

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜNEŞ GÖZELERİNİN MODELLENMESİ VE VERİMLİLİK
ANALİZLERİ**

Hece BATUR

**Danışman
Prof. Dr. Nuri ÖZEK**

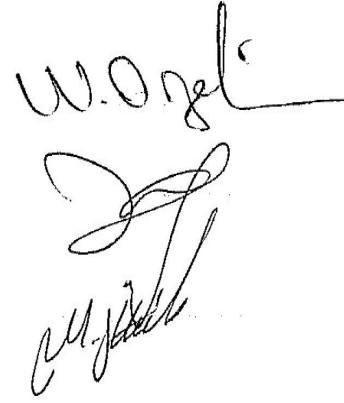
**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FEN BİLİMLERİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2013**

© 2013 [Hece BATUR]

TEZ ONAYI

Hece BATUR tarafından hazırlanan "Güneş Gözelerinin Modellenmesi ve Verimlilik Analizleri" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Prof. Dr. Nuri ÖZEK Süleyman Demirel Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. İskender AKKURT Süleyman Demirel Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Murat ÖZTÜRK Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü Doç.Dr. Ahmet ŞAHİNER

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Hece BATUR

H. Batur

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Güneş Enerjisi	3
2.2. Güneş Enerjisi Teknolojileri	6
3. TEORİK BİLGİ	9
3.1.YARIİLETKENLERİN ÖZELLİKLERİ	9
3.1.1. Maddenin Yapısı.....	9
3.1.2. Yarıiletkenler	12
3.1.2.1. Yarıiletkenlerin Yapısı	13
3.1.2.2. Enerji bantları.....	15
3.1.2.3. Yarıiletkenlerin Enerji Bant Yapısı.....	17
3.1.3. Yarıiletken Türleri	17
3.1.3.1. N tipi yarıiletken.....	18
3.1.3.2. P tipi yarıiletken	18
3.1.3.3. P – N kavşağı	19
3.2. Güneş Gözelerinin Tarihsel Gelişimi	20
3.3. Güneş Modülü	21
3.4. Fotovoltaik Hücreler.....	23
3.4.1. Fotovoltaik Modüllerin Temel Yapısı.....	24
3.4.2. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Elektriksel Özellikleri.....	25
3.4.3. Bir Fotovoltaik Güneş Piliinin Eşdeğer Devresi	26
3.5. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi.....	27
3.6. Güneş Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler.....	28
3.6.1 Sıcaklık.....	28
3.6.2. Yüzey Parametresinin Etkisi	29
3.6.3. Spektral Etki	29
3.7. Güneş Piliinde Verimliliğe Etki Eden Faktörler	29
3.7.1. Güneş Gözelerinin Yapısı ve I-V Karakteristiği	32
3.8. Boya Esaslı Güneş Pilleri	37
3.8.1. Organik Boya Esaslı Nano-kristal Yapılı TiO ₂ Güneş Piliinin Yapısı	37
3.8.2. Boya Esaslı İnce Film Fotovoltaik Hücre Çalışma Prensipleri	39
3.8.3. Boyalar	41
3.8.3.1. Metal Kompleksler	41
3.8.3.2. Rutenyum Boyaları.....	42
4. DENEYSEL KISIM.....	45
4.1. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Maddeler.....	45
4.2. Şeffaf İletken Oksit (TCO) Kaplı Elektrotlar:	46
4.3. TiO ₂ Çözelti Sentezi ve Pasta Hazırlanması.....	46
4.4. Çalışma Elektrot Yapımı	48
4.5. Karşıt Elektrotun Hazırlanması.....	48

4.6. Sıvı Elektrolitin hazırlanması ve Pil Yapımı	49
4.7. Pil Üretimi.....	49
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	51
6. SONUÇ	56
7. KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	60

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ GÖZELERİNİN MODELLENMESİ VE VERİMLİLİK ANALİZLERİ Hece BATUR

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nuri ÖZEK

Çok hızla gelişen teknoloji ve sanayileşme, sürekli artan nüfus ve bunların beraberinde getirdiği küresel kirlilik çağın en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Alternatif enerji kaynakları arasında en önemlilerinden biri güneştir. Güneş, dünya var olduğundan beri ısı ve ışık kaynağı olmasından dolayı tartışılmaz bir enerji kaynağı olmuştur. Bu tez çalışmasında boyar maddeli güneş pillerinin verimlilikleri incelenip sonuçları tartışılmıştır.

Autoklav denilen çelik basınç cihazı, reaksiyonların yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleşmesi için kullanılmıştır. Bu işlem için gerekli çözelti uygun miktarlarda titanyum(IV)izopropoksit, asetik asit ve deiyonize su içermektedir. Filmlerin iletken cam üzerine kaplanmasında sıyırma yöntemi kullanılmıştır ve çok katmanlı filmler hazırlanmıştır. Her kaplama sonunda filmler 470 °C’de yaklaşık yarım saatlik ısıtma işlemi tabii tutulmuştur.

TiO₂ kaplı ince filmler rutenyum boyası ile adsorplanarak çalışma elektrodu oluşturulmuştur. Karşıt elektrod ise platin kaplı iletken camdır. Sıvı elektrolit, iki farklı elektrod arasına enjekte edilmiştir. Sıvı elektrolit olarak iyodür/triiodat(I⁻/I₃⁻) çifti kullanılmıştır. Boya esaslı güneş pilleri yapılmıştır. Elde edilen pilleri seri ve paralel bağlayarak fotovoltaiik ölçümleri alınmıştır ve literatür ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: TiO₂, ince film, Rutenyum boyası

2013, 60 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MODELING AND EFFICIENCY ANALYSIS OF SOLAR CELLS Hece BATUR

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Physics**

Supervisor: Prof. Dr. Nuri ÖZEK

Very rapidly evolving technology and industrialization, which an ever-increasing population and global pollution one of the most important problems of the era has become brought. The solar energy is alternative sources of energy one of the most important. The sun, due to the World existence source of energy the of heat and light, its has been an indisputable source energy. In this study, dye-based of solar cells review and discuss the results of efficiency.

Steel pressure device called autoclav, reactions of high temperature and pressure for the realization were used. For this process appropriate solution amounts of titanium (IV) isopropoxide, acetic acid and deionized water contains was required. Films stripping method in the coating of conductive films on glass is used and multi-layer were prepared. Each coating end 470 °C for half an hour at of films are heat-treated.

TiO₂ coated thin films with ruthenium dye adsorption of inhibitors working electrode is formed. The opposite electrode with platinum is coated conductive glass. Liquid electrolyte, between two different electrodes is injected. The liquid electrolyte iyodür/triiyodat(I⁻/I₃⁻) are used. Solar cells base on dye is pare of fabricated. The photovoltaic cells are obtained as a serial and parallel connecting measurements and the experimental results are compared with the literature.

Keywords: TiO₂, thin film, ruthenium dyes

2013, 60 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Nuri ÖZEK'e teşekkürlerimi sunarım. Literatür araştırmalarımda yardımcı olan Uzman Esin EREN'e ve Doç. Dr. Murat ÖZTÜRK'e, elde edilen pillerin fotovoltaiik ölçümlelerini almamda yardımlarını esirgemeyen Ege Güneş Enerjisi Enstitüsü'e Doç. Dr. Ceylan ZAFER'e, Deniz AYKUT'a, Cihan ÖZSOY'a, Nermin KUTLU'ya ve Ege Güneş Enerjisi Enstitüsü çalışanlarına teşekkür ederim.

Labratuvarda çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Burçin TAÇ'a teşekkür ederim.

2853-YL-11 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Hece BATUR
ISPARTA, 2013

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Türkiye’de güneşlenme süresi	7
Şekil 3.1. Enerji Bandları	10
Şekil 3.2. Bir Yarıiletkenin Enerji Bant Diyagramı	11
Şekil 3.3. Elektronların çekirdekten uzaklıklarına göre enerji seviyeleri	12
Şekil 3.4. Yalıtılmış durumdaki bir atomun enerji seviyelerinin şematik olarak gösterimi	13
Şekil 3.5. Dış elektronlarına ait enerji seviyeleri belirtilmiş iki atomun şematik gösterimi	15
Şekil 3.6. İki atomun birbirine çok yakın olduğu durumdaki enerji seviyesi diyagramı	16
Şekil 3.7. Kristalik yapıda enerji bandı oluşumu	16
Şekil 3.8. N tipi yarıiletken	18
Şekil 3.9. P tipi yarıiletken	19
Şekil 3.10. p-n kavşağı oluşumu	19
Şekil 3.11. p-n kavşağı iç akımı	20
Şekil 3.12. Fotovoltaik dönüşüm sisteminin sematik gösterimi	24
Şekil 3.13. İdeal Bir Fotovoltaik Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi	27
Şekil 3.14. Tipik güneş pili modeli	28
Şekil 3.15. Elektron-deşik çiftinin oluşumunun gösterildiği güneş göze yapısı.	33
Şekil 3.16. Güneş gözesi eşdeğer devresi	33
Şekil 3.17. Karanlıkta ve aydınlıkta güneş gözesi karakteri.	34
Şekil 3.18. I-V eğrisinde açık devre geriliminin ve kısa devre akımının gösterimi	35
Şekil 3.19. Gözenin çıkış akımına (kırmızı çizgi) ve gücüne (mavi çizgi) karşı gerilim grafiği. Kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum güç noktalarının (V_{mp} , I_{mp}) Gösterimi	36
Şekil 3.20. Organik Boya Esaslı Nano-kristal Yapılı TiO_2 Güneş Pilinin Yapısı.	38
Şekil 3.21. DSSC’nin çalışma prensibi	39
Şekil 3.22. Rutenyum boyalarına örnekler	42
Şekil 4.1. Kullanılan rutenyum boyasının kimyasal yapısı	46
Şekil 4.2. Hazırlanan TiO_2 pasta ile kaplanmış camlar	48
Şekil 4.3. Ruthenyum boya ile adsorplanmış TiO_2 kaplı ITO cam	48
Şekil 4.4. Güneş pili	50
Şekil 5.1. Birinci güneş pilin akım-potansiyel eğrisi	51
Şekil 5.2. İkinci Güneş Pilin akım-potansiyel eğrisi	52
Şekil 5.3. Üçüncü Güneş Pilin akım-potansiyel eğrisi	52
Şekil 5.4. Dördüncü Güneş Pili akım-potansiyel eğrisi	53
Şekil 5.5. Paralel bağlı alınan 1. ölçüm akım-potansiyel eğrisi	53
Şekil 5.6. Paralel bağlı alınan 2. ölçüm akım-potansiyel eğrisi	54
Şekil 5.7. Seri bağlı alınan 1. ölçüm akım-potansiyel eğrisi	54
Şekil 5.8. Seri bağlı alınan 2. ölçüm akım-potansiyel eğrisi	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli	4
Çizelge 2.2. Türkiyedeki Bölgelerin Yıllık Bazda Ortalama Güneşlenme Süreleri.....	5
Çizelge 3.1. Fotovoltaik pilin kısa devre foto-akımına ve karanlık akımına etki eden faktörler	31
Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan kimyasal malzemelerin listesi	45
Çizelge 5.1. Güneş pil ölçümlerinin 1000 mW/cm ² ışınım ve AM 1.5 solar simulatör altındaki I-V ölçüm sonuçları ve verimleri.....	55
Çizelge 5.2. Seri ve paralel bağlı pillerin 1000 mW/cm ² ışınım ve AM 1.5 solar simulatör altındaki I-V ölçüm sonuçları ve verimleri.	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	soğurma katsayısını
black dye	(4,4',4''-trikarboksi- 2,2':6',2''- terpiridin) rutenyum(II)
BMGP	Boyar maddeli güneş pillerin
CB	iletkenlik bandına
DMİGM	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
e.m.k	elektromotor kuvveti
E_c	iletkenlik seviyesinin en alt seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_G	enerji bant genişliğine
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
E_{ilk}	elektronun geçiş yapmadan önce bulunduğu seviyenin enerjisi
E_{son}	elektronun geçiş yaptıktan sonra bulunduğu seviyenin enerjisi
E_v	değerlik bandının en üst seviyesi
E_{yap}	yapısal elektrik alan
H	Planck sabiti
HOMO	yükseltgenme enerji seviyeleri
I	akım
I^- / I_3^-	iyodür / triiyodür
I_0	diyotun doyma akımı
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_{SC}	foto-akım
I_{sc}	gözenin kısa devre akımı
ITO	indiyum katkılı kalay oksit
J_0	karanlık doyum akım yoğunluğunu
J_f	Fotoakım yoğunluğu
J_{kd}	pilin kısa devre akım yoğunluğu
J_L	ise yük direnci içinden geçen akım yoğunluklarını
K	Boltzmann sabiti
KI	potasyum iyodür
LUMO	indirgenme enerji seviyeleri
MLCT	Metalden liganta yük transfer
n_1	düşük enerjili enerji seviyesi
n_2	yüksek enerjili enerji seviyesi
N3	Cis-ditiyosiyanat bis (4,4'-dikarboksi-2,2'-bipiridin) rutenyum(II)
N719	Di-Tetrabutylammonium Cis-Bis (İso Thiocyanato) Bis (2,2'-Bipyridyl-4,4'-Dicarboxylato)- Ruthenium (II) 95% (NMR)
P	paralel ölçüm
PEG 20000	polietilen glikol
$P_{güneş}$	güneş ışımasını güç değeri
Pt	platin
PV	fotovoltaik
q	elektron yükü
R	yansıma katsayısını
R	Rydberg sabiti
R_s	güneş pilinin iç seri direncini
R_{sh}	şönt direncini, R_L yük direncini

S	seri ölçüm
T	tek ölçüm
T	mutlak sıcaklık
TEMEV	Temiz Enerji Vakfı
TiO ₂	titanyum dioksit
UGET-TB	Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu-Türkiye Bölümü
V	uçlar arasında oluşan potansiyel farkı
V _{ad}	açık devre gerilimi
V _{mp} , I _{mp}	maksimum güç noktalarının
V _{oc}	açık devre gerilimi
Θ	gelen ışığın foton açısını
Λ	yayılan fotonun dalga boyu

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun enerji ihtiyacı, artan nüfusa ve teknolojiye bağlı olarak gün geçtikçe hızlı bir şekilde artmaktadır. Mevcut geleneksel enerji kaynaklarından petrol, kömür ve doğalgazın yakın bir gelecekte tükenme durumuna geleceği açıktır. Ayrıca, bu enerji kaynaklarının giderek artan oranda kullanımı nedeniyle, dünya küresel ısınma tehditi ile karşı karşıyadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak ve geleneksel enerji kaynaklarına alternatif çevre dostu enerjilerin elde edilmesi için, uzun süredir yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında; güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmeyi amaçlayan güneş pilleri, önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Şenay, 2011).

Günümüzde, kişi başına düşen enerji tüketimi ile sağlanan üretim, ülkelerin ve milletlerin bir gelişmişlik göstergesi olarak kullanılmaktadır. Bugün hem gelişmiş ülkelerde hem de gelişmekte olan ülkelere hızlı nüfus artışı, sanayileşme gibi birçok nedenden dolayı enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Klasik diye adlandırdığımız fosil yakıtlarla bu talebin karşılanması ise mümkün görülmemektedir. Hızla tükenen, her geçen gün fiyatları yükselen ve çevreyi kirleten fosil enerji kaynakları yerine yenilenebilir, ucuz ve tükenmez temiz enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji ve hidrojen enerjisi sayılabilir. Bunlar arasında güneş enerjisi en popüler olanıdır.

Dünyadaki enerji türlerinin kökeni olarak güneş enerjisi gösterilmekte, diğer enerjiler güneş enerjisi kökenli “dönüşüm enerjileri” olarak tanımlanmaktadır. Bütün yenilenebilir enerjiler ve hatta fosil yakıtlar enerjilerini güneşten almaktadırlar. Termonükleer bir reaktör olan güneşten çeşitli dalga boylarında (62 MW/m^2) enerji yayılmakta ve güneşin bütün yüzeyinden yayılan enerjinin sadece iki milyarda biri yeryüzüne gelmektedir. Güneş enerjisinin atmosfer dışındaki ortalama ısınım değeri 1375 W/m^2 'dir. Güneş enerjisinin yeryüzündeki dağılımı dünyanın şekli nedeniyle büyük farklılıklar göstermekte olup, dünyaya gelen ortalama güneş enerjisi 0 ile 1100 W/m^2 arasında değişir. Güneş ısınımının tamamı dünya üzerine ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır, %50'si atmosferi geçerek dünya

yüzeyine ulaşır. Güneşten gelen ışıınının %20'si ise, atmosfer ve bulutlarda tutulur. Dünyaya gelen bütün güneş ışıınını, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir.

Ülkemiz, güneş enerjisi yönünden zengin bir konuma sahiptir. 36°-42° kuzey enlemleri ve 26°-45° doğu boylamları arasında yer alması ve bir bölümünün güneş kuşağı adı verilen bir bölgede bulunması, ülkemizde güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme çalışmalarına olan önemini arttırmıştır. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2.640 saat (günde 7,2 saat), ortalama toplam ışıının şiddetinin 1.311 KWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 KWh/m²-gün) olduğu tespit edilmiştir.

Şüphesiz yeryüzündeki organik yaşamın devamını sağlayan güneşin tükenmez enerjisidir. Güneş enerjisinden direkt ısı enerjisine dönüştürüldüğü gibi, bu enerjiyi elektriğe dönüştürerek depolayabilmek, taşıyabilmek daha caziptir. Güneş enerjisini elektriğe dönüştürülmesi fotovoltaik (PV) sistemleri veya halk arasında yaygın olarak kullanılan güneş pilleri teknolojileri ile mümkündür (Kudret, 2011).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş 1,4 milyon km çapıyla dünyanın 110 katı büyüklüğünde ve dünyadan $1,5 \times 10^{11}$ m uzaklıkta yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6.000 K olup iç bölgelerindeki sıcaklığın 8×10^6 K ile 40×10^6 K arasında değiştiği tahmin edilmektedir. Doğal ve sürekli bir füzyon reaktörü olan güneşin enerji kaynağı 4 Hidrojen atomunun 1 Helyum atomuna dönüşmesinde gizlidir. 4 hidrojen atomu 4,032 birim ağırlıkta, hâlbuki 1 Helyum atomu 4,003 birim ağırlıktadır. Bu olay sonucunda 0.029 akb kütle $E = mc^2$ bağıntısı sonucu enerjiye dönüşmektedir. Yani güneşte her saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle karşılığı $3,86 \times 10^{26}$ J enerji açığa çıkmakta ve bu enerji ışıınım şeklinde uzaya yayılmaktadır. Toplam enerji rezervi $1,785 \times 10^{47}$ J olan bu yıldız daha milyonlarca yıl ışımasını sürdüreceğinden dünya için sonsuz olarak kabul edilebilecek bir enerji kaynağıdır. Dünyanın çapına eşit bir dairesel alan üzerine çarpan güneş gücü, 178 trilyon kW düzeyindedir. Güneş enerjisi uzaya ve gezegenlere elektromanyetik ışıınım (radyasyon) biçiminde yayılır (Kabadayı, 2011).

Güneşten dünyaya gelen enerji, dünyada bir yılda kullanılan toplam enerjinin yaklaşık 20 bin katıdır. Teorik olarak dünyada kullanılabilir güneş enerjisi miktarı ise 120000 TW düzeyindedir. Bu da yaklaşık 76 milyar TEP'e eşdeğer enerjidir. Şu anda güneşten yıllık enerji üretiminin 3942 MWh (339 TEP) olduğunu temel alırsak, milyonda 4.6 TEP'e karşılık gelen kullanım oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Türkiye coğrafi konumu itibariyle dünyada güneş kuşağı olarak tarif edilen bölge içinde bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak ülkemiz güneş enerjisi kullanım imkânı açısından özellikle Avrupa ülkelerine göre çok daha şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nünde (DMİGM) ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE)'ninde mevcut yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışıınım şiddeti verilerinden yararlanarak yapılan çalışmaya göre; Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7.2 saat), ortalama toplam ışıınım şiddeti

ise 1311 kWh/m²yıl (günlük toplam 3.6 kWh/m²) düzeyindedir. Türkiye, 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye yılda birim metrekaresinden ortalama olarak 1.100 kWh'lık güneş enerjisi üretebilir. Dünyamızdaki tüm enerji kaynakları güneşten türemiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan fosil yakıtları, yüzyıllar önce güneşten aldığı enerji sayesinde değişime uğrayarak bugünkü kullanılır hale gelmişlerdir. Fosil yakıtlarının çok yakın gelecekte tükenebileceğinden dolayı enerji ihtiyacın büyük bir kısmını başka enerji kaynaklarından sağlanmalıdır. Alternatif enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri de güneş enerjisidir (Kabadayı, 2011).

Çizelge 2.1. Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli (EİE, 2013)

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	
OCAK	4,45	51,75	103,0
ŞUBAT	5,44	63,27	115,0
MART	8,31	96,65	165,0
NİSAN	10,51	122,23	197,0
MAYIS	13,23	153,86	273,0
HAZİRAN	14,51	168,75	325,0
TEMMUZ	15,08	175,38	365,0
AĞUSTOS	13,62	158,40	343,0
EYLÜL	10,60	123,28	280,0
EKİM	7,73	89,90	214,0
KASIM	5,23	60,82	157,0
ARALIK	4,03	46,87	103,0
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge Güneydoğu Anadolu bölgesidir. Bunu sırası ile Akdeniz, Ege, İç Anadolu, Doğu Anadolu, Marmara ve Karadeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi günümüzde elektrik enerjisi üretiminde, konutlarda ve iş yerlerinde ısıtmada, tarımsal teknolojide, sanayide, ulaşım araçlarında, iletişim araçlarında, sinyalizasyon ve otomasyonda kullanılmaktadır (Çizelge 2.2) (Boz, 2008).

Çizelge 2.2. Türkiye'deki Bölgelerin Yıllık Bazda Ortalama Güneşlenme Süreleri (EİE, 2013)

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

Güneş Enerjisinin Avantajları

- Doğrudan güneş enerjisini kullanır.
- Doğal ısıtma ve soğutma sistemleri kullanarak binaların gereksiz ve aşırı ticari enerji tüketimlerini önler.
- Çevre değerlerini korur, çevreye verilen zararları en aza indirir.
- Doğal ve sağlığa zararsız malzemeler kullanır.
- Ekonomiktir.
- Dışa bağımlı değildir.

Güneş Enerjisinin Dezavantajları

- Yarıiletkenler temin edilirken sıkıntı yaşanması.
- Verim/maliyet oranlarının yüksek olması.

Güneş enerjisinin kayda değer bir dezavantajı bulunmamaktadır. Verim arttırma, maliyet ve depolama zorlukları şimdilik önümüzde durmaktadır. Ancak fotovoltaiik piller ile ilgili çalışmalar arttıkça bu sorunlar aşılacaktır.

Güneş enerjisi, yeni ve yenilenebilir bir enerji kaynağı oluşu yanında; insanlık için önemli bir sorun olan çevreyi kirletici atıklarının bulunmaması, kolay uygulanabilmesi ve karmaşık bir teknoloji gerektirmemesi gibi üstünlükleri sebebiyle

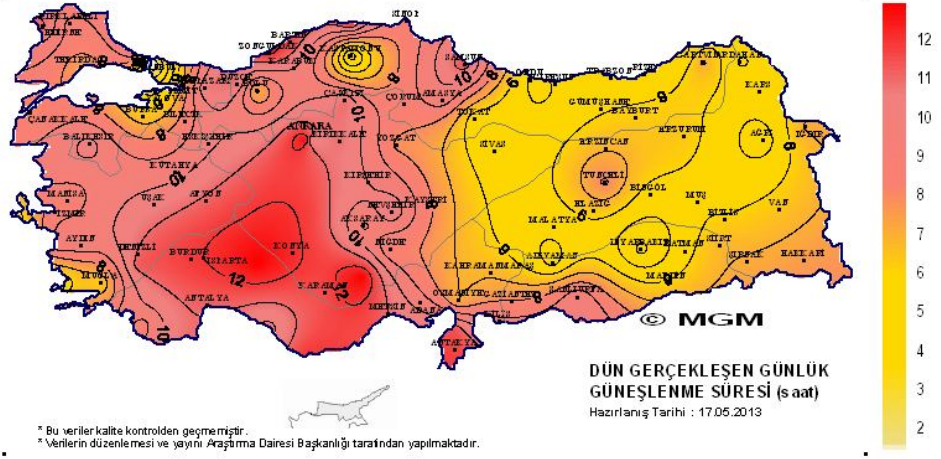
son yıllarda üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı bir alandır. Güneş enerjisi, dünyadaki hayatın temelini oluşturur, bol ve temiz bulunan bir kaynaktır.

Güneş enerjisinin kullanım alanları, özel amaçlara göre değişebilmektedir. Bu enerjinin kullanımındaki temel amaç, ekonomik rekabet koşullarında olabildiğince fosil yakıtların yerini almasıdır. Amaçlanan ve uygulanan kullanım alanları şöyle sıralanabilir:

1. Konutlarda, işyerlerinde ve gündelik yaşam yapısının çeşitli kesimlerinde ısı ve elektriğe dayalı bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
2. Endüstriyel enerji ihtiyacının bir bölümünün, ısı ve elektriğin birlikte üretim teknolojisiyle karşılanması.
3. Kırsal yörelerde ve tarımsal teknolojide enerji ihtiyacının karşılanması.
4. Kara, deniz ve hava taşıtlarının bir bölümünde hareketi sağlayıcı kaynak olarak kullanılması.
5. İletişim araçlarında (radyo, TV, telefon), sinyalizasyon ve otomasyonda bir bölüm enerji ihtiyacının karşılanması.
6. Elektrik sektörünün birincil kaynakları arasına güneş enerjisinin de girmesi.
7. Askeri alanda özel amaçlarla güneş enerjisinin kullanılması.
8. Uzay çalışmalarında enerji gereksiniminin karşılanması (İnan ve Ültanır, 1996, Boz 2008).

2.2. Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisinin yeterince kullanılabilmesi, uygun teknolojilerin geliştirilmesi ile mümkün olacaktır. Güneş santralleri için gerekli koşul sayılan yıllık en az 2000 saat güneşlenme süresi; Türkiye'de yaklaşık 2600, özellikle Güneydoğu, Anadolu Bölgesi'nde, yaklaşık 3000 saatlik süre ile sağlanmaktadır.



Şekil 2.1. Türkiye’de güneşlenme süresi

Güneş enerjisinden ısınma, soğutma veya elektrik elde etmede yararlanılabilir. Güneş enerjisinden yeterince yararlanmak, daha az yakıt (kömür, petrol, doğalgaz) kullanmayı beraberinde getirir. Daha az yakıt kullanmak, daha temiz ve sağlıklı çevre demektir. Temiz Enerji Vakfı (TEMEV) ve Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu-Türkiye Bölümü (UGET-TB) güneş enerjisinin ülkemizdeki kullanımını arttırmak için çalışmaktadırlar.

Güneş enerjisi teknolojilerini şu şekilde sınıflandırabiliriz:

“Isıl Güneş Teknolojileri,

Düşük sıcaklık sistemleri: Düzlemsel güneş kolektörleri, vakumlu güneş kolektörleri, güneş havuzları, güneş bacaları, su arıtma sistemleri, güneş mimarisi, ürün kurutma sistemleri ve seralar, güneş ocaklarıdır.

Yoğunlaştırıcı sistemler: Parabolik kollektörler, parabolik çanak sistemler, merkezi alıcı sistemlerdir.

Güneş enerjisi, kullanılacak alana göre uygun bir teknoloji ile başka bir enerji türüne dönüştürülür. Bugün en çok ihtiyaç duyduğumuz enerji türleri olan ısı ve elektrik enerjisidir. Bu yüzden de bugün yapılan çalışmaların çoğunluğu, güneş enerjisinden ısı ve elektrik enerjisi elde edilmesine yöneliktir. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde etme yöntemi, pasif ısıtma ve aktif ısıtma yöntemleriyle yapılmaktadır.

Güneş enerjisi kullanılarak hidrojen eldesi gibi dolaylı enerji taşıyıcısı elde etme yöntemleri de mevcuttur. Elektrik enerjisi üretimi açısından, güneşten gelen enerji başlıca iki sınıfa ayrılabilir. Bunlardan biri, kızılötesi dalga boylarını içeren ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkan kısım, diğeri ise görünür ve mor ötesi dalga boylarını kapsayan kısımdır.

Güneşin ısı enerjisini kullanan elektrik santrallerinde, güneş ışığı bilgisayar kontrollü aynalar tarafından bir kulede odaklanmaktadır. Burada, güneşten gelen ısı enerjisi bir akışkana aktarılmaktadır. Daha sonra bu ısı enerjisi, bir jeneratörü tahrik edecek buharı elde etmek için kullanılmaktadır. Bu tip bir santralden %5-6 arasında verim elde edilmektedir. Güneş kaynaklı fotonların enerjileri, fotovoltaiik güneş pilleri ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

3. TEORİK BİLGİ

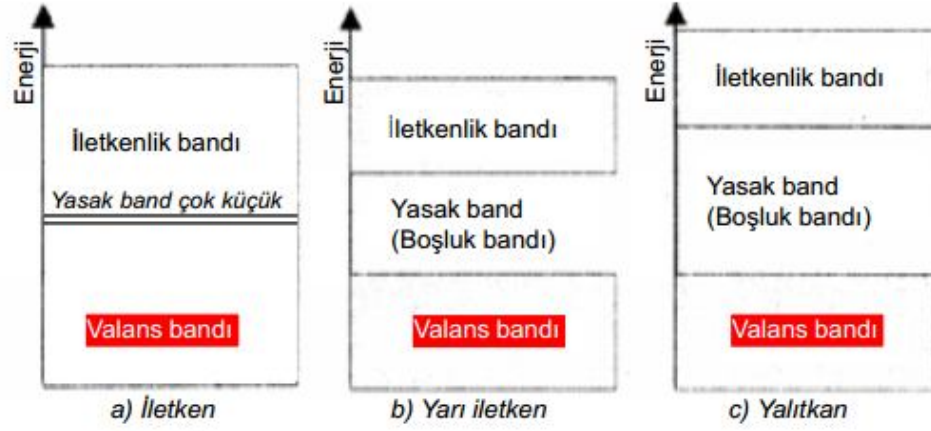
3.1.YARIİLETKENLERİN ÖZELLİKLERİ

3.1.1. Maddenin Yapısı

Bilindiği gibi madde, pozitif yüklü çok ağır bir çekirdekle, onun etrafında belirli yörüngelerde dolanan elektronlardan meydana gelmiştir. Bu yükler, dış tesir yoksa birbirini dengeler. Elektronlar, yörüngelerinin bulunduğu yarıçapa, orantılı olarak potansiyel ve kinetik enerji taşırlar. En dış yörünge de maksimum 2, sonrakinde 8 ve üçüncüde 18 elektron bulunabilir. Elektronlar, ard arda gelen ve her biri belli sayıda elektron bulunduran enerji bandlarında bulunurlar. Dışarıdan enerji alan bir elektron bir üst seviyedeki banda çıkabilir. Daha düşük banda geçen elektron da dışarı enerji yayar. Son tabaka elektronlarına valans (denge) elektronları denir ve cisimlerin kimyasal bileşikler yapmalarını temin eder. Son tabakası dolmamış bir atomun, bir başka cisme ait komşu atomdan elektron almaya yatkınlığı vardır. İç tabaka elektronları ise çekirdeğe çok sıkı bağlıdırlar. Termik enerji verilirse, elektronun yörüngesi etrafında titreşimi arttırır. Elektron, yörüngesini muhafaza ettiği müddetçe ne enerji yayar, ne de absorbe eder. Bir elektron, uyarımla, atomu terk edecek enerji kazanıp ayrılabilir. Atom (+) iyon şekline geçer. İzoleli atomda (gazlarda) elektronlar, belirli bir enerji bandını işgal ederler. Bir kristalin atomları, kristal içinde muntazam diziler halinde yer alırlar. Atomlar, birbirlerine çok yakındırlar ve elektronlar, birbirine yakın enerjileri temsil eden enerji bandları üzerinde bulunurlar. Yalıtılmış durumdaki elektronun üst enerji seviyelerinde elektronu bulunmaz. Boş olan bu banda, iletkenlik bandı denir. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasında oluşan ve elektron bulunması mümkün olmayan bölgeye yasak bant (boşluk bant) denir.

Elementin iletkenlik özelliğini gösterebilmesi için elektronlarının yasak bant aralığını atlamaları gerekir. Yarıiletkenler normalde yalıtkandırlar. Yani değerlik bandı dışında hiç serbest elektronları yoktur. Ancak ısı, ışık ve magnetik etki veya gerilim uygulandığında bir miktar değerlik elektronu serbest hale gelir ve iletkenlik bandına geçebilir. Bu durumda yarıiletken iletkenlik özelliği kazanır. Bu durum geçicidir.

Yani etki ortadan kalkarsa, elektronlar tekrar değerlik bandına geri dönerler. Yalıtkan, yarıiletken, iletken maddelerin enerji bandları Şekil 3.1.'de görülmektedir.



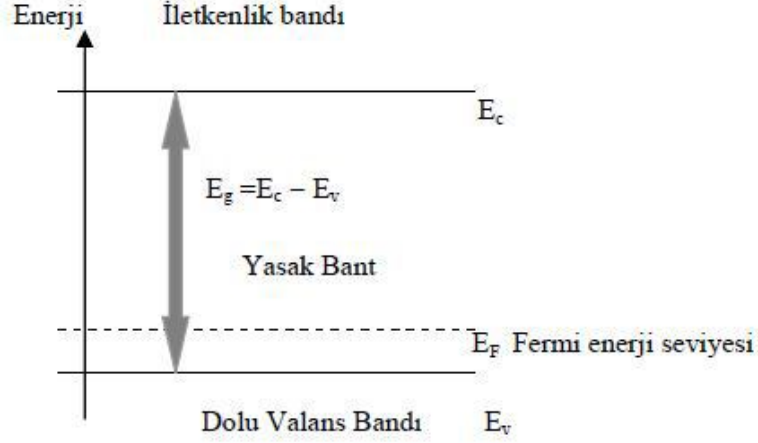
Şekil 3.1. Enerji Bandları

Fotoelektrik olay için E_g , kristalin soğurabileceği minimum enerjisini gösterir. Buna karşı, bir metalik kristalde yasak band yoktur, iletkenliği temin edecek, iletkenlik bandında çok sayıda elektron bulunur. Valans elektronlar, kovalent bağ içinde, bir atomdakinden daha düşük enerji seviyesindedir. Kristali bozmak için, bu enerji farkı kadar enerji gerekir. Bu kristalin kararlılığını gösterir.

Yasak enerji aralığı E_g 'nin değeri;

$$E_g = E_c - E_v \quad (3.1)$$

bağıntısına göre E_g iletkenlik seviyesinin en alt seviyesi E_c ile değerlik bandının en üst seviyesi E_v arasındaki farka eşittir.



Şekil 3.2. Bir Yarıiletkenin Enerji Bant Diyagramı

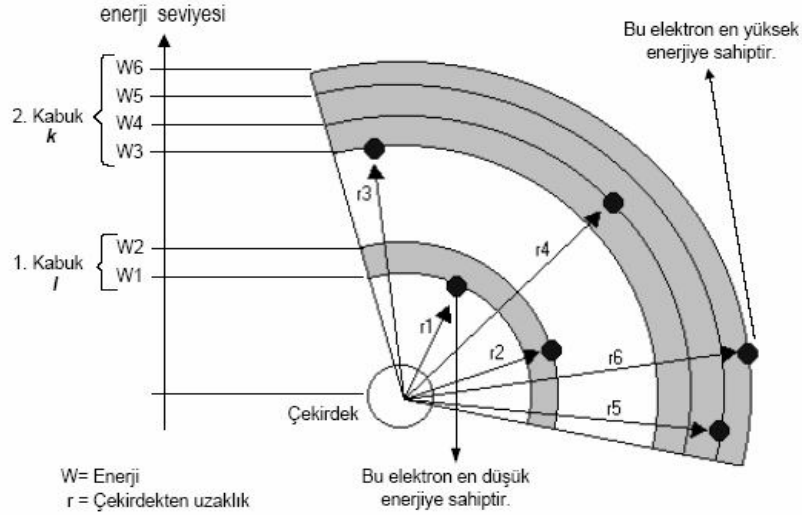
Şekil 3.2'de E_F ile gösterilen Fermi enerji seviyesidir. Fermi enerji seviyesi; katıda, mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronların bulunabileceği en yüksek enerji olarak tanımlanır. Fermi enerji seviyesi, katkı maddesi içermeyen saf yarıiletkenler için yasak bandın ortasında yer alır. Katkılı yarıiletkenler için katkı türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak; yukarı veya aşağı doğru kayabilir. İletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler arasındaki farklar enerji bant modeliyle açıklanabilir (Boz, 2008).

Herhangi bir dış etki ile elektronlar yasak enerji aralığına eşit veya daha fazla enerji kazanırlarsa; iletkenlik bandına geçerler ve geride boşluklar bırakırlar. Bu durumda bir elektrik alan uygulandığında; iletkenlik bandında bulunan elektronlar ile değerlik bandındaki boşlukların hepsi akım oluşturmada etkilidirler.

İki atomu birbirine bağlayan valans elektronların serbest hale geçmesi için gerekli enerji; metaller için 0 eV, yalıtkanlar için $E_G \geq 6\text{eV}$ elektron volt, yarı iletkenler için $2,5\text{eV} > E_G > 0,5\text{eV}$ civarındadır.

Bir atomda, elektron bulunduran yörüngeleri çekirdekten belirli uzaklıktadır. Çekirdeğin yakınındaki yörüngede bulunan elektronlar, çekirdeğin uzağındaki yörüngede bulunan elektronlardan daha az enerjiye sahiptir. Çekirdeğe farklı uzaklıklarda bulunan yörüngelerdeki elektronlar belirli enerji seviyelerine uyar. Atomda, enerji bantları olarak gruplaşmış yörüngeler “kabuk” olarak adlandırılır. Her bir atom, sabit bir kabuk sayısına sahiptir. Kabuklarda bulunan elektronlar ise

belirli bir sisteme göre dizilirler. Her bir kabuk, izin verilen maksimum sayıda elektron bulundurulur. Bu elektronların enerji seviyeleri değişmez. Çekirdek etrafında belirli bir yörüngeyi oluşturan kabuklar, k-l-m-n olarak gösterilirler. Çekirdeğe en yakın olan kabuk k'dır, k ve l kabukları Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Elektronların çekirdekten uzaklıklarına göre enerji seviyeleri

3.1.2. Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin tarihine bakıldığında, Edmond Becquerel'in 1839 yılındaki çalışmalarına kadar gitmek gerekir. Edmond Becquerel 1839 yılında, aynı elektrolit içine batırılmış iki elektrottan biri üzerine ışık düşürmüştü ve bunlar arasında bir potansiyel farkı oluştuğunu görmüştü. Bundan sonra, Faraday 1883 yılında gümüş sülfatın direncinin sıcaklıkla azaldığını bulmuştur. 1915 yıllarına doğru galen detektörler, 1920'de ise selenyum ve bakır oksit detektörler kullanılmaya başlanmıştır.

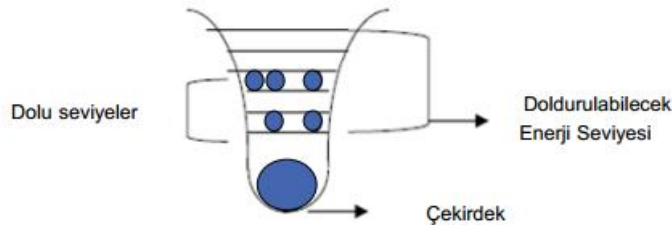
1923 yılında Schottky'nin yayınladığı kuru redresörler teorisi, yarıiletkenlerin teorik incelemesinde ilk adım olarak kabul edilmektedir. İkinci Dünya Savaşı'nda radar gereksinmelerinin bir sonucu olarak, yarıiletken diyotlar yeni bir gelişme alanı bulmuştur. 1958'de Amerika Birleşik Devletleri'nde, Brattain ve Bordein tarafından nokta temaslı detektörler keşfedilmiştir. Bundan kısa bir süre sonra Shockley, yüzey temaslı transistörü gerçekleştirmiştir (Oral, 1979; Kavcar, 2006).

İletkenlerde, sıcaklık arttıkça direnç artar. Bunun temel sebebi; iletkenliği sağlayan elektronların birbirleri ve etrafındaki diğer saçılma faktörleriyle (fononlar, kristal hataları v.b) daha fazla çarpışma yapmaları ve bundan dolayı hareketlerinin engellenmesidir. Sıcaklığın artmasıyla elektron yoğunluğunda bir değişim olması iletkenler için söz konusu değildir. Diğer bir ifadeyle; iletkenler için birim hacimdeki elektron sayısı her sıcaklık için sabittir. Tüm metaller bu gruba dahil olmaktadır. İletkenlerde dirençin sıcaklıkla artmasına karşın, yarıiletkenlerde öz direnç sıcaklıkla azalır.

Yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran bir özellik, sıcaklık arttığı zaman öz direncin küçülmesidir. Yarıiletkenin öz direncini etkileyen bir diğer faktör de, yabancı madde yoğunluğudur (Oral, 1979; Kittel, 1996; Erol, 2001).

3.1.2.1. Yarıiletkenlerin Yapısı

Yarıiletkenlerin yapısı, enerji bant modeliyle açıklanabilir. Enerji bant yapılarına bakarak iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenleri kıyaslayabiliriz. Element atomları, pozitif yüklü çok ağır bir çekirdek ile onun etrafında farklı yörüngelerde hareket eden belirli sayıda negatif yüklü elektronlardan meydana gelmiştir. Elektronlar, atomun çevresinde belirli enerji seviyelerinde bulunurlar. Dolu bir tabakaya başka bir elektron yerleşemez. Yani her bir elektronun tüm kuantum sayıları aynı olamaz. Şekil 3.4'de elektronların yerleşebilecekleri yörüngeler sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yalıtılmış durumdaki bir atomun enerji seviyelerinin şematik olarak gösterimi

Yatay çizgiler enerji seviyelerini belirtmektedir. Çekirdeğe en yakın elektronun, enerjisinin en küçük olduğu hesaplanmıştır. Yani elektronlar önce atoma en yakın olan, düşük enerji seviyelerine yerleşirler. Bu elektronlardan her birini bir üst veya daha üst yörüngelere çıkarmak mümkündür. Farklı yörüngelere çıkarmak için gereken enerji miktarları da farklıdır. H atomunu inceleyen Bohr; elektronların üst yörüngelere çıkabilmesi için atomun enerji alması (absorbe etmesi) gerektiğini, elektronun üst enerji bölgesinden daha alt enerji bölgelerine geçişi sırasında ise dışarı enerji yaydığını ortaya koymuştur. Bu durumu Denklem (3,2) ile ifade edebiliriz (Boz, 2008).

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (3,2)$$

λ yayılan fotonun dalga boyunu, R Rydberg sabitini, n_1 düşük enerjili enerji seviyesini, n_2 ise yüksek enerjili enerji seviyesini temsil eder. Birinci halde, yani elektron yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine geçtiğinde, enerjisi E_{ilk} ve E_{son} seviyeleri arasındaki farka eşit ve frekansı,

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3.3)$$

$$E_{son} - E_{ilk} = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.4)$$

bağıntısı ile verilen bir foton yayınlanır. Burada; E_{ilk} elektronun geçiş yapmadan önce bulunduğu seviyenin enerjisi, E_{son} elektronun geçiş yaptıktan sonra bulunduğu seviyenin enerjisi ve h Planck sabitidir.

Tersi durumda; yani elektronun düşük bir enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine çıkabilmesi için elektrona, en az bu iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit bir enerji vermek gerekir. Elektrona yeterli enerji verildiğinde, elektron denge konumu etrafında titreşim hareketi yapmaya başlar. Bu enerji aşağıdaki etkilerden biri ile sağlanabilir:

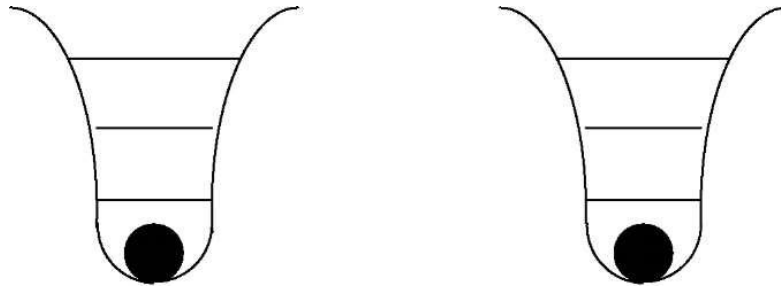
- 1) Elektriksel etki
- 2) Isı etkisi

- 3) Işıık etkisi
- 4) Elektronlar kanalıyla yapılan bombardıman etkisi
- 5) Manyetik etki

Enerji yeterli miktarda ise titreşimin genliğine bağılı olarak; elektron bulunduğı yörüngeyi terk ederek, daha yüksek enerji seviyesindeki bir yörüngeye geçebilir. Bu durumda elektronun enerji absorblaması söz konusudur. Elektronun enerji alarak daha yüksek enerji seviyesine çıkmasına uyarılma denir. Uyarılmış elektronlar, bu seviyede çok kısa bir süre kalırlar. Elektron, iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit enerjiye sahip bir foton yayınlayarak ilk konumuna geçer. Elektronu yeterli enerji verilirse, elektron atomdan kopar. Bu olaya ise iyonlaşma denir.

3.1.2.2 Enerji bantları

Gaz halinde atomu yalıtımak teorik olarak mümkündür. Ancak katılarda atomlar arası uzaklık çok düşüktür ve atomların birbirlerini elektrostatik olarak etkilemeleri sebebiyle elektronlar eşleşen enerji seviyelerini doldururlar.

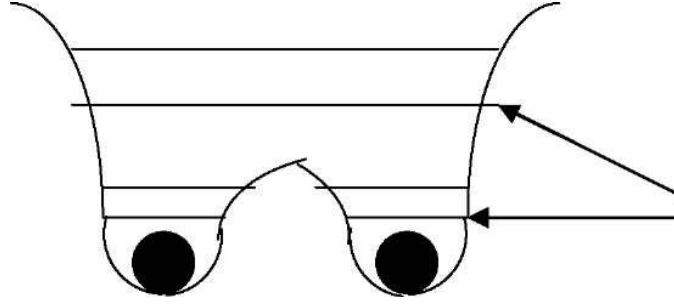


Şekil 3.5. Dış elektronlarına ait enerji seviyeleri belirtilmiş iki atomun şematik gösterimi

Değerlik elektronları ve son tabakanın hallerinde ayrılmalar olur. Yalıtılmış durumdaki her bir enerji seviyesinin yerini; bir birinden farklı, fakat birbirine yakın enerji seviyeleri alır. Bu enerji seviyeleri arasındaki fark 10^{-19} eV 'dur ve fark çok küçüktür. Bu sonuca bağılı olarak, bu seviyeler arasındaki enerji aralığı sürekli kabul edilerek, enerji bandı olarak tanımlanır.

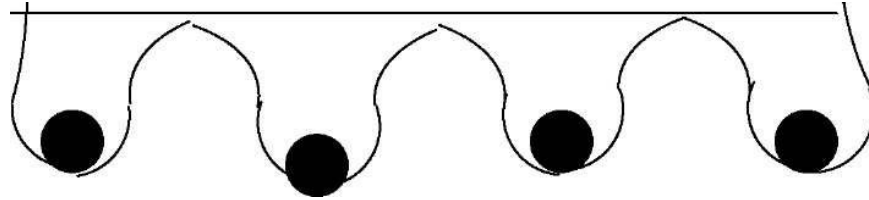
Katılarda kristal yapı içinde atomların birbirine yakındırlar. Bir atomun değerlik elektronlarını, komşu atomun çekirdeğinin çekmesi sebebiyle enerji aralığı küçülür. Yani elektronun atomdan kopması, diğer atomun çekirdeği üzerine geçmesi için gereken enerji azalır.

Şekil 3.6.'de birbirine yakın olan atomlar arasında enerji seviyesi farkının azaldığı sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. İki atomun birbirine çok yakın olduğu durumdaki enerji seviyesi diyagramı

Bir araya gelen atomların oluşturduğu düşük farklı enerji topluluğunun tümünü enerji bandı olarak adlandırabiliriz.



Şekil 3.7. Kristalik yapıda enerji bandı oluşumu

Elektriksel iletkenlik için atomun dış kabuktaki elektronlara karşılık gelen bantlar söz konusudur. Bu elektronlar, komşu atomlarla olan bağlantıyı sağlarlar. Serbest hale geçtiklerinde, yani atomlar iyonize olduklarında; bir elektrik alanın etkisi altında oluşan toplu hareketleri elektrik akımını meydana getirir. Mutlak sıfır sıcaklığında, yalıtılmış durumdaki bir yarıiletken atomu incelenirse; atom en temel haldedir. Elektronlar en düşük enerjiye sahiptir. Element atomlarının bir araya gelmesiyle oluşan kristalde ise temel seviye, değerlik bandı denilen bir enerji seviyesi ile

değişmiştir. Bu bant, diğer bantlara göre en düşük enerji seviyeli banttır. Elektronlar mevcut enerji seviyelerinin her birine birer tane olacak şekilde yerleşirler.

3.1.2.3. Yarıiletkenlerin Enerji Bant Yapısı

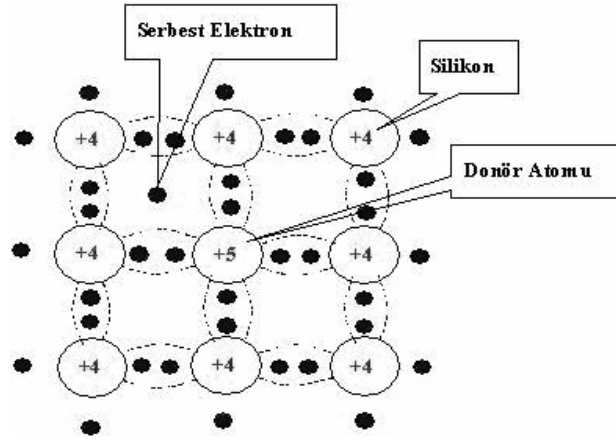
Yarıiletkenlerin yasak bant aralığı yalıtkanlarda olduğu gibi aralıklıdır. Ancak yalıtkanlarda olduğu kadar geniş değildir. Yarıiletkenlerin yasak bant genişliğinin yalıtkanlar ve iletkenler arasında bir değere sahip olduğu söylenebilir. Mutlak sıcaklıkta yalıtkan özellik gösteren yarıiletkenler, sıcaklık arttırıldığında iletkenlik özelliği kazanırlar. Bu durum fotovoltaiik pil yapımında yarıiletkenleri, iletkenlere göre avantajlı duruma getirir. Çünkü sıcaklık arttığında iletkenlerin direnci de artar ve iletkenlikleri azalır. Yarıiletkenlerin direnci ise sıcaklık arttığında azalır ve yarıiletken malzemenin elektrik iletkenliği artar. Bu da güneş ışığı ve ısısına maruz kalan fotovoltaiik piller açısından uygunluk arzeder.

3.1.3. Yarıiletken Türleri

Yarıiletkenler günümüzde elektronik endüstrisinde, bilimsel çalışmalarda, enerji üretiminde ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarıiletkenlerden faydalanılarak yapılan düzenekler arasında; diyotlar, foto-iyotlar, transistörler, güneş pilleri, detektörler, termistörler, fotoseller, modülatörler sayılabilir. Bu düzenekleri elde etmek için kullanılacak olan uygun özelliklere sahip yarıiletkenler, çoğu zaman doğal bir şekilde bulunmazlar. Bu yüzden yarıiletkenlerin bazı işlemlerden geçirilerek, bir takım özelliklerinin değiştirilmesi gerekir. Örneğin yarıiletken düzenekler p-n eklemi içerirler. Bir p-n eklemi elde edebilmek için çoğunluk yük taşıyıcısı holler olan p-tipi yarıiletkenler ile çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar olan n-tipi yarıiletkenler elde edilip, bunlar bir birine eklenmelidirler. Çünkü p-n eklemi, mono kristal (tek kristal) yarıiletkenin iletkenliğinin bir tipten başka bir tipe değiştiği bölgedir. p-tipi ve n-tipi iletkenliğe sahip yarıiletkenler uygun katkılama işlemleriyle elde edilebilirler. Çok saf, yani içinde hemen hemen hiç yabancı atom bulundurmayan yarıiletkenlere saf yarıiletkenler denir (Kittel, 1996;Erol, 2001).

3.1.3.1. N tipi yarıiletken

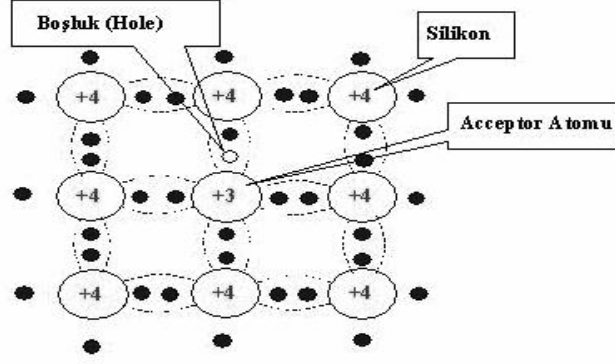
İletkenlik tipini değiştirmek için Si ve Ge içine, periyodik cetvelin III ve V. Grup elementleri ilave edilir. Bunlar boş valans elektronu bulundurlar (Arsenik, Bor, Fosfor, Antimuan gibi). Ergimiş halde bulunan Si'a (milyonda bir) arsenik ilave edilirse, her arsenik atomu, bir Si atomu yerini alacak ve 4 elektronuyla kovalent bağ teşkil edilecek, 5. Valans elektronu serbest kalıp iletkenliği temin edecektir. İletkenlik (-) yükle temin edildiği için N tipi yarı iletken ismini alır. Bu elektronlar, oda sıcaklığında, iletkenlik bandına ulaşır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. N tipi yarıiletken

3.1.3.2. P tipi yarıiletken

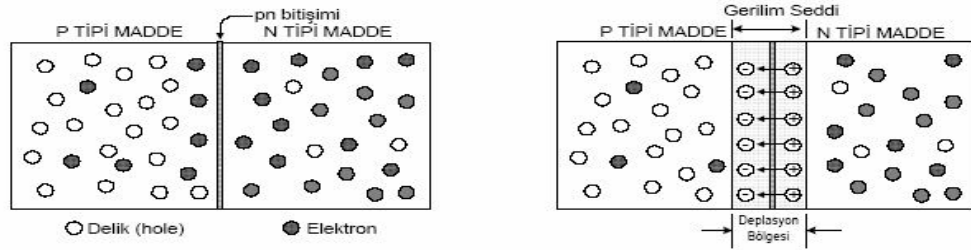
Ergimiş germanyuma, III. gruptan üç valans elektronu bulunduran elemanlar ilave edilerek yapılır (İndium, Galyum, vb). Katılaşma sırasında indium atomları kristal örgü içinde Si atomunun yerini alır. Kovalent bağ için 3 elektron mevcuttur ve komşu atomdan bir elektron kaparak bağ oluşturur. Komşu atomda bir boşluk oluşmuştur. Bu ise elektron hareketine sebep olur. Bir yarıiletkenin kullanılabilme maksimum sıcaklığı, aktivasyon enerjisiyle artar. Kullanabilme maksimum frekansı, yük taşıyıcıların hareketliliği ile artar.



Şekil 3.9. P tipi yarıiletken

3.1.3.3. P – N kavşağı

Bir monokristal yarı iletkenliğinin P tipinden N tipine geçiş bölgesidir. Bu bölge kristalleşme sırasında oluşturulur. N bölgesinde, termik uyarımla azınlıkta olan boşluk ve çoğunlukta olan elektron yükleri ve (+) iyonize atomlar vardır (Şekil 3.10).

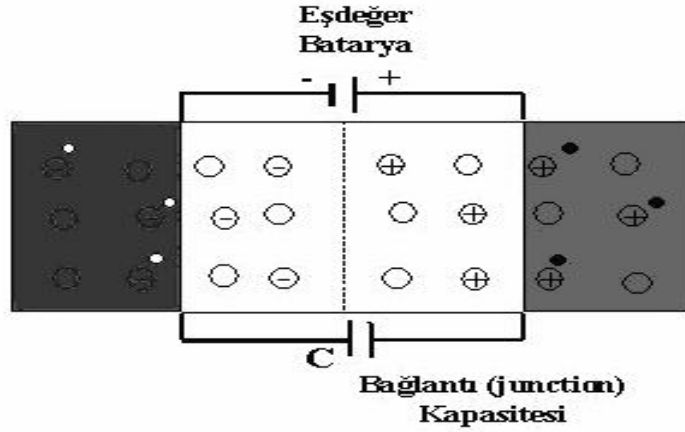


Şekil 3.10. p-n kavşağı oluşumu

P bölgesinde ise, negatif iyonize atom, termik uyarımla bulunabilen azınlık elektron ve çoğunluk elektron boşlukları vardır. İki eleman temasa geçirildiğinde, N bölgesindeki elektronlar (çoğunluktadır) P tipi bölgeye hareket eder. P bölgesindeki elektron boşlukları da N bölgesine hareket eder. Böylece N tipi bölgedeki atomlar (+), P tipi bölgedeki atomlar (-) olarak iyonlaşmış olur. Bunlar, kristal içinde sabit yük merkezleri oluştururlar. Kavşağın her iki yüzünde iyonize olmuş atomlar, kristal içinde, yönü N'den P'ye doğru olan bir elektrik alan meydana getirirler.

Bu bölge geçiş bölgesidir ve serbest yükler yoktur. Kavşaktaki bu potansiyel farkı, P'den N'ye geçecek boşluklar ve N'den P'ye geçecek elektronlar için bir potansiyel

duvarı teşkil eder. N'den ayrılacak bir elektron, arkasında kendini geri çağıran bir boşluk bırakır ve önündeki P tipi bölgedeki (-) yükler elektronu püskürtür (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. p-n kavşağı iç akımı

Özet olarak, P-N kavşağında meydana gelen elektrik alan, kavşak civarındaki elektronu, P'den N'ye doğru iter (N'deki elektronu geri püskürtür, P'deki elektronu N'ye iletir).

3.2. Güneş Gözellerinin Tarihsel Gelişimi

En eski fotovoltaik etkiyi 1839 yılında Fransız Fizikçi Alexandre-Edmond Becquerél elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek incelemiştir (Becquerél, 1839). Katılarda benzer bir olay ilk kez 1876 yılında selenyum elektrodu ışığa tutarak akım üreten fotovoltaj gözlemlemiştir (Adams ve Day, 1876). Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında uygulama olanağı getirmiştir. Russell Ohl 1946 yılında modern güneş hücrelerinin patentini almıştır (Ohl, 1941). 1954 yılında Bell Laboratuvarında yarıiletken malzemelerle deney yapılırken silisyumun güneş hücreleri için iyi bir malzeme olduğu bulunmuş ve modern güneş gücü teknolojisine ulaşmak için ilk adım atılmıştır (Chapin, 1954). Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında

kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. 1 Ocak 1958'de güneş panelleri, ilk uzay aracı olan Explorer'da kullanılmıştır. 1960'ların başlarında güneş pillerinin verimliliği %15'i bulmuştur. 2000'li yıllara gelindiğinde güneş pillerinin verimliliği artık % 28'e ulaşmıştır. Bugün laboratuvar şartlarında pil verimliliği % 46'ya kadar ulaşmıştır. Silikon kristaline dayalı fotovoltaiik hücrelerin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film fotovoltaiik hücre üzerindeki çalışmalara giderek ilgi artmaktadır (Kudret, 2011).

3.3. Güneş Modülü

Güneş pilleri (fotovoltaiik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Güneş pilleri fotovoltaiik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5-20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.

Güneş pilinde mekanik olarak elektrik üreten cihazların aksine hareketli parçalar olmadığından teorik ömürleri sonsuzdur. Bir güneş hücresinden elde edilebilecek güç pratikte 1-2 Watt'tır. İşe yarar ve kullanılabilecek düzeyde yüksek güçler elde etmek için, güneş hücreleri bir düzen içinde seri ya da paralel olarak birbirlerine bağlanmaları gerekir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine bağlanarak, bir yüzey üzerine monte edilebilir. Fotovoltaiik modül meydana getirilirken; güneş pilleri seri bağlanarak sistemin çıkış gerilimi, paralel bağlanarak ise çıkış akımı arttırılabilir.

Modülün çıkış akımı, yüzeyi üzerine gelen güneş ışık şiddetiyle doğru orantılıdır. Bu yüzden modül tasarımı, modül çıkış akımıyla doğrudan bağlantılıdır. Bunlardan başka, modülün camı üzerinde biriken tozun, %5 ile %10 arasında bir verim azalmasına neden olacağından, modül tasarımında bu durum da göz önüne alınmalıdır.

Güneşin hareketine göre yönlendirilen güneş modülleri daha verimli hale getirilebilir. Kuzey yarımkürede kullanılacak modüller güneşe bakacak şekilde, güney yarımkürede kullanılacak modüller kuzeye bakacak şekilde konumlandırılırlarsa, güneş ışınımından daha verimli yararlanılabilir. Yıl boyunca maksimum çıkış gücü elde etmek için modüllerin yatayla yaptığı açığı, genellikle bulundukları yerin enlem açısına eşit almak gerekir.

Yaz aylarında maksimum güç elde etmek için bulundukları yerin enlem -15° kış aylarında ise bulundukları yerin $+15^{\circ}$ kadar büyük seçmek gerekir. Güneş pillerinin bir birine bağlanmasıyla modüller, modüllerin bir birine bağlanması ile örgüler oluşturulabilir. En basit sistem, bir modül ve buna bağlı bir elektrik motoru veya aküden oluşmuş bir sistemdir. Her modül; paralel veya seri bağlanabilmesine olanak verecek şekilde, bağlantı kutusuyla birlikte tasarlanılmaktadır.

Modüllerin seri ya da paralel bağlanıp bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya panel adı verilir. Paneller bir modülden elde edilen gücü arttırmak için başvurulan bir yöntemdir. Arka arkaya bağlanmış modüllerden oluşmuş sistemlerde gücü megawatt'lara kadar çıkarmak mümkündür. Birden fazla panelin kullanıldığı bir sistemde, paneller kontrol cihazına veya akü grubuna birlikte bağlanabilecekleri gibi, her panel tek olarak da bağlanabilir. Tek tek bağlandıklarında sistemin bakımı daha kolay olacaktır. Sistemde kullanılan fotovoltaik üreteçlerin tümünün oluşturduğu yapı, örgü ya da ağ olarak tanımlanmaktadır. Örgünün çok büyük olduğu uygulamalarda daha kolay yerleştirme ve çıkış kontrolü için sistem 100000 veya daha fazla modülden de oluşabilir. Güneş pillerini bir birine bağlamak için geçerli olan kurallar, modüllerin ve panellerin bir birlerine bağlanmalarında da aynen uygulanır (Boz, 2008).

Fotovoltaik bir örgüde bir birine bağlanan güneş pilleri ya da güneş pili modülleri arasında, elektriksel ve termal dengesizlikler oluşabilir. Bunun sebebi fotovoltaik örgüyü oluşturan güneş pillerinin veya modüllerin her birinin, farklı özelliklere sahip olmasıdır. Gerçekte, güneş pillerinin elektriksel karakteristiklerinin ortalama bir değerden saptığı çokça görülür. Bu durum, güneş pili üretiminde yapılan teknik işlemlerden ve kullanılan yarıiletken malzemeden de kaynaklanabilir. Aynı zamanda

kısmi ya da tamamen tozlanma ve gölgelenme de elektriksel kayıplara sebep olur. Bu dengesizlikler engellenmediği zaman; örgüdeki bir veya daha fazla modül istem dışı çalışabilir ve bu durum da örgüye zarar verebilir. Örgüdeki modüllerden biri veya daha fazlası bir yük gibi davranmaya başlayarak, örgüdeki diğer modüllerin ürettiği enerjiyi tüketecek duruma gelebilir ve pillerin veya modüllerin yanmasına sebep dahi olabilir ve yüksek güçlerde (kW mertebesinde) zarar görerek kullanılmaz duruma gelebilir. Yüksek güçlere ulaşıldığında, fotovoltaik örgüyü oluşturan birimleri korumak için maliyeti fazla arttırmayarak ve üretilen enerjinin azalmasına yol açmayacak şekilde koruyucu elemanlar sisteme eklenmeli ve uygulanmalıdır. Güneş pilleri ve modüller sadece elektriği üretirler. Üretilen bu elektrik enerjisinin depolanması, iletilmesi ve düzenlenmesi gereklidir. Bunun için modüllere dengeleyici bileşenler eklenerek fotovoltaik güneş sistemleri meydana getirilir (Boz, 2008).

3.4. Fotovoltaik Hücreler

Fotovoltaik sistemlerin avantajları;

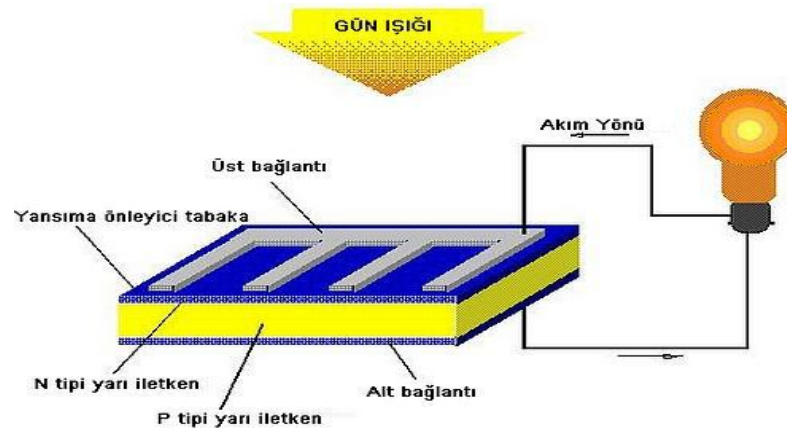
- Herhangi bir fosil yakıtı ihtiyaç duymaz ve herhangi bir sisteme bağlantı gerekmeksizin bağımsız bir şekilde elektrik üretebilir.
- Yapısında hareketli parçalar olmadığından elektrik üretiminde kullanılan hareketli sistemlere (hidroelektrik veya rüzgâr türbinleri, jeneratörler vb.) göre daha az bakıma ihtiyaç duyarlar.
- Enerji girdisi hemen her yerde ücretsiz temin edebilmektedir. Taşıma ve depolama gibi sorunları yoktur.
- Güçlü rüzgârlar, nem ve ısı, kar ve buzlanma gibi doğa olaylarına dayanıklıdır.
- Genelde enerji üretimi noktasıyla kullanım noktası arasında mesafeler çok kısa olduğu için oluşabilecek kayıplar yok denecek kadar azdır.
- Modüler bir yapıya sahip olduğundan güç çıkışı kolaylıkla arttırılabilir. Mevcut modüllere yenilerinin eklenmesi ile çıkış gücü arttırılabilir.
- Çevreye herhangi bir atık madde bırakmadığından çevre uyumludur.

Fotovoltaik sistemlerin dezavantajları;

- Büyük güçler üretilebilmesi için diğer sistemlere göre çok geniş alanlara ihtiyaç duyar.
- Işınımın olmadığı akşam saatlerinde enerji üretemez. Dolayısıyla şebekeden bağımsız yapılarda depolama sistemine ihtiyaç duyar.
- Kırılgan yapıda olduklarından pillerin çerçevelendirilmesi gerekmektedir.
- Fotovoltaik hücreleri yüksek üretim teknolojisi gerektirmeleri nedeniyle maliyetleri yüksektir.

3.4.1. Fotovoltaik Modüllerin Temel Yapısı

Güneş ışığından gelen ışık enerjisini, fotovoltaik olaydan yararlanarak direk olarak elektrik enerjisine çeviren dönüştürücülere fotovoltaik eleman adı verilir Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu enerji çevriminde, herhangi hareketli parça bulunmaz.



Şekil 3.12. Fotovoltaik dönüşüm sisteminin sematik gösterimi (Boz, 2008)

Güneş pilleri, bugün hayatın her kesiminde kullanım olanağı bulan elektronik düzeneklerin içerisinde kullanılan ve çok küçük boyutlara sahip olan yarıiletken diyotların, geniş yüzey alanlara uygulanmış şeklidir. Kullanılan malzemeler ve üretim şekilleri, diyotların çalışma ilkeleriyle temel olarak birbirlerine benzemektedir. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, fotovoltaik dönüşüm olayına dayanır. Fotovoltaik dönüşümde güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile çalışabilecek yapıda ve elektrik yüklerinin bir birinden ayrılabilmesine izin verebilecek uzunlukta yasak bant genişliğine sahip bir yarıiletken olmalıdır.

Fotovoltaik bir güneş pili yapımı; herhangi bir yarıiletken n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilebilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde, bir elektrik alanı kurulur. Bu bölgede oluşan elektrik alan, yapısal elektrik alan (E_{yap}) olarak isimlendirilmektedir. Yarıiletken eklemin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur. Önce eklem bölgesine ışık düşürülerek, elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. Sonra bunlar, oluşan elektrik alan yardımıyla bir birlerinden ayrılır (Boz,2008).

Fotovoltaik eleman yapısal olarak bir diyottur. Fotovoltaik eleman, fotovoltaik olay prensibine dayanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirir. Fotovoltaik etki olarak tanımlanan olayda, yarıiletken maddeler söz konusudur. Yarıiletken malzemelere en iyi örneklerden biri IV. Grup elementi silisyum atomlarının oluşturduğu kristal yapıdır. Bu yapı, atomların son yörüngelerinde bulunan dört valens (değerlik) elektronun birbirleriyle yaptıkları kovalent bağlar neticesinde ortaya çıkar.

3.4.2. Fotovoltaik Güneş Pillerinin Elektriksel Özellikleri

Fotovoltaik güneş pilleri; absorplanmış fotonların oluşturduğu akımı geçirecek yöndeki bir diyot üzerine paralel bağlanmış sabit bir akım kaynağı gibi hareket eder. Fotovoltaik güneş pilleri, ileri yönde beslenmiş bir p-n eklem diyotu gibi çalışırlar. Eklem her iki yanındaki çoğunluk yük taşıyıcıları difüzyon yoluyla, azınlık yük taşıyıcıları ise eklem bölgesinde elektrik alanın sürüklemesiyle eklem bölgesini geçerek fotoakım yoğunluğunu meydana getirirler (Erdoğan,2011).

Fotoakım yoğunluğu (J_f), p-n eklemine ileri yönde kutuplaştırır. Eğer fotovoltaik güneş pilinin çıkışında herhangi bir yük bağlı değilse ($R_L=0$) J_f , p-tipi bölgeyi pozitif, n-tipi bölgeyi negatif olarak yükler. Bu durumda p-n ekleminin potansiyel engeli Φ_0 azalır ve çoğunluk yük taşıyıcıları, azınlıkta oldukları bölgelere doğru difüzyon yoluyla göç ederler. Çoğunluk yük taşıyıcılarının oluşturduğu bu birleşim akım yoğunluğu olan J_r , p-tipi bölgeyi negatif, n-tipi bölgeyi pozitif yükler ve sonucunda bu yüklenmeden dolayı J_f fotoakım yoğunluğu, p-n eklemine ters yönde besler. Bu durumda Φ_0 potansiyel engelinin yüksekliği tekrar artar ve çoğunluk yük

taşıyıcılarının eklem bölgesini geçmeleri de engellenmiş olur. Bu sırada tekrar bir foton absorplanır ve $\Phi 0$ potansiyel engelinin yüksekliği tekrar azalır. Böylece $\Phi 0$ potansiyel engelinin bir azalıp bir artması, güneş pilinin güneş ışınlarının etkisinde kaldığı sürece devam eder.

3.4.3. Bir Fotovoltaik Güneş Pilinin Eşdeğer Devresi

Bir fotovoltaik güneş pili; fotonlar tarafından meydana getirilen akımı geçirmekte olan bir diyot ve üzerine paralel bağlı sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Diyotun uçları arasında, potansiyel duvarının indiği miktara eşit bir potansiyel farkı meydana gelir. Bu potansiyel farkına, fotovoltaik elektromotor kuvveti (e.m.k) denir. Fotovoltaik e.m.k; silisyumdan yapılmış güneş pilleri için yaklaşık 0.5 volt, germanyum malzeme kullanılarak yapılmış piller için yaklaşık 1 volt düzeyindedir.

Bir güneş pilinin açık devre gerilimi, pilden geçen akımın sıfır olduğu durumda pil uçlarında ölçülen potansiyel farkıdır. Pilin kısa devre akımı ise, sıfır gerilim altında ve aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Bu akımın şiddeti, seri direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışımaya şiddetine bağlıdır. İdeal bir güneş pili için $R_s=0$ ve $R_{sh}=\infty$ kabul edilir.

Bu durumda pilin kısa devre şartı altında, yani $V_d=0$ olması halinde; pilin kısa devre akım yoğunluğu (J_{kd}) ve fotoakım yoğunluğu (J_f) birbirine eşit olur. Bu durum;

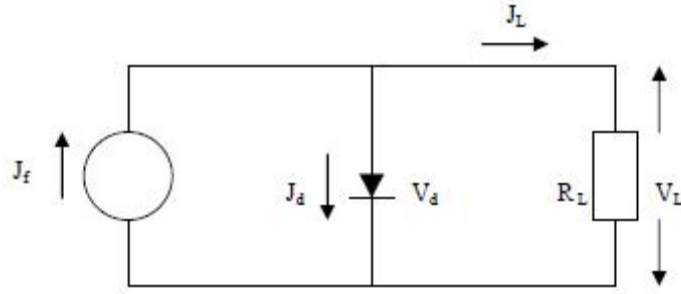
$$J_{kd} = J_f \quad (3.5)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Açık devre şartı altında, yani $R_L = \infty$ için güneş pili içerisinde geçen toplam akım sıfır olacağından; $J^*(\lambda) = 0$ alındığında, açık devre gerilimi V_{ad} için,

$$V_{ad} = \left(\frac{A_0 k T}{e} \right) \ln \left(1 + \frac{J_f}{J_0} \right) \quad (3.6)$$

bağıntısı bulunur. Burada A_0 , p-n eklemının ideal olma faktörü, J_0 karanlık doyum akım yoğunluğunu ifade eder. Düzgün olmayan eklem bölgesi, kristalin yapısında

bulunan ve istenmeyen safsızlıklar, kristaldeki boşluklar, J_0 akım yoğunluğunun artmasına sebep olur. Güneş pilinin açık devre voltajı fotovoltaik elektromotor kuvvetine (e.m.k) eşittir. Fotovoltaik emk, yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığının ve şönt direnci ile doğru orantılı olarak artar; J_0 akım yoğunluğunun ve sıcaklığın artması ile de ters orantılı olarak azalır. İdeal bir fotovoltaik güneş pilinin eşdeğer devresi Şekil 3.13. 'de gösterilmiştir.

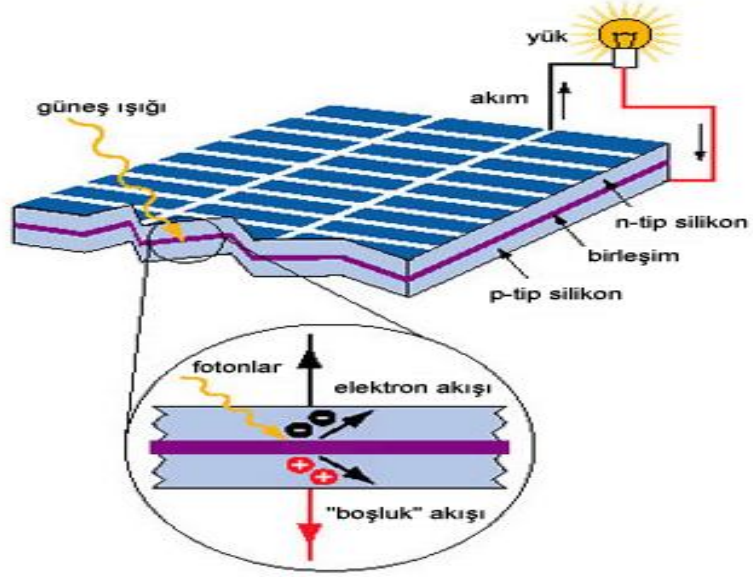


Şekil 3.13. İdeal Bir Fotovoltaik Güneş Piliin Eşdeğer Devresi

3.5. Güneş Pillerinin Çalışma İlkesi

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar ve günümüzde, pek çok güneş pili silisyumdan yapılmaktadır. Güneş pilinin üzerine güneş ışığı düştüğünde, silisyum atomunun son yörüngesindeki valans elektronu negatif yüklenir. Enerji parçacıklarından oluşan ışık fotonları bir atoma çarptıklarında tüm atom enerjilenir ve en kolay kopabilecek durumda olan son yörüngedeki valans elektronu kopar. Serbest kalan bu elektronda, gerilim veya elektriksel basınç olarak isimlendirebileceğimiz potansiyel enerji ortaya çıkar. Bu enerji, bir aküyü şarj etmek veya bir elektrik motorunu çalıştırmak için kullanılabilir. Önemli olan nokta, bu serbest elektronları pil dışına aktarabilmektir. Üretim sırasında, pilin ön yüzeyine yakın yerde bir iç elektrostatik bölge oluşturularak, bu elektronun serbest duruma geçmesi sağlanır. Silisyum kristali içine diğer elementler yerleştirilmiştir. Bu elementlerin kristal içinde bulunması, kristalin elektriksel olarak dengede olmasını önler. Işıkla karşılaşan malzemede, bu atomlar dengeyi bozar ve serbest elektronları diğer pile veya yüke gitmeleri için pilin yüzeyine doğru süpürürler. Milyonlarca foton pilin içine akarken, elektronlarda enerji kazanıp bir üst seviyeye çıkar, pil

içindeki elektrostatik bölgeye ve oradan da pil dışına akarlar. İşte bu oluşan akış elektrik akımıdır (Erdoğan, 2011).



Şekil 3.14. Tipik güneş pili modeli

3.6. Güneş Pillerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler

3.6.1. Sıcaklık

Güneş pillerinin çalışmasında sıcaklığın önemli bir etkisi vardır. Güneş pillerinin kısa devre akımı sıcaklığın düzgün bir şekilde artmasıyla yükselme eğilimi gösterir. Yarıiletken enerji band aralıkları genellikle sıcaklıkla azaldığından açık devre gerilimi ve dolum faktörü azalır. Enerji band aralığı oda sıcaklığında lineer olarak değişme gösterirken düşük sıcaklıklarda ise doğrusal olmayan bir değişme gösterir (Karamanav, 2007).

Güneş panelleri ideal sayılan 25 °C sıcaklık, 1.000 W/m² güneş radyasyonu ve 1,5 AM (Air Mass, hava kütlesi) ortamda test edilir. Bu ortama göre panellerin verimleri ve gösterdikleri etkiler hesaplanır. Panelin güneş ışınımı alması ile birlikte elektrik üretimi başlar fakat verimlerin %100 olmamasından dolayı güneşten gelen enerjinin bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı da ısı enerjisi olarak ortaya çıkar. Bu olay panellerin ısınmasına neden olur, güneş hücrelerinin ısınması ile akım (I)

artarken, gerilim (V) değeri düşer. Gerilimde ki düşüşün fazla olması nedeni ile çıkış gücünde de düşüş olur ve bu verim kaybına neden olur. Sıcaklığın düşük olması durumunda ise tam tersi geçerlidir ve panelde verim artışı olur. İşte bu nedenden dolayı güneş panelleri güneşli fakat soğuk yere ihtiyaç duyarlar. Panel seçimi yaparken, sıcaklığın panel üzerinde ki etkisi de değerlendirilmelidir.

3.6.2. Yüzey Parametresinin Etkisi

Işığın yansımalarını azaltmada kullanılan yaklaşımlardan biri de özel yapılı yüzeylerdir. Özel yapılı yüzeyler ve silisyum ince tabakaların kullanımı artmaktadır. Silisyum tabakaların yüzeylerinde küçük piramitler seçici dağlama yöntemi kullanılarak elde edilirler. Bu piramitlerin yüzeylerinden yansıyan ışık, diğer piramitlerden de yansıyarak pili içine girer. Güneş pillerinde anti yansıtıcı kaplama kullanılmasıyla yansıma kayıpları azaltılmış olur. Işığın yüzeye düştüğü her noktadaki toplam yansıma, silisyuma dik gelen ışıktaki gibidir. Yüzeydeki toplam yansıma %0.33 ile %11 seviyeleri arasındadır. Yüzeyleri piramitleştirme tekniği kullanılarak yansımayı önleyici kaplama olmaksızın yüksek performanslar elde edilebilir (Karamanav, 2007).

3.6.3. Spektral Etki

Monokromatik ışık, yarıiletken içinde elektron-deşik çiftinin oluşmasına neden olur. Elektron-deşik oluşumunun uzaysal dağılımı;

Kısa dalga boyları için soğurma katsayısını büyük bir değere sahiptir ve ışık yarıiletken malzeme içinde çabucak soğurulur. Hücrelerde fotonların bütün enerjileri kullanılmaz. Görünür dalga boylarında verim en yüksektir, kızılötesi bölgelerde ise en düşüktür (Karamanav, 2007).

3.7. Güneş Piliinde Verimliliğe Etki Eden Faktörler

Güneş piliinde verimin artırılabilmesi için foto-akım (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) mümkün olduğu kadar büyük, karanlık akımı da mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. Çizelge 2.3.'de kısa devre foto-akımını ve karanlık akımını etkileyen

faktörler sunulmuştur. Bu etkenler fotovoltaik pilin optimum tasarımında hesaba katılması gereken parametrelerdir. Bu parametrelerden bazılarını daha yakından inceleyelim:

- i) **Enerji bant aralığı:** Güneş spektrumu, fotovoltaik pile gelen güç miktarını ve foton sayısını belirlediği için foto-akıma etki eden temel faktörlerdendir. Fotovoltaik pil tasarımında, güneş spektrumundan optimum soğurma sağlayabilecek enerji bant genişliğine (E_G) sahip bir malzeme tercih edilmelidir. Eğer E_G çok büyük seçilirse küçük enerjili fotonlar soğuramaz ve foto-akım düşer. E_G çok küçük seçildiği takdirde ise foto-akım artar fakat çıkış gerilimi düşer. Enerji bant genişliği 1-1.5 eV aralığında verim en yüksek değerine ulaşmaktadır.
- ii) **Soğurma katsayıları ve güneş pili kalınlığı:** Güneş pilinin kalınlığı soğurma katsayısının tersi ile orantılıdır. Soğurma katsayısı ne kadar küçükse, pil kalınlığı da o kadar büyük olmalıdır. Ayrıca pil kalınlığındaki artış ışımasız rekombinasyonu ve dolayısı ile de karanlık akımını arttırmaktadır. Buna karşılık pil kalınlığı yeterli olmadığı takdirde yeterli soğurma yapılamamaktadır.

Çizelge 3.1. Fotovoltaik pilin kısa devre foto-akımına ve karanlık akımına etki eden faktörler (Şenay, 2011)

Fotovoltaik pilin optimum tasarımına etki eden faktörler	Kısa devre foto-akım	Karanlık akım
Güneş spektrumu	√	X
İletim verimliliği	√	X
Sıcaklık	√	√
Çıkış gerilimi	X	√
Etkin ön yüzey alanı	√	X
n,p tipi ve arıtılmış bölge kalınlıkları	√	√
Soğurma katsayıları	√	√
n,p tipi arıtılmış bölgelerindeki ömür süreleri	√	√
Katkılama yoğunluğu ve değişimi	√	√
Mobiliteler ve difüzyon katsayıları	√	√
Yüzey rekombinasyonu	√	√

iii) Taşıyıcı mobiliteleri, ömür süreleri, difüzyon uzunluğu ve katkı

konsantrasyonu: Difüzyon uzunluğunun büyük olabilmesi için mobilitenin de büyük olması gerekmektedir. Açık devre geriliminin büyük olması katkı konsantrasyonunun fazla olmasına bağlıdır, ancak mobilitelerin ve difüzyon uzunluğunun çok azalmaması için bir optimizasyon yapılmalıdır. Difüzyon uzunluğunu belirleyen diğer parametre ömür süresidir. Ömür süresinin büyük olması için malzeme içerisinde rekombinasyon merkezi gibi davranan safsızlıklar olmamalıdır.

iv) Sıcaklık: Diğer yarı-iletkenler gibi güneş pilleri de sıcaklığa karşı hassastır.

Yasak bant genişliği ve mobilite sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Yasak bant genişliğinin azalması ile kovalent bağı kırmak için daha az enerji gerekeceğinden kısa devre akımı çok az artar. Ancak, yasak bant genişliğinin azalması ile açık devre gerilimi de azalacağından, toplam verim azalacaktır (Şenay, 2011).

3.7.1. Güneş Gözelerinin Yapısı ve I-V Karakteristiği

Güneş gözeleri, güneşten gelen ışınımı fotovoltaiik etki sayesinde doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektronik devre elemanlarıdır. Genel olarak üzerine ışık düşürüldüğü zaman iki elektrot arasında potansiyel farkın ortaya çıkması olarak tanımlanabilir. Pratik olarak bütün güneş gözeleri yarıiletken malzemelerden üretilen bir p-n ekleminden oluşur. Yarıiletken malzeme güneş spektrumunun büyük bir kısmını soğurabilecek özellikte olmalıdır. Malzemenin soğurma özelliklerine bağlı olarak ışık, yüzeyde ya da malzeme içinde soğurulur.

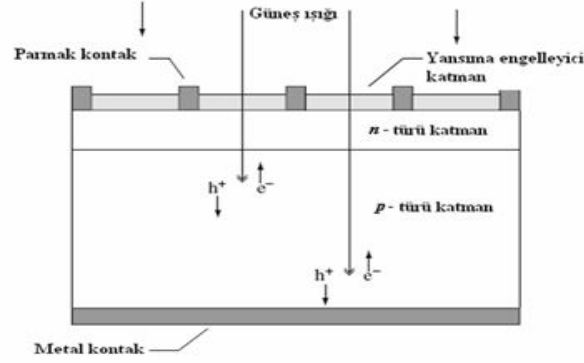
Güneş gözesine çarpan güneş ışınları yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından yüksek bir enerjiye sahipse yarıiletken malzemede elektron-deşik çiftleri oluşturur. Işığın soğurulması sonucunda oluşan elektron-deşik çiftleri birbirinden ayrılmalıdırlar. Bir güneş gözesinde bu işlem, bir p-n eklemi ya da metal-yalıtkan-yarıiletken yapı oluşturularak sağlanır. Bir malzemenin güneş gözesi olabilmesi, belirli şartların yerine getirilmesine bağlıdır. Bu şartlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1- Soğurucu özelliği,
- 2- Pencere özelliği,
- 3- Yansıtıcı olmayan yüzey özelliği,
- 4- Kontak özelliği.

Bu özelliklerin en önemlisi malzemenin soğurucu özelliğidir. Kullanılacak yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı verilen güneş ışınımı spektrumu mertebesinde olmalıdır. Her yarıiletken güneş göze yapımında soğurucu malzeme olarak kullanılabilir ancak bazı yarıiletkenler daha uygundur. Pencere olarak kullanılacak malzemeler hem ışığı yarıiletkene geçirecek hem de yapısal bir elektrik alan oluşturacak özelliğe sahiptir. Yansıtıcı olmayan yüzeylerin (anti-reflection coating) oluşturulması için kullanılacak malzemeler ise gelen ışığın yapıya en etkin şekilde, en az yansıma ile aktarılmasını sağlamalıdır. Kontak malzemesi ise ışığın soğurulması sonucunda oluşan akımın toplanmasını sağlamalıdır.

Şekil 3.15.'de p-n eklemi yapısındaki güneş gözesi tanıtılmıştır. Metal parmak kontak, elektriksel kontaklarından birini oluştururken aynı zamanda arasından güneş

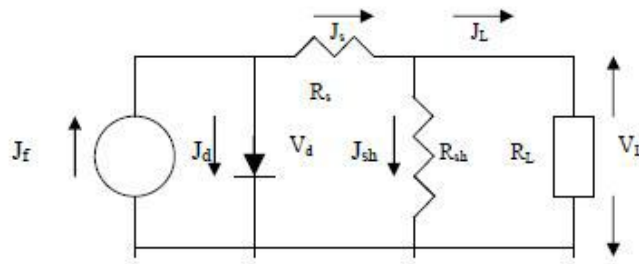
ışınlarının geçmesine izin verir. Parmak kontakların arasında bulunan yansıma engelleyici katman, yarıiletken malzemeye iletilen ışığın miktarını arttırmak için kullanılmaktadır.



Şekil 3.15. Elektron-deşik çiftinin oluşumunun gösterildiği güneş göze yapısı (Gül, 2008).

Sonuç olarak, güneş gözelerinde fotovoltaiik enerji dönüşümü temel olarak iki aşamada oluşmaktadır: İlkinde, gözede ışık soğurulmasının sonucu olarak, elektron-deşik çifti oluşturulur. İkinci aşamada, yapısal elektrik alan yardımıyla bu elektron-deşik çifti ayrılır ve böylece metal kontaklar aracılığı ile dış devrede elektrik akımı elde edilir.

Şekil 3.16' de, örnek bir güneş pilinin eşdeğer devresi gösterilmiştir. Burada R_s güneş pilinin iç seri direncini, R_{sh} şönt direncini, R_L yük direncini, J_L ise yük direnci içinden geçen akım yoğunluklarını ifade etmektedir.



Şekil 3.16. Güneş gözesi eşdeğer devresi (Gül, 2008).

İdeal bir güneş gözesi için akım-gerilim (I-V) karakteristiği ;

$$I = I_{sc} - I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada,

k, Boltzmann sabiti

T, mutlak sıcaklık

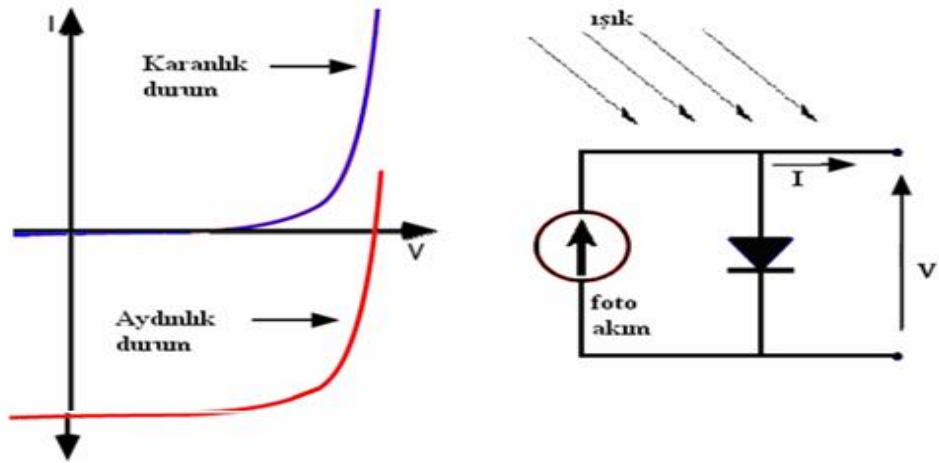
q, elektron yükü

V, uçlar arasında oluşan potansiyel farkı

I_0 , diyotun doyma akımı

I_{sc} , gözenin kısa devre akımıdır.

Güneş gözesi üzerine ışık düşmediği durumda gözenin elektriksel yapısı bir diyodun yapısı ile aynı özellikleri gösterir. Göze üzerine ışık düşürüldüğünde, göze güç üretmeye başlar ve I-V eğrisi ışık şiddeti oranında kayar. Şekil 3.17.'de görüldüğü gibi gözenin güç ürettiği bölge x-y koordinat sisteminde 4. bölgedir. Gözelerin karakterizasyonunda sadece bu bölge ile ilgilendiğimiz için diğer I-V eğrilerinde bu bölge 1. bölgeye taşınmıştır.



Şekil 3.17. Karanlıkta ve aydınlıkta güneş gözesi karakteri (Gül, 2008).

Güneş gözelerini karakterize eden dört önemli parametre, I-V eğrilerinden elde edilir. Bu parametreler güneş gözelerini birbirinden ayıran önemli değişkenlerdir.

a) Kısa devre akımı (Short circuit current): Güneş gözesinin uçları arası potansiyel farkın sıfır olduğunda elde edilen akım değeridir (Şekil 3.18) ve I_{SC} olarak gösterilir. Kısa devre akımı, foto taşıyıcıların (elektron-deşik) üretilmesine ve birikmesine bağlıdır. İdeal bir güneş gözesinde, kısa devre akımı ile fotoakım aynıdır ve bu nedenle kısa devre akımı güneş gözesinden çekilebilecek en yüksek akım değeridir. Kısa devre akımı, gözenin alanına, gelen ışık yoğunluğuna ve ışık spektrumuna, gözenin soğurma ve yansıtma özelliklerine bağlıdır. Üreticiler farklı alanlarda göze ürettiklerinden dolayı bu faktörden kurtulmak için kısa devre akım yoğunluğunu kullanırlar (J_{SC} mA/cm²). Tek kristal silikon güneş gözeleri için örnek vermek gerekirse AM 1.5 spektrumunda olası en yüksek akım yoğunluğu 46 mA/cm²'dir. Laboratuvar ölçeğinde 42 mA/cm², ticari amaçlı 28 mA/cm²'den 35 mA/cm²'ye kadar kısa devre akım yoğunluğuna erişilmiştir.

b) Açık devre gerilimi (Open circuit voltage): Güneş gözesinden akım geçmezken elde edilen maksimum potansiyel farktır (Şekil 3.18) ve V_{OC} olarak gösterilir. Açık devre gerilimi, gözede elektron-deşik çiftlerinin yeniden birleşmesinin (rekombinasyon) ölçüsüdür. Labarotuar ölçeğinde AM 1.5 spektrumunda silikon gözelerin açık devre gerilimi 720 mV, ticari gözelerde yaklaşık 600 mV olarak ölçülmüştür (Gül, 2008).



Şekil 3.18. I-V eğrisinde açık devre geriliminin ve kısa devre akımının gösterimi

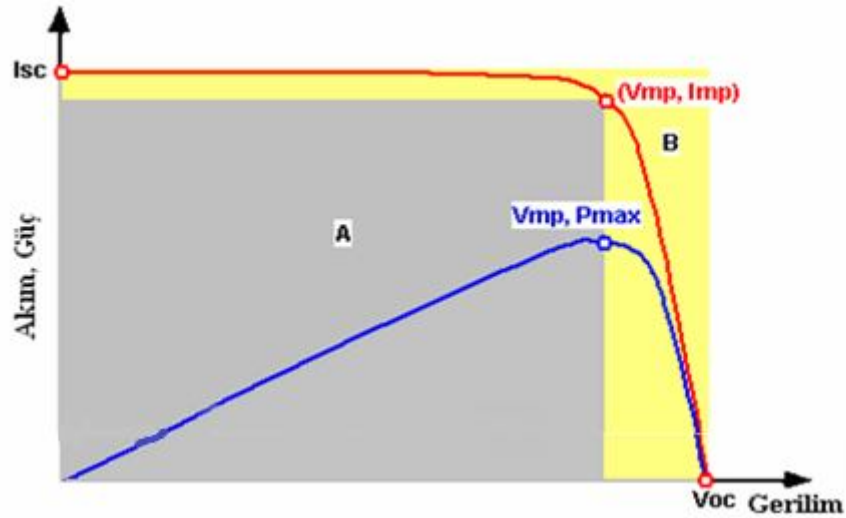
c) Dolum faktörü (Fill factor): Kısa devre akım ve açık devre gerilim değerleri güneş gözesi için maksimum akım ve gerilim değerleri olsa da, bu iki noktada güneş gözesinin gücü sıfırdır. Dolum faktörü, ya da yaygın olarak kullanılan kısaltmasıyla “FF”, güneş gözesinden alınacak olan en fazla gücü belirleyen ölçüdür. FF tanım olarak gözenin maksimum gücünün, V_{OC} ve I_{SC} değerlerinin çarpımına oranıdır. Grafikselsel olarak gözenin I-V eğrisi ne kadar kareye benzerse dolum faktörü o kadar büyük olur. I-V eğrisine çizilebilecek en büyük dikdörtgen FF’yi belirler. Dolum faktörü

$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (3.8)$$

eşitliği ile tanımlanır.

Şekil 3.19’da gözenin dolum faktörünü, maksimum güç noktasında altta kalan alanı kısa devre akımı ile açık devre gerilimi değerlerinin kesiştiği noktanın altında kalan alana oranlayarak hesaplayabiliriz.

$$FF = \frac{I_{mp} V_{pm}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{\text{Alan A}}{\text{Alan B}} \quad (3.9)$$



Şekil 3.19. Gözenin çıkış akımına (kırmızı çizgi) ve gücüne (mavi çizgi) karşı gerilim grafiği. Kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum güç noktalarının (V_{mp} , I_{mp}) Gösterimi (Gül, 2008)

d) Verim: Farklı gözeleri karşılaştırmak için en sık olarak kullanılan parametredir ve gözeden elde edilen çıkış enerjisinin, göze gelen güneş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Gözenin performansını yansıttığı gibi aynı zamanda gelen güneş ışınımı şiddetine, spektrumuna ve göze sıcaklığına bağlıdır. Bu yüzden herhangi bir karşılaştırma yapmadan önce belli standartlarda ölçümler alınmalıdır. Yeryüzünde kullanılacak olan gözelerin verimleri AM 1.5 spektrumunda, 25 °C sıcaklığında ölçülür. Uzay çalışmalarında kullanılacak gözeler ise AM0 spektrumunda ölçülür. Gözenin verimi gelen güneş enerjisinin elektrik enerjisine çevrim oranıdır. $P_{güneş}$, güneş ışınımı güç değeri olmak üzere,

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{güneş}} \quad (3.10)$$

eşitliği ile verilir (Gül, 2008).

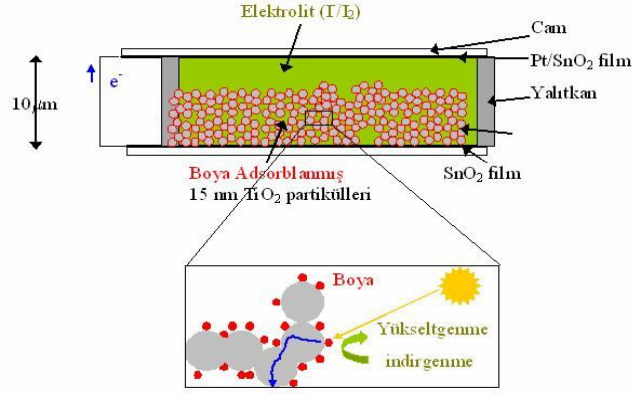
2.8. Boya Esaslı Güneş Pilleri

3.8.1. Organik Boya Esaslı Nano-kristal Yapılı TiO₂ Güneş Pilinin Yapısı

Boya sensörlü güneş pili, iletken cam yüzeyine kaplanmış nanokristal yapının (genelde TiO₂, ZnO) organik boya ile duyarlaştırılması ile oluşturulan yarıiletken film (çalışma elektrodu, platin kaplı iletken cam (sayıcı elektrot) ve çalışma elektrotu) ile sayıcı elektrotu birbirine bağlayan ve TiO₂ tabaksının gözeneklerini dolduran boşluk iletken malzemeden meydana gelmektedir.

Sıvı elektrolitli pillerde, boşluk iletken malzeme, organik çözügen içerisinde iyodür / triiyodür (I^- / I_3^-) redoks çiftinden meydana gelmektedir. Uçuculuğu yüksek çözgenli elektrolitlerde iyi bir yalıtım gerekmektedir. Şekil 3.20’de organik boya sensörlü güneş pilinin şeması verilmiştir. TiO₂’nin dışında, ZnO ve SnO₂ yarıiletkenleri de yoğun olarak kullanılmaktadır. Hangi yarıiletkenin kullanılacağı kullanılan boya ile direkt ilişkilidir. Fakat yarıiletkenler arasından en çok kullanılan ve verim açısından en iyi sonuç veren TiO₂’dir (Zafer, 2006).

Tek kristal yarıiletken yüzeyinin, tek tabaka boya ile duyarlaştırılması sonucu soğurulan ışık miktarının çok az olması verimliliklerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Bu sorun, tek kristal tabaka yerine nano kristal yapıli film kullanarak çözülmüştür.



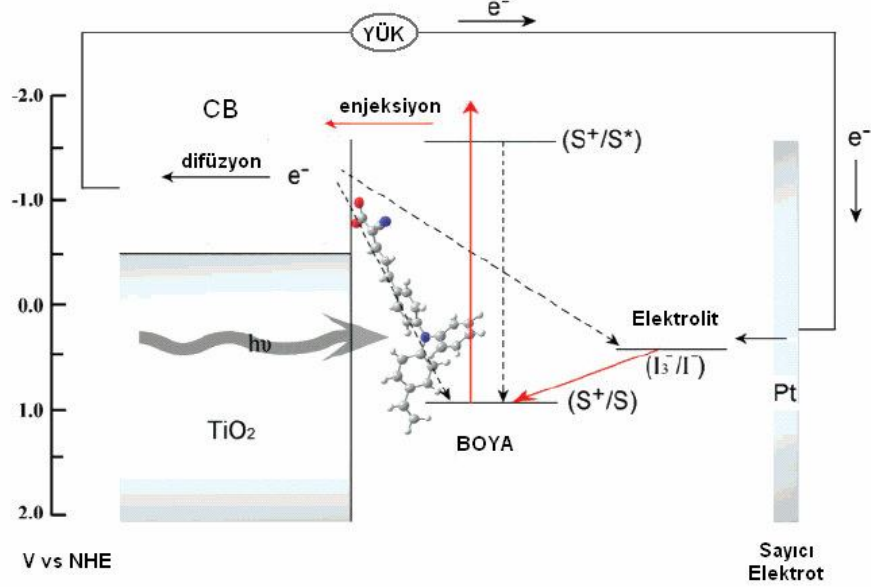
Şekil 3.20. Organik Boya Esaslı Nano-kristal Yapılı TiO₂ Güneş Pilinin Yapısı (Zafer, 2006).

Yüzey alanında meydana gelen bu büyüme nano-kristal yapıli film yüzeyinde daha fazla boya adsorplanmasına neden olmaktadır, bu da görünür bölgede daha çok ışık soğurulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, tek kristal TiO₂ elektrot, *cis*-di(thiocyanato)*bis*(2,2'-bipyridyl,4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II) veya Ru(dcbpy)₂(NCS)₂ boyası ile duyarlaştırıldığında ışığın %1'den daha az kısmını soğurmaktadır. Aynı boya ile nanokristal yapıli film duyarlaştırıldığında gelen ışığın %98'i soğurulmaktadır. Bu sonuçlar ışığında, 1991'de Grätzel ve O'Regan %7 verimli güneş pillerini rapor etmişlerdir (O'Regan vd. 1991). Bugün ise ince film güneş pillerinde verim % 20'lere (elektrikport, 2013).

DSSC teknolojisi düşük üretim maliyeti ve seri üretim avantajı gibi etkenler nedeniyle fotovoltaik hücreleri içinde günümüzde en çok kullanılan kristal silisyum teknolojisinin yerini alacak teknoloji olarak görülmektedir.

3.8.2. Boya Esaslı İnce Film Fotovoltaik Hücre Çalışma Prensibi

Boya esaslı fotovoltaik hücre meydana getiren malzemelerin indirgenme ve yükseltgenme enerji seviyeleri, elektron göçünün istenilen yönde ve istemli olarak gerçekleşmesine uygun olacak şekilde seçilmektedir (Zafer, 2006).



Şekil 3.21. DSSC'nin çalışma prensibi (Tekoğlu, 2009)

Boya esaslı fotovoltaik hücrenin çalışmaya başlaması, ışığın nanokristal titanyum oksit üzerine adsorblanmış olan boya molekülleri tarafından soğurulması ile olmaktadır. Işığı soğuran boya uyarılmış hale geçmektedir (Denklem 3.11). Uyarılan boya molekülü bir elektronunu titanyum oksidin iletkenlik bandına (CB) enjekte etmektedir (Denklem 3.12):



Enjekte edilen elektronlar iletken cam aracılığıyla sayıcı elektroda ilerleyerek bir dış akımın oluşmasına sebep olur. Bundan dolayı, geleneksel *p-n* kavşaklarına zıt olarak boya temeli güneş pillerinde ışık absorblama (boya) ile yük transfer (TiO₂) fonksiyonları birbirinden ayrılmıştır. Elektronlarını TiO₂ ye enjekte ederek bir

elektron akışına sebep olan dye katyonları elektrolit olarak kullanılan redoks çifti tarafından yükseltgenirler (Denklem 3.13’de A olarak gösterilmiştir):



Bir elektronunu TiO_2 ’in iletkenlik bandına aktarmasıyla oluşan boya katyonları redoks çifti içeren elektrolit tarafından nötral hale indirgenmektedir. Yükseltgenen elektrolit ise dış devre üzerinden platinlenmiş elektroda gelen elektron tarafından indirgenmektedir (Denklem 3.14).



Güneş pillerinde akım üretimine neden olan ve Denklem 3.12’den Denklem 3.14’e kadar gösterilen reaksiyonlarda net yük her zaman sıfırdır ve kimyasal olarak bir değişme meydana gelmemektedir. Bu elektron aktarım süreçleri sonunda fotoakım meydana gelmektedir. Buradaki gösterimler pilin içerisinde yalnızca bir tek döngü olması durumunda meydana gelen muhtemel olayları göstermektedir. Organik boya esaslı fotovoltaiik hücrede sürekli akım elde etmek için bu redoks reaksiyonlarının sürekli tekrarlanması gerekmektedir.

Grätzel tarafından yapılan ve boya olarak $\text{Ru}(\text{dcbpy})_2(\text{NCS})_2$ kompleksinin TiO_2 ile birlikte kullanıldığı pil çalışmalarında, dikkate değer bir performans kaybı ve boyaya ilişkin bir degradasyon olmaksızın, en yüksek döngü sayısı elde edilmiştir (en az 10^7 döngü ölçülmüştür). Işık altında, TiO_2 ’nin pseudo-Fermi seviyesi (E_f) ve elektrolit olarak kullanılan redoks çiftinin potansiyeli arasındaki Gibbs serbest enerji farkı, tasarlanan bu pilin maksimum fotovoltaj elde etmeye uygun olduğunu göstermektedir.

Grätzel ve grubunun yapmış olduğu çalışmalarda $\text{Ru}(\text{dcbpy})_2(\text{NCS})_2$ esaslı TiO_2 fotovoltaiik hücre performansında belirgin bir düşme meydana gelmeden en az 10^7 adet devir yaptığı ölçülmüştür. Organik boya esaslı fotovoltaiik hücreden elde edilebilecek maksimum foto-voltaj, TiO_2 ’in ışıyım altındaki psödo-fermi düzeyi ile elektrolitin redoks potansiyeli arasındaki Gibbs Serbest Enerji farkı ile belirlenmektedir (C. Zafer, 2006).

3.8.3. Boyalar

Boya esaslı güneş pilinde, TiO_2 nano-kristal tanecikler üzerine adsorplanmış olan boyanın bazı temel özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Foto-duyarlı absorpsiyon spektrumu, tüm görünür bölgeleri (400-700 nm) hatta kızıl ötesine yakın kısımları da kapsamalıdır.
- Yarıiletkenin iletim bandı ve uyarılmış boya arasında etkili bir elektron transferini sağlamak için, boyanın uyarılmış hal enerji seviyesi, n-tipi yarıiletkenin iletim bandından yüksek olmalıdır (n-tipi DSCs). P-tipi DSCs'ler için foto-duyarlının HOMO seviyesi p-tipi yarıiletken valans bandından daha pozitif potansiyele sahip olmalıdır.
- Boya rejenerasyonu için, uyarılmış foto-duyarlı hal enerji seviyesi elektrolitin redoks potansiyelinden daha pozitif olmalıdır.
- Boyanın uyarılmış durumundan TiO_2 'in iletkenlik bandına yapılan elektron transferi, floresans, fosforesans veya karanlık süreç gibi sönmeme reaksiyonlarına olanak sağlamaması için çok hızlı olmalıdır.
- Yarıiletken yüzeyine kuvvetli bağlanma yapabilecek gruplara (-COOH, - H_2PO_3 , - SO_3H , vd.) sahip olmalıdır. Ayrıca boya yüksek çözünürlüğe sahip olmalıdır.
- TiO_2 yüzeyine adsorplanmış olan boya fotokararlı, elektrokimyasal ve termal olarak kararlı olmalıdır.

Yukarıda bahsedilen özellikler yüksek verimli güneş pilinde olması gereken ana özelliklerdir. DSC pillerinde boyar malzeme olarak metal içermeyen organik boyalar, ftalosiyaninler, porfirinler, metal komplekslere dahil olan rutenyum boyaları vb. kullanılmaktadır (Hagfeldt vd. 2010).

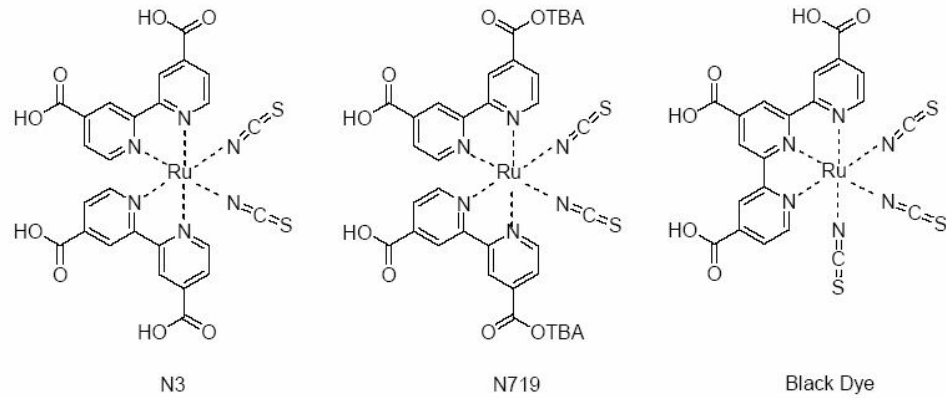
3.8.3.1. Metal Kompleksler

Geniş absorpsiyon spektrumlarına ve etkili fotovoltaiik özelliklere sahip olduklarından dolayı özellikle metal kompleksleri ve rutenyum (Ru (II)) kompleksleri, DSC uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle metal kompleksli boyalar, en az bir tane bağlayıcı gruba sahip olan ligandla merkez metal iyonu içermektedir. Metalden liganta yük transfer (MLCT) özellikleri

sayesinde güneş spektrumun görünür bölgesinde ışık absorpsiyonu vermektedir. Bundan dolayı, merkezi metal iyonu, komplekslerin tüm özelliklerin ana parçasıdır. Ligandlar bipyridines (bipiridiller) veya terpyridines (terpiridiller) yapısına farklı benzen gruplarını (alkil, aril, heterosiklik vb) bağlayarak fotofiziksel ve elektrokimyasal özelliklerini değiştirerek fotovoltaj performansı artırılabilir. Bağlayıcı gruplar boya ile yarı iletken arasındaki bağlanmayı sağlıyor ve uyarılan elektronu yarı iletkenin iletim bandına (CB) enjekte etmeyi kolaylaştırıyor (Hagfeldt vd. 2010).

3.8.3.2. Rutenyum Boyaları

Rutenyum boyaları şimdiye kadar organik güneş pillerinde en yüksek verimi sağlayan boyalar olarak bilinmektedir. Rutenyum kompleksleri; geniş bir absorpsiyon spektrumlarına, uygun temel ve uyarılmış enerji düzeylerine, uzun ömürlü ve iyi elektro-kimyasal kararlılığa sahip olması nedeniyle bu malzemeler güneş pillerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 3.22. Rutenyum boyalarına örnekler

Tiyosiyonat türevi, Cis-ditiyosiyonat bis(4,4'-dikarboksi-2,2'-bipiridin) rutenyum(II) olarak adlandırılan [N3] boyasıdır. Bu boya geniş görülebilir ışık absorpsiyon spektrumu foto-akım elektro akımına dönüşüm verimi olarak nitelendirilen IPCE spektrumu 800 nm'ye kadar artan yarıiletken yüzeye kuvvetli adsorblama vb. özellikleri sayesinde olağanüstü özelliklere sahiptir. Sonuç olarak, güneşten elektrik enerjisine dönüşüm verimi ilk olarak % 10 elde edilmiştir.

N3 boyasına 2 tane tetrabütül amonyum (TBA) substanti takılarak [N719] boyası elde edilmiştir. N719 boyası ile yaklaşık olarak N3 boyasının iki katı kadar verimlilik elde edilmiştir (Kılıç, 2010). Bu sonuç çözelti içerisindeki boya için N3 boyasının karboksilik asit grubuna protonlayarak yükseltgenme ve indirgenme potansiyelinde daha negatif bölgeye kaydırılmıştır. N3 ve N719 boyaları DSCC için referans boyalar olarak kullanılmaktadır.

Gratzel ve ark. tarafından çalışılan black dye olarak adlandırılan boya, 3 tane tiyosiyonat ligandı ve terpiridin ligandına ilave edilen 3 tane karboksil grubuna sahiptir. Bu boyalar metalden liganda yük transferi (MLCT) bandında kırmızı bölgeye kaymayı sağlamıştır. Bunun neden t_{2g} metal orbitalin enerjisinde artış ve terpiridin ligandına π^* seviyesindeki azalışından dolayıdır. Bu boyaya dayalı güneş pili IPCE spektrumu bütün görünür bölgeyi kapsayarak NIR bölgesine doğru. 920 nm'ye kadar kaymıştır ve verimlilik %10.4 elde edilmiştir. ($J_{sc}=20\text{mAcm}^{-2}$, $V_{oc}=720\text{mV}$, $FF=0,7$).

tritiyosiyonat (4,4',4''-trikarboksi- 2,2':6',2''- terpiridin) rutenyum(II) [**black dye**] Nazeeruddin et al. olarak adlandırılan rutenyum boyaları ile yoğun olarak çalışılmıştır ve bu boyalar %11 lik pil verimleri(η) ile yüksek verimliliklere sahiptirler.

1979 yılında karboksilat bipiridin liganda bağlı rutenyum kompleksleri TiO_2 tek kristalin sentezisyon (duyarlaştırma) ilk kez kullanılmıştır. 3 tane karboksilat bipiridin ligandına sahip benzer boyalar 1985 yılında Desilvestro ve grubu tarafından çalışılmıştır. Bunun yanında ilk kez boya esaslı güneş pilide çalışılmıştır ve IPCE %44 olarak elde edilmiştir.

Organik boya esaslı nano-kristal yapılı TiO_2 güneş pillerinin 1991'de literatüre kazandırılmasıyla birlikte $\text{Ru}(\text{dcbpy})_2(\text{NCS})_2$ boyaları ve türevleri önem kazanmış ve odak noktası olmuştur (O' Regan vd, 1991).

Şu ana kadar en yüksek pil verimleri rutenyum polipiridil kompleksleri ile sağlanmıştır. Rutenyum polipiridil boyaları bugüne kadar en yüksek verim gösteren

boyalar olmalarına rağmen ideal boyalar değildirler. Bu boyaları sınırlayan faktörler arasında sentezlerinin zor olması, çıkış maddelerinin pahalı olması, molar soğurma katsayılarının düşük olması ve güneş spektrumunun çok dar bir aralığında soğurma yapmaları sayılabilir (Tekoğlu, 2009).

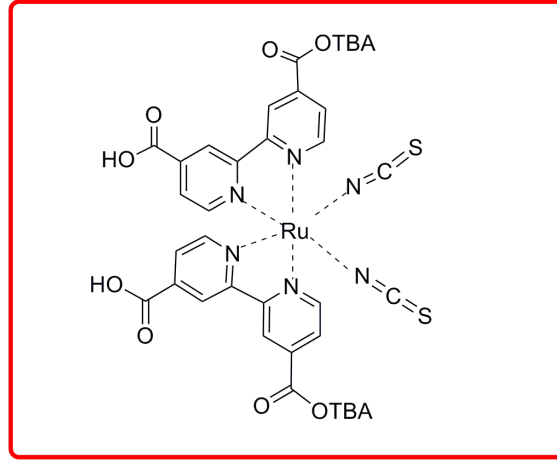
4. DENEYSEL KISIM

4.1. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Maddeler

Bu çalışmada kullandığımız kimyasal maddeler aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 4.1. deneylerde kullanılan kimyasal malzemelerin listesi

<i>Kimyasalın ismi</i>	<i>Firması</i>
(C ₁₂ H ₂₈ O ₄ Ti) Titanium(IV) isopropoxide (Titanyum tetra izo-propoksit)	{MERCK}
Asetik Asit (CH ₃ COOH) (%100)	{MERCK}
Nitrik Asit (HNO ₃) (%65)	{MERCK}
Etanol (C ₂ H ₅ OH) (%96)	{MERCK}
Polyethylene Glycols / PEG (HO(CH ₂ CH ₂ O) _n H) (Polietilen glikol)	{MERCK}
Titanium (IV) Chloride (TiCl) (Titanyum (IV) klorür)	{MERCK}
Platinum Standart Solution (Platin Standart Çözeltisi)	{MERCK}
Potassium Iodine (KI) (Potasyum İyodür)	{ SİGMA ALDRİCH}
Iodine (I ₂)	{ SİGMA ALDRİCH}
Di-Tetrabutylammonium Cis-Bis (İso Thiocyanato) Bis (2,2' - Bipyridyl-4,4' - Dicarboxylato)- Ruthenium (II) [Di-Tetrabutylamonyum Cis-Bis (izotiyosiyano)-Bis (2,2 ' - bipiridil-4, 4'-Dikarboksilat) - rutenyum (II) 95% (NMR)]	{ SİGMA ALDRİCH}



Şekil 4.1. Kullanılan rutenyum boyasının kimyasal yapısı

4.2. Şeffaf İletken Oksit (TCO) Kaplı Elektrotlar:

Bu çalışmada indiyum katkılı kalay oksit (ITO) şeffaf iletken oksit kaplı camlar kullanılmıştır. TCO elektrotlar kullanılmadan önce yıkama işleminden geçirilmiştir. Yıkama işlemi elektrotların önce deterjanlı su ile temizlendikten sonra, saf su, aseton, etanol çözücülerinde 20'şer dakika ultrasonik banyoda tutulmasının ardından kurutulmaları ile tamamlanmaktadır.

4.3. TiO₂ Çözelti Sentezi ve Pasta Hazırlanması

Bu tezde su bazlı hazırlanan TiO₂ çözeltisi hazırlanıp kullanılmıştır. Bu pasta Ocakoğlu ve arkadaşlarının rapor ettikleri bilgiye göre hazırlanmıştır (Ocakoğlu, 2008). Sentez aşaması, yağ banyosunda azot atmosferinde belli bir sıcaklıkta geri soğutucu altında ısıtma (reflux) düzeneğinde gerçekleşmiştir.

25 ml Titanyum tetra izo-propoksit üç boyunlu balona konulmuştur. İçerisine 5,5 ml glacial acetic acid damlatma hunisiyle damla damla ilave edilmiştir ve 15 dk karıştırma işleminden sonra, 120 ml suyun içine 0,1 M nitrik asit çözeltisi damlatma hunisiyle damla damla ilave edilmiştir. Azot atmosferinde geri soğutucu altında 80°C' de ısıtma (reflux) düzeneğinde 8 saat karıştırılmıştır.

Bu süre sonunda elde edilen şeffaf hafif jelimsi kolloidal çözelti 0,45 µm'lik şırınga filtresi ile süzülerek büyük aglomerlerden ayrılmıştır. Süzülen çözelti, otoklav içerisine alınmış ve T=220 °C de 12 saat tutularak tanecik büyütme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sırasında, küçük kristal taneleri, yüksek basınç ve sıcaklık altında çözünerek büyük kristal taneleri üzerinde tekrar kristallenerek, daha büyük kristal taneciklerini oluşturmuştur.

Otoklavdan çıkan TiO₂ süspansiyonu rotary evaporatörde %15 TiO₂ içerecek şekilde deriştirilerek içerisine film kalitesini arttırmak için % 6,2 oranında PEG 20000 katılmaktadır. Pasta çok düşük hızda bir gece manyetik karıştırıcıda karıştırılarak homojen pastaya dönüştürülmüş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir (Ocakoglu, 2008).

Elde edilen pasta iki kenarı da Scotch 3M polimer bant ile kaplanmış ITO kaplı cam yüzeyine bir pastör pipet ile damlatılmış ve cam baget yardımıyla sıyırılarak kaplanmıştır. Camlar 5 °C/dakika hızla ısıtılan ve 470 °C'de 30 dakika sinterlenmiştir.

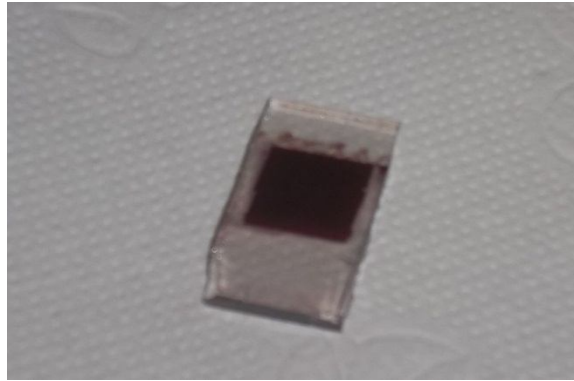
Soğuyan elektrotlar üzerine 0,02 M TiCl₄'ün sudaki çözeltisinden yayılarak bir gece bekletilmektedir. Beklenen süre sonunda elektrotlar bol su ile yıkanarak basınçlı kuru hava ile kurutulmaktadır. Elektrotların TiCl₄ ile muamele edilmesinin iki nedeni bulunmaktadır: birincisi, elektrotun yüzey alanını arttırmak ve adsorplanan boya miktarını arttırmak, ikincisi ise, kaplamadaki TiO₂ kristallerinin birbirlerine kaynaşmasını sağlayarak elektriksel iletkenliği sağlamaktır (Zafer, 2006). TiCl₄'li Camlar 5 °C/dakika hızla ısıtılan fırın ile 470 °C'de 30 dakika sinterlenmiştir.



Şekil 4.2. Hazırlanan TiO_2 pasta ile kaplanmış camlar

4.4. Çalışma Elektrot Yapımı

TiO_2 kaplanan tabaka hazırlanan rutheniyum boya çözeltisi içerisinde bırakıldı. Boyar maddeler içerisinde bırakılan TiO_2 yarıiletken filmler 4 saat boyunca bekletildi. Boyar içerisinden çıkarılan TiO_2 yarıiletken filmler seyreltilmiş etanol çözeltisinin içerisinde atılarak, yüzeye tutunamayan ölü boyar yüzeyden temizlendi ve oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı. Elde edilen bu tabaka ($\text{ITO} + \text{TiO}_2 + \text{Boyar Madde}$) çalışma elektrotu olarak kullanıldı. Çalışma elektrotunun fotoğrafı Şekil 4.2' de gösterildi.



Şekil 4.3. Rutheniyum boya ile adsorplanmış TiO_2 kaplı ITO cam

4.5. Karşıt Elektrotun Hazırlanması

Boyar maddeli güneş pillerin (BMGP) sürekli olarak çalışabilmesi için, elektrolitten boyar maddeye sürekli olarak elektron transferi sağlanması gerekmektedir. Bu

elektron transferi, iyot-iyodür dönüşümü ile olmaktadır. Bu dönüşüm hızı, platin (Pt) yüzeyinde, ITO yüzeyinde olduğundan çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Pt, katalizör etkisi yaparak dönüşüm reaksiyonunu hızlandırmaktadır. Dolayısıyla, bu işlem için tüm yüzeyin tamamen platin kaplanmasına gerek yoktur, sadece katalitik amaçlı bölgesel kaplamalar yeterli olmaktadır. ITO iletken cam madde üzerine Pr-OH (propil alkol) içinde 5 mM'lık H_2PtCl_6 1cm×1cm aktif alana yayarak termal olarak ITO iletken cam platinize edilmiştir. Pt kaplama kuruması için oda sıcaklığında bekletildi. Oda koşullarında kurutulduktan sonra ısı tabancası ile dakikada 20 °C arttırarak 400 °C'ye kadar arttırıldı. Sonra dakikada 10 °C arttırılıp 450 °C'ye çıkarıldı. 450 °C'de 20 dakika bekletildi. Daha sonra dakikada 20 °C düşürülüp 50 °C'ye kadar soğutuldu. 10-15 dakika kadar 50 °C'de bekletildi. Çıkan camlar platin kaplanmış oldu.

4.6. Sıvı Elektrolitin hazırlanması ve Pil Yapımı

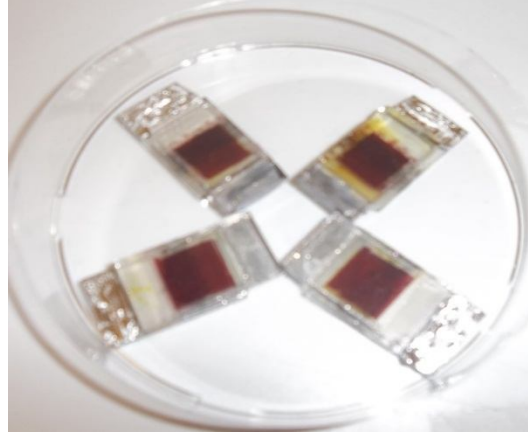
Sıvı elektrolit 0,05 M iyod (I_2) 10 ml saf etilen glikol içerisinde çözülüp, sonra içerisine 0,5 M potasyum iyodür (KI) eklenmesiyle oluşturulmuştur. Elektron döngüsünün gerçekleşebilmesi için gerekli olan redox tepkimesinin gerçekleştiği sıvı tabaka olan bu çözelti iyice karıştırıldıktan sonra, çözeltinin bozunmasını önlemek için karanlık bir ortamda ya da koyu renkli bir cam kap içerisinde muhafaza edildi. Bu çözelti BMGP çalışması esnasında gerekli olan tepkimelerin gerçekleştiği tabakadır ve çalışma elektrotu ile karşıt elektrot arasında yer alır.

4.7. Pil Üretimi

Boyar maddeli güneş pilleri, ITO + TiO_2 + Boyar Madde'den oluşan çalışma elektrotu ile ITO + Platin kaplı karşıt elektrot tabakası ve aralarına sıvı elektrolit bulunan tost biçiminde üst üste konularak oluşturulan yapıdır.

Yukarıda belirtildiği şekilde hazırlanan boya adsorplanmış TiO_2 ve karşıt elektrotlar 1,5cm x 2,5cm boyutlarında kesilmektedirler. TiO_2 kaplanan elektrotun yüzeyinde 1 cm^2 aktif alan kalacak şekilde, fazla TiO_2 kaplı kısımlar ince mikroskop lameli ile kazınmaktadır. Daha sonra pil içerisine elektrolit dolumu için karşıt elektrota, elmas matkap ucu ile küçük bir delik açılmaktadır. İki elektrotun iletken yüzeyleri

birbirlerine bakacak şekilde bir araya getirilmektedir. İki elektrot birbirlerine surlyn kullanılarak yapıştırılmaktadır.



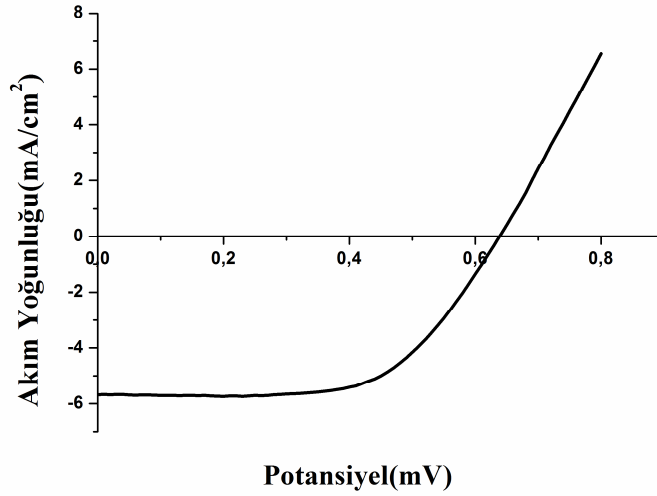
Şekil 4.4. Güneş pili

Her iki elektrotun 1cm'lik kısmı daha sonra ölçüm ve karakterizasyon için dışarıda kalmaktadır. Elektrotlar $\sim 110^{\circ}\text{C}$ 'deki ısıtıcı üzerinde, yüzeye Pt kaplı elektrot temas edecek şekilde 10–15 saniye hafif bastırılarak tutulur. Elektrotlar sıcak yüzeyde 15 saniyeden fazla tutulmamalıdır. Çünkü yüksek sıcaklıkta TiO_2 yüzeyine adsorplanmış olan boya desorplanmaya başlamaktadır ve bu da verim düşüklüğüne sebep olmaktadır. Surlyn, 100°C 'nin üzerinde erimeye başlamakta ve iki cam birbirlerine çok iyi yapışarak arada elektrolit için $25\ \mu\text{m}$ genişliğinde bir boşluk kalmaktadır. Hazırlanan elektrolit, pil içerisine vakum altında enjekte edilerek, açılan delik yine bir parça surlyn ve mikroskop camı ile ısıtılarak yalıtılır. Pil, ölçüm ve karakterize etmek için hazırdır. Ölçüm yapılırken, elektrotların daha iyi kontak alması için iletken yüzeye küçük bir miktar alüminyum ile lehim yapıldı. Lehim yapılan piller ölçüm almaya hazır hale getirildi (Şekil 4.4).

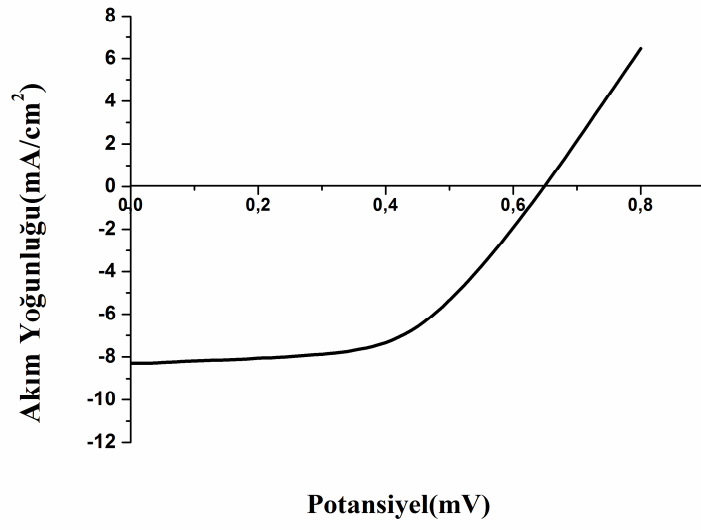
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışmasında TiO_2 sentezli ince film kaplamalı N719 boya esaslı 4 tane güneş pili yapılmıştır. Yapılan güneş pillerinin önce her birinin ayrı ayrı fotovoltatik ölçümleri alınmış ve sonra birbirleri ile seri ve paralel bağlanarak fotovoltatik pil ölçümleri alınmış sonuçlar incelenmiştir. N719 kullanılarak elde edilen güneş pillerinin I-V grafikleri Şekil 5.1 ile Şekil 5.8 arasında gösterilmiştir. Pillerdeki I-V grafikleri 1000 mW/cm^2 ışınlam ve AM 1.5 solar simülatörde aydınlıkta ölmüştür.

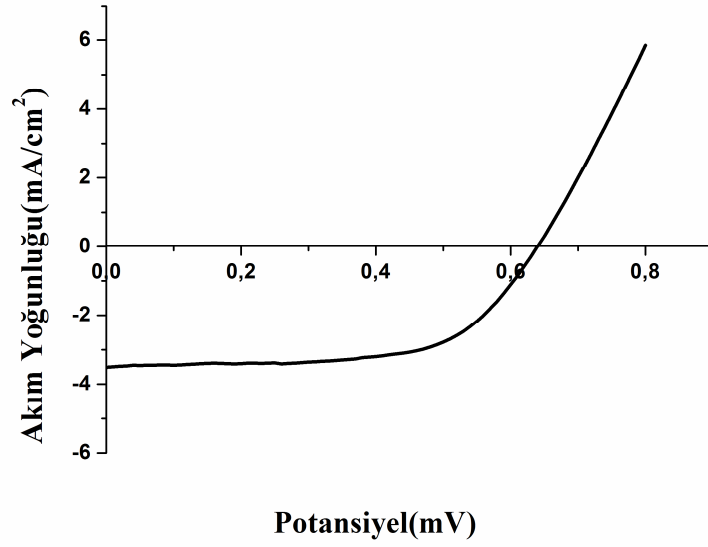
Işığın etkisi ile fotonlar boyar maddeden elektron sökmekte, bu elektronlar TiO_2 yarıiletken kristalinden ITO altlığa ulaşmakta ve devreyi tamamlayarak devrede bir akım olmasını sağlamaktadır. BMGP'lerinin fotovoltatik ölçümleri Çizelge 5.1 ile Çizelge 5.2'de verilmiştir.



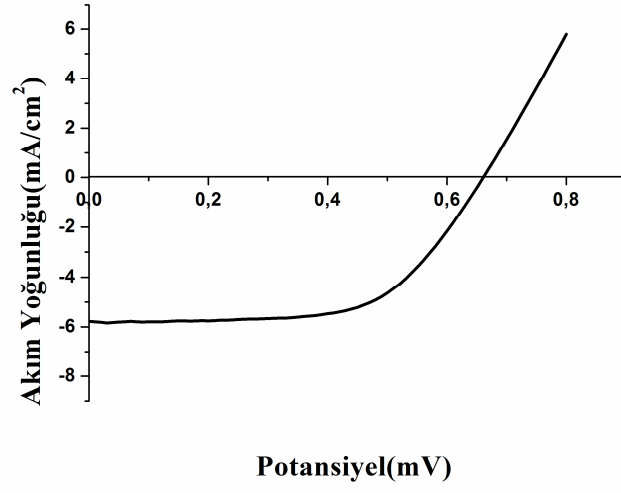
Şekil 5.1. Birinci güneş pilin akım-potansiyel eğrisi



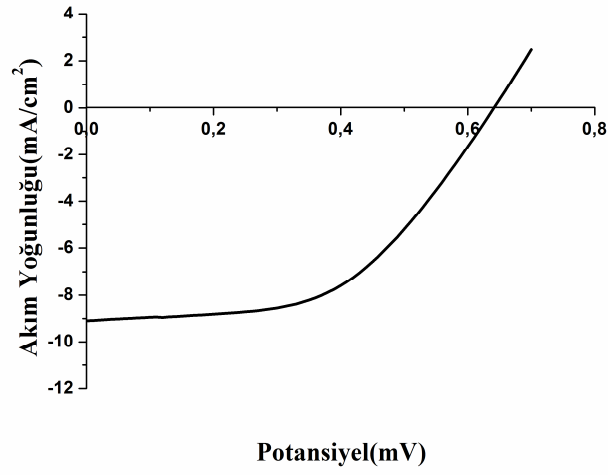
Şekil 5.2. İkinci Güneş Pilin akım-potansiyel eğrisi



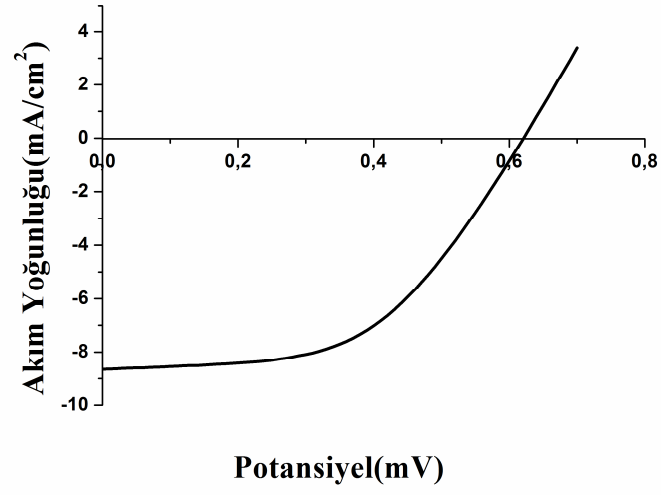
Şekil 5.3. Üçüncü Güneş Pilin akım-potansiyel eğrisi



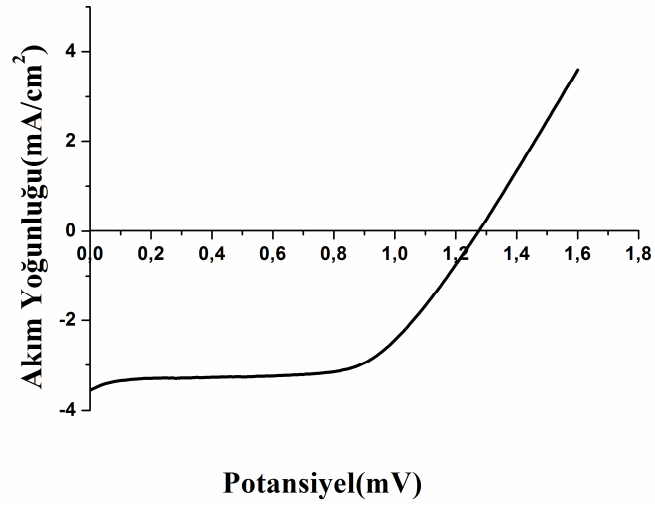
Şekil 5.4. Dördüncü Güneş Pili akım-potansiyel eğrisi



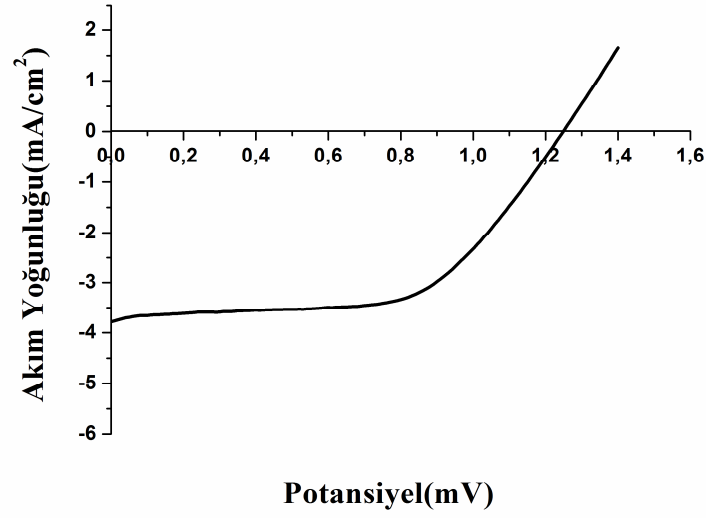
Şekil 5.5. Paralel bağlı alınan 1. ölçüm akım-potansiyel eğrisi



Şekil 5.6. Paralel bağlı alınan 2. ölçüm akım-potansiyel eğrisi



Şekil 5.7. Seri bağlı alınan 1. ölçüm akım-potansiyel eğrisi



Şekil 5.8. Seri bağlı alınan 2. ölçüm akım-potansiyel eğrisi

Çizelge 5.1. Güneş pil ölçümlerinin 1000 mW/cm² ışınım ve AM 1.5 solar simulatör altındaki I-V ölçüm sonuçları ve verimleri.

	I_{SC} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF	$M_{güççıkışı}$ [mW/cm ²]	V_{mp} [mV]	I_{mp} [mA/cm ²]	Verimlilik [%]
T ₁	5,681783	640,000	0,618122	2,247702	440,000	5,108413	2,247702
T ₂	8,289793	650,000	0,554045	2,985399	430,000	6,942789	2,985399
T ₃	3,510847	640,000	0,625126	1,404623	480,000	2,926297	1,404623
T ₄	5,777046	660,000	0,620091	2,364315	470,000	5,030458	2,364315

Çizelge 5.2. Seri ve paralel bağlı pillerin 1000 mW/cm² ışınım ve AM 1.5 solar simulatör altındaki I-V ölçüm sonuçları ve verimleri.

	I_{SC} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF	$M_{güççıkışı}$ [mW/cm ²]	V_{mp} [mV]	I_{mp} [mA/cm ²]	Verimlilik [%]
P ₁	9,099842	640,000	0,522168	3,041056	410,000	7,417209	3,041056
P ₂	8,648181	1270,00	0,523403	2,806419	400,000	7,016047	2,806419
S ₁	3,554824	640,000	0,588880	2,658574	910,000	2,921510	2,658574
S ₂	3,784477	1250,00	0,575209	2,721082	860,000	3,164049	2,721082

6. SONUÇ

Güneş pili yapımı sırasında kullanılacak olan boyar maddenin yapısı çok önemlidir. N719 boya, güneş pillerinde yüksek verime sahip olduğu için referans boya olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden tezde güneş pilinde kullanılan boyar malzeme olarak N719 boyası kullanılmıştır. BMGP için anot olarak kullanılan yarıiletkenler içerisinde en yüksek verime sahip olması nedeni ile TiO_2 yarıiletken olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada TiO_2 kaplı N719 boya esaslı güneş pili üretildi. Yapılan güneş pilleri seri ve paralel bağlantılar sağlanarak güneş pillerinin fotovoltaiik ölçümleri alındı. Yapılan pillerin hepsi aynı şekilde hazırlanmış olmasına rağmen TiO_2 tarafından yeteri kadar absorbe edilememesinden dolayı veya pil yapımındaki fiziksel koşullardan kaynaklı olarak alınan sonuçlar birbirinden farklılık göstermektedir. Buna göre verim sonuçlarına bakıldığında en yüksek verim paralel bağlı güneş pilinden elde edilmiştir. 4 tane güneş piller arasından T3 pil verimi diğerlerinden düşük çıkmıştır (Çizelge 5.1). Bu pilin değerinin az çıkmasının nedeni pil yapımı sırasında deneysel hatalardan kaynaklanmaktadır.

Güneş pili yapımı sırasında pil verimliliğini etkileyen önemli bir parametrede sıvı elektrot enjektesi ve elektrolitin pil dışına sızmamalarıdır önemlidir. Pillerde yapıştırıcı olarak kullanılan maddelerin zamanla bozulmaya uğraması sonucu sıvı elektrolitin pil dışına sızmasına sebep olmaktadır. Bu durum sonucunda pilin verimliliğinde düşüş meydana gelmektedir.

Aldığımız sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında ise makalelerle uyumlu sonuçların çıktığı görülmüştür. (M.H. Abdullah ve ark., 2013). Bazı literatürde ise FTO cam kullanıldığı zaman güneş pil verimleri daha yüksek çıktığı görülmüştür. (J. S. Suh ve ark., 2011)

FTO camın verimliliğinin ITO camdan daha iyi çıkmasının sebebi ITO camlar yüksek sıcaklıklardaki ısı işlemlerde yapısında bozulmalar meydana gelmektedir. Paralel bağlantı yapılarak alınan sonuçların seri sonuçlara göre biraz daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

7.KAYNAKLAR

- Adams, W.G., 1876 and Day, R.E., On the action of light on selenium, Proceedings of the Royal Society of London, 25:113-117
- Anders Hagfeldt, Gerrit Boschloo, Licheng Sun, Lars Kloo and Henrik Pettersson, 2010, Dye-Sensitized Solar Cells, Chem. Rev., 110, 6595–6663
- Becquerel, E., 1839, Memorie sure les effets electriques produits ous l'influence des rayons solaires. Comptes Rendues, 6:561.
- Boz, O.H., 2011, Günümüzün Alternatif Enerji Kaynağı: Fotovoltaik Güneş Pilleri, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 104s, Balıkesir.
- Chapin, D.M. 1954, A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into elektrical power. Journal of Applied Physics, 25:676-677.
- Elektrikport. 2013, Güneş Pili Verimliliğinde Yeni Dünya Rekoru, 20.09.2013, <http://www.elektrikport.com/haber-roportaj/gunes-pili-verimlilikinde-yeni-dunya-rekoru/6860#ad-image-0>
- Erdoğan, E., 2011, Güneş Pillerinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82s, Tunceli.
- Erol, M., 2001, Katı Hal Fizigi Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, (yayımlanmamış).
- Grätzel M, O'Regan B., 1991, “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dyesensitized colloidal TiO₂ films”, *et al. Nature* 353, 737-740
- Grätzel M., 1995, “Low cost and efficient photovoltaic conversion by nanocrystalline solar cells” Proc. Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.), 107(6), 607-619
- Gül, G., 2008, Güneş Gözellerinin Üretilmesinde Son Gelişmelerin Araştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Temiz ve Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 130s, Ankara.
- <http://www.gunessistemleri.com/fotovoltaik-sicaklik.php>, 2013, Sıcaklığın Güneş Hücreleri Üzerinde ki Etkisi.
- İnan D. ve Ültanır, M.Ö., 1996, Güneş Enerjisi, TEMEV; UGET-TB ve DÜÇAM Ortak Yayını.
- J. S. Suh et al., 2011, “Filling nanoparticles in the channels of TiO₂ nanotube membranes to enhance the efficiency of dye-sensitized solar cells”, Chemical Physics Letters, 513, 108-111

- Kabadayı, K., 2011, Esnek Yüzeyde Boya ile Duyarlaştırılmış Fotovoltaik Hücre Üretimi ve Performans İncelenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Bornova-İzmir.
- Karamanav, M., 2007, Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri, , Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Sakarya.
- Kavcar, N., 2006, Uygulamalı Fizik II Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, 130s, İzmir.
- Kılıç, B., 2010, Çinko Oksit (ZnO) Nanoyapılar Üzerinde Boya ile Duyarlı Hale Getirilmiş Güneş Pillerinin Üretilmesi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 115s, Erzurum.
- Kittel, C., 1996, Katıhal Fiziğine Giriş, Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd. Şti, 434
- Kudret, A., 2011; ZnO Tabanlı Doğal Boyar Maddeli Güneş Pili Yapımı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Kahramanmaraş.
- Küpeli, A.Ö., 2005, Güneş Pilleri ve Verimleri, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 146s, Eskişehir.
- M.H. Abdullah et al, 2013, Novel ITO/arc-TiO₂ antireflective conductive substrate for transmittance enhanced properties in dye-sensitized solar cell, Microelectronic Engineering, 108, 99–105.
- Nazeeruddin et al, 2001, Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline TiO₂ – based solar cells J. Am. Chem. Soc. 123, 1613 – 1624.
- Ocakoğlu, K., 2008, Organometalik Fotosensörlerin Sentezi ve Foto-organik Kimyasal Çalışmalar, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 95s, Bornova-İzmir.
- Ohl, R.S., 1941. Light-sensitive electric device, U.S. Patent No, 2:402-662.
- Oral, M., 1979, Güneş Pilleri, İzmir İlker Matbaası, 59.
- O' Regan et al, 1991, “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dyesensitized colloidal TiO₂ films” Nature, 353, 737-740.
- Özgöçmen, A., 2007. Güneş Pilleri Kullanılarak Elektrik Üretimi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Şenay, G., 2011, Çok Eklemlı Güneş Pillerinde Detaylı Denge Modeli ile Verim Optimizasyonu, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Ankara.

Tekoğlu, S., 2009, Güneş Pili Uygulamaları İçin Görünür Bölgede Absorbsiyon Yapan Yeni Organik Boyar Maddelerin Sentezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Bornova-İzmir

Yenilenebilir Enerji Bakanlığı. 2013. Güneş Enerjisi Potansiyeli, 12.10.2013, <http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/tgues.html>

Zafer, C., 2006, Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Doktora Tezi, 132s, İzmir.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hece BATUR
Doğum Yeri ve Yılı : Denizli, 1987
Medeni Hali : Bekâr
Cep Telefonu : (0545) 305 70 20
E- Posta : hece.batur@gmail.com

Lise : Denizli Cumhuriyet Lisesi, 2001-2004
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, 2005-2009

Yayınları

1. H.Batur,I.Akkurt,H.akyıldırım,B.Mavi,K.Gunoglu "CEP TELEFONLARINDA RADYASYON ÖLÇÜMLERİ " Turk Fizik Derneği fizik kongresi(tfd26)24-27 Eylul 2009 Bodrum
2. Murat ÖZTÜRK, Hece BATUR, Nuri ÖZEK “Fotovoltaik-Termal (PV-T) Kollektörlerin Isparta Meteorolojik Şartları Altında Analizi” Adım Fizik Günleri I, sayfa 73, 21-22 Mayıs 2010.
3. Murat ÖZTÜRK, Nuri ÖZEK, Hece BATUR, Murat KOÇ, ‘’Fotovoltaik (PV) Sistemlerin ve Fotovoltaik-Termal (PV-T) Kollektörlerin Termodinamik Değerlendirilmesi’’ Mühendis ve Makine, cilt 52, sayı 619, sayfa 50-62