecek düzeyde değil [63]. Polimer güneş hücrelerinin ticari uygulamalarının yaygınlaşması için Professor Fredrik C. Krebs üç önemli konunun aşılması gerektiğini belirtiyor [64], [65]. Bu üç konunun da eşit öneme sahip olduğunu ve şunlar olduğunu belirtiyor; fabrikasyon, kararlılık ve verimlilik [66]. Krebs'in yaptığı önerme neticesinde hiçbir konu diğerlerinden daha önemli değilse de güneş hücrelerinin verimliliği uzun zamandan beri özel bir önem arz etmiştir. Bazı uygulama alanlarında (uzay teknolojileri gibi) maliyet ikinci planda kalmaktadır. Ayrıca Krebs'e göre araştırmanın odak noktası bu 3 alanda birden değilse, teknolojinin uygulanmasına yönelik ilerleme yavaş kalacaktır. Son yıllarda hem proseslenebilirlik hem de kararlılık hakkında yayımlanan makale sayısı önemli derecede artmıştır.



Şekil 2. 13: Polimer güneş hücresi.

2.1.17. Polikristal Güneş Hücresi (Multi-Si)

Polisilikon veya poli-Si olarak da adlandırılan polikristalin silikon, güneş fotovoltaik ve elektronik endüstrisi tarafından hammadde olarak kullanılan yüksek saflıkta, polikristalin silikondan oluşur. Polisilikon, ticari olarak satılan silikondan Siemens süreci diye adlandırılan bir kimyasal saflaştırma işlemi ile üretilir. Bu işlem, uçucu silikon bileşiklerinin damıtılmasını ve yüksek sıcaklıklarda silikata dönüşmesini içerir. Gereksinim duyulan bu arıtma yöntemi, akışkan yataklı bir reaktör kullanır. Fotovoltaik endüstride ayrıca kimyasal saflaştırma işlemleri yerine metalürjik yöntemler kullanılarak yükseltilmiş silisyum (UMG-Si) üretilmektedir [67]. Genellikle belirli boyutlarda parçalara ayrılmış ve temiz odalarda paketlenmiş büyük çubuklar olan polisilikon hammaddesi direkt olarak çoklu kristal külçe içine dökülür veya tek kristal katmanı büyütmek için yeniden kristalleştirme işlemine tabi tutulur. Ürünler daha sonra ince silikon wafer'lara dilimlenir ve güneş hücreleri, entegre devreler ve diğer yarıiletken cihazların üretimi için kullanılır. Polisilikon, küçük metal kristallerinden oluşur ve malzeme tipik metal etkisi gösterir. Polisilikon ve multisilikon eşanlamlı olarak sıklıkla kullanılırken, Multi (çoklu) kristal tabiri genellikle 1 mm'den daha büyük kristalleri belirtir. Çok-kristalli güneş hücreleri, hızla büyüyen PV pazarında en yaygın kullanılan güneş hücresi türüdür ve dünya çapında üretilen polisilikonun çoğu bu amaçla tüketilir. 1 megawatt'lık (MW) geleneksel güneş modüllerini üretmek için yaklaşık 5 ton polisilikon gereklidir [68].

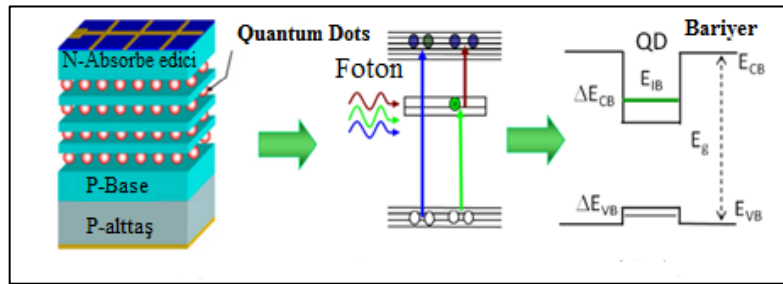


Şekil 2. 14: Solar paneller.

2.1.18. Quantum Dot Güneş Hücresi (CQD)

Bir kuantum dot (nokta) güneş hücresi, absorbe edici fotovoltaik malzeme olarak kuantum noktalar kullanan bir güneş hücresidir. Silika, bakır indiyum galyum selenit (CIGS) veya CdTe gibi malzemelerin yerine alternatif malzeme arayışı çalışmaları sonrası ortaya çıkmıştır. Kuantum noktaları, noktaların boyutunu değiştirerek geniş bir enerji yelpazesinde kontrol edilebilen bir bant aralığına sahiptir. Bu özellik, kuantum noktaları, güneş tayfının farklı kısımlarını absorbe ederek verimliliği artırmak için çeşitli malzemelerin kullanıldığı tandem ve çok bağlantılı (multi-junction) güneş hücreleri için çekici hale gelmiştir. Kuantum noktaları, "Exciton Bohr yarıçapının" altına düşmüş yarı iletken parçacıklardır. Kuantum noktalarına "suni atomlar" denir. Bu suni atomların enerji seviyeleri boyutları değiştirilerek ayarlanabilir; bu da bant aralığını tanımlar. Kuantum noktalar, altında kaplanmış olan kimyasalı veya fabrikasyon yöntemlerini değiştirmeden çeşitli bant genişlikleri arasında geçiş yapmaya imkân tanıyan bir dizi boyutta büyütülebilir [69]. Tipik kimyasal yöntemler kullanılarak üretilen hücrelerde, absorpsiyon bantının ayarlanması, sentez süresini veya sıcaklığını değiştirerek gerçekleştirilir. Bant aralığının kolay ayarlanabilme yeteneği, kuantum noktalarını güneş hücresi üretiminde arzu edilen bir malzeme haline getirdi. Kurşun sülfür (PbS) CQD'leri kullanan single-junction hücreler, klasik olarak elde etmesi genellikle çok zor olan uzak kızılötesi frekanslardaki ışımaları dahi soğurabilir. Dünya'ya ulaşan güneş enerjisinin yarısı kızılötesi ve bu kızılötesi ışımaların da büyük bir kısmı yakın kızılötesi bölgesindedir. Bir kuantum dot güneş hücresi, kızılötesi ışınları da absorbe edebilir ve bu bant genişliği istenildiği şekilde değiştirilebilir bir hücre yapısına sahiptir [70]. Dahası, CQD 'ler kolay sentez ve hazırlanma imkânı sunar. Kolloidal bir sıvı içinde asılı durumda bulunabilen kuantum noktalar, en kompleks ekipman olarak çeker ocak kullanılarak dahi hücre içine dahil edilebilirler. CQD 'ler tipik olarak küçük partiler halinde sentezlenir. Noktalar, küçük ölçekli ihtiyaçlarda spin kaplama yöntemi ile bir alt tabaka üzerine kaplanabilir. Büyük ölçekli üretim için ise, püskürtme veya rulo baskı sistemleri gibi düşük maliyetli uygulama yöntemleri kullanılabilir. Bu teknolojinin ilk örnekleri pahalı moleküler sentez ve epitaksi süreçleri kullandı, ancak daha sonra daha ucuz üretim yöntemleri ile de kaplanabilen teknikler geliştirildi. Konsantre nanoparçacık çözeltileri, nanokristalleri çözeltide

asılı tutan uzun hidrokarbon ligandları ile stabilize edilir. Bir katı oluşturmak için bu çözeltiler aşağıya indirilir ve uzun stabilize edici ligandların yerini kısa zincirli çapraz bağlayıcılarla değiştirirler. Nanokristalin yüzeyinin kimyasal olarak mühendisliği, nanokristallerin daha iyi pasifleştirilebilmesi ve taşıyıcı rekombinasyon yoluyla cihaz performansını kısıtlayacak zararlı tuzak durumlarını azaltabilir. Bu yaklaşım, %7,0'lik bir verimlilik ile üretilir [71]. 2014 yılında, oksijenle bağlanmayan bir ligand olarak iyodür kullanımı önerildi. Bu çalışmalar neticesinde, iyodürün stabil n-ve p-tipi tabakaları koruduğu ve absorpsiyon verimliliğini arttırdığı görülmüştür. Bu da %8'e kadar güç dönüştürme verimliliği sağlamıştır [72].

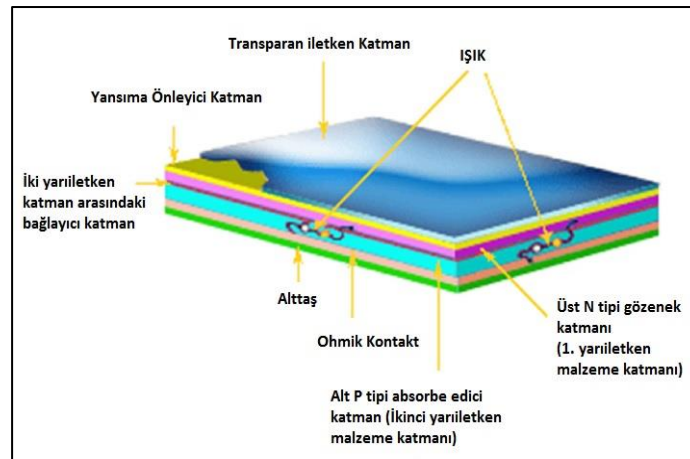


Şekil 2. 15: Quantum dots güneş hücresi.

2.1.19. İnce Film Güneş Hücresi (TFSC)

İnce film fotovoltaik hücre (TFPV) olarak da adlandırılan, ince film güneş hücreleri (TFSC), bir veya daha fazla ince tabaka veya ince film (TF) fotovoltaik materyalin cam, plastik veya metal gibi alt tabaka üzerine kaplanması ile üretilir. İnce film güneş pilleri, kadmium tellür (CdTe), bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) amorf silikon (a-Si, TF-Si) ve diğer ince film gibi çeşitli teknolojilerde ticari olarak kullanılmaktadır. Kullanılan filmin kalınlığı Silikon güneş hücrelerine kıyasla çok çok daha incedir. Bu da ince film hücrelerinin esnek olmasını, daha düşük ağırlıkta olmasını ve daha az sürtünmeye sahip olmasını sağlar. Entegre fotovoltaiklerin yapımında, gözlüklerde, şeffaf hücre üretimlerinde ve pencerelerde kullanılabilecek fotovoltaik uygulamalarda kullanılır. İnce film her zaman geleneksel c-Si teknolojisinden daha ucuz ancak daha az verime sahip olmuştur. Bununla birlikte, yıllar içinde verim değerlerinde belirgin bir gelişme gösterdiler ve CdTe ve CIGS için laboratuvar hücresi verimliliği şu anda çoğu güneş PV sisteminde

kullanılan baskın materyal olan çok kristalli silikondan daha iyi performans göstermektedir. (%20lerin üzerinde) ancak bu denli yüksek verime sahip hücrelerin ticari uygulamalarındaki kararsızlığı sağlanabilmiş değildir. 23,24 bu iyileştirmelere rağmen, ince filmin pazar payı son 20 yılda hiçbir zaman %20'den fazla olmamış ve 2013'te dünya çapında fotovoltaiik üretiminin yaklaşık %9'una gerilemiştir.



Şekil 2. 16: İnce film güneş hücresi.

2.1.20. Silikonlu Güneş Hücreleri

Siyah silikon güneş hücrelerinin yapısı, kristalin silikon güneş hücrelerinkine benzerdir. Aradaki fark, siyah silikonlu güneş hücrelerinin yüzeyinde siyah görünmesi için bir işlem uygulanmasıdır. Peki ama neden böyle bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır? Sıcak bir yaz gününde siyah bir Tshirt giydiğinizi düşünün. Siyah renk Daha fazla güneş ışığı emilimine sahip olduğu için siyah renkli t-shirt sizi, açık renkli t-shirtlere nazaran daha fazla bunaltır. Ancak bir güneş hücresi için daha fazla absorbsiyon daha fazla enerji demektir. Çok güneş ışığı almayan, ancak aldıkları ışığın iyi bir şekilde kullanılmasını isteyen alanlar için çok kullanışlı bir seçenektir. Siyah silikon, basit bir silikon parçasının üzerine nano ölçekli iğnelerin yoğun bir ağını ekleyerek üretilebilir. Malzemeyi bu şekilde modifiye etmek çok daha az yansıtıcı olmasını sağlar ve çok düşük açılardan geldiğinde bile ışığı yakalamak için güneş hücrelerine imkân sağlar. Siyah silikon hücreler adını, alt katman olarak siyah silikon kullanılmasından alır. Bu, özellikle kutuplara yakın ülkelerde, gün boyunca güneş pillerinin verimini artırmak için iyi bir yoldur. Ayrıca siyah silikon hücrelerin maliyeti daha düşük olabilir, zira birçok güneş hücresinde yansıma önleyici “anti-

reflecting” kaplama kullanılırken, siyah silikon güneş hücrelerinde bu katmana gerek duyulmaz. Siyah silikon hücreler teknolojisinin ilerlemesinin önündeki en büyük engel, rekombinasyon olayıdır. Bir foton, bir güneş hücresi içinde silikon atomuna çarptığında, fazla enerji daha sonra elektrik üretmek için kullanılan bir elektronu serbest bırakır. Rekombinasyon silikonun yüzey alanı ile orantılıdır ve siyah silikon yüzeyindeki iğneler yüzey alanını o kadar çok yükseltir ki serbest elektronların yaklaşık yarısı bu şekilde "kaybolur". Yapılan son araştırmalarda Profesör Hele Savin'in liderliğinde bir grup araştırmacı bu sorunu çözmeyi başardı ve verimliliği yüzde 22,1'e yükseltti. Araştırmacılar, daha düşük açılardan güneş ışığını kabul etme yetenekleri sayesinde, siyah silikon hücreler üzerinde aynı nominal verime sahip bir hücreden% 3 daha fazla enerji toplayabileceklerini gösterebildikleri için gerçek yaşam koşullarda kullanabilecek en etkin hücre olarak siyah silikon hücreleri öne sürdüler.Savin ve meslektaşları nanometrik yapıların üstünde kimyasal ve elektronik bir kalkan gibi davranan ince bir alüminyum film uygulayarak rekombinasyonu kontrol altında tutmayı başardılar.Bu iki değişiklik, serbest bırakılan elektronların yalnızca %4 ünün önceki %50'ye kıyasla yeniden birleştiği anlamına geldi. Ancak yeni hücre tasarımı, daha dayanıklı olan n-tipi silikondan ziyade p-tipi silikon kullandığından bu teknolojinin dayanım manasında hala birçok eksiğinin mevcut olduğunu gösteriyor.



Şekil 2. 17: Siyah silikonun geleceği.

2.2. Boya Duyarlı Güneş Hücresi (DSSC)

Organik boyaların elektrik üretim kapasitesi 1960'lı yılların sonundan beri bilinmekle birlikte, elektrik üretimi için yapılan ilk boya duyarlı yarı iletken film girişimi, ZnO filmin klorofil ile duyarlı hale getirilmesi ile üretilmişti [73]. İlk denemelerinde klorofilden faydalanılması o zamanlar 'Yapay Fotosentez' olarak anılmasına sebep olmuştu. Günümüzdeki Boya Duyarlı Güneş Hücrelerinin (DSSC) ilk örneği 1980'lerin sonlarına dayanmaktadır [74].

1991'deki Grätzel ve O'Regan'ın DSSC'nin doğuşu anlamındaki çalışması ile birlikte, DSSC'lerin alternatif bir enerji kaynağı olabileceği resmen de kanıtlanmıştır [1]. Geleneksel Ru bazlı boyalara sahip DSSC'ler için bildirilen en yüksek verimlilik %11,5 civarındadır [75], [76]. Son yapılan çalışmalar ile, Zn tabanlı bir boya ve Co bazlı elektrolit çifti geliştirildi ve verimliliği %12'yi aştı [14].

2.2.1. DSSC'nin Avantajları

DSSC'nin güç dönüştürme verimliliği diğer inorganik birinci ve ikinci nesil güneş hücrelerine kıyasla daha düşüktür ancak bazı noktalarda kendilerine has özelliklere sahiptirler. Doğal ortam sıcaklığı olarak kabul edilen 25-65°C normal çalışma sıcaklığı aralığında, DSSC verimliliği neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır. Aynı aralıkta, Si güneş hücrelerinin etkinliği %20 oranında azalmaktadır [77]. Açılı gelen güneş ışığı veya bulutlu hava koşullarında, DSSC, polikristal Si güneş hücresinden daha iyi verimlilik gösterir. Hücre performansı, foton radyasyonunun geliş açısına pek de bağlı değildir; dolayısıyla diğer hücrelerle üretilen modüllerdeki gibi güneş izleme mekanizmasına ihtiyaçları yoktur. DSSC ler her ne kadar ticari olarak pazarda aktif olmasa da ilerleyen dönemlerde tüm ince film hücrelerden daha az maliyetli olması beklenmektedir. Üretimi için sadece düşük maliyetli ve doğada bol miktarda bulunan malzemeler gereklidir. Amorf silikondan, CdTe veya CIGS hücrelerinden farklı olarak, üretimi sırasında da maliyeti oldukça düşüktür; yüksek vakuma ve yoğun saflaştırma cihazlarına ihtiyaç duymaz. Boya duyarlı hücreler ile hammadde problemi olmadan terawatt ölçeğinde enerji üretimi gerçekleştirilebilir. Üstelik bu üretim sırasında hiçbir toksik etki yaratabilecek kimyasal kullanımına da ihtiyaç duyulmaz. DSSC'lerin büyesinde, iki önemli rakibi olan CdTe ve CuIn (As)

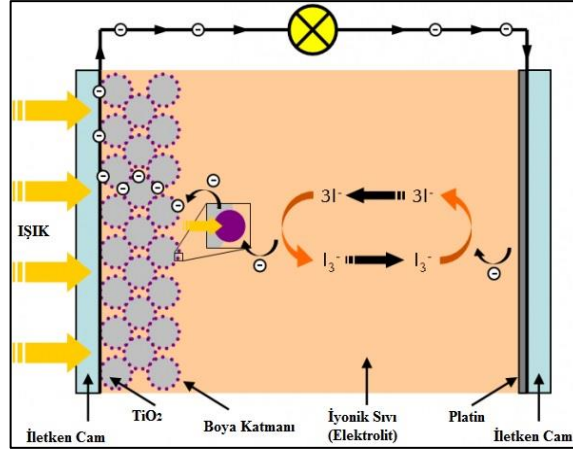
Se'nin barındırdığı toksik maddeleri barındırmamaları, rakiplerinden bir adım öteye taşımaktadır. Tüm enerji üretim tekniklerinde olduğu gibi, Güneş hücrelerinde de temel gereksinim kararlılıktır. Verim değerlerinin yüksek olması ne kadar önemli ise, bu yüksek verimliliğin uzun süre korunabilmesi de o denli önemlidir. Farklı kapsamlı çalışmalar sonucunda, DSSC'lerin ticari güneş hücrelerinde 20 yılı aşkın bir süre dış mekân kararlılık şartlarını karşılayabileceği doğrulandı. Bu avantajları göz önüne alındığında DSSC, büyük ölçekli güneş enerjisi dönüşüm sistemleri yarışında, gelecek vaad eden bir aday olma potansiyeline sahiptir.

2.2.2. Temel Çalışma Prensipleri

Boya Duyarlılaştırılmış Güneş Hücreleri (DSSC), güneşten gelen fotonları doğrudan elektrik enerjisine çevirmek için tasarlanmış ve foton emici katmanlarında kimyasal boyalar barındırma fotovoltaiik aygıtlardır. Her bitki yaprağı, güneş enerjisini biyolojik malzemeye dönüştüren bir fotokimyasal hücredir. Güneşten gelen fotonların sadece %0,02-0,05'i fotosentez işleminde kullanılsa da bitkilerden elde edilen gıda, insanlığın ihtiyaç duyduğu miktarın 100 katıdır [78]. Bitkilerin yeşil yapraklarında bulunan klorofil, güneşten gelen fotonların taşıdığı enerjisini kullanır ve fotosentez işlemini tamamlamak için birbirini takip eden bir dizi reaksiyonu tetikler. DSSCler güneşten gelen fotonları absorbe edebilme, elektron ve hole çifti oluşturabilme ve oluşan elektronların ilgili bölgeye taşınmasını sağlama yeteneğine sahip bir dizi katmandan oluşmaktadır.

2.2.3. Uyarı

Güneşten gelen fotonlar, hücre içerisinde yer alan boya moleküllerinin bulunduğu bölgeye ulaşır ve burada absorbe edilir. Absorbe edilen fotonun enerjisi boya molekülünün/atomunun son yörüngesindeki elektronu uyarır ve böylece elektron taban durumundan uyarılmış duruma geçer. Çoğu boya için absorpsiyon dalgaboyu başlangıcı 1,72 eV foton enerjisine karşılık gelen 720 nm aralığındadır. Uyarılmış elektronun ömrü ise nanosaniye mertebelerindedir.



Şekil 2. 18: DSSC'lerin basit yapısı ve band diyagramı.

2.2.4. Enjeksiyon

Duyarlılaştırıcı boya molekülleri geniş bant aralıklı yarı iletken (tipik olarak TiO_2) yüzeyine adsorbe edilir. Boya, bir fotonu absorbe ederek (uyararak), bir elektronu yarı iletken iletim bandına aktarma yeteneği kazanmış olur. Nanopartiküllerin iç elektrik alanı elektron ekstraksiyonuna neden olur ve boya molekülleri okside olmuş olur (S^+). Etkin elektron enjeksiyonu için boya içindeki en düşük enerjili molekül orbitalinin (LUMO) TiO_2 iletim bandının yaklaşık 0.3 eV üzerinde olması gerekir. Enjeksiyon hızı sabiti singlet durumu için femtosaniye aralığındadır.

2.2.5. TiO_2 katman difüzyonu

Gözeneksiz TiO_2 filmi yaklaşık 20 nm çapında küresel anataz parçacıklarından oluşur. Örgüde oksijen boşluklarının varlığı, onu zayıf n-katkılı bir madde haline getirir (eşdeğer taşıyıcı konsantrasyon 10^{16} cm^{-3}) [79]. TiO_2 parçacık çapı, elektrik alanının oluşması için çok küçük olduğundan, baskın elektron taşıma mekanizması, yakalama ve ayrıştırma yoluyla, difüzyondur.

2.2.6. İyot İndirgenmesi

Elektronlar, hücreyi tamamlayan devre boyunca dolaşırlar ve FTO veya ITO kaplı karşıt elektroda ulaşırlar. Böylelikle elektrolit içindeki iyot indirgenir. Bu indirgenmenin gerçekleşebilmesi için FTO üzerine daha önceden kaplanmış olan platin katmanı katalizör görevi görür. Katottaki indirgenme reaksiyonu;



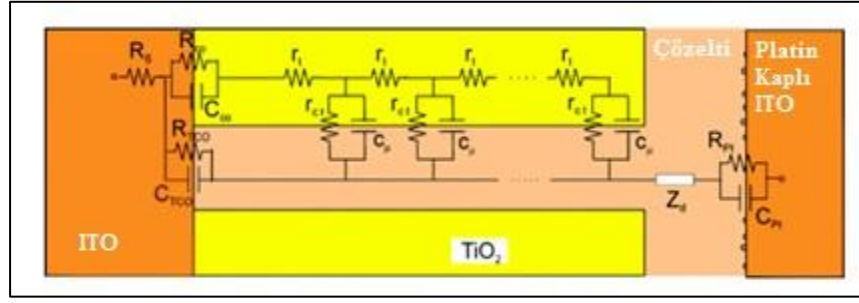
İyot indirgemesi, uyarılan boya moleküllerinde, ayrıştırılan elektron ve holelerin (exciton çiftleri) rekombinasyonuna neden olabilir. Etkili bir yük aktarımı için, karşı elektrotteki iyot indirgenme oranı, TiO_2 -elektrolit arayüzündeki rekombinasyondan daha hızlı olmalıdır. Yükseltgenme reaksiyonu:



Bu reaksiyon, iletim bandı elektronlarının boya moleküllerine geri dönmesine neden olabilecek S^+ oluşumunu engeller. Maksimum çıkış voltajı; yarıiletken Fermi seviyesi ve elektron redoks potansiyeli arasındaki farka eşittir [80]. Böylece, hücre içeriğinde hiçbir kalıcı fiziksel ve kimyasal değişiklik olmadan ışıktan elektrik üretebilir ve sürekliliğini devam ettirebilir.

2.2.7. DSSC'lerin Eşdeğer Devresi

Elektron taşıma ortamının mezoskopik filmi, bir dizi nanopartikülden oluşur. Karanlıkta DSSC sızıntı yapan bir kondansatör gibi davranır. DSSC'deki elektron kaybı, triiyodid iyonunun (I_3^-) azaltılmasıyla elektrolit üzerinde gerçekleşir.



Şekil 2. 19: DSSC'lerin eşdeğer devresi.

DSSC'nin eşdeğer elektrik devresinde (Şekil 2.19), her parçacık dirence karşı paralel bağlı kondansatör (C_{μ} ile gösterilen) gibi davranır ve elektrolit ile birleştirilmiş dirençli bir devre elemanı (r_{ct}) olarak temsil edilir [81]. Diğer terimlerin arasında r_t , yarıiletken içindeki elektronların transport direncidir. R_s , TCO camının öz direncini ve hücre direncini içeren bir seri dirençtir. Z_d , elektrolit içindeki I_3^- 'ün difüzyonunu belirleyen empedans parametresidir. Pt , TCO ve CO alt indisleri sırasıyla katot, TCO-elektrolit arayüzü ve TCO-TiO₂ arayüzündeki yük transfer direncini ve kapasitans parametrelerini belirtir.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Boya duyarlı hücreler, foton absorpsiyonu ile oluşan yüklerin taşınmasının birbirinden ayrı prosesler ile gerçekleştiği tek güneş hücreleridir. Diğer tüm konvansiyonel ve OPV teknolojileri, her iki işlemi aynı anda gerçekleştirir. Bu ayırım, hücrenin farklı parçalarını ve işlevlerini ayrı ayrı mühendislik ve optimize etme konusunda çok geniş seçenekler sunar.

Son 20 yılda DSSC alanında yapılan araştırmalar katlanarak artmıştır. Bu tezde yalnızca bu tez ile doğrudan ilgili literatürler yer almaktadır.

3.1. Yarıiletkenler

Boya duyarlı hücrelerde potansiyel elektron alıcıları olarak yarıiletkenler kullanılmaktadır. Bu bağlamda incelenen oksit yarı iletkenler arasında hem geniş band aralıklı hem de boya ile uyumu en iyi olan malzeme Titanyumdioksit (TiO_2) tir. TiO_2 muadillieri arasında en yüksek verimi sağlar, kimyasal olarak kararlıdır, toksik değildir ve rahatlıkla temin edilebilir. Anataz nanokristal formu, yüzey alanının, gözenekliliğin, gözenek çapının, şeffaflığın ve film kalınlığının optimizasyonu ile en etkin hücre verimini verir. TiO_2 geniş band aralığı, geniş yüzey alanlı nanoporoz yapı ve sırasıyla elektrolit ve boya ile uyumlu olan HOMO ve LUMO hizalanması nedeniyle de tercih sebebidir. Rutil faz 3 eV'luk anataz ise 3.2 eV'luk bir bant açısına sahiptir ve sırasıyla 413 ve 388 nm'lik foton soğurma sınırına tekabül ederler [46].

Karanlık ortamda, geniş bant aralığına sahip bu yarı iletken oksit film yalıtkan gibi davranır. TiO_2 katmana alternatif olarak kullanılan mezoporoz film veya TiO_2 nanotüpleri gibi TiO_2 'nin diğer yapıları da benzer bir verimlilik değeri vermektedir. DSSC'de diğer yarı iletken malzemeler de kullanılmaktadır [82], [83]. Çinkooksit (ZnO) de TiO_2 ile benzer kristal yapıya ve aynı bant aralığı sahiptir [84]. DSSC'lerde ayrıca ZnO nanopartikülleri ve nanotüpler kullanılmıştır [85], [86]. ZnO , esnek polimer yüzeylerde DSSC üretimini mümkün kılan TiO_2 gibi yüksek sıcaklıkta tavlama işlemine gerek duymaz. SnO_2 , In_2O_3 , Y_2O_3 ve Nb_2O_5 gibi diğer alternatif geniş bant aralığına sahip oksitler de DSSC'lerde kullanılabilirlik potansiyeline sahiptir [87]- [90]. Bu yarı iletkenlerin tek başlarına verime katkıları o kadar etkili olmasa da farklı kombinasyonlarından bazıları umut verici sonuçlar vermiştir.

3.1.1. Yüzey Yapısı

İki karşıt özellik film gözenekliliği ve etkili yüzey alanı DSSC için verime etkiyen önemli iki faktördür. Fotonlar tarafından üretilen akım, yüzey alanının artması ile artar; gözeneklilik arttıkça azalır. Gözeneklilik, bir materyaldeki boşluk alanlarının bir ölçümüdür ve toplam hacim üzerindeki boşluk hacminin fraksiyonu olarak tanımlanır ve normalde 0 ile 100 arasında yüzde olarak temsil edilir. Güneş hücresine gelen foton vasıtası ile üretilen akım, yüzey alanı arttıkça, boyalar için daha fazla tutunma yüzeyinin olması nedeniyle artar. Artan gözeneklilik, film başına düşen TiO_2 kütlesi ve cm^2 başına düşen etkin TiO_2 yüzeyini azaltacağından daha az akım üretilmesine neden olur. Ayrıca Daha az yüzey alanı, adsorbe edilen boya moleküllerinin yoğunluğunu düşürür. Dolayısıyla, gözeneklilik birçok nedenden dolayı verimdeki düşüşlerin başında gelir. Bununla birlikte, yük taşıyıcıları, küçük gözenekli yapıda elektrolit içinde yavaş yavaş dağılırlar. Örneğin 4nm çaplı bir gözenekte, gözenek duvarlarında emilen boya molekülleri, 3nm'yi (moleküler çapı $\sim 1.5\text{nm}$) kaplayacaktır. Tri-iyodür iyonunun boyutuna yakın olan elektrolitin difüzyonu için, gözenek içerisinde yalnızca 1 nm'lik bir alan kalır. Ayrıca gözenekli yapıda nüfuziyet elektrolit solventin viskozitesi ve iyot konsantrasyonu gibi diğer parametrelerden de etkilenir [80]. TiO_2 nanoparçacıklarının boyutu, şekli ve kristal yapısı, TiO_2 pastanın hazırlanma ve kaplanma yöntemine bağlıdır [91]. Gözeneklilik ayrıca tavlama sıcaklığının da bir fonksiyonudur. Ortalama gözenek boyutu, artan bir sıcaklığa maruz bırakılması ile 400 °C'den itibaren 15nm'den 20nm'ye kadar artış gösterebilir. Bununla birlikte, tavlama sıcaklıkları 500 ° C'nin üzerine çıktığında, artık gözenek büyüklüklerinde herhangi bir değişiklik olmadan sabit boyutlu hale gelir [80]. 150 °C ile 450 °C arasındaki bir tavlama sıcaklığında çalışılması, gözenekliliğin daha yüksek olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda tavllanmış filmler için artan bir I_{SC} 'ye neden olmaktadır. Bu, artan sıcaklık ile difüzyon katsayısının ve taşıyıcı ömrünün arttığı görülmektedir [92]. TiO_2 nanopartikül boyutu ise Boya duyarlı güneş hücreleri için bir başka önemli parametredir. Parçacık boyutunun artmasıyla, yüzey alanı azalır ve tane sınırlarının yapısı nedeniyle elektron difüzyon katsayısı artar. Öte yandan, elektron rekombinasyon ömrü partikül boyutu arttıkça azalır. Bu nedenle, DSSC uygulamaları için küçük partikül boyutu daha uygun

olacaktır. Bununla birlikte, yük iletim yeteneği, difüzyon uzunluğunun azalması nedeniyle, parçacık boyutu küçüldükçe azalacaktır. Tüm bunlar göz önüne alındığında hücre üretilirken parçacık boyutu optimizasyonu üzerinde çalışılmalıdır [93]. DSSC için tipik film kalınlığı, 5-20 um ve TiO₂ kütlesi yaklaşık 1-4 g / cm²'dir. Sinterlenmiş TiO₂ koloidinin optimum yüzey alanı 75m²/g'dir ve gözeneklilik oranı %50-65 arasındadır [94]. Nano partiküllerin ortalama boyutu 15-30 nm'dir. HRTEM ölçümlerine göre, daha düşük yüzey enerjisine sahip olduğu için en çok tercih edilen kristal yönelimidir [95].

3.1.2. Yarı İletken Kalınlığı

DSSC için, TiO₂ tabakalarının kalınlığı doğrudan foton adsorpsiyonuna etki eder. Tek katmanlı elektrotlar için (20nm katman kalınlığı), kalınlık arttıkça açık devre voltajında (V_{OC}) küçük ancak doğrusal bir azalma gözlenir. Bununla birlikte, kısa devre akım yoğunluğunun (J_{SC}) kalınlığa vereceği tepki, elektrolitin viskozitesine bağlıdır. Düşük viskoziteli bir elektrolit, kalın nanokristalin-TiO₂ tabakasından üretilen yüksek fotoakımı arttırıcı yönde etki gösterebilir, bu nedenle akım doğrusal bir artış gösterebilir. Bu sebeple, yüksek viskoziteli elektrolit barındıran hücrelerde akımda bir pik gözlenir ve sonrasında akımda azalmalar gerçekleşir. Kalınlığa bağımlılık ayrıca parçacık boyutunun ve yüzey yapısının bir fonksiyonudur. Örneğin, 20nm parçacıklar için optimum katman kalınlığı, 42nm parçacıklar için optimum olan katman kalınlığının yarısıdır [96].

3.1.3. Işık Saılanma Katmanı

Boya duyarlı hücrelerin verimini sınırlayan etmenlerden birisi de yakın kızılötesi bölgede yetersiz kalmalarıdır. Bunu düzeltmenin bir yolu daha büyük titanyum parçacıklarından oluşan ek bir ışık saçılım tabakası oluşturmaktır. Bu katman, dağınık fotonların çoklu yansımalar vasıtasıyla filmde tutulmasını ve optik yol uzunluğunun film kalınlığının çok ötesinde arttırılmasını sağlar. Sonuç olarak, güneş ışığı Emilimi, özellikle kırmızı ila yakın IR bölgelerinde arttırılmış olur. Işık saçılma merkezleri olarak 200-400 nm boyutlu anataz parçacıklarının kullanımı ile, arttırılmış ışık absorpsiyonundan ötürü N719 kullanılarak üretilen DSSC'lerdeki I_{SC}

değerlerinde 3-4 mA/cm²'lik bir artışı gözlemlendi. Ayrıca, cam yüzey üzerine gelen ışığın yansımaları nedeniyle yaklaşık %4'lük de bir kayıp oluşur. Bu kaybın önüne geçebilmek veya bir nebze azaltabilmek adına, UV filtre olarak da işlev yapabilen, yansıma önleyici bir filmin üst katman olarak kaplanması gerekmektedir [97].

3.1.4. Engelleme Katmanı

Yük rekombinasyonu, DSC'lerde düşük akımın temel nedenlerinden biridir. Rekombinasyon hem Elektrod/Elektrolit hem de TiO₂/Elektrolit arayüzünde gerçekleşir. İletken elektrot ile nanokristalin TiO₂ tabakası arasında RF yansıtıcı veya TiO₂'nin kompakt blokaj tabakası, elektrot/elektrolit arayüzünde rekombinasyonu etkili bir şekilde önleyebilir. Bu tabakanın varlığı, elektrolitin elektroda ulaşmasını (J_{SC}'yi artırır) ve nanokristal titanyumdan elektroda elektron naklini artırır (V_{OC}'yi artırır). Bu bloke edici tabaka organik boyalar kullanılan hücreler için kesinlikle gereklidir, buna karşılık rutenyum bazlı sensitizörler bu yalıtım katmanını kendi kendilerine oluşturabilir rekombinasyon kayıplarını kendi doğası ile azaltabilirler [98]. Bu tabakayı oluşturmanın oldukça uygun maliyetli ve kolay bir yolu da TiCl₄ hidrolizidir [97]. Bu bloklama tabakası ayrıca ZnO veya Nb₅O₂ gibi diğer metal oksitlerden yapılabilir [99].

3.1.5. TiCl₄ Katmanı

TiO₂/elektrolit arayüzünde yük rekombinasyonunu azaltmak için, TiO₂'nin bir başka bloke edici katmana ihtiyacı vardır. Bu katman da TiCl₄ kaplayarak (ve sonrasında tavlayarak) oluşturulabilir. Ortalama gözenek çapı ve spesifik yüzey alanı, TiCl₄ ile azalır. Çünkü TiO₂'nin yüzey epitaksiyal büyümesi, parçacıkların iç içe geçmesini ve yeni bir TiO₂ tabakası oluşmasını sağlar. Parçacıkların birbirine yaklaşımlarının artması, nanoparçacıklar yoluyla elektron taşıma direncini azaltarak rekombinasyon olasılığını azaltır. Aynı zamanda, yüzey pürüzlülüğü faktörünü ve ışık absorpsiyonunu geliştirir [97]. Bunlar karanlık akımı azaltmakta ve fotoakımın artışına neden olmaktadır [100]. Asidik TiCl₄ çözeltisinin kullanılması, TiO₂'ye kıyasla demir oksidin daha yüksek çözünürlüğünden ötürü Fe³⁺ gibi yabancı

maddelerin çökmesini önler. Nanokristal Titanyumun en yaygın kaynağı olan P25 tozunda 100 ppm Fe_2O_3 bulunur. Boya duyarlı hücredeki elektron enjeksiyonuna pozitif katkı sağladığı bilinmektedir. TiCl_4 katmanının kaplanması yüksek saflıkta TiO_2 katmanı elde edilmesini sağlar. Bu sayede enjeksiyon verimi artar ve hücrenin rekombinasyon engelleme özelliği arttırılmış olur [46]. Teorik olarak, bu üst katman, TiO_2 'den daha yüksek iletim bant sınırlarına sahip olan diğer metal oksit filmlerden (örnekler MgO , ZnO , Al_2O_3 ve Nb_2O_5 içerir) oluşturulabilir [101].

3.2. Boya

Fotosensitizerler DSC'ler için verim tayininde en önemli unsurdur. Yarı iletken filmin üzerine boya tabakasının da kaplanması, demirli fotosensitizatörün stoikiometrisi 1:100 (Ru başına Ti) kadar yüksek olan bir monomoleküler tabaka oluşturur [102].

3.2.1. Yüksek Verimli Fotosensitizer Tasarımı

Spektrumdan etkin faydalanabilme: Boyanın ışık emme özellikleri, maksimum foton absorbe edebilecek şekilde ayarlanmalıdır.

Yük aktarımı: Etkili bir yük aktarımı için, boya duyarlı katmanın uyarılmış seviyesinin yarıiletkenin akseptör orbitalleriyle yakın seviyelerde olması gerekir. Boya LUMO'sunun titanyumun 3d orbitallerine elektronik olarak bağlanabilmesi gerekir.

Fonksiyonel grup: Boya üzerindeki fonksiyonel gruplar, yarı iletken yüzey üzerindeki adsorpsiyonu kontrol eder ve uyarılmış boya ile TiO_2 iletken bandı arasındaki elektron transportunu kolaylaştırır [103].

Redoks potansiyeli: Elektrolit ortamında verimli hole aktarım reaksiyonlarına sahip olmak için boyanın indirgenmiş hali, redoks çiftinin redüksiyon potansiyeline uygun olmalıdır. Boya rejenerasyon hızının, yarıiletkenin iletkenlik bandı ile oksitlenmiş boya arasındaki elektron rekombinasyonunu en aza indireyecek kadar hızlı olmasını sağlamak için yaklaşık 0.3 eV'lik tercih edilen bir potansiyel farkı gerekir [96]. Rekombinasyonu daha da azaltmak için daha büyük bir potansiyel fark yararlı olsa da 0.3 eV üzeri değerlerde çıkış potansiyeli kaybı gözlenmiştir.

Kararlılık: Boya duyarlı hücrelerin, mevcut teknolojilerle rekabet edebilmesi ve pazarda kendine bir yer edinebilmesi için, en az 20 yıl ömre sahip olması gerekmektedir.

3.3. Elektrolit

DSSC'lerde üretilen voltaj, elektronların TiO₂ nanopartiküllerinde elde ettiği kimyasal potansiyel (Fermi seviyesi) ile boşlukları (hole'leri) ileten ortamdaki hole kimyasal potansiyeli (redoks elektrolitler için Nernst potansiyeli) arasındaki fark ile belirlenir. Karanlık ortamda (denge durumunda) Fermi seviyesi hücre boyunca sabittir. Açık devre voltaj denklemi;

$$V_{oc} = E_{CB}/q + kT/q \ln(n/N_{CB}) - E_{redox}/q \quad (\text{volts}) \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemden redoks çiftinin HOMO seviyesini aşağı kaydırarak V_{oc} 'nin iyileştirilebileceği açıktır. Boya duyarlı hücrelerdeki kararlılık problemini aşabilmek için yeni elektrolit malzeme arayışları devam etmektedir. Günümüzde geleneksel DSSC'lerde kullanılan elektrolit, hücre ömrünün az olmasının başlıca nedenlerinden birisidir. Organik katı redoks çiftleri kararlılığı uzun süre devam ettirebilmek için uygun bir çözüm gibi gözükmektedir.

3.4. Karşıt Elektrot

Boya duyarlı hücrelerde karşıt elektrot olarak platin kaplı FTO cam kullanılır. Platin kaplı FTO, triiyodür iyonunun katodik indirgenmesi için bir katalizör görevi görürken, aynı zamanda ışık emilimini en üst düzeye çıkarmak için filminden geçen ışığı hücre içine hapsedilmesini sağlar ve tekrar dışa yansımalar oluşmasını engeller [105]. Bununla birlikte, verimli ışık absorpsiyonu için tamamen optimize edilmiş nanopor titanyum film için 0.05 M'lık bir heksakloroplatinik asit solüsyonundan kimyasal olarak çökelmiş platin benzer şekilde performans gösterebilir.

3.5. Alttaş

Boya duyarlı hücrelerde alttaş olarak genellikle ITO (İndiyum Thin Oxide) veya FTO (Florin Thin oxide) kullanılmaktadır. Alttaş hücre performansını iki şekilde etkiler. FTO'nun direnci, hücrenin seri direncini etkiler, ayrıca ışık emilimini kontrol eder. Alttaşın ince olması, ışık geçirgenliğini arttıracğından tercih sebebidir. TCO (Transparent conductive oxide) Transparan iletken oksit katman için direncin optimum değeri 10Ω ve ilgili ışık geçirgenliğı de %80 ile olarak bulunmuştur.

3.6. Işık Yoğunluğı ve Sıcaklık

Kısa devre akımı, daha fazla foton ve dolayısıyla daha fazla fotoelektron (fotonlar vasıtası ile üretilen elektron) varlığına bağılı olarak ışık şiddeti ile doğrusal bir artış gösterir. Açık devre voltajı da ışık şiddeti ile hafifçe artar. Ancak, iletken cam elektrotlarda kayıplara bağılı olarak dolum faktöründe (FF) bir azalma gözlenmektedir [104]. 5°C ile 70°C arasında sıcaklık artarsa V_{OC} düşer ancak akım önemli derecede yükselir. Dolum faktörü üzerindeki etkisi ise elektrolit solventine bağılıdır. Propilen karbonat gibi yüksek viskoziteli solventler için dolum faktörü sıcaklık ile birlikte artar. Kuantum verimlilik değeri sıcaklık aralığında etkilenmez. Buradaki en önemli nokta ise duyarlaştırılmış yük enjeksiyon oranının sıcaklıktan bağımsız olmasıdır, ki bu da bir kuantum mekanik tünel oluşturma işlemi demektir.

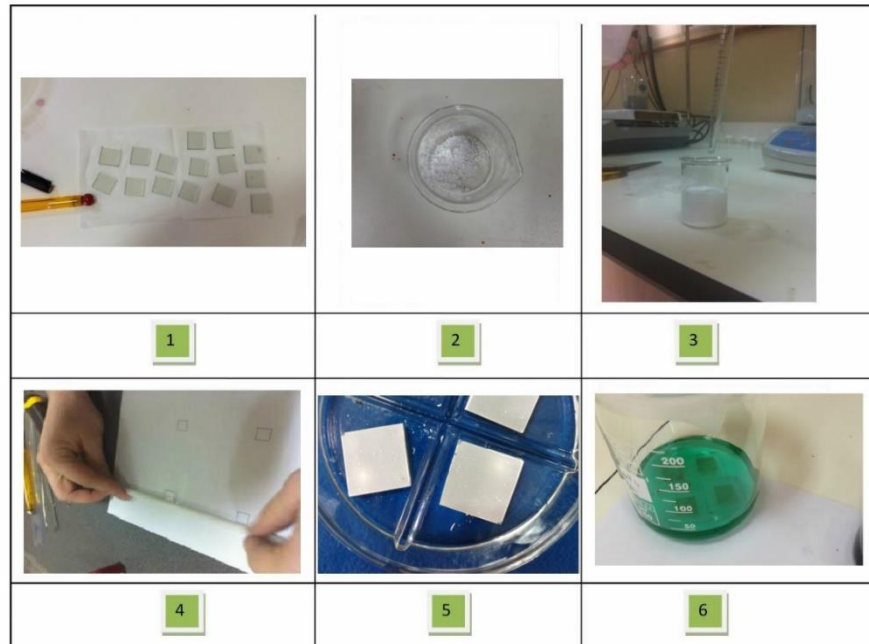
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Güneş Pili Optimizasyon Çalışmaları, DSSC'lerin Üretimleri ve Karakterizasyonları

Bu tez kapsamında Boya Bazlı Güneş Hücreleri üretimi, ölçüm ve karakterizasyonu yapılmıştır. Boyar malzeme olarak ftalosiyanin türevleri kullanılmıştır. Boya Bazlı Güneş Hücrelerinin üretimi için kullanılan tüm ftalosiyanin bileşikleri GTÜ-Kimya Bölümü Laboratuvarlarında sentezlenmiştir. Sentezlenen tüm ftalosiyaninlerin bir kısmının Boya Bazlı Güneş Hücrelerinin üretimi GTÜ-Fizik Bölümü Laboratuvarlarında bir kısmı ise COST Action MP1307 tarafından sağlanan kısa süreli laboratuvarlar arası bilimsel çalışma desteği (**Short Term Scientific Missions (STSM)**) ile Hollanda'daki Hybrid Solar Energy Conversion Department of Physics and Astronomy'de Dr. Elizabeth von Hauff 'un labında gerçekleştirilmiştir.

- GTÜ'de alınan ölçümler,

GTÜ de üretilen hücrelerin üretim basamakları Şekil 4.1'de verilmiştir.



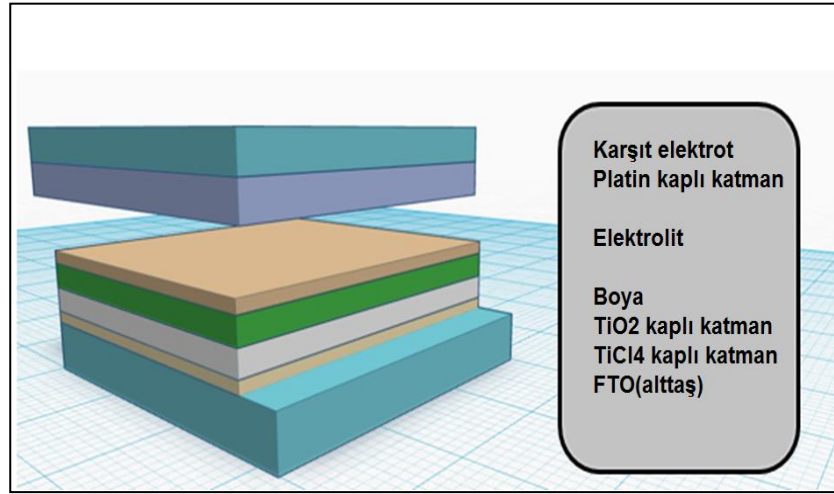
Şekil 4. 1: Güneş hücresi üretim basamakları 1-6.

Hücre üretim basamakları, 1. İletken altlıklar uygun ölçülerde kesilerek temizlenme işlemi gerçekleştirildi. Temizlenen altlıklar $TiCl_4$ çözeltisi (10ml Etanol, 0,2 ml $TiCl_4$) ile kaplandı. Kaplama işlemi spin coater yöntemi ile gerçekleştirildi. Kaplama işleminden hemen sonra, altlıkların bir kenarından 2 mm lik bir kısımdaki kaplama ölçümler sırasında direk ITO'dan kontak alınabilmesi için kaldırıldı. Daha sonra iletken altlıklar 500° de 30 dakika tavlandı ve kendi kendine soğumaya bırakıldı. 2. Bir sonraki fabrikasyon aşaması Titanyum pasta uygulamasıdır. Titanyum pasta hazırlanırken çözücü olarak yüksek saflıkta etanol kullanıldı. 3. Pasta homojen bir karışım olana kadar karıştırıldı ve daha sonra içerisine Titanyum İzopropoksit ilave edildi. 4. Titanyum pasta Doctor Blade yöntemi ile kaplandı. 5. ITO ların yüzeylerinin tamamı kaplandıktan sonra orta kısmından $1,00\text{ cm}^2$ kısım haricinde yüzey temizlendi. ITO'lar ortasında pasta kaplı ancak kenarları boş olacak şekilde hazırlandı. Hazırlanan örnekler 500°C de 30 dakika tavlandı ve kendi kendine soğumaya bırakıldı. 6. Daha sonra ftalosiyanınlar için çözelti hazırlandı. Çözeltide daha önceden belirlenen molaritelerde olacak şekilde çözücü olarak etanol kullanıldı.



Şekil 4. 2: Güneş hücresi üretim basamakları 7-12.

Devamı, 7. Tavlanan ITO'lar çözeltilerin içerisinde oda sıcaklığında 48 saat bekletildi. 8. Bu sırada üretilen pil sayısınca ITO platisol kaplandı ve 300° de tavlandı. 9. Ftalosiyanın çözeltilerinden çıkartılan Pillerin Titanyum pasta kaplı olmayan 3 kenarı Teflon bant ile kapatılarak üzerine Platin kaplanan ITO'lar yerleştirildi ve kısıkaçlar yardımıyla sıkıştırıldı. 10. Açık kalan kenardan iletken sıvı döküldü. 11. Böylelikle piller ölçüme hazır hale getirildi.12. Ölçümler aydınlık ortamda (solar simülatör altında) gerçekleştirildi.



Şekil 4. 3: Üretilen hücrelerin şematik gösterimi.

Tez kapsamında üretilen 5 farklı iletkenliği arttırmak amaçlı, literatürde mevcut iyonik sıvı karışımları hazırlanarak kullanılmıştır [105], [106]. Bunları içerikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1: Kullanılan iyonik sıvıların içerikleri.

959	960	AY₂	BC	AY₃
DM11 (2.24g)	DM11 (2.24g)	Lil (1.338g)	BM11 (1.596g)	Lil (669.35mg)
Iodine (76.14mg)	Lil (66.92mg)	Iodine (126.90mg)	Iodine (126.90mg)	NaI (749.45mg)
GT (118.16mg)	I ₂ (76,14 mg)		Lil (133.85mg)	I ₂ (126.90mg)
TBP (0.732ml)	TBP (0.732ml)		TBP (0.732ml)	
	GNCS(11 8.16mg)			
85/15 AN/VN	85/15 AN/VN	AN	85/15 AN/VN	AN

Hazırlanan iyonik sıvılar boyar malzemeler ile denenmiş ve en yüksek verim sonuçlarının elde edilebildiği iyonik sıvı karışımı belirlenmiştir.

- Karakterizasyon,

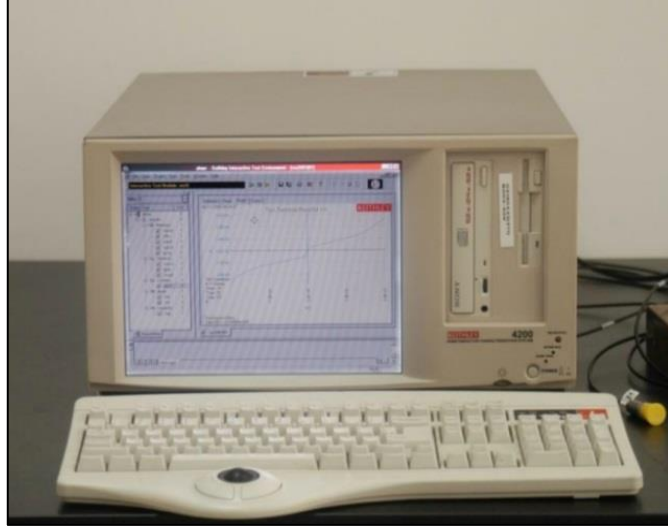
Hazırlanan piller Keitley 4200SCS cihazı ile karakterize edildi. Her pil için aydınlık (solar simülatör altında) ölçüm alındı. Alınan veriler bilinen yöntemler ile işlendi. Dolum faktörü ve verim hesaplandı. Güneş hücreleri için klasik verim hesabı yapıldı [77].

Dolum faktörü (fill factor, FF): Işınım altındaki akım-gerilim eğrisinde, akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük $V_{mp} \times I_{mp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ ye oranı olarak tanımlanır.

$$FF = (P_{\max} [W] / I_{sc}[A] \times V_{oc}[V]); (P_{\max} [W] = I_{mp}[A] \times V_{mp} [V]) \quad (4.1)$$

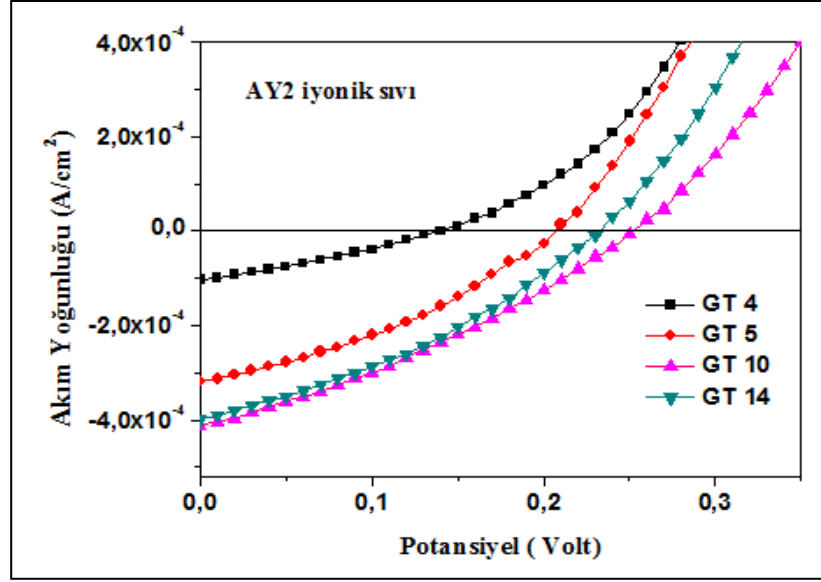
Bir güneş pilinin verimliliği, η , fotovoltaik gözenin üzerine düşen güneş ışınım gücünün, gözeden alınabilecek güce oranı olarak tanımlanır.

$$\eta [\%] = (P_{\max} [W] / 1,000[Wm^{-2}] \times \text{Cell area}[m^2]) \quad (4.2)$$



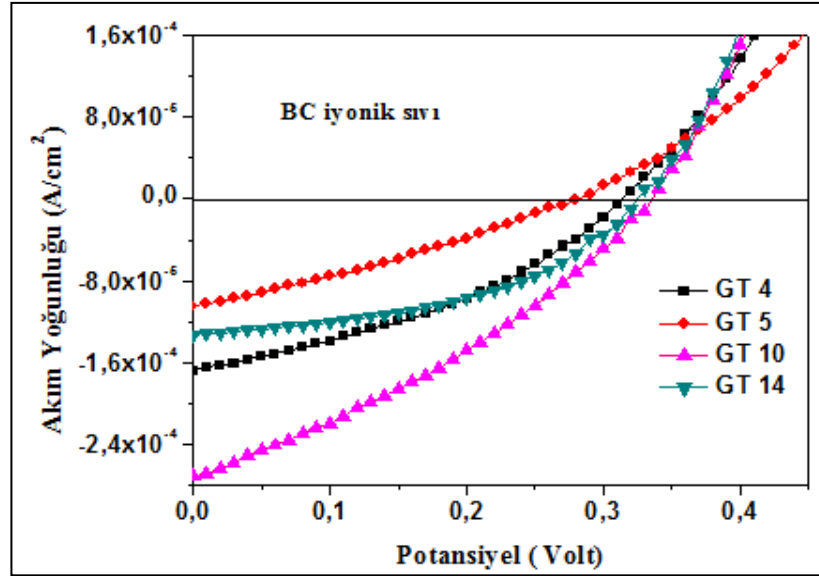
Şekil 4. 4: Keitley 4200 SCS karakterizasyon Cihazı.

Tez çalışmasında güneş hücresi üretiminde boyar katman olarak farklı ftalosiyenin türevleri kullanılmış ve farklı parametreler uygulanarak bu hücrelere ait elektriksel ölçüm sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 4. 5: AY2 ile üretilen 5 farklı hücreye ait I-V grafiği [Pc7a(GT4), Pc9a (GT5), Pc4a (GT10), Pc10a (GT14)].

Daha sonra aynı metodlar ile BC iyonik sıvısı kullanılarak hücre üretimi tekrarlandı.



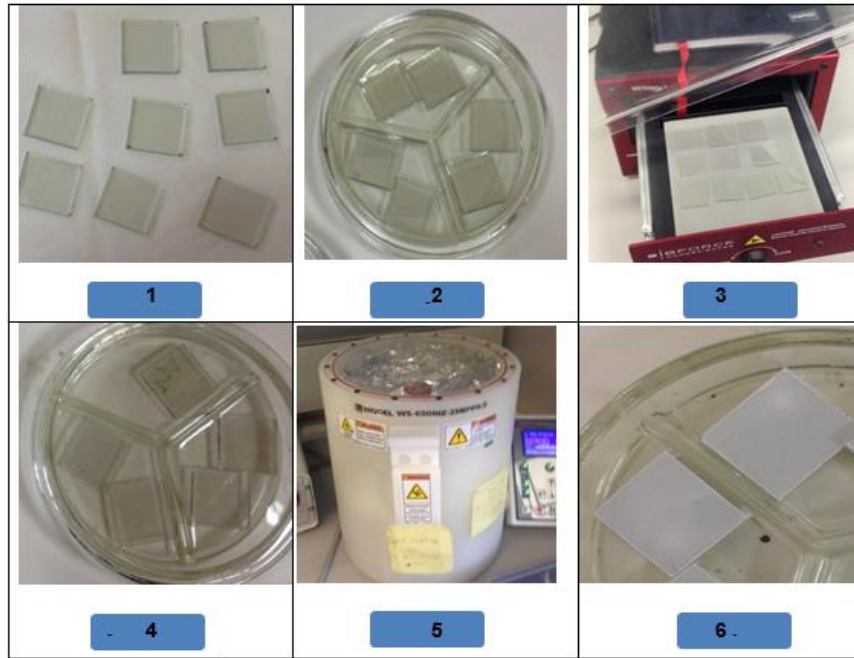
Şekil 4. 6: AY2 ile üretilen 5 farklı hücreye ait I-V grafiği [Pc7a(GT4), Pc9a (GT5), Pc4a (GT10), Pc10a (GT14)].

Şekil 4.5 ve şekil 4.6 de görüldüğü gibi iyonik sıvıların verime katkısı pilin boyar maddesine bağlıdır. AY₂ iyonik sıvısı için en düşük verim **Pc7a** (GT4) ile üretilen hücreden alınmasına rağmen, BC iyonik sıvısında **Pc7a** (GT4) ile üretilen

hücrenin verimi **Pc9a** (GT5) ile üretilen hücrenin veriminden yüksektir. Görüldüğü gibi farklı boyar malzemeler için uygun iyonik sıvı seçilmesi gerekmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde alınan en yüksek verim AY₂ ve BC iyonik sıvıları için **Pc4a** (GT10) adlı ftalosiyanın türevi ile üretilen hücrelerde görülmüştür. Ancak BC iyonik sıvısı için **Pc4a** (GT10) kullanılarak üretilen hücrelerin verimi daha düşüktür.

- Hollanda da Alınan Ölçümler

COST Action MP1307 tarafından sağlanan kısa süreli laboratuvarlararası bilimsel çalışma desteği (**Short Term Scientific Missions (STSM)**) ile Hollanda'daki Hybrid Solar Energy Conversion Department of Physics and Astronomy'de Dr. Elizabeth von Hauff 'un labında da **Pc1a, Pc3a, Pc4a, Pc7a, Pc10, Pc12a** nolu maddeler için hücre üretimi ve verimliliği çalışmaları yapılmıştır. Hücre üretim basamakları şöyledir;



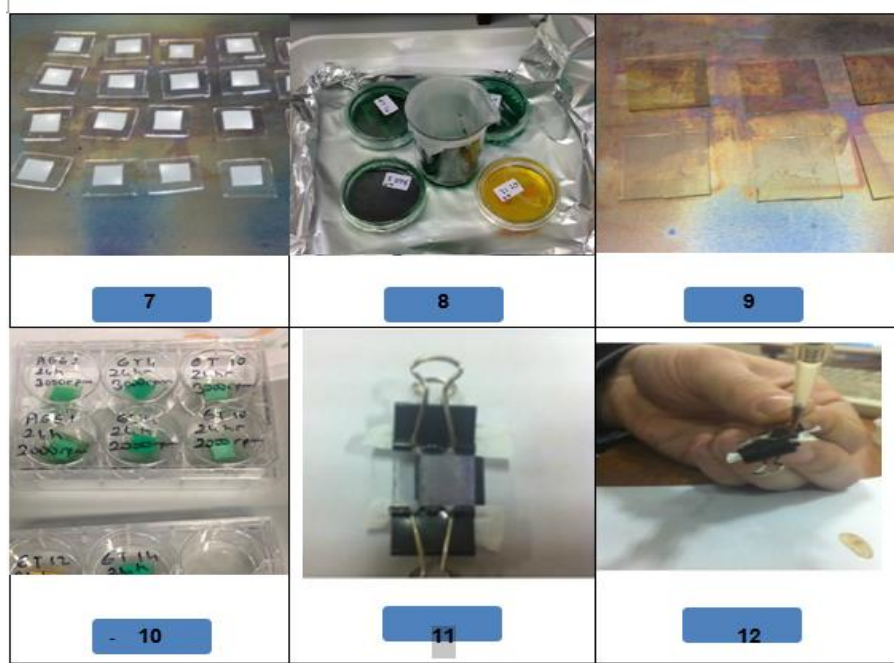
Şekil 4. 7: Güneş hücresi üretim basamakları 1-6.

- Hazırlık aşamaları (Şekil 4.7, Şekil 4.8)

Hazırlama basamakları için, 1. Ticari olarak alınan 10x10 cm ebatlarındaki FTO (Fluorine doped Tin Oxide) camlar, hücre üretimi için uygun ölçülerde kesildi. Kesim işlemi hassas cam kesici ile 2x2 cm ölçülerinde olacak şekilde yapıldı. 2. Kesilen FTO'lar Saf su ile durulandı ve 10 dakika titreşime bırakıldı. Ardından

Aseton ve Etanol ile temizlenip son aşamada gaz ile kurutuldu. 3. Daha sonra yüzey dağılımını düzenlemek ve temizlik işlemini tamamlamak için UV Ozone Cleaner yardımı ile 15 dakika UV ışığa maruz bırakıldı.

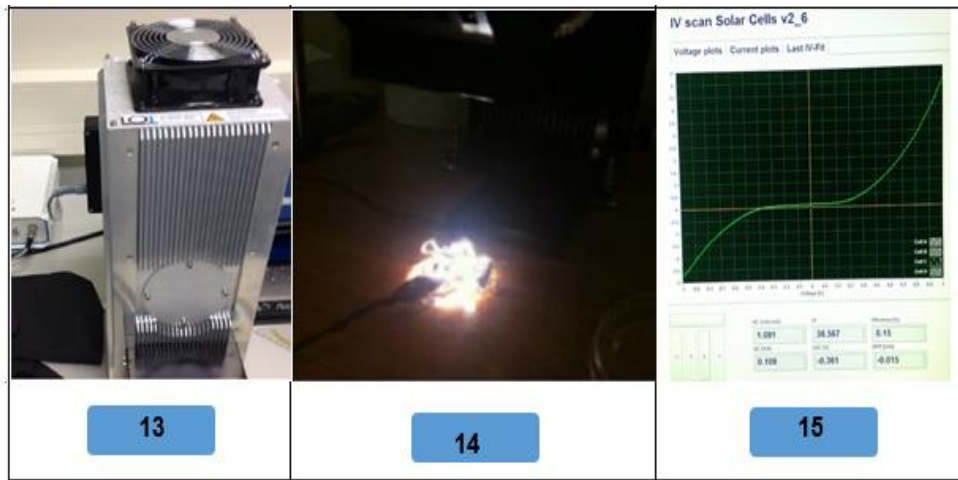
Hücre üretim aşamaları, 4. Daha sonra $TiCl_4$ kaplandı ve $500^\circ C$ de 30 dakika tavlandı. 5. Tavlanan FTO'lar titanyum pasta kaplaması için spin coater içine yerleştirildi. Titanyum pasta için Ticari olarak alınan TiO_2 ve etanol çözeltisi pasta kıvamına gelinceye kadar karıştırıldı ve içine İzopropoksit ilave edildi. Karıştırma işlemi soğuk tampon yardımı ile 60 dakika gerçekleştirildi. Spin coater'da kaplama hızı için iki farklı parametre değeri dikkate alındı ve 2000 rpm ve 3000 rpm değerlerinde kademeli olarak hız artışı olacak şekilde ayarlandı. Bunun sebebi kaplama esnasındaki dönüş hızının, kaplanacak tabakanın kalınlığı ile orantılı olmasıdır. 6,50 saniye dönen FTO'ların kuruması beklendi. Ardından orta noktasında 1 cm^2 lik bir alan kaplı kalacak şekilde kenarları alkol yardımı ile temizlendi.



Şekil 4. 8: Güneş hücresi üretim basamakları 7-10.

Devamı, 7. Sadece orta kısmı kaplı kalan FTO'lar $500^\circ C$ de 30 dakika tavlandı ve sonrasında kendi kendine soğumaya bırakıldı. 8. Belirlenen çözelti oranlarında Ftalosiyanınlar ile Kloroform veya etanol kullanılarak çözelti hazırlandı. Yüksek sıcaklıkta tavlanan FTO'lar ftalosiyanın çözeltileri içinde beklemeye bırakıldı. 9. Bu sırada karşıt elektrot hazırlandı. Bunun için daha önceden temizlenen FTO'lar

platisol sürülerek platin kaplandı ve yüksek sıcaklıkta tavlandı. 10. FTO'lar ftalosiyanın çözeltisinde 24 saat ve 48 saat olmak üzere 2 farklı zaman parametresinde bekletildikten sonra çıkartıldığında gaz ile kurutuldu. 11. Ftalosiyanın ve platin kaplanan FTO'lar yan tarafları ataçlar (paperclips) yardımıyla sıkıştırılacak şekilde tutturuldu ve boş kalan kenarlardan kontak alınacak şekilde timsah uçlu bağlantı kabloları şeklindeki gibi bağlandı. Ataçların Ftalosiyanın kaplı aktif alanın üzerine gelmemesine dikkat edilmelidir (Şekil 4.8). Gelen güneş ışınlarının aktif alana düşmesini engellemek için ataçlar sadece FTO'ların boş kalan uç kısımlarına bağlanmıştır. 12. Daha sonra kontak alınacak tarafların birinden FTO'lar arasına iyonik sıvı mikro pipet yardımı ile enjekte edildi.



Şekil 4. 9: Güneş hücresi üretim basamakları 13-15.

- Karakterizasyon aşamaları, (Şekil 4.9)

13. Ölçümler güneş ışığının ölçüm standartlarına uygun olarak solar simülatör altında yapıldı. 14. Üretilen her hücre için hem aydınlık hem de karanlık ölçümler sağlıklı bir ölçüm olması için üçer defa tekrarlandı. 15. Simülatöre bağlı bilgisayarda bulunan IV SCAN SOLAR CELLS v2_6 programı yardımı ile dolum faktörü (FF), Kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}) ve verim (n) ölçümleri kaydedildi.

Ölçüm ve Sonuçlar, Hücre üretimi sırasında bir takım üretim metotları değiştirilmiş ve neticesinde optimum fabrikasyon teknikleri belirlenmiştir. Ftalosiyanın katmanı kaplanırken FTO'lar hem 24 saat hem de 48 saat çözelti içerisinde bekletilerek iki farklı katman kalınlığı elde edildi. Ftalosiyanın çözeltisi içerisinde bekletildiği süre boyunca çözelti ve FTO'nun ışıktan etkilenmemesi için,

bekletme işlemi karanlık ortamda (alüminyum folyo ile sarılarak) bekletildi.

Pc1 ftalosiyanın türevi için; 20 ml kloroform için 13 mg madde kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti içerisinde farklı kalınlıklarda titanyum kaplanmış hücrelerden (2000rpm ve 3000rpm) 4 tanesi 24 saat ve diğer 4 tanesi ise 48 saat bekletildi. Toplamda Pc1 ile hazırlanan 8 tane hücreye ait ölçüm elde edildi. Hücreler 2 farklı iyonik sıvı ile ölçüme hazır hale getirildi. Alınan en yüksek verim değeri %0.169 ve dolum faktörü %45,79 olarak bulunmuştur.

Pc2 ftalosiyanın türevi için; 20 ml kloroform için 9,6 mg madde kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti içerisinde farklı kalınlıklarda titanyum kaplanmış hücrelerden (2000rpm ve 3000rpm) 4 tanesi 24 saat ve diğer 4 tanesi ise 48 saat bekletildi. Toplamda Pc7a ile hazırlanan 8 tane hücreye ait ölçüm elde edildi. Hücreler 2 farklı iyonik sıvı ile ölçüme hazır hale getirildi. Alınan en yüksek verim değeri %0.070 ve dolum faktörü %44,96 olarak bulunmuştur.

Pc3 ftalosiyanın türevi için; 20 ml THF için 13 mg madde kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti içerisinde farklı kalınlıklarda titanyum kaplanmış hücrelerden (2000rpm ve 3000rpm) 4 tanesi 24 saat ve diğer 4 tanesi ise 48 saat bekletildi. Toplamda Pc3 ile hazırlanan 8 tane hücreye ait ölçüm elde edildi ancak üretilen hücrelerden birinde 3 defa denenmesine karşın verim gözlenmedi. Hücreler 2 farklı iyonik sıvı ile ölçüme hazır hale getirildi. Alınan en yüksek verim değeri %0.032 ve dolum faktörü %37,62 olarak bulunmuştur.

Pc4 ftalosiyanın türevi için; 20 ml THF için 9,6 mg madde kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti içerisinde farklı kalınlıklarda titanyum kaplanmış hücrelerden (2000rpm ve 3000rpm) 4 tanesi 24 saat ve diğer 4 tanesi ise 48 saat bekletildi. Toplamda Pc4 ile hazırlanan 8 tane hücreye ait ölçüm elde edildi. Hücreler 2 farklı iyonik sıvı ile ölçüme hazır hale getirildi. Alınan en yüksek verim değeri %0.054 ve dolum faktörü %40,72 olarak bulunmuştur.

Pc5 ftalosiyanın türevi için; 12 ml kloroform için 5,8 mg madde kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti içerisine Spin Coater'da 1500 rpm hız ile kaplanmış 2 adet Titanyum kaplı FTO yerleştirildi ve bu hücrelere ait ölçüm elde edildi. Hücreler 2 farklı iyonik sıvı ile ölçüme hazır hale getirildi. Alınan en yüksek verim değeri %0.011 ve dolum faktörü %27,91 olarak bulunmuştur.

Pc8 adlı ftalosiyanın türevi için; 12 ml kloroform için 4,7 mg madde kullanılarak çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti içerisine Spin coater'da 1500 rpm hız ile kaplanmış 2 adet Titanyum kaplı FTO yerleştirildi ve bu hücrelere ait ölçüm

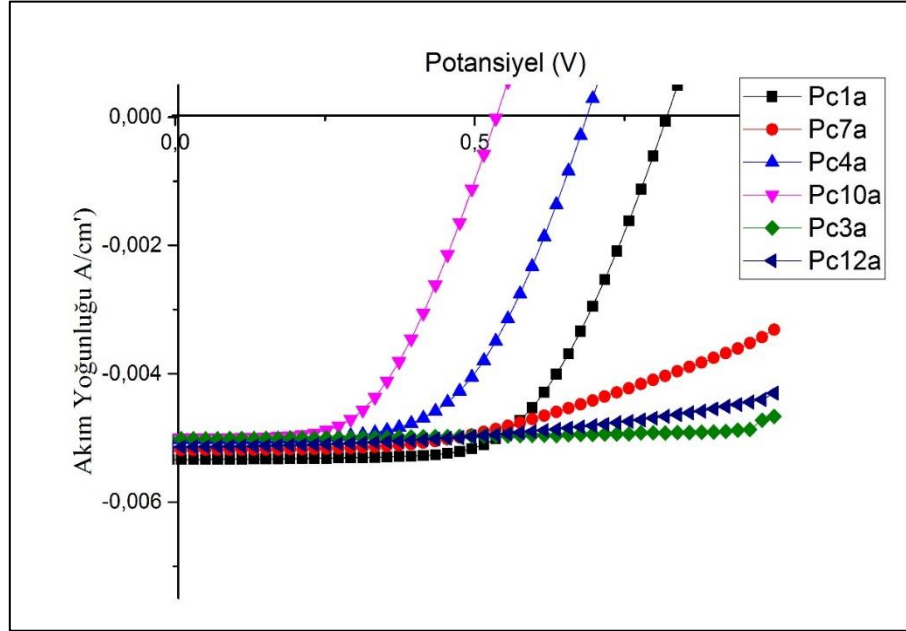
elde edildi. Hücreler 2 farklı iyonik sıvı ile ölçüme hazır hale getirildi. Alınan en yüksek verim değeri %0.027 ve dolum faktörü %33,72 olarak bulunmuştur.

 l  m aŗamasında her hücre 5er defa ölçülerek ortalama verim hesabı yapıldı. Aŗaęıda Tablo 4.2’de farklı iyonik sıvı, farklı TiO₂ kaplama hızı ve ftalosiyanin çözeltisi içerisinde bekletilme süresine göre her bir hücreye iliŗkin elde edilen sonuçlar g sterilmiŗtir

Tablo 4. 2: Hollanda da Üretilen tüm hücelere ait karakterizasyon tablosu.

Boyar madde	Boyanma Süresi	İyonik Sıvı	Verim	Dolum Faktörü	Kısa Devre Akımı	Açık Devre Voltajı	TiO2 kaplama hızı
Pc1A	24	AY2	0.141790	39,44828	0.100702	0.356926	2000
PC1A	24	Z150	0.033610	72,93259	0.003508	0.311376	3000
PC1A	48	AY2	0.169655	45,79487	0.083467	0.443848	3000
PC1A	48	Z150	0.082386	51,09740	0.039391	0.409316	2000
PC7A	24	AY2	0.014857	29,18716	0.035414	0.143735	2000
PC7A	24	Z150	0.027424	36,65964	0.031418	0.238100	3000
PC7A	48	AY2	0.024963	30,90433	0.043729	0.184719	2000
PC7A	48	Z150	0.070206	44,86836	0.047013	0.332826	3000
PC4A	24	AY2					3000
PC4A	24	Z150	0.032617	37,62380	0.006254	0.138618	2000
PC4A	48	AY2	0.015588	26,42995	0.005646	0.104459	2000
PC4A	48	Z150	0.022634		0.003969		3000
PC10A	24	AY2	0.001710	30,80037	0.004236	0.131069	3000
PC10A	24	Z150	0.054494	40,72557	0.055896	0.239386	3000
PC10A	48	AY2	0.005026	32,87946	0.025821	0.059202	3000
PC10A	48	Z150	0.004039		0.003337		2000
PC3A*	24	Z150	0.011432	27,91092	0.004705	0.087051	1500
PC3A*	24	AY2	0.009285	26,10117	0.004482	0.079364	1500
PC12A*	24	Z150	0.027751	33,72087	0.036124	0.227818	1500
PC12A*	24	AY2	0.025022	33,03161	0.034387	0.220286	1500

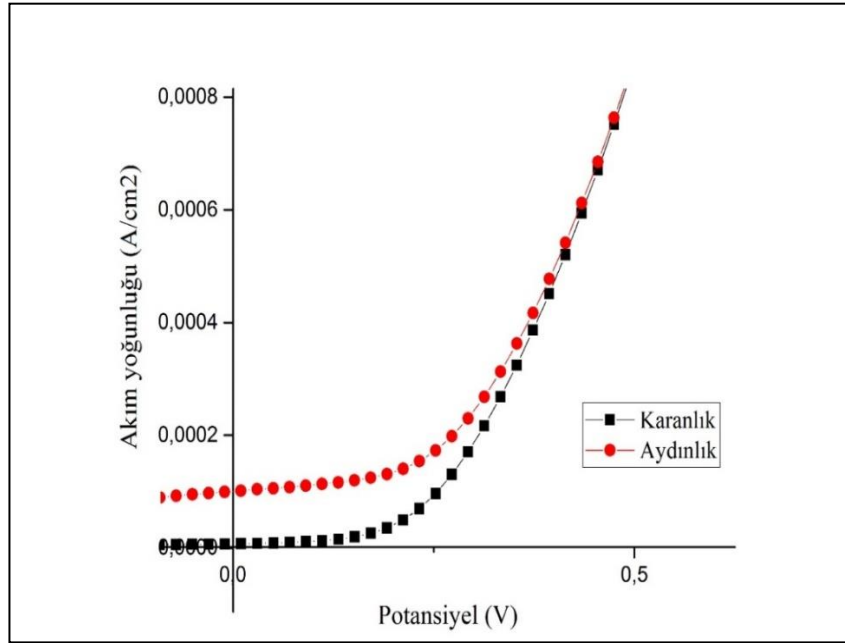
Yukarıdaki tabloda görülen değişken parametrelerden “iyonik sıvı” elektron akışını sağlayıcı kimyasaldır. “TiO₂ kaplama hızı” ise Spin Coater ile kaplanan Titanyum katmanının kalınlığına ilişkin bilgi vermektedir. Tüm hücrelerin aydınlık ölçümleri (solar simülatör altında) ise şöyledir;



Şekil 4. 10: Hollanda da üretilen hücrelere ait I-V grafiği.

Yapılan ölçümler neticesinde farklı ftalosiyeninler ile üretilen hücrelerin farklı iyonik sıvılarda en yüksek verimi verdiği görülmüştür. Titanyum kaplanan FTO’lar ftalosiyenin çözeltisi içerisinde 48 saat bekletildiğinde daha iyi verim gözlenmiştir. Bir önceki çalışmada aynı boyar malzemenin çözelti içerisinde bekletilme süreleri değiştirilmiş ve optimum kaplama süresi 48 saat olarak belirlenmişti. Bu çalışmada da 48 saatlik numunelerin 24 saatlik numunelerden daha iyi verim verdiği tekrar gözlenmiştir.

En yüksek verimin elde edildiği **Pc1a** ftalosiyanini ile üretilen hücreye ait hem aydınlık hem de karanlık ortamdaki ölçüm sonuçları ise şöyledir;



Şekil 4. 11: Pc1a ftalosiyanın ile üretilen hücreye ait aydınlık ve karanlık ölçümler.

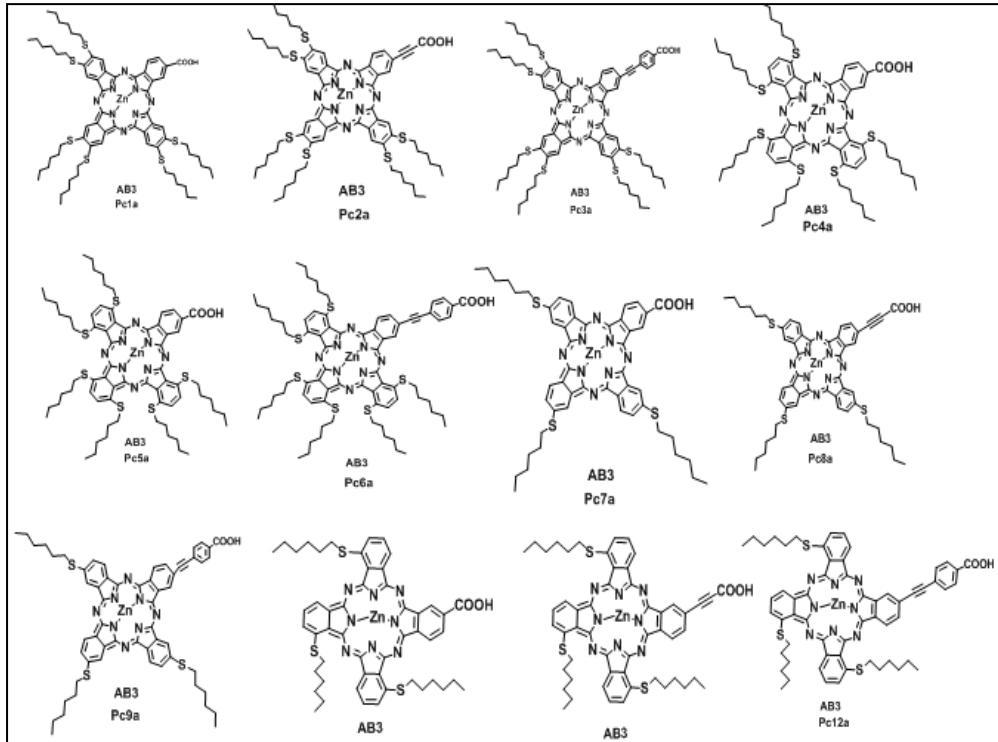
Yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi **Pc1a** için yapılan karanlık ve aydınlık ölçümleri arası farkın fazla olması, güneş hücresi uygulamalarında kullanılabilir bir molekül olduğunu göstermektedir. Ancak verimlerin az olması sebebiyle hücre üretim tekniklerinin geliştirilmeye ihtiyacı vardır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

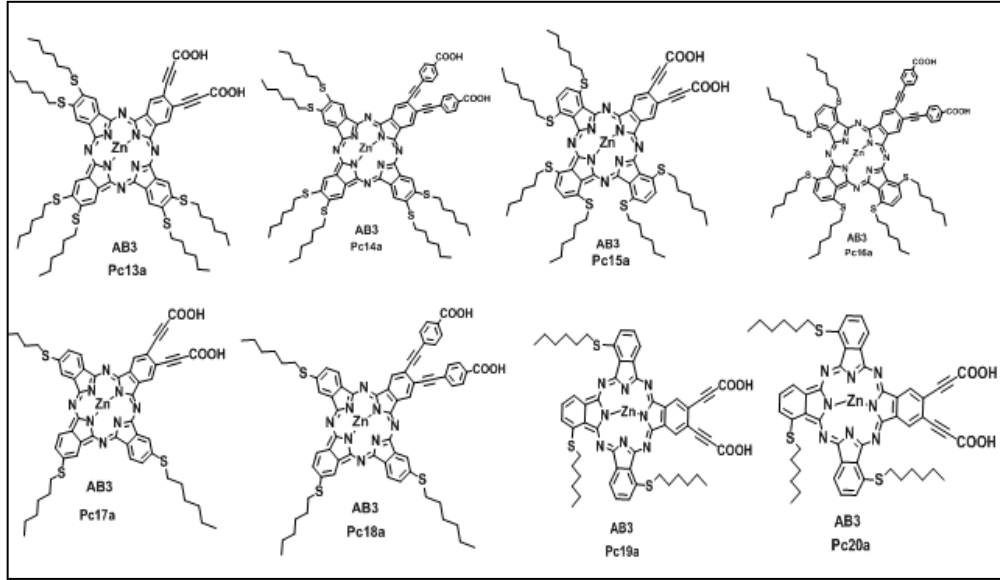
5.1. DSSC Üretimi İçin Sentezlenen Bileşiklerinin Sentezi ve Yapısal karakterizasyonları

Bu tez kapsamında GTÜ kimya bölümü laboratuvarlarında yirmi adet (**Pc1a**, **Pc3a**, **Pc4a**, **Pc7a**, **P9a**, **Pc10a**, **Pc11a**, **Pc12a**, **Pc13a**, **Pc14a**, **Pc15a**, **Pc16a**, **Pc17a**, **Pc18a**, **Pc19a**, **Pc20a**) asimetrik çino ftalosiyanın türevi 3 farklı karboksilli asit veya 2 farklı alkol sübstitüe dinitril türevi (A) ile dört farklı heksil tiya grupları içeren dinitril türevlerinin (B) 1:9 veya 1:10 mol oranında (A/B) karışımları ile bir çinko(II) klorür [ZnCl_2] ve organik baz olarak DBU varlığında DMF (dimetilformamid) içinde geri soğutucu altında kaynatılması ile sentezlenmiştir. Sentezi yapılan tüm ftalosiyanın türevlerinin yapısı MALDİ-MS, FT-IR, NMR, CV, UV-Vis, spektroskopisi teknikleri kullanılarak aydınlatılmış ve DSSC üretim ve karakterizasyonu yapılmıştır.

Aşağıda Şekil 4.12 ve şekil 4.13’de sentezi yapılan 20 adet ftalosiyanın bileşiğinin molekül yapısı verilmiştir.



Şekil 4. 12: DSSC üretimi için kullanılan ftalosiyaninler.



Şekil 4. 13: DSSC üretimi için kullanılan ftalosiyanınlar.

5.2. DSSC’lerin Üretim ve Karakterizasyonu

Boya duyarlı güneş hücreleri son yıllarda birçok avantajından ötürü dünya çapında gelecek vadededen bir araştırma konusu olmuştur. Bu tez çalışmasında hem boya duyarlı hücre katmanında kullanılmak üzere gerekli ftalosiyanın sentezi hem de hücre uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Farklı üniversitelerde yapılan üretim ve karakterizasyon teknikleri ile üretim basamakları ve sistemler arası bir mukayese fırsatı doğmuştur.

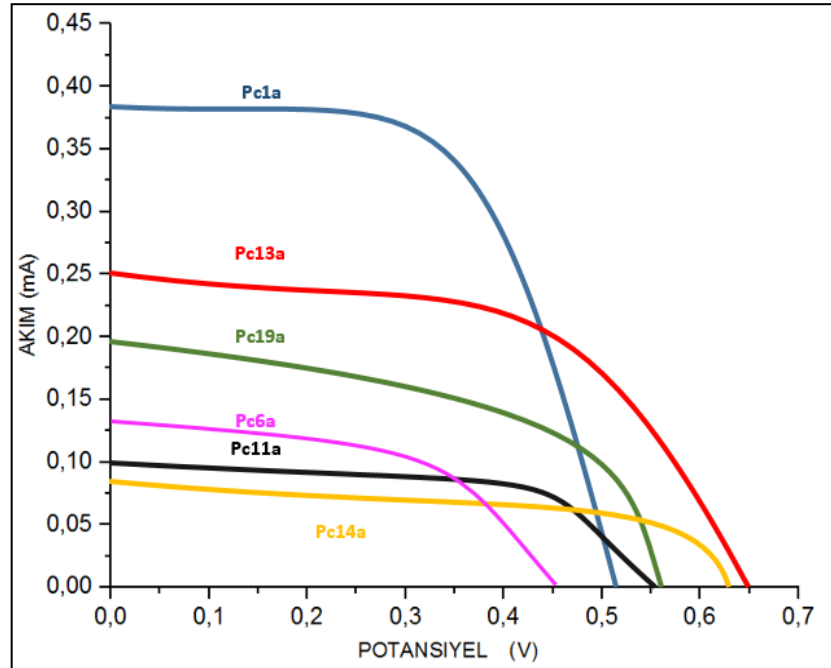
Hücre üretim teknikleri geliştirilerek nihai bir optimum değer yakalanmış ve geliştirilen basamaklar ilk sentezlenen kimyasallar ile tekrar denenerek yapılan iyileştirme çalışmalarının sonuçları görülmüştür. Örneğin **Pc1a** adlı ftalosiyanın kullanılarak üretilen hücrelerde uygulanan hücre üretim basamakları daha sonraları geliştirilmiş ve **Pc1a** ile tekrar denendiğinde verim artışı görülmüştür. Bunun gibi birçok iyileştirme ile üretilen ve üretilecek olan hücrelerin verim değerlerinin artırılması hedeflenmiştir.

Elektrolit olarak Z-150 iyodolit kullanılarak, GTÜ ve Hollanda da üretimi yapılan DSSC’lerden elde edilen elektriksel ölçüm sonuçları Tablo 5.1 de toplu olarak gösterilmiştir.

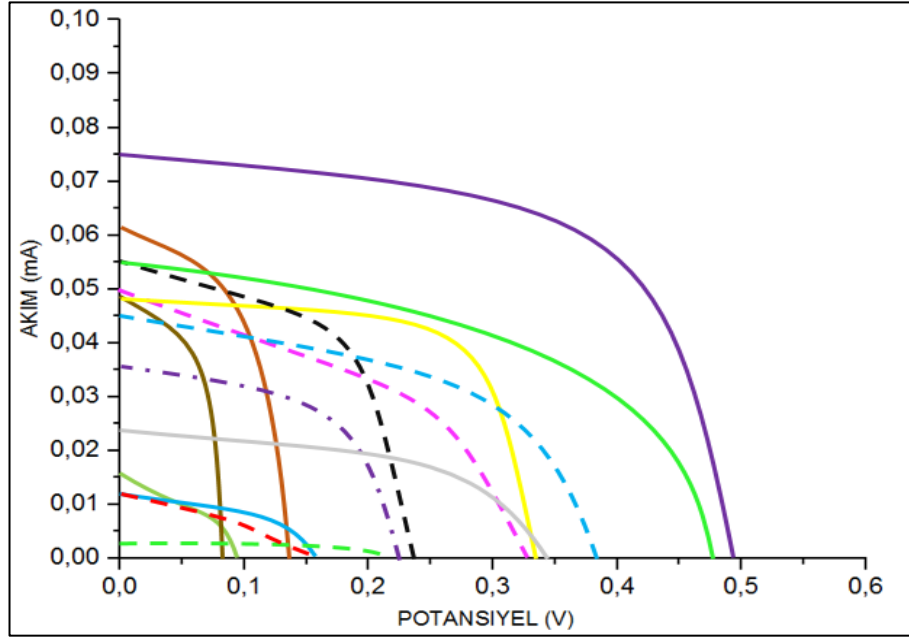
Tablo 5. 1: Üretilen tüm hücelere ait karakterizasyon tablosu.

	BOYA	Voc (mV)	Isc (mA)	Ip (mA/cm ²)	FF	n (%)	Çözücü
	Pc1a	514	0,383	1,532	50,73	0,541	Kloroform
	Pc2a	94	0,016	0,064	51,94	0,014	THF
	Pc3a	87	0,047	0,188	27,91	0,011	Etanol
	Pc4a	138	0,062	0,248	37,62	0,032	Etanol
	Pc5a	327	0,051	0,204	51,36	0,045	THF+Pridin
	Pc6a	451	0,13	0,52	54,07	0,114	Etanol
	Pc7a	332	0,047	0,188	44,86	0,070	Etanol
	Pc8a	155	0,011	0,044	42,21	0,032	THF
	Pc9a	215	0,003	0,012	35,57	0,024	Etanol
	Pc10a	239	0,056	0,224	40,72	0,054	Etanol
	Pc11a	554	0,098	0,392	40,32	0,08	THF+Pridin
	Pc12a	227	0,036	0,144	33,72	0,027	Etanol
	Pc13a	649	0,251	1,004	60,22	0,103	THF
	Pc14a	632	0,085	0,34	39,03	0,095	THF
	Pc15a	154	0,013	0,052	54,32	0,033	THF+Pridin
	Pc16a	347	0,024	0,096	57,99	0,063	THF+Pridin
	Pc17a	497	0,075	0,3	35,32	0,058	THF
	Pc18a	478	0,055	0,22	26,94	0,031	THF+Pridin
	Pc19a	560	0,19	0,76	48,31	0,18	THF+Pridin
	Pc20a	386	0,045	0,18	38,01	0,027	THF+Pridin

Tabloda yer alan tez kapsamında hücre ölçümleri yapılan tüm ftalosiyanın bileşiklerine ait akım gerilim grafikleri de Şekil 4.14 ve 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4. 14: Yüksek verime sahip hücelere ait I-V grafiği.



Şekil 4. 15: Üretilen diğer ftalosiyanimlere ait I-V grafiği.

KAYNAKLAR

- [1] O'regan B., Graetzel M., (1991), "High-Efficiency Solar Cell Based On Dye Sensitized Colloidal TiO₂ Films", *Nature*, 353, 737-740.
- [2] Muduli, S., Game O., Dhas V., Yengantiwar A., Ogale S. B., (2011), "Shape preserving chemical transformation of ZnO mesostructures into anatase TiO₂ mesostructures for optoelectronic applications", *Energy Environ. Sci*, 4, 2835-2839.
- [3] Chen D., Huang F., Cheng Y.-B., Caruso R. A., (2009), "Mesoporous Anatase TiO₂ Beads with High Surface Areas and Controllable Pore Sizes: A Superior Candidate for High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells", *Adv. Mater*, 21, 2206–2210.
- [4] Kim D., Ghicov A., Albu S. P., Schmuki P., (2008), "Bamboo-Type TiO₂ Nanotubes: Improved Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells" *J. Am. Chem. Soc*, 130, 16454–16455.
- [5] Ghadiri E., Taghavinia N., Zakeeruddin S. M., Grätzel M., Moser J. E., (2010), "Enhanced Electron Collection Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells Based on Nanostructured TiO₂ Hollow Fibers", *Nano Lett*, 10, 1632–1638.
- [6] Gao F., Wang Y., Shi D., Zhang J., Wang M., Jing X., Humphry-Baker R., Wang P., Zakeeruddin S. M., Grätzel M., (2008), "Enhance the Optical Absorptivity of Nanocrystalline TiO₂ Film with High Molar Extinction Coefficient Ruthenium Sensitizers for High Performance Dye-Sensitized Solar Cells", *J. Am. Chem. Soc*, 130, 10720–10728.
- [7] Ito S., Zakeeruddin S. M., Humphry-Baker R., Liska P., Charvet R., Comte P., Nazeeruddin M. K., Pechy P., Takata M., Miura H., Uchida S., and Gratzel M., (2006), "Fabrication of Screen-Printing Pastes From TiO₂ Powders for Dye-Sensitised Solar Cells", *Adv. Mater*, 18, 1202–1205.
- [8] Argazzi R., Iha N.-Y.-M., Zabri H., Odobel F., Bignozzi C.A., (2004), "Design Of Molecular Dyes For Application In Photoelectrochemical And Electrochromic Devices Based On Nanocrystalline Metal Oxide Semiconductors", *Coord.Chem. Rev*, 248, 1299–1316.
- [9] Ogura R. Y., Nakane S., Morooka M., Orihashi M., Suzuki Y., Noda K., (2009), "High-Performance Dye-Sensitized Solar Cell with A Multiple Dye System", *Appl. Phys. Lett*, 94, 073308.
- [10] Allegrucci A., Lewcenko N. A., Mozer A. J., Dennany L., Wagner P., Officer D.L., Sunahara K., Mori S., (2009), "Spiccia, Improved performance of porphyrin-based dyesensitised solar cells by phosphinic acid surface treatment", *Energy Environ. Sci*, 2, 1069-1073.

- [11] Kuang D., Walter P., Nu"esch F., Kim S., Ko J., Comte P., Zakeeruddin S. M., Nazeeruddin M. K., Gratzel M., (2007), "Co-sensitization of Organic Dyes for Efficient Ionic Liquid Electrolyte-Based Dye-Sensitized Solar Cells", *Langmuir*, 23, 10906–10909.
- [12] Chen Y., Zeng Z., Li C., Wang W., Wang X., Zhang B., (2005) "Highly efficient co-sensitization of nanocrystalline TiO₂ electrodes with plural organic dyes", *New J. Chem*, 29, 773–776.
- [13] M.Wu, X. Lin, T. Wang, J. Qiu, T.M., (2011), "Low-Cost Dye-Sensitized Solar Cell Based on Nine Kinds of Carbon Counter Electrodes", *Energy Environ. Sci*, 4, 2308-2315.
- [14] Yella A., Lee HW., Tsao HN., Yi C., Chandiran AK., (2011), "Porphyrin-Sensitized Solar Cells with Cobalt (II/III) –Based Redox Electrolyte Exceed 12 Percent Efficiency", *Science*, 334-629.
- [15] McGehee M. D., (2011), "Paradigm Shifts in Dye-Sensitized Solar Cells", *Science*, 334, 607-608.
- [16] Park N.G., Kim K. M., Kang M.G., Ryu K. S., Chang S. H., Shin Y. J., (2005), "Chemical Sintering of Nanoparticles: A Methodology for Low-Temperature Fabrication of Dye-Sensitized TiO₂ Films", *Adv. Mater*, 17, 2349–2353.
- [17] Lee K.M., Wu S.J., Chen C.Y., Wu C. G., Ikegami M., Miyoshi K., Miyasaka T., Ho K.C., (2009), "Efficient and Stable Plastic Dye-Sensitized Solar Cells Based on A High Light-Harvesting Ruthenium Sensitizer", *J. Mater. Chem*, 19, 5009–5015.
- [18] Kijitori Y., Ikegami M., Miyasaka T., (2007), "Highly Efficient Plastic Dye-sensitized Photoelectrodes Prepared by Low-temperature Binder-free Coating of Mesoscopic Titania Pastes", *Chem. Lett*, 36, 1, 190-191.
- [19] Zhang D., Yoshida T., Minoura H., (2003), "Low-Temperature Fabrication of Efficient Porous Titania Photoelectrodes by Hydrothermal Crystallization at the Solid/Gas Interface", *Adv. Mater*, 15, 814–817.
- [20] Li Y., Lee W., Lee D. K., Kim K., Park N.G., Ko M. J., (2011) "Pure Anatase TiO₂ "Nanoglue": An Inorganic Binding Agent to Improve Nanoparticle Interconnections in The Low-Temperature Sintering of Dye-Sensitized Solar Cells", *Appl. Phys.Lett.*, 98, 103301.
- [21] Hagfeldt A., Boschloo G., Licheng Sun L., Kloo L., Pettersson H., (2010), "Dye-Sensitized Solar Cells", *Chemical Reviews*, 110, 6595–6663.
- [22] Ciesielski P. N., Hijazib F. M., Scott A.M., Faulkner C. J., Beard L., Emmett K., Rosenthal S.J., Clifffel D., Jennings G.K., (2010), "Photosystem I- Based Biohybrid Phtoelectrochemical Cells", *Biosource Technology*, 101, 9, 3053.

- [23] Yehezkeli O., Tel-Vered R., Wasserman J., Trifonov A., Michaeli D., Nechushtai R., Willner I., (2012), “Integrated Photosystem II-Based Photobioelectrochemical Cells”, *Nature Communication*, 3, 742.
- [24] Wohlgemuth J.H., Narayanan S., (1991), “Buried Contact Concentrator Solar Cells”, *Twenty Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1, 273-277.
- [25] “Publications, Presentations, and News Database: Cadmium Telluride”, *National Renewable Energy Laboratory*.
- [26] Zweibel K., Mason J., Fthenakis V., (2008), “A Solar Grand Plan”, *Scientific American*, 1, 64-73.
- [27] Biello D., (2008) “Solar Power Lightens Up with Thin-Film Technology”, *Scientific American*, 25.
- [28] Peng J., Lu L., Yang H., (2013), “Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback and Greenhouse Gas Emission of Solar Photovoltaic Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 255–274.
- [29] Fthenakis V., Kim H. C., (2010), “Life-Cycle Uses of Water in U.S. Electricity Generation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2039–2048.
- [30] Wild-Scholten M.J., (2013), “Energy Payback Time and Carbon Footprint of Commercial Photovoltaic Systems”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 119, 296–305.
- [31] Trabish H., (2012), “The Lowdown on The Safety of First Solar's CdTe Thin Film”, *greentechmedia.com*.
- [32] Mullins R., (2008), “Cadmium: The Dark Side of Thin-Film”, *Gigaom Structure Connect*, 10.
- [33] Peumans P., Bulovic V., Forrest S.R., (2000), “Efficient photon harvesting at high optical intensities in ultrathin organic double-heterostructure photovoltaic diodes”, *Applied Physics Letters*, 76, 2650.
- [34] Philipps S., (2014), “Photovoltaics Report”, *Fraunhofer ISE*, 18-19.
- [35] Web1,(2017), <http://www.solar-facts-and-advice.com/amorphoussilicon.html>, (Erişim Tarihi: 16/12/2017)
- [36] Web 2, (2017), <http://www.iea.org>, (Erişim Tarihi: 20/12/2017)
- [37] Fraunhofer ISE and NREL (2015), “Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology”, Retrieved 25 April 2015.

- [38] Web 3, (2017), <https://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>, (Erişim Tarihi: 13/11/2017)
- [39] Moss, S. J., Ledwith, A., (1987), "The Chemistry of the Semiconductor Industry". 1th Edition, Springer.
- [40] Milliron, D. J., Gur I. A., Paul A., (2005), "Hybrid Organic–Nanocrystal Solar Cells", MRS Bulletin, 30, 41-44.
- [41] Shaheen S. E., Ginley D. S., Jabbour G. E., (2005), "Organic–Based Photovoltaics", MRS Bulletin, 30, 10.
- [42] Saunders B.R., Turner M.L., (2008), "Nanoparticle-Polymer Photovoltaic Cells", Advances in Colloid and Interface Science, 138 (1) 1–23.
- [43] Sariciftci N.S., Smilowitz L., Heeger A.J., Wudl F., (1993), "Semiconducting polymers (as donors) and buckminsterfullerene (as acceptor): photoinduced electron transfer and heterojunction devices", Synthetic Metals, 59 (3), 333–352.
- [44] Ginger D.S., Greenham N.C., (1999), "Photoinduced Electron Transfer from Conjugated Polymers to CdSe Nanocrystals", Physical Review B, 59 (16), 624–629.
- [45] Shaw P.E., Ruseckas, A., Samuel I.D.W., (2008), "Exciton Diffusion Measurements in Poly(3-hexylthiophene)", Advanced Materials 20 (18), 3516–3520.
- [46] Debije M. G., Verbunt P. C., Nadkarni P. J., Velate S., Bhaumik K., Nedumbamana S., Rowan B. C., Richards B. S., Hoeks T. L., (2011), "Promising Fluorescent Dye for Solar Energy Conversion Based on A Perylene Perinone", Applied Optics, 50 (2), 163-169.
- [47] Debije M. G., Verbunt P. C., Rowan B. C., Richards B. S., Hoeks T. L., (2008), "Measured surface loss from luminescent solar concentrator waveguides", Applied Optics, 47 (36), 6763-6768.
- [48] McIntosh K. R., Yamada N., Richards B. S., (2007), "Theoretical Comparison of Cylindrical and Square-Planar Luminescent Solar Concentrators", Applied Physics B-Lasers and Optics, 88 (2), 285-290.
- [49] Bagher M. A., Vahid M. M. A., Mohsen M., (2015), "Types of Solar Cells and Application", American Journal of Optics and Photonics, 3, (5), 94-113.
- [50] Green, M. A., (2003), "Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion", Springer, 12, (1), 1437-0379.
- [51] Gupta N., Alapatt G. F., Podila R., Singh R., Poole K.F., (2009), "Prospects of Nanostructure-Based Solar Cells for Manufacturing Future Generations of Photovoltaic Modules", International Journal of Photoenergy 13.

- [52] Eperon, G. E., Stranks S. D., Menelaou C., Johnston, M. B., Herz L. M., Snaith, H.J., (2014), "Formamidinium Lead Trihalide: A Broadly Tunable Perovskite for Efficient Planar Heterojunction Solar Cells", *Energy & Environmental Science*, 7 (3), 982.
- [53] Noel N. K., Stranks S. D., Abate A., Wehrenfennig C., Guarnera S., Haghighirad A., Sadhanala A., Eperon G. E., Pathak S. K., Johnston M. B., Petrozza A., Herz L. M., Snaith H. J., (2014), "Lead-Free Organic– Inorganic Tin Halide Perovskites for Photovoltaic Applications", *Energy & Environmental Science*, 7 (9), 3061.
- [54] Snaith H. J., (2013), "Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 21, 3623-630.
- [55] Joong J. N., Noh J. H., Kim Y. C., Yang W. S., Ryu S., and Seok S. I., (2015), "Solvent Engineering for High-performance Inorganic–organic Hybrid Perovskite Solar Cells", *Nature Materials*, 13, 897-903.
- [56] Qi C., Zhou H., Hong Z., Luo S., Duan S., Wang H.H., Liu Y., Li G., Yang Y., (2014), "Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells via Vapor-Assisted Solution Process", *Journal of the American Chemical Society*, 136 (2), 622-25.
- [57] Liu M., Johnston M. B., Snaith H. J., (2013), "Efficient Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells by Vapour Deposition", *Nature*, 501, 7467, 395-98.
- [58] Gratzel M., (2001), "Photoelectrochemical Cells", *Nature*, 414, 338-344.
- [59] Khaselev O., Turner J.A., (1998), "A Monolithic Photovoltaic-Photoelectrochemical Device for Hydrogen Production Via Water Splitting", *Science*, 280, 425-427.
- [60] Licht S. J., (2001), "Multiple Band Gap Semiconductor/Electrolyte Solar Energy Conversion", *Phys. Chem.*, 105, 6281-6294.
- [61] Nowotny J., Bak T., (2005), "Solar-hydrogen: Environmentally safe fuel for the future", *Int. Journal of Hydrogen Economy*, 30, 521 - 544.
- [62] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D., (2012), "Progress in Photovoltaics: Research and Applications", 20 (1), 1-126.
- [63] Krebs F. C., (2007), "Organic Solar Cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10, 1002, 794.
- [64] Krebs F. C., Hosel M., Corazza M., Berenger R., Madsen V.M., gevorgyan A.S., (2013), "Freely available OPV-The fast way to progress", *Energy Thecnology*, 1, (7), 378-381

- [65] Green M., Emery K., Hishikava Y., (2012), “Solar Cell Efficiency Tables”, *Photovoltaics*, 20, (1) 12-20.
- [66] Jorgensen M., Norrman K., Krebs F. C., (2008), “Stability/degradation of polymer solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (92) 686-714.
- [67] Krebs F. C., (2009), “Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, (4), 394-412.
- [68] Brabec C. J., (2004), “Organic photovoltaics: Technology and market”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 83, (2-3), 273-292.
- [69] Baskoutas S., Terzis A. F., (2006), “Size-dependent band gap of colloidal quantum dots”, *Journal of Applied Physics*, (99), 013708.
- [70] Sargent E. H., (2005), “Infrared Quantum Dots”, *Advanced Materials*, 17 (5), 515–522.
- [71] Alexander H., Thon, S. M., Hoogland S., Voznyy O., Zhitomirsky D., Debnath R., Levina L., Rollny, Lisa R., Carey G. H., Fischer A., Kemp K. W., Kramer I. J., Ning Z., Labelle A. J., Chou K. W., Amassian A., Sargent E. H., (2012), “Hybrid passivated colloidal quantum dot solid”, *Nature Nanotechnolog*, 7 (9), 577–582.
- [72] Mitchell M., (2014), “New nanoparticles bring cheaper, lighter solar cells outdoors”, *Rdmag.com*. Retrieved, 2014-08-24.
- [73] Tributsch H., (1972), “Reaction of Excited Chlorophyll Molecules at Electrodes and in Photosynthesis”, *Photochem. Photobiology*, 16, 261-269.
- [74] Vlachopoulos N., Liska P., Augustynski J., Graetzel M., (1988), “Very efficient visible light energy harvesting and conversion by spectral sensitization of high surface area Polycrystalline titanium dioxide films”, *Journel American Chemical Society*, 110 (4), 1216–1220.
- [75] Chen C., Wang M., Li J., Pootrakulchote N., Alibabaei L., Ngoc-le C., Decoppet J., Tsai J., Wu C., Zakeeruddin S. M., and Grätzel M., (2009), “Highly Efficient Light Harvesting Ruthenium Sensitizerfor Thin-Film Dye-Sensitized Solar Cells”, *ACS Nano*, 3, 3103.
- [76] Chiba Y., Islam A., Watanabe Y., Komiya R., Koide N., and Han L., (2006), “Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1%”, *Jpn. J. Applied Physics*, 45, L638.
- [77] Grätzel M., (2006), “The Advent of Mesoscopic Injection Solar Cells, Progress in Photovoltaics”, *Research and Applications*, 14(5), 429-442.
- [78] Barber J., and Andersson B., (1994), “Revealing the Blueprint of Photosynthesis”, *Nature*, 370 (6484), 31-34.

- [79] Rothenberger G., Fitzmaurice D., and Grätzel M., (1992), “Spectroscopy of Conduction Band Electrons in Transparent Metal Oxide Semiconductor Films: Optical Determination of the Flat Band Potential of Colloidal Titanium Dioxide Films”, *Journal Physical Chemistry*, 96, 5983-5986.
- [80] Barbé C. J., Arendse F., Comte P., Jirousek M., Lenzmann F., Shklover V., Grätzel M., (1997), “Nanocrystalline Titanium Oxide Electrodes for Photovoltaic Applications”, *Journal of the American Ceramic Society*, 80 (12), 3157–3171.
- [81] Wang Q., Ito S., Grätzel M., Fabregat-Santiago F., Mora-Seró I., Bisquert J., Bessho T., and Imai H., (2006), “Characteristics of High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells”, *Journal Physical Chemistry B*, 110 (50), 25210–25221.
- [82] Zukalová M., Zukal A., Kavan L., Nazeeruddin M. K., Liska P., Grätzel M., (2005), “Organized Mesoporous TiO₂ Films Exhibiting Greatly Enhanced Performance in Dye Sensitized Solar Cells”, *Nano Letters*, 5 (9), 1789–1792.
- [83] Kang T., Smith A. P., Taylor B. E., Durstock M. F., (2009), “Fabrication of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays and Their Use in Dye-Sensitized Solar Cells”, *Nano Letters*, 9 (2), 601–606.
- [84] Hagfeldt A., Gratzel M., (1995), “Light-Induced redox reactions in nanocrystalline systems”, *Chemical Review*, 95, 49–68.
- [85] Rensmo H., Keis K., Lindström H., Södergren S., Solbrand A., Hagfeldt A., and Lindquist S.E., (1997), “High Light-to-Energy Conversion Efficiencies for Solar Cells Based on Nanostructured ZnO Electrodes”, *Journal Physical Chemistry B*, 101 (14), 2598–2601.
- [86] Martinson A., Elam J., Hupp J., and Pellin M., (2007), “ZnO Nanotube Based Dye-Sensitized Solar Cells”, *Nano Letters*, 7 (8), 2183–2187.
- [87] Snaith H. J., Ducati C., (2010), “SnO₂ -Based Dye-Sensitized Hybrid Solar Cells Exhibiting Near Unity Absorbed Photon-to-Electron Conversion Efficiency”, *Nano Letters*, 10 (4), 1259–1265.
- [88] Sharma R., Mane R. S., Min S., Han S., (2009), “Optimization of Growth of In₂O₃ Nanospheres Thin Films by Electrodeposition for Dye-Sensitized Solar Cells”, *Journal of Alloys and Compounds*, 479 (1-2), 840-843.
- [89] Kay A., Grätzel M., (2002), “Dye-Sensitized Core-Shell Nanocrystals: Improved Efficiency of Mesoporous Tin Oxide Electrodes Coated with a Thin Layer of an Insulating Oxide”, *Chemical Material*, 14 (7), 2930–2935.
- [90] Viet A. L., Jose R., Reddy M. V., Chowdari B. V. R., Ramakrishna S., (2010), Nb₂O₅ Photoelectrodes for Dye-Sensitized Solar Cells: Choice of the Polymorph”, *Journal Physical Chemistry C*, 114 (49), 21795–21800.

- [91] Shklover V., Nazeeruddin M. K., Zakeeruddin S. M., Barbé C., Kay A., Haibach T., Steurer W., Hermann R., Nissen H. U., Grätzel M., (1997), "Structure of Nanocrystalline TiO₂ Powders and Precursor to Their Highly Efficient Photosensitizer", *Chemical Material*, 1997, 9 (2), 430–439.
- [92] Nakade S., Matsuda M., Kambe S., Saito Y., Kitamura T., Sakata T., Wada Y., Mori H., Yanagida S., (2002), "Dependence of TiO₂ Nanoparticle Preparation Methods and Annealing Temperature on the Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells", *Journal Physical Chemistry B*, 106 (39), 10004-10010.
- [93] Nakade S., Saito Y., Kubo W., Kitamura T., Wada Y., Yanagida S., (2003), "Influence of TiO₂ Nanoparticle Size on Electron Diffusion and Recombination in Dye-Sensitized TiO₂ Solar Cells", *J. Phys. Chem. B*, 107, 8607-8611.
- [94] Nazeeruddin M. K., Péchy P., Renouard T., Zakeeruddin S. M., Humphry-Baker R., Comte P., Liska P., Cevey L., Costa E., Shklover V., Spiccia L., Deacon G. B., Bignozzi C. A., Grätzel M., (2001), "Engineering of Efficient Panchromatic Sensitizers for Nanocrystalline TiO₂ -Based Solar Cells", *Journal American Chemical Society*, 123 (8), 1613-1624.
- [95] Grätzel M., (2004), "Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 164(1–3), 3-14
- [96] Ito S., Nazeeruddin M. K., Zakeeruddin S. M., Pechy P., Comte P., Gratzel M., Mizuno T., Tanaka A., Koyanagi T., (2009), "Study of Dye-Sensitized Solar Cells by Scanning Electron Micrograph Observation and Thickness Optimization of Porous TiO₂ Electrodes", *International Journal Photoenergy*, 517609.
- [97] Ito S., Murakami T. N., Comte P., Liska P., Grätzel C., Nazeeruddin M. K., Grätzel M., (2008), "Fabrication of Thin Film Dye Sensitized Solar Cells with Solar To Electric Power Conversion Efficiency Over 10%", *Thin Solid Films*, 516 (14), 4613–4619.
- [98] Burke A., Ito S., Snaith H., Bach U., Kwiakowski J., Grätzel M., (2008), "The Function of a TiO₂ Compact Layer in Dye-Sensitized Solar Cells Incorporating "Planar" Organic Dyes", *Nano Letters*, 8 (4), 977–981.
- [99] Choi H., Nahm C., Kim J., Moon J., Nam S., Jung D., Park B., (2012), "The Effect of TiCl₄ Treated TiO₂ Compact Layer on The Performance of Dye-Sensitized Solar Cell", *Current Applied Physics*, 12 (3), 737–741.
- [100] Ito S., Liska P., Comte P., Charvet R., Péchy P., Bac U., Schmidt-Mende L., Zakeeruddin S. M., Kay A., Nazeeruddin M. K., Grätzel M., (2005), "Control of Dark Current in Photoelectrochemical (TiO₂/I⁻ I₃⁻) and Dye-Sensitized Solar Cells", *Chemical Communication*, 34, 4351-4353.

- [101] Palomares E., Clifford J. N., Haque S. A., Lutz T., Durrant J. R., (2003), "Control of Charge Recombination Dynamics in Dye Sensitized Solar Cells by the Use of Conformally Deposited Metal Oxide Blocking Layers", *Journal American Chemical Society*, 125 (2), 475–482.
- [102] Zubavichus Y. V., Slovokhotov Y. L., Nazeeruddin M. K., Zakeeruddin S. M., Grätzel M., Shklover V., (2002), "Structural Characterization of Solar Cell Prototypes Based on Nanocrystalline TiO₂ Anatase Sensitized with Ru Complexes. X-ray Diffraction, XPS, and XAFS Spectroscopy Study", *Chemical Material*, 2002, 14(8), 3556–3563.
- [103] Zakeeruddin S. M., Nazeeruddin M. K., Pechy P., Rotzinger F. P., Humphry-Baker R., Kalyanasundaram K., Grätzel M., Shklover V., Haibach T., (1997), "Molecular Engineering of Photosensitizers for Nanocrystalline Solar Cells: Synthesis and Characterization of Ru Dyes Based on Phosphonated Terpyridines", *Inorganic Chemistry*, 36 (25), 5937–5946.
- [104] Grätzel M., Durrant J., (2008), "Dye-Sensitised Mesoscopic Solar Cells", *Nanostructured and Photoelectrochemical Systems for Solar Photon Conversion*, 503-536.
- [105] Çoğal S., Ela Ş, E., Ocakoğlu K., Oksuz A, U., (2015), "Asymmetric phthalocyanine derivatives containing 4-carboxyphenyl substituents for dye-sensitized solar cells", *Dyes and Pigments*, 113, 474-480.
- [106] Liu F., Zhu J., Hu L., Zhang B., Yao J., Nazeeruddin K., Gratzel M., Dai S., (2015), "Low-temperature, solution-deposited metalchalcogenide films as highly efficient counter electrodes for sensitized solar cells", *Journal of Materials Chemistry A*, (3), 6315.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Yavuz, 1989 yılında Diyarbakır’da doğmuş, ilk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamlamıştır. 2014 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü’nden mezun olmuş ve 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Bu süre zarfında Tübitak tarafından desteklenen 114M488 numaralı, ‘Fotovoltaik Teknolojiler için Asimetrik Ftalosiyanınların sentezi ve uygulamaları’ başlıklı projede proje asistanı olarak görev almıştır.