



RECEP TAYYIP
ERDOĞAN
ÜNİVERSİTESİ

**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ULTRAVİYOLE IŞINLARININ SİLİSYUM TABANLI GÜNEŞ
PİLİNE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ VE KRİYOJENİK KAPLAMA YÖNTEMİ İLE
GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN SAĞLANMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Neslihan FIRAT

**Danışman
Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU**

**RİZE
2023**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında, Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU danışmanlığında, Neslihan FIRAT tarafından hazırlanan *Ultraviyole Işınlının Silisyum Tabanlı Güneş Piline Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Kriyojenik Kaplama Yöntemi İle Geri Dönüşümünün Sağlanması* adlı bu tez çalışması, 08/08/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğu ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. Şükrü ÇELİK	
Üye	: Doç. Dr. M. Gökhan ŞENSOY	

ETİK BEYAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Ultraviyole Işınlarnın Silisyum Tabanlı Güneş Piline Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Kriyojenik Kaplama Yöntemi İle Geri Dönüşümünün Sağlanması” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

08/08/2023

Neslihan FIRAT

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında piyasadan temin edilen Emin marka no: EM5063 modelli Si tabanlı güneş pilleri farklı dış etkilere (sıcaklık ve UV ışınları) maruz bırakıldı ve fotovoltaik değerlerde düşüşler sağlandı. Bilindiği üzere güneş ışınlarının bünyesinde yüksek enerjili fotonlara sahip UV ışınları bulunmaktadır. Bu ışınlar fotovoltaik hücreler tarafından soğrulmakta ve aygıtın aşırı ısınmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı güneş pillerinin yüzeyi UV ışınlarını yansıtan yansıtıcı tabakalarla kaplanmaktadır. Fakat günümüzde bu uygulamanın yetersiz olduğu ve yenilikçi yöntemlerin kullanılmasının önemli olduğu görülmüştür. İncelenen örneklerden 1 tanesi kontrol örnek olmak üzere, 2 tanesi farklı dalga boylarında (260 ve 360 nm) UV ışınları ile ışınlandırıldı. 3. örnek ise tüp fırında 60 °C sıcaklıkta ısıtıldı. Bu uygulama günde 1 saat olmak üzere 12 hafta devam etti. Elde edilen sonuçlar en hızlı bozulma sürecinin sırası ile 260 nm, 360 nm ve 60 °C ısıtılmış güneş pili örneklerinde olduğunu gösterdi. Tez çalışmasının ikinci aşamasında dış etkilere maruz bırakılmış güneş pillerinin yüzeyleri kriyojenik yöntem kullanılarak gümüş (Ag) iyonlarıyla kaplandı ve foto aygıtlarda yüzeysel plazmon rezonans (SPR) olayının gerçekleşmesi sağlandı. Bu yeni uygulama ile güneş pillerine plazmonik özellik kazandırıldı ve foto aygıtların karakteristik özelliklerinde iyileşmeler sağlandı tez metninde elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak açıklandı.

Bu tez çalışması TÜBİTAK-BİDEB tarafından “2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı” kapsamında desteklenmiştir. Katkı ve desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince, bana olan desteğini her daim hissettiren ve tüm zorlu süreçlerde yanımda olan, saygıdeğer danışmanım Sayın Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU’na; Arş. Gör. Melih MANIR’a ve tüm eğitim hayatım boyunca üzerimden hiçbir desteklerini ve güvenlerini esirgemeyen sevgili anneme, babama, ablama ve motivasyon kaynağım yeğenim Hamza’ya teşekkür ederim.

Neslihan FIRAT
2023/RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
GİRİŞ	1
1. YARIİLETKENLER	3
1.1. Yarıiletken Türleri.....	4
1.1.1.Saf (Katkısız) Yarıiletkenler	4
1.1.2.Katkılı Yarıiletkenler.....	8
1.2. Yarıiletkenlerin Bant Yapıları.....	11
1.2.1.Yarıiletken Yapılarda Elektriksel İletkenlik	13
1.3. Silisyum Atomu ve Özellikleri.....	14
2. GÜNEŞ PİLLERİ	17
2.1. Güneş Hücresi Yapısı.....	18
2.2. Güneş Pili Çeşitleri	21
2.2.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri.....	21
2.2.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri	23
3. GÜNEŞ PİLİ VERİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	25
3.1. Güneş Pillerine Sıcaklık Etkisi.....	25
3.2. Güneş Pillerine Ultraviyole (UV) Işık Etkisi	29
3.3 p-n Eklem Kapasitansı	32
3.4 Yüzeysel Plazmon Rezonans (SPR) Olayı.....	34
3.5. Gümüş	37
3.6. Kriyojenik Kaplama Yöntemi	38
4. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	40
4.1. Güneş Pillerinin UV ve Sıcaklık Etkisine Maruz Bırakılması.....	40
4.2. Kriyojenik Kaplama Yöntemi İle Ag Kaplama İşlemi	41

4.3 Si Tabanlı Güneş Pillerinin Karakterizasyonu.....	45
5. BULGULAR.....	46
6. SONUÇ.....	64
KAYNAKÇA.....	65



Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans

Danışman : Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU

Hazırlayan : Neslihan FIRAT

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 68

ÖZET

ULTRAVİYOLE IŞINLARININ SİLİSYUM TABANLI GÜNEŞ PİLİNE OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE KRİYOJENİK KAPLAMA YÖNTEMİ İLE GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN SAĞLANMASI

Si tabanlı güneş pili üzerine yapılan bu tez çalışması iki aşamada gerçekleştirildi. Birinci aşamada güneş pili örnekleri dış etkilere (sıcaklık ve ultraviyole ışınlar) maruz bırakılarak fotovoltaik değerlerde düşüşler sağlandı. Deneyler, biri kontrol örneği olmak üzere, 4 farklı güneş pili örnekleri üzerinde günde 1 saat olmak üzere 12 hafta süreyle sürdürüldü. Dış etki uygulama işleminde, örneklerin bir tanesi tüp fırında 60°C sıcaklıkta ısıtılırken diğer iki örnek sırasıyla $\lambda=260$ nm ve $\lambda=360$ nm dalga boylu UV ışınlarıyla aydınlatıldı. Yapılan elektriksel ölçümler uygulama sonrası güneş pillerinin fotovoltaik değerlerinin olumsuz yönde etkilendiğini gösterdi. Karanlık ve aydınlık ortamda (93 mW/cm^2) I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. I-V ölçümlerinden açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) değerleri hesaplandı. C-V ölçümlerinden ise verici yoğunluğu (N_d) tespit edildi. Çalışmanın ikinci aşamasında ise dış etkilere maruz bırakılmış güneş pillerinin yüzeyleri vakum (10^{-6} Torr) ortamında kriyojenik sıcaklıkta (200 K) Ag iyonları ile kaplandı. Bu yeni uygulama ile güneş pillerine yüzeysel plazmon rezonans (SPR) özelliği kazandırıldı. Güneş pillerinde gerçekleşen etkili SPR olayı sayesinde fotovoltaik değerlerde artışlar sağlandı ve örneklerin tümünde geri dönüşüm işlemlerinin gerçekleştiği görüldü.

Anahtar Kelimeler: UV ışın, SPR, Ag nano parçacık, güneş pili

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies
Department : Energy Systems Engineering
Thesis Type : Master's Thesis
Supervisor : Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU
Author : Neslihan FIRAT
Year : 2023
Pages : 68

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ULTRAVIOLET RADIATION ON SILICON-BASED SOLAR CELLS AND THEIR RECYCLING THROUGH CRYOGENIC COATING METHOD

This thesis study on Si-based solar cells was conducted in two stages. In the first stage, solar cell samples were subjected to external influences (temperature and ultraviolet radiation) to induce decreases in photovoltaic parameters. The experiments were carried out on four different solar cell samples, including one control sample, for a duration of 12 weeks with one hour of exposure per day. During the application of external influences, one sample was heated in a tube furnace at a temperature of 60°C, while the other two samples were illuminated with UV radiation at wavelengths of $\lambda=260$ nm and $\lambda=360$ nm, respectively. Electrical measurements revealed that the applied treatments had a negative impact on the photovoltaic parameters of the solar cells. I-V and C-V measurements were performed in both dark and illuminated (93 mW/cm²) conditions. From the I-V measurements, open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current (I_{sc}), fill factor (FF), and efficiency (η) values were calculated. C-V measurements were used to determine the donor concentration (N_d). In the second stage of the study, the surfaces of the solar cells, which had been exposed to external influences, were coated with silver (Ag) ions in a vacuum environment (10⁻⁶ Tor) at cryogenic temperature (200K). This new application imparted a superficial surface plasmon resonance (SPR) property to the solar cells. The effective SPR phenomenon occurring in the solar cells resulted in an increase in photovoltaic parameters, and it was observed that the recycling process took place in all samples.

Keywords: The UV radiation, SPR, Ag nano-particles, solar cell

KISALTMALAR

Ag	:	Gümüş
Al	:	Alüminyum
As	:	Arsenik
Au	:	Altın
B	:	Bor
C	:	Kapasitans
Cu	:	Bakır
CdTe	:	Kadmiyum tellür
E_a	:	Akseptör enerji seviyesi
E_f	:	Fermi enerji seviyesi
E_g	:	Enerji bant aralığı
E_v	:	Valans bandının üst enerji seviyesi
E_c	:	İletim bandının alt enerji seviyesi
eV	:	Elektronvolt
FF	:	Doldurma faktörü
FESEM	:	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
Ga	:	Galyum
GaAs	:	Galyum arsenik
I_{sc}	:	Kısa devre akımı
I_0	:	Doyma akımı
K	:	Kelvin
k	:	Boltzman sabiti
m_e^*	:	Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	:	Boşluğun etkin kütlesi
m_n^*	:	İletkenlik bandında bulunan elektronların etkin kütlesi
m_p^*	:	Valans bandında bulunan boşluğun etkin kütlesi
N_a	:	Alicı yoğunluğu
N_d	:	Verici yoğunluğu
N_C	:	İletim bandı durum yoğunluğu
N_v	:	Valans bandı durum yoğunluğu
N_{cv}	:	Katkı yoğunluğu
N_{ss}	:	Yüzey durum yoğunluğu
n_i	:	Elektron yoğunluğu
p_i	:	Boşluk yoğunluğu
P	:	Fosfor
PV	:	Fotovoltaik sistem
Q	:	Yük yoğunluğu
Sb	:	Antimon
Si	:	Silisyum
SPR	:	Yüzey plazmon rezonans
UV	:	Ultraviyole
V	:	Gerilim
V_{oc}	:	Açık devre gerilimi
Φ_b	:	Engel potansiyeli
W	:	Deplasman bölgesinin genişliği

ρ	:	Özdirenç
Ω	:	Ohm
\vec{J}	:	Elektrik akım yoğunluğu
σ	:	Elektriksel iletkenlik
λ	:	Dalga boyu



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin öz dirençleri gösterimi.....	3
Tablo 2. Silisyumun bazı özellikleri	16
Tablo 3. PV teknolojisi tarihsel gelişimi.....	17
Tablo 4. Ag elementi özellikleri.....	37
Tablo 5. Hücrelere ait verici yoğunluğunun (Nd) $1/C^2$ grafiklerinden hesaplanmış değerleri	50
Tablo 6. Ag kaplama sonrası hücrelere ait verici yoğunluğunun (Nd) $1/C^2$ grafiklerinden hesaplanmış değerleri.....	51
Tablo 7. Kontrol güneş pili örneğine ait fotovoltaik veriler	53
Tablo 8. 260 nm dalga boyunda aydınlatılmış kaplanmamış ve kaplanmış güneş piline ait fotovoltaik değerler.....	54
Tablo 9. 360 nm dalga boyunda aydınlatılmış kaplanmamış ve Ag kaplanmış güneş pili örneğine ait fotovoltaik parametre değerleri	55
Tablo 10. 60°C ısıtılmış kaplanmamış ve Ag kaplanmış güneş pili örneğine ait fotovoltaik parametrelerin değerleri	56
Tablo 11. Güneş pillerine ait idealite faktörü(n), engel potansiyeli (ϕ_b) ve I_0 değerleri	61
Tablo 12. Güneş pilleri N_{ss} ve deplasman bölgesini genişliği (W) değerleri	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Yarıiletkenin sıfır Kelvin ve oda sıcaklığında valans ve iletkenlik bantları	5
Şekil 2. a) Katkısız yarıiletkenlerde elektron bağlanma modeli b) ve c) uyarılma sonrası	5
Şekil 3. a) n-tipi elektriksel iletkenliğe sahip yarıiletken kristal yapı modeli b) ve c) uyarılma sonrası	8
Şekil 4. n tipi yarıiletkene ait donör enerji seviyesi	9
Şekil 5. p-tipi katkılı yarıiletken a) Üç değerlik elektrona sahip bor ile katkılama b) Elektrik alan içerisinde boşluğun hareketi	10
Şekil 6. p tipi yarıiletkenlerde akseptör özellikli enerji seviyesi	11
Şekil 7. (a) Yalıtkan (b) yarıiletken ve (c) iletken malzemenin enerji bant diyagramı ve 0 K sıcaklığında fermi seviyeleri	11
Şekil 8. Silisyum bağ yapısı	15
Şekil 9. a) $T=0$ 'da silisyum bağları b) $T > 0$ silisyum bağları	16
Şekil 10. Güneş Hücre Modülü	18
Şekil 11. Fotovoltaik hücre çalışma prensibi	19
Şekil 12. Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi	20
Şekil 13. Güneş hücresi bileşenleri	21
Şekil 14. Tek kristal silisyum güneş pili	22
Şekil 15. Hava şartlarına göre verimleri	22
Şekil 16. Polikristal silisyum güneş pilleri	23
Şekil 17. İnce film güneş pili örnekleri	24
Şekil 18. Güneş ışınlarının yer yüzüne farklı açılarda gelişinin şematik görüntüsü	25
Şekil 19. Sıcaklığa göre verimdeki değişim	28
Şekil 20. Saate bağlı ortam sıcaklığı ve güç üretimi değişimi	29
Şekil 21. a) ilgili sıcaklıklarda akım-voltaj değerleri b) ilgili sıcaklıklarda voltaja bağlı güç değerleri	29
Şekil 22. Saate bağlı UV değişimi	32
Şekil 23. Ag, Au ve Cu nano parçacıklar için yüzey plazmon soğurma bantları	38
Şekil 24. Dış elektromanyetik etkiye maruz bırakılan metalik nano parçacığın sergilediği fiziksel sürecin şematik görünümü	38

Şekil 25. Güneş pillerinde ışığın yakalanması için kullanılan metalik plazmon yapılı modellerinin şematik görünümü	38
Şekil 26. Kriyojenik yöntem düzeneği	38
Şekil 27. Tüp fırın.....	40
Şekil 28. UV kabin	40
Şekil 29. Si tabanlı güneş pili modeli: a) Koruma camı, b) Anti-yansıtıcı katman, c) Üst kontak, d) n-tipi silisyum, e) p-tipi silisyum, f) Alt kontak	40
Şekil 30. Elektrokimyasal ölçüm cihazı ve güneş simülatörü.....	41
Şekil 31. Kriyojenik altlık düzeneği film üretim aşamaları.....	42
Şekil 32. Kriyojenik yöntemle a) kaplanmamış ve b) kaplanmış güneş pili örneği .	42
Şekil 33. Cam altlıklar üzerinde 300 K, 200 K'de hazırlanan Ag ince filmlerin taramalı FESEM görüntüleri.....	43
Şekil 34. 300 K ve 200 K'de cam altlıklar üzerinde hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları	43
Şekil 35. Hassas terazi görüntüsü	44
Şekil 36. Sisteme sıvı azot eklenmesi.....	44
Şekil 37. FESEM ölçümlerinde kullanılan Zeiss Sigma 300 FESEM cihazı.....	45
Şekil 38. İvium CompactStat.h10800 elektrokimyasal ölçüm cihazı.....	45
Şekil 39. a) 260 nm, b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60 °C ısı uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık C-V ölçüm sonuçları grafiği	46
Şekil 40. 260 nm, 360 nm dalga boylu UV ışınına ve 60 °C Isıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 12 haftalık kapasitans- zaman ölçümleri	48
Şekil 41. a) 260 nm b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60 °C Isıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık $1/C^2$ -V grafiği.....	49
Şekil 42. a) 260 nm b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60 °C Isıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin kaplama öncesine ve sonrasına ait verim grafikleri.....	57
Şekil 43. a) 260 nm b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60 °C Isıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık $\ln(I)$ -V grafiği	59

GİRİŞ

Dünyada enerjiye duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılayabilmek için var olan enerji kaynaklarına karşılık alternatif yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmektedir. Fosil yakıtların giderek azalması ve kullanımlarına bağlı olarak çevreye sağladığı olumsuz katkılar yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önemli kılmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları temiz, çevreci enerji kaynakları olarak bilinmesi sebebi ile güncel araştırmalarda önemli bir alana sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi önemli potansiyel taşımaktadır. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası'ndan alınan verilere göre; ülkemizde günlük güneş ışığına maruz kalma süresi yaklaşık olarak 7,5 saat iken dünyada bu süre günlük olarak 4.18 kWh/m².gün olarak belirlenmiştir (URL-1). “Yeşil enerji” kaynağı olan güneş enerjisi santrallerinin sayıları dünya üzerinde gün geçtikçe artmaktadır. Güneş enerjisine eğilim ve güneşten elektrik enerjisi üretimi ülkemizde de gözde konulardan olmuştur. Bu bağlamda alternatif enerji kaynakları sınıfına ait olan güneş pilleri üzerine yenilikçi çalışmaların yapılması önem arz etmektedir. Ticari olarak üretilen güneş pilleri ağırlıklı olarak silisyum tabanlıdır. Farklı kristal yapıya sahip silisyum tabanlı güneş pilleri güvenilir olması ve düşük üretim maliyetine sahip olması nedeniyle fotovoltaik endüstrinin gelişiminde küresel olarak önemli bir yere sahiptir (Battaglia vd., 2016).

Günümüzde, küresel ısınma ve çevre kirliliği nedeniyle ozon tabakasında meydana gelen yarılmalar neticesiyle yüksek enerjili parçacıkların, yer kabuğuna daha yoğun bir şekilde ulaştığı yapılan çalışmalarda görülmektedir. Bu durum, canlılar gibi aygıtları da olumsuz yönde etkilemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve özellikle foto aygıt teknolojilerin incelenmesi güncel araştırma konuları içerisinde yer almaktadır.

İdeal şartlar altında fotovoltaik-PV sistemlerin ömürleri sonsuz olarak kabul edilmektedir. Fakat PV sistemlerin ömürlerinin kısalmasında doğal ve sistemsel kaynaklı olumsuzluklar etkili olmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin verimli üretim sürelerinin azalması diğer nedenlerle birlikte güneş ışınları bünyesinde bulunan UV ışınlarından da kaynaklı olmaktadır. Bu kapsamda UV ışınımının güneş pillerine olan etkisi üzerine çalışmaların yapıldığı görülmektedir (Dong vd., 2020; Leijtens vd., 2013; Kempe 2010; Liu vd., 2014; Yeo vd., 2022; Shahid vd., 2022; Şahan vd., 2010;

Başay vd., 2019; Azaza vd., 2017). Yapılan bir bilimsel çalışmada UV ışınlarının fotovoltaiik hücreleri oluşturan yarıiletken malzemelerin yapısal bozulmasına neden oluğu rapor edilmiştir (Başay vd., 2019). Bununla birlikte sıcaklığın etkisi ile güneş pillerinde gerçekleşen olumsuz süreçlerle ilgili yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur (Akbarzadeh ve Wadowski, 1996; Katkar vd., 2011; Hasan vd., 2014; Bigorajski, ve Chwieduk, 2018; Azaza vd., 2017; Kıncay vd., 2007). Bu tez çalışmasının literatürdeki çalışmalardan farkı, Si tabanlı güneş pillerini Türkiye’de dış etkilere (ultraviyole ışınları ve sıcaklık) bozulma sürecinin ayrıntılı olarak incelenmesinin yapılması amaçlanmıştır.

Yapılan bu tez çalışmanın 1. aşamasında 260 nm ($E=4.77$ eV) ve 360 nm ($E=3.44$ eV) dalga boylarına sahip ultraviyole ışınların ve 60 °C ($E=0.0287$ eV) sıcaklığın üç farklı silisyum tabanlı güneş pillerinin fotovoltaiik parametrelerine olan etkisi incelendi. 12 hafta (3 ay) boyunca sıcaklık ve UV ışına maruz bırakılan silisyum tabanlı güneş pillerinin I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerden açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) değerleri I-V ölçümlerinden elde edilirken, verici yoğunluğu (N_d) C-V ölçümlerinden elde edildi. Çalışmanın ikinci aşamasında ise dış etkilere maruz bırakılmış güneş pillerinin yüzeyleri kriyojenik sıcaklıklarda Ag iyonları ile kaplandı ve tüm örneklere plazmonik özellik kazandırıldı. Örneklere gerçekleşen bu yeni durum sayesinde fotovoltaiik parametrelerde artışlar görüldü. Böylece dış etkilere maruz bırakılarak fotovoltaiik parametreleri düşürülmüş güneş pillerinin verimli üretim süresinin arttırıldığı belirlenmiştir. Bu uygulamada elde edilen sonuçlar incelendiğinde çöplüklere terkedilmiş kimyasal içerikli elektronik aygıtların yoğunluğunda bir nebze olsa, azalmalarının sağlanacağı anlaşılmıştır.

1. YARIİLETKENLER

Katılar elektriksel özellikleri bakımından üç farklı başlıkta incelenmektedir. Bunlar; iletken, yarı iletken ve yalıtkanlardır. Bu malzemelerin özdirençleri birbirinden farklıdır. İletkenlerin özdirenci $\rho = 10^{-16}-10^{-4} \Omega.cm$, yarıiletkenlerin $\rho = 10^{-4}-10^{10} \Omega.cm$ ve yalıtkanların özdirenci ise $\rho \geq 10^{-16}-10^{-4} \Omega.cm$ 'dir. İletkenler devrede dolaşan akımı iletme görevini taşırken, yalıtkanlar akımı iletmezler. Yarıiletkenler katıların en önemli sınıfını oluşturan malzemelerdir. Bu malzemeler gelişmekte olan teknolojiye ve elektronik aygıtlarda sıkça tercih edilmektedir. Bu tercihin sebebi ise yarıiletken üzerinde herhangi bir dış uygulama yapılması ile (ısıtma vb.) karakteristik özelliklerinin değiştirilebilir olmasıdır. Yarıiletkenler güneş pili, diyot gibi devre elemanlarında kullanılmaktadır. Yarıiletkenler düşük sıcaklıkta veya karanlık ortamda yalıtkan gibi davranırken sıcaklığın artırılması durumunda ya da üzerine ışık yansıtılması durumunda bir elektrik alana maruz kalırsa iletkene yakın davranış sergilerler (Akat, 2012). Sıcaklığın artması ile metallerde özdirenç artarken, yalıtkanlarda sabit kalıp yarıiletkenlerde ise malzemenin özdirenci azalır. Bu olayın sebebi ise sıcaklığın artması ile yarıiletken malzemelerde daha çok elektronun serbest hale geçmesi ve yük taşıyıcı yoğunluğunun artmasıdır. Buna bağlı olarak da özdirenç azalır. İletken, yarıiletken ve yalıtkanların özdirençleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin özdirençleri gösterimi

	$\rho_{iletken}$	$10^{-6} - 10^{-10} \Omega.cm$
Özdirenç (ρ)	$\rho_{yarı iletken}$	$10^{-4} - 10^{10} \Omega.cm$
	$\rho_{yalıtkan}$	$10^{10} \Omega.cm$

Güneş pilleri, diyotlar, transistörler gibi elektronik aygıt elde edilmesinde kullanılan yarıiletken malzemeler genel olarak doğal bir yapıda bulunmazlar. Bu sebeple yarıiletkenlerin bazı aşamalardan geçirilerek var olan özelliklerinin değiştirilmesi söz konusudur. Örnek olarak yarıiletken sistemler p-n eklem yapısı içerirler. Bu yapıda çoğunluk yük taşıyıcısı olan boşluklar ve elektronlar sırası ile p-tipi yarıiletkenden ve n-tipi yarıiletkenden temin edilip birbirine entegre edilmelidirler.

p-tipi ve n-tipi yarıiletken yapılar belirli katkılandırma işlemi sonucu elde edilirler. Yarıiletkenler mutlak sıfır noktasında $T=0$ K 'de yalıtkan özellik gösterirler. Çünkü bantların tamamen dolu ya da boş olma durumu söz konusudur.

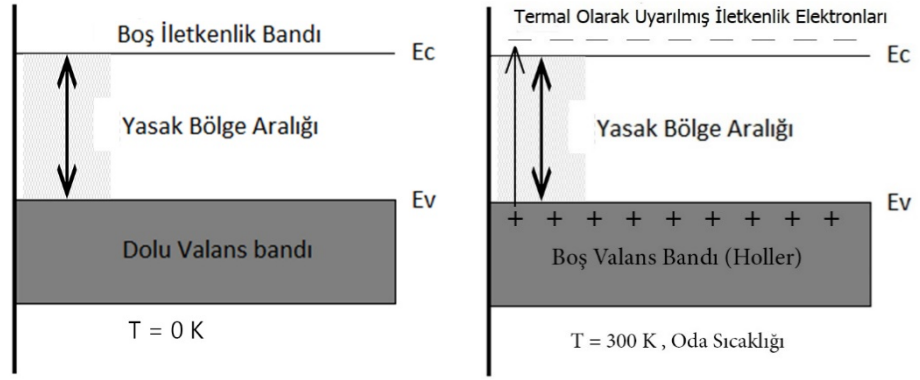
Si ve Ge en çok kullanılan yarıiletken elementlerdir. Yapılarında sp^3 bağları vardır. $T=0$ K'de en yüksek tutulmuş enerji bandı elektronlar ile doludur ve bu bant valans bandı olarak adlandırılır. Mutlak sıcaklıkta boş olan bant ise iletkenlik bandı olarak isimlendirilir. Eğer malzemenin bant aralığı 3 eV'den büyük bir değere sahipse yalıtkan, küçük bir değere sahipse yarıiletken olarak tanımlanmaktadır.

1.1. Yarıiletken Türleri

Yarıiletkenler katkı durumlarına göre saf (katkısız) yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olarak iki sınıfta incelenmektedir. Saf yarıiletken yapılarda valans bandındaki boşluk durum yoğunluğu ile iletkenlik bandındaki elektronların durum yoğunlukları eşittir.

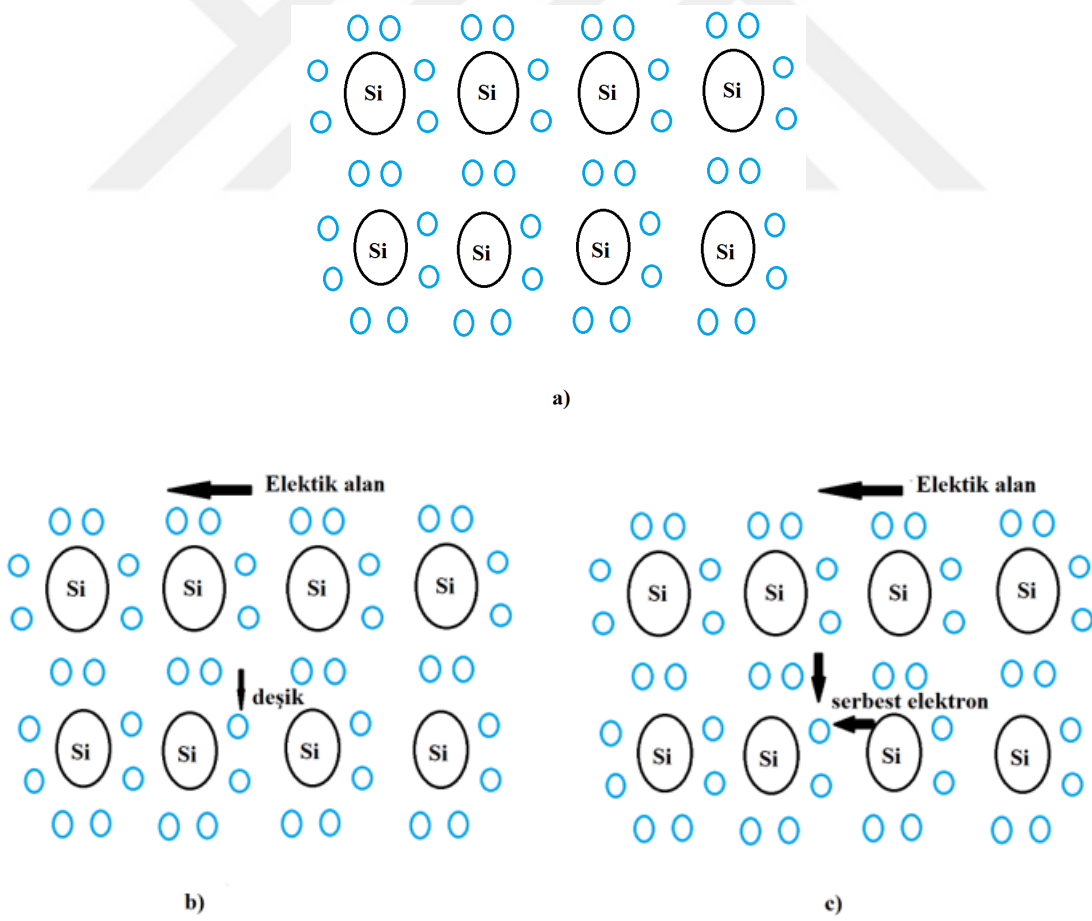
1.1.1. Saf (Katkısız) Yarıiletkenler

Saf yarıiletkenlerde valans bandındaki boşlukların durum yoğunluğu ile iletkenlik bandındaki elektronların durum yoğunluğunun aynı olduğundan bahsetmiştik. Bu durumun sebebi enerji alan valans bandından uyarılıp iletkenlik bandına geçen elektron sayısı kadar geride yani valans bandında boşluk kalmasıdır. Şekil 1 'de mutlak sıfır derecesinde ve oda sıcaklığında enerji bant yapısı görülmektedir. Sıcaklığın artması ile valans bandında bulunan elektronların E_g (yasak bant aralığı) geçebilecek kadar enerji alarak iletkenlik bandına geçebilme ihtimali vardır. Söz konusu elektronlar iletkenliğe katkıda bulunmuş olur. Yani sıcaklık arttıkça malzemedeki iletkenlik de artmış olur (Aydoğan, 2011). Bir elektrik alan etkisinde yapı içerisinde eksik kalan elektronun konumunun, tamamlanamayan bağı oluşturmak için geride kalan diğer değerlik elektronların yer değiştirmesi ile tamamlandığı düşünülebilir. Bu durum valans bandından eksilen elektronun boşluk (hole) gibi davranış sergilemesi ile hız kazanır. Boşluklar elektronların aksine eksi yüklü olarak kabul edilir.



Şekil 1. Yarıiletkenin sıfır Kelvin ve oda sıcaklığında valans ve iletkenlik bantları

Katkısız yarıiletkenlerde serbest elektron boşluk çifti oluşumu Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. a) Katkısız yarıiletkenlerde elektron bağlanma modeli b) ve c) uyarılma sonrası

Saf yarıiletkenlerde n_i elektron yoğunluğunu p_i boşluk yoğunluğunu gösterir. Bahsedildiği gibi $n_i = p_i$ dir. Ayrıca saf yarıiletkenlerde fermi enerji seviyesi saf (katkısız) fermi enerji seviyesi şeklinde isimlendirilmektedir. $E_f = E_{fi}$ şeklinde ifade edilir. Denklem bir yarı 1 ve 2 'de n_i ve p_i yoğunluğu formülleri verilmiştir.

$$n_i = N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_{fi})}{kT} \right] \quad (1)$$

$$p_i = n_i = N_v \exp \left[\frac{-(E_{fi} - E_v)}{kT} \right] \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2) den faydalanılarak,

$$n^2 = N_v N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_{fi})}{kT} \right] \exp \left[\frac{-(E_{fi} - E_v)}{kT} \right] \quad (3)$$

Veya

$$n^2 = N_c N_v \exp \left[\frac{-(E_c - E_v)}{kT} \right] = N_c N_v \exp \left[\frac{-(E_g)}{kT} \right] \quad (4)$$

Denklemlerde T sıcaklığı, k Boltzman sabitini, N_c iletim bandındaki durum yoğunluğunu N_v ise valans bandındaki durum yoğunluğunu ifade eder.

Saf yarıiletkenlerde bulunan boşluk ve elektron sayılarını belirlemek için kullanılan kavram Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu denir. Bant yapılarında bulunan elektron ve boşluklar ise hal yoğunluğu fonksiyonu ile bulunur. İletkenlik bandının taban durumu ile valans bandının en üst kısmında bulunan elektron ve boşluklar k' dalga vektörüne bağlı olarak parabolik bir özellik gösterirler. Bu bölgede bulunan elektron ve boşlukların özellikleri etkin kütle davranışına sahip serbest parçacık davranışı gibidir (Aydoğan, 2011). Elektron ve boşlukların serbest parçacık özellikleri dışında davranışta bulunup uyarılma ihtimalleri çok düşüktür. Bu sebeple serbest parçacıklar için hal yoğunluğu fonksiyonları tercih edilir.

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu;

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_f)/kT}} \quad (5)$$

Valans bandındaki hal yoğunluğu;

$$N_v(E) dE = \frac{8\sqrt{2}\pi m_p^{*3/2}}{h^3} \sqrt{E_v - E} dE \quad (E < E_v) \quad (6)$$

İletkenlik bandındaki durum yoğunluğu;

$$N_c(E) dE = \frac{8\sqrt{2}\pi m_n^{*3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} dE \quad (E > E_c) \quad (7)$$

şeklinde gösterilmektedir.

m_n^* iletkenlik bandında bulunan elektronlar için, m_p^* valans bandında bulunan boşluklar için etkin kütleleri temsil etmektedir.

Elektron ve hollerin etkin kütleleri aynı ise fermi enerji seviyesinin gösterimi

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (8)$$

Saf yarıiletken yapılarda fermi seviyesi yasak enerji bant aralığının orta kısmında yer alır (Kittel, 1996).

Fermi enerji seviyesi;

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right) \quad (9)$$

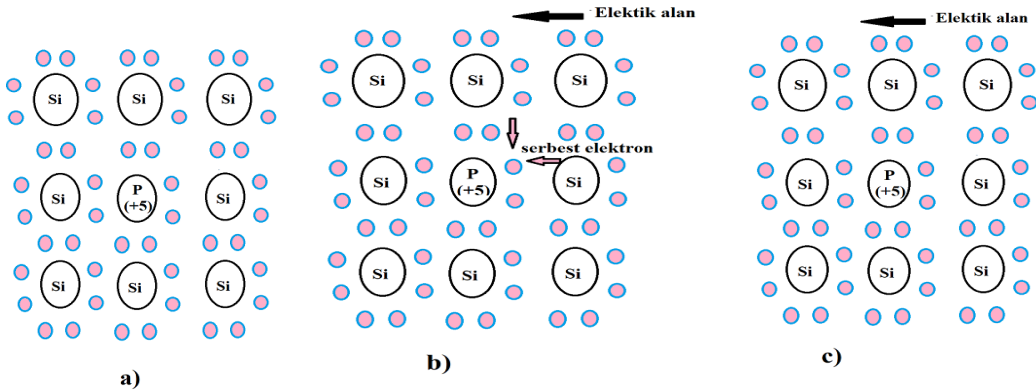
olarak gösterilmiştir.

1.1.2. Katkılı Yarıiletkenler

Bütün ticari yarıiletken malzemeler katkılanmışdır. Yani yapılarında yabancı atom barındırırlar. Bu yabancı atomlar safsızlık atomları olarak adlandırılırlar. Yarıiletken yapılar üzerinde çeşitli katkılanma teknikleri uygulanarak katkılandırılması ile, katkılı yarıiletkenler elde edilir. Katkılanma yapılması ile yarıiletken elektriksel özellikleri farklılık gösterir. Bu farka göre n-tipi ve p-tipi yarıiletken malzemeler elde edilmiş olur (Kittel, 1996; Küpeli, 2005).

1.1.2.1. n-tipi yarıiletkenler

n-tipi yarıiletken oluşturmak için katkılama işlemi donör atomlarıyla yani verici atomlarla katkılama yapılır. Örnek olarak silisyum yarıiletkeni düşünelim. Son yörüngesinde 4 elektron bulunduran silisyum atomu komşu atomlarla kovalent bağ kurar. Periyodik cetvelin V A grup elementlerinden olan P, As, Sb gibi elementler ise son yörüngelerinde 5 değerlik elektron bulundururlar. Saf silisyum atomuna VA grubu elementlerinden herhangi birinin eklenmesi ile 4 elektron komşu elektronlar ile kovalent bağ kurar. 1 elektron açıkta kalır. Şekil 3’de görüldüğü gibi açıkta kalan serbest elektron kristal yapı içerisinde dolanır. Bu elektron elektriksel iletkenliği artırır.



Şekil 3. a) n-tipi elektriksel iletkenliğe sahip yarıiletken kristal yapı modeli b) ve c) uyarılma sonrası

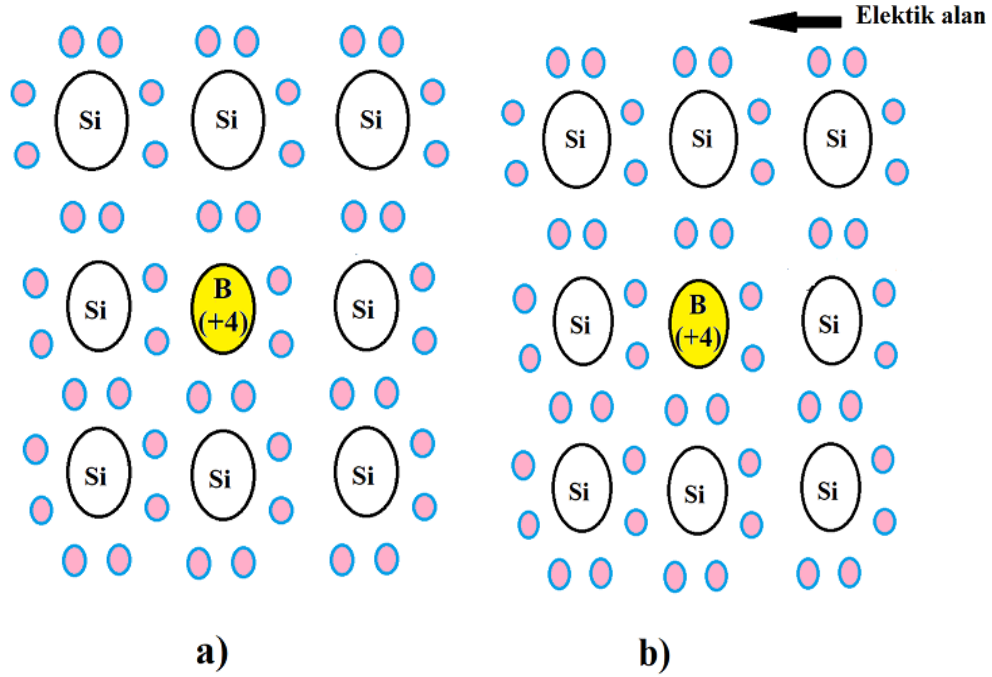
Fosfor atomunun dış yörüngesinde elektron fazlalığı mevcuttur. Si kristal yapısı bu elementle katkılandırıldığında dış etki ile var olan elektron fazlalığı kristal yapının düğüm noktalarında ve boşluklarda hareket ederek yapıya n tipi özellik kazandırır. Bu durum kristal yapının yasak bant aralığında donör seviyesi(verici) oluşturur ve E_d olarak tanımlanır. (Küpeli, 2005). bantOluşan bu seviye iletkenlik bandının birkaç meV altında yer alır ve bahsedildiği gibi çok düşük sıcaklıklarda bile kristale verilebilecek elektronları sağlar.



Şekil 4. n tipi yarıiletkene ait donör enerji seviyesi

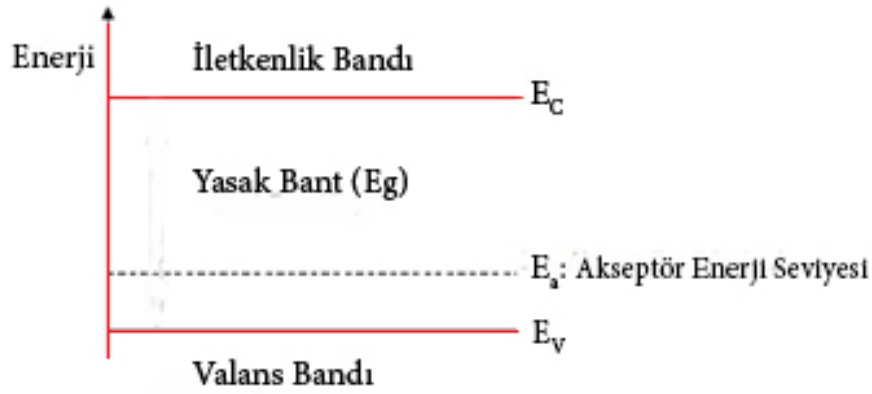
1.1.2.2. p-tipi yarıiletkenler

p-tipi yarıiletken oluşturmak için katkılama işlemi akseptör özellikli (alıcı) atomlarla yapılır. Silisyum elementine periyodik cetvelin III A grubu elementlerinden (Al, B, Ga) birinin katılanması ile elde edilen yarıiletkene p-tipi yarıiletken denir. Son yörüngesinde 4 elektron bulunduran Si atomu son yörüngesinde 3 elektron bulunduran III A grubu elementi ile kovalent bağ kurar. Yapı içerisinde silisyumun eşleşemeyen bir elektronu kalır. Bu durum elektron eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Buna da boşluk ya da hole denir. Boşluklar pozitif yüklü olarak kabul edilir. III A grubu elementinde bulunan boşluk komşu bağdan bir elektron transfer edilmesi ile serbest hale geçebilir.



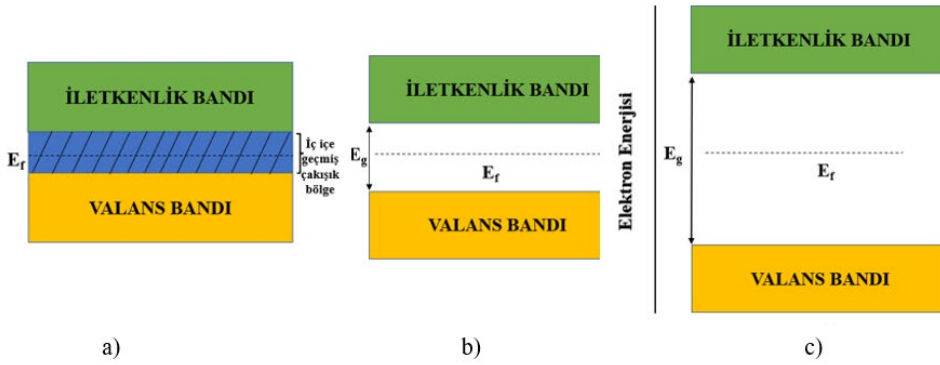
Şekil 5. p-tipi katkılı yarıiletken a) Üç değerlik elektrona sahip bor ile katkılama b) Elektrik alan içerisinde boşluğun hareketi

Bor atomlarının katkılandırma işlemi ile yapı içerisinde yasak enerji bant aralığında bir enerji seviyesi oluşur ve E_a olarak adlandırılır. Oluşan bu seviye değerlik bandının birkaç meV üzerindedir. Oda sıcaklığında valans bandının üst noktasında yer alan elektronların sahip olduğu belirli bir enerji vardır. Yani valans bandında bulunan elektronlar katkı elektronlarınca yakalanabilir. Böylelikle valans bandında boşluk oluşmuş olur. Valans bandından E_a enerji seviyesine geçen elektron geride bir boşluk bırakırken iletkenlik bandında elektron sayısının arttığı söylenemez. Bu şekilde p-tipi yarıiletken yapıda çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklar (hole) iken azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır. Boşlukların iletkenliğe katkıları ise elektronlara göre çok daha verimlidir (Kittel, 1996; Küpeli, 2005).



Şekil 6. p tipi yarıiletkenlerde akseptör özellikli enerji seviyesi

1.2. Yarıiletkenlerin Bant Yapıları



Şekil 7. a) metal b) yarıiletken ve c) yalıtkan malzemenin enerji bant diyagramı ve 0 K sıcaklığında fermi seviyeleri

Yarıiletken malzemeler elektronik teknolojilerde elektrik devrelerinde materyal üretiminde kullanılmaktadırlar. Yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda veya ışıksız ortamlarda yalıtkan özelliği gösterirler. Fakat sıcaklığın arttığı, elektrik alana maruz kaldığı ve üzerine belirlenmiş bir frekans değerinde ışık düşmesi sonucunda iletkenlere yakın özellik gösterirler (Akat, 2012). Yarıiletkenlerde iletken malzemelerden farklı olarak iletim bandı ile valans bandı arasında boşluk, yani yasak enerji aralığı bulunur (Omar, 1975). Yarıiletken malzemelerin yasak bant aralığı 0,1 eV ile 5 eV aralığında yer alır (Yazıcı, 2007). Valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçmesi için aradaki eşik enerjisi kadar ve daha büyük enerjilere ihtiyacı

vardır (Shur, 2005). Oda sıcaklığında ısı uyarılım sonrasında elektronlar valans bandından iletim bandına geçer ve böylelikle iletim sağlanmış olur (Omar, 1975).

İletken malzemeler için enerji bant diyagramları şu şekilde açıklanır; kolayca hareket eden valans bandındaki elektronların dışarıdan uygulanan bir etki ile; herhangi bir potansiyel fark etkisi ile, iletim bandına geçişi malzemede iletkenliği oluşturmaktadır. Bu özelliği taşıyan malzemeler iletken malzemelerdir (URL-2). Ayrıca iletken malzemelerde valans bandı ve iletim bandı arasında boşluk yoktur, üst üste binmiş çakışık durumdadırlar. Yani iletkenlerde yasak bant aralığı E_g yoktur (Omar, 1975). Bu sebeple serbest hale gelen elektronlar herhangi bir eşik enerjisine ihtiyaç duymadan bir üst banda geçer ve iletkenlik sağlanmış olur.

Yalıtkan malzemeler elektrik akımını iletmezler. Çünkü akımı iletecek olan serbest elektronları yoktur, bütün elektronların komşu atomlar ile kuvvetli bağı vardır. Yalıtkanların yasak bant aralığı $E_g > 5$ eV'tur (URL-3). Yalıtkanlarda valans bandı tamamen doluyken iletim bandı tamamen boştur. Yalıtkan maddelerde yasak enerji aralığı E_g geniştir ve bu sebeple herhangi bir sıcaklık etkisiyle bile elektronların valans bandından iletim bandına geçişi söz konusu değildir. Dolu olan elektronlar valans bandında kalır. Bir elektron hareketliliği olmadığı için de yalıtkanlar elektriği iletmezler (Omar, 1975).

İletim bandının enerjisi aşağıdaki gibidir.

$$E_c(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (10)$$

burada m_e^* elektronun etkin kütlesi ve k dalga vektörüdür. E_g enerjisi, enerji boşluğunu temsil etmektedir. Değerlik bandının enerjisi,

$$E_v(k) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (11)$$

Şeklinde yazılır. Burada m_h^* boşluğun etkin kütlesi değeridir.

1.2.1. Yarıiletken Yapılarda Elektriksel İletkenlik

Taşıyıcıların manyetik ve elektrik alanlardaki devinimini açıklayabilmek sebebi ile elektronlar için,

$$m_e \left(\frac{d\vec{v}_e}{dt} + \frac{\vec{v}_e}{\tau_e} \right) = -e\vec{E} - e\vec{v}_e \times \vec{B} \quad (12)$$

İfadesi kullanılırken, boşluklar için

$$m_h \left(\frac{d\vec{v}_h}{dt} + \frac{\vec{v}_h}{\tau_h} \right) = +e\vec{E} + e\vec{v}_h \times \vec{B} \quad (13)$$

Şeklinde bir ifade yazılır.

Doğru akım esnasında elektrik alanı bulunduğunda denklem (12) ve (13)'nin çözümlenmesi

$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e}\vec{E} = -\mu_e\vec{E} \quad (14)$$

$$\vec{v}_h = -\frac{e\tau_h}{m_h}\vec{E} = -\mu_h\vec{E} \quad (15)$$

şeklinde olur. Burada bulunan \vec{v}_e ve \vec{v}_h sırası ile elektron ve boşlukların sürüklenme hızlarıdır. Elektron ve boşluk hareketliliği ise,

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e} \quad \text{ve} \quad \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \quad (16)$$

ile gösterilmektedir.

Elektron ve boşluk yüklerinin toplanması ile oluşturmuş olduğu elektrik akım yoğunluğu,

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + pe\vec{v}_h = \left(\frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h} \right) \vec{E} \quad (17)$$

$$\vec{j} = (ne\mu_e + pe\mu_h)\vec{E} = \sigma\vec{E} \quad (18)$$

şeklinde gösterilir. σ elektriksel iletkenliği değeri,

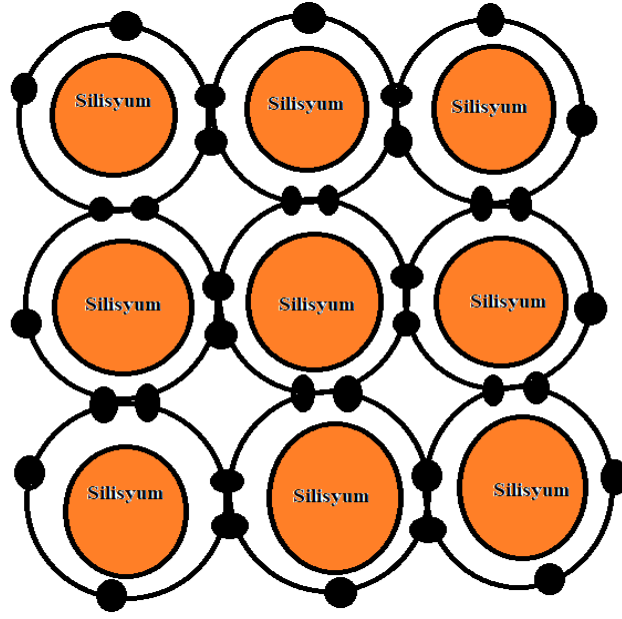
$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \quad (19)$$

ile gösterilen Ohm yasasıdır. Elektron ve boşluk hareketlilikleri genellikle karşılaştırılabilir oldukları için bağıl taşıyıcıların yoğunlukları elektronların ve boşlukların iletkenliğe yaptıkları bağıl katkıları belirlerler. Özden yarıiletkenlerde elektron ve boşluk katkısı genellikle birbirine yakın olup, katkılı yarıiletken olan sıcaklık bölgesinde ise çoğunluk taşıyıcıları yaygındır (Öncel, 2014).

1.3. Silisyum Atomu ve Özellikleri

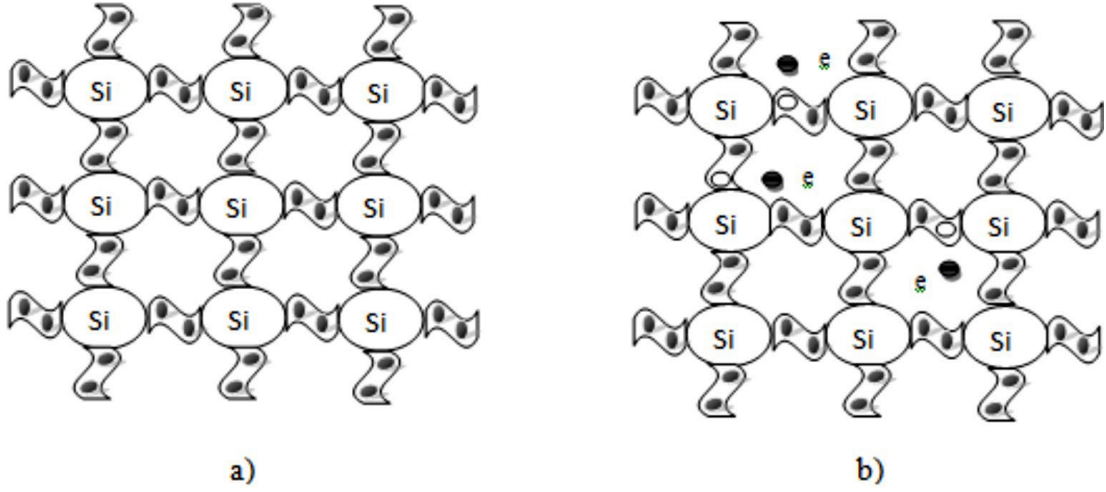
Silisyum doğada çok yaygın bulunan bir elementtir. Yerkabuğunun % 26'sını oluşturur ametal grubuna aittir. Periyodik cetvelin IV. grubunda bulunur. Silisyum atomunun 14 elektronu vardır. Elektron dağılımı ise Si₁₄: 1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p² şeklindedir. Çekirdekten uzakta bulunan elektronlar, çekirdeğe yakın olan elektronlara göre daha fazla enerjiye sahiptirler. En dış enerji düzeyinde çekirdeğin etrafında dönen 4 valans elektronuna sahiptir. Bu valans elektronları komşu atomlarla etkileşime girerler. Her silisyum atomu değerlik 4 elektronunun her birini 4 komşu atom ile paylaşır. Böylelikle kovalent bağ kurulur. Sadece valans elektronlar komşu atomlarla

paylaşılabilir. Bu durum değerlik elektronların fotovoltaik etki oluşumunda önemli bir etkiye sahip olmasına sebep olur. Çok sayıdaki silisyum atomu, kristal yapı oluşturabilmek için valans elektronları sayesinde birbirlerine bağlanırlar. Şekil 8’de silisyumun bağ yapısı gösterilmiştir. Silisyum kristal yapı 5 silisyum atomunun bir araya gelmesi ile oluşur. Bu yapının tekrarlanması ile silisyum kafesi meydana gelir. Silisyum bu durumların gerçekleşmesi ile elektrik üretebilir. İşte bu ilkeye bağlı olarak çalışan güneş hücrelerine ise kristal silisyum hücreler denir (Öztürk vd., 2013). Silisyumun bazı özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Silisyum bağ yapısı

Mutlak sıfır noktasında kovalent bağlarda elektronlar tam doludur. Isı etkisi ile kovalent bağlarda kopmalar olabilmektedir. Kopan bağ ile birlikte elektron serbest kalmakta ve boşalan elektronun yerinde boşluklar oluşabilmektedir. Böylelikle ısı etkisi ile elektron boşluk çiftleri meydana gelebilir. Bu durum Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. a) T=0 'da silisyum bağları b) T > 0 silisyum bağları

Kaynak: Sze vd., 2007

Tablo 2. Silisyumun bazı özellikleri

Örgü parametresi (nm)	0,543
Yoğunluk (g/cm ³)	2,33
Yasak bant aralığı, 300 K (eV)	1,1
Ergime noktası (°C)	1420
Dielektrik katsayısı	12
Elektronların mobilitesi, 300 K (cm ² /V.s)	1350
Kırılma indisi	3,9
Özden yük taşıyıcıların konsantrasyonu, 300 K (cm ⁻³)	1,5x10 ¹⁰
Deliklerin mobilitesi, 300 K (cm ² /V.s)	480

Kaynak: Caferov,1998

2. GÜNEŞ PİLLERİ

PV tarihi fizikçi Alexandre-Edmund Becquerel'in elektrik akımının kimyasal tepkimelerin indüklediği ışıklardan oluştuğunu farketmesi ile ortaya çıkmıştır. 1940'lı yılların sonlarında ilk defa silisyum güneş hücresinin geliştirilip % 6 verimle endüstride kullanılması ile devam etmiştir. İlk silisyum güneş ünitesi tasarımı, PV sistemin pratik eklemelerle güç dönüşüm ünitesi olarak kullanılması ile gerçekleşmiştir (Öztürk vd., 2013). PV teknolojisinin tarihsel gelişimi Tablo 3'te verilmiştir. İlk Si hücresi modüler tasarım olarak geliştirilmiştir. Günümüzde ise güneş hücreleri endüstriyel tasarımla üretilmektedir.

Tablo 3. PV teknolojisi tarihsel gelişimi

Tarihsel gelişme	Yıl
Becquerel tarafından fotovoltaj etkinin keşfedilmesi	1839
Adams ve Day tarafından selenyumda fotovoltaj etkinin bildirilmesi	1876
Mott ve Schottky tarafından katı durum teorisinin geliştirilmesi	1940
Charpin, Puller ve Pearson Si hücre veriminin (%6) belirlenmesi	1954
Reynolds ve arkadaşları tarafından kadmiyum sülfid hücresi tasarımı	1954
Vanguard 1 isimli yörüngeli uyduda hücrelerin ilk kez kullanımı	1958

Kaynak: Öztürk, 2013

PV teknolojisinin geliştirilmek istenmesinin amacı, az maliyetle en çok güç elde edilmeye çalışılmasıdır. Güneş hücresi içerisinde gerilim ve akımın istenilen seviyede tutulabilmesi için hücreler seri ya da paralel olarak bağlanır. Bu yapı PV panelin ana yarıiletken yapısını oluşturur. Bir güneş hücresi modülü Şekil 10'da gösterilmiştir. Eğer güneş hücresinin soğurma özelliği geliştirilirse kazanılacak güç miktarı da artmış olur.



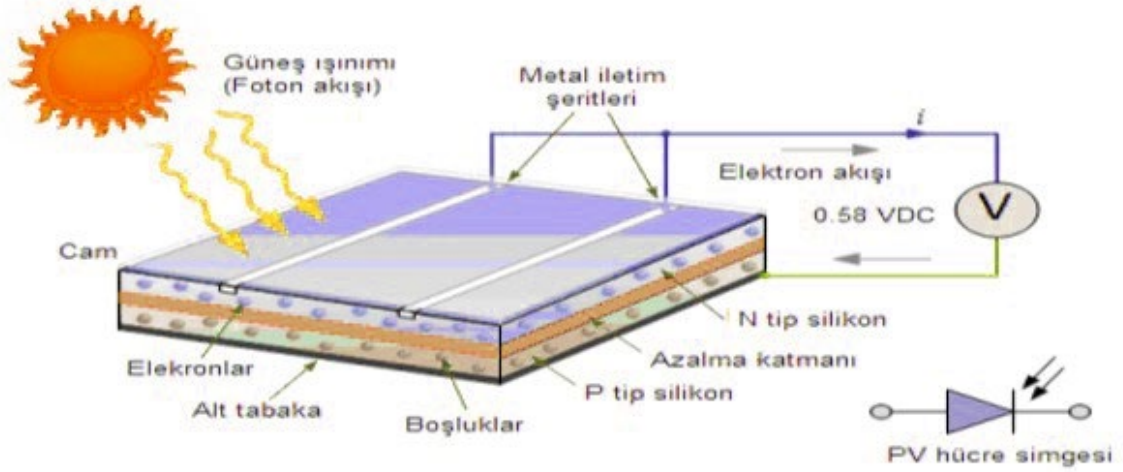
Şekil 10. Güneş Hücre Modülü

Güneş hücreleri üzerine düşen ışığı doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen aygıtlardır. Güneş hücreleri fotovoltaiik ilkeye bağılı olarak çalışırlar. Yani üzerlerine ışık düşmesi ile uçlar arasında elektriksel bir potansiyel oluşur. Fotovoltaiik etki güneş ışınımının elektrik enerjisine dönüştürülmesine verilen addır. PV hücre için en kullanışlı yarıiletken malzemeler; silisyum, kadmiyum tellür galyum arsenit gibi malzemelerdir. Silisyum gibi yarıiletken malzeme üzerine çarpan güneş ışınımındaki fotonlar, atomlardaki elektronları serbest hale getirir. Güneşten gelen ışık enerjili fotonların birleşimi ile oluşur. Fotonlar ışınım spektrumundaki dalga boylarına bağılı olarak farklı enerjilere sahiptirler. Fotovoltaiik hücre üzerine düşen fotonların bir kısmı hücre tarafından soğurular, bir kısmı yansıtılırken bir kısmı da hücrenin içerisinden geçmektedir. Elektrik üretiminde görevli olan fotonlar PV hücre tarafından soğurulanlardır. Soğurulan fotonun sahip olduğı enerji yarıiletkenin atomundaki elektrona geçer. Elektron elde etmiş olduğı bu enerji ile elektrik devresinde akımın bir parçası olabilmek için yarıiletkendeki atomun normal durumundan kurtulma özelliğı kazanır.

2.1. Güneş Hücresi Yapısı

Güneş hücresi ışık yansımalarını minimum değerde tutabilmek için yansıma önleyici (ARC) bir tabaka ile kaplıdır. Hücrenin en üstündeki yarıiletken tabaka ya da n-tipi katman az miktarda fosfor atomları ile katkılanmıştır. En alttaki yarıiletken tabaka yani p-tipi tabaka ise çok az bor atomları katkılanmıştır. p ve n-tipi tabakalar birbirine yakın konumda bulduklarında boşluklar ve elektronlar birbirinin dikkatini çeker. Boşluklar pozitif yüklü elektronlar ise negatif yüklüdür. Negatif ve pozitif

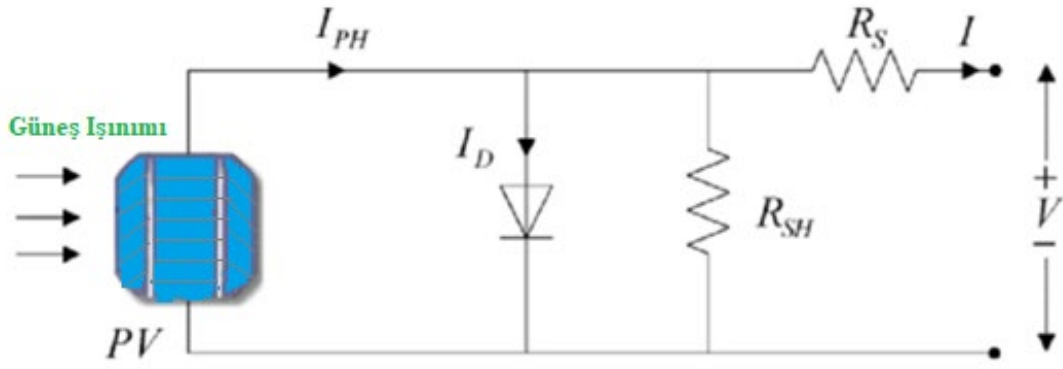
yüklerin hareketlenmesi ile p-n eklem karşısında kuvvetli bir elektrik alan oluşur. n-tipi ve p-tipi silisyum yapılar temas ettiğinde iki yarıiletkenin p-n bağlantı noktası olarak isimlendirilen yerde buluşarak, potansiyel fark oluşturmak için batarya gibi görev yaparlar.



Şekil 11. Fotovoltaik hücre çalışma prensibi

Yani n-tipi veya p-tipi malzeme üzerine güneş ışığı düşmesi ile fotonların enerjisi yasak bant aralığından daha büyükse eşit sayıda elektron-boşluk çifti oluştururlar. Işık yoğunluğu arttığında yarıiletken içerisinde çoğunluk taşıyıcıları çok fazla değişmezken azınlık taşıyıcılarında artış görülür (Navruz, 2008). p-n eklem bölgesindeki elektrik alan sebebiyle p-tipi yarıiletkenin üzerine ışık düşmesi ile azınlık taşıyıcısı olan elektronlar n-tipi bölgeye doğru çekilirler. Aynı mantıkla n-tipi bölgede elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile valans bandında kalan azınlık taşıyıcısı olan boşluklar p- tipi bölgesine geçerler. Yani fotonların yüzeye düşmesi ile elektronlar bir tarafa itilirken boşluklar bir tarafa itilir.

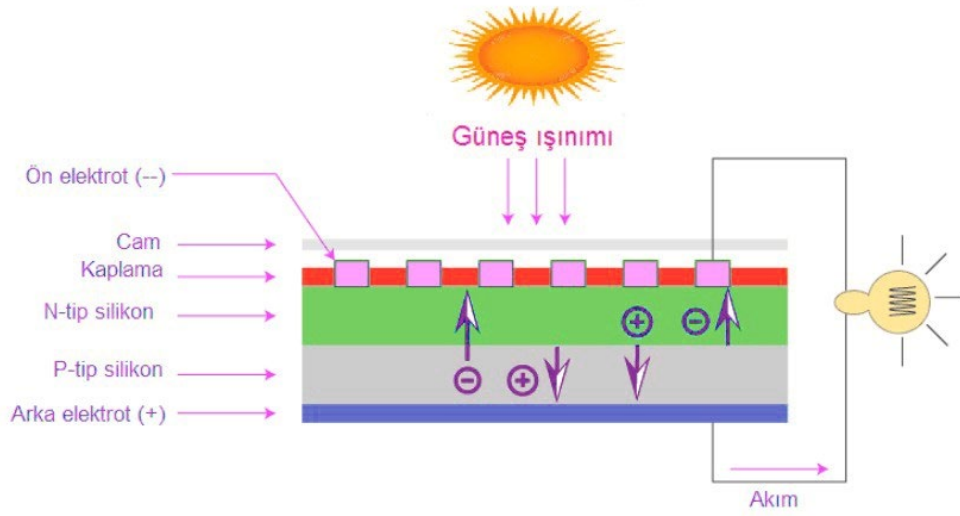
Bu yöntem ile birbirinden ayrılan elektron ve boşluklar Şekil 12 'deki gibi dış devre üzerinden birleştirilebilmektedir. Böylelikle elektrik akımı oluşur.



Şekil 12. Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi

Özetle n-tipi ve p-tipi geçiş bölgesinde bir elektrik alan oluşur. Yarıiletken eklem yapının PV hücre modeli gibi işlev görebilmesi için fotovoltaik dönüşüm sağlanmalıdır. İlk olarak eklem bölgesine ışık düşmesi ile elektron boşluk çiftleri oluşur. Bu bölgede bulunan elektrik alan sayesinde birbirlerinden ayrılırlar. Fotonlar sayesinde hücreden koparılan elektronlar eklem bölgesi içerisinde harekete geçer ve böylelikle elektrik akımı oluşur.

Güneş hücresi modülünün en üst tarafı cam ya da plastik malzemeden oluşur. Bu yapının amacı korumayı sağlamaktır. Kontak yapısı yarıiletkende üretilmiş olan elektronları toplar. Yansıma önleyici kaplama, adından da anlaşılacağı üzere hücreye yansıtılan güneş ışınımını önlemek amacı ile kullanılmaktadır. n-tipi yarıiletken, elektrik akımı için elektron sağlar. İletim katkılama işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Bu bölgede katkılama saf silisyum tabakaya fosfor atomlarının katılması ile olur. Böylelikle fazlaca elektronlar oluşturulur. p-tipi yarıiletken ise pozitif yükler üretir. Yine burada da iletim için katkılama işlemi yapılmaktadır. Arka kontak yapısı ise metaldir. Fotovoltaik hücrenin alt tarafını korur. Güneş hücresi bileşenleri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Güneş hücresi bileşenleri

2.2. Güneş Pili Çeşitleri

Güneş pili tarihsel gelişiminden günümüze kadar pek çok çeşit güneş pili üretilmiştir. Genel olarak güneş pilleri birinci nesil güneş pilleri ve ikinci nesil güneş pilleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.2.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri

Tekli ve çoklu kristal silisyum güneş pilleri bu gruba aittir. Birinci nesil güneş pillerinde Si elementi kullanılmıştır. Sebebi ise silisyumun doğada kolay bulunması ve verimlerinin yüksek olmasıdır. Ayrıca silisyumun elektriksel, yapısal ve optiksel özelliklerini uzun zaman muhafaza edebilmesi tercih nedeni olmuştur.

2.2.1.1. Tek Kristal (Monokristal) Silisyum Güneş Pilleri

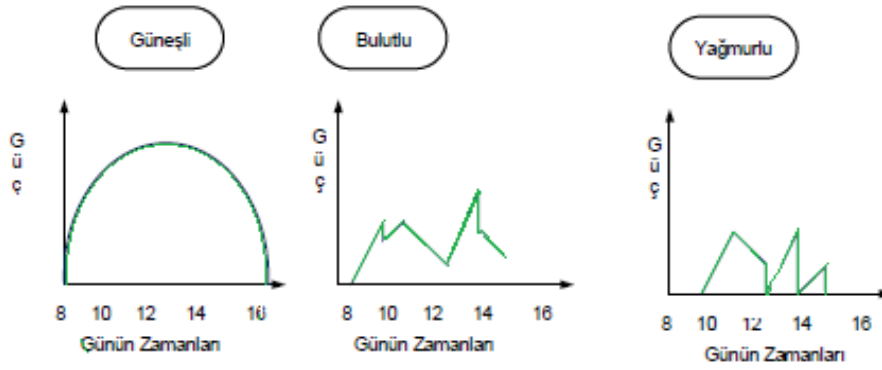
Güneş paneli yapımında sıkça tercih edilmektedir. Fakat maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple çok kristal silisyum güneş pilleri daha çok kullanılmaktadır. Tek kristal güneş pilleri güneş ışınımını DC elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Genellikle boyutları 100x100 mm, 125x125 mm ya da 156x156 mm değerlerindedir. Verimleri % 15 ile 18 arasında değişmektedir. Laboratuvar koşullarında ise % 20'lik verimler elde edilmiştir. Maddi amorti süresi 4-6 yıl arasındadır. Üretiminde saf kristal gerektirdiği için maliyetlidir. Üretimi esnasında malzeme kaybının çok olması dezavantajıdır. (Karamanav, 2007).



Şekil 14. Tek kristal silisyum güneş pili

Kaynak: Kıncay vd., 2007

Tek kristal güneş pillerinin hava şartlarına göre verimlilikleri Şekil 15’de verilmiştir.



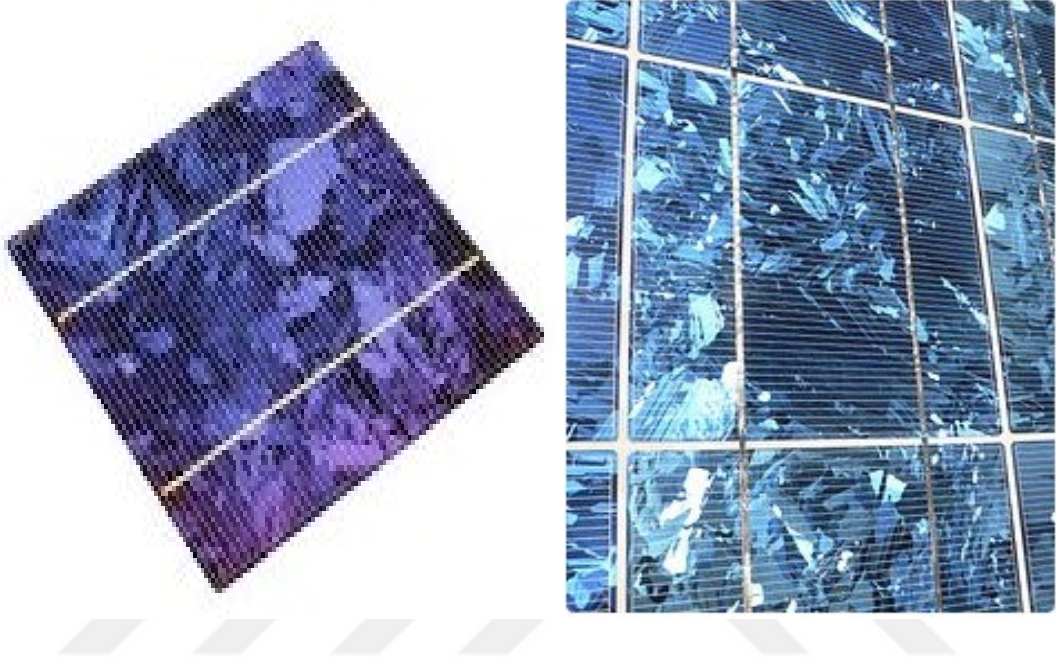
Şekil 15. Hava şartlarına göre verimleri

Kaynak: Ardağ, 2012

2.2.1.2. Çok Kristal (Polikristal) Silisyum Güneş Pilleri

Çok kristal silisyum güneş pilleri PV teknolojisinde daha çok yer almaktadır. Bunun sebebi ise polikristal güneş pillerinin kolayca üretilebilmesidir (Ardağ, 2012). Üretim maliyetleri oldukça düşüktür. Bu güneş pili üretiminde tercih edilen yöntem

dökme yöntemidir. Bu yöntemle elde edilen tek kristal güneş pillerinin verimlilikleri düşük olmasına rağmen maliyetler önemli ölçüde düşüktür. Şekil 16'da çok kristal silisyum güneş pilleri gösterilmiştir.



Şekil 16. Polikristal silisyum güneş pilleri

2.2.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri

Amorf silisyum, ince film silisyum güneş pilleri, kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum, galyum arsenik (GaAs) ve selenyum güneş pilleri ikinci nesil güneş pilleri sınıfına girmektedir. İkinci nesil güneş pilleri; amorf silisyum güneş pili, ince film silisyum güneş pili kadmiyum tellür silisyum güneş pili, bakır indiyum güneş pili, galyum arsenik güneş pili, selenyum güneş pili şeklinde sıralanabilir. Yapılan bu tez çalışması silisyum tabanlı güneş pili üzerine yapıldığı için ikinci nesil güneş pillerinden silisyum tabanlı olanlar hakkında bilgi verilmiştir.

2.2.2.1. Amorf Silisyum Güneş Pili

Amorf silisyumun kristal silisyumdan farkı yapı içerisindeki silisyum atomlarının rastgele olmasıdır. Rasgele dizilen bu atomlar amorf-silisyumun elektrik iletkenlik kalitesini azaltsa da belirli miktar hidrojen katkılanması ile, elektriksel

özellikler PV çevrime uyumlu düzeye getirilebilir. Bu yapı için kullanılan en genel teknoloji ışık boşalım teknolojisidir. Bu teknoloji ile SiH_4 gazı ve hidrojen karışımı elektrod arasından geçirilir ve elektrotların işaretleri frekans yükseldikçe değiştirilir. Böylelikle SiH_4 fazı parçalanarak SiH_3 yapısını oluşturur. SiH_3 kararlı hale geçebilmek için elektrotlardan birine gider ve bağlanır ve hidrojen yüzeyinden ayrılır, geriye silisyum kalır. Yani yüzeyi silisyum ile kaplanmış olur (URL-4). Elektrot yüzeyindeki silisyum gazına bor ya da fosfor katkılanması ile n-tipi ya da p-tipi haline getirilebilir. Geçmiş yıllarda yapılan laboratuvar ortamındaki çalışmalarda amorf silisyum güneş pillerinin verimleri % 15'e kadar çıkmıştır. Güneş altında verimliliklerinin hızlı bir şekilde düşmesi geniş kapasiteli güç üretiminde tercih edilmemesine neden olmuştur. Fakat gerekli ışık yansıtma yöntemleri ile bu güneş pillerinden yüksek verimler elde edilebilir. Bu yüksek verim için ayrıca güneş pillerinin ince olması gerekmektedir.

2.2.2.2. İnce Film Silisyum Güneş Pilleri

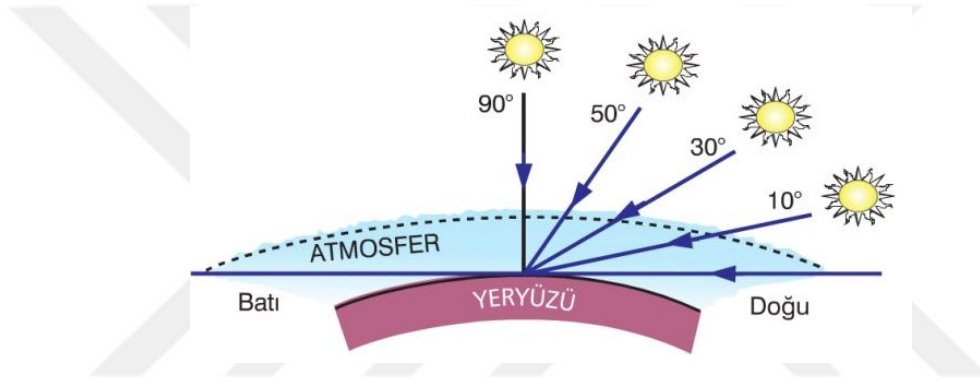
İnce filmler birkaç nanometre ile mikrometre arasında değere sahip olan yapılardır. Bütün malzemelerdeki gibi filmin yapısı, hazırlanma koşulları ve yapıya bağlı olarak amorf ve polikristal olmak üzere iki grupta incelenir. Kaliteli ince film güneş pili üretmek için fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki biriktirme yöntemi kullanılır. İnce film güneş pili örnekleri Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. İnce film güneş pili örnekleri

3. GÜNEŞ PİLİ VERİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Güneş pili enerji verimliliğini aydınlanma şiddeti, nem, toz, sıcaklık, UV ışınlar, güneşlenme süresi, foto açısal etken gibi pek çok faktör etkilemektedir. Bu tez çalışmasında güneş pilleri üzerinde sıcaklık ve UV ışık etkisi üzerinde durulmuştur. Bilindiği üzere güneş ışınları yer kabuğuna zamana bağlı olarak farklı açılarda düşmektedir. Düşme açısı büyüdükçe yer kabuğu daha fazla ısınmaktadır. Şekil 18’de görüldüğü üzere güneş ışınları saat 11.00-13.00 arası yere dik olarak (90°) gelmekte ve bu da AM1,5 (100 mW/cm^2) açısına denk gelmektedir.



Şekil 18. Güneş ışınlarının yer yüzüne farklı açılarda gelişinin şematik görüntüsü

3.1. Güneş Pillerine Sıcaklık Etkisi

Fotovoltaik sistemler, güneş ışınımından kaynaklı sıcaklık değişimine bağlı olarak etkilenirler. Bu etkilenme ile güneş hücresinin enerji verimliliği de değişkenlik göstermektedir. Güneş pilleri çalışma sıcaklığı kullanım alanlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu sebeple sıcaklığın verime etkisi iyi bir şekilde bilinmelidir.

Bir güneş pili sıcaklığa maruz bırakıldığında güneş pili yüzeyinde bazı bozulmalar olur. Bu bozulmalara bağlı pil verimliliği gün geçtikçe düşer ve PV sistem işlevini göremez hale gelir. Sıcaklığın güneş pili içerisindeki yarıiletkenlerde akım geçişi hususunda direkt etkisi bulunmaktadır. Sıcaklığın düşük olması verimi etkilemezken yüksek sıcaklıklarda çalışma güneş pili verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Fotovoltaik sistemlerdeki sıcaklığın olumsuz etkisini minimuma indirmek için PV/T olarak adlandırılan fotovoltaik termal tasarımlar geliştirilmiştir

(Köse, 2018). Bu sistemlerde güneş hücreleri sıcaklık etkisine göre soğutulmaktadır. Böylelikle de verim olumsuz etkilenmemektedir.

Sıcaklığın etkisi ile güneş pili parametreleri değişmektedir. Kısa devre akımı sıcaklık ile çok bağlantılı değildir. Yani artan sıcaklığa bağlı olarak kısa devre akımı az miktarda artmaktadır. Bu durumun sebebi, yükselen sıcaklık değeri ile yarıiletkenin yasak bant aralığının daralması, buna bağlı olarak da ışık soğurulmasında artışın oluşmasıdır. Diğer parametrelerden olan açık devre gerilimi (V_{oc}) ve doldurma faktörü (FF) ise artan sıcaklığa bağlı olarak azalır (Engin, 1995). Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi bağıntısı,

$$I_{sc} = I_0(e^{qV_{oc}/kT}-1) \quad (20)$$

ile gösterilir. Burada I_{sc} kısa devre akımını, I_0 doyma akımını, V_{oc} açık devre gerilimini, k Boltzman sabitini, T sıcaklığı verir.

Negatif terim ihmal edilerek bu denklem,

$$I_{sc} = AT^\gamma e^{-E_{g0}/kT} e^{qv_{ad}/kT} \quad (21)$$

haline dönüşür. A sıcaklıktan bağımsız bir sabit iken, E_{g0} yarıiletkenin 0°C 'de yasak bant genişliğidir. γ ise I_0 'ı bulabilmek için kullanılan parametrelerin sıcaklığa olan bağılılıklarını göstermektedir. 1 ve 4 arasında değer almaktadır. 0°C 'de pil uçları arasındaki potansiyel fark olan V_{g0} ,

$$V_{g0} = \frac{E_{g0}}{q} \quad (22)$$

Şeklinde gösterilir. Denklem 21'nin sıcaklığa göre türevi alınırsa,

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = A\gamma T^{\gamma-1} e^{(V_{oc}-V_{g0})/kT}$$

$$+AT^{\gamma} \left(\frac{\gamma}{kT} \right) \left[\frac{dv_{oc}}{dT} - \left\{ \frac{v_{oc} - v_{q0}}{T} \right\} \right] e^{(q(v_{oc} - v_{q0})/kT)} \quad (23)$$

Denklemine ulaşılır. I_{sc} değeri sıcaklık ile az oranda değiştiği için,

$$\frac{dI_{kd}}{dT} = 0 \quad (24)$$

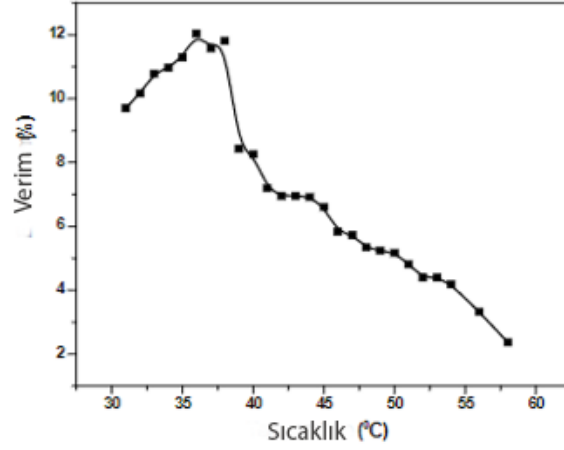
elde edilir. Denklem 23'den

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{V_{g0} - V_{oc} + \gamma(kT/q)}{T} \quad (25)$$

bağıntısına ulaşılır. Böylelikle artan sıcaklığa bağlı olarak V_{oc} değerinin lineer olarak azaldığı öngörülmektedir (Engin, 1995; Demirci, 1996).

Doldurma faktörü (FF) $V_{ad} / (kT / q)$ bağıntısına bağlıdır. Sıcaklıkta meydana gelen fark daha çok V_{oc} değerini etkilediği için, artan sıcaklığa bağlı olarak pilin verimi ve çıkış gücünde azalma meydana gelir.

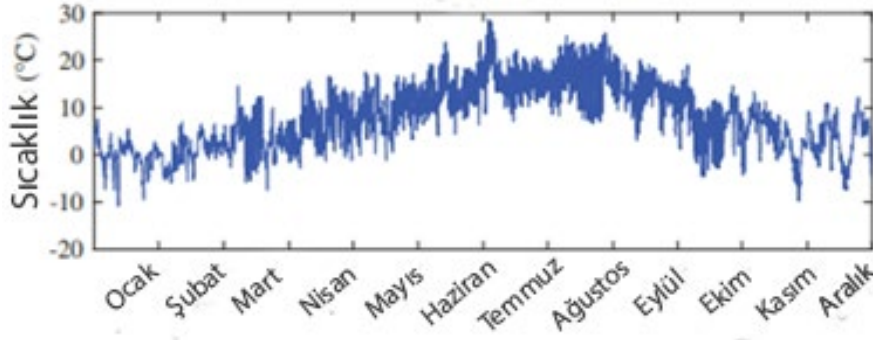
Güneş pillerine sıcaklık etkisi üzerine literatürde yapılmış pek çok çalışma vardır. Akbarzadeh ve Wadowski (1996), yaptıkları çalışma ile güneş hücrelerinin yüksek ışımaya şiddetine ve sıcaklığa bağlı olarak ısınmasının verimlerini olumsuz etkilediğini ortaya koymuşlardır. Katkar vd. (2011) sıcaklık artışına bağlı olarak güneş hücresi akımının azaldığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada 31 °C sıcaklık değerinde verim % 9.7 iken, sıcaklık 36 °C çıktığında verim % 12.04 olmuştur. Ardından sıcaklık devamlı olarak yükselerek 58 °C çıkarken verimde de devamlı bir kayıp başlamıştır. Bu sıcaklık değerinde verim % 2.4 dolaylarındadır. Fakat verimi etkileyen tek etken sıcaklık olmadığı için 31 °C - 36 °C aralığında sıcaklık artışına bağlı olarak verimde de artış görülmüştür.



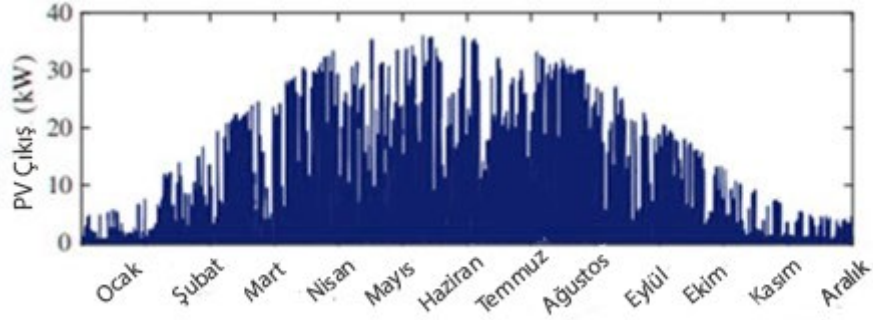
Şekil 19. Sıcaklığa göre verimdeki değişim

Kaynak: Katkar vd. 2011

Hasan vd. (2014), çalışmaları ile sıcaklık artışına bağlı olarak güneş hücresinin elektrik enerjisi üretebilme verimlerinde düşüş olduğunu deneysel olarak ispatlamışlardır. Bigorajski, ve Chwieduk (2018), yaptıkları çalışmada sıcaklığın artması ile gerilim düşmesine bağlı olarak güneş hücresi güç çıkışının azaldığını söylemişlerdir. Azaza vd. (2017), İsveç'te yaptıkları deneysel çalışma ile bir yıllık sürede sıcaklığın fotovoltaik sistem üzerindeki güç çıkışını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. İlgili çalışmanın görseli Şekil 20'de gösterilmiştir.



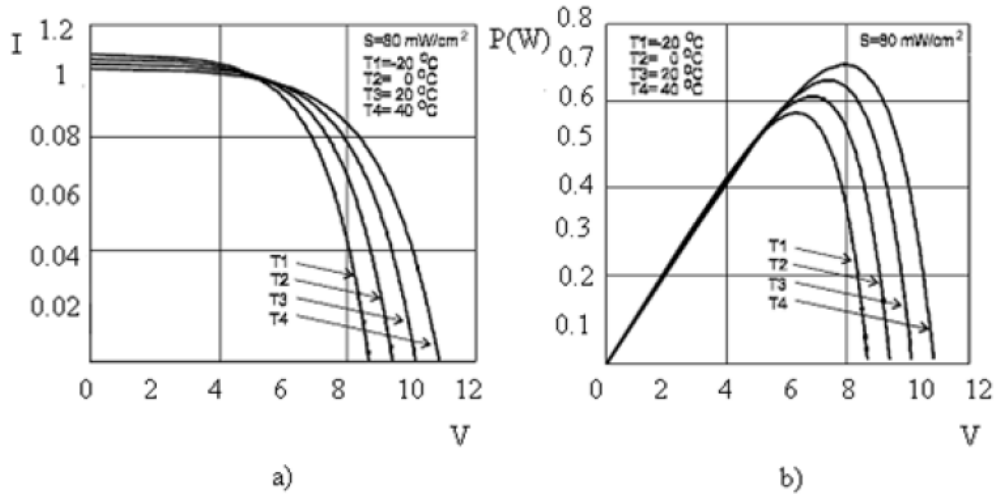
Şekil 20. Saate bağlı ortam sıcaklığı ve güç üretimi değişimi



Şekil 21 (devam). Saate bağlı ortam sıcaklığı ve güç üretimi değişimi

Kaynak: Azaza ve Wallin, 2017

Kıncay vd. (2007), yaptıkları çalışmada 80 mW/cm^2 ışık şiddeti altında 20°C , 0°C , 20°C , 40°C farklı sıcaklık değerlerinde güneş hücresinin akım gerilim ve güç değerlerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. İlgili görsel Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 22. a) ilgili sıcaklıklarda akım-voltaj değerleri b) ilgili sıcaklıklarda voltaja bağlı güç değerleri

Kaynak: Kıncay vd. 2007

3.2. Güneş Pillerine Ultraviyole (UV) Işık Etkisi

UV ışınlar ya da morötesi ışınlar 10 ile 400 nm dalga boyu aralığına sahip ışınlardır. Ultraviyole ışınlar X ışınlarından daha uzun dalga boyuna sahipken görünür ışıktan ise daha kısadır. İnsan gözü 400 ile 700 nm dalga boyu aralığındaki ışıkları algılayabilir. Morötesi ışınlar UV-A, UV-B ve UV-C olmak üzere üç sınıfta incelenmektedir. Bu sınıflandırılmanın sebebi ise karakteristik farklılıklardır. UV-A;

ozon tabakasından geçebilen ve UV ışınların % 95'ini oluşturan türüdür. Cilt kanserine sebep olmaktadır. UV-B; büyük bir çoğunluğu ozon tabakasından geçemeyen UV ışık sınıfıdır. Vücutta oluşan güneş yanıkları UV-B kaynaklıdır. Morötesi ışınların % 5'ini oluşturmaktadır. UV-C; sınıfı ise sağlık açısından en fazla tehlike arz edenlerdir. Ozon tabakasından geçemezler (URL-5).

UV ışınların çevresel zararları vardır. Öğle saatlerinde güneş ışınları dünyaya dik açı ile geldiği için en çok UV ışınına maruz kalınan süre bu zaman dilimidir. Morötesi ışınlar ekvatora doğru gidildikçe artmaktadır. Bu sebeple bu bölgelerde güneş daha kısa ara ile dünyaya gelir. Böylelikle daha çok UV ışığı alır. Rakım arttıkça UV ışık absorpsiyonu artar. 1000 metre mesafede UV %10 oranında artar. Kar, su, kum gibi yüzeyler UV ışığı yansıtılabilmektedir. Karlı ortamda iki kat fazla güneş ışığına maruz kalınır. UV ışınlar sağlık açısından zararlıdır. Cilt kanserlerine neden olmaktadır. Deride incelmeye kırışıklık renk değişimi gibi zararları da mevcuttur.

Fotovoltaik sistemler güneş ışığına maruz kalırlar. Güneş ışığı içerisinde bulunan UV ışınlar insan sağlığını tehdit ettiği gibi güneş pilleri için de olumsuz bir etkidir. UV ışınlar güneş hücresinde bozulmalara neden olur. Bu bozulmalara bağlı olarak fotovoltaik parametreler etkilenir ve güneş pili veriminde değişimler olur. UV ışınlar hücrenin yüzeyinde ve içinde tahribata sebep olduğu için güneş pili verimi düşer. Böylelikle sistem gün geçtikçe görevini yerine getiremez hale gelir.

Güneş hücrelerine UV ışık etkisi ile oluşabilecek durum ile ilgili yapılan çalışmalar mevcuttur.

Dong vd. (2020), yapmış oldukları çalışma ile p-tipi kristal silisyum güneş pilleri üzerinde UV ışık etkili bozulmaları incelemişlerdir. Çalışmada güneş pili 300-390 nm dalga boyundaki UV ışınlar maruz bırakılmıştır. UV ışın kaynaklı potansiyel bozulma gecikmesi PID denilen bir test ile yapılmıştır. Güneş modülü bahsedilen dalga boylarında ışık ışıması olan ve olmayan durumda 24 saatlik süre ile PID testine tabi tutulmuştur. p-tipi kristalin silisyum (c-Si) güneş hücrelerinde PID testi sırasında 300-390 nm dalga boyu aralığındaki UV ışınlarının ışıtilmasının, PID'nin neden olduğu güneş hücresi performansının bozulmasını geciktirebileceği sonucuna varılmıştır.

Leijtens vd. (2013), TiO₂ tabanlı güneş pillerinin UV ışığına maruz kalması ile oluşan bozulmaları incelemek için, farklı güneş pil yapılarına 5 saat boyunca 100 mW/cm² güneş ışığına maruz bırakılmıştır. Bu çalışmada incelenen güneş hücreleri,

perovskit duyarlı TiO₂ güneş hücreleri olup, bazıları koruyucu madde ile ve bazıları koruyucu madde olmadan (<435-nm UV kesim filtresi) incelenmiştir. TiO₂ bazlı güneş pillerinde bir UV filtresi kullanıldığında daha kararlı görüldüğünü görmüşlerdir.

Kempe (2010), yapmış olduğu çalışmada PV modüllerin maruz kaldığı ısı, nem mekanik stres, UV ışın gibi koşullardan bahsedip UV ışın hakkında çalışma yapmıştır. Fotovoltaik malzemelerin UV dayanıklılığını hızlı bir şekilde değerlendirmek için yöntemlere ihtiyaç duyulduğundan bahsetmiştir. Çalışma ile çevresel bir odada UV geçirgenliği yüksek cam kullanarak PV malzemelerini UV ışınlarına maruz bırakılmış, 3.18 mm kalınlığında cam arkasındaki stres açısından 20 yıllık maruziyete eşdeğer UV dozlarını yaklaşık 6 ayda elde etmenin mümkün olduğu sonucunu elde etmiştir.

Liu vd. (2014), fotovoltaik modellerin arka levhalarının UV ışığının etkisi ile bozulmalarını inceleyebilmek için çalışma yapmışlardır. Araştırma ile, dört farklı ticari fotovoltaik arka levhalar 3000 saate kadar UV ışığına maruz bırakılmıştır. Örneklerin farklı UV maruz kalma sürelerinden sonra optik, mikroyapısal (SEM), kimyasal (FTIR) ve elektriksel analizleri yapılmıştır. FTIR analizleri ile yüksek UV dozajının daha şiddetli kimyasal bozulmalara böylelikle çatlamalara neden olduğunu görmüşlerdir. Bu çatlakların yoğunluğunun farkının ise UV bozulma dereceleri ile ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca örneklerin sadece yüzeylerinde bozulmalar olduğu için elektriksel özelliklerin önemli ölçüde etkilenmediği saptanmıştır.

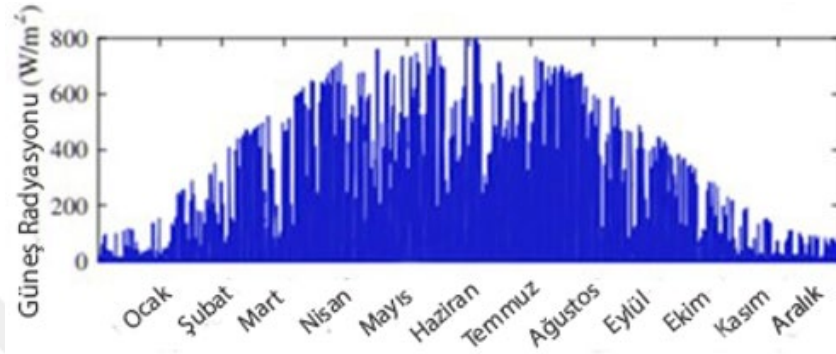
Yeo vd. (2022), yaptıkları çalışmada silisyum tabanlı güneş pillerinin ışık kaynaklı bozulmalarını tespit etmiş ve bu bozulmaların azaltılması için incelemeler yaparak geleceğe dair bakış açıları sunmuşlardır.

Shahid vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada tasarladıkları sistem sayesinde güneş ışınlarından gelen UV radyasyonlarından bütün gün boyunca sabit bir ışınım değeri elde etmişlerdir.

Şahan vd. (2010), araştırmalarında ultraviyole güneş enerjisi değerlerinin ölçülmesi için UV ışınımı belirleyen düzenekler hazırlamışlardır. Toplam ışınım ve UV ışınım değerlerinin ölçülmesi için sırası ile pranometre ve UV-radyometre kullanmışlardır.

Başay vd. (2019) çalışmalarında fotovoltaik modüle UV ışınların etkisini incelemiş ve deniz seviyesinden yüksekte bulunan fotovoltaik sistemlerin, deniz seviyesindeki sistemlere göre daha az ömürlü olabileceği sonucuna varmışlardır.

Azaza vd. (2017), İsveç'te yaptıkları deneysel çalışma ile bir yıllık sürede solar ışımının (radyasyonun) fotovoltaik sistem üzerindeki aylara bağlı değişimini göstermişlerdir. İlgili çalışmanın görseli Şekil 22'de gösterilmiştir.



Şekil 23. Saate bağlı UV değişimi

Kaynak: Azaza ve Wallin, 2017

3.3. p-n Eklem Kapasitansı

p-n eklemden iki tür kapasitans oluşmaktadır. Birincisi yük depo edilmesi ise gerilimin akımın önüne geçmesi ile oluşur ve difüzyon kapasitansı olarak adlandırılır. İkincisi ise deplasman bölgesine ve kenarlarında oluşan yük dağılımına bağlı elde edilir ve eklem kapasitansı olarak adlandırılır. Ters besleme halinde eklem kapasitansı baskın halde iken, ileri besleme halinde difüzyon kapasitansı etkindir (Özden, 2015). Deplasman bölgesinin p-tipi bölgesinde hollerin geçişi ile geride negatif yüklü iyonlar kalırken, n-tipi bölgesinde elektron geçişi ile pozitif yükler kalır. Bu yükler bir kapasitans yapısı oluşturur. Oluşan kapasitans $C=Q/V$ şeklinde ifade edilebilir,

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (26)$$

Deplasman bölgesinin ısı dengedeki genişliği (W),

$$w = \left[\frac{2\varepsilon V b_i}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (27)$$

denklemini ile gösterilir.

Uygulanan besleme gerilimi (V) ile deplasman bölgesinin genişliği ise,

$$w = \left[\frac{2\varepsilon V b_i - V}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (28)$$

şeklinde ifade edilir. İleri besleme ile W azalırken, ters besleme ile artar.

Yük yoğunluğu (Q), n ve p bölgesindeki deplasman bölgesi genişlikleri ve katkı yoğunlukları şeklinde düzenleme yapılırsa,

$$|Q| = qA x_{n0} N_d = qA x_{p0} N_a \quad (29)$$

denklemini bulunur. Deplasyon bölgesi genişliği ifadesinin (W) x_{n0} ve x_{p0} 'a bağlayan eşitlikler kullanılması ile,

$$x_{n0} = \frac{N_a}{N_a + N_d} W$$

$$x_{p0} = \frac{N_d}{N_a + N_d} W$$

eşitlikleri elde edilir. Yük yoğunluğu (Q),

$$|Q| = qA \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} W = A \left[2q\varepsilon(V_{bi} - V) \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2} \quad (30)$$

denklemleri ile ifade edilir. Eklem kapasitansı (C),

$$C = \left| \frac{dQ}{d(V_{bi} - V)} \right| = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\varepsilon}{(V_{bi} - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2} \quad (31)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitliğin düzenlenmesi ile;

$$C = A\varepsilon \left[\frac{q}{2\varepsilon(V_{bi} - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon A}{W} \quad (32)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerdeki ε yarıiletkenin dielektrik sabitini, N_a alıcı yoğunluğunu, N_d verici yoğunluğunu, V_{bi} eklem engel potansiyelini, V uygulanan gerilimi ifade eder.

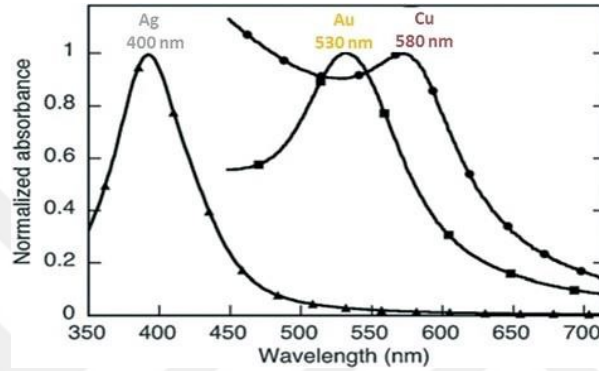
3.4. Yüzeysel Plazmon Rezonans (SPR) Olayı

Plazmon tanımından ilk kez 1952 yılında David Pines ve David Bohm bahsetmiştir. Plazmon, metallerdeki iletim elektronları salınımı olarak adlandırılabilir. Maxwell denklemlerine bağlı olarak yapılan çalışmalarda plazmonun, metallerin ışıkla etkileşimi sonucu ortaya çıktığı sonucuna varmışlardır (Pines vd., 1953; Jackson vd., 1962). Nanoplazmonik ortamlarda yüzey ve ışık etkileşimi ile ortaya çıkan plazmon yapılarına yüzey plazmonları denmektedir (Zeng vd., 2013).

Au, Ag gibi soy metal nanoparçacıklar ışık ile etkileşime girdiklerinde yani elektromanyetik dalga demeti gönderildiğinde, metalde var olan serbest elektronların hareketliliğine zorlanır. Böylelikle belirli dalga boylarında SPR olayı gerçekleşir. Özel frekanslarda gerçekleşen salınım lokalize yüzey plazmon rezonansı (LSPR) denir. Ag nanoparçacıkları için SPR etkisi $\lambda=450$ nm dalga boyunda gerçekleşmektedir. Ag, Au,

Cu gibi nanoparçacıklar görünür renk spektrumlarında plazmon rezonans etki gösterebilen yoğun renkteki parçacıklardır. Yüze plazmon rezonans olayı için rezonans frekansı, partikülün boyut, şekil ve çevre koşulları ile ilişkilidir.

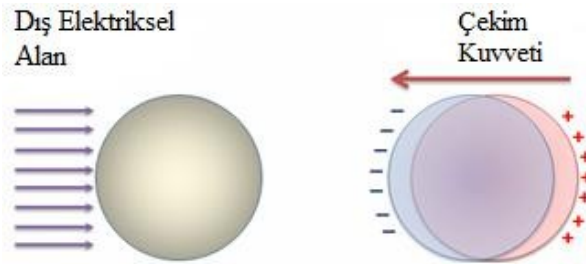
Bazı metalik nano parçacıklar (Au, Ag, Cu ve Al gibi) görünür dalga boylarında yüze plazmon rezonans (SPR) sergilemektedirler Şekil 23’de Ag, katmanlarında gerçekleşen SPR olayının görüntüsü optiksel soğurma spektrumlarında verilmiştir.



Şekil 23. Ag, Au ve Cu nano parçacıklar için yüze plazmon soğurma bantları

Şekil 23’te görüldüğü üzere söz konusu metalik nanoparçacıklara ait SPR olayının oluşumu farklı dalga boylarında meydana gelmektedir. Ayrıca bu olayın ağırlıklı olarak görünür dalga boylarında gerçekleşmesi bu sürecin foto aygıtlarda kullanımının önünü açmaktadır.

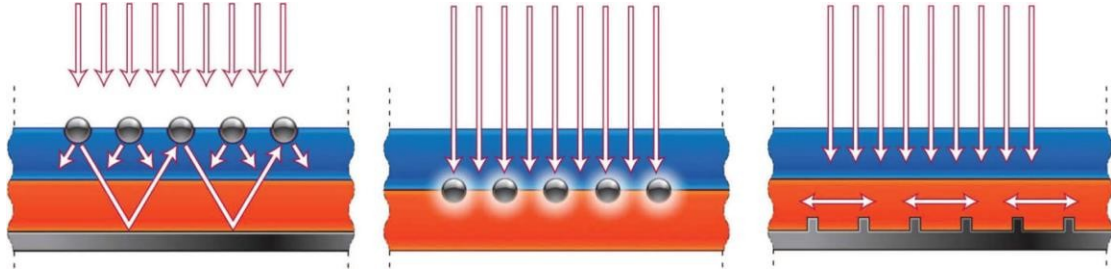
Şekil 24’te bir metalik nano parçacıkta gerçekleşen plazmonik süreç anlatılmaktadır.



Şekil 24. Dış elektromanyetik etkiye maruz bırakılan metalik nano parçacığın sergilediği fiziksel sürecin şematik görünümü

Görüldüğü üzere elektromanyetik dalganın etkisi ile nano parçacık içindeki elektron bulutu yer değiştirir ve metal atomlarının pozitif yüklü çekirdeği ters taraftan açığa çıkar. Yer değiştirmiş hareketli elektronlar ile metal atomlarının pozitif yüklü

çekirdeği arasında bir çekim kuvveti meydana gelir. Bu etkileşme kuvvetleri sayesinde plazmon özelliği bu parçacıklarda elektronlar ayrılarak iletkenliğe katkıda bulunmaktadır.



Şekil 25. Güneş pillerinde ışığın yakalanması için kullanılan metalik plazmon yapıları şematik görünümü. (a) Hücre üstündeki metal nano parçacıklarla saçılan ışığın açısız olarak yeniden dağıtımı. (b) Yakın alan etkili gömülü metal nano parçacıklar, (c) Arka yüzeye uygulanan metal nano yapı katmanı

Yüzeysel plazmon rezonans (SPR) olayına dair yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur.

Manır vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada farklı n-CdS/p-Cu₂S güneş hücreleri üzerinde 200 K ve 300 K sıcaklarında kriyojenik kaplama yöntemi ile Cu buharlaştırmışlardır. 200 K'de elde etmiş oldukları Cu tabakasının adacık büyüme mekanizmasına ve soliton büyüme mekanizmasına uygun olarak nanopartiküllerden oluştuğu gözlemlenmişlerdir. 12 hafta boyunca yapmış oldukları incelemelerde, 300 K üretilen güneş hücrelerinin veriminin 7. Haftada 0.1360 olduğu, 200 K'de üretilen güneş hücrelerinin veriminin 5. Haftadaki değerinin ise 0.0384 olduğunu görmüşlerdir. 200 K altlık sıcaklığında üretmiş oldukları güneş hücresinin verim değerindeki düşük hızlı değişimin sebebinin, Cu atomdaki SPR olayından kaynaklandığını görmüşlerdir.

Nevruzoglu vd. (2023), biyosensörlerin geliştirilmesi için kriyojenik sıcaklıklarda çalışmalar yapmışlardır. Klasik vakum buharlaştırma tekniği (300 K) ve kriyojenik kaplama tekniği (200 K) ile Ag nanoparçacıklarla kaplanan iki sistemi karşılaştırmışlardır. 200 K altlık sıcaklığında kaplamış oldukları yüzeyde daha dar spektral çizgilerle plazmonik rezonansların uyarılmasını sağlamışlardır. Ayrıca yüzeyin daha homojen ve eşit boyutlu bir şekilde kaplandığını göstermişlerdir. Böylelikle algılama yüzeyini çevreleyen hacme yayılan büyük yerel elektromanyetik

alanlarla ilişkilendirilen yüzey plazmon uyarılmalarının oluşturulmasını kolaylaştırmışlardır. Bu yöntemle klasik tekniklere göre daha güçlü ışık-madde etkileşimleri sağlanmış ve etiketsiz biyosensör uygulamaları için geliştirilmiş kırılma indisi hassasiyetine ulaşılmıştır.

Nevruzoglu vd. (2020), çalışmalarında Ag nanoparçacığının yüzey plazmon etkisini, substrat sıcaklığına ve kaplama süresine bağlı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada n tipi Si ve cam altlık yüzeyler kullanmışlardır. Si ve cam altlıklar üzerinde hazırlanan Ag ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri gözlemlenmiştir. Ag kaplaması için genellikle yüksek substrat sıcaklıklarında gerçekleştirilen vakum buharlaştırma yerine düşük substrat sıcaklığında (<300 K) vakum buharlaştırma yöntemi kullanılmışlardır. 150-200 K sıcaklık aralığında homojen nano boyutlu Ag parçacıkları Si üzerinde elde etmişlerdir. Cam altlıklar üzerinde hazırlanan Ag ince filmlerin optiksel yansıtma ölçümleri sonucunda Ag nanoparçacıkların SPR etkisi gösterdiğini ispatlamışlardır.

3.5. Gümüş

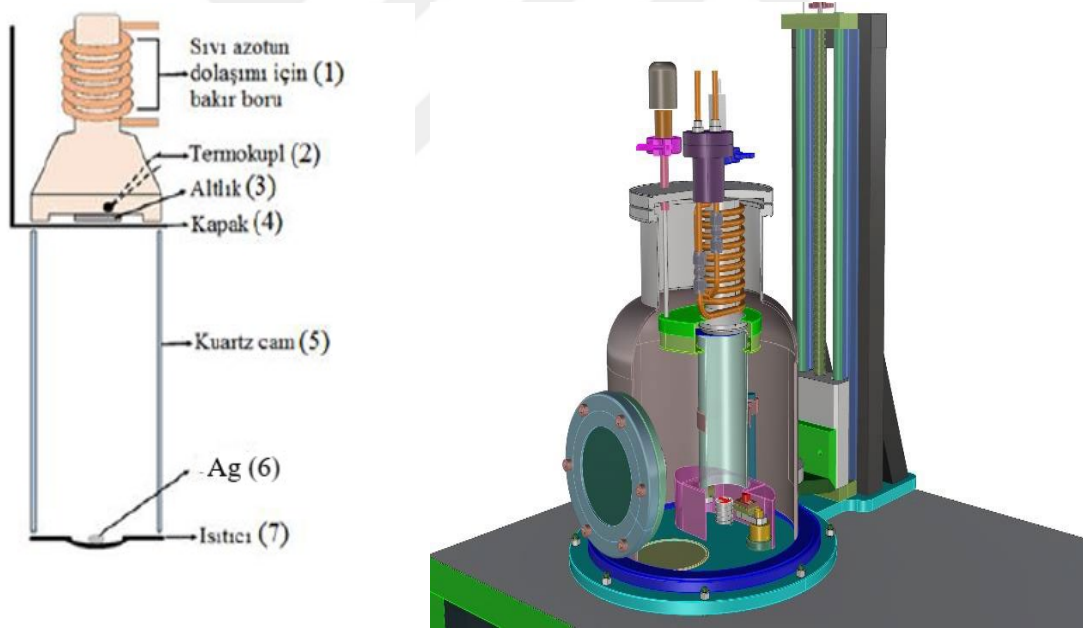
Gümüş elementi periyodik cetvelde Ag ifadesi ile gösterilmektedir. Gümüşün atom numarası 47'dir. Genellikle bileşiklerde +1 değerlik almaktadır. Beyaz ve parlak bir elementtir. Tablo 4'te Ag atomunun özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Ag elementi özellikleri

Fiziksel Özellik	Değer
Atom numarası	47
Atom ağırlığı (g/mol)	107.8682
Atom yarıçapı (pm)	172
Elektronegatiflik	1.93
Erime noktası (K)	1234.93
Yoğunluk (g/cm ³)	10,49
Kaynama noktası (K)	2435
Ergime ısısı (kJ/mol)	11.28

3.6. Kriyojenik Kaplama Yöntemi

Kriyojenik yöntem yeni ve kullanışa elverişli bir sistemdir. Kriyojenik etki yönteminde özel tasarlanmış Vaksis PVD handy/1DLE-LN cihazı kullanıldı. Bu düzeneğin şematik görünümü Şekil 26’de verilmiştir. Au, Ag, Cu gibi plazmonik özelliğe sahip metalik nano malzemeler bu aparat yardımı ile soğutulmuş altlık sıcaklıklarında üretilmektedir. Bu düzenek, altlığın soğutulduğu sistem ve doymuş buharın biriktiği reaktör olmak üzere iki temel kısımdan oluşmaktadır. Ayrıca soğutulmuş altlıklar yüzeyinde kaplama işlemi yüksek vakum değerlerinde (10^{-5} - 10^{-6} Torr) gerçekleştirilmektedir. Sistem içerisinde altlık tutucu ve açılıp kapanabilen pencere, kuartz reaktör, tungsten yatakçık ve bakır borular bulunmaktadır. Tungsten kısım malzemeyi ısıtıp buharlaştırmak için kullanılırken, bakır borular içerisinde altlığı soğutmak amacı ile sıvı azot dolaşmaktadır.



Şekil 26. Kriyojenik yöntem düzeneği

Sıvı azot ile soğutulmuş olan altlık reaktördeki doymuş buhar ile karşılaşınca altlığın yüzeyine doğru nano boyutlu kümeler taşınır. Bu kümeler doymuş buhar ortamındaki boyutlardan farklıdır. Oluşan kümeler kritik öncesi, kritik, kritik sonrası olarak üç gruba ayrılmaktadır. Kritik boyutlu kümelerde, doymuş buhar ortamındaki

atomların basıncı doymuş buhar basıncından bir miktar daha fazladır. Bu sebeple atomlar serbest bir şekilde hareket edebilmektedir. Buhar ortamında oluşacak kümeler serbest atomların birleşip yapışması ile büyümektedir. Ayrıca buhar ortamında bulunan kümeler eşit boyutlu olarak kabul edilir. Kritik öncesi boyutlu kümelere serbest atom bulunmamaktadır. Bu durumun nedeni atomların çok yüksek basınca sahip olmaları nedeni ile buhar ortamındaki kümelerle yapışmış durumda olmalarıdır. Ortamda var olan kümeler kendileri ile çarpışarak büyümektedir. Kritik ötesi boyuta sahip kümeler ise kritik ve kritik öncesi boyutlu kümelerin gerçekleşmediği durumlarda geçerli olmaktadır. Burada da süreç, küme büyümesi küçük kümelerin atomlarının buharlaşarak büyük kümelere yapışması ile sonuçlanmaktadır.

Kriyojenik kaplama yönteminin en büyük avantajı ve diğer yöntemlerden ayrılan yanı, soliton dalga mekanizmasıdır. Bu dalga, doymuş buhardan gelen altlık yüzeyine taşınan ve orada konumlanan kümelerin altlık atomları ile çarpışması ile oluşmaktadır. Soliton dalgaları doğrusal özellikte değildir ve kütle taşıma özellikleri sebebi ile altlık yüzeyinde parçacıkların enerji kaybına uğramadan hareket etmesini sağlamaktadır. Bu modelde altlığın kristal yapıda olması, tek yönde Burger vektörünün oluşmasına ve böylelikle soliton dalgası etkisiyle parçacıkların taşınımının aynı yönde oluşmasına sebep olmaktadır. Böylece homojen bir kaplama gerçekleşmektedir. Soliton dalga oluşumunu sağlayan ve soliton büyüme mekanizmasını gerçekleştiren kümeler kritik boyutlu kümelerdir. Bu kümeler altlık yüzeyinin sıcaklığına göre 10-15 nm arasında değişkenlik göstermektedir. Soliton dalgası oluşumuna katkı sağlayamayan kritik öncesi ve kritik sonrası kümeler tekrardan doymuş buhar ortamına geri dönerler. Böylelikle altlık yüzeyi eşit boyutlu nano ölçeğe sahip kümelerle kaplanmış olur ve metalik film katmanları oluşur.

Kapalı sistem şartlarında ısı buharlaştırma yöntemi ile soğutulmuş olan altlıklar üzerinde metal kaplama yapılması ile alakalı çalışmalar bulunmasa bile, soğuk altlıklar üzerinde yarıiletkenlerin kaplanmasına dair farklı çalışmalar vardır (Bacaksiz vd., 2007; Tomakin vd., 2012).

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Güneş Pillerinin UV ve Sıcaklık Etkisine Maruz Bırakılması

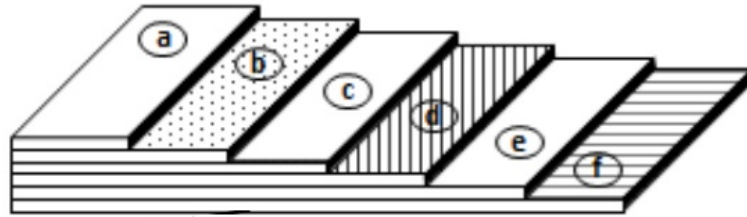
Bu çalışmanın ilk aşamasında piyasadan satın alınan Emin marka no: EM5063 modellenli Si tabanlı güneş pilleri dış etkilere maruz bırakıldı. Temin edilen dört adet silisyum tabanlı güneş pillerinden bir tanesi kontrol örneği olarak kullanıldı. Geriye kalan güneş pilleri sırası ile $\lambda=260$ nm, $\lambda=360$ nm dalga boylu UV ışına maruz bırakılırken bir diğer örnek de 60 °C 'da tavlandı. Şekil 27'de tavlama işlemi için tercih edilen Protherm Furnaces marka PTF 12/75/600 modellenli tüp fırın, Şekil 28'de ise deneysel aşamalarda kullanılan UV kabin gösterilmektedir.



Şekil 27. Tüp fırın



Şekil 28. UV kabin



Şekil 29. Si tabanlı güneş pili modeli: a) Koruma camı, b) Anti-yansıtıcı katman, c) Üst kontak, d) n-tipi silisyum, e) p-tipi silisyum, f) Alt kontak

Her bir güneş pili örneği günde 1 saat olmak üzere 12 hafta boyunca UV ışınlarına ve sıcaklık etkisine maruz bırakıldı ve karakteristik özellikleri aydınlık ve karanlık ortamlarda incelendi. Bununla birlikte I-V ve C-V ölçümlerinde

elektrokimyasal ölçüm cihazı olan İvium CompactStat.h10800 kullanıldı. Aydınlık ortam ölçümlerinde (93 mW/cm^2) Sciencetech marka SF150C model güneş simülatörü ile yapıldı. UV aydınlatma sürecinde örneklerde olası sıcaklık değişimlerinin tespitinde, Fluke Ti32 Thermal Imagers sıcaklık algılayıcı aparat kullanıldı. İlgili deney düzeneği Şekil 30'da gösterilmiştir.

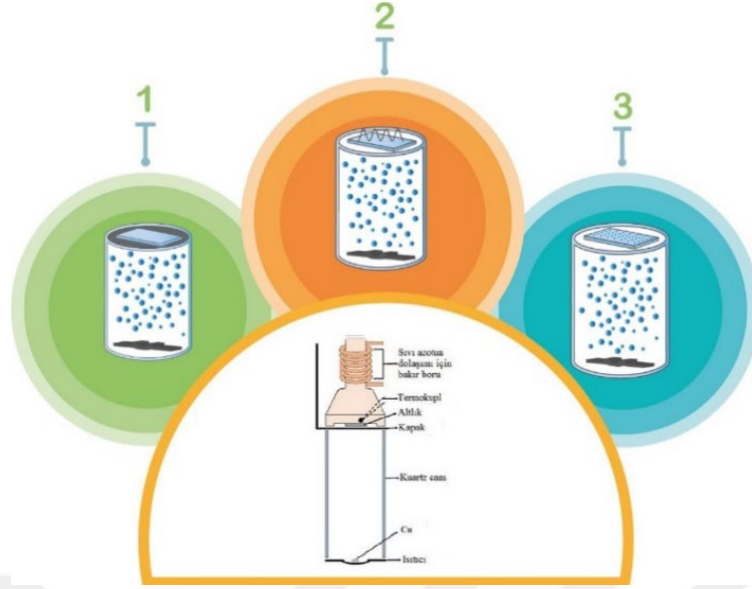


Şekil 30. Elektrokimyasal ölçüm cihazı ve güneş simülatörü

Elde edilen sonuçlar, UV aydınlatma uygulamasında örneklerde önemli sıcaklık değişiminin ($1-3^\circ\text{C}$) olmadığını gösterdi. Yapılan elektriksel ölçümler dış uygulama süreçlerinde (UV ışın ve sıcaklık) güneş pillerinin karakteristik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini gösterdi. I-V ölçümlerinden elde edilen kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve doldurma faktörü (FF) değerlerinde dış uygulama sürecine bağlı olarak değişimlerin olduğu görüldü. Elde edilen C-V ölçüm grafiklerinden ise örneklere ait verici yoğunluğu (N_d) değerleri hesaplandı.

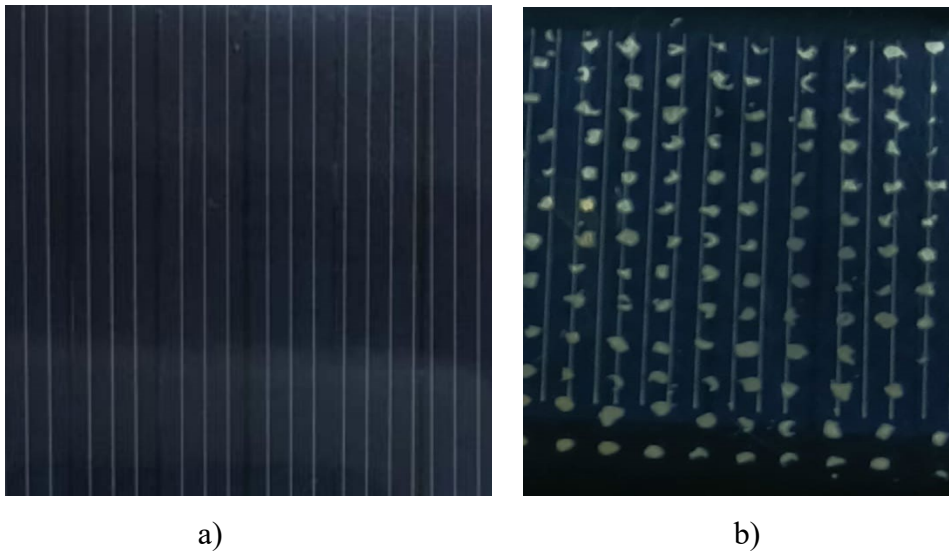
4.2. Kriyojenik Kaplama Yöntemi İle Ag Kaplama İşlemi

Çalışmanın ikinci aşamasında UV ve sıcaklık uygulamalarında bozulmaya uğramış güneş pilleri üzerinde geri dönüşüm çalışması başlatıldı. Bu doğrultuda güneş pillerinin yüzeyi kriyojenik etki yöntemi kullanılarak Ag iyonları ile kaplandı. Şekil 31'de kriyojenik etki yönteminde gerçekleşen kaplama işleminin şematik görünümü ve üretim aşamaları verilmiştir.



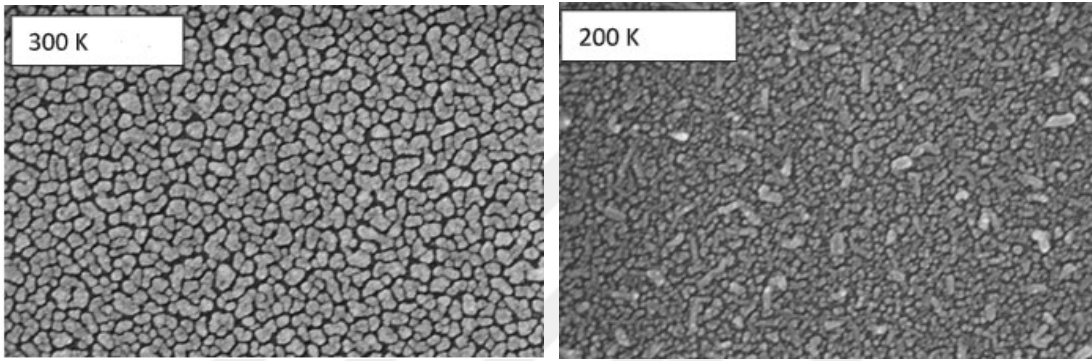
Şekil 31. Kriyojenik altlık düzeneği film üretim aşamaları a) 1.aşamada ayarlanabilir pencere kapalı durumda iken aparatın reaktör bölümünde buharlaştırılan malzemenin doymuş buharı oluşturulurken, aparatın soğutma bölgesinde altlıklar sıvı azotla soğutulur, b) 2.aşamada pencere açılır ve doymuş buharla soğutulmuş altlıkların teması sağlanır. Bu süreçte reaktörden altlık yüzeyine taşınan farklı boyutlu kümelerden sadece kritik boyutlu kümeler soliton tipi dalgalar oluşturur, c) 3.aşamada soliton dalgalar sayesinde altlık yüzeyinde kritik boyutlu kümelerin hareketliliği sağlanır ve homojen bir kaplama gerçekleşiyor.

Kaplama işlemine geçilmeden önce ilk olarak güneş pillerinin yüzeyleri alüminyum folyo ile maskelendi ve güneş pili yüzeyinde eşit aralıklarla Ag adacıklarının dağılımı sağlandı. Şekil 32’de güneş pillerinin buharlaştırma öncesi ve 200 K altlık sıcaklığında buharlaştırılan Ag adacıklarının görüntüsü sergilenmektedir.



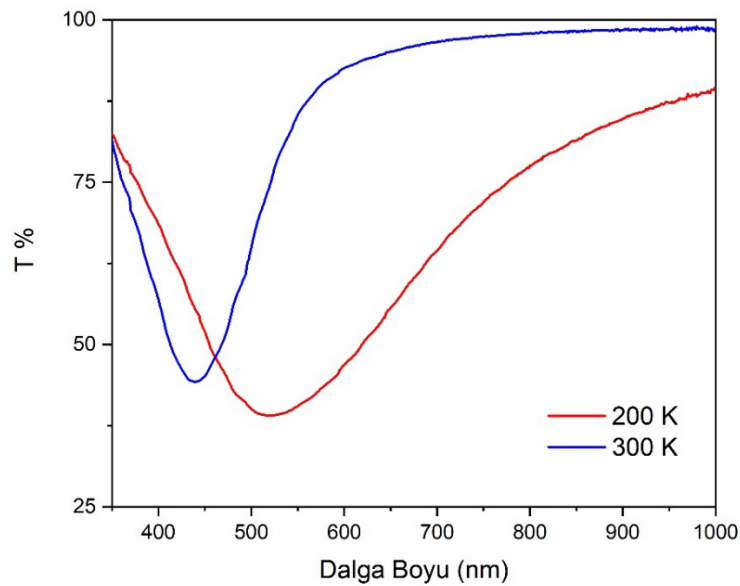
Şekil 32. Kriyojenik yöntemle a) kaplanmamış ve b) kaplanmış güneş pili örneği

Şekil 33'te 300 K (klasik yöntem) ve 200 K sıcaklıkta soğutulmuş altlık yüzeyinde üretilmiş Ag katmanlarının FESEM görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü üzere 300 K altlık sıcaklığından farklı olarak 200 K altlık sıcaklığında üretilen Ag kümeleri yaklaşık 12-15 nm boyutlarında olmaktadır. Ag kümelerinin yaklaşık eşit boyutlarda olması 200 K altlık sıcaklığında filmlerin soliton büyüme mekanizması ile gerçekleştiğinin bir kanıtı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca eşit boyutlu metalik nano boyutlu kümelerde etkili SPR olayının gerçekleştiği yapılan çalışmalardan bilinmektedir.



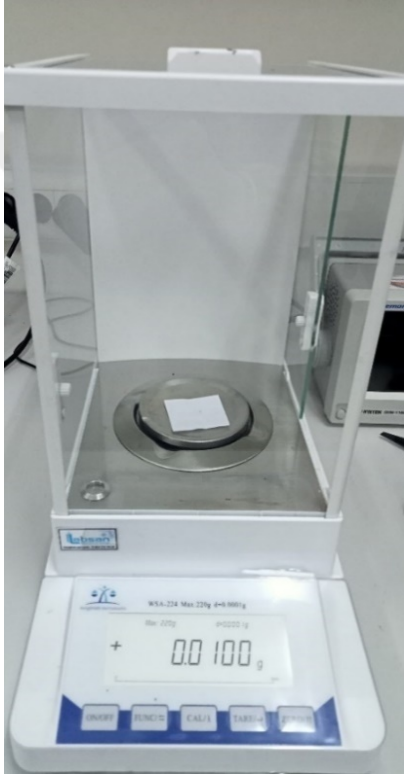
Şekil 33. Cam altlıklar üzerinde 300 K ve 200 K'de elde edilen Ag ince filmlerin FESEM görüntüleri.

Şekil 34'te 300 K ve 200 K altlık sıcaklıklarında üretilen filmlere ait SPR olayının gerçekleştiği dalga boyları verilmiştir.



Şekil 34. 300 K ve 200 K'de cam altlıklar üzerinde hazırlanan Ag ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

Kaplama işlemlerinde 0.1 gram %99.9 saflıkta Alfa Aesar marka metalik Ag malzemesi kullanıldı. Buharlaştırma işlemi 10^{-6} Torr basınç altında gerçekleştirildi. Buharlaştırılma sürecinde kullanılan tungsten kayıkçığa 20 sn süre ile 46.7 A değerinde akım uygulandı ve kaplama işlemi gerçekleştirildi. Ag metalik malzemenin tartım işlemi Şekil 35'te verilmiş hassas terazi ile gerçekleştirildi. Örneklerin soğutulma işleminde özel tasarlanmış bakır borulardan sıvı azot dolaşımı sağlandı. Şekil 36'da deneyde gerçekleşen görseller sunulmuştur.



Şekil 35. Hassas terazi görüntüsü



Şekil 36. Sisteme sıvı azot eklenmesi

4.3. Si Tabanlı Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

Kaplanmış örneklerin FESEM analiz görüntüleri Şekil 37'de verilen Zeiss Sigma 300 model cihazı ile elde edildi.



Şekil 37. FESEM ölçümlerinde kullanılan Zeiss Sigma 300 FESEM cihazı

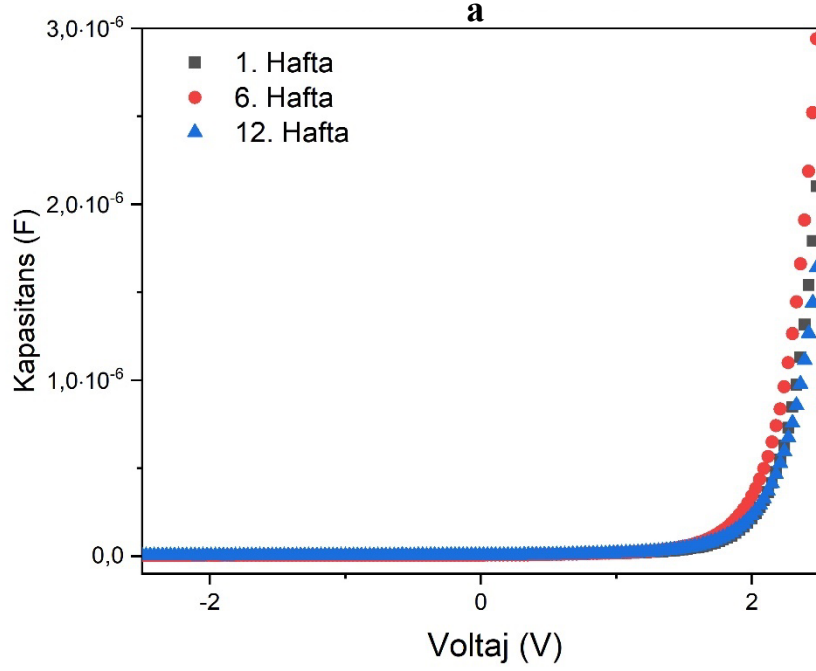
Güneş pillerinin elektriksel özellikleri Şekil 38'de verilen İvium CompactStat.h10800 elektrokimyasal ölçüm cihazı (galvonastat/potansiyostat) ölçüldü.



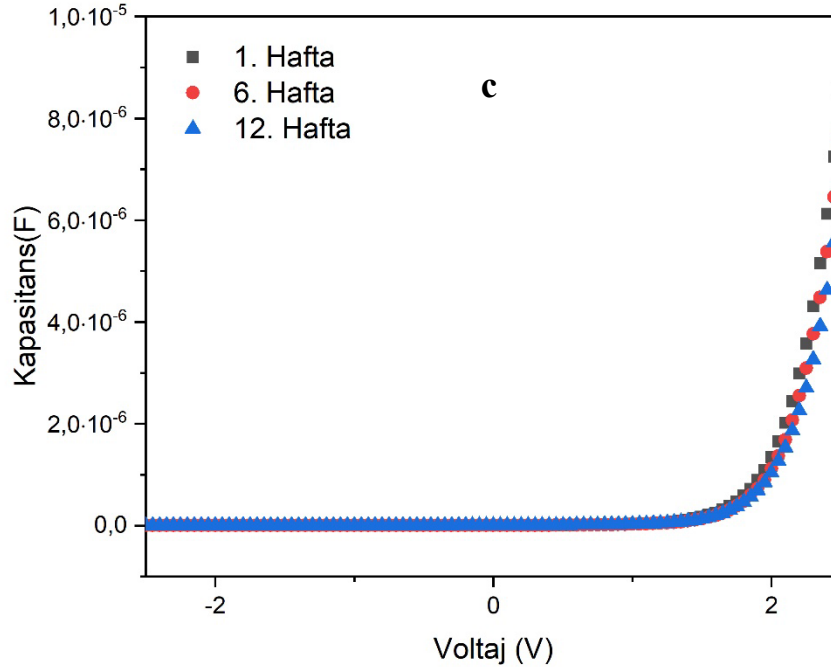
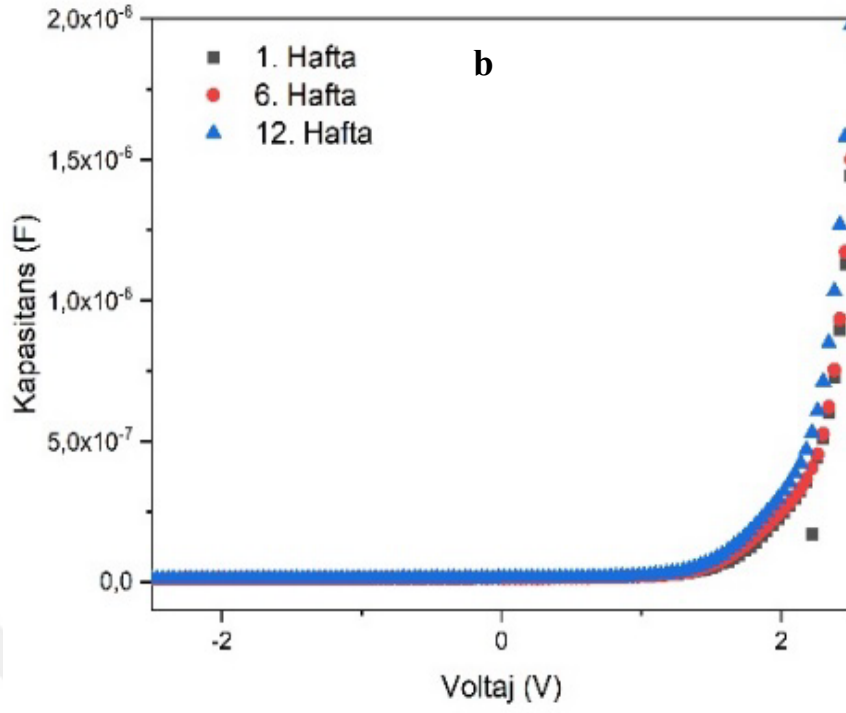
Şekil 38. İvium CompactStat.h10800 markalı elektrokimyasal ölçüm cihazı

5. BULGULAR

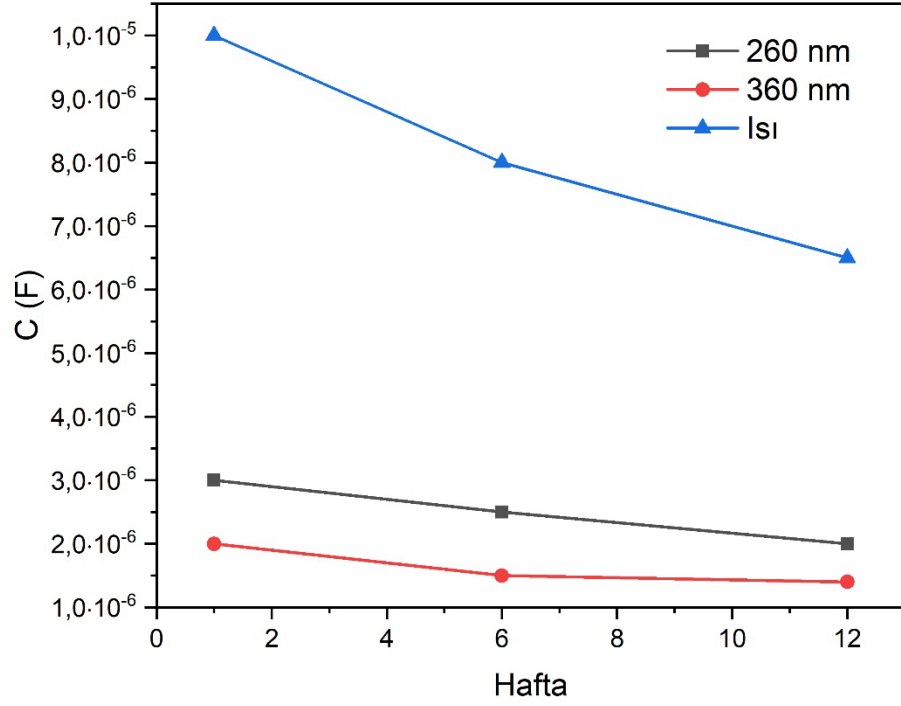
Şekil 39 a) 260 nm, b) 360 nm UV ışına ve c) 60 °C ısıtılan güneş pillerinin C-V ölçümleri -2 V ve +2 V aralığında 1000 Hz frekansta oda sıcaklığında yapıldı. Elde edilen C-V sonuçlarından yararlanılarak kapasitans değerlerinin zamana bağlı olarak değişim grafiği çizildi.



Şekil 39. a) 260 nm, b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60°C ısı uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık C-V ölçüm sonuçları grafiği

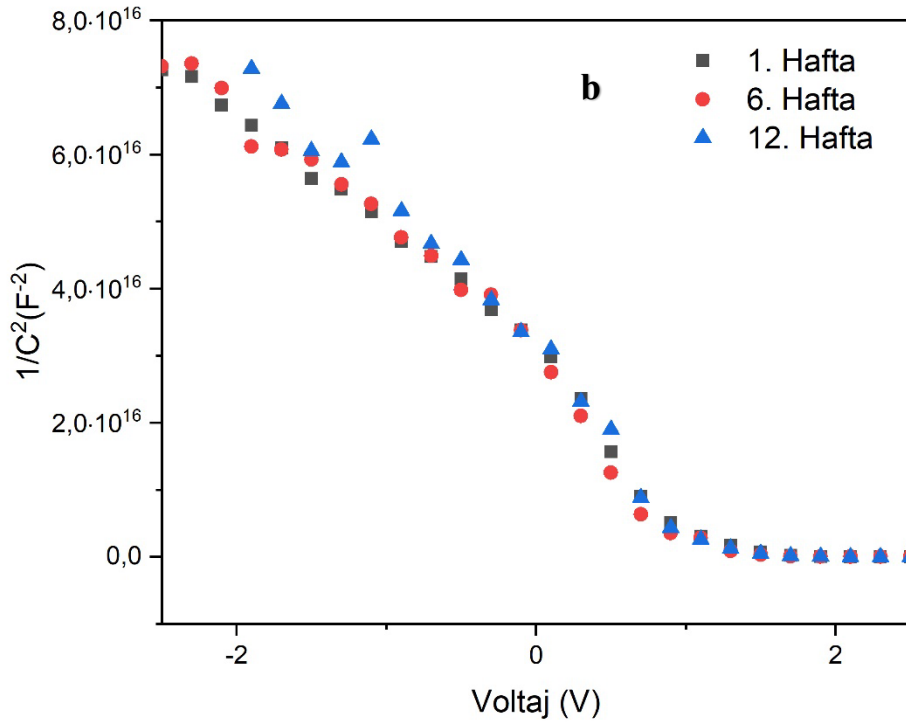
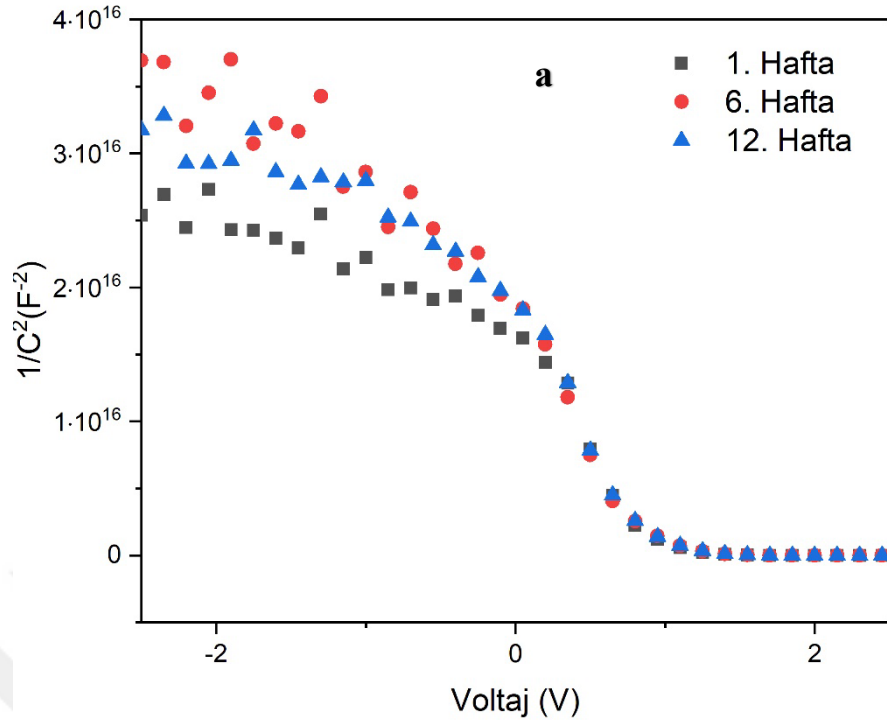


Şekil 39 (devam). a) 260 nm, b) 360 nm dalga boyulu UV ışınına ve c) 60°C ısıll uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık C-V ölçüm sonuçları grafiği

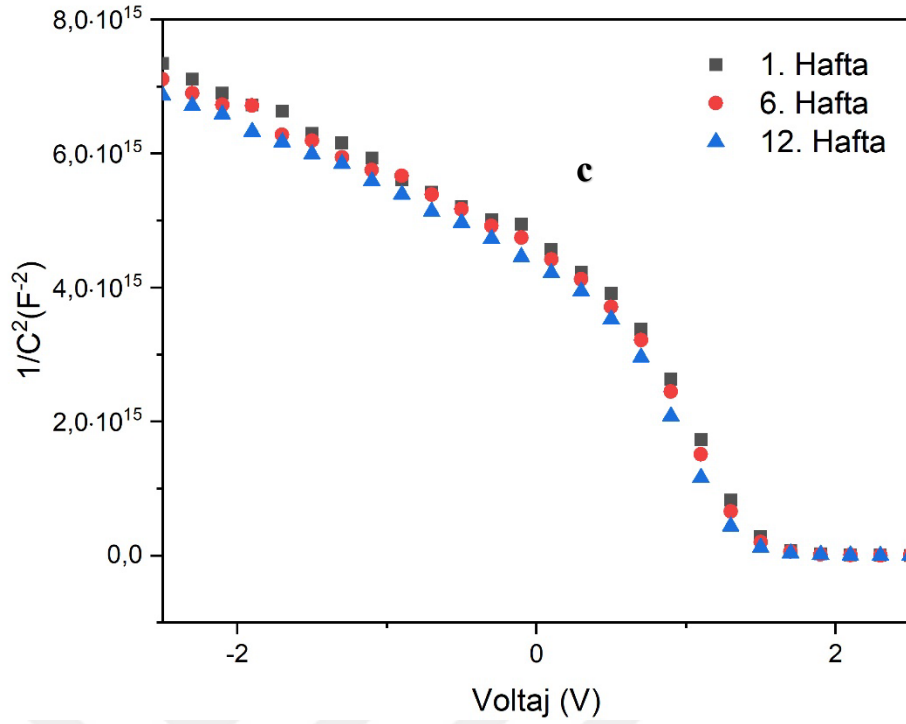


Şekil 40. a) 260 nm, b)360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60°C ısıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 12 haftalık kapasitans- zaman ölçüm sonuçları grafiği

$1/C^2$ -V grafiklerindeki oluşan değişimin doğrusal olduğu noktadan katkı yoğunluğu (N_{cv}) değerleri hesaplandı. Şekil 41’de üç farklı güneş pilinin kapasitans-voltaj ölçümlerinden $1/C^2$ -V grafikleri bulunmuştur.



Şekil 41. a) 260 nm, b) 360 nm dalga boyulu UV ışınına ve c) 60°C ısı uygulmaya maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık $1/C^2$ -V grafiği



Şekil 41 (devam). a) 60 nm, b) 360 nm dalga boylu UV ışımına ve c) 60°C ısı uygulamasına maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık $1/C^2$ -V grafiği

260 nm, 360 nm ve ısı etkisine maruz bırakılan güneş pillerinin verici yoğunluğu (N_d) değerinin gösterildiği Tablo 5' de gösterilmiştir. Tablo 5'te de görüldüğü üzere 12 hafta süre boyunca N_d değerleri azalmaktadır.

Tablo 5 .Hücelere ait verici yoğunluğunun (N_d) $1/C^2$ grafiklerinden hesaplanmış değerleri

Hafta	Uygulama	N_d (cm ⁻³) x10 ¹⁵
1	Isı	2.22
	360 nm	1.53
	260 nm	1.08
2	Isı	2.15
	360 nm	1.27
	260 nm	1.02
3	Isı	2.03
	360 nm	1.14
	260 nm	0.94
4	Isı	1.96
	360 nm	0.93
	260 nm	0.85
5	Isı	1.95
	360 nm	0.72
	260 nm	0.76

Tablo 5 (devam). Hücelere ait verici yoğunluğunun (N_d) $1/C^2$ grafiklerinden hesaplanmış değerleri

Hafta	Uygulama	N_d (cm^{-3}) $\times 10^{15}$
6	Isı	1.85
	360 nm	0.68
	260 nm	0.61
7	Isı	1.74
	360 nm	0.60
	260 nm	0.55
8	Isı	1.61
	360 nm	0.57
	260 nm	0.50
9	Isı	1.52
	360 nm	0.53
	260 nm	0.45
10	Isı	1.51
	360 nm	0.50
	260 nm	0.38
11	Isı	1.45
	360 nm	0.42
	260 nm	0.32
12	Isı	1.41
	360 nm	0.39
	260 nm	0.30

Tablo 6. Ag kaplama sonrası hücelere ait verici yoğunluğunun (N_d) $1/C^2$ grafiklerinden hesaplanmış değerleri

Hafta	Uygulama	N_d (cm^{-3}) $\times 10^{15}$
1	Isı	1.48
	360 nm	1.28
	260 nm	1.25
2	Isı	1.47
	360 nm	1.27
	260 nm	1.25
3	Isı	1.46
	360 nm	1.27
	260 nm	1.25
4	Isı	1.46
	360 nm	1.27
	260 nm	1.24

Güneş pillerinin karanlık ortam şartlarındaki I-V ölçümü grafiklerinin diyot özelliği gösterdiği bilinmektedir. Hetero yapı içerisindeki I-V ilişkisi diyot denklemi, denklem 33'te verilmiştir.

$$I_d = I_0[\exp(eV / nkT) - 1] \quad (33)$$

Denklemden e elektrik yükü, n idealite faktörü, k Boltzman sabiti, T sıcaklık, I_0 ise doyma akımını göstermektedir. İlgili denklemdeki iki tarafında logaritması ve V değerine göre türevi alınması ile idealite faktörü elde edilir. İdealite faktörü n , denklemi aşağıda verilmiştir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} \quad (34)$$

12 hafta boyunca UV ışın ve ısı etkisine maruz bırakılan güneş pillerinin aydınlık ortam I-V ölçümlerinden kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) değerleri elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo - 7 -8-9 ve 10'da verilmiştir. Doldurma faktörü (FF) 0 ve 1 aralığında değer almaktadır. Ayrıca bir güneş modülünün kısa devre akımı ve açık devre gerilimine göre işlevini gösteren bir kavramdır.

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (35)$$

$$Verim = \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (36)$$

Tablo 7-8-9 ve 10'da da görüldüğü üzere ısı ve UV ışık etkisine maruz kalan güneş pillerinde kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), doldurma faktörü (FF) değerleri güneş pili bozulmasına bağlı olarak azalmıştır. Fakat Ag iyonları ile kaplanan güneş pillerinde iyileşmeler olduğu ve buna bağlı olarak da güneş pili verimlerinin arttığı görülmüştür.

Tablo 7’ de kontrol güneş piline ait I-V ölçümlerinden elde edilmiş fotovoltaik parametrelerin sayısal değerleri verilmiştir.

Tablo 7. Kontrol güneş pili örneğine ait fotovoltaik veriler

Hafta	I_{sc} (A) ($\times 10^{-3}$)	V_{oc} (V)	FF ($\times 10^{-1}$)	Verim (%)
1	6.72	3.28	8.48	1.24
2	6.86	3.25	8.49	1.25
3	6.62	3.22	8.49	1.26
4	6.82	3.29	8.46	1.23
5	6.73	3.31	8.48	1.25
6	6.92	3.30	8.47	1.24
7	6.76	3.28	8.46	1.25
8	6.73	3.26	8.48	1.26
9	6.82	3.32	8.48	1.25
10	6.77	3.30	8.47	1.23
11	6.79	3.28	8.46	1.25
12	6.81	3.27	8.48	1.26

Tablo 7’ dan görüldüğü üzere herhangi bir dış uygulamaya maruz bırakılmayan kontrol güneş pilinin fotovoltaik değerlerinde önemli ölçüde değişimlerin olmadığı görülmektedir.

Tablo 8. 260 nm dalga boyunda aydınlatılmış kaplanmamış ve kaplanmış güneş piline ait fotovoltaik değerler

260 nm				
Hafta	I_{sc} (A)	V_{oc}	FF	Verim
	($\times 10^{-3}$)	(V)	($\times 10^{-1}$)	(%)
1	8.28	3.15	8.63	1.51
2	8.15	3.18	8.33	1.45
3	8.13	3.16	7.76	1.33
4	8.11	3.14	7.60	1.30
5	8.05	3.19	6.93	1.19
6	8.03	3.16	6.32	1.07
7	8.00	3.15	5.67	0.96
8	7.76	3.20	5.49	0.91
9	8.44	3.22	4.93	0.79
10	7.32	3.22	4.82	0.76
11	7.03	3.19	4.09	0.61
12	7.02	3.21	3.91	0.59
Ag kaplama sonrası				
1	8.14	3.14	4.85	0.92
2	8.10	3.21	4.82	0.91
3	8.05	3.22	4.83	0.91
4	7.86	3.30	4.78	0.90

Tablo 8 incelendiğinde günde 1 saat olmak üzere 12 hafta boyunca 260 nm dalga boyuna maruz bırakılmış güneş pili örneklerinin kısa devre akım değerinde (I_{sc}), % 15.21, doldurma faktöründe (FF) %54.46, ve verim değerinde % 60.92 düşüşler görünürken, açık devre gerilimi (V_{oc}) değerinde % 1.90 artışların olduğu görülmektedir. Ag kaplama uygulaması sonrası ise incelenen güneş pili örneklerinde SPR olayının gerçekleşmesi sayesinde geri dönüşüm süreci tamamlanmış olup, kaplama öncesi 12. hafta ile kaplama sonrası 1. hafta değerleri kıyaslandığında I_{sc} değerinde % 15.95, FF değerinde % 24.04, verim değerinde ise % 55.93 artış olmakla birlikte V_{oc} değerinde % 2.18 azalma görülmüştür.

Tablo 9. 360 nm dalga boyunda aydınlatılmış kaplanmamış ve Ag kaplanmış güneş pili örneğine ait fotovoltaik parametre değerleri

360 nm				
Hafta	I_{sc} (A) ($\times 10^{-3}$)	V_{oc} (V)	FF ($\times 10^{-1}$)	Verim (%)
1	4.11	3.14	7.93	0.68
2	4.05	3.13	7.79	0.66
3	4.02	3.11	7.60	0.63
4	4.04	3.05	7.52	0.62
5	4.01	3.10	7.40	0.61
6	4.02	3.15	7.16	0.60
7	4.01	3.15	7.03	0.58
8	3.93	3.15	6.30	0.52
9	4.00	3.16	5.88	0.49
10	3.74	3.19	5.45	0.43
11	3.58	3.20	4.66	0.35
12	3.57	3.21	4.64	0.34
Ag kaplama sonrası				
1	4.13	3.60	4.18	0.45
2	4.08	3.58	4.13	0.44
3	4.07	3.61	4.11	0.44
4	4.05	3.63	4.09	0.43

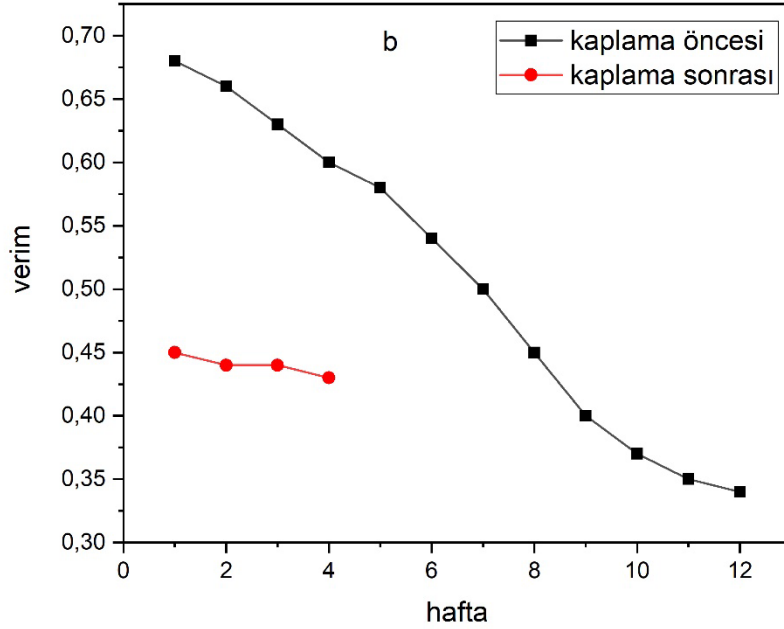
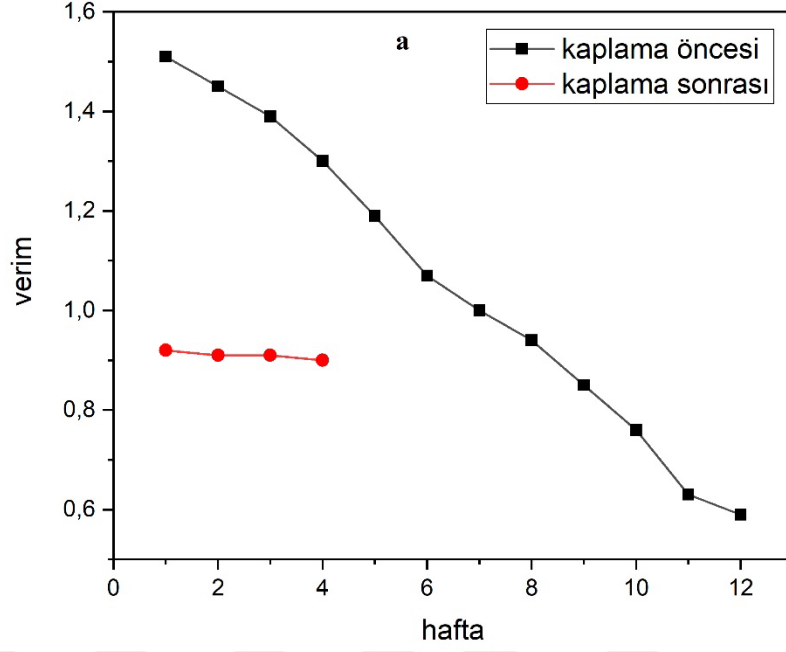
Tablo 9 incelendiğinde 360 nm dalga boyuna maruz bırakılmış güneş pili örneklerinin kısa devre akım değerinde (I_{sc}), % 13.13, doldurma faktöründe (FF) % 41.48 ve verim değerinde % 50.00 düşüş gözlenirken açık devre gerilimi (V_{oc}) değerinde %2.22 artış olduğu görülmüştür. Ag kaplama sonrası incelenen güneş pili örneklerinde geri dönüşüm süreci tamamlanmış olup kaplama öncesi 12. hafta ile kaplama sonrası 1. hafta değerleri kıyaslandığında I_{sc} değerinde % 15.68, verim değerinde % 32.35 ve V_{oc} değerinde % 12.14 artış görülmekle beraber, FF değerinde % 9.91 azalma olduğu görülmüştür.

Tablo 10. 60°C ısıtılmış kaplanmamış ve Ag kaplanmış güneş pili örneğine ait fotovoltaiik parametrelerin değerleri

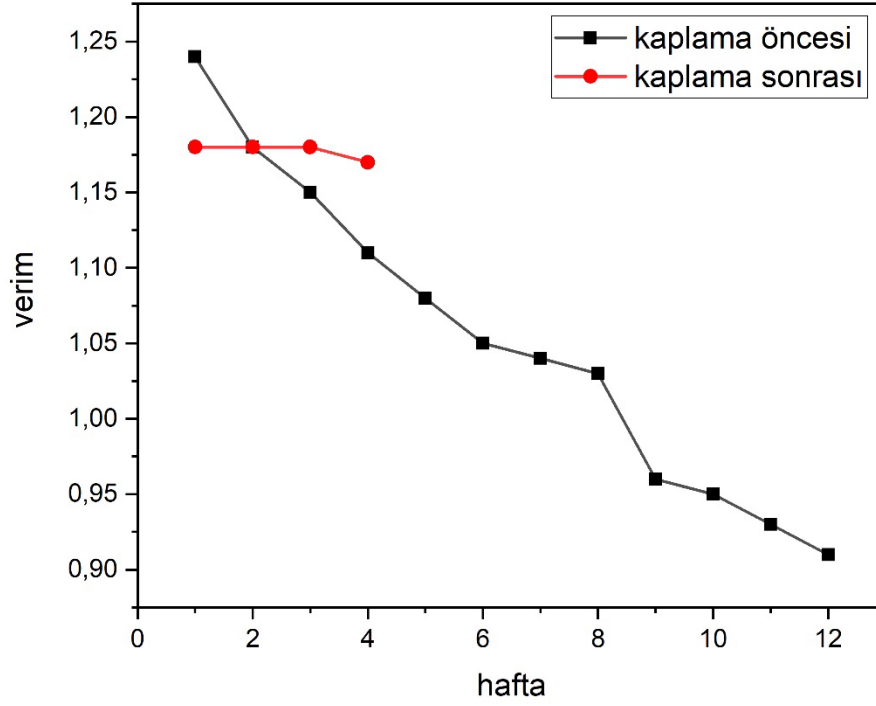
Isı				
Hafta	I_{sc} (A) (x10⁻³)	V_{oc} (V)	FF (x10⁻¹)	Verim (%)
1	6.71	3.30	8.36	1.24
2	6.54	3.25	8.27	1.18
3	6.39	3.29	8.19	1.15
4	6.26	3.31	8.01	1.11
5	6.20	3.28	7.95	1.08
6	6.12	3.26	7.87	1.05
7	6.07	3.29	7.82	1.04
8	5.97	3.32	7.74	1.03
9	5.72	3.35	7.95	0.96
10	5.68	3.36	7.87	0.95
11	5.57	3.38	7.82	0.93
12	5.50	3.38	7.74	0.91
Ag kaplama sonrası				
1	6.10	3.52	7.54	1.19
2	6.08	3.53	7.52	1.18
3	6.06	3.55	7.50	1.18
4	6.03	3.57	7.48	1.17

Tablo 10 incelendiğinde 60°C ısıtılmış ısı etkisine maruz bırakılmış kaplanmamış güneş pili örneklerinin kısa devre akım değerinde (I_{sc}) % 18.00, doldurma faktöründe (FF) % 7.41 ve verim değerinde % 26.61 düşüşler görülürken açık devre gerilimi (V_{oc}) değerinde % 2.42 artış gözlenmiştir. Ag kaplama sonrası ise incelenen güneş pili örneklerinde geri dönüşüm süreci tamamlanmış olup kaplama öncesi 12. hafta ile kaplama sonrası 1. hafta değerleri kıyaslandığında I_{sc} değerinde % 10.90, verim değerinde % 30.76, V_{oc} değerinde ise % 4.14 artış görülürken FF değerinde %2.58 azalma görülmüştür.

Şekil 42'de 260 nm, 360 nm dalga boylu UV ışınına ve 60°C ısıtılarak ısı uygulamasına maruz bırakılmış güneş pillerinin Ag kaplama öncesi ve sonrasına ait 12 haftalık verim değerlerinde gerçekleşen değişimlerin grafikleri verilmiştir.



Şekil 42. a) 260 nm, b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60 °C Isıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin kaplama öncesine ve sonrasına ait verim değerleri grafiği



Şekil 42 (devam). a) 260 nm, b) 360 nm dalga boylu UV ışınına ve c) 60 °C Isıl uygulamaya maruz bırakılmış güneş pillerinin kaplama öncesine ve sonrasına ait verim değerleri grafiği

Doğru besleme rejiminde elde edilen $\ln(I)$ -V grafiğinin çizgisel eğim kısmı $dV/d(\ln(I))$ sonucunu vermektedir. Aşağıda verilen denklem(37) ile aygıtın doyum akımı (I_0) hesaplanabilir. Denklemden verilen q elektronun yükünü, k Boltzman sabitini, T ise sıcaklık değerini ifade etmektedir.

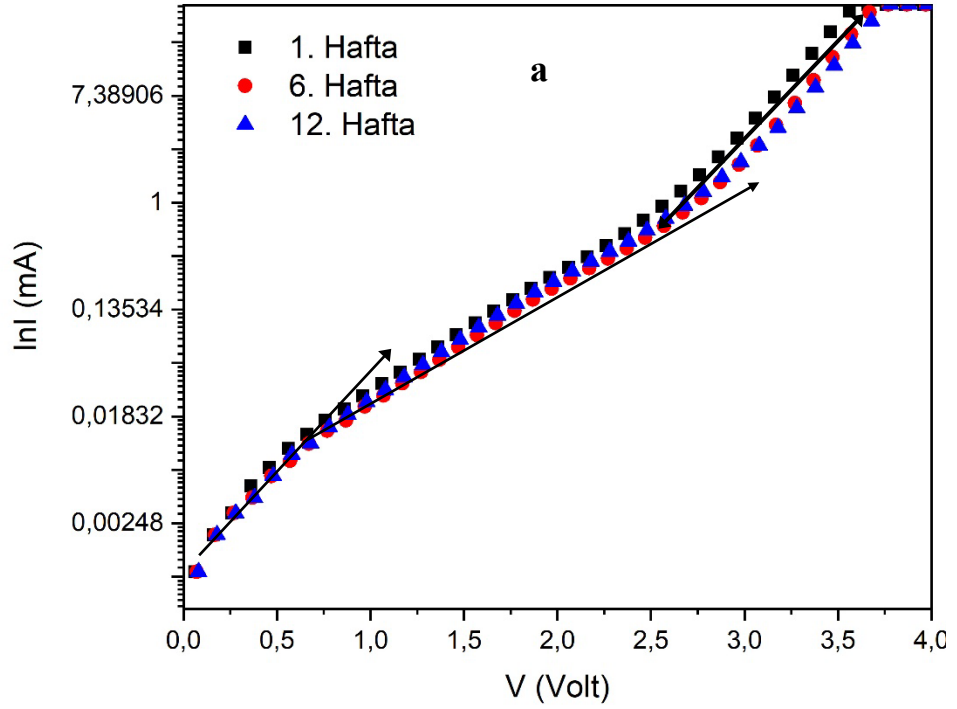
$$I_0 = AA^*T^2 \exp(-q\phi_b / kT) \quad (37)$$

Burada $A = (0.0016 \text{ m}^2)$ güneş pili alanı, A^* Richardson sabitidir ($112 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$)

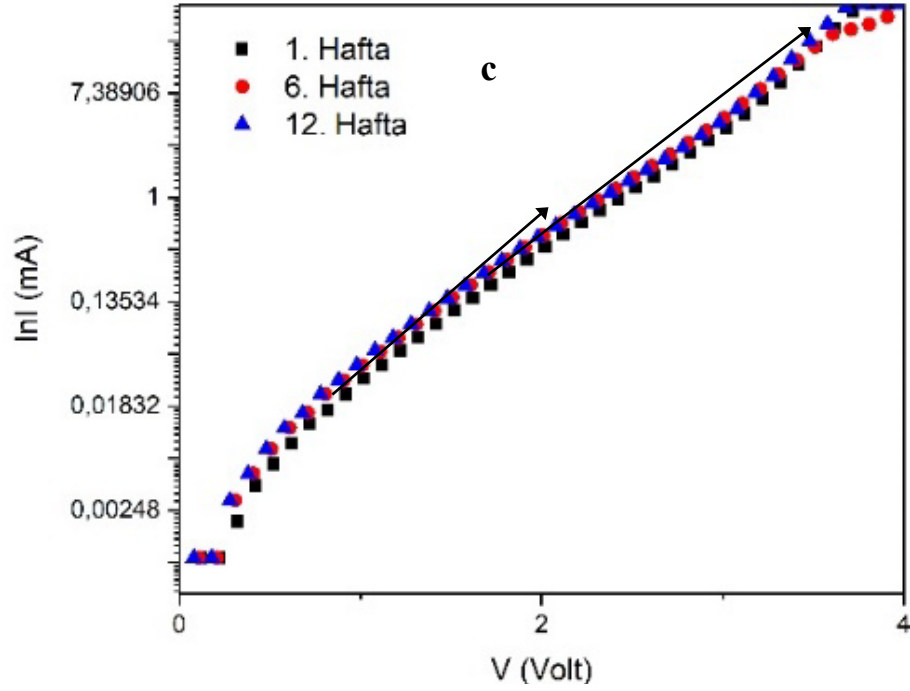
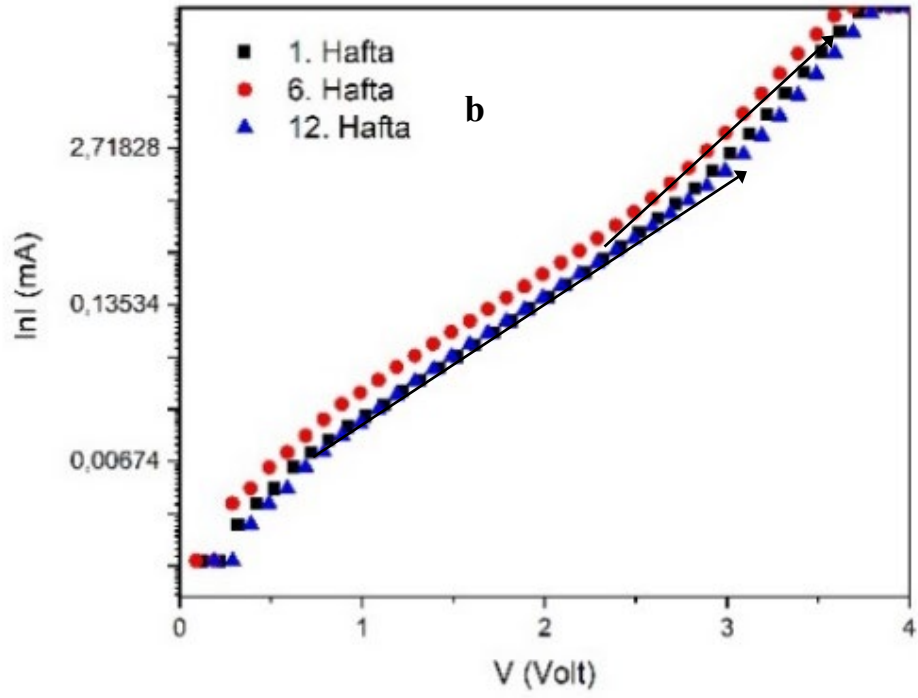
Denklem 37'nin logaritmasının alınması ile ϕ_b engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (38)$$

Şekil 43'de UV ışınlarına (260 nm, 360 nm) ve (60°C) ısı etkisine tabi tutulan güneş pillerine ait 1., 6. ve 12. haftalarda ölçülen yarı logaritmik I-V grafikleri verilmiştir.



Şekil 43. a) 260 nm, b) 360 nm dalga boyulu UV ışınına ve c) 60 °C ısı uygulamasına maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık ln(I)-V grafiği



Şekil 43 (devam). a) 260 nm, b) 360 nm dalga boylu UV ışınma ve c) 60 °C ısı uygulamasına maruz bırakılmış güneş pillerinin 1, 6 ve 12 haftalık ln(I)-V grafiği

Şekil 43 incelendiğinde güneş pillerine ait ln(I)-V grafiklerinin farklı açılarda dağılım gösterdiği görülmektedir. 360 nm dalga boyuna ve 60°C ısı etkisine tabi tutulan güneş pillerinin ln(I)-V grafiğinin ağırlıklı olarak iki farklı açıda değiştiği

görülmektedir. Bu durum söz konusu güneş pillerinin iki farklı akım iletim mekanizmasına (termoionik emisyon (TE) ve tünelleme emisyonu) sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte 260 nm dalga boyu ışınlarına maruz bırakılan güneş pili ln(I)-V grafiğinin üç farklı açıda dağılım sergilediği görülmektedir. Bu durumun, güneş pilinin üç farklı (termoionik emisyon mekanizması (TE), tünelleme alan emisyon mekanizması ve rekombinasyon) akım iletim mekanizmasına sahip olduğundan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. 260 nm dalga boyu ile aydınlatılmış güneş pilinin daha fazla iletim mekanizması sergilemesinin başlıca nedeni, uygulama esnasında hetero geçitin temas bölgesinde oluşan yüzey durum yoğunluğundaki (N_{ss}) artışlardan kaynaklanmaktadır. Tablo 11’de incelenen güneş pillerine ait idealite faktörü(n), engel potansiyeli (ϕ_b) ve doyuma akımı (I_0) değerlerinin zamana bağlı olarak hesaplanmış verileri gösterilmiştir.

Tablo 6. Güneş pillerine ait kaplama öncesi ve sonrası idealite faktörü(n), engel potansiyeli (ϕ_b) ve I_0 değerleri

Hafta	Dış etki	n	(ϕ_b) (eV)	I_0 (A)x10 ⁻⁶
1	Isı	2.53	1.80	5.15
	360 nm	2.58	1.81	4.91
	260 nm	2.63	1.85	4.79
2	Isı	2.54	1.79	4.56
	360 nm	2.59	1.80	4.69
	260 nm	2.66	1.84	4.32
3	Isı	2.57	1.75	4.32
	360 nm	2.61	1.74	4.46
	260 nm	2.68	1.82	4.23
4	Isı	2.60	1.70	4.06
	360 nm	2.63	1.72	4.24
	260 nm	2.70	1.80	4.18
5	Isı	2.79	1.65	3.87
	360 nm	2.65	1.70	4.14
	260 nm	2.71	1.76	4.02
6	Isı	2.80	1.59	3.63
	360 nm	2.70	1.61	4.01
	260 nm	2.74	1.61	3.97
7	Isı	2.81	1.50	3.48
	360 nm	2.74	1.55	3.86
	260 nm	2.76	1.60	3.69

Tablo 11 (Devam). Güneş pillerine ait kaplama öncesi ve sonrası idealite faktörü(n), engel potansiyeli (ϕ_b) ve I_0 değerleri

Hafta	Dış etki	n	ϕ_b (eV)	I_0 (A) x10 ⁻⁶
8	Isı	2.82	1.43	3.32
	360 nm	2.81	1.48	3.65
	260 nm	2.79	1.59	3.49
9	Isı	2.88	1.35	3.08
	360 nm	2.84	1.40	3.32
	260 nm	2.85	1,43	3.21
10	Isı	2.95	1.19	2.74
	360 nm	2.87	1.28	2.15
	260 nm	2.90	1.38	3.89
11	Isı	3.11	1.06	2.41
	360 nm	2.98	1.18	3.02
	260 nm	2.97	1.37	2.74
12	Isı	3.16	1.01	2.25
	360 nm	3.03	1.07	2.86
	260 nm	3.05	1.29	2.65
Ag Kaplama sonrası				
1	Isı	2.76	1.65	2.38
	360 nm	2.95	1.76	2.97
	260 nm	2.71	1.88	2.75
2	Isı	2.77	1.64	2.25
	360 nm	2.96	1.75	2.89
	260 nm	2.72	1.87	2.68
3	Isı	2.78	1.63	2.23
	360 nm	2.97	1.73	2.82
	260 nm	2.73	1.85	2.62
4	Isı	2.79	1.62	2.20
	360 nm	2.98	1.72	2.79
	260 nm	2.75	1.84	2.57

Tablo 11’ de güneş pillerinin idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b) doyma akımı (I_0) değerleri verilmiştir. Tablo 11’ de de görüldüğü gibi ısı ve UV ışık etkisine maruz bırakılan güneş pillerinde idealite faktörü değerlerinin yükselerek bozulduğu, engel yüksekliği ve doyma akımı değerlerinde ise azalmaların olduğu görülmüştür. Burada idealite faktöründeki artışın sebebi temas bölgesinde yüzey durum yoğunluğundaki (N_{SS}) artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu artışın nedeni dış uygulamalar sonucu temas bölgesinde kimyasalların kontrolsüz hareketliliğinden kaynaklanmaktadır. Dış etkilere bağlı olarak engel yüksekliğindeki (ϕ_b) değişimler

kimyasalların kontrolsüz hareketliliği sonucu arındırılmış bölgenin genişliğindeki artıştan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Yukarıda verilen tablo incelendiğinde güneş piline ait karakteristik parametrelerde en büyük değişimlerin 260 nm dalga boyunda ışınlandırılmış aygıtta gerçekleştiği görülmektedir.

İdealite faktörü bozulmaya bağlı olarak artarak ideal 1 değerinden uzaklaşır ve engel yükseklik değeri düşer. Öte yandan engel yüksekliğinin düşmesi arındırılmış bölgenin genişliğinin artması anlamına gelmektedir. Bu süreçte aygıtın doyma akımı (I_0), arındırılmış bölgenin genişliğine bağlı olarak azalır. Aygıt bünyesinde gerçekleşen bu fiziksel süreç sonucunda güneş pilinin yüzey durum yoğunluğunda (N_{ss}) farklılıklar meydana getirir. Yüzey durum yoğunluğu ile ilgili denklem 39’da verilmiştir.

$$N_{ss} = \left(2\varepsilon_0 \varepsilon N_d \frac{\phi_b}{q} \right)^{1/2} \quad (39)$$

Burada ε_0 havanın dielektrik sabitini, ε silisyumun dielektrik sabitini, N_d verici yoğunluğunu, ϕ_b eklem engel potansiyelini q ise elektron yükünü ifade eder.

Verici yoğunluğu değerleri Tablo 5’ de verilmişti. Denklem 39’dan hesaplanan N_{ss} değerleri ve deplasman bölgesinin genişliği (W) değeri ise Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Güneş pilleri N_{ss} ve deplasman bölgesini genişliği (W) değerleri

hafta	N_{ss} (cm ⁻³) (x10 ¹²)	W (μm)	N_{ss} (cm ⁻³) (x10 ¹²)	W (μm)	N_{ss} (cm ⁻³) (x10 ¹²)	W (μm)
	260 nm		360 nm		Isı	
1	1.59	1.47	1.90	1.24	2.31	1.04
6	1.12	1.83	1.19	1.75	1.98	1.07
12	0.71	2.33	0,74	1.89	1.64	1.16

6. SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında piyasadan temin edilen Emin marka no: EM5063 modelli güneş pilleri UV dalga boyu (260nm ve 360 nm) ışıklara ve 60 °C ısıtma işlemlerine günde 1 saat olmak üzere 12 hafta boyunca maruz bırakıldı ve karakteristik özelliklerindeki değişimler incelendi. Deneylerde kullanılan güneş pillerinin I-V ve C-V ölçümleri yapılarak dış uygulamaya bağlı olarak örneklerde meydana gelen değişimler tespit edildi. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en hızlı bozulmanın $\lambda=260$ nm dalga boyunda ısıtılmış güneş pili örneğinde gerçekleştiği anlaşıldı. Daha sonra sırası ile karakteristik özelliklerde bozulmaların, $\lambda =360$ nm ve 60°C ısıtılmış örneklerde olduğu tespit edildi. Tüm dış kaynaklara bağlı olarak örnekler üzerine uygulanan etkilerle; yüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), engel yüksekliği (ϕ_b), verici yoğunluğu (N_d) ve verim değerlerinde azalmalar olurken kapasitans (C) ve deplasman bölgesinde genişliğin (W) arttığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada $\lambda=260$ nm, $\lambda =360$ nm ve 60°C etkisine maruz bırakılmış güneş pillerinde farklı bozulmaların olmasının sebebi, dış etkilerin enerji birimine çevirildiğinde farklı değerler vermesidir. Buna bağlı olarak en az bozulmanın 60°C ($E= 0.0287$ eV) ısı etkisine maruz bırakılmış güneş pilinde, sonrasında $\lambda =360$ nm ($E=3.44$ eV) dalga boyu ile aydınlatılmış güneş pilinde, en çok bozulmanın ise $\lambda= 260$ nm ($E=4.77$ eV) dalga boyunda aydınlatılan güneş pilinde olduğu görülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında soğuk altlık yöntemi kullanılarak incelenen güneş pili örneklerinin yüzeyleri 200 K altlık sıcaklığında Ag katmanı ile kaplandı ve güneş pillerine plazmonik özellik kazandırıldı. Bu yeni uygulama ile güneş pillerinin fotovoltajik parametrelerinde iyileşmeler görüldü. Örneğin $\lambda=260$ nm, $\lambda =360$ nm ve 60°C etkisine maruz bırakılmış ve Ag katmanı ile kaplanmış güneş verim değerlerinde gerçekleşen iyileşmelerin sırası ile %62.72, %47.14 ve %27.77 şeklinde olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında güneş pilleri üzerine gerçekleştirilen yeni uygulama ile hem güneş pillerinin hem de diğer elektronik aygıtların zamanla çöplüklerde birikmesinin bir nebze olsa önüne geçilmiş olabileceği görülmüştür.

Bu tez çalışması 4. Uluslararası Kapadokya Bilimsel Araştırma Kongresi'nde sunulmuştur.

KAYNAKÇA

- Akat, E. (2012). *Katıhal Fiziği Temelleri*. Papatya Yayıncılık, 2. Baskı, ISBN: 978-605-4220-16-8, 574s., 328-332.
- Akbarzadeh, A. and Wadowski T. (1996). Heat-pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. *Appl Therm Eng*, 16(1), 81–7. [https://doi.org/10.1016/1359-4311\(95\)00012-3](https://doi.org/10.1016/1359-4311(95)00012-3).
- Ardağ, Y. (2012). *Güneş Pili Karakteristiklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Aydoğan, Ş. (2011). Katıhal Fiziği. Nobel Yayın, 1. Baskı, ISBN: 978-605-395-431-6, 615s., 221-230.
- Azaza, M., Wallin, F. (2017). Multi objective particle swarm optimization of hybrid micro-grid system: A case study in Sweden. *Energy*, 123,108–118. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.149>.
- Bacaksiz, E., Basol, B.M., Altunbaş, M., Novruzov, V., Yanmaz, E. and Nezir, S.(2007). Effects of substrate temperature and post-deposition anneal on properties of evaporated cadmium telluride films. *Thin Solid Films*, 515(5), 3079-3084. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.08.026>
- Başay, V., Eken, R., Yılmaz, G. (2019). Orta yükseklikte dağlık bölgelerde kurulan güneş enerjisi santralinde fotovoltaik modüllerin yaşlanmasının araştırılması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 341–352.
- Battaglia, C., Cuevas, A., and De Wolf, S. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. *Energy and Environmental Science*, 9(5), 1552–1576. <https://doi.org/10.1039/c5ee03380b>
- Bigorajski, J. and Chwieduk, D. (2018). Analysis of a micro photovoltaic/thermal-PV/T system operation in moderate climate. *Renewable Energy*, 137, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.116>.
- Caferov, T.,1998. *Yarıiletken Fiziği* 1. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım Yayın Merkezi, İstanbul.
- Demirci, F. (1996). *Fotovoltaik güneş pillerinin çalışmasını etkileyen dış faktörlerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 58 s.
- Dong, Nguyen., Yasuaki, Ishikawa. (2020). Elucidating the mechanism of potential induced degradation delay effect by ultraviolet light irradiation for p-type crystalline silicon solar cells. *Solar Energy*, 199,55-62. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.034>

- Engin, R. (1995). Güneş pilleri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları*, No:3, 148-151.
- Hasan, M.A., Sumathy, K. (2010). Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2845–2859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.011>.
- Jackson, J.D. (1962). 10.8 Plasma Oscillations. *Classical Electrodynamics*
- Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
- Katkar, A.A., Shinde, N.N., Patil, P.S. (2011). Performance & evaluation of industrial solar cell w.r.t. temperature and humidity. *IJRMET*, 1(1), 69–73.
- Kempe, M. (2010). Ultraviolet light test and evaluation methods for encapsulants of photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94(2010), 246-253. <https://10.1016/j.solmat.2009.09.009>
- Kıncay, O. Bekiroğlu, N. Yumurtacı, Z. (2007). *Güneş Pilleri*, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 1.bölüm s.1-36.
- Kittel, C. (1996). *Katılmal Fiziğine Giriş*. Palme Yayınları, 8. Baskı, ISBN: 978-605-355-225-3, 680s., 434-450.
- Köse, E. (2018). Fotovoltaik sistemlerin sıcaklığa bağlı enerji verimliliği performansının analiz edilmesi. *Dünya Multidisipliner Araştırmalar Dergisi*, 2018 (2), 39-53. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumad/issue/52685/694667>.
- Küpeli, A. (2005). *Güneş pilleri ve verimleri*. Yüksek Lisans Tezi. Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 146 s.
- Leijtens, T. et al. (2013). Overcoming ultraviolet light instability of sensitized TiO₂ with meso-superstructured organometal tri-halide perovskite solar cells. *Nature Communications*, 4(2885), 1-8. <https://doi.org/10.1038/ncomms3885>.
- Liu, F., Jiang, L., & Yang, S. (2014). Ultra-violet degradation behavior of polymeric backsheets for photovoltaic modules. *Solar Energy*, 108, 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.06.027>.
- Manir, M., Nevruzoglu, V., & Tomakin, M. (2021). The investigation of stability of n-CdS/p-Cu₂S solar cells prepared by cold substrate method. *Semiconductor Science And Technology*, 36(3), 035021. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/abe05c>
- Navruz, T.S. (2008). *Arabant yapılı güneş pillerinde verim optimizasyonu*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Nevruzoglu, V., Tomakin, M., Manir, M., Demir, S., Beriş, F. Ş., & Cetin, A. E. (2023). Enhancing Label-Free Biosensing With Cryogenic Temperature-

Induced Plasmonic Structures. *Plasmonics*, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01963-1>

- Nevruzoğlu, V., Bal Altuntaş, D., & Tomakin, M. (2020). Cold substrate method to prepare plasmonic Ag nanoparticle: deposition, characterization, application in solar cell. *Applied Physics A*, 126, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-3433-8>
- Omar, M. A. (1975). *Elementary Solid State Physics*. Addison-Wesley Publishing Company Inc, 2. Baskı, ISBN: 978-020-160-733-8, 465s., 215-224.
- Öncel, Y. (2014). *Kimyasal banyo yöntemiyle elde edilen Cd_{1-x}Cox S filmlerin bazı yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi.Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye.
- Özden, Ş. (2015). *Farklı sürelerle CdCl₂ ortamında ısıtılmış ince film CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel karakterizasyon yöntemleriyle incelenmesi*. Doktora Tezi. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, Türkiye.
- Öztürk, H. ve Kaya, D. (2013). *Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji*. Umuttepe Yayınları, 1. Baskı, ISBN:978-605-5100-00-1, 417s., 70-75.
- Pines, D., Bohm, D. (1953). A collective description of electron interactions: II. collective vs. individual particle aspects of the interactions. *Phys. Rev*, 92(3), 1-17. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.338>.
- Shahid, H., Butt, M. S., Rashid, U., Anwer, H., Obaid, H. M., Butt, F. A., Adnan, M. (2022). Design and implementation of an active optimized optical green energy generation system using ultraviolet solar irradiance. *Optik*, 258, 168929. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168929>.
- Shur, M. (2005). *Semiconductors*. Politeknik Enstitüsü Yayın.
- Sze M.S. and Kwog K.N. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons Inc, 2.Baskı ISBN: 978-047-114-323-9, 832s., 105-120.
- Şahan, M., Şahan, H., Yeğingil, İ. (2010). Yıllık toplam ve ultraviyole (UV) güneş enerjisi Verilerinin Ölçülmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 10-16. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sdufenbed/issue/20791/221940>.
- Tomakin, M., Altunbaş, M. and Bacaksız, E. (2011). The influence of substrate temperature on electrical properties of Cu/Cds/SnO₂ Schottky diode. *Physica B: Condensed Matter*, 406(23), 4355-4360. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.08.067>.

- Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksiz, E. and Çelik, Ş. (2012). Current transport mechanism in cds thin films prepared by vacuum evaporation method at substrate temperatures below room temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14(2), 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.160>.
- URL-1, (2023). <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> (3 Nisan 2023).
- URL-2,(2023).http://golcukmyo.kocaeli.edu.tr/dosyalar/dersNotlari/fahrettin/5otomotiv_elektronigi.pdf. (5 Mayıs 2023).
- URL-3, (2023). <https://barakli.sakarya.edu.tr/sites/barakli.sakarya.edu.tr/file/h1.pdf>. (5 Mayıs 2023).
- URL-4, (2023). <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/ozcanh/71124/G%C3%BCne%C5%9F%20Pilleri.pdf>. (5 Mayıs 2023).
- URL-5, (2023). <https://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/ultraviyole-isik-nedir-127004/> (5 Mayıs 2023).
- Yapıcı, C., Aslantaş, N. (2008). Amorf malzemeler. *Sakarya üniversitesi Mühendislik Fakültesi metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Dergisi*, s.1-10.
- Yazıcı, D. (2007). *Fosfin metal komplekslerinin fiziksel özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Yeo, Z., Ling, Z. P., Rodriguez-Gallegos, C. D., Lim, Q., So, Y. H., & Wang, S. (2022). Status review and future perspectives on mitigating light-induced degradation on silicon-based solar cells. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 159, 112223. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112223>.
- Zeng, S., Yu, X., Law, W. C., Zhang, Y. (2013). Size dependence of Au Np-enhanced SPR based and differential phase measurement. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 176 (2013), 1128-1133. 10.1016/j.snb.2012.09.073.