

**FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag TABAKALARI VE
PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCREİNİN STRES
FAKTÖRLERİ ALTINDA KARAKTERİZASYONU**

Ayşegül TAŞÇIOĞLU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag TABAKALARI VE PEROVSKİT GÜNEŞ
HÜCRESİNİN STRES FAKTÖRLERİ ALTINDA KARAKTERİZASYONU**

Ayşegül TAŞÇIOĞLU
0000-0002-1771-358X

Prof. Dr. Ali VARDAR
(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILMAZ
(2. Danışman)

DOKTORA TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ayşegül TAŞÇIOĞLU tarafından hazırlanan “FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag Tabakaları ve Perovskit Güneş Hücresinin Stres Faktörleri Altında Karakterizasyonu” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : (Prof. Dr. Ali VARDAR)
İkinci Danışman : (Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILMAZ,
Burdur Mehmet Akif Ersoy
Üniversitesi)

Başkan :	Prof. Dr. Ali VARDAR 0000-0001-6349-9687 Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Prof. Dr. Nazmi İZLİ 0000-0002-2084-4660 Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Prof. Dr. Tolga TİPİ 0000-0002-1090-3639 Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Doç. Dr. Osman GÖKDOĞAN 0000-0002-4933-7144 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Muzaffer ŞAĞBAN 0000-0001-8820-5622 Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü Optisyenlik Programı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım
Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Ayşegül TAŞÇIOĞLU

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı
Tarih

Öğrencinin Adı-Soyadı
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag TABAKALARI VE PEROVSKİT GÜNEŞ HÜCRESİNİN STRES FAKTÖRLERİ ALTINDA KARAKTERİZASYONU

Ayşegül TAŞÇIOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali VARDAR
2. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILMAZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan Güneş enerjisi büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak yenilenebilir enerjilerden elektrik enerjisi üreten sistemler ve teknolojiler sürdürülebilir kullanım için yüksek verim ve düşük maliyetleri karşılamak noktasında yetersiz kalmaktadır. Güneş hücrelerinin üretimindeki teknolojilerin ilerlemesi ile yeni nesil güneş hücreleri kendilerine bu alanda yer bulmaya başlamışlardır. Bu yeni nesil güneş hücreleri arasında olan perovskit güneş hücreleri düşük maliyetleri ve yüksek verimleriyle bilim insanlarının dikkatini çekmektedir. Ancak perovskit güneş hücrelerinin piyasada ticari olarak bulunamamasının sebebi üretimlerinden kısa bir süre sonra bozunmaları ve verimlilik değerlerini kaybetmeleridir.

Bu tez çalışmasında; FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/C₆₀/Ag konfigürasyonunda üretilmiş olan perovskit güneş hücrelerinin hem hücre hem de tabaka bazlı bozunmaları incelenmiştir. Bu bağlamda tabakalardan CH₃NH₃PbI₃ ve C₆₀ termal buharlaştırma yöntemi ile TiO₂ tabakası ise sputter (saçırma) yöntemi ayrı ayrı cam taban malzemeler üzerine büyütülmüştür. Üretilen malzemelerin yapısal karakterizasyonu için XRD (X-ışını kırınımı) desenlerinin analizleri, yüzey morfolojisi analizleri için Taramalı Elektron Mikroskopu, optik absorpsiyon ve ışıl geçirgenlik için UV-Vis Soğurma Spektroskopisi analizleri yapılmıştır. Üretilen malzemelerin bozunma mekanizmaları laboratuvar atmosferi, vakum atmosferi, ışık banyosunda, ultraviyole ışık altında ve oksijen gazı altında yaşlandırılmış durumları için elektriksel karakterizasyon yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Elektriksel karakterizasyon yöntemleri olarak ışık akısına bağlı, sıcaklığa bağlı, zamana bağlı, karanlık ve aydınlık iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Stres faktörleri altında tabakalarda elde edilen sonuçlar ile hücrelerde elde edilen sonuçlar arasında korelasyon kurularak bozunmanın etkilerine ışık tutulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Perovskit güneş hücreleri, kararsızlık, fiziksel saçırma yöntemi, termal buharlaştırma, TiO₂, CH₃NH₃PbI₃, C₆₀

2022, ix + 142 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

CHARACTERIZATION OF FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag LAYERS AND PEROVSKITE SOLAR CELL UNDER STRESS FACTORS

Ayşegül TAŞÇIOĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali VARDAR
2nd Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILMAZ

Solar energy, which is one of the renewable energy sources, has a great potential. However, systems and technologies that produce electrical energy from renewable energies are insufficient to meet high efficiency and low costs for sustainable use. With the advancement of technologies in the production of solar cells, new generation solar cells have begun to find a place for themselves in this field. Perovskite solar cells, which are among these new generation solar cells, attract the attention of scientists with their low cost and high efficiency. However, the reason why the perovskite solar cells are not commercially available in the market is that they degrade shortly after their production and lose their efficiency values.

In this thesis study; both cell and layer-based degradation of perovskite solar cells produced in FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/C₆₀/Ag configuration were investigated. In this context, CH₃NH₃PbI₃ and C₆₀ are produced by thermal evaporation method and TiO₂ layer is produced by sputter method separately on glass substrates. XRD (X-ray Diffraction) analyses were performed for the structural characterization of the produced materials. Scanning Electron Microscope analyzes (Scanning Tunneling Microscope) were performed for surface morphology analyzes. UV-Vis Absorption Spectroscopy analyzes were performed for optical absorption and light transmittance. The degradation mechanisms of the produced materials were characterized by electrical characterization methods for their aged conditions in laboratory atmosphere, vacuum atmosphere, light soaking, ultraviolet (UV) light application and oxygen application. As electrical characterization methods, light flux-dependent, temperature-dependent, time-dependent, dark and light conductivity measurements were carried out. The effects of degradation were evaluated by establishing a correlation between the results obtained in the layers under stress factors and the results obtained in the cells.

Key words: Perovskite solar cell, instability, sputter, thermal evaporation, TiO₂, CH₃NH₃PbI₃, C₆₀

2022, ix + 142 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren çok değerli doktora tez danışman hocam Prof. Dr. Ali VARDAR'a ve laboratuvar imkanlarını bana açarak karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan çok değerli ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmamda beni yönlendiren ve desteğini esirgemeyen Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Adem KORKMAZ'a, Rektör Yardımcısı Prof. Dr. Hüseyin DALGAR'a, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü Öğretim Üyesi değerli Müdürüm Prof. Dr. Şenol GÜZEL'e, ürettiğim malzemelerin yapısal ve morfolojik ölçümlerinde bana destek olan Bilimsel ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü Prof. Dr. Fatih Mehmet EMEN'e, Nanobilim ve Nanoteknoloji Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Neslihan KAYA KINAYTÜRK'e, Süleyman Demirel Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Murat KALELİ'ye, Dr. Öğr. Üyesi Murat KOÇ'a, Öğr. Gör. Dr. Salih AKYÜREKLİ'ye, Ramazan ALTINKAYA'ya ve laboratuvar çalışmalarım sırasında her zaman yanımda olan Enerji Sistemleri Yüksek Mühendisi Ayşegül ÇOŞĞUN, Asuman KOÇU ve Fatma Nur SARIKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı hazırlarken her zaman bana destek olan değerli kuzenlerim Prof. Dr. Aşkın KESER'e ve Doç. Dr. Hilal YILDIRIR KESER'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında gösterdikleri sonsuz sevgi, destek ve anlayış için çok kıymetli babam Ahmet TAŞÇIOĞLU'na, çok kıymetli annem Canan TAŞÇIOĞLU'na ve değerli kardeşim Öğr. Gör. Ceyda TAŞÇIOĞLU'na gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma “Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)” tarafından 119F033 numaralı ‘Perovskit (CH₃NH₃PbI₃) İnce Filmin Termal Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Üretilmesi ve Kararsızlık Mekanizmalarının Elektriksel ve Optoelektronik Yöntemler ile Belirlenmesi’ isimli Tübitak (1002) projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan bazı ekipmanlar, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı'na bağlı olarak “Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşması Programı: Burdur İlinde Sektörel Rekabet Gücünün Artırılması / Enerji” adlı 2017K12-41003-12 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Ayşegül TAŞÇIOĞLU
.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM	14
3.1. Radyo Frekansı (RF) Saçtırma Yöntemi	14
3.2. İkincil Isıl İşlem (Tavlama)	18
3.3. Metal Buharlaştırma	19
3.4. Termal Buharlaştırma Sistemi	22
3.5. Karakterizasyon Teknikleri	29
3.5.1. Yapısal Karakterizasyonlar.....	37
3.5.1.1. X-ışını Kırınımı (XRD)	37
3.5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	38
3.5.1.3. Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi	39
3.5.2. Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyonlar	43
3.5.3. Tabakalara Uygulanacak Stres Faktörleri.....	48
3.5.3.1. Laboratuvar Atmosferi.....	50
3.5.3.2. Vakum Atmosferi	50
3.5.3.3. Işık Banyosu	52
3.5.3.4. UV Yaşlandırma	53
3.5.3.5. Oksijen Yaşlandırması.....	55
4. BULGULAR.....	58
4.1. Yapısal Karakterizasyon Bulguları.....	58
4.1.1. XRD Kırınım Analiz Bulguları	58
4.1.2. SEM Analizi Bulguları	61
4.1.2. UV Analizi Bulguları.....	62
4.2. Elektriksel Karakterizasyon Bulguları.....	75
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	133
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	142

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Dedektör alanı
Ag	Gümüş
cm	Santimetre
°C	Sıcaklık
eV	Elektron volt
F (λ)	Işık akısı
g	Gram
G	Işıl yaratma oranı
Isc	Kısa devre akımı
Iph	Işık altındaki akım
Voc	Açık devre voltajı
K	Kelvin
mBar	Milibar
$\mu\tau$	Mobilite yaşam süresi çarpımı
nm	Nanometre
R	Işığın film yüzeyinden yansıma katsayısı
t	İnce film malzemenin kalınlığı
Id	Karanlık altındaki elde edilen akım
V	Volt
W	Watt
QE	Kuantum verimliliği
q	Elektriksel yük
λ	Işığın dalga boyu
A	Optik soğurma katsayısı

Kisaltmalar	Açıklama
CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Metil amonyum kurşun iyodür
C ₆₀	Karbon altmış
DC	Doğru akım
ETL	Elektron geçiş tabakası
FTO	Florin katkılı kalay oksit
HTL	Hole geçiş tabakası
MAI	Metil amonyum iyodür
ND	Nötr yoğunluk filtresi
PbI ₂	Kurşun iyodür
PCE	Güç dönüşüm verimliliği
RF	Radyo frekansı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TiO ₂	Titanyum dioksit
XRD	X-Işını kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayımlanan Güneş hücrelerinin verimliliklerinin karşılaştırılması.....	2
Şekil 2.1. A, B ve X formülünden oluşan temel bir ABX ₃ kübik 3D perovskit yapısının birim hücresi.....	5
Şekil 2.2. Metilamoniyum Kurşun İyodür'ün (MAPbI ₃) yıllara göre güç dönüşüm verimliliği (PCE).....	6
Şekil 2.3. Perovskit güneş hücrelerinin üretim tekniğine bağlı olarak sınıflandırılması	8
Şekil 2.4. Perovskit ince filmlerin SEM görüntüsü	9
Şekil 2.5. Geleneksel Perovskit güneş hücresinin enerji bant diyagramı	11
Şekil 2.6. Tezde üretilen perovskit güneş hücresinin enerji bant diyagramı.	13
Şekil 3.1. RF saçtırma sisteminin şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.2. RF saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi	16
Şekil 3.3. Sputter cihazı	18
Şekil 3.4. Sputter yöntemiyle üretilen TiO ₂ ince filmler	18
Şekil 3.5. Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM bünyesinde bulunan kül fırın	19
Şekil 3.6. Metal Buharlaştırma Cihazı.....	20
Şekil 3.7. Tavlama yapılmış TiO ₂ malzemeler	21
Şekil 3.8. Gümüş Buharlaştırma İşlemi	21
Şekil 3.9. Gümüş kontak atılan TiO ₂ malzemeler.....	22
Şekil 3.10. Termal buharlaştırma sistemi	23
Şekil 3.11. Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.12. Tungsten tel ve kuarts pota.....	25
Şekil 3.13. Termal buharlaştırma sistemi potaları	26
Şekil 3.14. Termal buharlaştırma sisteminde kullanılan maske tasarımları ..	27
Şekil 3.15. Termal buharlaştırma sistemiyle üretilen MAPbI ₃ ince filmler...	27
Şekil 3.16. Termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen Perovskit güneş Hücreleri	28
Şekil 3.17. Gümüş kontak atılan Perovskit güneş hücreleri	29
Şekil 3.18. ND Filtreler	33
Şekil 3.19. J-V grafiği.....	35
Şekil 3.20. Doldurma faktörü grafiği.....	35
Şekil 3.21. X-Işını Toz Difraktometresi cihazı (dıştan görünümü)	37
Şekil 3.22. X-Işını Toz Difraktometresi cihazı malzeme tutucu	38
Şekil 3.23. Gemini marka SEM cihazı	39
Şekil 3.24. Gemini marka SEM cihazı numune tutucu	39
Şekil 3.25. Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi cihazı.....	40
Şekil 3.26. Işığın ince film içerisinden geçişinin görselleştirilmiş gösterimi	41
Şekil 3.27. Optik soğurma katsayısı tauc grafiği ve optik enerji aralığı belirlenmesi.....	42
Şekil 3.28. Perovskit Güneş Hücresi Tabakalarının Optiksel Karakterizasyonu için kullanılan Fotoiletkenlik Ölçüm Sisteminin şematik tasarımı..	44

Şekil 3.29.	İnce film malzemelerin Optiksel Karakterizasyonu için kullanılan Fotoiletkenlik Ölçüm Sisteminin resmi	44
Şekil 3.30.	Kriostata malzeme yerleştirilmesi	46
Şekil 3.31.	Kriostata yerleştirilen malzemenin karanlık-aydınlık ortamda ölçüm alınması ile ilgili akış diyagramı.....	46
Şekil 4.1.	TiO ₂ ince filmin XRD analizi.....	59
Şekil 4.2.	Malzemelerin XRD kırınım grafikleri.....	60
Şekil 4.3.	C ₆₀ ince filmin XRD kırınım grafiği.....	61
Şekil 4.4.	FTO/TiO ₂ /MAPbI ₃ /C ₆₀ /Ag formunda üretilmiş perovskit güneş hücresinin SEM görüntüsü	62
Şekil 4.5.	PbI ₂ -1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği	63
Şekil 4.6.	PbI ₂ -1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği	63
Şekil 4.7.	MAPbI ₃ 2-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği.....	64
Şekil 4.8.	MAPbI ₃ 2-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	65
Şekil 4.9.	MAPbI ₃ 3-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği.....	66
Şekil 4.10.	MAPbI ₃ 3-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	66
Şekil 4.11.	MAPbI ₃ 4-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği.....	67
Şekil 4.12.	MAPbI ₃ 4-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	68
Şekil 4.13.	MAPbI ₃ 5-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği.....	69
Şekil 4.14.	MAPbI ₃ 5-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	69
Şekil 4.15.	MAPbI ₃ 6-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği.....	70
Şekil 4.16.	MAPbI ₃ 6-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	71
Şekil 4.17.	C ₆₀ 1-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği	72
Şekil 4.18.	C ₆₀ 1-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	72
Şekil 4.19.	SP-TiO ₂ kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği.....	73
Şekil 4.20.	SP-TiO ₂ kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği.....	74
Şekil 4.21.	300 °C, 500 °C ve 700 °C’de tavllanmış robax malzemenin zamana bağlı iletkenlik grafiği.....	77
Şekil 4.22.	Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği	80
Şekil 4.23.	Işık banyosunda yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği.....	82
Şekil 4.24.	UV ışık altında yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği.....	84
Şekil 4.25.	Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği	86
Şekil 4.26.	Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği.....	88
Şekil 4.27.	Işık banyosunda yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği	90
Şekil 4.28.	UV ışık altında yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği	92
Şekil 4.29.	Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği	94
Şekil 4.30.	500 °C’de tavllanmış pürüzlü ve robax malzemelerin zamana bağlı iletkenlik grafiği.....	96
Şekil 4.31.	500 °C’de tavllanmış silisyum wafer malzemenin zamana bağlı iletkenlik grafiği.....	97

Şekil 4.32.	Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği.....	99
Şekil 4.33.	Işık banyosunda yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği	101
Şekil 4.34.	UV ışık altında yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği	103
Şekil 4.35.	Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği	105
Şekil 4.36.	Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği.....	107
Şekil 4.37.	Işık banyosunda yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği	109
Şekil 4.38.	UV ışık altında yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği	111
Şekil 4.39.	Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO ₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği.....	113
Şekil 4.40.	Pürüzsüz mikroskop camı üzerine büyütülen MAPbI ₃ ince filmin zamana bağlı iletkenlik grafiği.....	117
Şekil 4.41.	Laboratuvar atmosferinde, Işık banyosunda, UV ışık altında ve Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış MAPbI ₃ ince filmin ışık akısı grafiği.....	120
Şekil 4.42.	Laboratuvar atmosferinde, Işık banyosunda, UV ışık altında ve Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış MAPbI ₃ ince filmin mobilite yaşam süresi grafiği	122
Şekil 4.43.	Laboratuvar atmosferine maruz bırakılan perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği.....	124
Şekil 4.44.	Vakum atmosferine maruz bırakılan perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği	125
Şekil 4.45.	UV ışık altında yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği	126
Şekil 4.46.	Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği	127
Şekil 4.47.	Oksijende yaşlandırılmış vakum atmosferinde perovskit güneş hücresinin aydınlıkta akım yoğunluğu grafiği.....	128
Şekil 4.48.	Işık banyosunda yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği	129
Şekil 4.49.	Perovskit güneş hücresinin doldurma faktörü ve verimlilik özet grafiği	131

ÇİZELGELER DİZİNİ

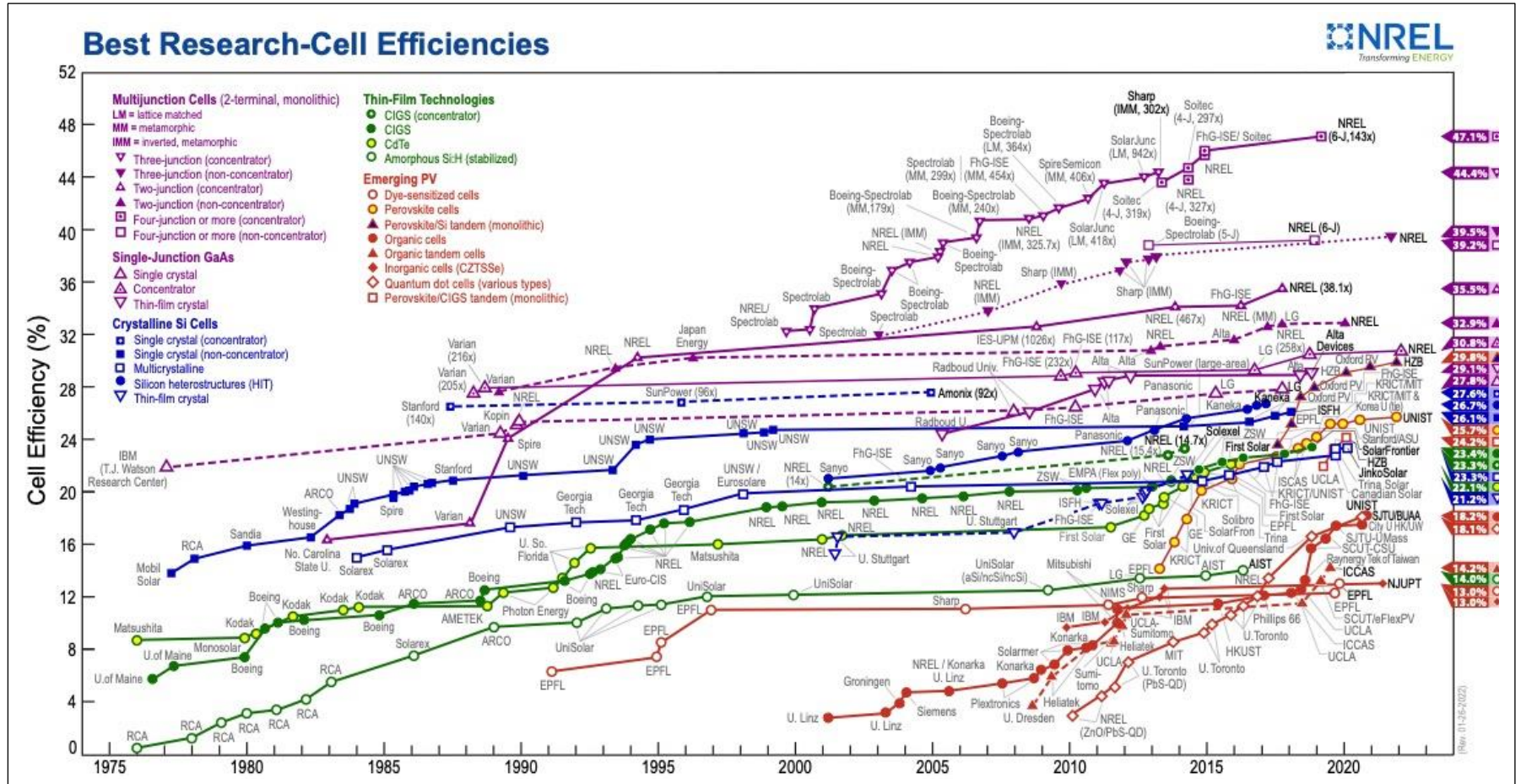
	Sayfa
Çizelge 3.1. ND kombinasyonları	33
Çizelge 4.1. Üretimde kullanılan PbI_2 ve $MAPbI_3$ oranları ve malzeme kodları	58
Çizelge 4.2. Üretimde kullanılan C_{60} oranı ve malzeme kodu.....	58
Çizelge 4.3. Malzemelerin direkt ve indirekt bant aralığı enerji değerleri	74
Çizelge 4.4. Malzemelerin tavlama sıcaklıklarına göre kodlamaları.....	75

1. GİRİŞ

Dünyada enerji talebi endüstri ve teknolojinin gelişmesi ile sürekli bir artış halindedir. Enerji arzına bakıldığında ise geleneksel enerji kaynaklarının (kömür, linyit, petrol ve doğalgaz) temel seviyede enerjinin üretilmesini sağladığı görülmektedir. Ancak geleneksel kaynakların fosil tabanlı tükenbilir kaynaklar olduğu aşıkardır. Fakat fosil yakıtların hızla tükenmesi, sanayileşme, hammadde fiyatlarının artması, çevreye ve insan sağlığı üzerine olan zararlı etkileri, kullanımlarındaki bir takım zorluklar son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarını popüler kılmıştır (Özgöçmen, 2007). Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi büyük bir potansiyele sahiptir. Fakat sürdürülebilir kullanım için yüksek verim ve düşük maliyetleri karşılamak noktasında yetersiz kalmaktadır (Özel, 2017).

Gelişen teknoloji ile yeni nesil organik-hibrit güneş hücreleri düşük maliyetleri ve yüksek verimleriyle son yılların popüler güneş hücreleri arasındadır. Organik güneş hücrelerinin avantajları arasında; üretim süreçlerinde kolaylık ve çeşitlilik, tasarım maliyetlerinin düşük olması gibi özellikler yer almaktadır (Arslan, 2015). Güneş hücreleri, birinci, ikinci ve üçüncü nesil güneş hücreleri olmak üzere üç gruptan oluşmaktadır. Birinci nesil güneş hücreleri, tek kristal silisyum (Si) ve çok kristal silisyumdan yapılmaktadır. Ticari olarak üretilen birinci nesil güneş hücrelerinin verimleri ortalama %12 ve %16'dır (Badawy vd., 2013). Birinci nesil güneş hücrelerinin üretimleri maliyetlidir. İkinci nesil güneş hücrelerinin üretimlerinde ince film teknolojileri kullanılmaktadır. Bu hücrelerin üretiminde amorf silisyum, kadmiyum indiyum selenid, indiyum kalay oksitten yararlanılmaktadır. Bunların verimlilikleri ise %10 ile %15 arasındadır. İkinci nesil güneş hücrelerinin maliyetleri birinci nesil güneş hücrelerinin maliyetlerine göre daha düşüktür. Bu gruptaki hücrelerin bir kısmı esnek olarak üretilebilirler. Fakat üretilen bu güneş hücreleri için pahalı vakum tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır ve az bulunan elementlerden dolayı maliyetinin düşürülmesi zordur (Badawy, 2013). Üçüncü nesil güneş hücreleri ise, nanoteknoloji bilimine dayanmaktadır. Bunlar organik ve hibrit güneş hücrelerini de içine alan ve özellikle perovskit güneş hücrelerinin çalışıldığı, nano kristaller veya daha sık "Kuantum noktaları" olarak adlandırılan yapılardır (Kayunkid vd., 2010; Pehlivan vd., 2016; Chuang vd., 2009; Shen ve Maes, 2011). Nano kristalli güneş hücrelerinin, ticari olarak üretilen silisyum tabanlı güneş hücrelerinden daha verimli

olduğu ve güneş spektrumunun % 60' ından fazlasını dönüştürebildiği bilinmektedir (Sasaki vd., 2007; Spano, 2005; Clark vd., 2007; Dudenko vd., 2012). Organik güneş hücrelerinin en büyük avantajı pahalı vakum tekniklerine ihtiyacı olmayışıdır. Bir başka önemli avantajı ise, esnek güneş hücrelerinin yapılabilmesi ve üretimlerinin kolay olmasıdır (Aktuna, 2016).



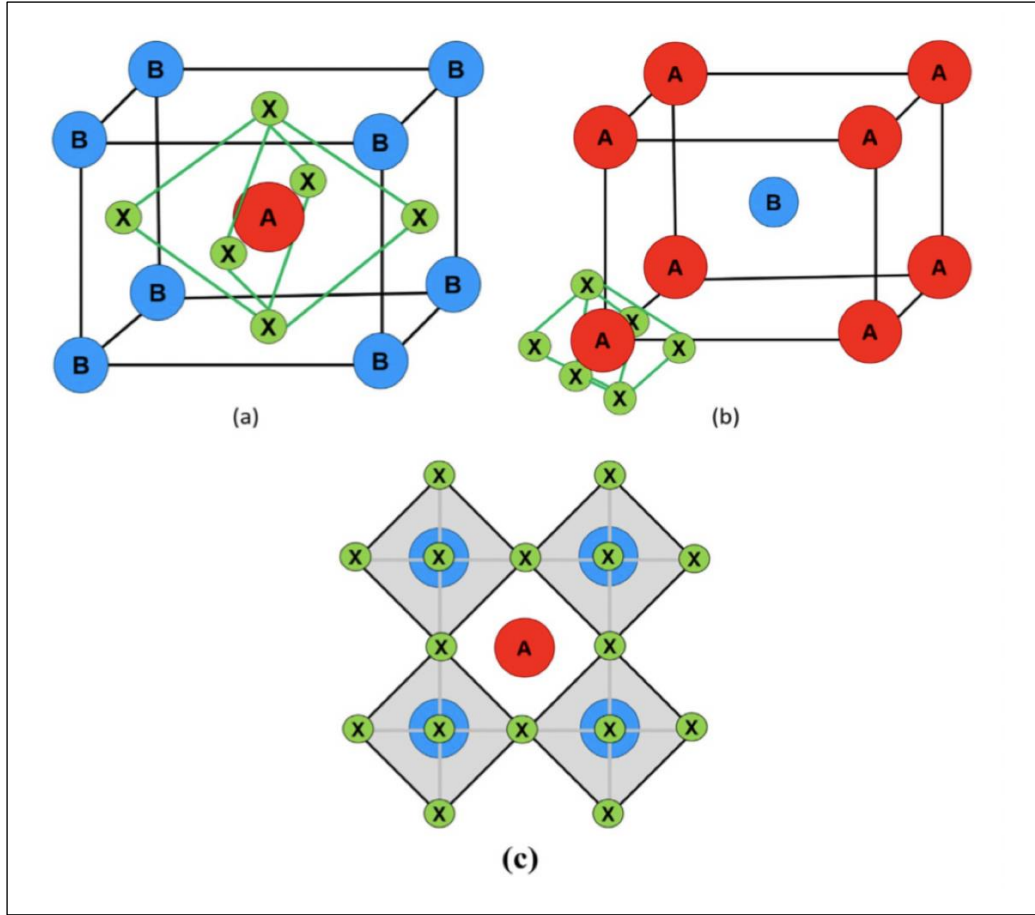
Şekil 1.1 Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından yayımlanan Güneş hücrelerinin verimliliklerinin karşılaştırılması (Anonim, 2022a).

Şekil 1.1’de yeşil çizgi inorganik güneş hücreleri ailesinden Silisyum güneş hücrelerinin 1970’lerden günümüze kadarki verimlilik artışını göstermektedir. Kırmızı çizgi ise organik güneş hücresi ailesindeki ilerlemeyi göstermektedir. Şekil 1.1’deki grafiğe daha detaylı bakılacak olunursa içi sarı dolgulu kırmızı daireler sadece Perovskit güneş hücrelerinde 2010 yılından günümüze kadar hızla kaydedilen ilerlemeyi göstermektedir. Perovskit güneş hücreleri 2010 yılından günümüze verimliliğinde çok hızlı bir artış olduğu için bilim insanlarının ilgi odağı haline gelmiştir. Perovskit güneş hücreleri o kadar güncel bir konu haline gelmiştir ki 2010 yılı ile 2021 yılı arasında 10.681 adet makale yayımlanmıştır. Ancak, üzerine bu kadar çalışma yapılan perovskit güneş hücresi ticari bir ürün haline gelememiştir. Perovskit güneş hücresinin ticarileşmemesinin önündeki en büyük engel malzemenin bozunma/kararsızlık mekanizmalarıdır. Kimyasal solüsyon yolu ile oluşturulan üretimlerde morfolojinin kesikli olduğu, çok fazla gözenek oluştuğu görülmektedir. Fakat fiziksel büyütme koşullarında böyle bir problemin yaşanmadığı görülmektedir. Perovskit güneş hücresindeki bozunma mekanizmalarını tetikleyen parametreler ise havadaki su buharı, UV ışık, oksijen ve ışık banyosudur. Perovskit güneş hücrelerinde bu kararsızlığın anlaşılabilmesi için güneş hücresini oluşturan her tabakanın bağımsız olarak üretilmesi ve farklı stres faktörlerine tek tek maruz bırakılarak tabakalarda oluşan bozunmaların anlaşılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında; Perovskit güneş hücresini oluşturan tabakalardan TiO_2 sputter (saçtırma) yöntemi ile, $CH_3NH_3PbI_3$ ve C_{60} tabakaları termal buharlaştırma yöntemiyle ayrı ayrı tek bir tabaka formunda cam taban malzeme üzerine üretilmiştir. Üretilen malzemelerin elektriksel özellikleri; literatürde bozunmada/yaşlandırmada tanımlanmış stres faktörlerine (laboratuvar atmosferine, vakum atmosferine, ışık banyosuna, ultraviyole ışık altına ve oksijen gazına) tabii tutularak ışık akısına bağlı (düşük ışık akısı ve yüksek ışık akısı), sıcaklığa bağlı, zamana bağlı, karanlıkta ve kalibre ışık altında iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilerek bozunma mekanizmaları detaylı araştırılmıştır. Tabakalar üzerindeki yaşlandırma ve bozunma analizlerine ek olarak FTO/ TiO_2 / $CH_3NH_3PbI_3$ / C_{60} /Ag tasarımında perovskit güneş hücresi üretilerek aynı stres faktörleri perovskit güneş hücresine uygulanmış ve hücredeki oluşan değişimler incelenmiştir. Nihai olarak stres faktörlerinin tabakalarda oluşturduğu etki ile güneş hücresinde oluşan etki arasında bağlantılar kurulmaya çalışılmıştır.

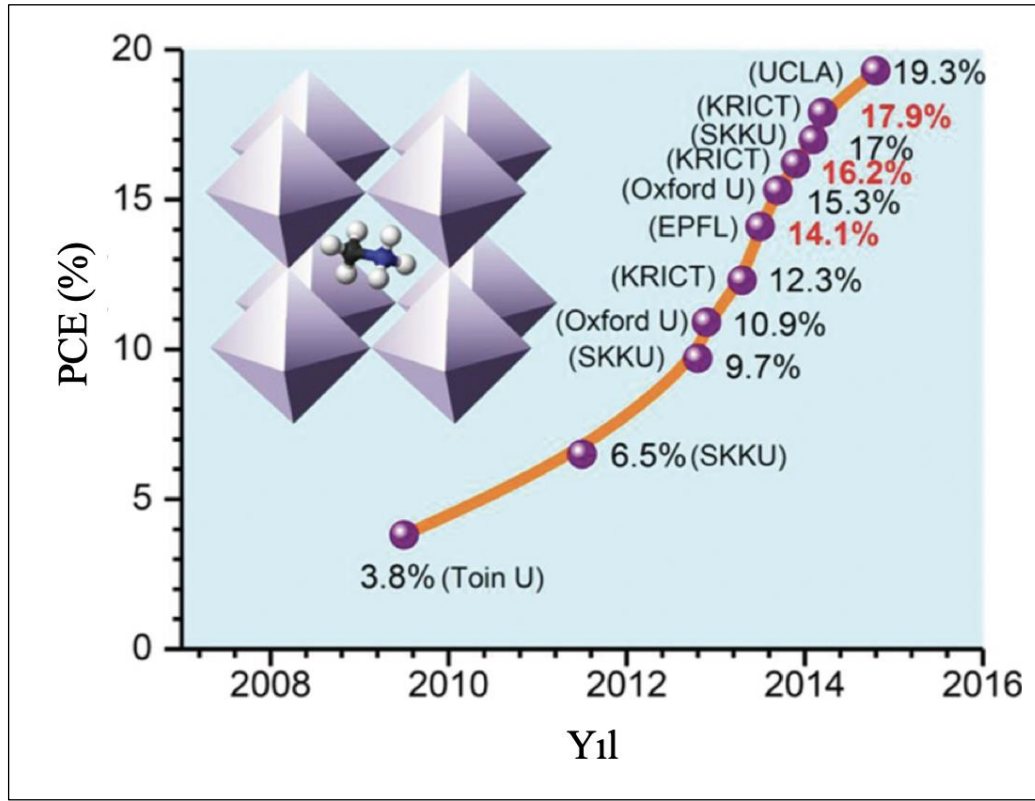
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Adını L.A. Perovski'den alan ve formülü ABX_3 olan perovskitler ilk kez Miyasaka ve çalışma arkadaşları tarafından 2009 yılında güneş hücreleri çalışmalarında kullanılmıştır. $CH_3NH_3PbX_3$ formülü ile tanımlanan perovskitler X yerine Br (Brom) kullanılarak %3.1 ve X yerine I (İyot) kullanılarak ise %3,8 Güç Dönüşüm Verimliliği (Power Conversion Efficiency (PCE)) ile üretilmiştir (Kojima vd., 2009).



Şekil 2.1. A, B ve X formülünden oluşan temel bir ABX_3 kübik 3D perovskit yapısının birim hücresi (Asghar vd., 2017).

Daha sonraki çalışmada Park ve çalışma arkadaşları Metilamonyum Kurşun İyodür ($MAPbI_3$) ($CH_3NH_3PbI_3$) formundaki perovskit güneş hücresini %6.5 PCE ile üretmeyi başarmışlardır (Im vd., 2011).



Şekil 2.2. Metilamoniyum Kurşun İyodür'ün (MAPbI_3) yıllara göre güç dönüşüm verimliliği (PCE) (Jung ve Park 2015).

Perovskit güneş hücrelerinin tarihsel gelişimine bakıldığında Şekil 2.2'den de görüleceği gibi PCE değeri 2012 yılında % 9,7 iken, 2013 yılında %12,3 ve 2014 yılında % 19,3'a kadar çıktığı gözlemlenmiştir. (Jung ve Park, 2015). En güncel olarak Şekil 1.1'de gösterildiği gibi 2022 yılında %25,7 PCE değerine ulaştığı literatürde rapor edilmiştir.

Etgar ve çalışma arkadaşları $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ heteroeklem yapısının ışık toparlayıcı ve buna ek olarak bu yapının hole transfer malzemesi olduğunu belirtmiştir (Etgar vd.,2012). Xing ve Stranks araştırmalarında $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ malzemesinin, solüsyon tabanlı üretilen diğer yarıiletken malzemelere göre daha uzun bir difüzyon sızma mesafesinin (100-300 nm) olduğunu vurgulamışlardır (Xing vd., 2013).

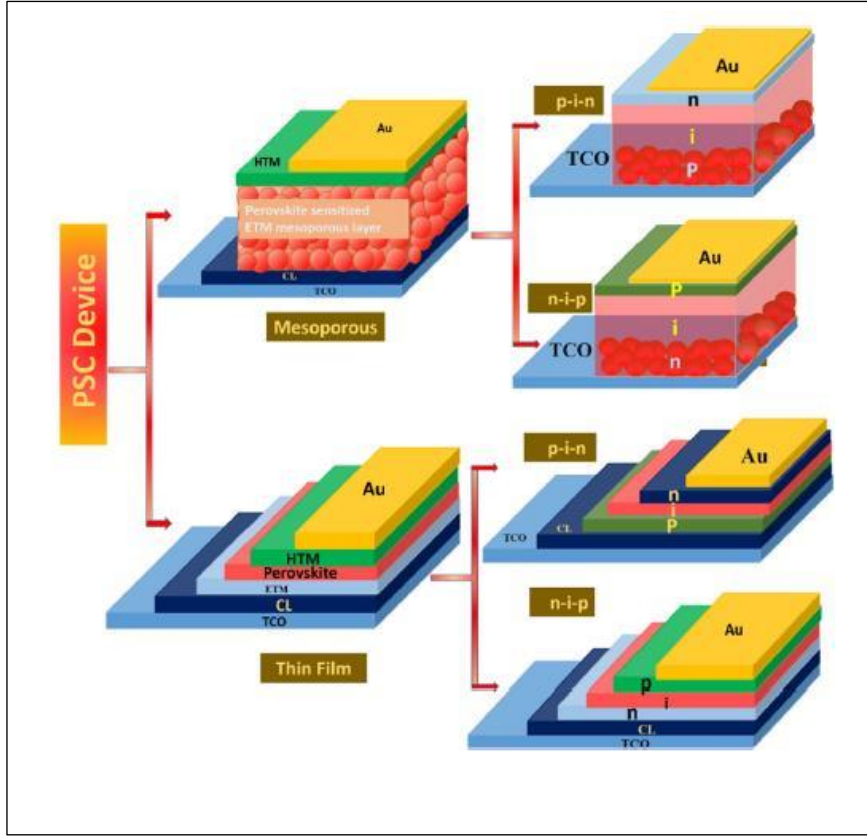
Seok ile birlikte çalışmış olan Gratzel ve çalışma arkadaşları nano-gözenekli $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{spiro-MEOTAD}/\text{Au}$ yapı mimarisini kullanarak %15 PCE ile üretimi sağlamışlardır (Mei vd., 2014). Liu ve çalışma arkadaşları $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ kaplama,

spiro-MEOTAD ve TiO_2 kullanarak %15,4 PCE ile üretmişlerdir (Liu vd., 2013). Seok ve çalışma arkadaşları mezo-gözenekli TiO_2 , $CH_3NH_3PbI_3-xBr_x$ kaplama ve PTAA kullanarak %16,2 PCE'ne sahip perovskit üretmişlerdir (Green vd., 2014). 2014 yılının başlarında bu çalışma PCE değeri %17,9'luk bir gelişme de göstermiştir (Green vd., 2014). 2015 yılına gelindiğinde Seok ve çalışma arkadaşları Metilamonyum(MA) ve Formamidinyum(FA) birleştirerek %20,1'lik PCE değerine ulaşmışlardır (Christians vd., 2015). Günümüzde ise perovskit güneş hücrelerinin PCE değeri %25 seviyelerine ulaşmıştır (Zhang vd., 2022; Gao vd., 2022; Liu vd.,2022).

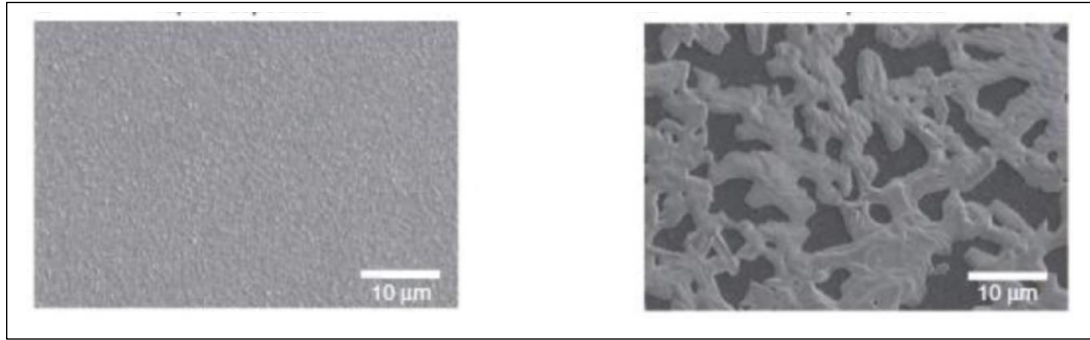
Perovskit güneş hücreleri %25'lik PCE değerine ulaşmasına rağmen üretimden kısa bir zaman sonra verimlilik değerlerinde belirgin düşüşler gözlemlenmiştir. Kararsızlık probleminin temel kaynağı olarak metal kontak ile Perovskit arasındaki oksit tabaka, havadaki su buharı, oksijen, ışık ve sıcaklık gösterilmektedir. 2011 yılındaki çalışmalarda perovskit güneş hücreleri üretiminden 10 dakika sonra %80 oranında bozunuma uğradıkları rapor edilmiştir (Im vd., 2011). 2012 yılındaki çalışmalarda ise spiro-MEOTAD tabanlı perovskit güneş hücreleri üretilerek kararlılık durumları dakikalardan 500 saate kadar çıkartılmıştır (Kim vd., 2012). 2013 yılındaki çalışmalarda Al_2O_3 tabanlı perovskit güneş hücrelerinde 1000 saat kararlılık durumuna ulaşıldığı rapor edilmiştir (Leijtens vd., 2013).

Zhou ve çalışma arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda $TiO_2/CH_3NH_3PbI_3$ heteroeklem yapının üzerine düşük sıcaklıkta indirgenmiş karbon elektrot eklemiştir. $TiO_2/CH_3NH_3PbI_3/C$ heteroeklem yapısındaki güneş hücresi %9,08 PCE değerine ulaştığı gözlemlenmiştir (Zhou vd., 2014). Mezogözenekli $TiO_2/CH_3NH_3PbI_3/C$ heteroeklem güneş gözesi enkapsülasyon yapılmadan laboratuvar atmosferinde ve karanlıkta yapılan ölçümlerinde 2000 saatten fazla kararlı kaldığı rapor edilmiştir (Zhou vd., 2014). Ancak görüldüğü üzere kararlılık değerleri ticari muadilleri ile karşılaştırılacak mertebede değildir. Bu neden ile perovskit güneş hücrelerinin ticari muadilleri ile yarışabilmesi için hem kararlılığı yüksek hem de verimlilik değerleri ticari muadilleri ile karşılaştırılabilir Perovskit üretimi gerekmektedir.

Perovskit güneş hücresinin mimarisi incelendiğinde Şekil 2.3’de görüleceği gibi iki temel üretim mimarisinin bulunduğu görülmektedir. Bunlardan ilki mesoporous yani mezo gözenekli mimari bir diğeri ise planar yani ince film mimarisi olduğu bilinmektedir. Şekil 2.3.’de görüleceği gibi Shaikh ve çalışma arkadaşları Perovskit ailesini üretim yöntemleri bazında ayrımlarını göstermişlerdir (Shaikh vd., 2017). Bu bağlamda literatürde çözelti formunda üretilen mezo-gözenekli ve termal buharlaştırma yöntemi üretilen ince film Perovskit filmlere ait SEM görüntüleri Şekil 2.4.’de karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Şekil 2.4.’den de görüleceği üzere gözenekli yapıda birçok boşluk bulunmakta ve bu boşluklar yüzey alanını genişleterek Perovskit malzemenin reaksiyona açık yüzey alanını arttırmaktadır. Buna karşın ince film malzeme yüzeyi oldukça homojen, pürüzsüz ve tek yüzeyli bir yapıya sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir. Böyle pürüzsüz ve homojen bir ince film yapısı malzemede oluşabilecek açık bağların azaltılması, reaksiyona açık alanların azaltılması yüzey yük yoğunluğunun homojen ve sürekli olması açısından yüksek elektronik kalitede malzeme üretmek isteyen araştırmacılar tarafından istenilen bir parametredir. Kararsızlık probleminin temeline bakıldığında Perovskit güneş hücresini oluşturan tabakaların çözelti formlarında üretilmelerinden kaynaklı olarak üretim sonrasında filmlerin gözenekli, süreksiz yapılarda oluştuğu, kararlı ve sonlanmış bir kimyasal yapıda olmadıkları, buna bağlı olarak zaman ile malzemenin verimliliğinde kayıplar oluşturulduğu belirtilmektedir (Liu vd., 2013).



Şekil 2.3. Perovskit güneş hücrelerinin üretim tekniğine bağlı olarak sınıflandırılması (Shaikh vd., 2017).



Şekil 2.4. Perovskit ince filmlerin SEM görüntüsü
A) Termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen B) Çözücü aracılığı ile üretilen (Liu vd., 2013).

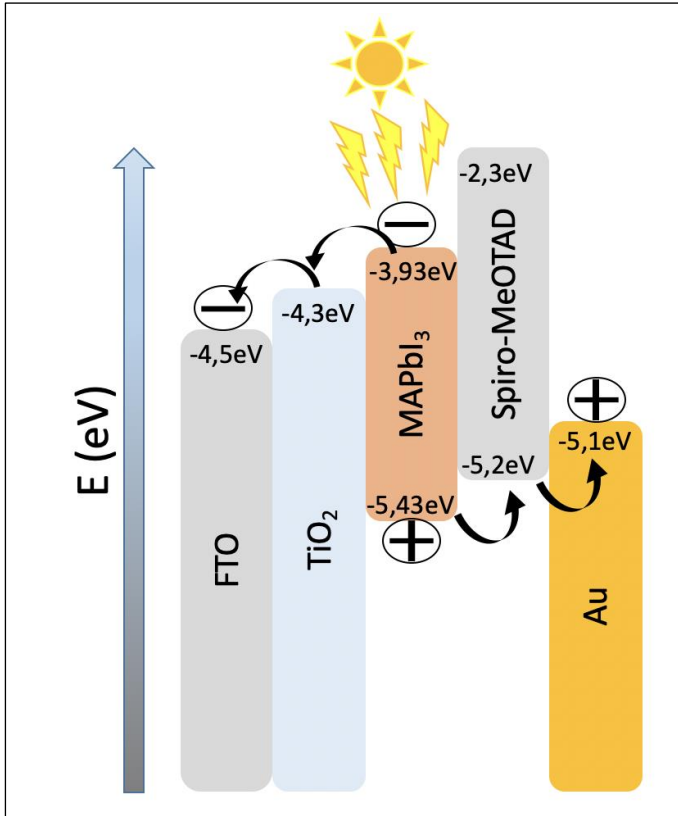
Genel olarak Perovskit güneş hücresinin mimarisinde cam yüzeyine optik geçirgenliği yüksek bir iletken tabaka (genellikle (florin katkılı kalay oksit) FTO ya da (indiyum katkılı kalay oksit) ITO), boşluk yük geçişlerinin engellemek için bloklayıcı tabaka (bir diğer ismi ile Elektron Geçiş Tabakası (ETL)), elektron-boşluk çiftinin oluşturulduğu

optik soğurucu tabaka genellikle MAPbI₃ (CH₃NH₃PbI₃) ya da FAPbI₃ Perovskit tabaka, elektron yük geçişini engellemek için bloklayıcı (bir diğer ismi ile Hole Geçiş Tabakası (HTL)) ve son olarak arka kontak olarak gümüş ya da benzeri metal tabaka kullanıldığı görülmektedir. Bu tabakalar verimli olmalarına karşın üretim yöntemleri ve malzemelerin laboratuvar atmosferine maruz kalmalarından kaynaklı olarak verim kayıpları yaşandığı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir (Krüger vd., 2001; Liu vd., 2014). Benzer şekilde güneş hücresinin yapısı incelendiğinde kararlılığı ve verimi açısından en önemli parametreler arasında her tabakanın uyumlu bir enerji bant aralığına sahip olması gerektiği görülmektedir. Yani güneş hücreleri üretildikten sonra uzun ömürlü ve verimli olabilmesi için laboratuvar atmosferlerinden etkilenmemeleri ve yapısını oluşturan tabakaların enerji bant diyagramlarının uyumlu olması gerektiği görülmektedir.

Verimlilikteki bir diğer sorun ise tabakalar arasında gerçekleşen kayıplar olduğu belirtilmektedir. Geleneksel Perovskit güneş hücresinin enerji bant diyagramı Şekil 2.5'de sunulmuştur. İnorganik güneş hücrelerinde n-i- p (yani n-katkılı, p-katkılı ve i-katkısız (intrinsic)) yapısında olduğu gibi Perovskit güneş hücrelerinde de n ve p tabakalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tabakalara Perovskit güneş hücrelerinde ETL, HTL olarak adlandırılmaktadır. İnorganik güneş hücrelerinde olduğu gibi seçilecek n tabakası ve p tabakası arasında bir yerleşik (built-in) potansiyel oluşturulması gerekmektedir. n ve p tabakalar arasında oluşan elektrik alan katkısız (intrinsic) tabakada oluşan yüklerin kontaklara doğru çekilmesini sağlamaktadır. Benzer yapı Perovskit güneş hücrelerinde ETL ve HTL tabakaları ile sağlanmaktadır. Burada önemli olan yapı ETL ve HTL tabakalarının enerji bant aralıklarıdır. Şekil 2.5.'de literatürde sıkça karşılaşılan Perovskit güneş hücresinde görüleceği üzere enerji bant diyagramları arasında yük geçişleri için uygun gibi gözükse de enerji aralıklarının daha yakın malzemeler kullanılırsa yük geçişlerindeki kayıpların daha da azaltılabilmesi mümkün olduğu görülmektedir.

Perovskit güneş hücresi detaylı olarak incelendiğinde tabakalardan ilkinin transparan iletken tabaka olduğu görülmektedir. Bu tabakada genellikle FTO ya da ITO olarak kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemde görüleceği gibi FTO üzerine ETL olarak TiO₂ tabakası büyütülmektedir.

Spin kaplama ve termal buharlaştırma MAPbI₃ üretiminde en çok tercih edilen temel iki yöntemdir. Spin kaplama, termal buharlaştırma yöntemine göre basit ve ucuz bir yöntemdir. Ancak spin kaplama yöntemi ile üretilen MAPbI₃ filmlerin stokiometrisini tutturmak ve homojen bir yüzey elde etmek oldukça zordur. Termal buharlaştırma yöntemi ile ilk üretilen MAPbI₃ filmler spin kaplamaya göre çok daha fazla homojen ve elde edilen güneş hücresinin verimi ve açık devre gerilimi çok daha yüksektir. İnce film güneş hücrelerinde tabakaların yüzey homojenliği, tabakalar arası ara yüzey durumları, tabakaların elektronik kalitesi ve tabakaların enerji seviyesi ayarlaması üretilen güneş hücresinin performansını büyük ölçüde etkileyen parametrelerdir. İnce film güneş hücresinde yüzey morfolojisi ve ara yüzey elektronik durumları güneş hücresinin fiziksel mekanizmasının anlaşılmasında çok önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 2.5. Geleneksel Perovskit güneş hücresinin enerji bant diyagramı

Bu bilgiler güneş hücresinin güç dönüşüm verimliliğinin ve uzun dönem performans güvenilirliğinin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Perovskit güneş hücresini oluşturan MAPbI₃ ya da FAPbI₃ Perovskit tabakalar spin kaplama gibi sıvı formdan (çözeltiden)

üretmek yerine termal buharlaştırma yöntemi ile üretilmesi durumunda sitokimetri kontrol edilebilir, kristal hacim oranı kontrol edilebilir, homojen yüzeye sahip ve kimyasal tepkime süreci tamamlanmış kararlı bir yapı elde edilmektedir. Bu durum daha kararlı bir Perovskit güneş hücresi üretiminde önemli bir kriterdir.

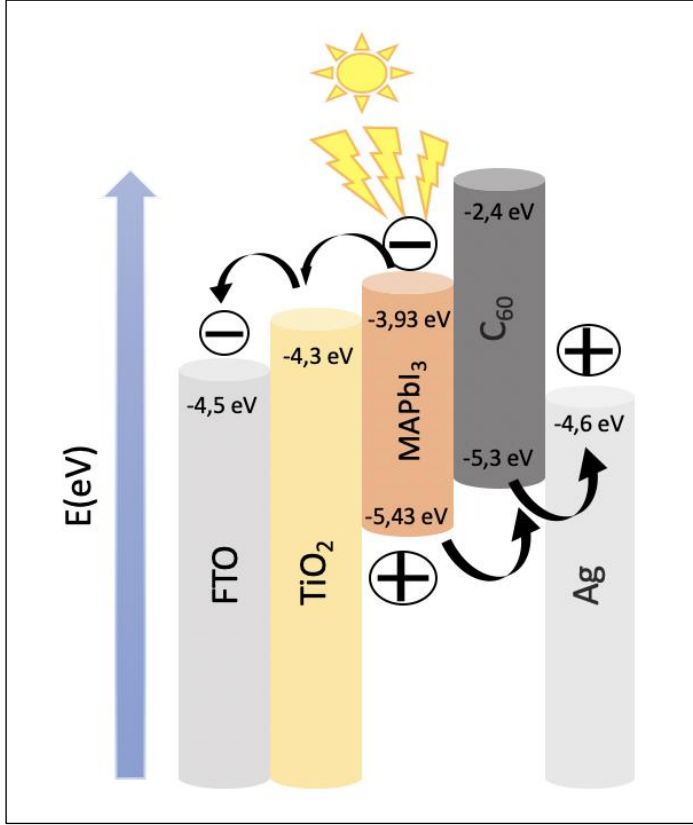
HTL olarak seçilecek malzemenin oda sıcaklığında kimyasal tepkimeye girmeyen, yüzeyinde açık bağ bulundurmayan (yüzeyi kararlı), uzun erimli, kusur (defect) yoğunluğu düşük, düşük maliyetli, hole mobilitesi yüksek ve çözelti formunda üretilmemiş bir malzeme olması gerekmektedir.

Bu arayış içerisinde C_{60} potansiyeli en yüksek malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. C_{60} filmler termal CVD ve termal buharlaştırma yöntemleri ile kolaylıkla üretilmektedir (Huang vd., 2017; Li ve Zhu, 2015; K. Liu vd., 2012).

C_{60} molekülünün keşfinden sonra birçok farklı uygulama alanında kendine yer bulmuştur. Bunlar arasında önde gelenleri yarıiletken teknolojileri, süper iletken uygulamaları ve optik kaplama uygulamalarıdır (Rhee vd., 2008). C_{60} 'ın enerji bant aralığı 1.5-2.0 eV aralığında olduğu için güneş hücreleri uygulamalarında da etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kojima vd., 2006).

Literatürde silisyum üzerine kaplanmış C_{60} ince filmlerin optik ve elipsometrik ölçümleri sonucu malzemenin (n, k) optik sabitleri deneysel olarak hesaplanmış ve HOMO-LUMO arasındaki enerji farkının 2.3 eV olarak belirlenmiştir (Ren vd., 1991) Alkali metal katkılanmış C_{60} ve C_{70} ince filmlerin optik özellikleri incelenmiş ve moleküller arası titreşim modları deneysel olarak elde edilmiştir (Eklund vd.,1995). PVD ile kaplanmış C_{60} ince filmlerin transmisyon ve reflektans ölçümleri ve sıcaklığa bağlı fotoluminesans (PL) ölçümleri sonucunda yasak enerji aralığı değeri 1.9 eV – 2.2 eV değerleri arasında bulunmuş olup PL ölçümleri sonucunda artan sıcaklık ile PL şiddetinin de doğrusal olarak azaldığı rapor edilmiştir (Capozzi vd., 1996). Argon gazı atmosferinde üretilen C_{60} ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri 2.02 – 2.24 eV değerlerinde bulunmuş ve XRD sonuçlarına göre hem fcc (yüzey merkezli kübik faz) hem de hcp (hekzagonal faz) fazda bir yapıya sahip olduğu ortaya konulmuştur (Zhang vd., 2001). PVD ile farklı alt tabaka

sıcaklıklarında ve tavlama yapılmış ince filmlerin XRD sonuçlarına göre kristal yapıya sahip C_{60} filmlerin yasak enerji aralığı değerleri 1.3 – 1.6 eV arasında gözlemlenirken, amorf yapıya sahip filmlerin yasak enerji aralığı değerlerinin 2.4 – 2.6 eV değerleri arasında olduğu gözlenmiştir (Faiman vd., 1997).



Şekil 2.6. Tezde üretilen perovskit güneş hücresinin enerji bant diyagramı

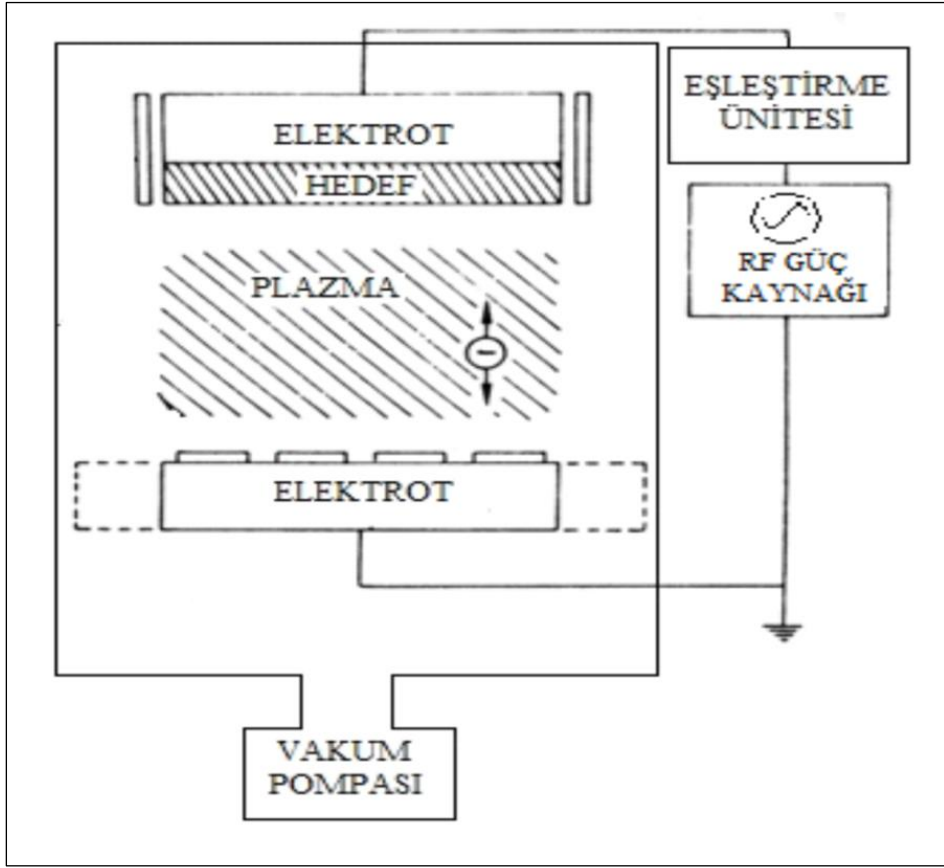
Bu tez kapsamında üretilmiş olan perovskit güneş hücresinin enerji bant diyagramı Şekil 2.6'da sunulmuştur. Buna göre TiO₂ kaplanan FTO taban malzeme üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle MAPbI₃ ve katkılanmış C₆₀ büyütülmüştür. Elde edilen perovskit güneş hücresine gümüş (Ag) kontak atılmıştır. Hücresinin optiksel ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bir alttaş üzerine istenilen malzemeleri biriktirerek ince film üretmenin birçok farklı yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında fiziksel yöntemler en homojen ve elektronik kalitesi yüksek ince filmlerin üretilmesinin imkanını sağlamaktadır. Fiziksel büyütme yöntemleri incelendiğinde büyütülmek istenilen malzemenin erime sıcaklığına, buharlaşma sıcaklığına, gaz formunda olup olmamasına, iletken ya da yalıtkan olmasına göre üretim yöntemi tercih edilmektedir. Fiziksel büyütme yöntemleri arasında buharlaşma sıcaklığı yüksek malzemeler için en çok tercih edilen yöntem saçtırma (sputtering) yöntemidir. Buharlaştırma sıcaklığı düşük olan malzemeler için örneğin metal ya da organik bileşikler, en çok tercih edilen fiziksel büyütme yöntemi termal buharlaştırma (Thermal Evaporation) yöntemidir. Bu bölümde tez kapsamında üretilen TiO_2 , $MAPbI_3$, katkılanmış C_{60} ve metal kontaklara ait üretim yöntemleri aşağıdaki başlıklarda detaylı olarak sunulmuştur.

3.1. Radyo Frekansı (RF) Saçtırma Yöntemi

Bu yöntemle hedef ile alttaki elektrotlar arasına alternatif bir voltaj uygulanmaktadır. Elektrotlar akımın frekansına bağlı olarak katot-anot dönüşümüne uğrarlar. Böylece hedefin iyonlar tarafından bombardıman edilmesi yarım periyot aralığında gerçekleştirilirken, diğer yarım periyotta ise herhangi bir yük birikmesi gerçekleşmez. RF saçtırma sisteminin frekansı 13.56 MHz' dir. RF saçtırma tekniği ile yüksek sıcaklıkta üretilmesi gereken ancak teknik olarak istenilen yüksek sıcaklıklara çıkmanın mümkün olmadığı malzemelerin ince filmleri üretilmektedir. Tipik RF saçtırma sisteminin şekli şematik olarak Şekil 3.1' de gösterilmiştir (Bunshah, 1994).



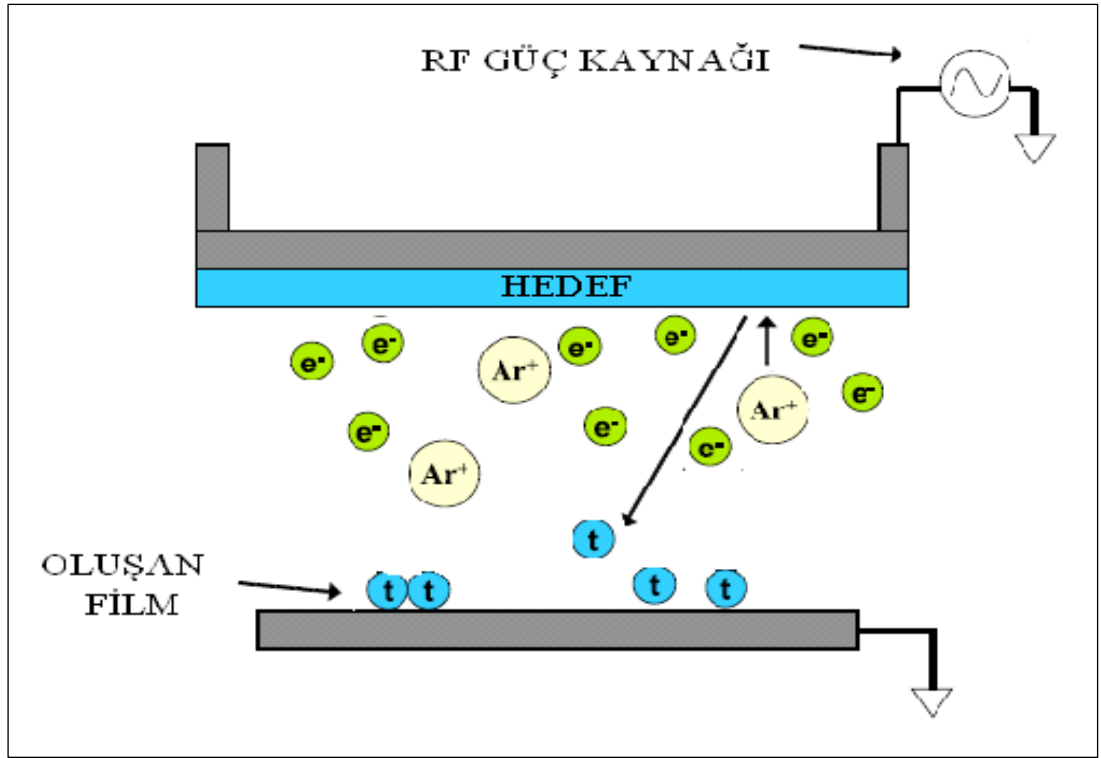
Şekil 3.1. RF saçırma sisteminin şematik gösterimi (Bunshah, 1994).

RF saçırma sistemi; vakum odası, vakum pompası, radyo frekansı güç kaynağı olmak üzere üç ana bölümden meydana gelmektedir (Grill, 1993; Johnson, 2005). Bu sistemde, vakum odası içinde bulunan elektrotlardan birinin üzerine hedef yerleştirilirken, diğer elektrota ise alttaş yerleştirilir. Vakum pompası; vakum odasının basıncını düşük basınç değerlerine çekmek amacıyla kullanılmaktadır. Basıncın düşürülmesinin nedeni; vakum odasını havadaki diğer gazlardan temizlemek ve üretimde oluşacak iyonize olmuş parçacıkların ortalama serbest yolunu artırarak yüksek enerjili çarpışmalar elde etmektir. Böylece plazması oluşturmak istenen materyalin saflığı ve kalitesi artırılabilir (Grill, 1993).

Vakum odası istenilen basınç değerine geldiğinde vakum odasına bir sovgaz pompalanır. Daha sonra radyo frekansı güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Bu dalgalar eşleştirme ünitesi sayesinde vakum odası içinde titreşim frekansı oluştururlar. Oluşan titreşim frekansı ile vakum odası içindeki sovgazın plazması oluşur (Grill, 1993;

Johnson, 2005). Böylece soygaz atomları iyonize hale geçerek ve hedefi bombardıman ederek hedeften nötral atomların saçılmasını sağlar. Saçılan bu atomlar yoğunlaşarak altına doğru yönelirler.

Saçtırma tekniğinin çalışma prensibine somut bir örnek olarak duvara çelik topların fırlatılmasına örneği verilebilir. Toplar duvara çarptıkça duvardan ufak parçacıklar kopartarak, ince katmanlar oluşmaktadır. Çelik topu iyonlaşmış atomlar, duvarı ise hedef materyal olarak eşleştirebiliriz. RF saçtırma tekniğiyle film oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3.2' de gösterilmiştir (Johnson, 2005).



Şekil 3.2. RF saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi (Johnson, 2005).

RF saçtırma tekniği ile elektriksel olarak iletken, yarıiletken ve yalıtkan kaplamalar yapılabilir. RF saçtırma tekniğiyle depolanan yalıtkan ve yarıiletken materyallerden bazı örnekler şunlardır:

Yarıiletkenler: Si ve Ge

III-V bileşikleri: GaAs, GaSb, GaN, AlN

II-VI bileşikleri: CdSe, CdS, ZnO, ZnSe

IV-VI bileşikleri: PbTe

Refrakter (ateşe dayanıklı) yarıiletkenler: SiC

Ferroelektrik bileşikler: Bi₄Ti₃O₁₂

Oksitler: In₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, Ta₂O₅, Y₂O₃, TiO₂, ZrO₂, SnO₂, PtO, Bi₂O₃, ZnO, CdO

Ateşe dayanıklı camlar ve plastikler (Bunshah, 1994).

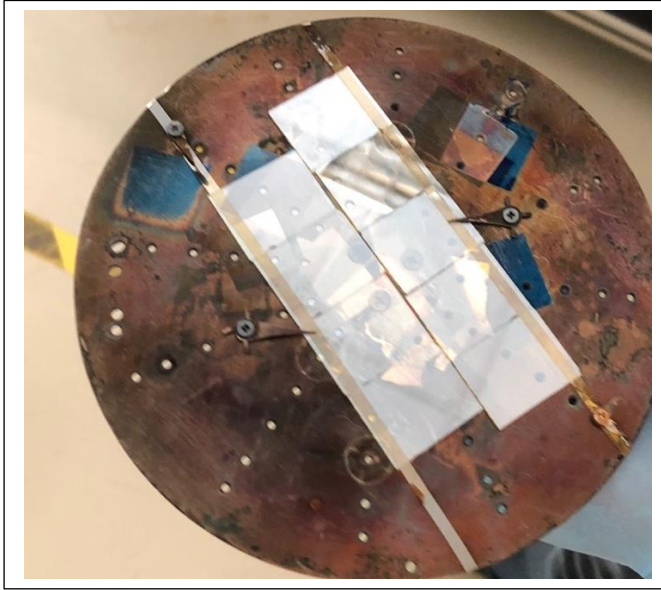
Tez kapsamında üretilen TiO₂ ince filmler TiO₂ hedef malzeme kullanılarak Sputter yöntemi ile Süleyman Demirel Üniversitesi (SDÜ) Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) 'nde hizmet alımı yoluyla üretilmiştir. Sputter sistemi ve üretilmiş olan TiO₂ ince filmler Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de sunulmuştur. Sputter yöntemi ile üretilen TiO₂ ince filmler üretim parametreleri aşağıda sunulmuştur.

Titanyum dioksit Üretim Parametreleri;

Üretim sıcaklığı	: 120 C ⁰
Malzeme yoğunluğu	: 2,730 g/cm ³
Azot çıkış kontrolü	: 9,6 sccm
Gerçek basınç	: 6E-3 Torr
RF uygulanan güç	: 90 W
RF uygulanan DC gerilim	: 343 V
Alttaş sıcaklığı	:125 C ⁰



Şekil 3.3. Sputter cihazı



Şekil 3.4. Sputter yöntemiyle üretilen TiO₂ ince filmler

3.2. İkincil Isıl İşlem (Tavlama)

Sputter sistemi ile üretilen TiO₂ ince filmler üretim sonrasında ikincil ısıl işleme tabi tutulmuştur. İkincil ısıl işlemin yapılma sebebi TiO₂ ince filmlerin morfolojik yapısını

daha gözenekli bir hale getirmek ve yine morfolojik yapısını daha kararlı bir hale getirmektir. Bu bağlamda ikinci ısıl işlemler Şekil 3.5’de gösterilen ve YETEM bünyesinde bulunan kül fırında gerçekleştirilmiştir. İkinci ısıl işlem 300 °C, 500 °C ve 700 °C’de laboratuvar atmosferinde yapılmıştır. İkincil tavlama sıcaklığına 10 derece/dk adımlarla çıkmıştır. Malzeme üretiminde şömine camı (kalın cam), pürüzlü cam ve silisyum wafer taban malzeme üzerine üretim yapılmıştır. Taban malzemelerin yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılacak olunursa pürüzlü cam daha gözenekli bir yapıya sahipken, şömine camı daha düzgün bir yapıya sahiptir. n tipi 100 düzleminde silisyum wafer malzeme ise atomik seviyede düzlüğe sahiptir.



Şekil 3.5. Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM bünyesinde bulunan kül fırın

3.3. Metal Buharlaştırma

Tez kapsamında üretilen bütün ince filmler üzerine Şekil 3.9’da görseli de sunulduğu gibi eş düzlemler gümüş metal kontaklar büyütülmüştür. Metal kontakların büyütülmesinde eş düzlemin seçilmesinin sebebi farklı stres faktörleri uygulamalarında ince filme stres faktörlerinin ulaşması ve film üzerinde oluşturacakları etkinin net olarak belirlenmesini sağlamaktır. Üretim sonrasında ikincil ısıl işlem gören (tavlanan) TiO₂ ince filmler

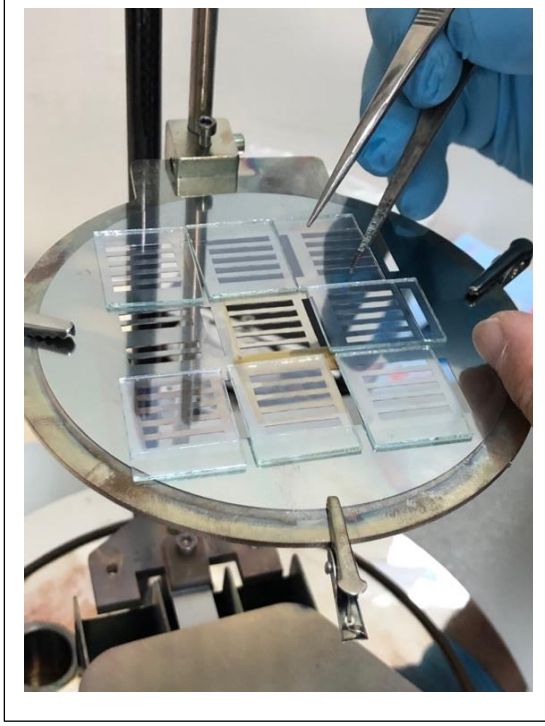
Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde hizmet veren termal buharlaştırma sistemi kullanılarak metal kontaktarı büyütülmüştür. Metal buharlaştırma yöntemi ile elde edilen metal kontaktara ait görseller Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8'de sunulmuştur. Şekil 3.9'da üretilmiş olan TiO_2 malzemelerin üzerine kaplanmış gümüş kontaktarın görseli sunulmuştur. TiO_2 ince filmler dışında üretilen $MAPbI_3$ filmlere Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Nano-malzemeler ve Optoelektronik (Nano-Op) laboratuvarında bulunan termal buharlaştırma sistemi ile aynı kontak geometrisi ve parametreleri kullanılarak metal kontaktar büyütülmüştür.

Metal Buharlaştırma Parametreleri:

Başlangıçta vakum sisteminin $10E-5$ mBar civarına düşmesi beklenmiştir. Gümüş miktarı, buharlaştırma süresi kaplama kalınlığına göre optimize edilmiştir. Sistem $10E-5$ 'de sabitlenince (YETEM'de) 70 amperde, (Nano-Op'da) 150 amperde 4.5 dakika kaplama yapılmıştır. Maske yardımı ile 500 nm kalınlığında Ag (gümüş) metal kontaktar atılmıştır. Daha sonra sistemin 20 dakika soğuması beklenerek gümüş kontak atılan malzemeler elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Metal buharlaştırma cihazı



Şekil 3.7. Tavlama yapılmış TiO_2 malzemeler



Şekil 3.8. Gümüş Buharlaştırma İşlemi



Şekil 3.9. Gümüş kontak atılan TiO₂ malzemeler

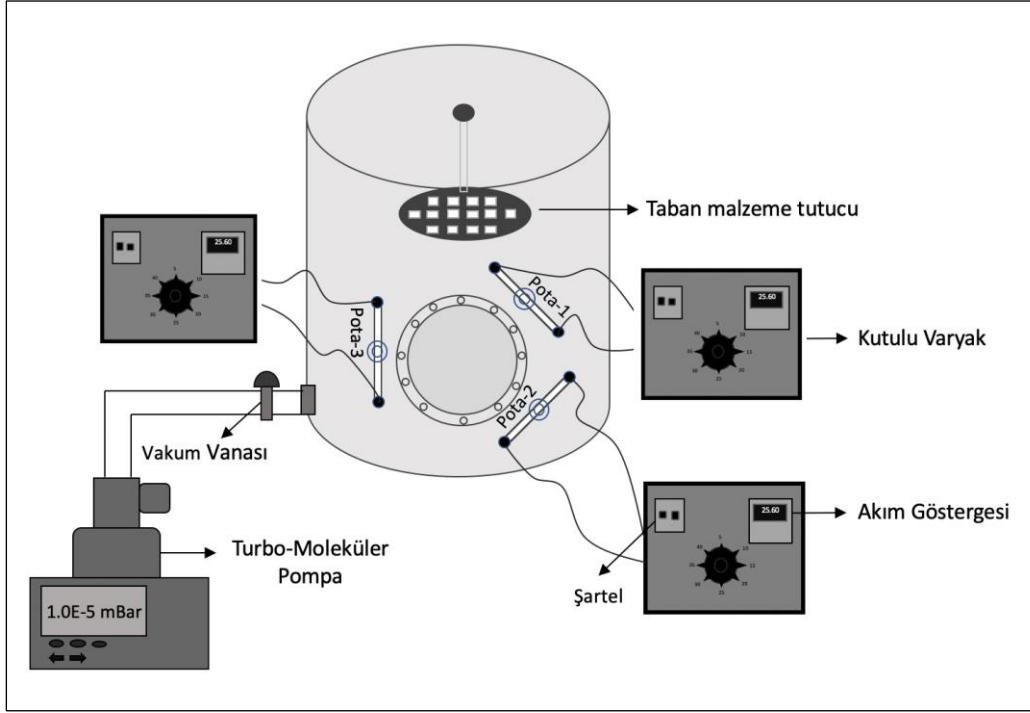
3.4. Termal Buharlaştırma Sistemi

Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden en çok kullanılan bir diğer yöntem Termal buharlaştırma yöntemidir. Bu yöntemin amacı, kaplanmak istenen malzemeye ısı verilerek buharlaştırılması sağlanır ve buharlaşan atomlar kaplanacak olan taban malzeme üzerinde birikir. Termal buharlaştırma sistemi vakum odası, turbo-moleküler vakum pompası, vakum seviyesinin okuyucusu, akım kaynakları, akım kaynaklarının bağlı olduğu pabuçlar, pabuçlar arasına yerleştirilmiş potalar, potaların üzerine yerleştirilmiş kapatıcılar (shutter) ve döner taban malzeme tutucudan oluşmaktadır. Termal buharlaştırma sisteminde buharlaştırılmak istenilen malzemenin buharlaşma sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık 100 °C ile 1800 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışılabilir. Yine termal buharlaştırma sisteminde üretim öncesinde vakum seviyesi $\sim 10^{-6}$ mBar seviyesinde olması beklenmektedir. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Nano-Op laboratuvarında bulunan termal buharlaştırma sisteminin görseli Şekil 3.10’da sistemin iç tasarımının şematik çizimi Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.10. Termal buharlaştırma sistemi

Şekil 3.11’ de kimyasal malzemelerin eklendiği potalar üzerinden yüksek akım geçirilerek potalar ısıtılmaktadır. Potaların dirençleri sabit olduğundan akım arttırıldıkça potaların üzerindeki sıcaklık da artar. Potaların sıcaklığı buharlaştırılmak istenilen malzemenin buharlaşma sıcaklığına ulaştığında buharlaşma eylemi başlar. Sistemde bulunan shutterların açılması ile buharlaşan atomlar taban malzeme tutucuya doğru yükselerek taban malzeme tutucu üzerine yerleştirilmiş taban malzemelere tutunur ve ince film büyüme işlemi gerçekleşmiş olur.



Şekil 3.11. Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi

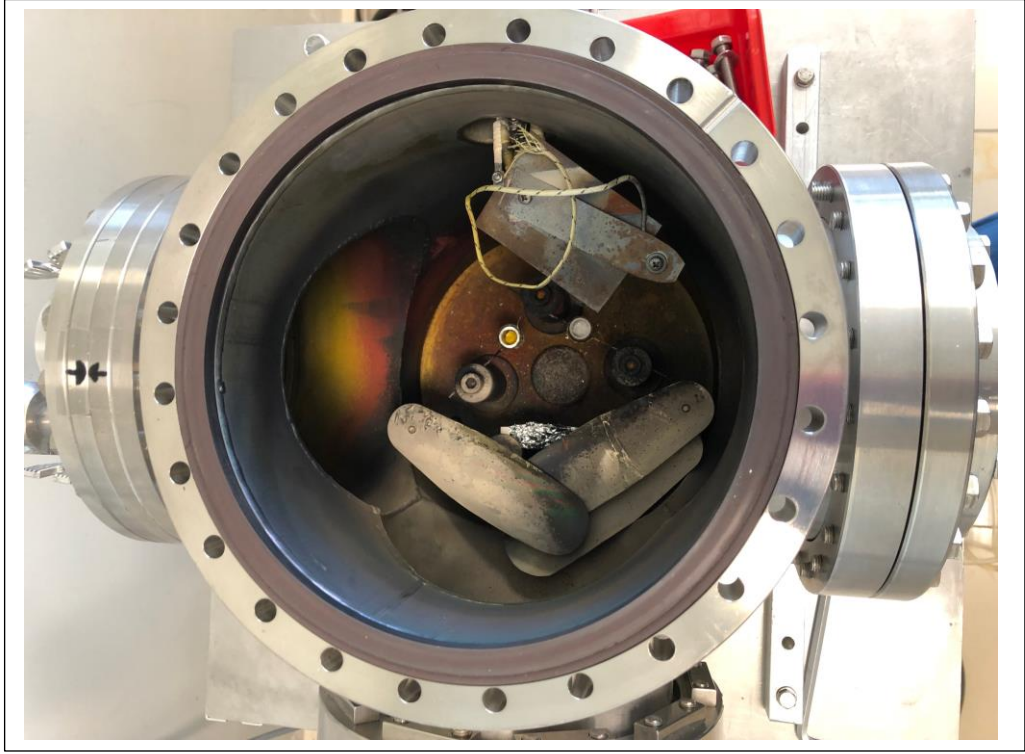
Termal buharlaştırma sisteminde Pota 1 ve Pota 2 organik potalara bağlı iki adet kutulu varyak ve Pota 3 metal buharlaştırma potasına bağlı bir adet kutulu varyak olmak üzere toplam üç adet kutulu varyak bulunmaktadır. Kutulu varyakta belirlenmiş ayar sahası aralığında, istenilen akımı manuel olarak ayarlamayı sağlar. İçerisinde bulunan varyak, tek sargılı emaye bakır telin toroidal sac nüvenin üstüne sarılması ile oluşturulur. Gücü ve voltaj ayarını sağlayan tüm yükü varyak sağlamaktadır. Kutulu varyağın üzerindeki gösterge ile çekilen amperi anlık olarak görülebilmektedir. Organik potaların bağlı olduğu varyaklar, buharlaşma sıcaklığına bağlı olarak 220V AC girişli, 50 Hz. 0-7,5 Vac ayarlı 100 ampere kadar akım verilmektedir. Metal buharlaştırma potasına bağlı kutulu varyak sisteme 220V AC girişli, 50 Hz., 0-5 Vac ayarlı ve 300 ampere kadar akım verilmektedir.

Çapı 1mm olan tungsten telin 20°C direnci $\sim 5 \times 10^{-6}$ ohm/cm dir. Tungsten tele akım uygulandığında malzemenin direncinden kaynaklı olarak tel ısınır. Telin orta bölümünde bulunan potanın çevresine sarılı kuarts pota da telin ısınmasına bağlı olarak ısınır. Bu süreç pota içerisinde koyulan malzemenin ısınması şeklinde devam eder. Potanın içinden malzemelerin buharlaşma sıcaklığına geldiğinde sistemin vakum ortamında olmasının da

etkisi ile katı açılı yaklaşımı ile malzeme buharlaşmaya başlar. Katı açılı ne kadar dar olursa kaplanacak yüzey de o kadar homojen olur ve ince filmin kalınlığı kontrol edilebilir (Anonim, 2022b). Buna bağılı olarak katı açılı daralması ile daha az madde miktarı ile daha homojen ince film üretimi de mümkündür. Bu nedenle tez kapsamında üretilen ince filmle katı açılı yaklaşımı ile pota ile taban malzeme tutucu arasındaki mesafe 15 cm olacak şekilde ve potanın çapı 10 mm ve derinliği 13 mm olarak seçilmiştir. Daha önceki denemelerde kullanılan molibden potaların çapları çok daha geniş olduğundan homojen filmler üretilemezken kuarts potalar kullanılarak homojenite problemi çözülmüştür. Potalar arasındaki farkın daha rahat algılanabilmesi için Şekil 3.12’de görselleri sunulmuştur.

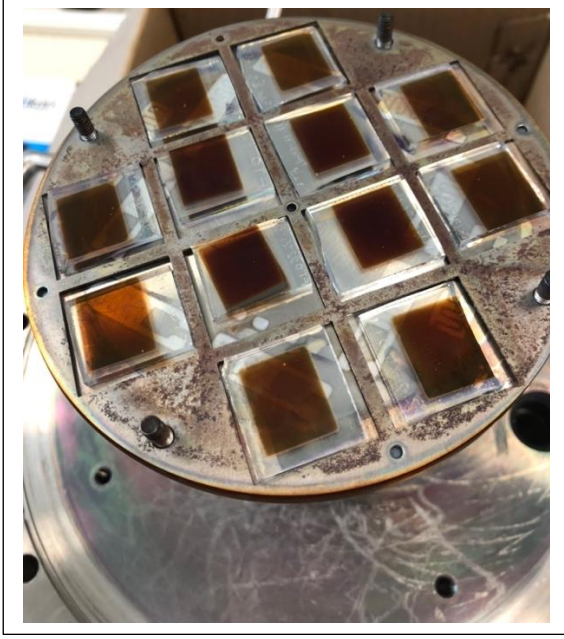


Şekil 3.12. Tungsten tel ve kuarts pota



Şekil 3.13. Termal buharlaştırma sistemi potaları

Şekil 3.13'de termal buharlaştırma sisteminin içten görünüşü ve potaların konumlandırılması sunulmuştur. Şekil 3.14'de ise termal buharlaştırma sisteminde kullanılan maske tasarımları detaylı olarak sunulmuştur. Şekil 3.14'de hem ince film üretiminde ve elektriksel karakterizasyonunda kullanılan hem de perovskit güneş hücresinin katmanları ve t-metal kontak yapısının üretilmesinde kullanılan kombine maske grubu çizimleri ölçekleri ile birlikte sunulmuştur. Şekil 3.15'de termal buharlaştırma yöntemiyle maske uygulamaları gerçekleştirilerek mikroskop camları üzerine üretilen MAPbI_3 ince filmlerin görseli sunulmuştur.



Şekil 3.16. Termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen Perovskit güneş hücreleri

Termal buharlaştırma yöntemi ve maske uygulamaları ile FTO taban malzeme üzerine büyütülmüş TiO_2 üzerine büyütülen Perovskit optik soğurucu tabakanın görseli Şekil 3.16'da sunulmuştur. Üretilen yapının ($\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{MAPbI}_3$) üstüne karbon 60 (C_{60}) büyütülmüş ve üst metal(gümüş) kontaklar atılarak elde edilmiş Perovskit güneş hücresi ($\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{MAPbI}_3/\text{C}_{60}/\text{Ag}$) Şekil 3.17'de sunulmuştur. Şekil 3.17'de görüleceği gibi her bir cam tabaka üzerinde 10 adet ($0,08 \text{ cm}^2$) alanına sahip güneş hücreleri üretilmiştir. Her kontak yapısı ve hücre yapısı elektriksel ve optiksel olarak tek tek kontrol edilerek en uygun belirlenmiş hücre üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Gümüş kontak atılan Perovskit güneş hücreleri

3.5. Karakterizasyon Teknikleri

Işık Kalibrasyonu

Malzemelerin fotoiletkenlik ölçümleri farklı ışık akılarına maruz bırakılarak ölçülmüştür. Fotoiletkenlik ölçümlerinin tekrar edilebilir olması, fotoiletkenlik ölçümleri sonuçlarının hesaplamalarından ışııl yaratma oranı ve mobilite-yaşam süresi hesaplamalarının yapılabilmesi için önce malzeme üzerine gönderilen ışığın kalibre edilmesi gerekmektedir. Işığın kalibrasyonunda referans bir foto diyot kullanılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında Hamamatsu S2386-44K silisyum fotodiyot ışık akısının belirlenmesi için kullanılmıştır. Fotoiletkenlik ölçümlerinde mümkün mertebe tek renk ışık altında ölçüm yapılarak ışığın farklı dalga boylarından kaynaklı etkilerinin engellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ışık akısı ölçümlerinde beyaz ışık kaynağından kaynaklı diğer dalga boylarının engellenebilmesi için 635nm bant aralığı geçiren (bandpass) filtre kullanılmıştır. Bant aralığı geçiren filtre, dalga boyu belirli bir aralıkta ileten ve o aralığın dışındaki dalga boylarını (frekansları) zayıflatan bir filtrelerdir. Işık akısı kalibrasyonunda beyaz ışık kaynağı, odaklayıcı lens, bandpass filtre, fotodiyot ve elektrometre kullanılmıştır. Burada fotodiyotun parametreleri ışık akısının

belirlenmesindeki en önemli kriterlerdir. Işık kalibrasyonu yaparken beyaz ışık kaynağının ışık yolu üzerine 10 cm odak mesafesine sahip odaklayıcı lens yerleştirilir, odaklanan ışık bandpass üzerinden geçerek fotodiyot üzerine düşürülür ve fotodiyotun uçları arasında bir foto akım oluşur. Elde edilen fotoakım değeri ve fotodiyot parametreleri kullanılarak eşitlik 3.1'deki ışık akısı hesaplanır (Colinge, 2005).

$$F(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{A * QE(\lambda) * q} \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1 deki fotoakım 635nm bandpass filtreden geçen ve fotodiyotun uçları arasında oluşan akım $I(\lambda = 635\text{nm})$ dir. Eşitlik 3.1'deki A parametresi silisyum fotodiyotun alanını, QE silisyum fotodiyotun kuantum verimliliğini ve q elektronun birim yükünü göstermektedir. Yukarıda tanımlı parametreler kullanılarak ışığın akısı ($F(\lambda)$) eşitlik 3.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

Farklı ışık akısı değerleri elde edilebilmesi için ışık yolunun üzerine ışığı soğuran nötr yoğunluk filtreleri (ND) yerleştirilmektedir. Önce ENH Halojen lamba ve 10 cm odak mesafesi olan optik lens kullanılarak 635nm bandpass filtre ve Hamamatsu dedektör ışık yolu üzerine hizalanır. Işık yolu üzerine farklı yoğunluklarda (aşağıda yoğunluk tablosu verilmiştir) ND filtreler yerleştirilerek 635nm bandpass filtre ile elde edilmiş tek renk ışık ile fotodiyotda fotoakım $I(\lambda = 635\text{nm})$ üretilir. Yine fotodiyodun yüzey alanı A ve ışığın dalga boyuna karşılık gelen kuantum verimi QE ve q parametreleri kullanılarak ışık akısı eşitlik 3.1 yardımı ile hesaplanmaktadır.

Işık akısına bağlı ölçümler ışık yolundaki ekipmanların hizalanması (alligment) ve kalibrasyonları ile başlamıştır. Işık yolu üzerindeki ekipmanlar sırası ile sayılması gerekirse güneş spektrumuna yakın bir spektruma sahip Osram marka 120V 250W ENH beyaz ışık kaynağı ve ışık evi (Lamp house), Edmund marka 10cm odak uzaklığına sahip odaklayıcı lens, Newport marka 635nm band pass filtreler, Newport marka farklı ışık geçirgenliklerine sahip ND filtreler (Neutral Density Filter), ışık yolunu kesmek için bir ışık kesici (shutter), Hamamatsu S2386-44K kalibre silisyum fotodiyot ve Keithley 617 Elektrometreden oluşmaktadır.

Işık kaynağından çıkan ışık demeti lens aracılığı ile odak noktası tam fotodiyot üzerine düşecek şekilde odaklanmıştır (Işık kaynağı ile kriostat içerisindeki bulunan malzemenin mesafeleri önceden ölçülmüş ve ışık kalibrasyonu yapılırken bu değerler referans alınarak kullanılmıştır). Akabinde fotodiyot üzerine 635nm band pass filtre yerleştirilmiştir. Daha önceden belirlenen kombinasyonlarla ND filtreler yerleştirilerek ışık geçirgenliği ayarlanmıştır. Belirlenen ND kombinasyonları Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Işık yolu hizalanması bittikten sonra ışık kesici kapatılarak fotodiyot üzerine ışık düşmesi engellenmiş ve fotodiyotun doyum noktasına ulaşması engellenmiştir. Kararlı bir ışık kalibrasyonu yapılabilmesi için ışık kaynağı maksimum güçteyken 30’dk beklenmiştir ve sonrasında ölçümlere geçilmiştir. ND filtre kombinasyonu ve band pass filtre varken ışık yolundaki ışık kesici kaldırılmış ve fotodiyottaki foto akımı elektrometre aracılığı ile okunarak kaydedilmiştir. Ardından ışık kesici tekrar ışık yoluna koyularak ışığın fotodiyot üzerine düşmesi engellenmiş ve bu sırada bir sonraki ND filtre kombinasyonuna geçilmiştir. Bu şekilde band pass filtre ile %0.018 geçirgenlikten %100 (sadece band pass filtre) olacak şekilde ışık akısı okunarak ışık kalibrasyonu sağlanmıştır. Böylece tek renkte ışık akıları belirlenmiştir. Aynı düzenek kriostat içerisine malzeme yerleştirildikten sonra malzeme üzerine farklı ışık akıları düşürülerek gerçekleştirilmiş ve farklı ışık akılarına bağlı fotoiletkenlik değerleri kayıt altına alınmıştır. Işık akısına bağlı olarak ölçülen fotoiletkenlik değerlerinden malzemenin çoğunluk yük taşıyıcılarının hareketlilik yaşam süresi ($\mu\tau$ -çarpımları) çarpımları ışıl yaratma hızının fonksiyonu olarak hesaplanmıştır (Colinge, 2005).

$$\sigma ph = q * \mu\tau * G \quad (3.2)$$

Eşitlikte 3.2’deki σph ışık şiddetine bağlı elde edilen fotoiletkenlik bulgularını göstermektedir. Böylece bu eşitlikten serbest elektronların mobilite-yaşam süresi, $\mu\tau$ çarpımı elde edilmektedir (Colinge, 2005).

$$\mu\tau = \frac{\sigma ph}{q * G} \quad (3.3)$$

Perovskit güneş hücresi katmanlarını oluşturan TiO_2 , $MAPbI_3$ ince filmlerin önemli deneysel parametrelerinden birisi “mobilite-yaşam süresi çarpımı” ifadesidir. Eşitlik

3.3'de deneysel olarak elde edilen fotoiletkenlik bulgularından malzemenin fotovoltaiik kalitesini belirleyen mobilite-yaşam süresi, $\mu\tau$ çarpımı elde edilmektedir.

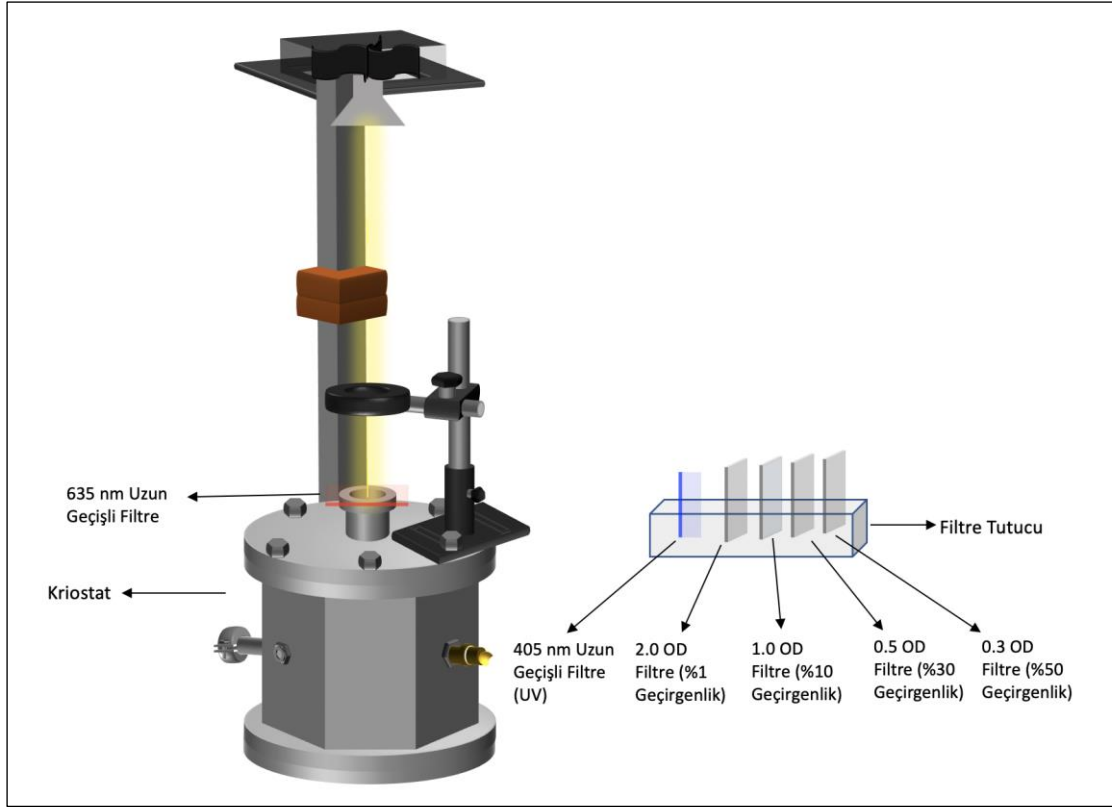
Fotoiletkenlik ölçümlerinde kullanılan tek renk ışık altında elektron-boşluk yaratma hızı G tamamen deney koşullarına ve malzemenin özellikleri ile belirlenmektedir.

$$G = \frac{F(\lambda) * [1 - R(\lambda)] * [1 - e^{-\alpha(\lambda)t}]}{t} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'de $F(\lambda)$ ışık akısını, $R(\lambda)$ ışığın film yüzeyinden yansıma katsayısını, $\alpha(\lambda)$ yarı iletken malzemenin $\lambda = 635$ nm dalga boyundaki optik soğurma katsayısını ve t ince film malzemenin kalınlığını göstermektedir. Fotoiletkenlik ile ışık altında elektron-boşluk yaratma hızı arasındaki ilişki Albert Rose'un 1978 de belirttiği gibi şu basit model ile ortaya konmuştur (Rose, 1978).

$$F(\lambda) = \frac{\sigma p h(\lambda)}{A * Q E(\lambda) q} \quad (3.5)$$

$$G = F(\lambda) * K \quad (3.6)$$



Şekil 3.18. ND Filtreler

Çizelge 3.1. ND kombinasyonları

IŞIK KALİBRASYONU (635nm'lik filtre)	
ND Filtreler	Geçirgenlik(%)
% 1+% 10+% 30+% 50	0,018
% 1+% 10+% 30	0,03
% 1+% 10+% 50	0,05
% 1+% 10	0,1
% 1+% 30	0,3
% 1+% 50	0,5
% 1	1
% 10+% 30+% 50	1,50
% 10+% 30	3
% 10+% 50	5
% 10	10
% 30+% 50	15
% 30	30
% 50	50
% 100	100

Güneş Hücresi Elektriksel Karakterizasyon Teknikleri

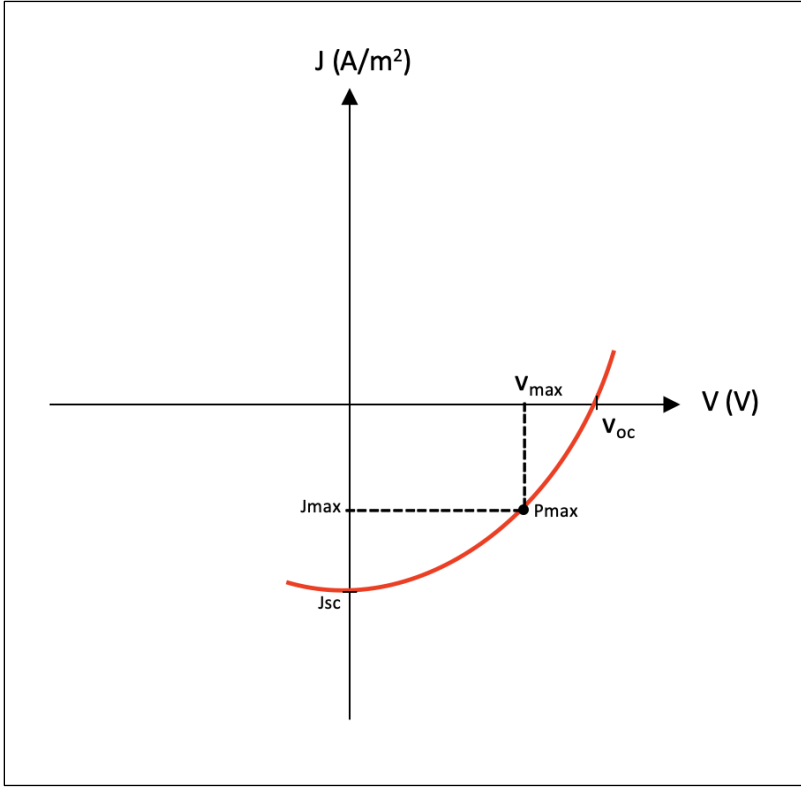
Doldurma Faktörü (Fill Factor-FF)

Güneş hücreleri ışık altında belirli bir akım ve gerilim üreten aygıtlardır. Ancak bilimsel olarak karşılaştırılmaların yapılabilmesi için birim alanda elde edilen akım değerleri yani akım yoğunluğu ($J=I/A$) önemlidir. Bu nedenle güneş hücresi ölçümünde elde edilen her ne kadar akım (I) olsa bile akımın alana bölünmüş hali olan akım yoğunluğu ($J=I/A$) kullanılmaktadır. Bir güneş hücresinden elde edilen en yüksek akım; gerilimin sıfır değerinde elde edilen kısa devre (I_{sc}) akımı ya da kısa devre akım yoğunluğudur (J_{sc}). Benzer şekilde bir güneş hücresinde elde edilen en yüksek gerilim; güneş hücresindeki akımın sıfır olduğu yani açık devre (V_{oc}) gerilimidir. Ancak bu çalışma noktalarının her ikisinde de güneş pilinden gelen güç ($P=J*V$) sıfırdır. Güneş hücresinin çalışması esnasında (yani hücre aydınlatılmış halde iken) hücrede oluşan en yüksek güç maksimum güç olarak tanımlanmaktadır. Maksimum güç eşitlik 3.7'de sunulmuştur.

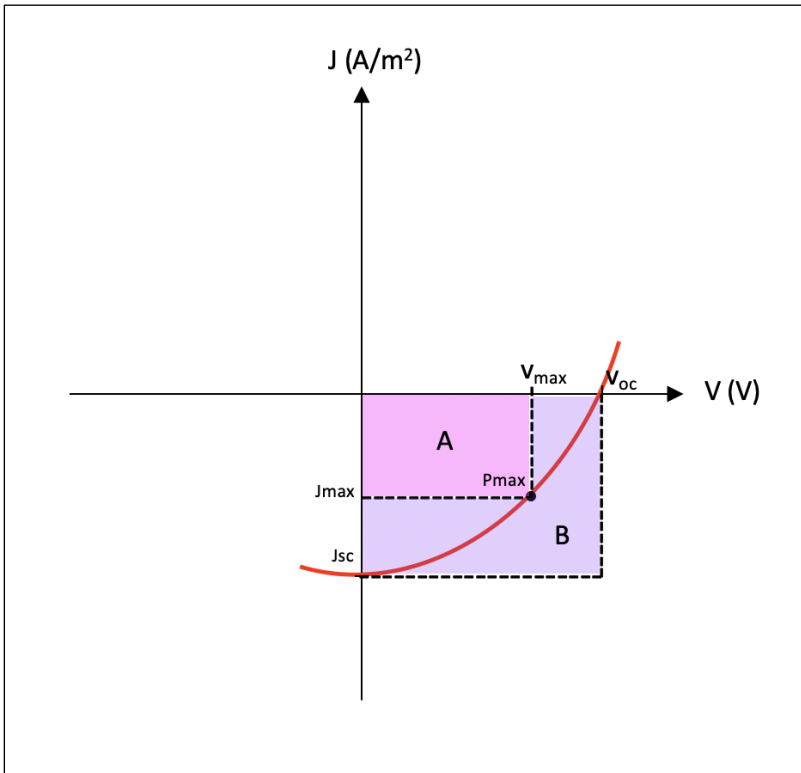
$$P_{max} = J_{max} * V_{max} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7'den görüleceği gibi maksimum güç ifadesini oluşturan parametrelerden akım parametresi maksimum akımı, gerilim parametresi ise maksimum gerilimi ifade etmektedir. Şekil 3.18'de kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum akım ve maksimum gerilim ifadelerinin J-V grafiği üzerinde gösterimi sunulmuştur. Güneş hücresindeki ifadelerin daha net anlaşılabilmesi için bilim dünyasında doldurma faktörü (FF) olarak tanımlanan bir ifade kullanılmaktadır. Doldurma faktörü bir güneş hücresinde maksimum güç parametreleri tarafından oluşturulan dikdörtgen alanın ($A_{lan}= A$), kısa devre akımı ve açık devre geriliminin oluşturduğu dikdörtgen alanına ($A_{lan}=B$) oranıdır. Doldurma faktörünün eşitlik olarak ifadesi eşitlik 3.8'de ve görsel ifadesi Şekil 3.19'da J-V grafiği üzerinden sunulmuştur.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * J_{sc}} \quad (3.8)$$



Şekil 3.19. J-V grafiği



Şekil 3.20. Doldurma faktörü grafiği

Buna göre doldurma faktörü (FF),

$$FF = \frac{V_{max} * J_{max}}{V_{oc} * J_{sc}} \quad (3.9)$$

$$FF = \frac{A \text{ alanı}}{B \text{ alanı}} \quad (3.10)$$

V_{max} = Gücün (P_{max}) maksimum olduğu değerdeki gerilim değeri

J_{max} = Gücün (P_{max}) maksimum olduğu değerdeki akım değeri

V_{oc} = Akımın sıfır noktasından geçtiği gerilim değeri (Açık devre voltajı)

J_{sc} = Gerilimin sıfır noktasından geçtiği akım değeri (Kısa devre akımı)

Şekil 3.19 ve 3.20'deki grafiklerdeki kırmızı çizgi hücre çıkış akımı eğrisini göstermektedir. Doldurma faktörünü grafiksel olarak ifade etmek gerekirse, doldurma faktörü güneş hücresinin "kareselliğinin" bir ölçüsüdür. Doldurma faktörü (FF) aynı zamanda akım gerilim (J-V) eğrisine uyan en büyük dikdörtgenin alanıdır.

Verimlilik (Efficiency)

Bir güneş hücresinin performansını diğeriyle karşılaştırmak için en yaygın kullanılan parametre verimliliktir. Verimlilik, güneş hücresinden çıkan enerjinin güneşten gelen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Verimlilik, güneş hücresinin performansını yansıtanın yanı sıra, gelen güneş ışığının spektrumuna, yoğunluğuna ve güneş hücresinin sıcaklığına bağlıdır. Güneş hücreleri AM1.5 koşulları altında ve 25°C sıcaklıkta ölçülür. AM 1.5; 1 metrekareye 1000 Watt düşen ışınım şiddetidir. Verimlilik hesabı eşitlik 3.12'de gösterilmiştir.

$$P_{max} = V_{oc} * J_{sc} * FF \quad (3.11)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} * J_{sc} * FF}{P_{in}} \quad (3.12)$$

P_{in} = Güneşten gelen enerji

3.5.1. Yapısal Karakterizasyonlar

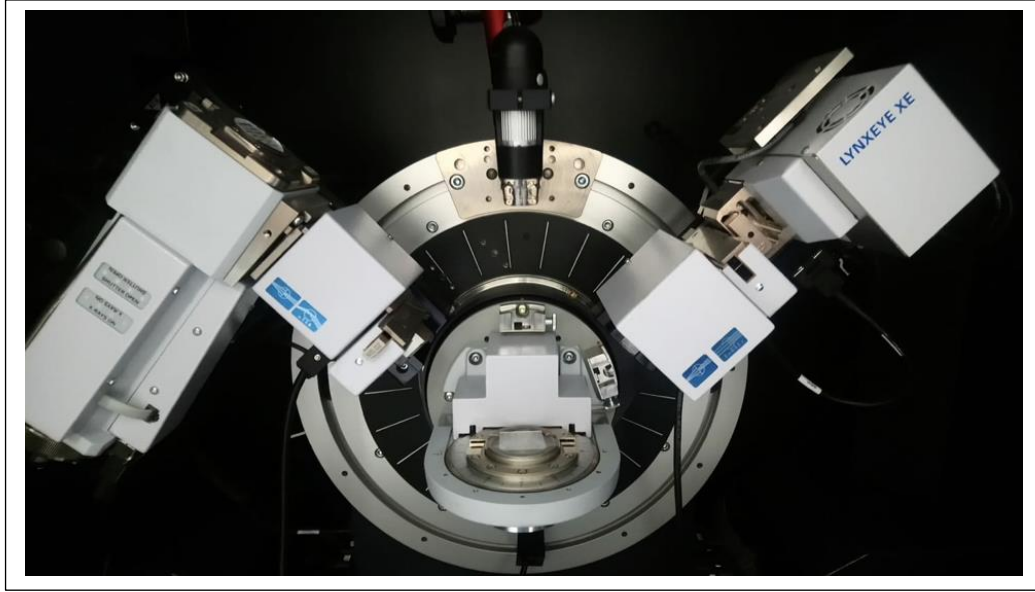
Perovskit güneş hücrelerini oluşturan her tabaka cam ve silisyum wafer taban malzeme üzerine büyütüldükten sonra yapısal karakterizasyon (XRD, SEM, UV-Vis) işlemine tabii tutulmuştur. Böylece malzeme katmanlarının yapısal özellikleri hakkında derinlemesine bilgi edinilmiş ve tekrarlanabilir üretimlerin gerçekleştirilebilmesi için malzeme optimizasyonları belirlenmiştir.

3.5.1.1. X-ışını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı analizleri Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi (MAKÜ) Bilimsel ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (BİLTEKMER) hizmet alımı şeklinde yapılmıştır. XRD analizinde ince film silisyum wafer malzeme kullanılmıştır. Böylece alt tabakalardaki gürültü olabildiğince azaltılmıştır. X-ışını kırınımı analizleri Brucker marka D8 ADVANCE model X-ışını Toz Difraktometresi cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümlerde 1,54 Å, Cu K(α) ışın kaynağı kullanılmıştır. 5 ile 60 derece arasında 2θ tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. X-ışını Toz Difraktometresi cihazı Şekil 3.21'de sunulmuştur.



Şekil 3.21. X-ışını Toz Difraktometresi cihazı (dıştan görünümü)

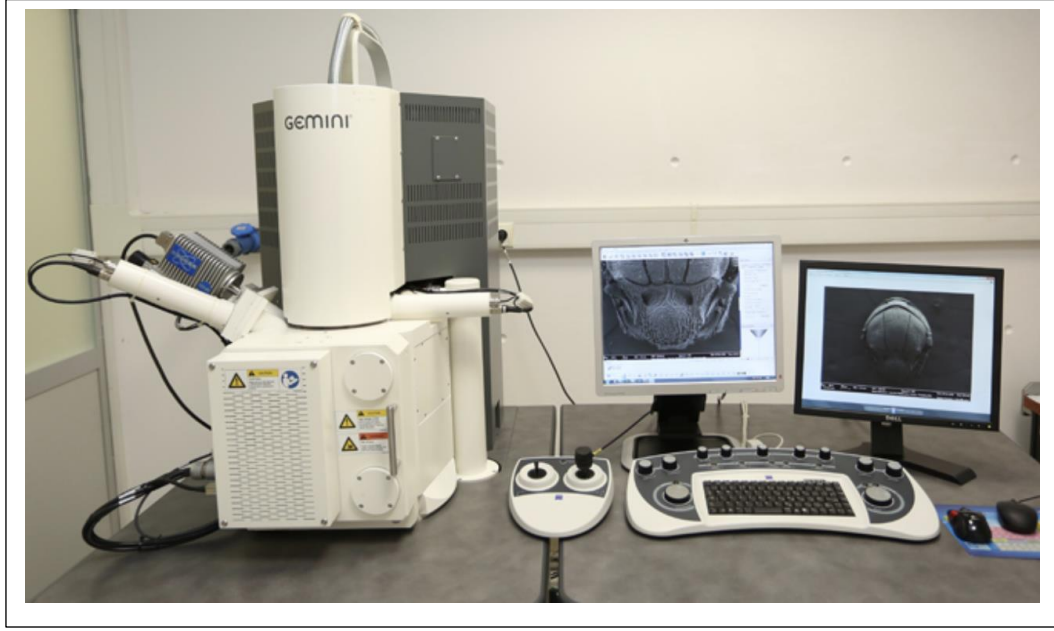


Şekil 3.22. X-Işını Toz Difraktometresi cihazı malzeme tutucu

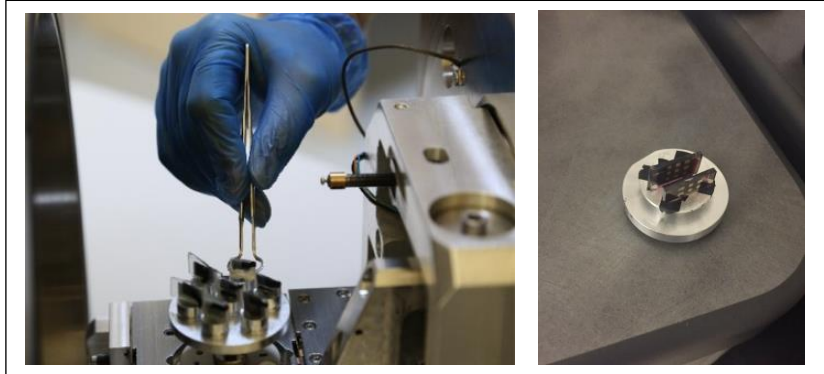
3.5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskop (SEM) analizi Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde hizmet alımı şeklinde yaptırılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu; malzemenin topografi ve kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir. Kısaca SEM-EDX olarak isimlendirdiğimiz ölçüm sistemi, bir taramalı elektron mikroskobuna entegre edilmiş EDX sisteminden oluşmaktadır ve nanogram mertebesindeki numune analizlerini yapmaktadır. Cihaz; optik kolon, numune haznesi, görüntüleme sistemi ve enerji dağılımlı spektrometre (EDX) bağlantısı olmak üzere dört temel kısımdan meydana gelmektedir. Taramalı elektron mikroskobu numunelerin yapılarını mikro ve nano boyutta analizini yapmaktadır (Ayas, 2017).

Malzemelerin SEM ve EDS analizleri Gemini marka cihaz ile yapılmıştır. Malzemelerin üzerine herhangi bir iletken malzeme kaplanmamıştır. SEM analizleri, taramalı elektron mikroskobu düşük vakuma alınarak yapılmıştır. Kabin basıncı 60 Pascal olarak ayarlanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu Şekil 3.23'de sunulmuştur.



Şekil 3.23. Gemini marka SEM cihazı



Şekil 3.24. Gemini marka SEM cihazı numune tutucu

3.5.1.3. Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi

Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi analizleri Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Nanobilim ve Nanoteknoloji Bölümü'nde bulunan laboratuvarında yapılmıştır. UV analizi Shimadzu 2600 cihazı ile yapılmıştır.

Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi cihazı ile ince film üzerinden absorblanmayan ışın yoğunluğu belirlenerek yani absorbans değerleri ve ışıl geçirgenlik değerleri ölçülerek belirlenmiştir. UV-Vis sistemi, 300 nm ile 1100 nm dalga

boyları arasındaki ışığın, bu ışın yoluna sahip bir ince filmdeki geçirgenliğinin T ya da absorbansının A ölçümüne dayanmaktadır. Numuneden çıkan ışık şiddetinin numuneye giren ışık şiddetine oranına geçirgenlik T denilmektedir. Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi cihazı Şekil 3.25’de sunulmuştur.



Şekil 3.25. Morötesi ve Görünür Bölge (UV-Vis) Soğurma Spektroskopisi cihazı

UV-Vis ölçüm sisteminden elde edilen parametreler kullanılacak ince film malzemelerin optik soğurma katsayıları eşitlik 3.13’de gösterilmiştir.

$$(ahr)^{\gamma} = A(h\nu - E_g) \quad (3.13)$$

$$0 = A(hr - E_g)$$

$$E_g = hr$$

$\gamma = 1/2$ indirekt

$\gamma = 2$ direkt

$y = m(x)$

α = Optik soğurma katsayısı

h = Plank sabiti

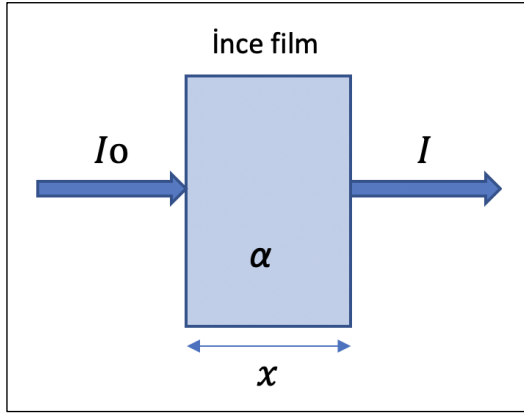
ν = Frekans

A = Matematiksel sabit

E_g = Optik enerji aralığı

γ = Elektronik geçiş ifadesi

Beer-Lambert Yasasına göre, Bir ortamdan geçen ışık miktarı, ışığın ortam içinde kat ettiği yol ve ortam konsantrasyonu ile logaritmik olarak ters orantılı, emilen ışık miktarı ise doğru orantılıdır. Beer-Lambert Yasası eşitlik 3.14'de sunulmuştur. Şekil 3.26'da optik soğurma katsayısı (α) enerjiye olan grafiğinde kırmızı ok işaretinin x eksenini kestiği parametre optik enerji aralığıdır.



Şekil 3.26. Işığın ince film içerisinde geçişinin görselleştirilmiş gösterimi

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.14)$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha x} = e^{-\alpha l}$$

$$\log \frac{I}{I_0} = \log(e^{-\alpha x})$$

$$\log \frac{I}{I_0} = -\alpha l \log(e)$$

$$\log(e) = 0,4343$$

$$\log \frac{m}{n} = -\log \frac{n}{m}$$

$$\log \frac{I}{I_0} \equiv A = -\alpha l(0,4343)$$

$$\log \frac{I_0}{I} \equiv A = \alpha l(0,4343)$$

$$\alpha = \frac{1}{0,4343}$$

$$\alpha = 2,302A(cm^{-1})$$

A= absorbans

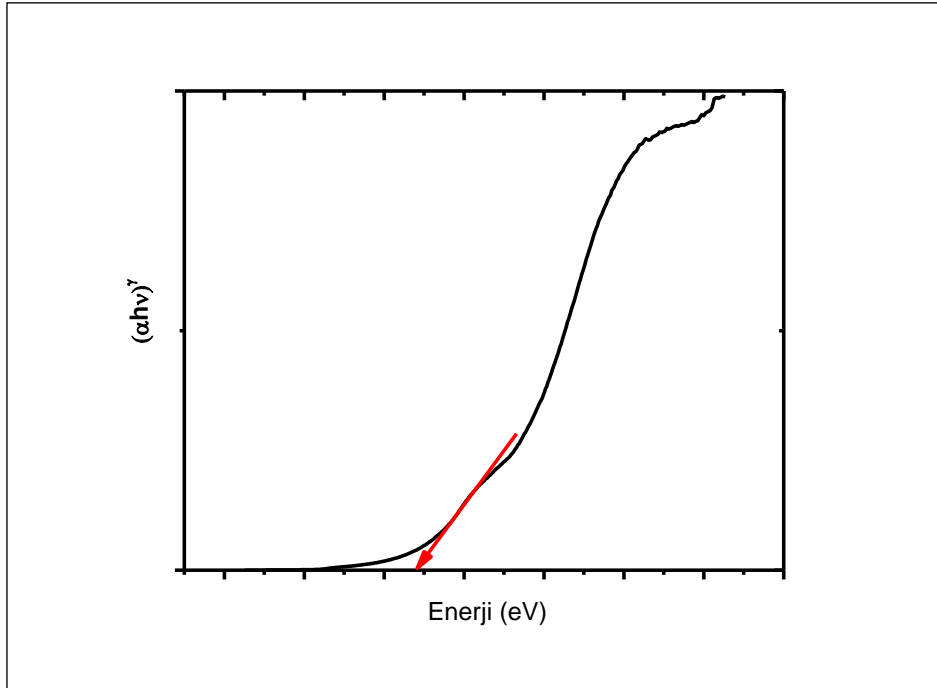
I= Geçen ışınım şiddeti

I₀= Gelen ışınım şiddeti

α = Optik soğurma katsayısı

x= İnce filmin kalınlığı

Bu eşitliğin grafiğini sunmak gerekirse;



Şekil 3.27. Optik soğurma katsayısı tauc grafiği ve optik enerji aralığı belirlenmesi

3.5.2. Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyonlar

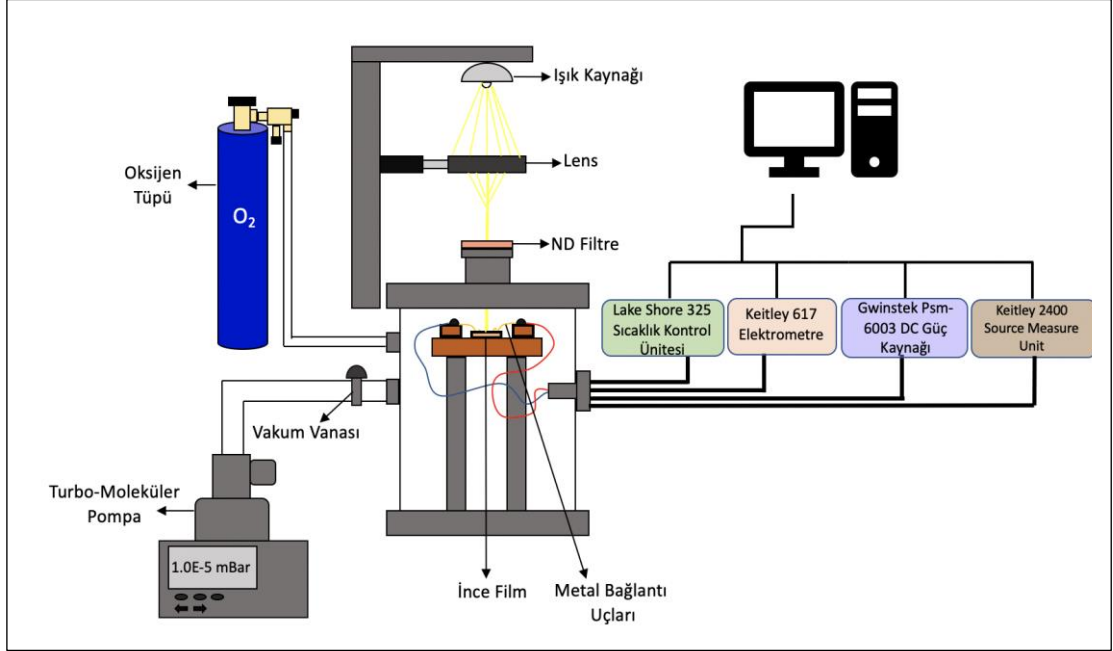
Malzemelerin Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyon ölçümleri Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILMAZ tarafından kurulan Nano Malzemeler ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Şekil 3.26'de gösterilen Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyon ölçüm sisteminde; Perovskit güneş hücresini oluşturan; TiO_2 , $MAPbI_3$ tabakalarının yüksek vakum ortamında ölçülmesini sağlayan bir adet kriyostat, bir adet turbo moleküler pompa, bir adet PKR 251 model pirani tipi vakum ölçer, bir adet Pfeiffer 3691 model dijital vakum okuyucu, bir adet Lake Shore 325 model sıcaklık kontrol ünitesi, bir adet Keithley 617 Elektrometre, bir adet GWInstect marka PMS 6003 model DC gerilim kaynağı, bir adet Keitley 2400 Source Measure Unit, bir adet Osram ENH 250W halojen lamba bulunmaktadır. Sistemin ve kriostatın fotoğrafları Şekil 3.28 ve 3.29'da sırası ile sunulmuştur.

Sistemdeki Kriyostatın tasarımı bireysel olarak yapılmış olup oda sıcaklığı ile 450K sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Turbo-drag moleküler pompa, bir adet Pfeiffer ve Leybold firmalarının parçalarının birleştirilmesi ile oluşturulmuş ve 10^{-6} mBar vakum seviyesine inebilmektedir. Lake Shore 325 model sıcaklık kontrol ünitesi ile ölçümü yapılan malzemenin sıcaklığı değiştirilebilmektedir. Keithley 617 Elektrometre ile ölçümü yapılan malzemelere uygulanan dc gerilim altında sıcaklığa bağlı karanlık akım değerleri ile ışık şiddetine bağlı fotoakım değerleri ölçülmektedir. GWInstect marka PMS 6003 model DC gerilim kaynağı ile incelenen malzemelerin paralel metal kontakları arasında sabit elektrik alan uygulanmaktadır. Keitley 2400 Source Measure Unit ile de güneş hücresinin ölçümleri yapılır. Son olarak Osram marka ENH 250W halojen lamba ışık kaynağı ile fotoiletkenlik değerleri tek renk ışık altında elde edilmektedir.

Ayrıca, sistemde çok düşük karanlık ve fotoakımları algılamak için kullanılan düşük gürültü değerlerine sahip BNC kablolar, malzemedan gelen verileri ve cihazların kontrolünün sağlandığı GPIB kablolar, GPIB kart ve HT- BASIC Yazılım bulunmaktadır. Sistem ile alınan bir tam tur ölçüm prosedürü Şekil 3.31'de detaylı olarak sunulmuştur.

İletkenlik ölçümlerinin detayları “malzemelerin ölçüm prosedürü” başlığı altında detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.28. Perovskit Güneş Hücresi Tabakalarının Optiksel Karakterizasyonu için kullanılan Fotoiletkenlik Ölçüm Sisteminin şematik tasarımı

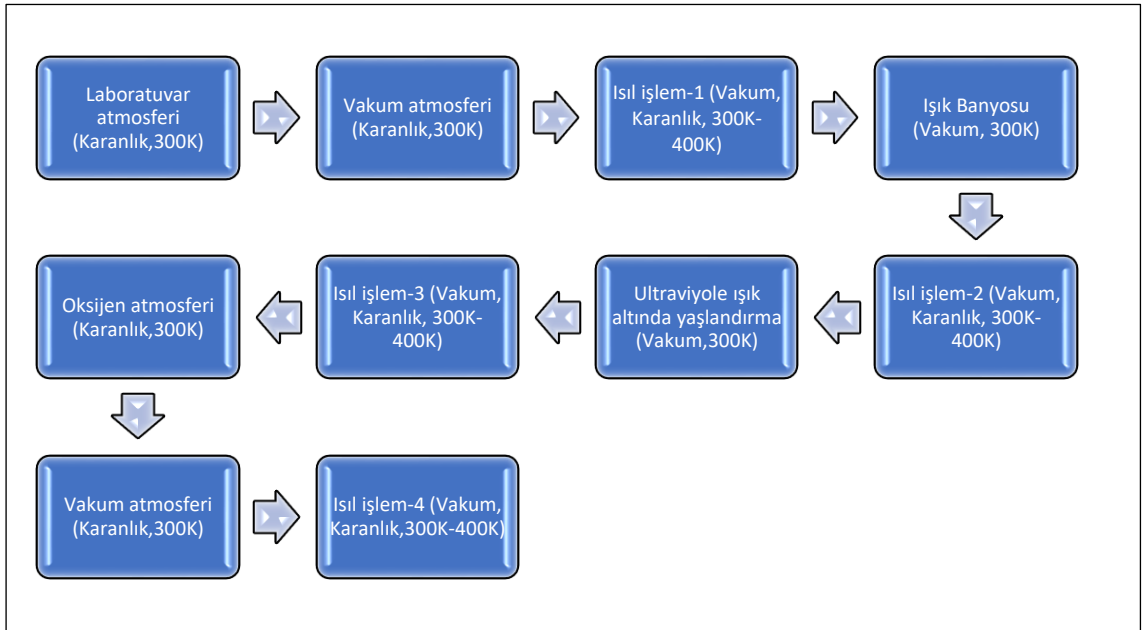


Şekil 3.29. İnce film malzemelerin Optiksel Karakterizasyonu için kullanılan Fotoiletkenlik Ölçüm Sisteminin resmi (Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi)



Şekil 3.30. Kriostata malzeme yerleştirilmesi

Elektriksel ve optiksel ölçüm adımları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.



Şekil 3.31. Kriostata yerleştirilen malzemenin karanlık-aydınlık ortamda ölçüm alınması ile ilgili akış diyagramı.

Malzemelerin ölçüm prosedürü

Üretilen her tabaka kriostata yerleştirildikten sonra oda sıcaklığında (25⁰C) pozitif polaritelerde tarama yapılarak Ohmik I-V ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde malzemenin Ohmik davranışı belirlenerek malzemenin bütün ölçümleri Ohmik bölgede belirlenen gerilim altında gerçekleştirilmiştir.

- i. Ohmik gerilimi belirlenmesinin ardından malzemelerin karanlık iletkenlik değerleri bilgisayar kontrollü olarak zamana bağlı bir şekilde kayıt altına alınmıştır. Ardından kriostat sistemi vakuma alınmaya başlamıştır. Vakum ortamında iletkenlik değerleri kararlı hale gelene kadar sistem Ohmik gerilim altında belirlenen zaman aralıklarında (60s) iletkenlik değerleri kayıt altına alınmıştır. İletkenlik değerlerinin kararlı hale gelmesinden sonra atmosferik koşullar uygulanarak malzemedeki elektriksel değişimler iletkenlik yöntemi ile kayıt altına alınmıştır.
- ii. Tabakaların fotoiletkenlik ölçümlerinin ardından oda sıcaklığında vakuma alınmıştır. Ardından tabakaların üretim sıcaklığına (her malzeme için farklı bir üretim sıcaklığı vardır) yakın sıcaklıklara kadar 10'ar derecelik adımlarla ısıtılacak ve her karanlık iletkenlik ölçümü alınmıştır. Bu şekilde her tabakaya ait aktivasyon enerjileri ve buna bağlı olarak yasak enerji aralıkları belirlenmiştir. Bu durum tabakalar arasındaki enerji aralıklarının belirlenmesine ve uygulamada daha verimli bir mimari oluşturulmasına imkan sağlamıştır.
- iii. Isıl işlem döngüsünün ardından tabakalar yine vakum ortamında karanlık iletkenlik değerleri kararlı hale gelene kadar bilgisayar kontrollü bir şekilde karanlık iletkenlik değerleri kayıt altına alınmıştır. Burada elde edilen karanlık iletkenlik değerleri 2 numaralı adımda elde edilen değer ile karşılaştırılarak atmosferik etkinin malzemedeki geri-dönüşümlü/kısmi-geri-dönüşümlü ya da geri-dönüşümsüz bir etki yapıp yapmadığının belirlenmesine imkan sağlamıştır.

i, ii ve iii numaralı prosedür her tabaka için ve her farklı atmosferik koşul için tekrarlanmıştır. Elektriksel karakterizasyon ölçümlerinin tamamı HT-Basic programı ile bilgisayar kontrollü olarak ve gerçek zamanlı (real time) gerçekleştirilmiştir.

3.5.3. Tabakalara Uygulanacak Stres Faktörleri

Tabakaların karakterizasyonlarında bir diğer önemli etken ise tabakalara uygulanacak stres faktörleridir. Bu faktörlerin her birinin etkisinin net olarak anlaşılabilmesi için her stres faktörünün tek başına tabakaya uygulanması ve ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle 4 ana stres faktörü tek tek detaylı olarak tabakalar üzerinde uygulanmıştır. Bu stres faktörleri laboratuvar atmosferi, ışık banyosu, UV yaşlandırma ve oksijen yaşlandırmasıdır.

1. Kriostat içerisinde laboratuvar atmosferinde (atmosferik etkiler elimine edilerek), 300 K'de sadece laboratuvar atmosferinin tabaka üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak elektriksel ve optiksel ölçümler ile kayıt altına alınmıştır.

2. Kriostat içerisinde yüksek vakum ortamında (atmosferik etkiler elimine edilerek), 300 K'de ışık banyosuna maruz bırakılarak sadece ışık banyosunun tabaka üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak elektriksel ve optiksel ölçümler ile kayıt altına alınmıştır.

3. Kriostat içerisinde yüksek vakum ortamında (atmosferik etkiler elimine edilerek), 300 K'de UV ışığa maruz bırakılarak sadece UV ışığın tabaka üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak elektriksel ve optiksel ölçümler ile kayıt altına alınmıştır.

4. Kriostat içerisine vakum ortamında (10^{-5} mBar) (atmosferik etkiler elimine edilerek), 300 K'de karanlıkta (UV ışığın etkisi elimine edilerek) bekleyen malzeme yüksek saflıkta (%99.9) oksijen gazına maruz bırakılarak sadece oksijen gazının tabaka üzerindeki etkisi zamana bağlı olarak elektriksel ve optiksel ölçümler ile kayıt altına alınmıştır.

Laboratuvar atmosferinde ölçüm için kriostat'a yerleştirilen bir tabaka için bir tam ölçüm prosedürü aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Laboratuvar atmosferinden itibaren her farklı atmosferik koşulda bu prosedür tekrarlanmıştır.

Tabakalara Uygulanacak Bir Tam Ölçüm Prosedürü:

Akım Gerilim Ölçümü (I-V):

✓ Her Perovskit tabakası laboratuvar atmosferinde kriostat içerisinde, karanlık ortamda ve 250W ENH Holojen beyaz ışık altında ND filtre seti kullanılarak I-V ölçümü alınmıştır. Bu şekilde tabakanın her farklı atmosferde Ohmik bölgede ölçümleri gerçekleştirilerek tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir ölçüm sonuçları belirlenmiştir.

✓ Tabakalar her işlem sonrasında (ısıtım işlemi, ışık altında ölçümler ya da farklı atmosferlere geçişler) I-V ölçümü tekrarlanarak malzemelerin Ohmik bölgesinde bir değişiklik olup olmadığı belirlenmiştir.

Zamana Bağlı Karanlık İletkenlik Ölçümü:

✓ I-V ölçümü tamamlanan tabakaların Ohmik gerilim bölgesinin belirlenmesinin ardından tabakaya Ohmik bölgede sabit bir DC gerilim uygulanmıştır. Bu uygulama ile eş zamanlı olarak zamana bağlı karanlık iletkenlik ölçümü ve vakum pompası başlatılmıştır. Bu şekilde tabakada karanlık ve vakum ortamında zamanla elektriksel iletkenlik değerlerinde herhangi bir değişim olup olmadığı belirlenmiştir.

✓ Her farklı atmosfer ya da işlem sonrasında (Laboratuvar atmosferi, Laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçişi, Oksijen atmosferi ya da ısıtım işlemi sonrası) zamana bağlı karanlık iletkenlik ölçümleri alınmıştır. Bu şekilde her farklı atmosfer ya da işlem sonrasında malzemenin kararlı haline geliş süresi, kararlı halinin bir önceki duruma göre değişimleri detaylı olarak belirlenmiştir.

Perovskit güneş hücresini oluşturan; TiO_2 , $MAPbI_3$ tabakalarının ayrı ayrı karakterizasyonu aşağıdaki sıralamaya göre yapılmıştır.

3.5.3.1. Laboratuvar Atmosferi

İlk olarak ölçümü yapılacak güneş hücresi tabakası (TiO_2 ya da MAPbI_3 ince film) laboratuvar atmosferinde kriostat içerisine yerleştirilir. Metal bağlantı uçlarıyla bağlantıları yapıldıktan sonra multimetrenin direnç ölçer skalası ile ince filmin kontakları ve BNC çıkış uçlarına iletkenlik kontrolü yapılır. İletkenlik kontrolünden sonra kriostatın kapağı kapatılarak sistemin karanlık olması sağlanır. HT-BASIC programı ile yazılan “Akım-Gerilim Ölçüm Programı” kullanılarak her bir malzeme için akım-gerilim ölçümü DC gerilim altında 0 V ile +30 V arasında değiştirilerek karanlık ve ışık altında kontakların ohm yasasına uygun olup olmadığı DC gerilim bölgesi LogI-LogV ve $\text{Log}(\sigma)\text{-LogV}$ grafiklerinden belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ortamda kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına alınır. Sonrasında 25°C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50’lik, %1+%10+%30’luk, %1+%10+%50’lik, %1+%10’luk, %1+%30’luk, %1+%50’lik, %1’lik, %10+%30+%50’lik, %10+%30’luk, %10+%50’lik, %10’luk, %30+%50’lik, %30’luk, %50’lik ve %100’lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

3.5.3.2. Vakum Atmosferi

Sabit sıcaklıkta (300 K) HT- BASIC programı ile yazılmış olan “Zamana Bağlı Karanlık İletkenlik Programı” başlatılır. Program çalışırken belirli aralıklarla programdan veriler alınıp grafik çizilerek kararlı duruma gelmesi kontrol edilir. İletkenlik değerleri kararlı hale geldikten sonra program çalışırken turbo moleküler pompa çalıştırılarak sistem vakum altına alınır ve vakuma başladığı dakika kayıt altına alınır.

Sistem vakum ortamında iken dakikada bir olacak şekilde ayarlanan programdan belirli aralıklarla programdan veriler alınıp grafik çizilerek kararlı duruma gelmesi kontrol edilir. Vakum atmosferinde kararlı duruma ulaşan malzemenin zamana bağlı iletkenlik kayıt programı durdurulur ve yeniden “Akım-Gerilim Ölçüm Programı” karanlık ve ışık

altında I-V ölçümü alınır. Vakum ortamındaki I-V grafiği çizdirilerek ohmik bölgede değişim olup olmadığı belirlenir Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ve vakum ortamında kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına alınır. Sonrasında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'luk, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

Sistem vakum ortamında iken belirlenen Ohmik gerilim uygulanarak HT- BASIC programı ile yazılmış olan "Isıl işlem Programı" başlatılır. Malzemelerden; MAPbI₃ 300 K'den 400 K'e kadar , TiO₂ 300 K'den 450 K'e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K sıcaklık artışı olacak şekilde ve her 10 K'de karanlık iletkenlik verileri ölçümü alınarak yapılır.

MAPbI₃ için 400 K'e , TiO₂ için 450 K'e ulaşan malzemeler (MAPbI₃ için 400 K'e, TiO₂ için 450 K'de 1800 s) ısıl işleme (tavlama) maruz bırakılır. Sonrasında MAPbI₃ için 400 K'den 300 K'e, TiO₂ için 450 K'den 300 K'e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K azalacak şekilde ve her 10 K'de karanlık iletkenlik değerleri ölçülür ve soğutulur. Malzeme 300 K'e geldiğinde zamana bağlı iletkenlik programını çalıştırır ve 300 K'de zamana bağlı kararlı karanlık iletkenlik seviyesi belirlenir.

300 K'e ulaşan malzemenin laboratuvar atmosferinde yaşlanmış halinden sonraki yani referans değeri (asdeposited condition) belirlenmiş olur. Isıl işlem adımı bittikten sonra malzeme oda sıcaklığında vakum atmosferindeyken tekrar karanlık ve ışık altında I-V ölçümleri alınır ve ohmik gerilim belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Tabaka, karanlık ve vakum ortamında kararlı hale geldikten sonra tabakanın karanlık iletkenlik değeri belirlenir. Sonrasında 25⁰C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile

%1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

3.5.3.3. Işık Banyosu

Bu adımda malzemeler 250W ENH Halojen lamba ile 60 dakika süreyle ışık banyosuna maruz bırakılmıştır. Işık banyosuna maruz bırakma esnasında atmosferik koşullar elimine edilir. Malzeme sıcaklığı 300K'de ve sistemin vakum atmosferi (10^{-5} mBar) sabit tutulur. Böylece ışık banyosunun malzeme üzerindeki etkisi belirlenmiş olur. Işık banyosundan sonra HT-BASIC programı ile yazılan "Akım-Gerilim Ölçüm Programı" kullanılarak her bir malzeme için akım-gerilim ölçümü DC gerilim altında 0 V ile +30 V arasında değiştirilerek karanlık ve ışık altında kontakların ohm yasasına uygun olup olmadığı DC gerilim bölgesi LogI-LogV ve Log(σ)-LogV grafiklerinden belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ortamda kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına alınır. Sonrasında 25⁰C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

Sistem vakum ortamında iken belirlenen Ohmik gerilim uygulanarak HT- BASIC programı ile yazılmış olan "Isıl İşlem Programı" başlatılır. Malzemelerden; MAPbI₃ 300 K'den 400 K'e kadar, TiO₂ 300 K'den 450 K'e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K sıcaklık artışı olacak şekilde ve her 10 K'de karanlık iletkenlik verileri ölçümü alınarak kayıt altına alınır.

MAPbI₃ için 400 K'e , TiO₂ için 450 K'e ulaşan malzemeler (MAPbI₃ için 400 K'e, TiO₂ için 450 K'de 1800 s) ısıtılma (tavlama) maruz bırakılır. Sonrasında MAPbI₃ için 400 K'den 300 K'e, TiO₂ için 450 K'den 300 K'e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K azalacak şekilde ve her 10 K'de karanlık iletkenlik değerleri ölçülerek kayıt altına alınır ve soğutulur. Malzeme 300 K'e geldiğinde zamana bağlı iletkenlik programı çalıştırılır ve 300 K'de zamana bağlı kararlı karanlık iletkenlik seviyesi belirlenir.

300 K'e ulaşan malzemenin laboratuvar atmosferinde yaşlanmış halinden sonraki yani referans değeri (asdeposited condition) belirlenmiş olur. Malzeme ısıtılma sonrasında oda sıcaklığında vakum atmosferindeyken tekrar karanlık ve ışık altında I-V ölçümleri alınır ve ohmik gerilim belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ve vakum ortamında kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına alınır. Sonrasında 25°C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

3.5.3.4. UV Yaşlandırma

Bu aşamada malzemelere 405 nm uzun geçişli filtre ve 60 dakika süre ile UV yaşlandırma yapılmıştır. UV yaşlandırma sonrasında malzeme sıcaklığı 300K'de ve sistemin vakum atmosferi (10⁻⁵ mBar) sabit tutulur. Böylece UV yaşlandırmanın malzeme üzerindeki etkisi belirlenmiş olur. UV yaşlandırmadan sonra HT-BASIC programı ile yazılan "Akım-Gerilim Ölçüm Programı" kullanılarak her bir malzeme için akım-gerilim ölçümü DC gerilim altında 0 V ile +30 V arasında değiştirilerek karanlık ve ışık altında kontakların ohm yasasına uygun olup olmadığı DC gerilim bölgesi LogI-LogV ve Log(σ)-LogV grafiklerinden belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ortamda kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına

alınır. Sonrasında 25⁰C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

Sistem vakum ortamında iken belirlenen Ohmik gerilim uygulanarak HT- BASIC programı ile yazılmış olan "Isıl işlem Programı" başlatılır. Malzemelerden; MAPbI₃ 300 K'den 400 K'e kadar , TiO₂ 300 K'den 450 K'e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K sıcaklık artışı olacak şekilde ve her 10 K'de karanlık iletkenlik verileri ölçümü alınarak kayıt altına alınır.

MAPbI₃ için 400 K'e , TiO₂ için 450 K'e ulaşan malzemeler (MAPbI₃ için 400 K'e, TiO₂ için 450 K'de 1800 s) ısıl işleme (tavlama) maruz bırakılır. Sonrasında MAPbI₃ için 400 K'den 300 K'e, TiO₂ için 450 K'den 300 K'e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K azalacak şekilde ve her 10 K'de karanlık iletkenlik değerleri ölçülerek kayıt altına alınır ve soğutulur. Malzeme 300 K'e ulaştığında sistem otomatik olarak zamana bağlı iletkenlik programını çalıştırır ve 300 K'de zamana bağlı kararlı karanlık iletkenlik seviyesi belirlenir.

300 K'e ulaşan malzemenin laboratuvar atmosferinde yaşlanmış halinden sonraki yani referans değeri (asdeposited condition) belirlenmiş olur. Malzeme ısıl işlem sonrasında oda sıcaklığında vakum atmosferindeyken tekrar karanlık ve ışık altında I-V ölçümleri alınır ve ohmik gerilim belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ve vakum ortamında kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına alınır. Sonrasında 25⁰C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık

akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

3.5.3.5. Oksijen Yaşlandırması

Malzeme üzerine son uygulanan stres faktörü ise oksijen uygulamasıdır. Bu aşamada Zamana bağlı karanlık iletkenlik programı çalıştırılır ve turbo moleküler pompa kapatılır. Kriostat içerisindeki vakum ortamında (10^{-5} mBar) ve karanlıkta bekleyen malzeme yüksek saflıkta (%99,9) oksijen gazına maruz bırakılır. Atmosferik koşullar elimine edilir ve sıcaklık 300 K'de sabit tutulur. Böylelikle oksijen gazının film üzerinde oluşturduğu yaşlanma etkisi belirlenir. Kriostat üzerinde bulunan çek valf (release valve) aracılığı ile kriostat içerisine 60 dakika boyunca oksijen gazı gönderilir. Böylece içerideki basıncın dış basınçtan fazla olması sağlanarak içeriye laboratuvar atmosferinin girmesi engellenir, içerideki fazla oksijen dışarı çıkmış olur. Bu şekilde malzeme ikinci ısıl işlem sonrasında laboratuvar atmosferine maruz kalmadan vakum ortamından direkt oksijen gazı atmosferine geçerek sadece oksijen gazının etkisi gözlemlenmiş olur. Malzemenin kararlı hale ulaşması ardından karanlık ve ışık altında I-V ölçümü alınır. Sonrasında 25⁰C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

Zamana bağlı karanlık iletkenlik programı çalıştırılır ve turbo moleküler pompa yeniden açılır. Belirli süre sonra sistem kararlı hale geldiğinde karanlık ve aydınlık iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilir. Ohmik gerilim belirlenir. 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50'lik, %1+%10+%30'luk, %1+%10+%50'lik, %1+%10'luk, %1+%30'luk, %1+%50'lik, %1'lik, %10+%30+%50'lik, %10+%30'luk, %10+%50'lik, %10'luk, %30+%50'lik, %30'luk, %50'lik ve %100'lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilir.

Sistem vakum ortamında iken belirlenen Ohmik gerilim uygulanarak HT- BASIC

programı ile yazılmış olan “Isıl işlem Programı” başlatılır. Malzemelerden; MAPbI₃ 300 K’den 400 K’e kadar , TiO₂ 300 K’den 450 K’e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K sıcaklık artışı olacak şekilde ve her 10 K’de karanlık iletkenlik verileri ölçümü alınarak kayıt altına alınır.

MAPbI₃ için 400 K’e , TiO₂ için 450 K’e ulaşan malzemeler (MAPbI₃ için 400 K’e, TiO₂ için 450 K’de 1800 s) ısıtılma (tavlama) maruz bırakılır. Sonrasında MAPbI₃ için 400 K’den 300 K’e, TiO₂ için 450 K’den 300 K’e kadar PID kontrolü ile dakikada 2 K azalacak şekilde ve her 10 K’de karanlık iletkenlik değerleri ölçülerek kayıt altına alınır ve soğutulur. Malzeme 300 K’e ulaştığında sistem otomatik olarak zamana bağlı iletkenlik programını çalıştırır ve 300 K’de zamana bağlı kararlı karanlık iletkenlik seviyesi belirlenir.

300 K’e ulaşan malzemenin laboratuvar atmosferinde yaşlanmış halinden sonraki yani referans değeri (asdeposited condition) belirlenmiş olur. Malzeme ısıtılma sonrasında oda sıcaklığında vakum atmosferindeyken tekrar karanlık ve ışık altında I-V ölçümleri alınır ve ohmik gerilim belirlenir. Belirlenen ohmik gerilim GWINSTEK PSM-6003 DC güç kaynağına girilir ve kararlı hale gelmesi beklenir. Karanlık ve vakum ortamında kararlı duruma ulaşan tabakanın karanlık iletkenlik değeri kayıt altına alınır. Sonrasında 25°C sıcaklığında ışık akısı ölçümleri için 635 nm lik uzun geçişli filtre malzeme üzerine yerleştirilir ve ışık kaynağı açılır. ND filtreler aracılığı ile %1+%10+%30+%50’lik, %1+%10+%30’luk, %1+%10+%50’lik, %1+%10’luk, %1+%30’luk, %1+%50’lik, %1’lik, %10+%30+%50’lik, %10+%30’luk, %10+%50’lik, %10’luk, %30+%50’lik, %30’luk, %50’lik ve %100’lük filtreler ile ışık akısı değerleri kayıt altına alınır. Origin programında ışık akısı grafiği çizdirilerek bir tam elektriksel karakterizasyon ölçümü tamamlanmış olur.

Fotoiletkenlik Ölçümleri:

Karanlık ve vakum ortamında (in-situ) kararlı duruma ulaşan tabaka 25°C sıcaklığında ND filtreler aracılığı ile ışık akısı değiştirilerek ve tek renk band pass (~635nm) filtre kullanılarak beyaz ışık yardımı ile kararlı durum fotoiletkenlik ölçümleri ölçülmüştür.

Ölçülen değerlerden Perovskit tabakalarının çoğunluk yük taşıyıcıların $\mu\tau$ - çarpımları ışılt yaratma hızının fonksiyonu olarak hesaplanmıştır.

Sıcaklığa Bağlı Karanlık İletkenlik Ölçümü:

Malzemelerin fotoiletkenlik ölçümlerinin de tamamlanmasının ardından malzemeler oda sıcaklığından ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) üretim sıcaklıklarından altındaki sıcaklıklara Ohmik gerilim altında karanlık iletkenlik değerleri ısıtma soğutma çevrimi (tavlama işlemi) bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Tavlama işlemi sıcaklık kontrol ünitesi kullanılarak ve dakikada 2K sıcaklık artışı olmak üzere her adımlarda Ohmik gerilim altında karanlık iletkenlik değerleri ölçülerek ve kaydedilmiştir. Bu şekilde malzemelerin aktivasyon enerjileri belirlenmiştir.

Isıl işlem uygulaması tamamlanan malzemeler oda sıcaklığına ulaşmalarının ardından yine karanlık ve vakum ortamında zamana bağlı karanlık iletkenlik ölçümleri alınmıştır. Böylece ısıl işlem öncesi ve sonrası malzemelerin kararlılık durumlarında oluşan değişimler belirlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Yapısal Karakterizasyon Bulguları

Perovskit güneş hücrelerini oluşturan her tabaka cam taban malzeme ve silisyum wafer üzerine büyütüldükten sonra yapısal karakterizasyon işlemine tabii tutulmuştur. PbI_2 ve $MAPbI_3$ kaplanan ince film malzemelerin kodları ile üretimde kullanılan PbI_2 ve $MAPbI_3$ miktarları Çizelge 4.1 de verilmiştir. Üretimde kullanılan C_{60} miktarı ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretimde kullanılan PbI_2 ve $MAPbI_3$ oranları ve malzeme kodları

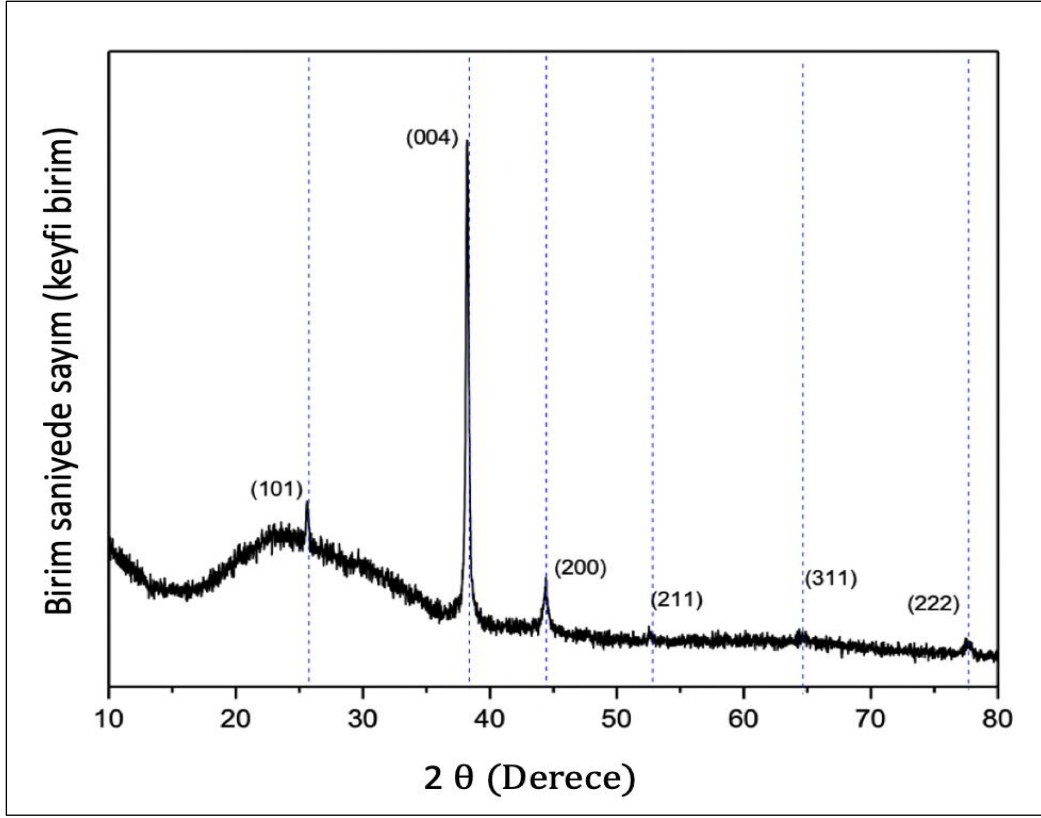
MALZEME KODLARI	PbI_2 Oranı	MAI Oranı
PbI_2 -1	1 (0,05g)	-
$MAPbI_3$ 2-1	1 (0,05g)	1 (0,05g)
$MAPbI_3$ 3-1	1 (0,05g)	2 (0,1g)
$MAPbI_3$ 4-1	1 (0,05g)	3 (0,15g)
$MAPbI_3$ 5-1	2 (0,1g)	3 (0,15g)
$MAPbI_3$ 6-1	1 (0,02g)	3 (0,06g)

Çizelge 4.2. Üretimde kullanılan C_{60} oranı ve malzeme kodu

MALZEME KODU	C_{60} oranı
C_{60} 1-1	0,05g

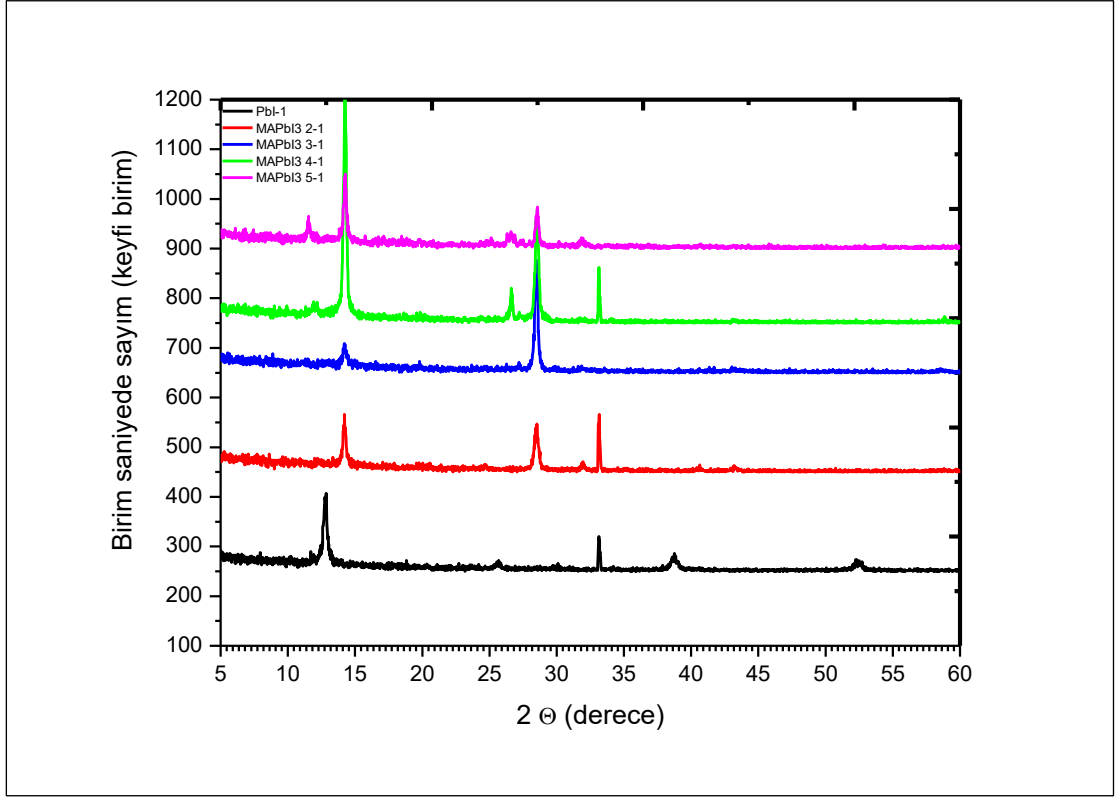
4.1.1. XRD Kırınım Analiz Bulguları

Bölüm 3.5.1.1’de anlatılan parametrelerde silisyum wafer üzerine büyütülen C_{60} , $MAPbI_3$ ve PbI_2 ince filmlere XRD analizleri uygulanmıştır. Analizi yapılan malzemelerin XRD grafikleri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. TiO₂ ince filmin XRD analizi

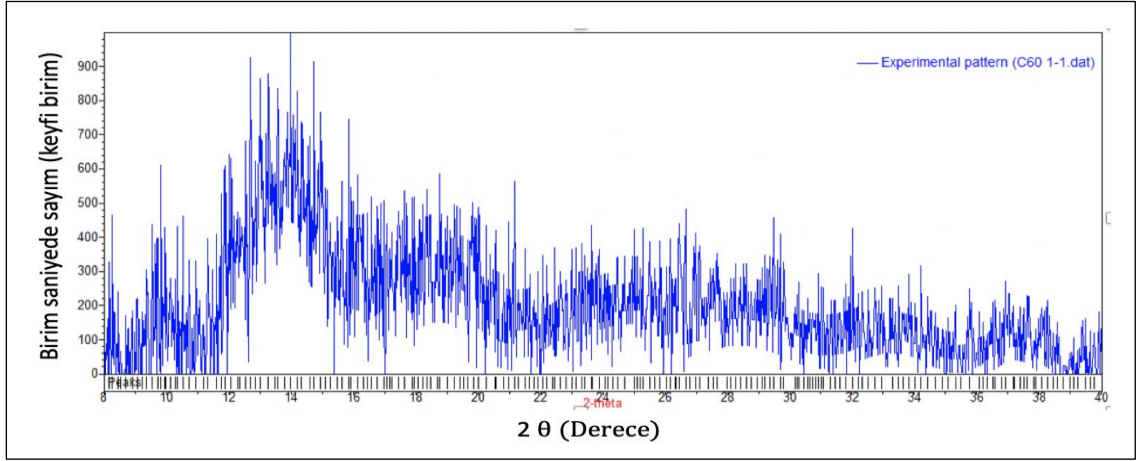
Silisyum wafer üzerine büyütülen TiO₂ ince filme XRD analizleri uygulanmıştır. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi XRD verileri, TiO₂ üzerine tavlama sonrası filmin anataz fazı ile örtüşüğünü göstermektedir. Bu da literatür ile tutarlılık gösterir. XRD zirveleri, "Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)" veri tabanından indekslenerek ve kart numarası 00-004-0477'dir (Jalali vd., 2020; Sun vd., 2015).



Şekil 4.2. Malzemelerin XRD kırınım grafikleri

Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi siyah renk çizgi ile görülen PbI_2 ' nin XRD analizini göstermektedir. Siyah renkte PbI_2 'nin 12, 37 ve 40 derecedeki zirve değerlerinin bağlanmadan kaldığını ve PbI_2 'de görülen zirve değerleri diğer renklerde görülmediği için PbI_2 yapısının oluştuğu görülmüştür.

Buna bağlı olarak madde miktarları değiştirilerek kırmızı, mavi, yeşil ve pembe renklerde görülen; $MAPbI_3$ 2-1, $MAPbI_3$ 3-1, $MAPbI_3$ 4-1 ile $MAPbI_3$ 5-1 çizelge 4.1.'de belirtilen oranlarda üretilmiş ve üretilen malzemelerin XRD analizleri şekil 4.2'de sunulmuştur. $MAPbI_3$ perovskit yapısının oluştuğunu gösteren en önemli zirve değerleri 14 ve 28 derecede görülmüştür. Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi üretilen bütün $MAPbI_3$ yapılarında 14 ve 28 derecedeki tepe noktaları net olarak belirlenmiştir. Bu durum üretilen bütün yapıların $MAPbI_3$ yapısına sahip olduğunun kanıtıdır (Chen vd.,2021; Wang vd.,2021).



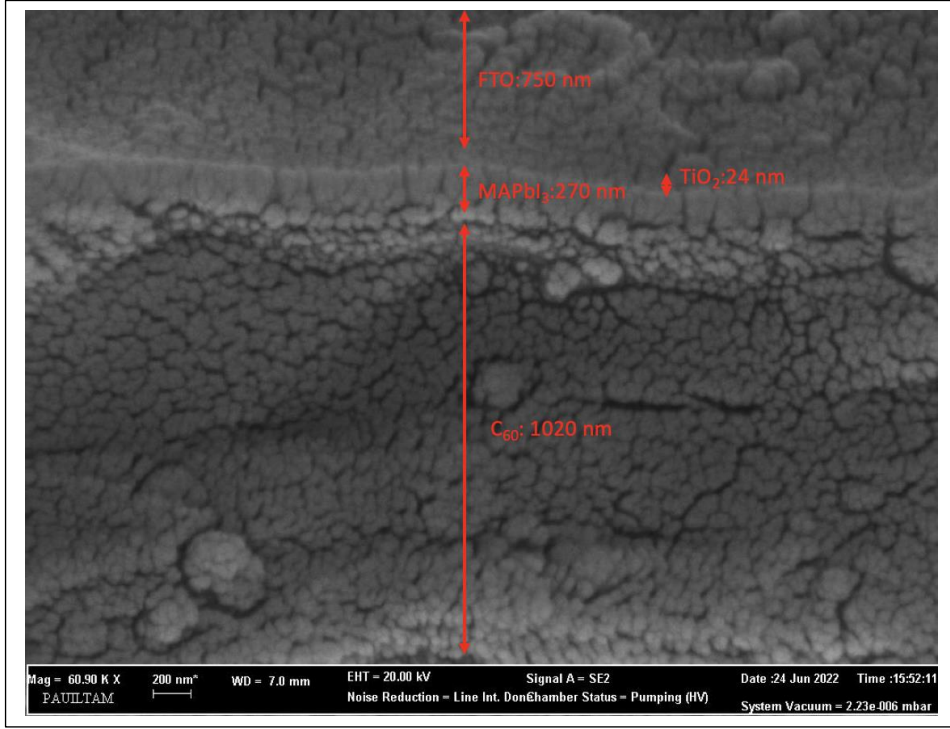
Şekil 4.3. C₆₀ ince filmin XRD kırım grafiği

Şekil 4.3’de Silisyum wafer üzerine büyütülen C₆₀ ince filmin XRD kırım grafiği verilmiştir. C₆₀ ince filmin amorf fazda oluştuğunu gösteren en önemli zirve değeri 14,18 derecede, görülmüştür. Literatürde C₆₀ amorf yapısında 14,18 derecede kristal formda ise zirve değerleri ise 17, 27, 32 ve 33 derecelerde tepe noktaları görülmektedir (Ortiz-López ve Gómez-Aguilar, 2003).

4.1.2. SEM Analizi Bulguları

Termal buharlaştırma yöntemiyle FTO/TiO₂ /MAPbI₃/C₆₀/Ag formunda üretilmiş olan MAPbI₃ perovskit güneş hücresinin, üçüncü bölüm 3.5.1.2. numaralı konu başlığında anlatılan parametrelerde yüzey morfolojisi SEM analizleri yapılmıştır. SEM ile kalınlıkları kesit alınarak ölçülmüştür. SEM analizleri Yüksek Vakum (HV) ortamında (2,3 E-6 mBar) ve 60.000 kat büyütme kullanılarak elde edilmiştir.

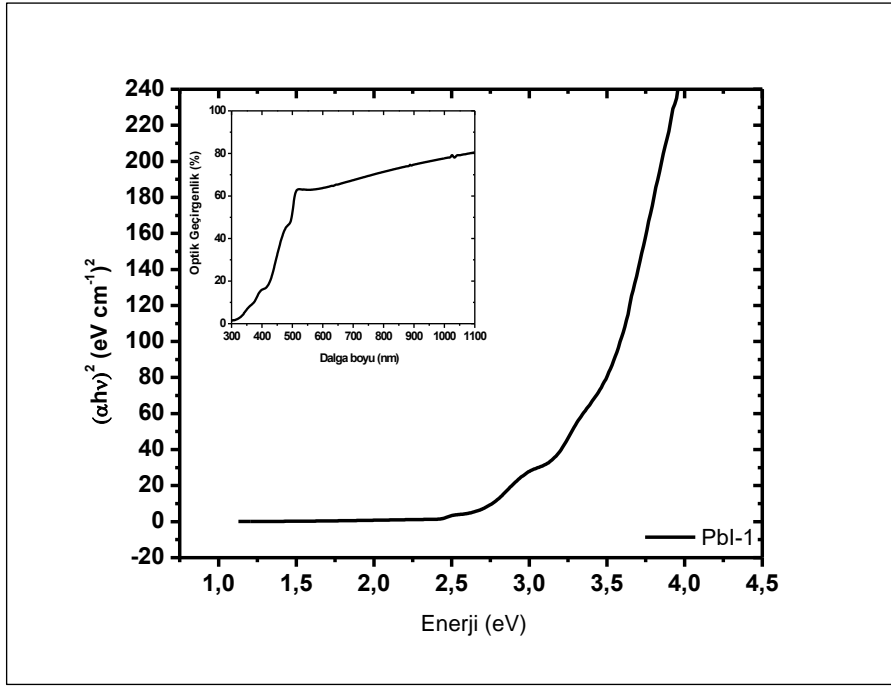
Perovskit güneş hücresinde SEM ölçümlerinin çözünürlüğünü arttırmak ve atmosferik etkiye bağlı olarak morfolojideki değişimi minimum ölçekte tutabilmek için bütün ölçümler yüksek vakum ortamında alınmıştır. SEM analiz görüntüleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



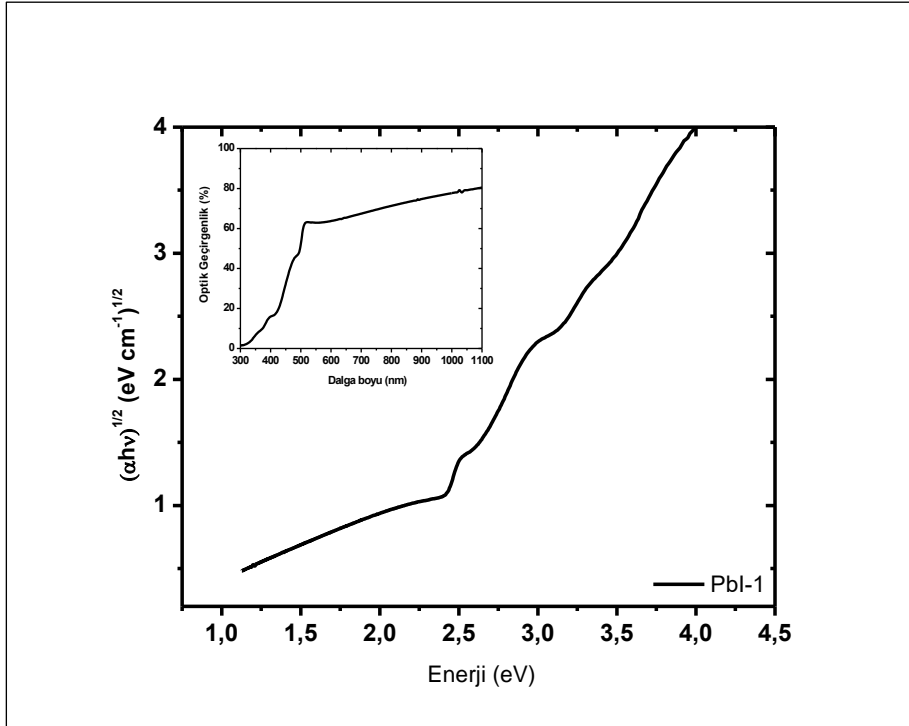
Şekil 4.4. FTO/TiO₂ /MAPbI₃/C₆₀/Ag formunda üretilmiş perovskit güneş hücresinin SEM görüntüsü

4.1.2. UV Analizi Bulguları

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de belirtilen oranlarda ince cam üzerine üretilmiş PbI₂ , C₆₀ ve MAPbI₂ ince filmlere, üçüncü bölüm 3.5.1.3 numaralı konu başlığında anlatılan parametrelerle UV analiz yapılmıştır. Malzemelerin direkt ve indirekt bant aralıkları Şekil 4.5 ile Şekil 4.20 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir.

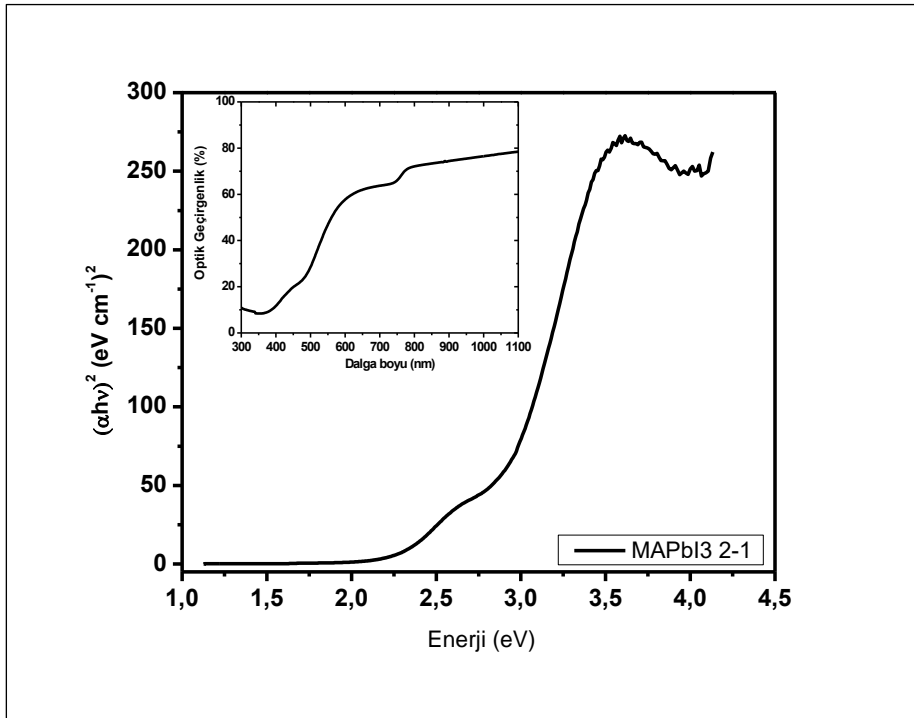


Şekil 4.5. PbI₂-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

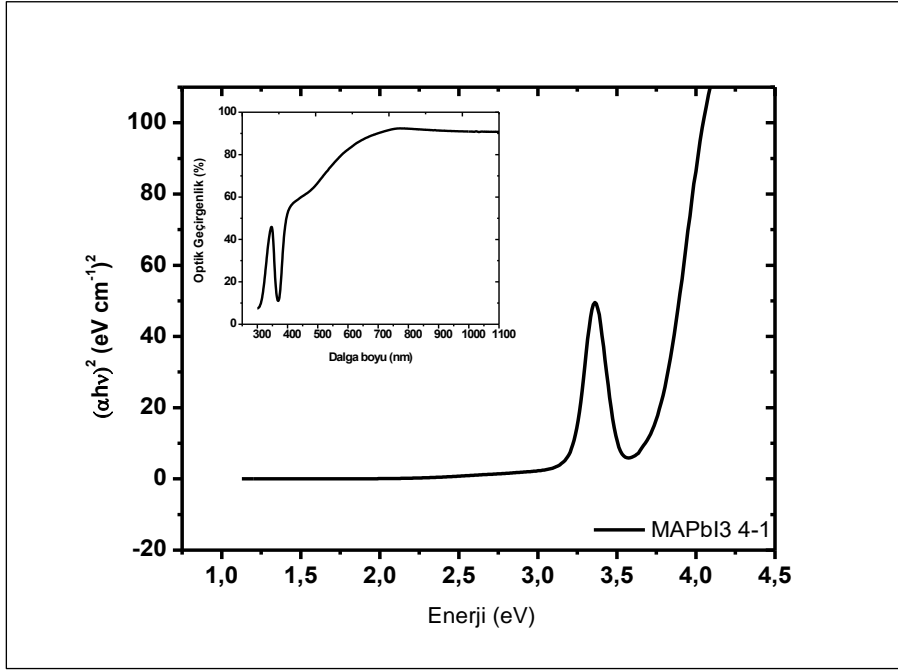


Şekil 4.6. PbI₂-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Şekil 4.5 ve 4.6’de görüleceği üzere PbI_2 ’nin optik soğurma absorpsiyon verilerinden hesaplanan tauc grafiği ve optik geçirgenlik enerji seviyeleri hesaplaması sonucu direk ve indirek tauc gıaplar sunulmuştur. Tauc grafiklerinin Enerji eksenini kestiği nokta malzemenin optik geçirgenlik enerji seviyesini göstermektedir. Buna göre malzemede direk geçişlerin enerji aralığı 2,43 eV olarak belirlenirken indirek geçişlerin enerji aralığı 2,19 eV olarak belirlenmiştir. Bu durum sadece referans olarak alınmış ve $MAPbI_3$ yapısının oluşup oluşmadığını belirlemek amacı ile karşılaştırma olarak kullanılmıştır.

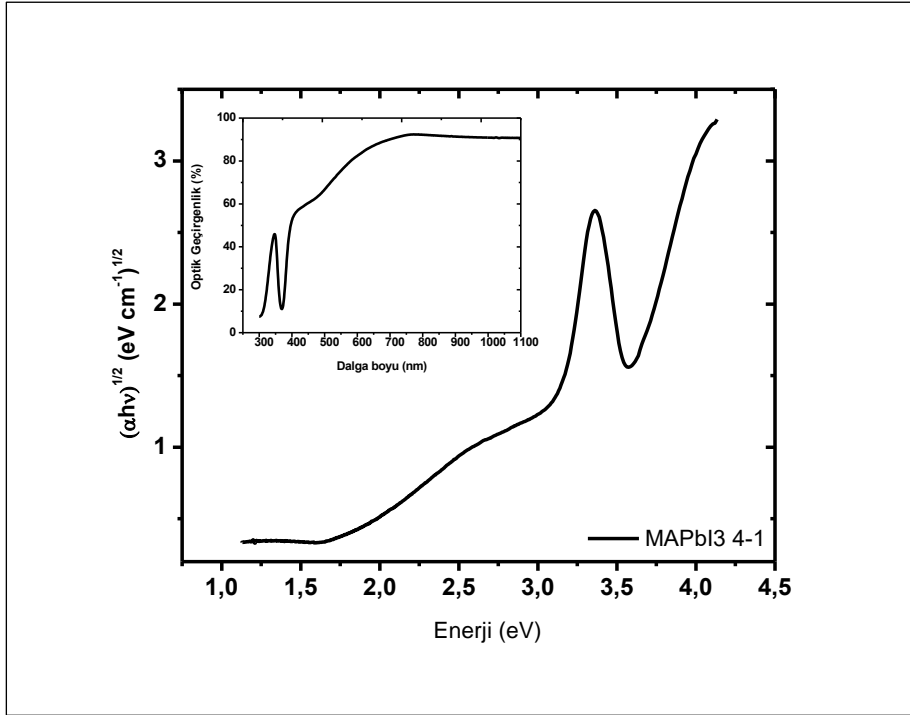


Şekil 4.7. $MAPbI_3$ 2-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

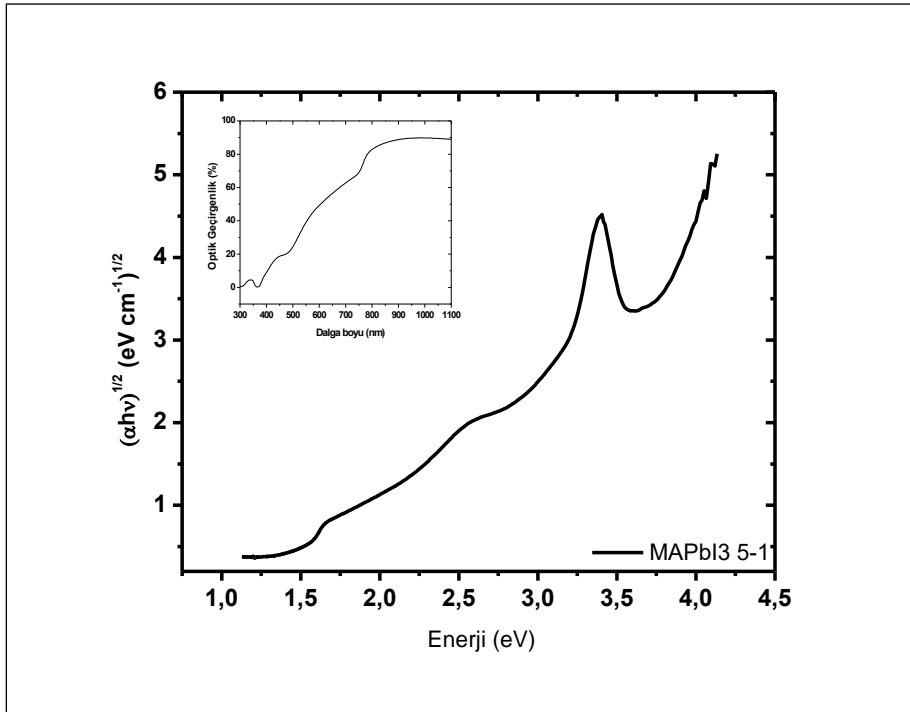


Şekil 4.8. MAPbI₃ 2-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Bire bir oranında üretilmiş olan MAPbI₃ 2-1 kodlu ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.7 ve 4.8’de sunulmuştur. Şekil 4.7’den görüleceği üzere direk geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 2,26 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirek geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,54 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.

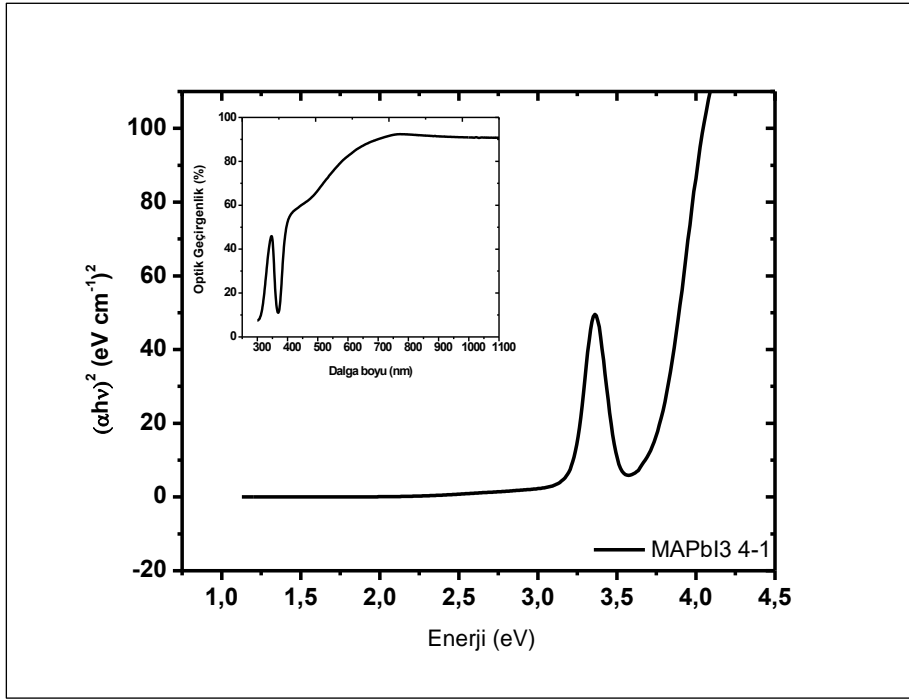


Şekil 4.9. MAPbI₃ 3-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

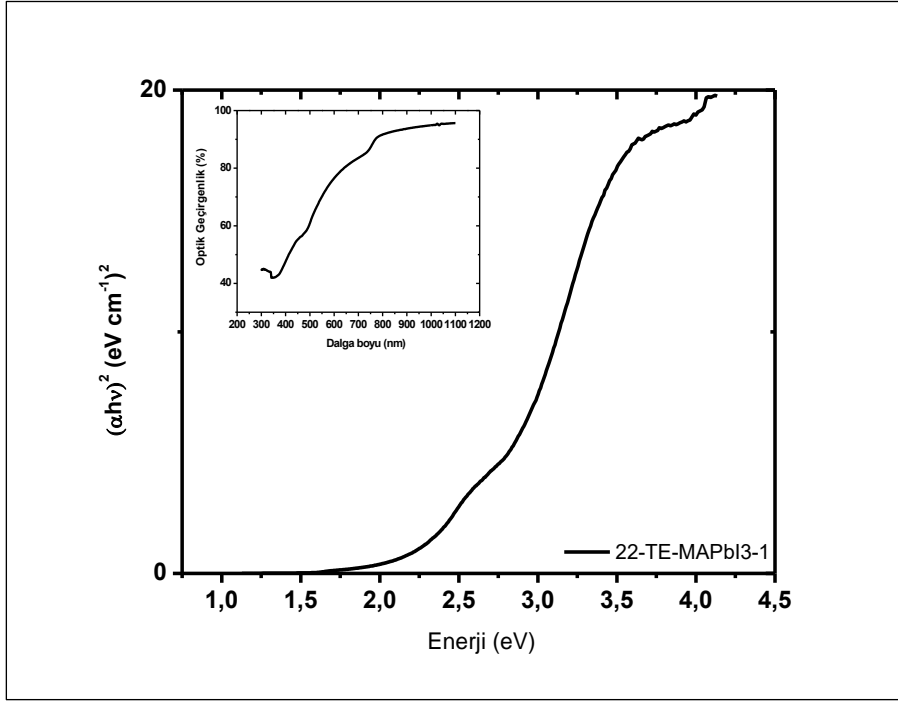


Şekil 4.10. MAPbI₃ 3-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Bire iki oranında üretilmiş olan MAPbI₃ 3-1 kodlu ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.9 ve 4.10'da sunulmuştur. Şekil 4.9'dan görüleceği üzere direk geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 3,12 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirekt geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,44 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.

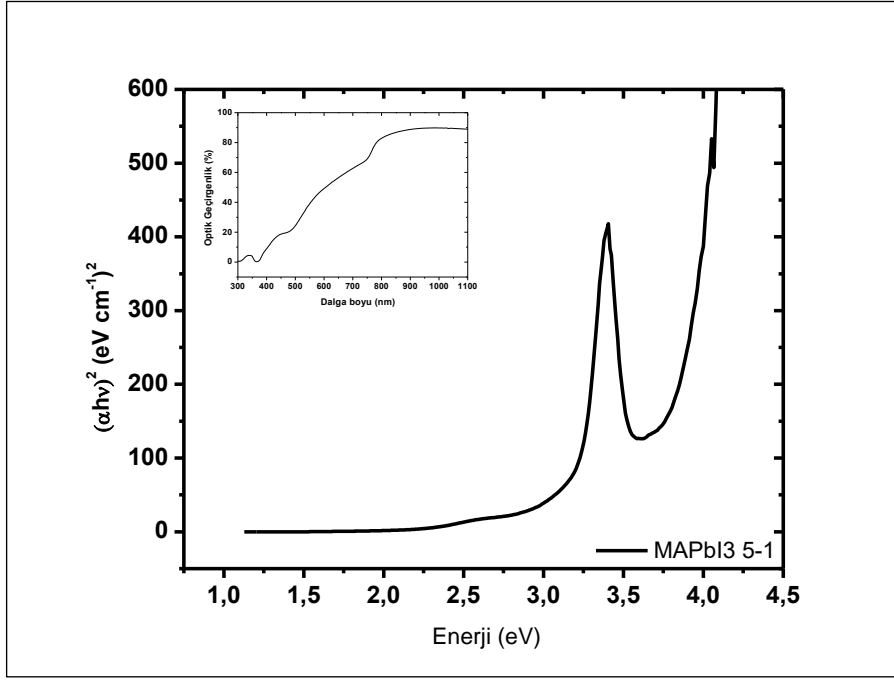


Şekil 4.11. MAPbI₃ 4-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

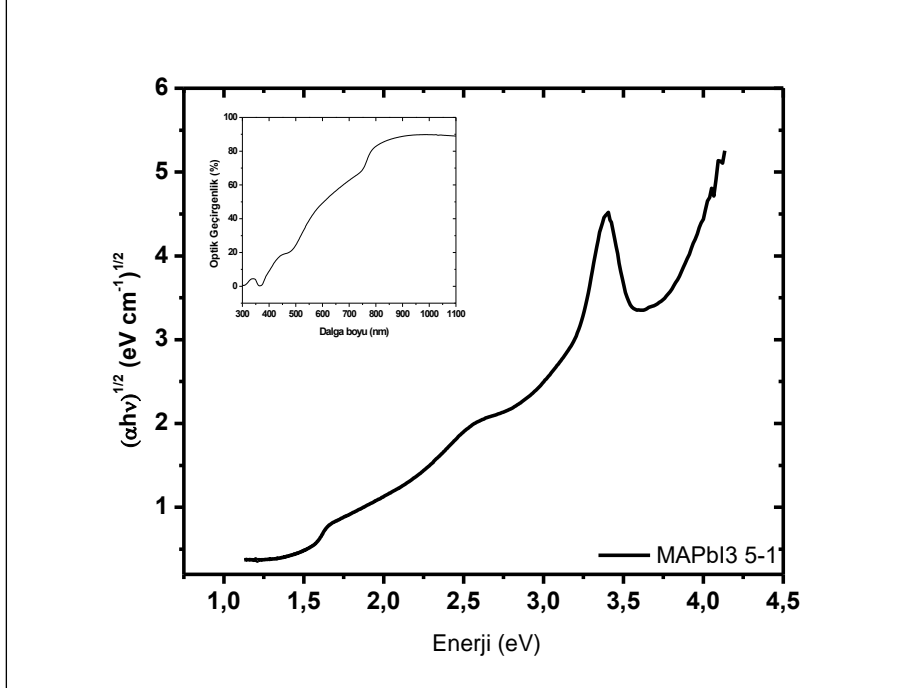


Şekil 4.12. MAPbI₃ 4-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Bire üç oranında üretilmiş olan MAPbI₃ 4-1 kodlu ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.11 ve 4.12’de sunulmuştur. Şekil 4.12’den görüleceği üzere direk geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 3,07 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirekt geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,52 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.

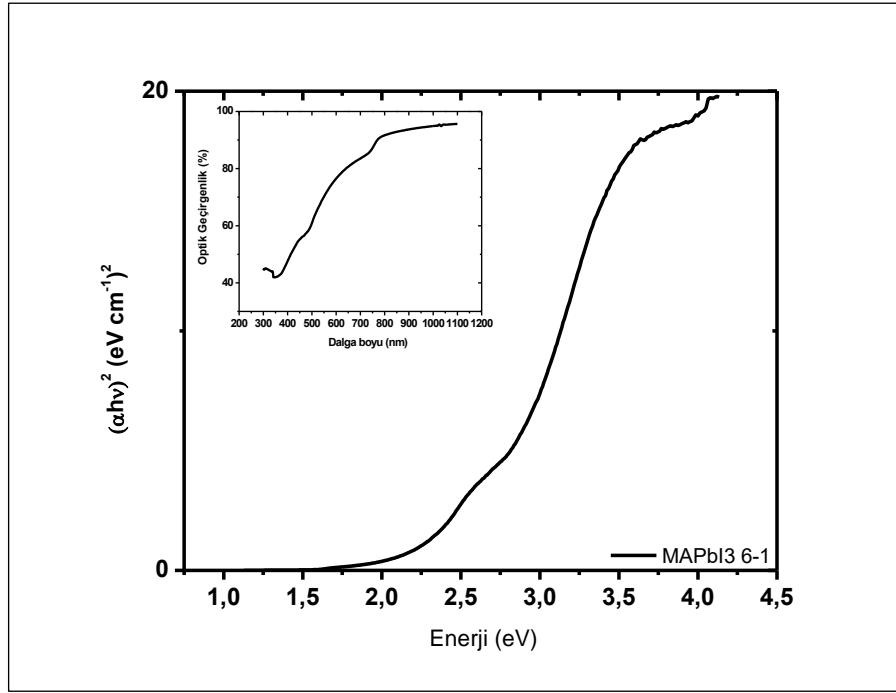


Şekil 4.13. MAPbI₃ 5-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

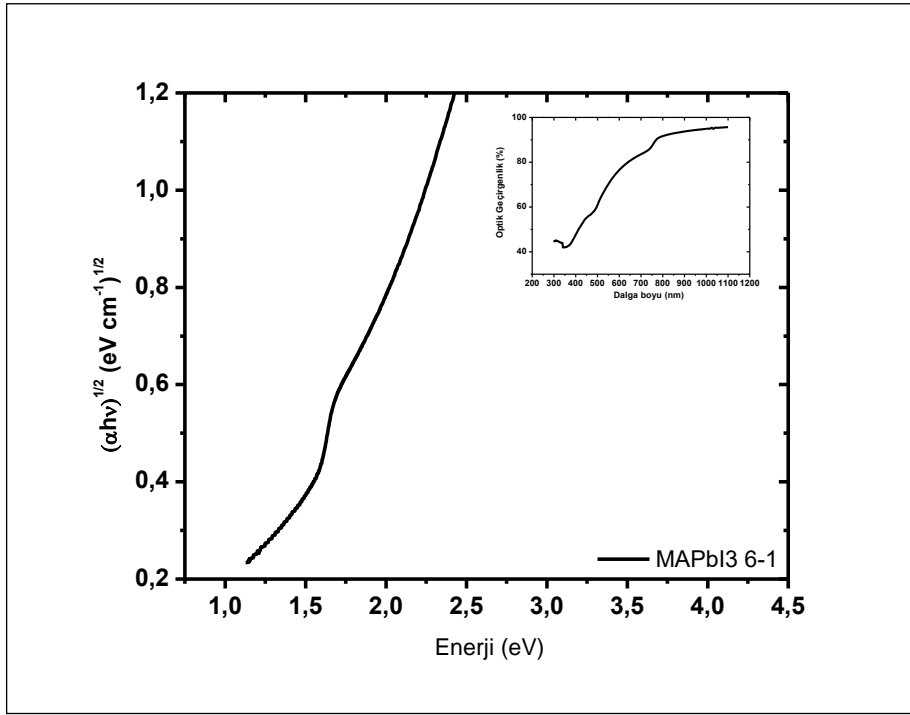


Şekil 4.14. MAPbI₃ 5-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

İkiye üç oranında üretilmiş olan MAPbI₃ 5-1 kodlu ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.13 ve 4.14’de sunulmuştur. Şekil 4.13’den görüleceği üzere direk geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 3,12 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirekt geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,45 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.

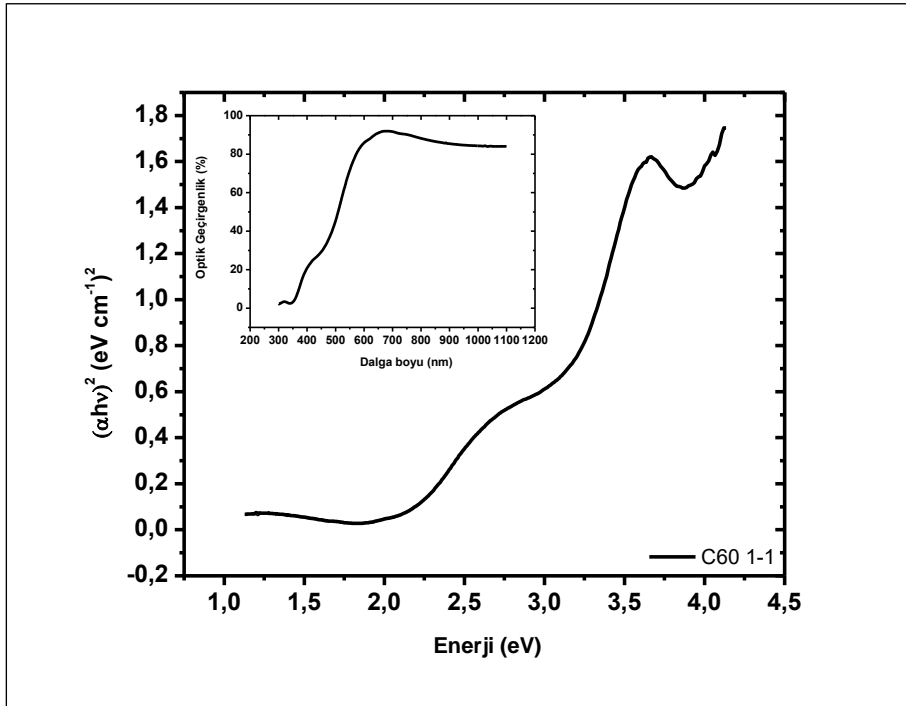


Şekil 4.15. MAPbI₃ 6-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

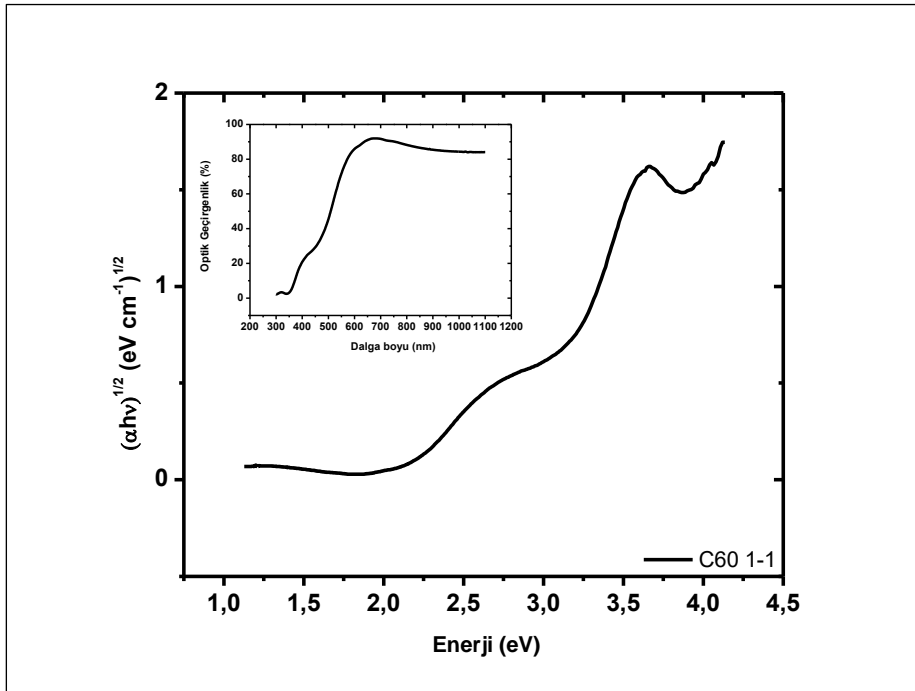


Şekil 4.16. MAPbI₃ 6-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Bire üç oranında üretilmiş olan MAPbI₃ 6-1 kodlu ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.15 ve 4.16'de sunulmuştur. Şekil 4.15'dan görüleceği üzere direk geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 2,24 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirekt geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,47 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.

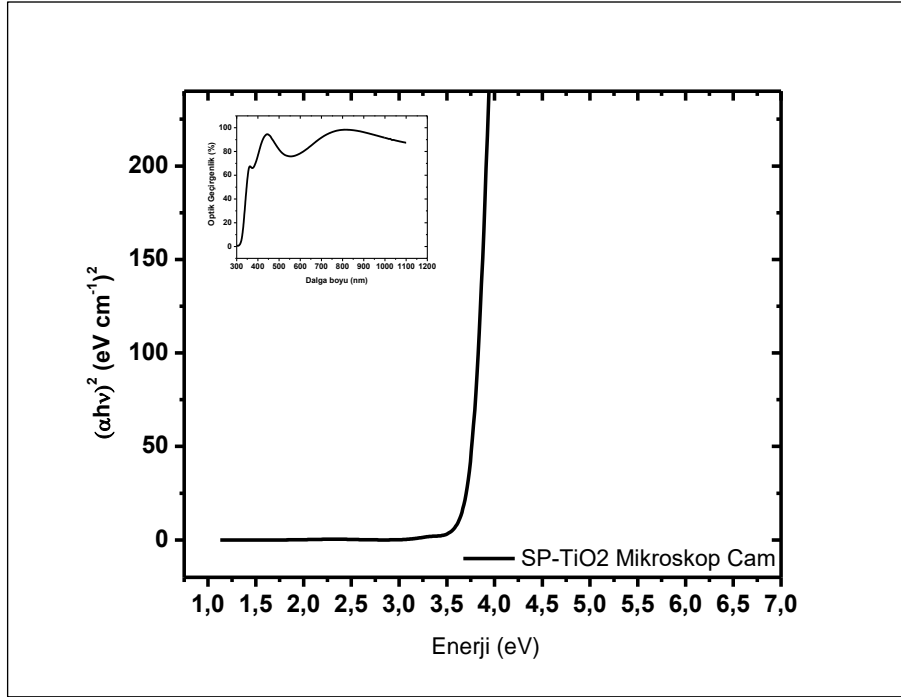


Şekil 4.17. C₆₀ 1-1 kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği

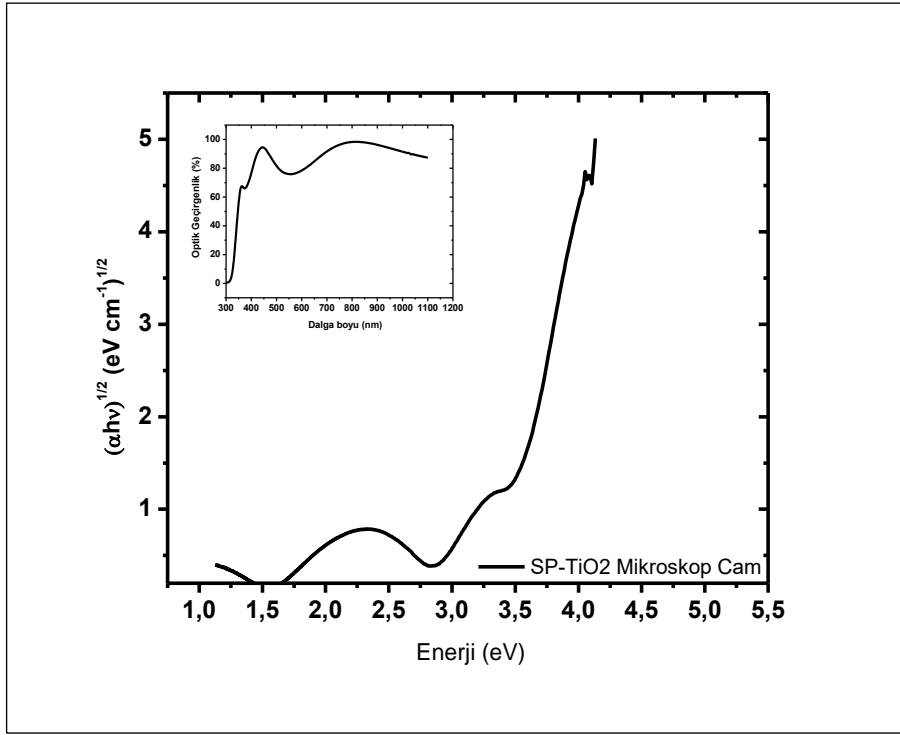


Şekil 4.18. C₆₀ 1-1 kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Elde edilmiş C₆₀ ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.17 ve 4.18’da sunulmuştur. Şekil 4.17’den görüleceği üzere direkt geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 1,95 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirekt geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,67 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.



Şekil 4.19. SP-TiO₂ kodlu malzemenin direkt bant aralığı grafiği



Şekil 4.20. SP-TiO₂ kodlu malzemenin indirekt bant aralığı grafiği

Elde edilmiş TiO₂ ince filmlere ait optik soğurma spektrumlarından elde edilen tauc grafikleri Şekil 4.19 ve 4.20’de sunulmuştur. Şekil 4.19’den görüleceği üzere direkt geçiş çok net ve pürüzsüz olarak gerçekleşmekte ve elde edilen optik geçirgenlik enerji seviyesi 3,61 eV olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde indirekt geçiş hesabında optik geçirgenlik değeri 1,67 eV olarak belirlenmiştir. Her iki grafikte de iç indekslerde optik geçirgenlik spektrumları okuyucu için referans olması adına yerleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Malzemelerin direkt ve indirekt bant aralığı enerji değerleri

Malzeme kodu	PbI ₂ -1	MAPbI ₃ 2-1	MAPbI ₃ 3-1	MAPbI ₃ 4-1	MAPbI ₃ 5-1	MAPbI ₃ 6-1	C ₆₀ 1-1	SP-TiO ₂
Direkt Bant Aralığı	2,439 eV	2,266 eV	3,123 eV	3,071 eV	3,121 eV	2,244 eV	1,954 eV	3,613 eV
İndirekt Bant aralığı	2,196 eV	1,541 eV	1,444 eV	1,521 eV	1,453 eV	1,474 eV	1,675 eV	1,671 eV

4.2. Elektriksel Karakterizasyon Bulguları

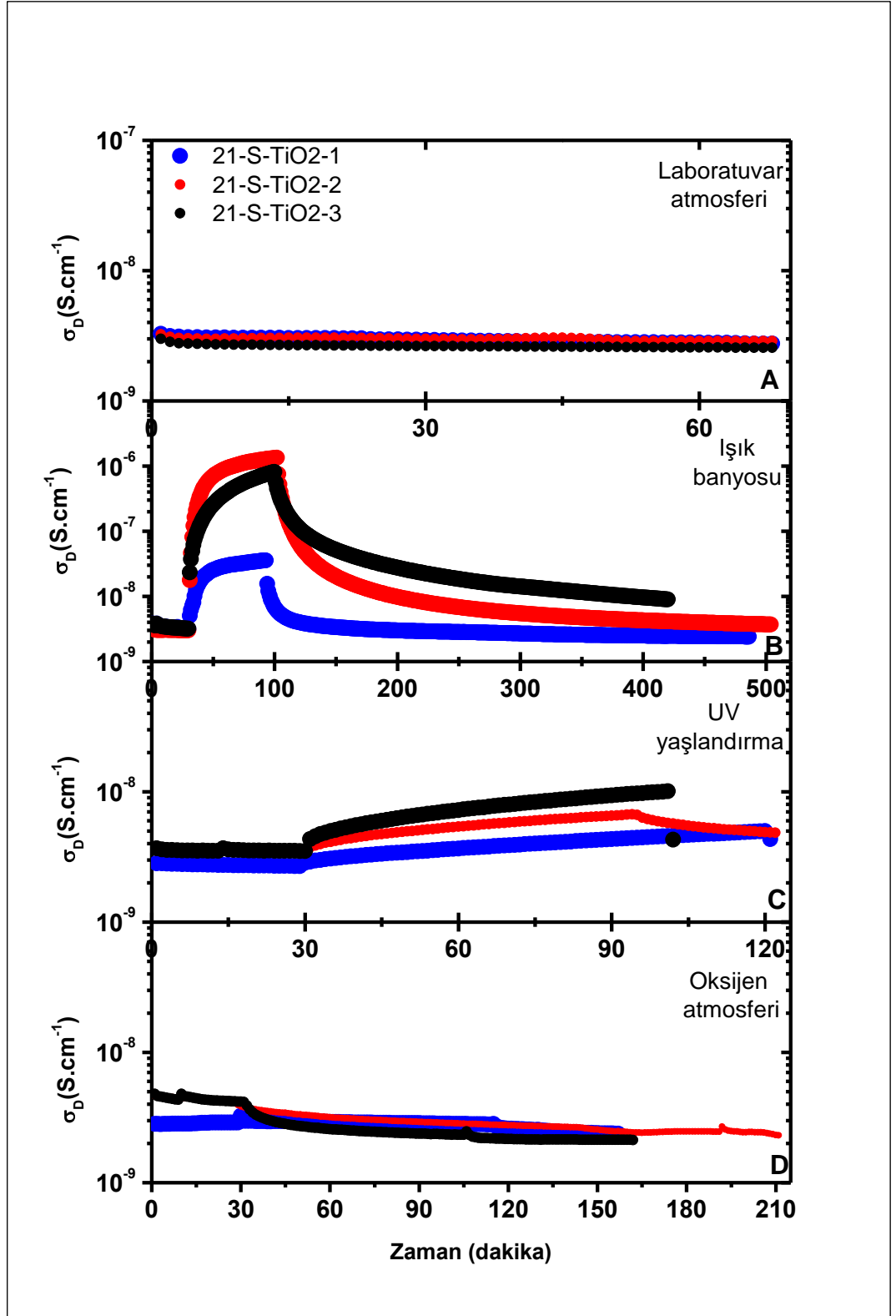
Perovskit güneş hücrelerinin n-i-p formunda üretilmelerinde ışıqla ilk karşılaşacak tabaka ETL tabakasıdır. Bu nedenle tez kapsamında ilk olarak ETL tabakası olan TiO₂ tabakası karakterize edilmiştir. TiO₂ malzemeler üretimlerinden sonra ısı işleme tabii tutulmaları durumunda yapısal olarak değişikliğe uğramakta ve güneş hücrelerinde en çok tercih edilen anataz fazına geçmektedir. Ancak uygulanacak ısı işlemindeki sıcaklık standart laboratuvar lamalarına uygulanması durumunda camlar deforme olmaktadır. Bu nedenle TiO₂ ince filmler yüksek ısı mukavemetli pürüzsüz cam taban malzeme üzerine büyütülmüş ve farklı sıcaklıklarda ikincil ısı işleme maruz bırakılmaları sonrası malzemelerin stres faktörleri altındaki değişimi incelenmiştir. Yüksek ısı mukavemetli pürüzsüz cam taban malzeme olarak “utt.com.tr” websitesi Recep Topçu’dan tedarik edilen Robax camlar kullanılmıştır. Bu camların kullanılma sebebi 700 °C ve üstündeki sıcaklıklarda camların deforme olmamalarıdır. TiO₂ ince filmler Sputter yöntemi ile Robax malzemeler üzerine büyütülmüştür. Üretilen malzemelerin daha kararlı ve istikrarlı olması için 300°C , 500°C ve 700°C sıcaklıklarda kül fırında bir saat süre ile ikincil ısı işleme uygulanmıştır. Malzemeler 300°C, 500°C ve 700°C’de tavlınca daha gözenekli bir yapıya sahip olmaktadır.

300°C , 500°C ve 700°C sıcaklıklarda kül fırında ikincil tavlama yapılan TiO₂ ince film malzemelere verilen malzeme kodlarının tablosu çizelge 4.4’de sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Malzemelerin tavlama sıcaklıklarına göre kodlamaları

Malzeme kodu	Taban malzeme	İkincil tavlama	İnce film
21-S-TiO ₂ -1	Robax	300 °C	TiO ₂
21-S-TiO ₂ -2	Robax	500 °C	TiO ₂
21-S-TiO ₂ -3	Robax	700 °C	TiO ₂
21-S-TiO ₂ -4	Wafer	500 °C	TiO ₂
21-S-TiO ₂ -5	Pürüzlü	500 °C	TiO ₂

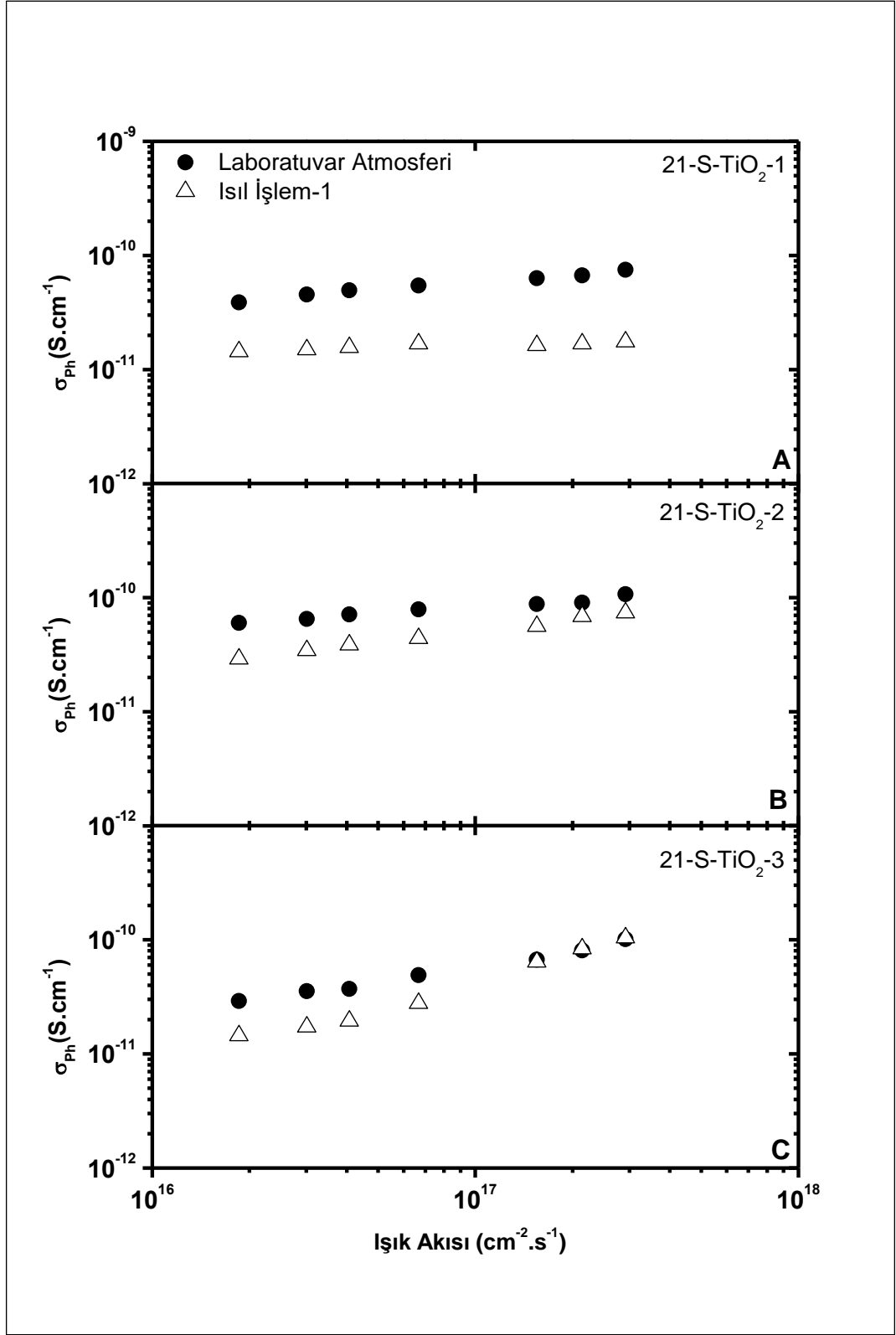
İkincil tavlama sıcaklıklarına dakikada 10 derece sıcaklık artışı ile 300°C, 500°C' ve 700°C 'ye çıkılmıştır. Metal buharlaştırma ile gümüş kontak atılan malzemelerin elektriksel özellikleri sırasıyla; laboratuvar atmosferi altında, ışık banyosu altında, ultraviyole ışık altında ve oksijen gazı altında ışık akısına bağlı fotoiletkenlik ölçüm grafikleri ile karakterize edilmiştir. Elde edilen bulgular sırası ile aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



Şekil 4.21. 300 °C, 500 °C ve 700 °C’de tavlanmış robax malzemenin zamana bağlı iletkenlik grafiği

Şekil 4.21'de 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince filmlerin laboratuvar atmosferi, ışık banyosu, UV yaşlandırma, oksijen yaşlandırması altındaki zamana bağlı iletkenlik grafiği verilmiştir. Buna göre Şekil 4.21'de 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince filmlerin, laboratuvar atmosferi altında zamana bağlı karanlık iletkenliklerinde bir değişim görülmemiştir. Bu durum TiO₂ malzemelerin laboratuvar atmosferinden etkilenmedikleri şeklinde yorumlanabilir. Bir sonraki adımda Şekil 4.21 a'dan da görüleceği gibi malzemeler laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine alınmıştır. Vakum ortamında iletkenlik değerlerinin kararlı hale gelmesinden sonra TiO₂ malzemeler 440K'de ilk ısıl işleme tabii tutulmuştur. Isıl işlem sonrasında oda sıcaklığında ve vakum atmosferindeyken 30. dakikadan itibaren 60 dakika boyunca ışık banyosuna maruz bırakılmıştır ve Şekil 4.21 b'de sunulmuştur. Şekil 4.21 b'de görüleceği gibi 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince filmin fotoiletkenlik değerinin 60 dk süreyle aydınlık ortamda en yüksek olduğu görülürken, 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince filmin fotoiletkenlik değerinin en düşük olduğu görülmüştür. Malzemeler 60 dakika süreyle ışığa maruz bırakıldıktan sonra (ölçümün başladığı andan itibaren 90. Dakikada) ışık banyosu işlemi sonlandırılmıştır. 90. dakikadan itibaren 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince filmlerin karanlık ortamda fotoiletkenlik değerlerinde düşüş görülmüştür. Buna göre 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince filmin karanlık ortamda fotoiletkenlik değeri en düşüktür. Işık banyosu uygulaması sonrası malzemeler vakum atmosferi bozulmadan 440K'de ikinci ısıl işleme tabii tutulmuştur. İkinci ısıl işlem sonrası Şekil 4.21 c'de görüleceği gibi oda sıcaklığında ve vakum atmosferinde malzemeler 30. dakikadan itibaren 60 dakika boyunca UV yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. UV ışık altında 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince filmin fotoiletkenlik değeri en yüksek iken 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince filmin fotoiletkenlik değerinin en düşük olduğu görülmüştür. 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince filmler 90. Dakikadan itibaren UV ışık kapatılmış ve veri kaydına devam edilmiştir. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemenin 90. dakikadan itibaren UV ışık kapatıldıktan sonra kararlı durumda karanlıkta ulaştığı değer 4,39E-9'dur. UV ışık uygulaması sonrası üçüncü ısıl işlem uygulanmıştır. Üçüncü ısıl işlem sonrası malzemeler Şekil 4.21 d'de görüleceği gibi oda sıcaklığında vakum atmosferinde iken karanlık iletkenlik değerleri kayıt altına alınmıştır. Zamana bağlı iletkenlik grafiğinde 30. dakikadan itibaren malzemeler 60 dakika boyunca oksijen yaşlandırmasına maruz bırakılmıştır. 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3

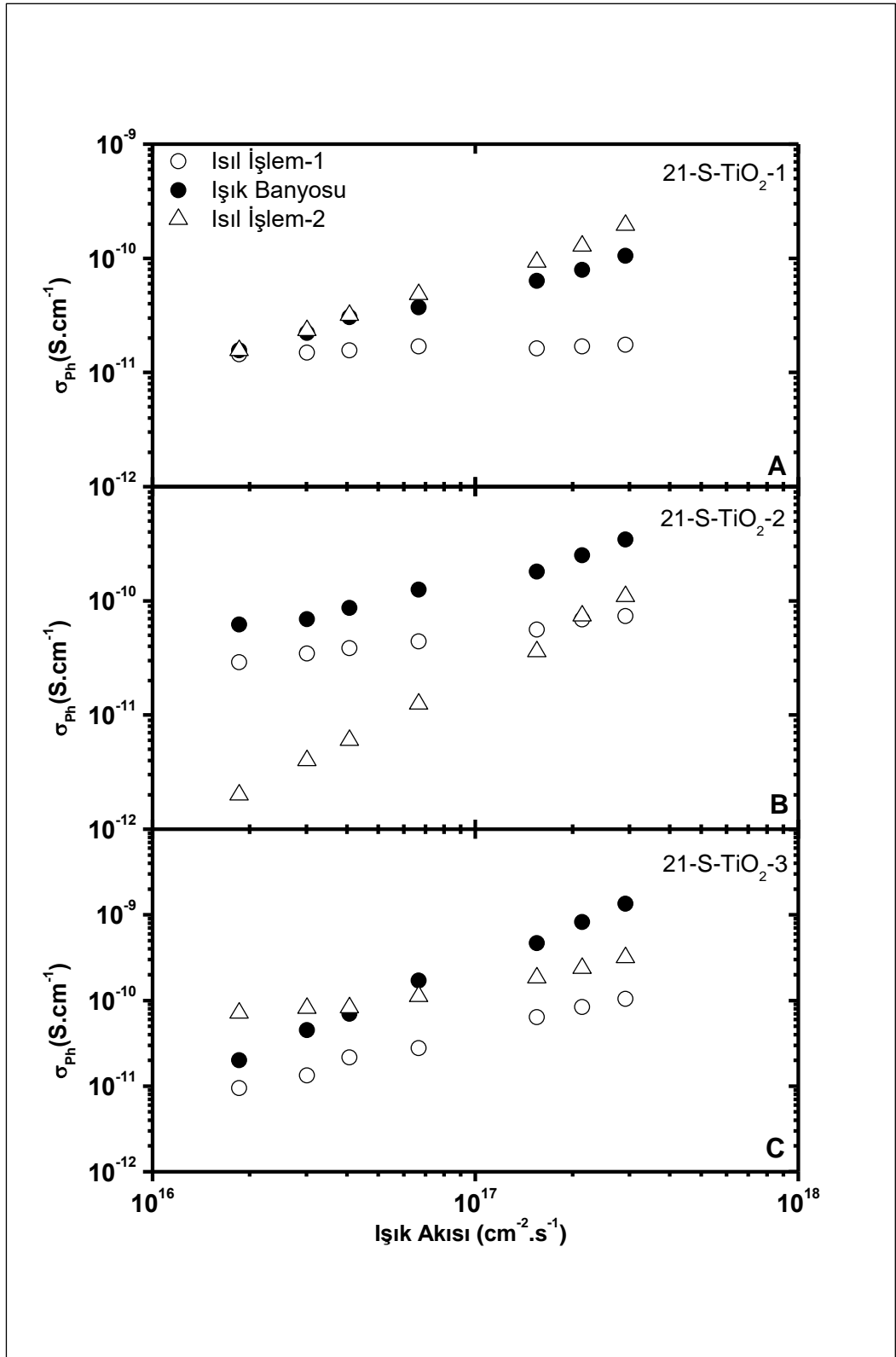
kodlu TiO₂ ince film malzemelerde oksijen yaşlandırmasına bağlı olarak zamana bağlı fotoiletkenlik değerlerinde değişim gözlenmemiştir.



Şekil 4.22. Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış TiO_2 ince filmlerin ışık akısı grafiği

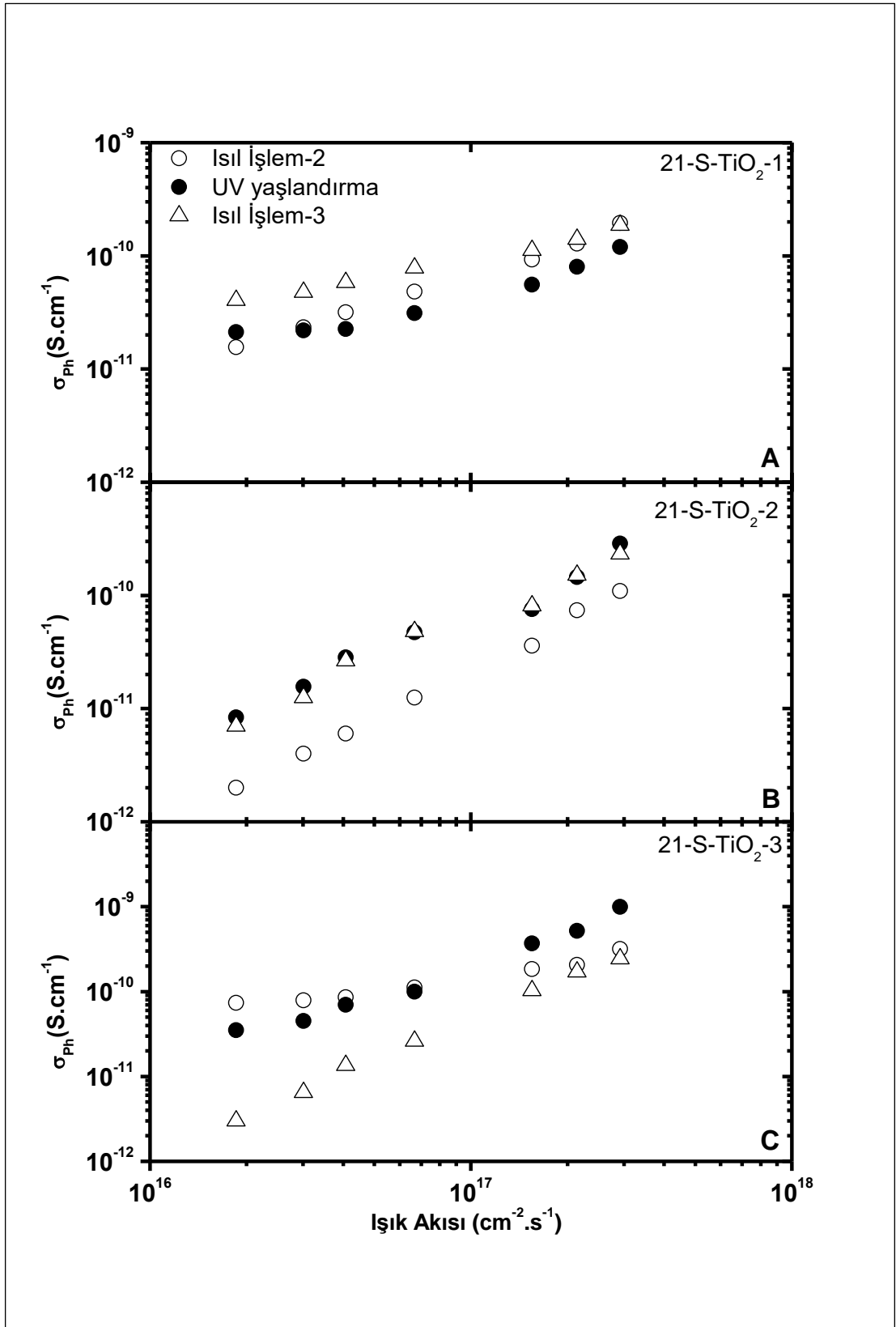
Şekil 4.22’de 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Şekil 4.22’de Laboratuvar atmosferinden ısıl işleme geçildiğinde her üç malzemede de fotoiletkenlik değerleri benzer düşüş göstermiştir. 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film malzemeye detaylı bakıldığında fotoiletkenlikte 3,19 katlık bir azalma görülmüştür. Benzer durum 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemede fotoiletkenlikte 1,80 katlık bir azalma görülmüştür. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemede ise düşük ışık akısı bölgesinde 3,04 katlık düşüş görülürken yüksek ışık akısı bölgesinde 1,27 katlık artış olmuştur.

Şekil 4.22 ’de laboratuvar atmosferiyle ısıl işlem-1 arasında fotoiletkenliklerdeki düşüşün temel nedeni laboratuvar atmosferindeki 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin TiO₂ yapısına tutunma ihtimalinin olmasıdır. Aynı malzemenin 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film ve 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin her iki ölçümünün de eğimlerinin aynı oluşu, malzemenin yasak enerji aralığındaki kusur yoğunluğunun değiştiğini göstermektedir. Isıl işlem uygulandığında elektronik kusur yoğunluğu artmıştır buna bağlı olarak fotoiletkenlik değerleri düşüş göstermiştir. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemenin yüksek ışık akısı bölgesinde eğim değişmiştir. Eğimin değişmesinin temel sebebi; içerideki kusur çeşitlerinin de değiştiğinin bir göstergesi olarak tanımlanır.



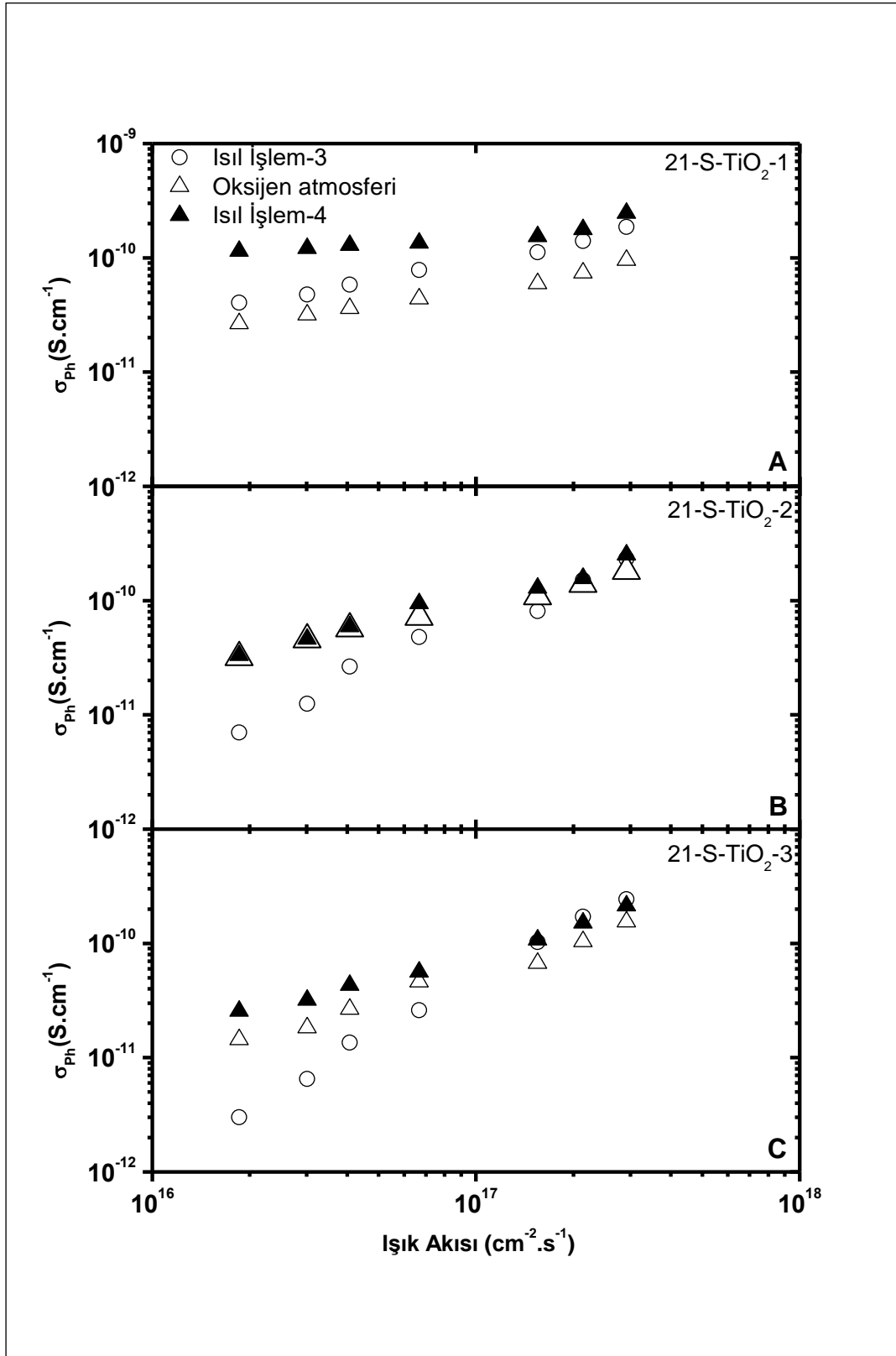
Şekil 4.23. Işık banyosunda yaşlandırılmış TiO₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.23’de 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin ışık banyosunda yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Malzeme bu adımda laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine alınmıştır. Malzemeler 60 dakika boyunca ışık banyosuna maruz bırakılmıştır. Buna göre 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film malzemedeki ışık banyosundan kaynaklı fotoiletkenlikte bir değişim oluşmamaktadır. Fakat ışık banyosunun etkisi ikinci ısıl işlemde ortaya çıkmaktadır. Bu da yüksek ışık akısı bölgesindeki fotoiletkenlik değerlerinde düşüşe sebep olmaktadır. 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film malzeme ışık banyosuna maruz bırakıldıktan sonra düşük ışık akısı bölgesinde 1,93 katlık artış, yüksek ışık akısı bölgesinde 4,75 katlık artış olmuştur. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosundan sonra fotoiletkenlik düşük ışık akısı bölgesinde artış göstermektedir. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosuna maruz bırakıldıktan sonra düşük ışık akısı bölgesinde 3,00 katlık azalış görülürken, yüksek ışık akısı bölgesinde 1,65 katlık artış olmuştur. Birinci ısıl işleme göre ışık banyosu malzemedeki kısmen kusur yoğunluğunu azaltan bir etki gibi gözükse de ikinci ısıl işlem uygulandıktan sonra eğim değişerek aşağı doğru düşüş göstermiştir. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosuna maruz bırakıldıktan sonra düşük ışık akısı bölgesinde 5,66 katlık artış, yüksek ışık akısı bölgesinde 2,00 katlık artış olmuştur. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosundan sonra hem eğim hem açı değişmektedir. Buna bağlı olarak kusur çeşidi değişmektedir, ışık banyosu kusur yoğunluğunu azaltmaktadır ikinci ısıl işlemde sonra ise malzemedeki kısmi dönüşümlü bir etki oluşmuştur.



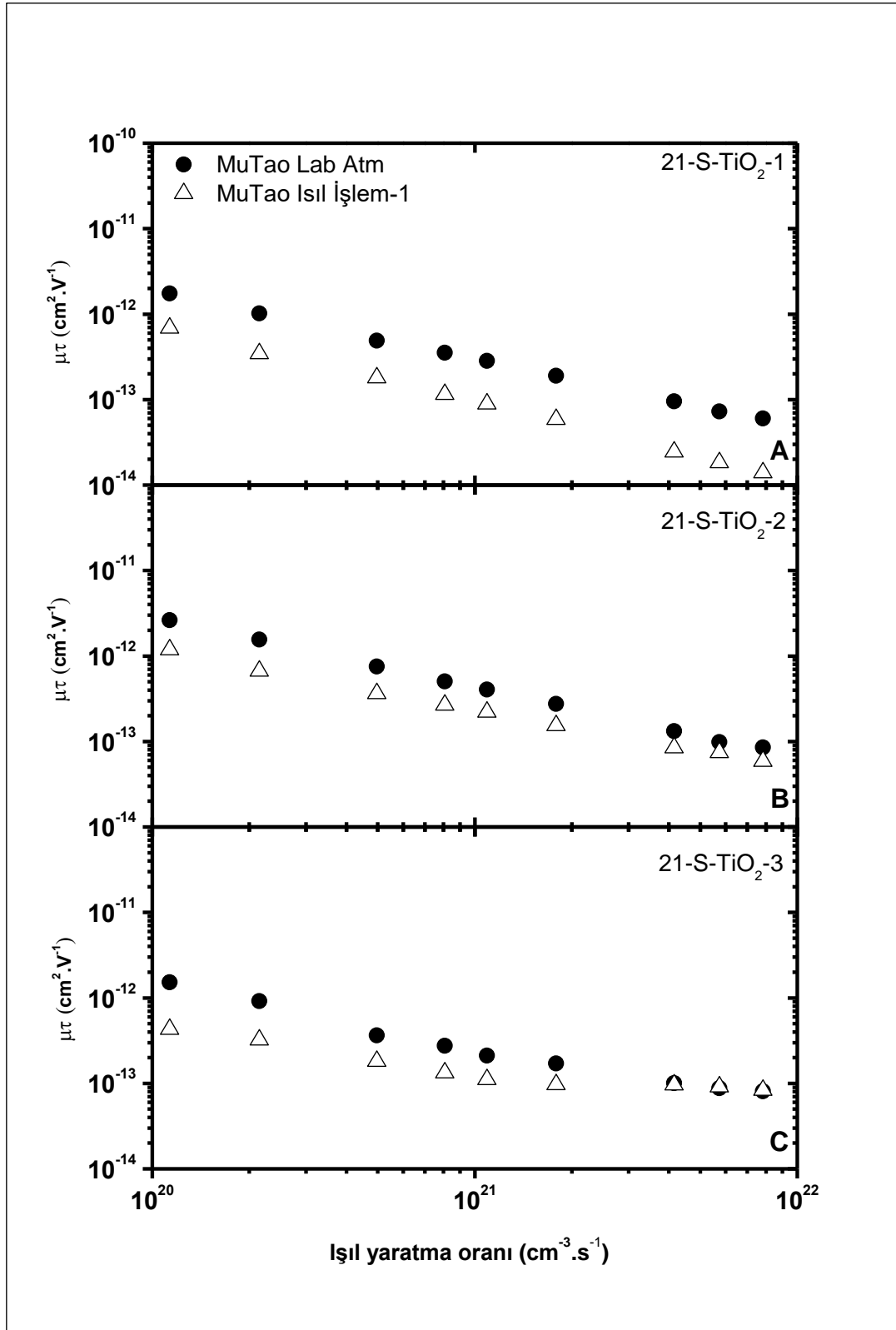
Şekil 4.24. UV ışık altında yaşlandırılmış TiO₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.24’de 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin UV ışık altında yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Malzemeler 60 dakika boyunca UV ışık altında yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Buna göre 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film malzemedeki UV ışık altında yaşlandırmadan sonra ısıtma işlemi 2’ye yakın bir davranış sergilemektedir. 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film malzemedeki UV ışık altında yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonra düşük ışık akısı bölgesinde 1,93 katlık artış, yüksek ışık akısı bölgesinde 1,10 katlık artış olmuştur. 3. Isıtma işleminden sonra eğim değişerek fotoiletkenlik değeri artış göstermektedir. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemedeki UV ışık altında yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonra fotoiletkenlikte 1,64 katlık bir artış görülmüştür. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemedeki UV ışık altında yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonra herhangi bir değişim görülmemektedir. Isıtma işlemi 2 ile ısıtma işlemi 3 verileri birbiriyle tamamen örtüşmektedir. Malzeme geri dönüşümlü bir etki yaratmıştır. Bu da morfolojik değişimlerin malzemedeki elektronik değişimlerin bir göstergesidir.



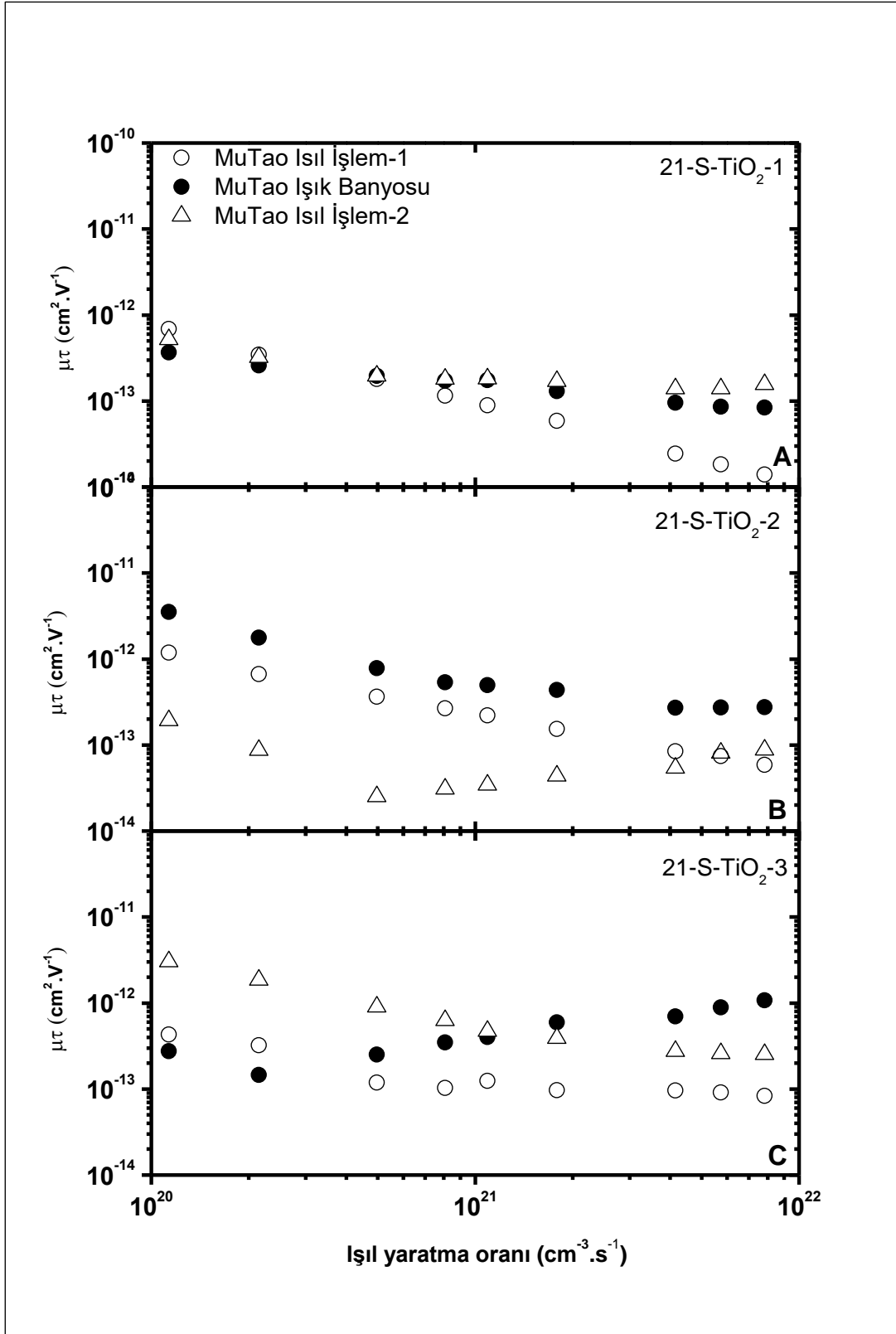
Şekil 4.25. Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış TiO₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.25’de 21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Malzemeler 60 dakika boyunca oksijen gazına maruz bırakılmıştır. Malzeme oksijen yaşlandırmasından sonra fotoiletkenlik değerleri artış göstermiştir 21-S-TiO₂-1 kodlu TiO₂ ince film malzemede oksijen yaşlandırmasına maruz bırakıldıktan sonra düşük ve yüksek ışık akısı bölgesinde 0,86 katlık artış görülmüştür. Buna bağlı olarak elektronik kusur yoğunluğu azalmıştır. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzeme oksijen atmosferinde yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonra düşük ışık akısı bölgesinde 1,43 katlık artış, yüksek ışık akısı bölgesinde ise 0,91 katlık artış görülmüştür. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemede oksijen yaşlandırmasından sonra ısı işlem 3 ve ısı işlem 4 verileri örtüşmeyerek geri dönüşümsüz bir etki oluşturmaktadır. 21-S-TiO₂-3 kodlu TiO₂ ince film malzemede oksijen yaşlandırmasına maruz bırakıldıktan sonra düşük ışık akısı bölgesinde 2,57 katlık azalış, yüksek ışık akısı bölgesinde ise 1,64 katlık azalış görülmüştür. Elektronik kusur yoğunluğu azalmıştır. Isıl işlem 3 ve ısı işlem 4 den sonra verilerin örtüşmeyerek malzemenin geri dönüşümsüz olduğu görülmektedir.



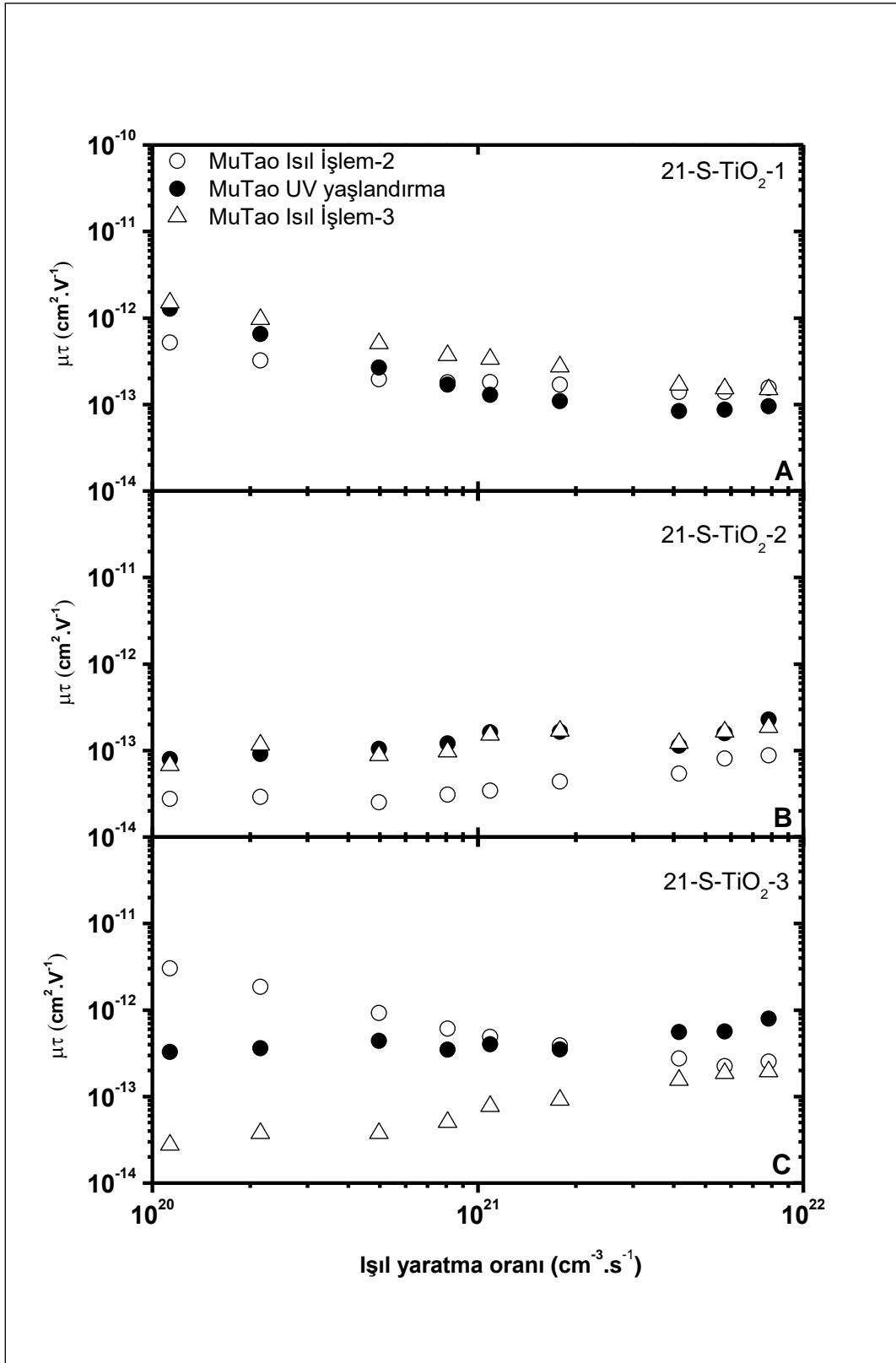
Şekil 4.26. Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış TiO₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.26’da 21-S-TiO₂-1,2 ve 3 kodlu malzemelere ait laboratuvar atmosferi ve ısıtım işlem-1 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımı sonucu elde edilen veriler sunulmuştur. Şekil 4.26’da görüleceği üzere her üç malzemede de ısıtım işlem sonrasında mobilite yaşam süresi çarpımları eğimleri değişmeden sadece değer olarak azaldığı belirlenmiştir. Bu durum ısıtım işlem sonrasında malzemelerde elektronik kusur çeşidinin değişmediğini ancak elektronik kusur yoğunluğunda belirgin artış olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni olarak ısıtım işlem sonrasında yüzeyde tutunmuş olabilecek yabancı gaz moleküllerinin yapmış olduğu potansiyel enerji değişimleri olabileceği gibi ısıtım işlem uygulaması sonrası elektronik kusur durumlarında yeniden bir düzen durumunun oluşması da olabilir.



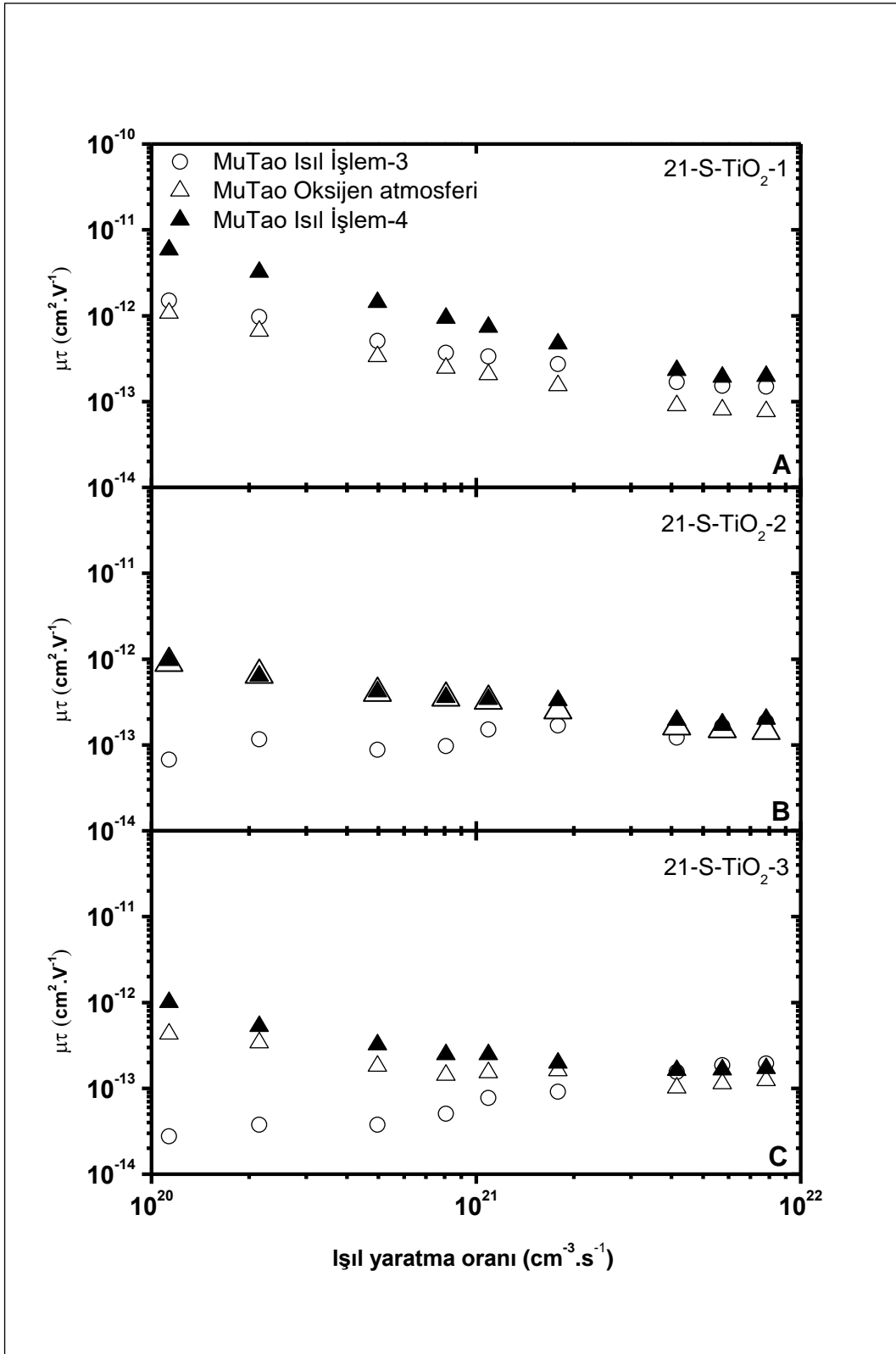
Şekil 4.27. Işık banyosunda yaşlandırılmış TiO₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.27’de 21-S-TiO₂-1, 2 ve 3 kodlu malzemelere ait ışık banyosu sonrası, ısıtma işlem-2 sonrası ve değişimin karşılaştırılabilmesi için ısıtma işlem-1 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımı sonucu elde edilen veriler sunulmuştur. 21-S-TiO₂-1’de yüksek ısıtma oranı bölgesinde $\mu\tau$ değerlerinin ısıtma işlem-1 sonrası duruma göre arttığı ancak düşük ısıtma oranı bölgesinde ısıtma işlem-1 değeri ile örtüştüğü görülmektedir. 21-S-TiO₂-2’de ise ışık banyosu sonrası $\mu\tau$ değerlerinin ısıtma işlem-1 sonrası duruma göre arttığı eğimin aynı kalarak artış gösterdiği görülmektedir. Yine bu durum malzemede sadece elektronik kusur yoğunluğunda bir değişim olduğunun bir göstergesidir. Ancak ikinci ısıtma işlemin uygulanması ile 21-S-TiO₂-2 $\mu\tau$ değerlerinin hem eğim olarak değiştiği hem de $\mu\tau$ değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum ikinci ısıtma işlemle malzemenin elektronik kusur durumlarının çeşidinin değiştiğini ve buna ek olarak elektronik kusur yoğunluğunun da arttığını göstermektedir. 21-S-TiO₂-3’de ise ışık banyosu sonrası $\mu\tau$ değerlerinin ısıtma işlem-1 sonrası duruma göre hem eğiminin değiştiği hem de arttığı görülmektedir. Buna karşın ikinci ısıtma işlem uygulaması sonrası birinci ısıtma işlem uygulaması ile benzer eğimde ancak $\mu\tau$ değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum elektronik kusur durumlarının ısıtma işlem-2 uygulaması sonrası azaldığı ve ışık banyosunun bir nevi pasivasyon etkisi oluşturduğunun göstergesidir.



Şekil 4.28. UV ışık altında yaşlandırılmış TiO_2 ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

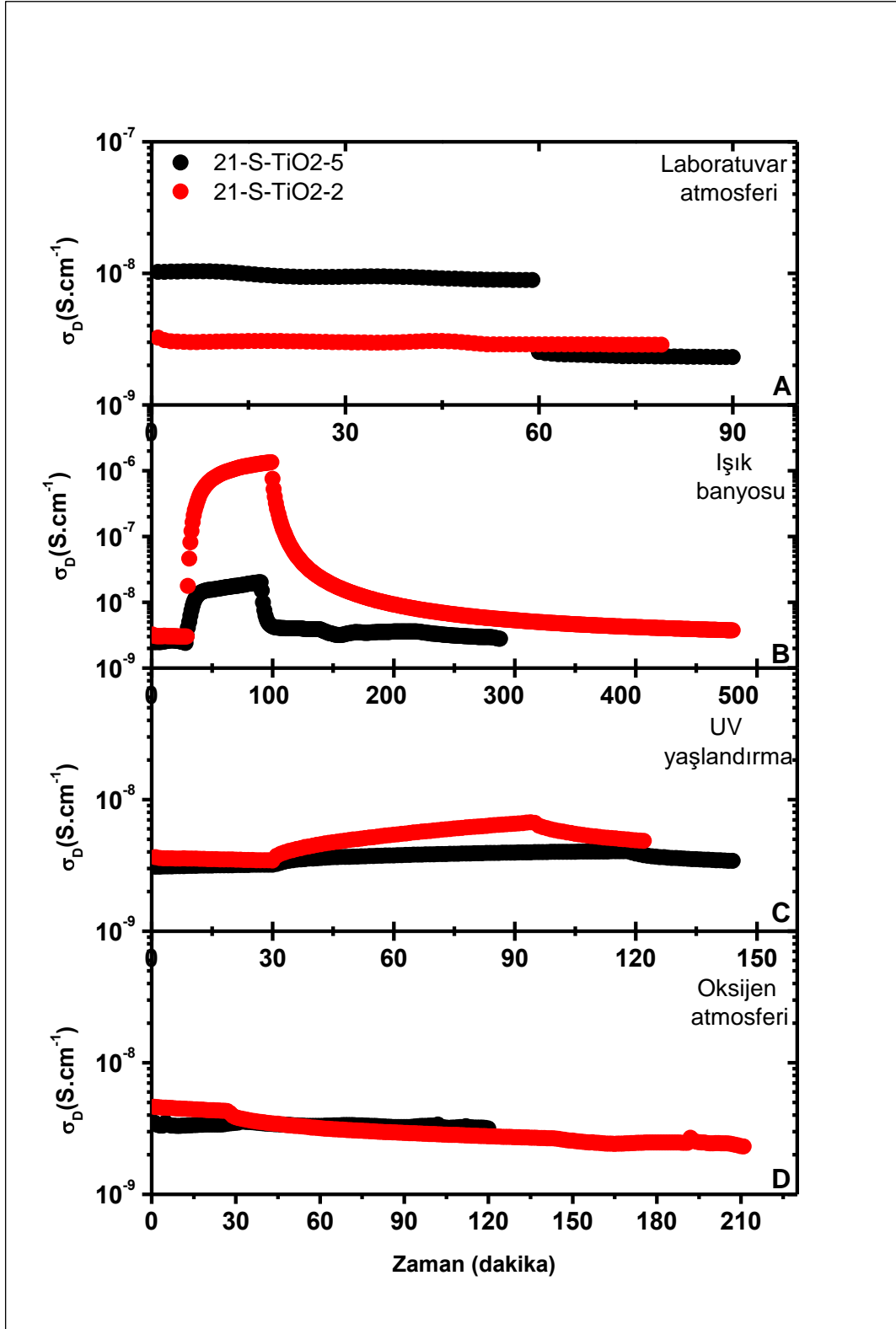
Şekil 4.28’de 21-S-TiO₂-1, 2 ve 3 kodlu malzemelere ait UV yaşlandırma sonrası, ısıtma işlem-3 sonrası ve değişimin karşılaştırılabilmesi için ısıtma işlem-2 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımı sonucu elde edilen veriler sunulmuştur. 21-S-TiO₂-1’de UV yaşlandırmanın elektronik kusurlar üzerinde belirgin bir değişim oluşturmamış gibi görünse de UV yaşlandırmanın asıl etkisinin ısıtma işlem-3 sonrasında görüldüğü belirlenmiştir. Buna bağlı olarak 21-S-TiO₂-1’de UV yaşlandırma malzemenin elektronik kusur dağılımını azalttığı şeklinde yorumlanabilir. 21-S-TiO₂-2’de ise UV yaşlandırma sonucu $\mu\tau$ değerlerinin eğiminde değişim olmazken $\mu\tau$ değerlerinin artmış olduğu belirlenmiştir. Bu durum bu malzeme için elektronik kusurların UV uygulaması ile azaldığının bir göstergesidir. 21-S-TiO₂-3’de ise UV yaşlandırması diğer iki malzemeye göre tam tersi bir davranış sergilemektedir. 21-S-TiO₂-3’de UV yaşlandırması sonrası $\mu\tau$ değerlerinin eğiminin değiştiği ve ısıtma işlem-3 uygulaması ile aynı eğimle $\mu\tau$ değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum 21-S-TiO₂-3’de UV yaşlandırması elektronik kusur yoğunluğunda keskin değişimlere neden olduğu göstermektedir. UV yaşlandırması sonrası oluşabilecek değişimlerin genel nedeni incelenecek olursa yüksek enerjiye sahip fotonların bağları kırması ve malzemelerde oluşan açık bağların ısıtma işlem uygulaması ile yeniden kurgulanması olarak değerlendirilebilir. Bu durum malzemenin sahip olduğu bağ yapısı doğal olarak morfolojik yapısını da ilgilendirmektedir. Bu nedenle farklı ikincil ısıtma işlemlere tabii tutulan malzemelerin morfolojik yapısı değiştiğinden dolayı elektronik kusur profillerinde de farklılık göstermesi normaldir.



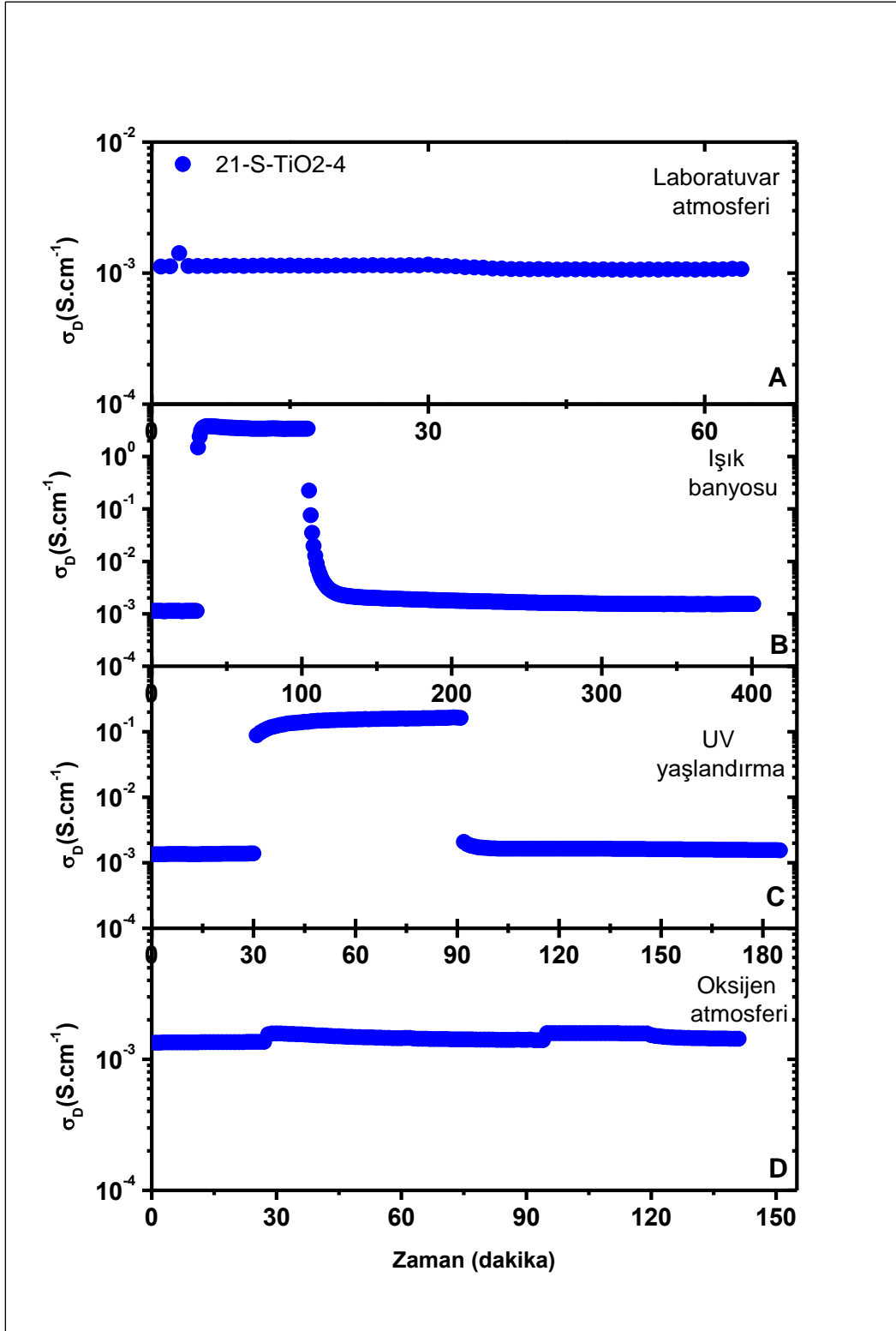
Şekil 4.29. Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış TiO₂ ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.29’da 21-S-TiO₂-1, 2 ve 3 kodlu malzemelere ait oksijen yaşlandırma sonrası, ısıtım işlem-4 sonrası ve değişimin karşılaştırılabilmesi için ısıtım işlem-3 sonrası elde edilen mobilite-yaşam süresi çarpımı sonucu elde edilen veriler sunulmuştur. 21-S-TiO₂-1’de oksijen gazı yaşlandırması sonrası $\mu\tau$ değerlerinin eğiminin aynı kalarak artış olmuş olsa da dördüncü ısıtım işlemle bunun tamamen ortadan kalktığı ve tamamen geri dönüşümlü bir etki olduğu belirlenmiştir. 21-S-TiO₂-2’de oksijen gazı yaşlandırması sonrası $\mu\tau$ değerlerinin düşük ışıl yaratma oranlarında artış gösterirken yüksek ışıl yaratma oranlarında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Ancak bu sefer oksijen geri dönüşümsüz bir etki oluşturmuş ve dördüncü ısıtım işlem sonrasında elde edilen değerler oksijen gazı yaşlandırması sonucu elde edilen değerlerle örtüşmüştür. 21-S-TiO₂-3’de oksijen gazı yaşlandırması sonrası elde edilen bulgular 21-S-TiO₂-2’de elde edilen bulgularla birebir aynıdır. Bu durum yine malzemelerin sahip oldukları morfolojik ve buna bağlı olarak açık bağ yapılarının benzemesi sonucu benzer atmosferik etkenlere benzer cevaplar verdiğinin bir göstergesidir.

Bu tez çalışmasında akıllarda oluşan diğer bir soru da TiO₂ yapılarının ikincil ısıtım işlem sonrası morfolojik olarak değişimlerinin taban malzemesi ile ilişkili olup olmadığıdır. Bu nedenle farklı taban malzemeler kullanılarak aynı ikincil ısıtım işleme maruz bırakılan malzemelerin stres faktörleri altındaki değişimi incelenmiştir. Sputter yöntemi ile yüksek ısı mukavemetli pürüzsüz cam taban malzeme (robax) (21-S-TiO₂-2), wafer (21-S-TiO₂-4) ve pürüzlü cam taban malzeme (21-S-TiO₂-5) kodlu TiO₂ ince filmlere, 500 °C’ de kül fırında bir saat süreyle ikincil ısıtım işlem uygulanmıştır. Metal buharlaştırma ile gümüş kontak atılan malzemelerin stres faktörleri altındaki değişimi incelenmiştir. Malzemelerin elektriksel özellikleri aynı ölçüm prosedürü ile sırasıyla; laboratuvar atmosferi altında, ışık banyosu altında, ultraviyole ışık altında ve oksijen gazı altındaki ışık akısına bağlı fotoiletkenlik ölçüm grafikleri aşağıda gösterilmiştir. Silisyum wafer malzemenin iletkenlik değerleri çok yüksek olduğundan karşılaştırmalar yapılırken ayrı olarak sunulmuştur.

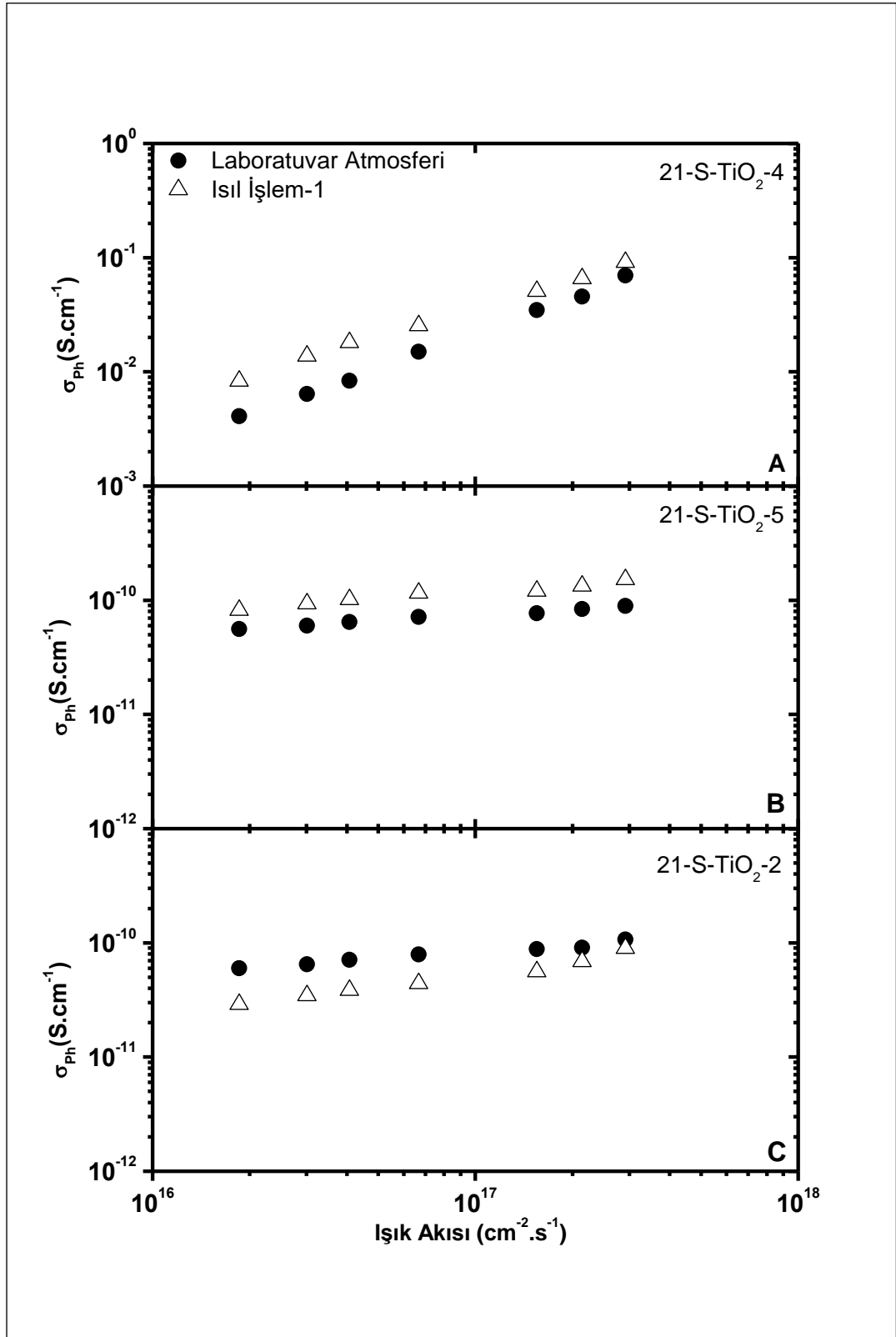


Şekil 4.30. 500 °C’de tavllanmış pürüzlü ve robax malzemelerin zamana bağlı iletkenlik grafiği



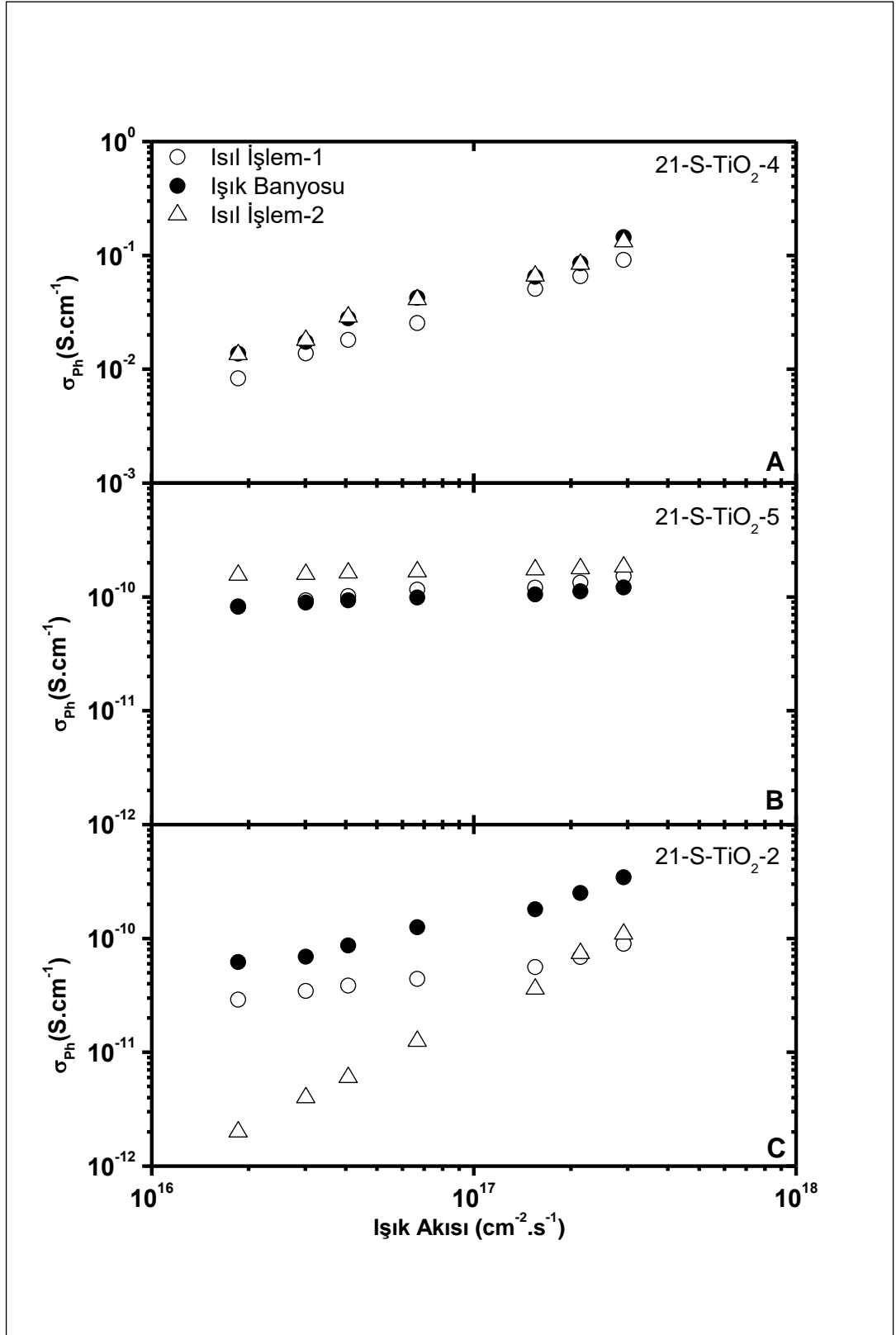
Şekil 4.31. 500 °C’de tavllanmış silisyum wafer malzemenin zamana bağlı iletkenlik grafiği

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de 500 °C sıcaklıkta tavllanmış 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ malzemelerin laboratuvar atmosferi, ışık banyosu, UV yaşlandırma, oksijen yaşlandırması altındaki zamana bağlı iletkenlik grafiği verilmiştir. 500°C sıcaklıkta tavllanmış 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-4 kodlu malzemelerin laboratuvar atmosferi altında zamana bağlı karanlık iletkenliklerinde bir değişim görülmezken, 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemenin 60. dakikadan itibaren düşüş görülmüştür. Bir sonraki adımda malzemeler laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine alınmıştır. Malzemeler 30. dakikadan itibaren 60 dakika boyunca ışık banyosuna maruz bırakılmıştır. 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin fotoiletkenlik değeri aydınlık ortamda en yüksek olduğu görülürken, 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemenin fotoiletkenlik değeri en düşüktür. Bu adımdan sonra malzemeler 30. dakikadan itibaren 60 dakika boyunca UV yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin fotoiletkenlik değeri aydınlık ortamda en yüksek olduğu görülürken, 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemenin fotoiletkenlik değeri en düşüktür. Zamana bağlı iletkenlik grafiğinde son adım olarak 30. Dakikadan itibaren malzemeler 60 dakika boyunca oksijen yaşlandırmasına maruz bırakılmıştır. 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin oksijen yaşlandırmasına bağlı olarak zamana bağlı fotoiletkenlik değerlerinde değişim gözlenmemiştir.



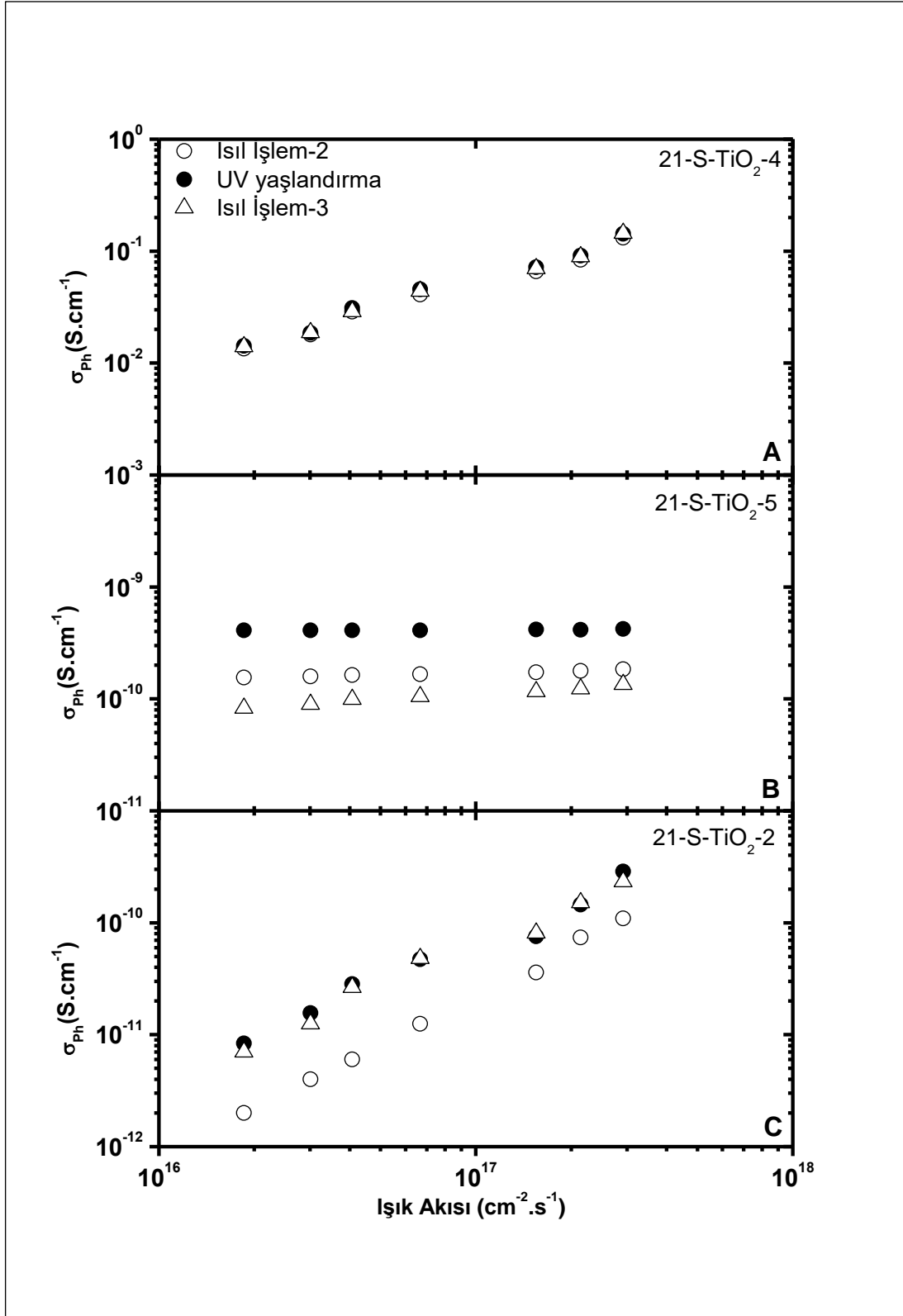
Şekil 4.32. Laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO_2 ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.32’de 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin laboratuvar atmosferinde yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Buna göre Şekil 4.32a’da laboratuvar atmosferinden ısıtılma işlemine geçildiğinde 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde 2,22 katlık bir artış görülmektedir. 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde 1,61 katlık bir artış görülmektedir. Yine 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ise ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerleri düşük ışık akısı bölgesinde 1,84 katlık azalış görülürken yüksek ışık akısı bölgesinde 1,32 katlık azalış görülmektedir.



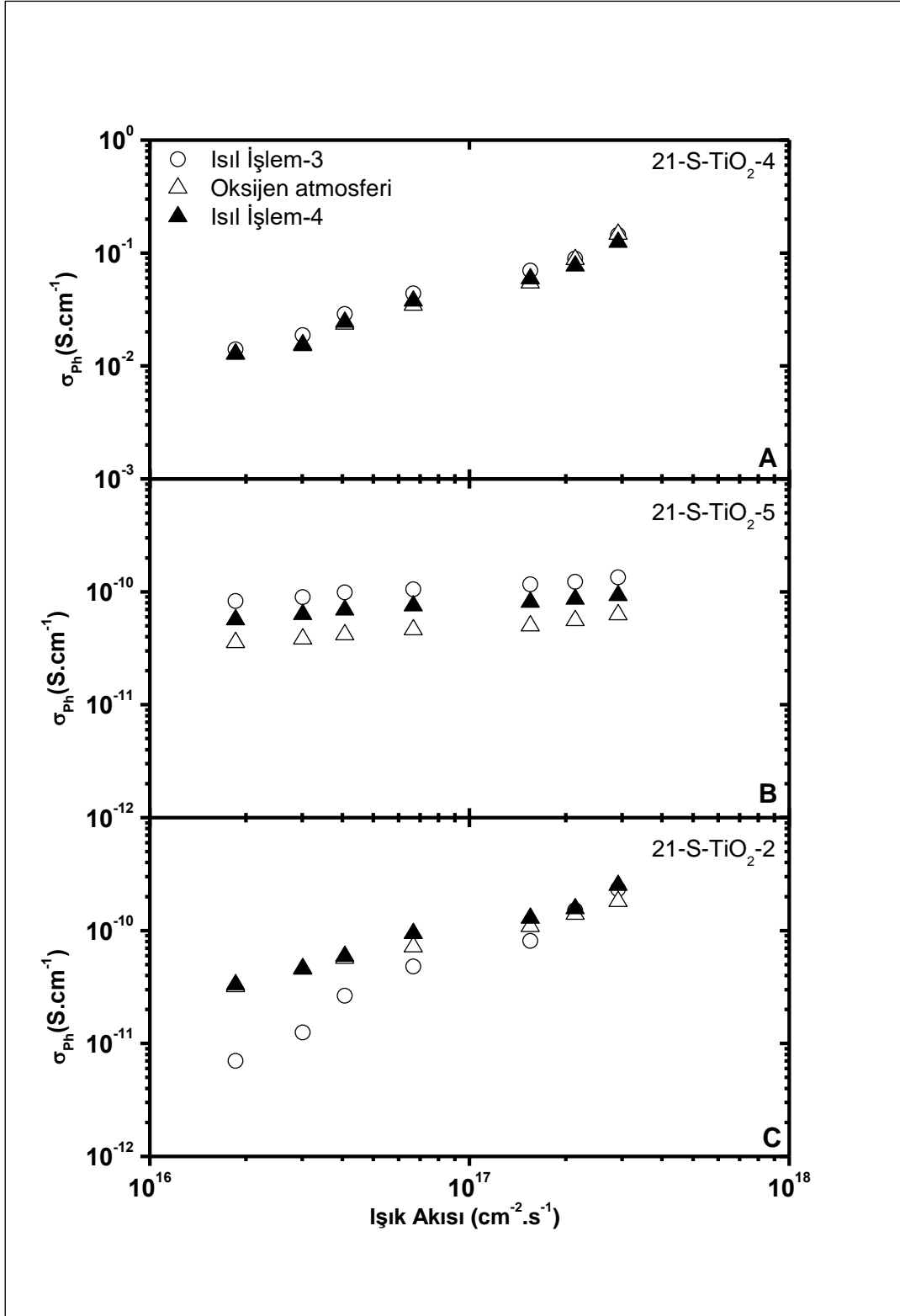
Şekil 4.33. Işık banyosunda yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO_2 ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.33’de 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin ışık banyosunda yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Malzeme bu adımda laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine alınmıştır. Malzemeler 60 dakika boyunca ışık banyosuna maruz bırakılmıştır. Buna göre 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosundan sonra ısıl işlem-2 verileriyle tamamen birbiriyle örtüşmektedir. Malzemeler geri dönüşümlü bir etki yaratmıştır. 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde 1,44 katlık bir artış görülmektedir. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosundan sonra ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde düşük ışık akısı bölgesinde 2,5 katlık bir azalış görülürken, yüksek ışık akısı bölgesinde 1,60 katlık artış görülmektedir. Birinci ısıl işleme göre ışık banyosu malzemede kısmen kusur yoğunluğunu azaltan bir etki gibi gözükse de ikinci ısıl işlem uygulandıktan sonra hem eğim değişmektedir hem aşağı doğru gelmiştir. Ayrıca yüksek ışık akısı bölgesinde eğim değişmiştir. Eğimin değişmesinin temel sebebi; içerideki kusur çeşitlerinin de değiştiğinin bir göstergesi olarak tanımlanır.



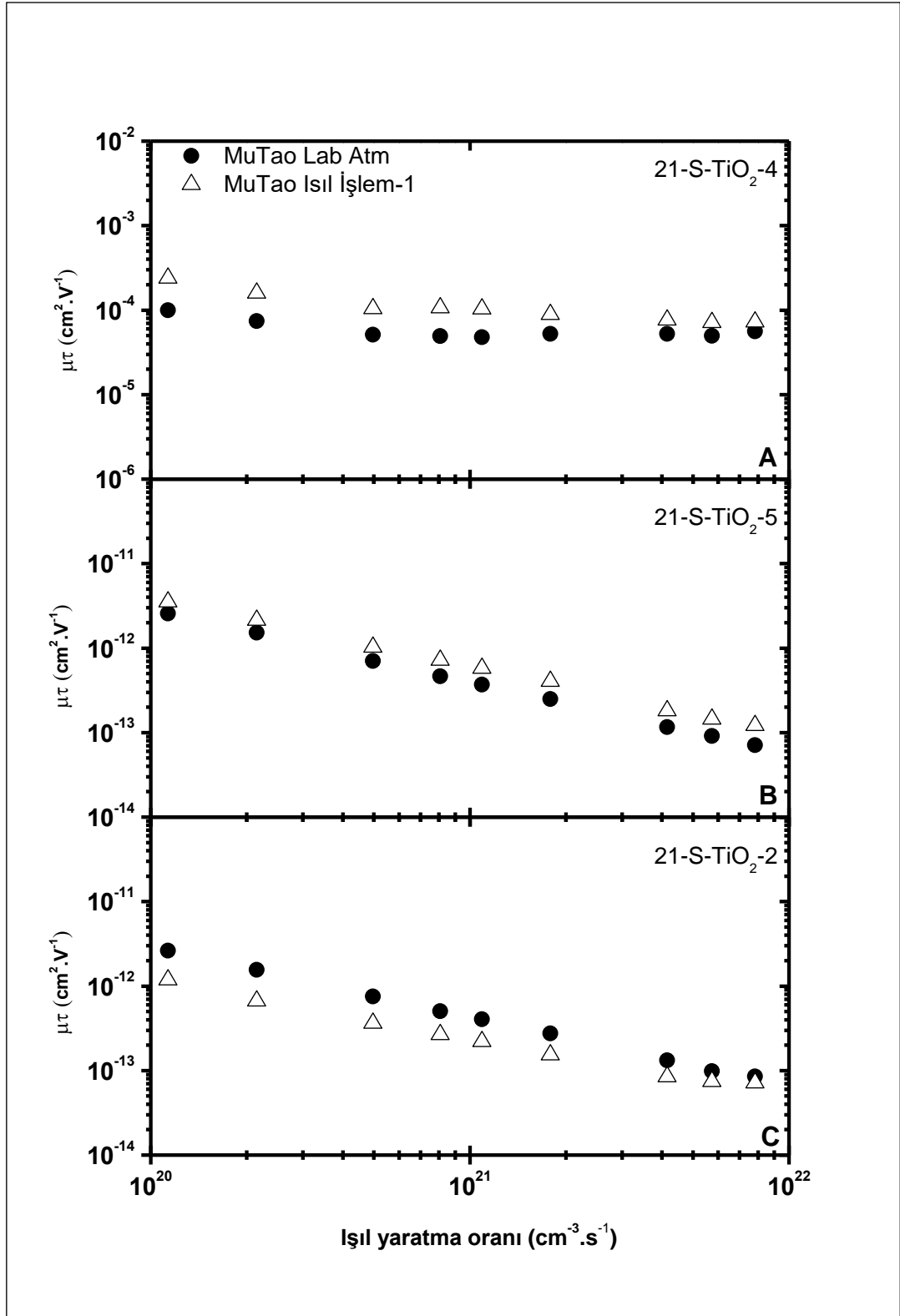
Şekil 4.34. UV ışık altında yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO₂ ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.34’de 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin UV ışık altında yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Malzemeler 60 dakika boyunca UV yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin UV yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonra ısı işlem-2 ile ısı işlem-3 verileri birbiriyle tamamen örtüşmektedir. Malzemeler geri dönüşümlü bir etki yaratmıştır. 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde 1,58 katlık bir azalış görülmektedir. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde 2,12 katlık bir artış görülmektedir. Buna göre 21-S-TiO₂-2 ve 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin UV yaşlandırmadan sonra ısı işlem-3 verileriyle örtüşmüştür. Bu bağlamda malzemenin dönüşümlü olduğu görülmüştür. 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ise UV yaşlandırmadan sonra ısı işlem-3 verileriyle birebir örtüşmeyerek fotoiletkenlik azalmıştır buna bağlı olarak elektronik kusur yoğunluğu artmıştır. Böylece malzemenin kısmi dönüşümlü olduğu görülmüştür. 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemedeki UV yaşlandırmadan sonra fotoiletkenlik azalmaktadır. UV yaşlandırma elektronik kusur yoğunluğunu arttırmaktadır. ikinci ısı işleminden sonra ise kısmi dönüşümlü bir etki oluşturmuştur.

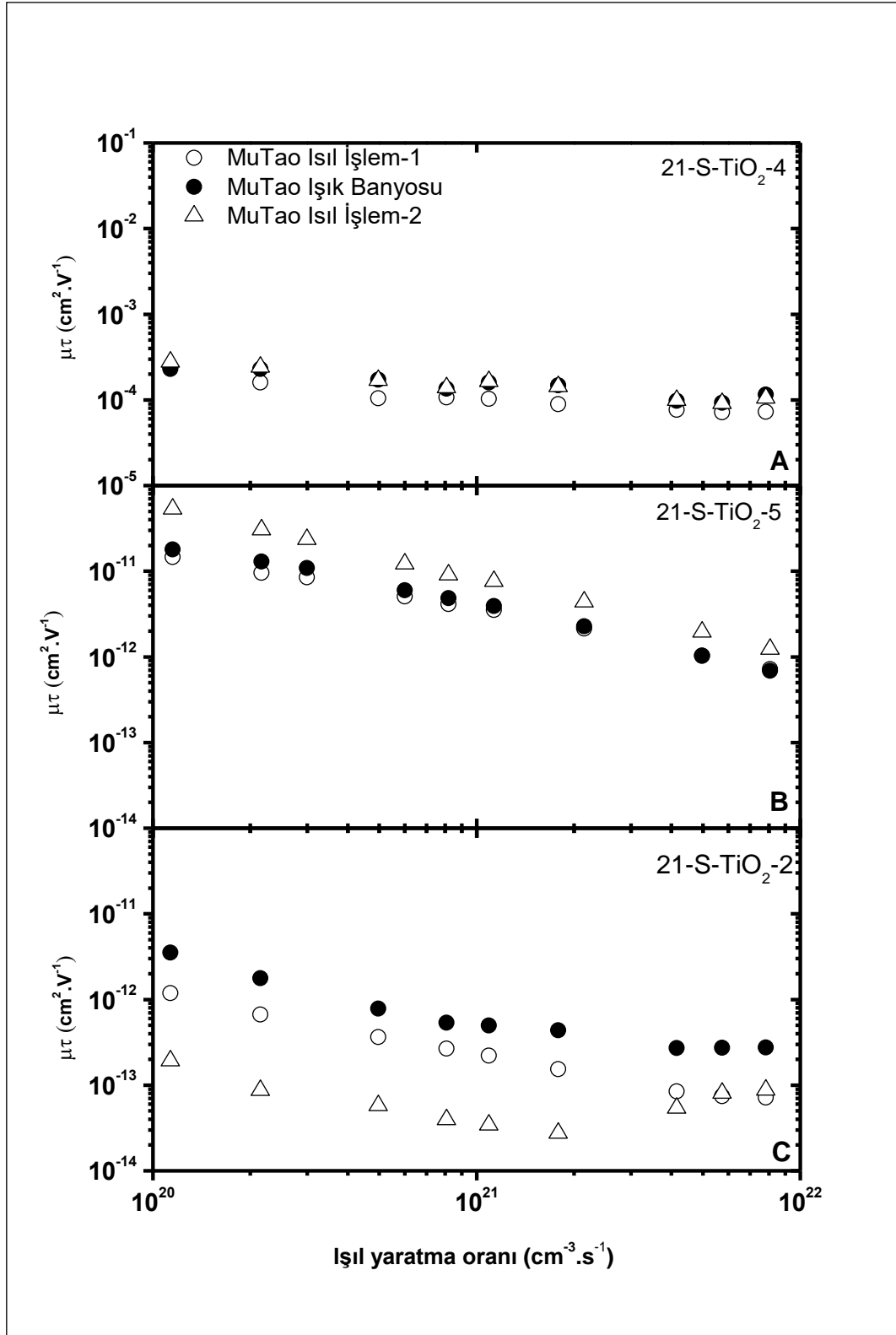


Şekil 4.35. Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO_2 ince filmlerin ışık akısı grafiği

Şekil 4.35’de 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemelerin oksijen atmosferinde yaşlandırılmış malzemelerin ışık akısı grafiği verilmiştir. Malzemeler 60 dakika boyunca oksijen gazına maruz bırakılmıştır. Buna göre 21-S-TiO₂-4 kodlu TiO₂ ince film malzemenin oksijen yaşlandırmasında sonra ısıl işlem-3 verileriyle ısıl işlem-4 verileri birbiriyle tamamen örtüşmüştür. Bu bağlamda malzemenin dönüşümlü olduğu görülmüştür. 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemede oksijen yaşlandırmasından sonra fotoiletkenlik değerlerinde 1,39 katlık bir düşüş görülmektedir. 21-S-TiO₂-2 kodlu TiO₂ ince film malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerlerinde düşük ışık akısı bölgesinde 3,64 katlık bir artış görülürken yüksek ışık akısı bölgesinde 1,40 katlık bir artış görülmektedir.

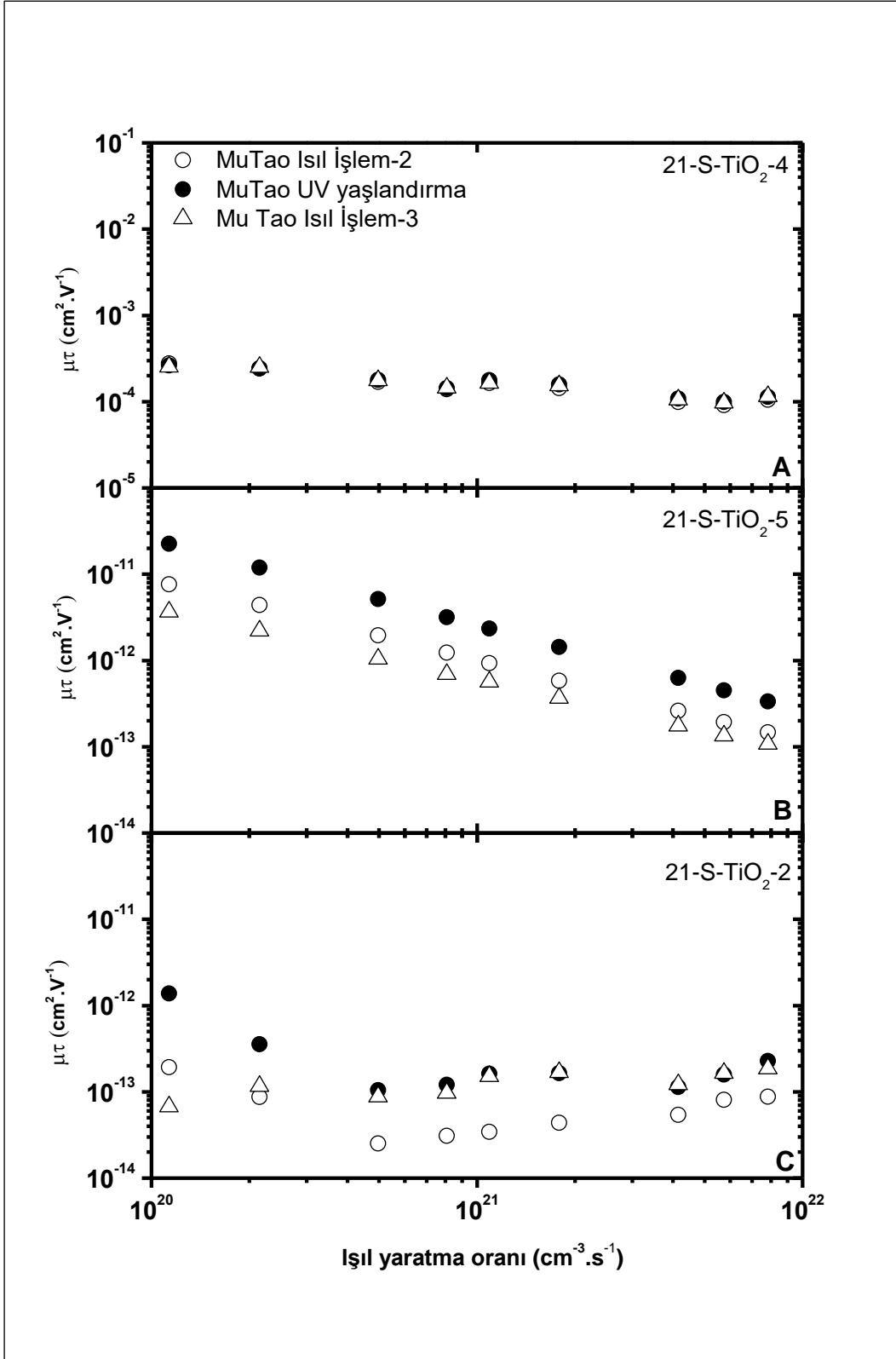


Şekil 4.36’de 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5’e ait $\mu\tau$ değerlerinin laboratuvar atmosferi ve ısıtma işlemi-1 sonrasındaki değişimleri net olarak sunulmuştur. 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5’e ait $\mu\tau$ değerlerinin ısıtma işlemi uygulaması ile eğimi aynı kalırken değerlerinde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Bu durum elektronik kusur durumlarında ısıtma işlemi-1 ile kısmen bir azalma olduğu şeklinde yorumlanabilir. 21-S-TiO₂-2’de ise $\mu\tau$ değerlerinin yine eğimi aynı kalmakla birlikte değerlerinde bir miktar azalma olduğu bana bağlı olarak malzemede elektronik kusur yoğunluğunda artış olduğu belirlenmiştir.



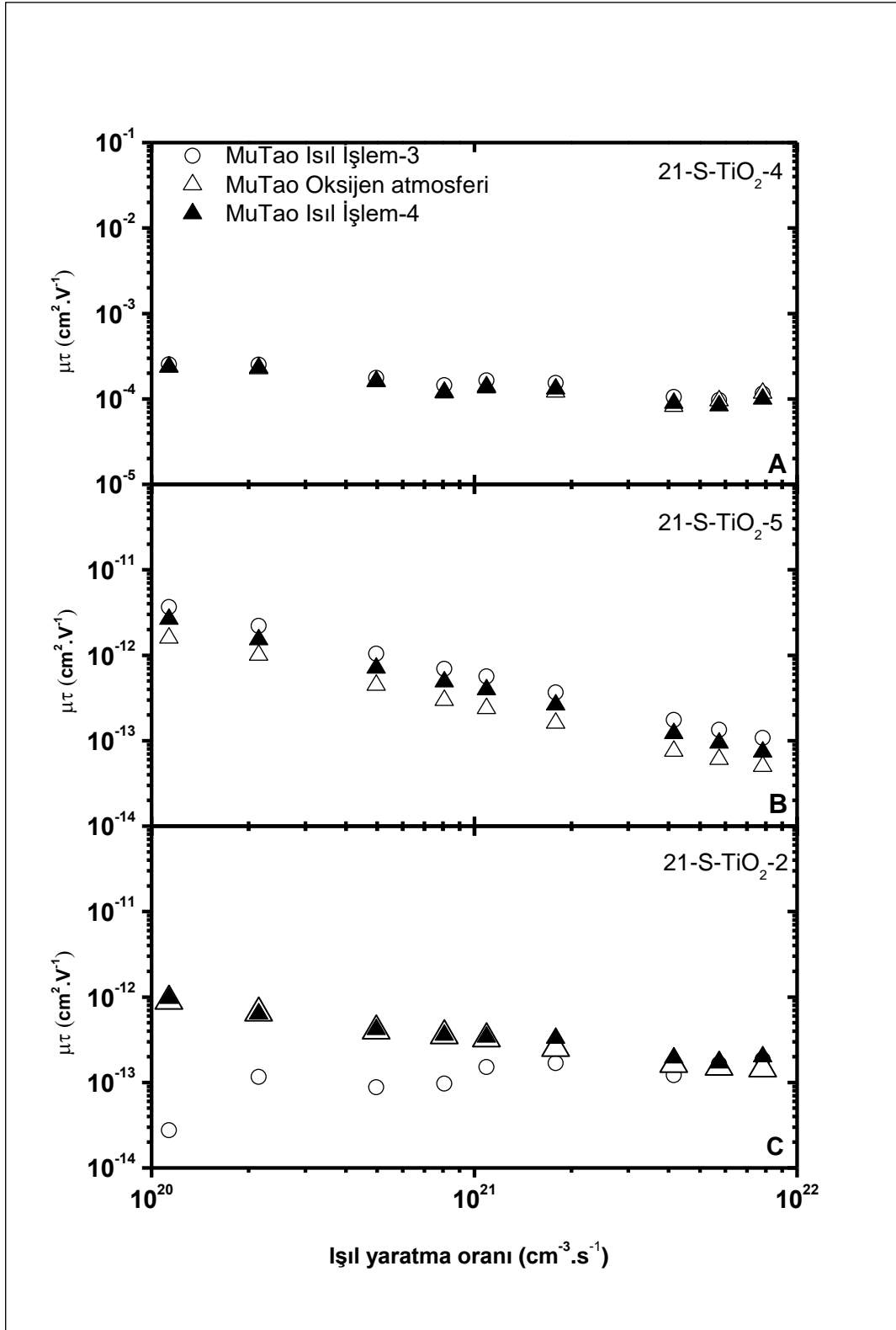
Şekil 4.37. Işık banyosunda yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO_2 ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.37’de 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5’e ait $\mu\tau$ değerlerinin ışık banyosu, ısıl işlem-2 ve referans oluşturması için ısıl işlem-1 sonrasındaki değişimleri sunulmuştur. 21-S-TiO₂-4’de ışık banyosundan kaynaklı herhangi bir değişim oluşmazken 21-S-TiO₂-5’de ikinci ısıl işlem uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde artış belirlenmiştir. 21-S-TiO₂-2’de ise ışık banyosu uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde önce artış ardından ikinci ısıl işlemle birinci ısıl işlemin de altına inen bir azalma belirlenmiştir.



Şekil 4.38. UV ışık altında yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO_2 ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.39'da 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5'e ait $\mu\tau$ değerlerinin UV yaşlandırma, ısıtma işlem-3 ve referans oluşturması için ısıtma işlem-2 sonrasındaki değişimleri sunulmuştur. 21-S-TiO₂-4'de UV yaşlandırmadan kaynaklı herhangi bir değişim oluşmazken 21-S-TiO₂-5'de UV yaşlandırma uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde artış belirlenmiştir. Ancak bu artış üçüncü ısıtma işlem ile azalarak ikinci ısıtma işlem değerinin de altına inmiştir. 21-S-TiO₂-2'de ise UV yaşlandırma uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde aynı eğimi koruyarak artış gözlemlenmiş ve bu artış üçüncü ısıtma işlem uygulaması sonrasında bir değişim oluşturmamıştır. Yani UV yaşlandırma malzemedeki kalıcı bir değişim oluşturmuştur.



Şekil 4.39. Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış robax, pürüzlü ve silisyum wafer üzerine büyütülmüş TiO_2 ince filmlerin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.39'da 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5'e ait $\mu\tau$ değerlerinin oksijen yaşlandırma, ısıtma işlem-4 ve referans oluşturması için ısıtma işlem-3 sonrasındaki değişimleri sunulmuştur. 21-S-TiO₂-4'de oksijen yaşlandırmadan kaynaklı herhangi bir değişim oluşmazken 21-S-TiO₂-5'de oksijen yaşlandırma uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde azalma belirlenmiştir. Ancak bu azalma dördüncü ısıtma işlem ile devam etmiş ve daha da aşağılara inmiştir. 21-S-TiO₂-2'de ise oksijen yaşlandırma uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde aynı eğimi koruyarak artış gözlemlenmiş ve bu artış dördüncü ısıtma işlem uygulaması sonrasında bir değişim oluşturmamıştır. Yani oksijen yaşlandırma malzeme kalıcı bir değişim oluşturmuştur.

Genel olarak görüleceği üzere wafer üzerine büyütülen TiO₂ üzerinde stres faktörlerinden kaynaklı bir değişim belirlenmemiştir. Ancak bu durum wafer'ın kendisinin sahip olduğu yüksek iletkenlikten kaynaklı olarak belirlenmemiş olma ihtimali de bulunmaktadır. Bununla birlikte robax ve pürüzlü camlarda stres faktörlerinden kaynaklı benzer davranışların sergilendiği belirlenmiştir. Bu durum taban malzemenin malzeme üzerinde etkisi olsa bile ihmal edilebilir seviyede olduğunun bir göstergesidir.

21-S-TiO₂-1, 21-S-TiO₂-2, 21-S-TiO₂-3, 21-S-TiO₂-4 ve 21-S-TiO₂-5 kodlu TiO₂ ince film malzemelere ikincil tavlama uygulandıktan sonra literatürle bağlantılı olarak morfolojide belirgin gözenekli değişim görülmektedir (Thapliya vd., 2021).

Morfolojideki değişime bağlı olarak malzemelere uygulanan atmosferik koşullardan ışık banyosu ve UV yaşlandırmada değişim gözlenirken, oksijen yaşlandırmasından kaynaklı bir değişim gözlemlenmeyip geri dönüşümlü bir etki göstermiştir.

TiO₂ ince film malzemelere ikincil tavlama uygulandıktan sonra en belirgin ikincil tavlama 500 °C' de tavllanmış robax TiO₂ ince film malzeme de görülmüştür. Malzemeye uygulanan atmosferik koşullar içerisinde en belirgin, ışık banyosu yaşlandırmasından kaynaklı değişim görülmüştür. Buna göre, kusur çeşidi değişmektedir, ışık banyosu kusur yoğunluğunu azaltmaktadır ikinci ısıtma işleminden sonra ise malzeme de kısmi dönüşümlü bir etki oluşmuştur. 500 °C' de tavllanmış robax TiO₂ ince film malzemenin mobilite yaşam süresi değerlerinin hem eğim olarak değiştiği hem de mobilite yaşam süresi

değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum ikinci ısıl işlemle malzemenin elektronik kusur durumlarının çeşidinin değiştiğini ve buna ek olarak elektronik kusur yoğunluğunun da arttığını göstermektedir.

300 °C' de tavllanmış robax TiO₂ ince film malzemenin UV ışık altında yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonra eğim değişerek fotoiletkenlik değerinde artış görülmektedir.

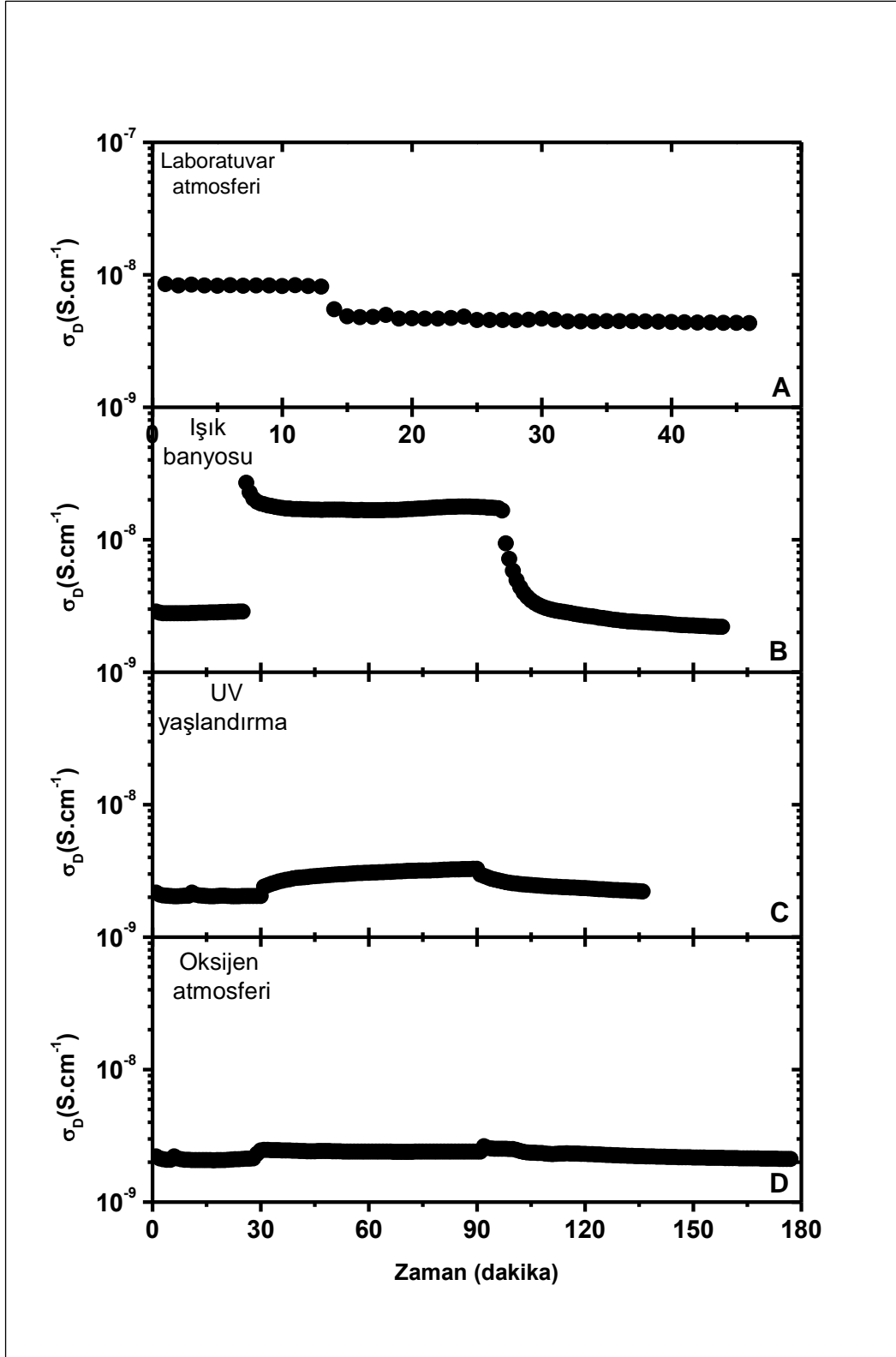
Farklı taban malzemeler üzerine aynı TiO₂ malzemeler büyütülmüştür. Aynı stres faktörlerine maruz bırakılarak farklı taban malzemelere etkisi olup olmadığı araştırılmıştır. Herhangi bir pürüzden kaynaklı olduğu görülmemiştir. Silisyum Wafer malzeme p- tipi Silisyum wafer kullanılmıştır. Wafer malzemenin iletkenliği çok yüksek olduğundan pürüzsüzdür. Bu malzeme üzerinden taban malzemedeki kaynaklı pürüzlülük oluşması beklenmemiştir. Bu sebeple 500 °C tavllanmış wafer TiO₂ ince film malzemenin ışık banyosundan ve UV yaşlandırmadan sonra malzemelerde geri dönüşümlü bir etki oluşturduğu görülmüştür. Pürüzlü TiO₂ ince film malzemenin ise UV yaşlandırmadan sonra elektronik kusur yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Böylece malzemenin kısmi dönüşümlü olduğu görülmüştür. Yine pürüzlü TiO₂ ince film malzeme UV yaşlandırmadan sonra fotoiletkenliğin azalarak, UV yaşlandırma elektronik kusur yoğunluğunun arttığı görülerek kısmi dönüşümlü bir etki oluşturmuştur.

Farklı taban malzemeler üzerine aynı sıcaklıkta ikincil tavlama uygulanan TiO₂ ince film malzemelerin $\mu\tau$ değerlerinde aynı eğimi koruyarak bir değişim oluşturmayarak oksijen yaşlandırmasında sonra mobilite yaşam süresinde geri dönüşümlü bir etki oluşturduğu görülmüştür.

Bu kısımda MAPbI₃ ince filmler termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak pürüzsüz cam taban malzeme üzerine büyütülmüştür. Termal buharlaştırma yöntemi ile MAPbI₃ ince film üretimi yapılırken, sistem içinde bulunan potalardan Pota 1'e 0,02 g PbI₂, Pota 2'e ise 0,06g MAI koyulmuştur. Sistem vakuma alınmıştır. Taban malzeme olarak mikroskop camı kullanılmıştır. Her potadaki malzemenin buharlaşma sıcaklığı farklı olduğundan ve eş buharlaştırma yapılması gerektiğinden dolayı sistem vakum değeri 1,01E-4'e geldiğinde pota 1'e 15 amper, pota 2'e 10 amper uygulanarak üretim süreci

başlatılmıştır. Eş zamanlı buharlaştırma yapılabilmesi için farklı akım değerleri sırası ile arttırılarak uygulanmıştır. Pota 1 PbI_2 28 ampere geldiğinde, pota 2 MAI, 20 amper değerine ulaştığında, her iki potadaki malzemeler eş zamanlı olarak buharlaştırılmıştır.

Büyütülen $MAPbI_3$ ince filmler stres faktörleri (laboratuvar atmosferi, vakum atmosferi, ışık banyosu, UV ışık, oksijen atmosferi) altındaki elektriksel değişimleri belirlenmiştir. Elektriksel değişimlerin belirlenebilmesi için $MAPbI_3$ ince filmler tek tabaka halinde pürüzsüz mikroskop camı üzerine büyütülmüştür. Bu şekilde herhangi bir ara yüzey oluşturmadan sadece $MAPbI_3$ ince filmlerin stres faktörleri altındaki değişimleri belirlenmiştir. $MAPbI_3$ ince filmlerdeki elektriksel özellikler sırası ile laboratuvar atmosferinde yaşlanmış durumda, ışık banyosunda yaşlanmış durumda, ultraviyole ışık altında yaşlanmış durumda ve oksijen gazında yaşlanmış durumda karanlık iletkenlik, fotoiletkenlik ölçümleri yapılarak ve mobilite-yaşam süresi hesaplamaları gerçekleştirilerek belirlenmiştir. $MAPbI_3$ 6-1 kodlu malzeme için elde edilen bulgular Şekil 4.40, 4.41 ve 4.42’de özetlenerek sunulmuştur.

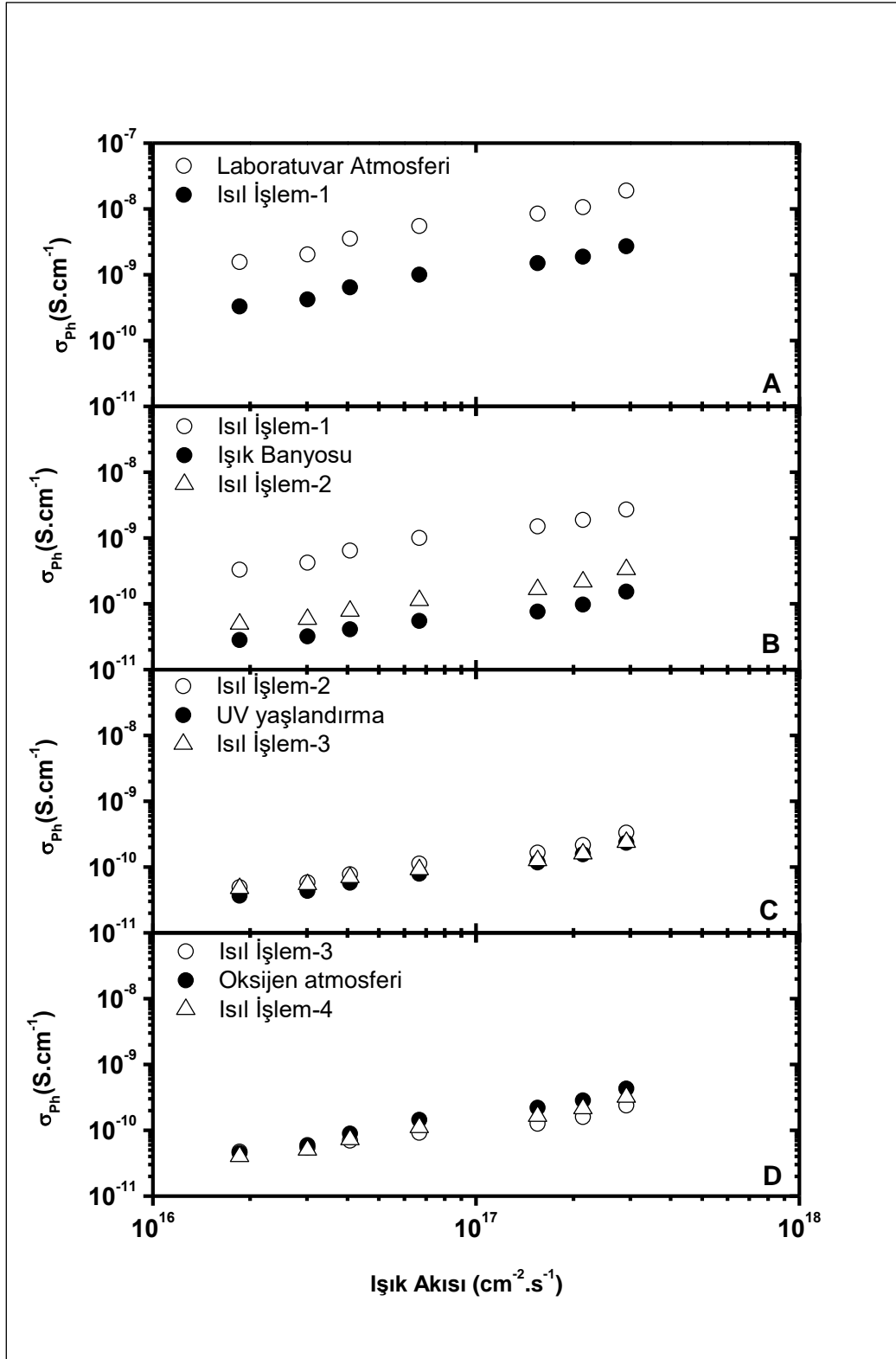


Şekil 4.40. Pürüzsüz mikroskop camı üzerine büyütülen MAPbI₃ ince filmin zamana bağlı iletkenlik grafiği

Şekil 4.40'da MAPbI₃ 6-1 kodlu MAPbI₃ malzemenin laboratuvar atmosferi, ışık banyosu, UV yaşlandırma, oksijen yaşlandırması altındaki zamana bağlı iletkenlik grafiği verilmiştir. Şekil 4.40 a'da malzemenin laboratuvar atmosferi altında zamana bağlı karanlık iletkenliği alınırken sistemin vakuma alınması ile gerçekleşen iletkenlik değişim gösterilmiştir. Şekil 4.40 a'da görüleceği gibi 13. dakikada vakum pompası çalıştırılmış ve malzemenin iletkenlik değeri belirgin bir şekilde azalarak 8,43E-9 değerinden 4,55E-9 değerine düşmüştür. Vakum atmosferinde karalı hale gelen malzeme yine vakum atmosferinde ısıtma işlemi uygulamasına tabii tutulmuştur. Vakum ortamı bozulmadan ısıtma işlemi uygulaması sonrası 300K'e ulaşan malzemenin zamana bağlı karanlık iletkenlik değeri alınmaya devam edilmiştir. Şekil 4.40 b'de görüleceği gibi vakum atmosferinde zamana bağlı karanlık iletkenlik ölçümleri alınırken 30. Dakikada ışık kaynağı açılmış ve malzeme 60 dakika boyunca ışık banyosuna maruz bırakılmıştır. 60 dakika sonrasında ışık kaynağı kapatılmış ve zamana bağlı iletkenlik alınmaya devam edilmiştir. Bu şekilde malzemenin ışık banyosu öncesi ve sonrası iletkenlik değerindeki değişim net olarak belirlenmiştir. Buna göre malzeme ışık banyosu öncesi 2,88E-9 değerinde iken 10,34 kat artarak 2,98E-8 iletkenlik değerine ulaşmıştır. Işık banyosu sonrası vakum ortamı bozulmadan malzemeye ikinci ısıtma işlemi uygulanmıştır. İkinci ısıtma işlemi uygulaması sonrası soğuyan ve 300K seviyesine gelen malzemenin vakum atmosferi bozulmadan zamana bağlı iletkenlik verileri alınmaya devam edilmiştir. Şekil 4.40 c'de görüleceği gibi malzemenin 30 dakika vakum altında iletkenlik değeri alındıktan sonra malzemeye UV ışık uygulaması yapılmıştır. 60 dakika boyunca vakum atmosferinde UV ışık uygulaması sonrası UV ışık kapatılmış ve iletkenlik değerleri kayıt altına alınmaya devam ederek UV ışığın malzeme üzerinde oluşturduğu değişim belirlenmiştir. Buna göre UV ışık uygulaması sonrası malzemenin iletkenlik değeri UV ışık uygulamasına göre 1,67 kat artmıştır. UV ışık uygulaması sonrası sistemin vakum ortamı bozulmadan üçüncü ısıtma işlemi uygulanmıştır. Üçüncü ısıtma işlemi sonrasında malzeme soğuyarak 300K'e ulaştığında malzemenin iletkenlik değerleri kayıt altına alınmaya devam edilmiş ve Şekil 4.40 d'de sunulmuştur. Şekil 4.40 d'de görüleceği üzere vakum ortamında 30 dakika kayıt alındıktan sonra sisteme yüksek saflıkta oksijen gazı gönderilmiş ve iletkenlik değerlerindeki değişim 60 dakika boyunca kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.40 d'de görüleceği üzere 90 dakikada sistem vakuma alınmış ve oksijen gazının malzemede oluşturduğu iletkenlik değişimi belirlenmiştir. Buna göre oksijen gazından kaynaklı

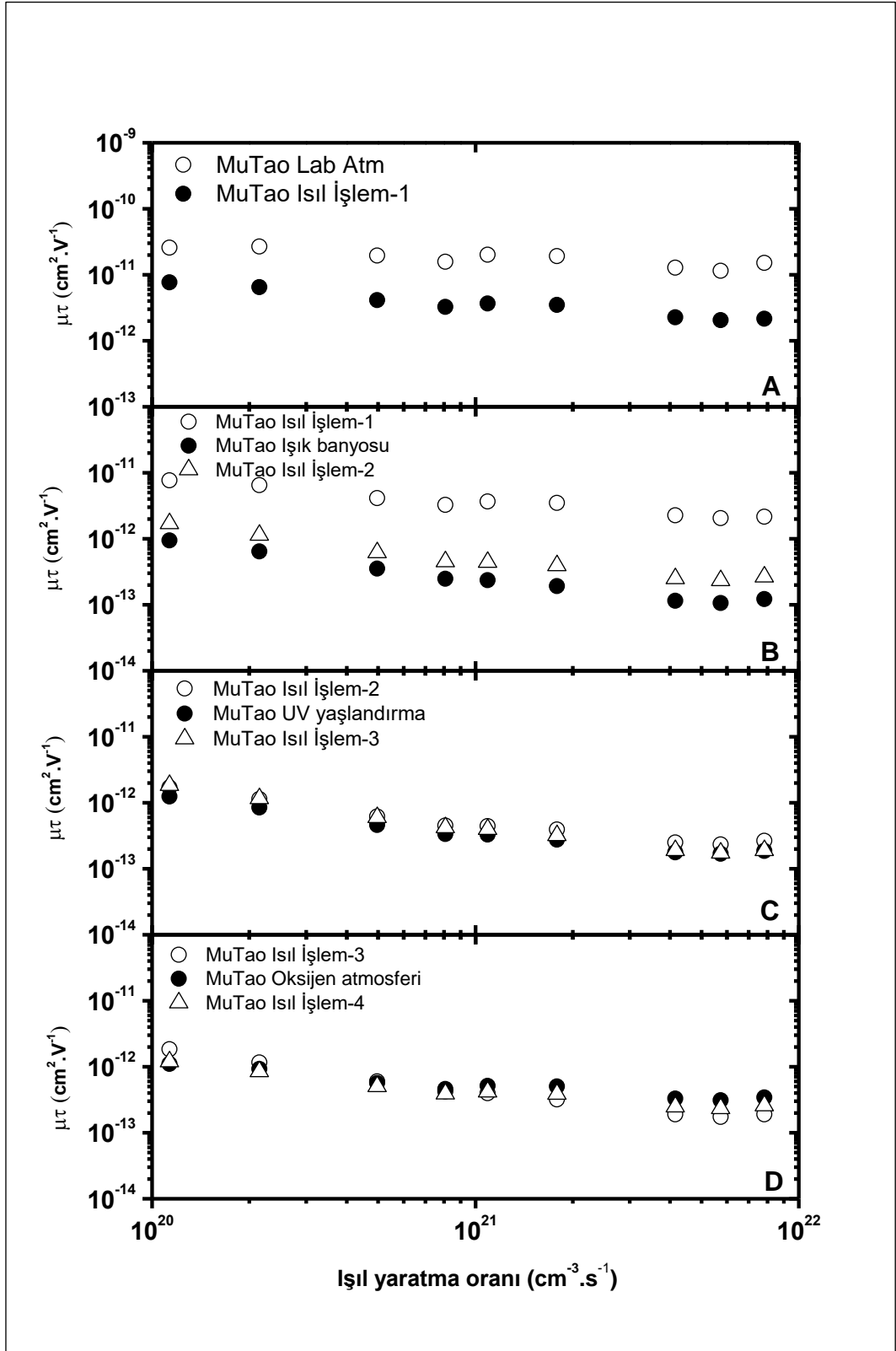
olarak malzemede oksijen uygulaması öncesindeki değere göre 1,27 katlık artış belirlenmiştir.

Bu ölçüm prosedürü sayesinde malzeme herhangi bir şekilde atmosferik koşullara maruz kalmadan ve sadece tek stres faktörü uygulanarak stres faktörünün malzemede oluşturduğu değişim net olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.41. Laboratuvar atmosferinde, Işık banyosunda, UV ışık altında ve Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış MAPbI₃ ince filmin ışık akısı grafiği

MAPbI₃ malzemesine uygulanan her stres faktörü sonrası malzemenin ışık akısına bağlı fotoiletkenlik değerleri kayıt altına alınarak malzemedeki elektronik değişimler hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.41'de her stres faktörü ve uygulaması sonrası ve referans olması için stres faktöründen önceki ısıtma işlemi ve stres faktöründen sonraki gerçekleştirilen ısıtma işlemi sonrası fotoiletkenlik değerleri gösterilmiştir. Buna göre Şekil 4.41 a'da laboratuvar atmosferindeki ve ısıtma işlemi-1 sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerleri görülmektedir. Buna göre ısıtma işlemi-1 uygulaması sonrası malzemenin fotoiletkenlik değerlerinde 5,35 kat azalma belirlenmiştir. Bu durum laboratuvar atmosferindeki atmosferik gazların yüzeyde oluşturdukları paralel direnç etkisinden kaynaklı olduğunu ifade etmektedir. Şekil 4.41 b'de ise ışık banyosu sonrası, ısıtma işlemi-2 sonrası fotoiletkenlik değerlerine ek olarak referans olması için ısıtma işlemi-1 sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerleri de sunulmuştur. Şekil 4.41 b'de görüleceği üzere ışık banyosu sonrası fotoiletkenlik değerlerinde ısıtma işlemi-1 seviyesine göre neredeyse bir mertebeye varan bir azalma görülmüştür. Işık banyosu sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerleri ısıtma işlemi-2 uygulaması ile kısmen artmıştır. Ancak ısıtma işlemi-1 seviyesine göre oldukça aşağıdadır. Bu durum ışık banyosunun malzeme üzerinde geri dönüşümsüz bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Şekil 4.41 c'de UV yaşlandırması, ısıtma işlemi-2 ve ısıtma işlemi-3 sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerlerinin örtüştüğü görülmektedir. Bu durum UV yaşlandırmasının malzeme üzerinde bir değişim oluşturmadığını ve ışık banyosu sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerlerinin değişmediğini göstermektedir. Benzer durum yüksek saflıkta oksijen uygulamasında da görülmektedir. Şekil 4.41 d'de oksijen gazı uygulaması, ısıtma işlemi-3 ve ısıtma işlemi-4 uygulaması sonrası fotoiletkenlik değerlerinin değişmediği net olarak belirlenmiştir. Bu durum oksijen gazının da malzeme üzerinde herhangi bir fotoiletkenlik değişimi oluşturmadığı şeklinde yorumlanabilir. Elde edilen bulgular gösteriyor ki malzemeye uygulanan stres faktörleri arasında en etkili olanı ışık banyosudur. Diğer stres faktörleri malzemeye uygulanmış olsa dahi ışık banyosu sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerlerini değiştirecek bir etki oluşturamamaktadır.



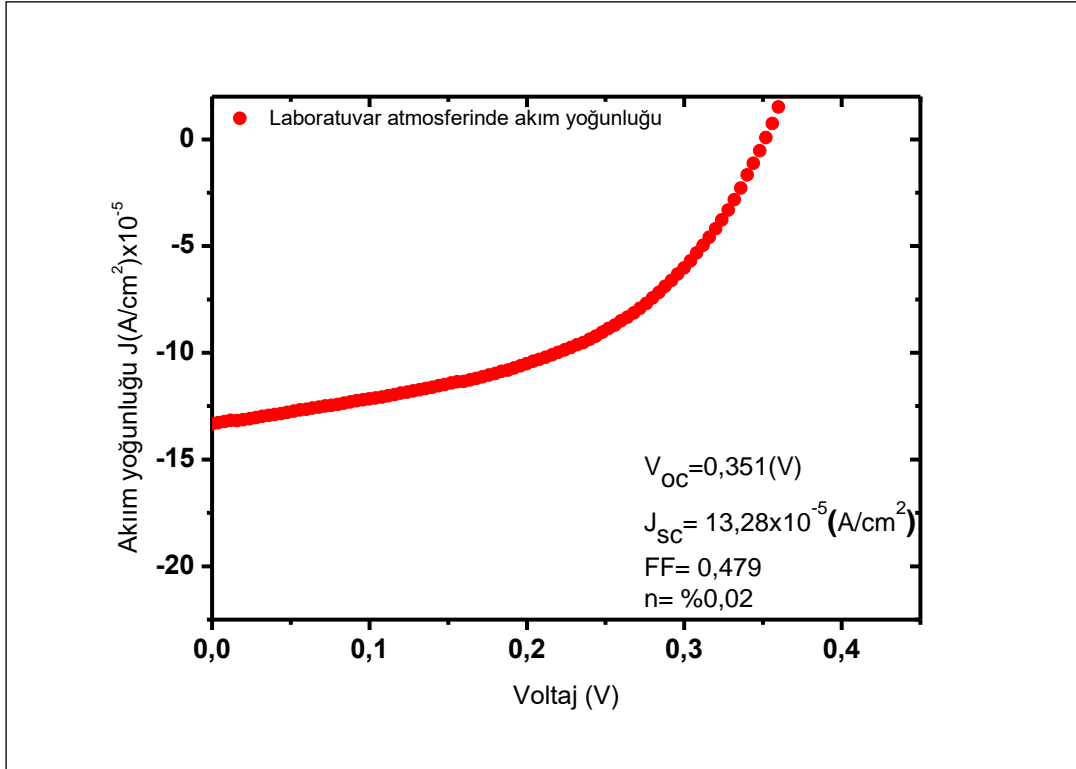
Şekil 4.42. Laboratuvar atmosferinde, Işık banyosunda, UV ışık altında ve Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış MAPbI₃ ince filmin mobilite yaşam süresi grafiği

Şekil 4.42’de MAPbI₃ 6-1 kodlu malzemenin laboratuvar atmosferinde, ışık banyosunda, UV ışık altında ve oksijen atmosferinde yaşlandırılmış malzemelerin mobilite yaşam süresi grafiği verilmiştir. MAPbI₃ 6-1 kodlu malzemeye ait $\mu\tau$ değerlerinin laboratuvar atmosferi ve ısıtma işlem-1 sonrasındaki değişimleri net olarak sunulmuştur. Malzemenin laboratuvar atmosferine ait $\mu\tau$ değerlerinin ısıtma işlem uygulaması ile eğimi aynı kalırken değerlerinde bir miktar azalış olduğu görülmektedir. Bu durum elektronik kusur durumlarında ısıtma işlem-1 ile kısmen bir artış olduğu şeklinde yorumlanabilir. MAPbI₃ 6-1 kodlu malzemeye ait $\mu\tau$ değerlerinin ışık banyosu, ısıtma işlem-2 ve referans oluşturması için ısıtma işlem-1 sonrasındaki değişimleri sunulmuştur. Malzemede ikinci ısıtma işlem uygulaması sonrası $\mu\tau$ değerlerinde artış belirlenmiştir. Malzemenin $\mu\tau$ değerlerinin UV yaşlandırma, ısıtma işlem-3 ve referans oluşturması için ısıtma işlem-2 sonrasındaki değişimlerine bakıldığında UV yaşlandırmadan kaynaklı herhangi bir değişim oluşmadığı gözlemlenmiştir. Malzemeye ait $\mu\tau$ değerlerinin oksijen yaşlandırma, ısıtma işlem-4 ve referans oluşturması için ısıtma işlem-3 sonrasındaki değişimleri sunulmuştur. Malzemenin $\mu\tau$ değerlerinin oksijen yaşlandırmadan kaynaklı herhangi bir değişim oluşmadığı gözlemlenmiştir.

Termal buharlaştırma yöntemi ile perovskit güneş hücresi üretimi yapılırken, Pota 1’e 0,1 g PbI₂, Pota 2’ye ise 0,3g MAI, Pota 3’e 0,1 g C₆₀ koyulmuştur. Sistem vakuma alınmıştır. Taban malzeme olarak TiO₂ kaplı FTO taban malzeme kullanılmıştır. Her potadaki malzemenin buharlaşma sıcaklığı farklı olduğundan ve eş buharlaştırma yapılması gerektiğinden dolayı sistem vakum değeri 2,85E-4’e geldiğinde pota 1’e 15 Amper, pota 2’ye 17 amper uygulanarak üretim süreci başlatılmıştır. Eş zamanlı buharlaştırma yapılabilmesi için farklı akım değerleri sırası ile arttırılarak uygulanmıştır. Pota 1 PbI₂ 28 ampere geldiğinde, pota 2 MAI 24 amper değerine ulaştığında her iki potadaki malzemeler eş zamanlı olarak buharlaştırılmıştır. Buharlaşma sonucunda FTO/TiO₂/MAPbI₃ ince film yapısı üretilmiştir. Daha sonrasında sistem 15 dakika daha vakumda bekletildikten sonra pota üçte bulunan C₆₀’ın buharlaştırmasına geçilmiştir. C₆₀’ın bulunduğu Pota 3’e 10 amper verilerek akım değeri yükseltilmeye yavaş yavaş başlatılmıştır. Akım değeri 40 amper değerine ulaştığında C₆₀ buharlaştırılmış ve FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀ ince film yapısı elde edilmiştir. Elde edilen son yapı üzerine metal kontak için maske uygulaması gerçekleştirilmiş ve gümüş elementi buharlaştırılarak

metal kontaklar oluşturulmuştur. Gümüş kontakların oluşturulması ile FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag formunda perovskit güneş hücresi üretilmiştir.

Perovskit güneş hücresinin laboratuvar atmosferinde, vakum atmosferinde, UV ışık altında, Oksijen atmosferinde, Oksijende yaşlandırılmış vakum atmosferinde ve Işık banyosunda aydınlık akım yoğunluğu grafikleri aşağıda verilmiştir.

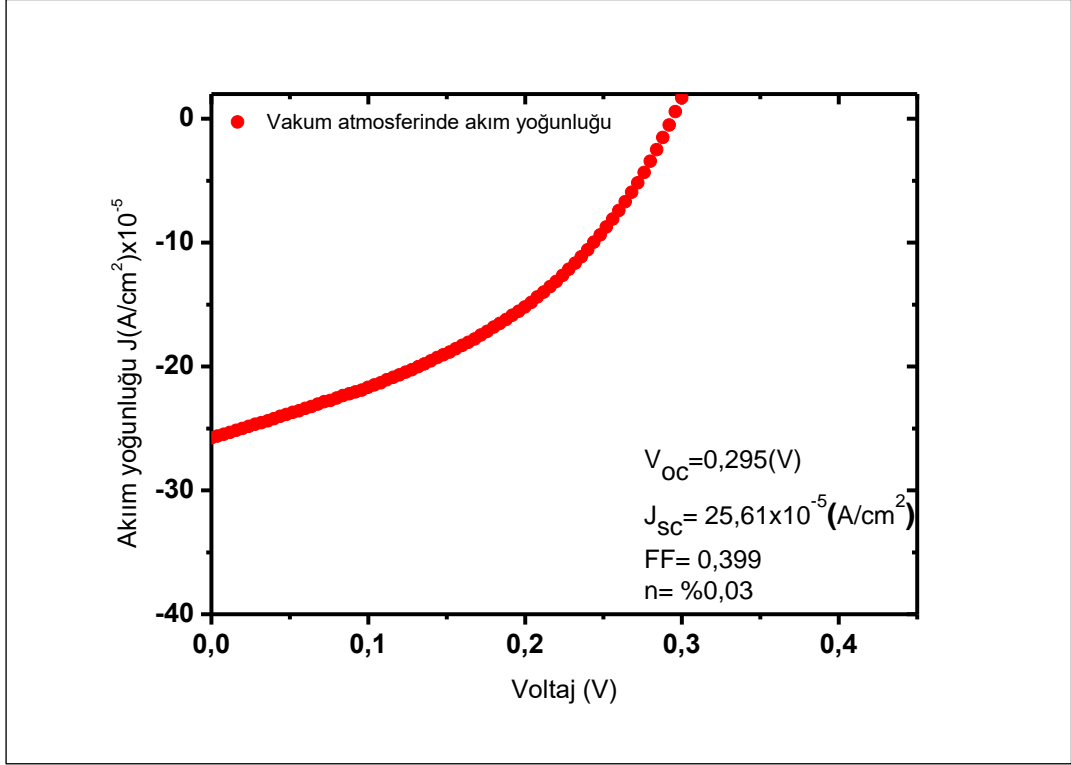


Şekil 4.43. Laboratuvar atmosferine maruz bırakılan perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği

Şekil 4.43’de Laboratuvar atmosferine maruz bırakılan perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği verilmiştir.

Şekil 4.43’de üretilmiş olan perovskit güneş hücresinin laboratuvar atmosferinde I-V grafiğinden elde edilen akım değerlerinin güneş hücresinin aktif alanına bölümü sonucu elde edilen J-V grafiği sunulmuştur. Şekil 4.43’de görüleceği gibi ışık altında alınan akım yoğunluğu değerlerinde kısa devre akım yoğunluğu $-147 \mu\text{A}$ seviyesinde başlamıştır. Açık devre gerilimi V_{oc} ise $0,35\text{V}$ değerindedir. Maksimum güç noktası belirlenerek

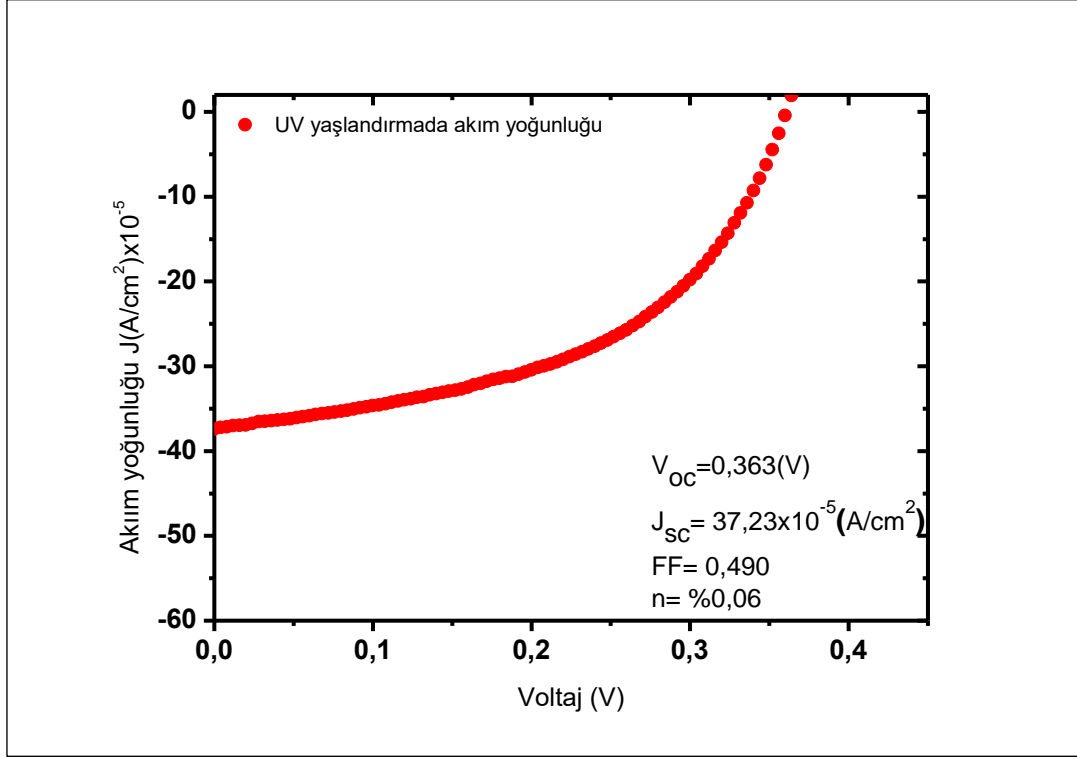
hesaplanan dolum faktörü değeri ise %48 seviyesindedir. Hücrenin hesaplanan verimlilik değeri ise %2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.44. Vakum atmosferine maruz bırakılan perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği

Şekil 4.44’de vakum atmosferine maruz bırakılan perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği verilmiştir. Perovskit güneş hücresi bu adımda vakuma alındıktan 30 dakika sonra ışık altında I-V ölçümü alınarak J-V değer hesaplanmıştır. Şekil 4.44’de görüleceği gibi kısa devre akım değerinden hesaplanan akım yoğunluğu ifadesi sistemin vakuma alınması ile laboratuvar atmosferinde elde edilen $-147 \mu A$ ’den $-283 \mu A$ seviyesine çıkmıştır. Açık devre gerilimi V_{oc} ise $0,29V$ seviyesindedir. Vakum atmosferine alınmasından sonra V_{oc} değerinin $0,35V$ ’dan $0,29V$ ’a düşmesi malzeme yüzeyine tutunan gaz moleküllerinin oluşturduğu shunt direncinin değişiminin bir göstergesidir. Sistemin vakuma alınmasından sonra hesaplanan dolum faktörü değeri ise %39’dur. Vakum atmosferinde elde edilen verilerle hesaplanan verimlilik değeri ise %3’dür. Bu durum sistemin vakuma etkisinin malzeme üzerinde akım değerini artırırken

gerilim değerinin azalmasına buna bağlı olarak verimliliğinin artarken maksimum güç noktasından kaynaklı olarak dolum faktörünün azaldığını göstermektedir.

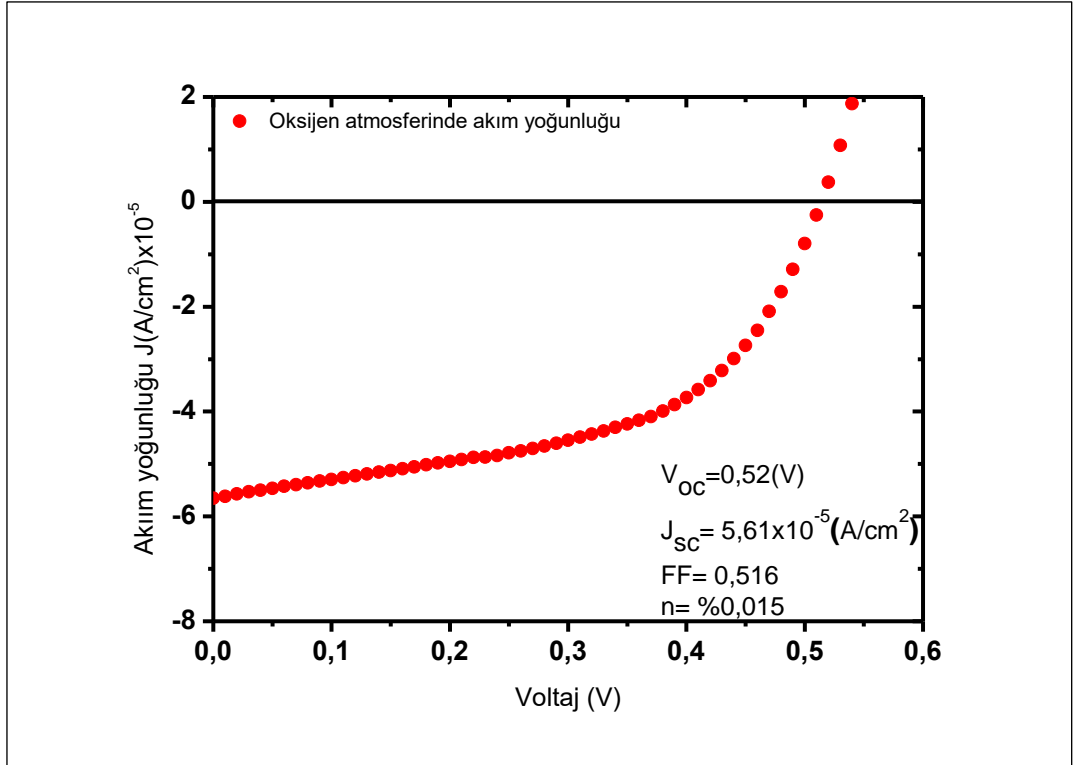


Şekil 4.45. UV ışık altında yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği

Perovskit güneş hücresinin vakum atmosferindeki ölçümlerinin tamamlanmasının ardından sistemin vakumu bozulmadan 30 dakika beklenmiştir. 30 dakika beklenmesinin sebebi malzemenin relaxation time olarak adlandırılan üzerinde oluşabilecek streslerden arındırılması ve kararlı hale ulaşmasını sağlamaktır. Akabinde sistemin vakum atmosferi bozulmadan (böylece diğer atmosferik gazlardan kaynaklı olabilecek etkiler elenerek) perovskit güneş hücresi 15 dakika UV ışığa maruz bırakılmıştır. UV ışığın perovskit güneş hücresi üzerinde oluşturduğu bozunma UV uygulaması sonlandırıldıktan sonra I-V grafiği ile incelenmiştir. Şekil 4.45’de UV ışık altında yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği verilmiştir. UV ışık yaşlandırmasından sonra kısa devre akım yoğunluğunun vakum atmosferindeki ölçümde elde edilen $-283 \mu\text{A}$ ’den $-410 \mu\text{A}$ seviyesine çıktığı görülmektedir. Açık devre gerilimi ise $0,29\text{V}$ ’dan $0,36 \text{V}$ değerine yükselmiştir. Şekil 4.45’den görüleceği gibi UV yaşlandırmasından kaynaklı olarak akım gerilim eğrisi daha köşesal bir şekil almaya başlamış ve bunun sonucunda

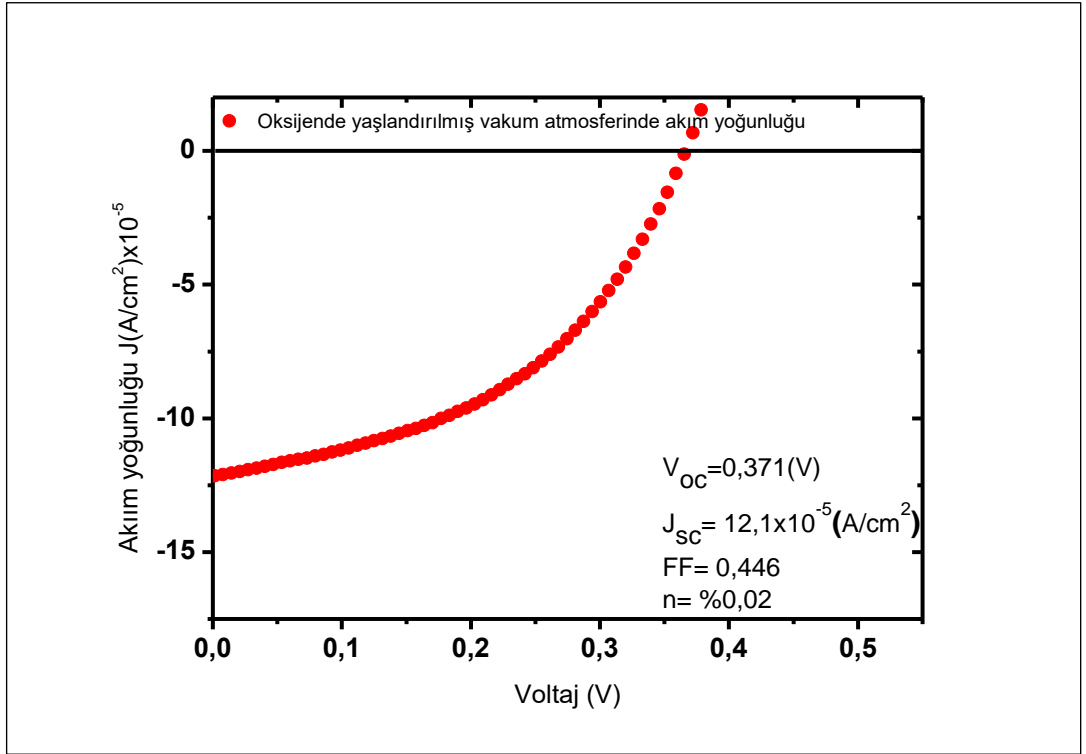
dolum faktörü değeri vakum atmosferindeki elde edilen %39'dan %49 seviyesine çıkarak %10 luk bir artış göstermiştir. Buna ek olarak hesaplanan verimlilik değeri vakum atmosferinde %3 iken UV yaşlandırma sonrasında %6'ya yükselmiştir. Bu durum vakum atmosferinde elde edilen verimlilik ifadesinin tam iki katıdır. Bu verilere bağlı olarak kısa süreli UV yaşlandırmanın malzeme üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu söylenebilir.

UV yaşlandırılmış durumdan sonra 30 dakika beklenecek malzemenin kararlı hale gelmesine olanak verilmiştir. Akabinde sistem laboratuvar atmosferine maruz bırakılmadan kriostat içersine yüksek saflıktaki oksijen gazı gönderilerek oksijen gazı yaşlandırılması gerçekleştirilmiştir. Oksijen gazı yaşlandırılmasında iki farklı ölçüm alınmıştır. Bunlardan ilki sistem içersine 15 dakika oksijen gazı gönderildikten sonra (oksijen gazı yaşlandırılması yapıldıktan sonra) kriostat içersinde oksijen gazı varken I-V ölçümü alınması. İkincisi ise oksijen gazı yaşlandırılması yapıldıktan sonra sistemin vakuma alınıp 30 dakika sonra I-V ölçümünün alınmasıdır.



Şekil 4.46. Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği

Şekil 4.46’da Oksijen gazı atmosferinde yaşlandırılmış ve oksijen gazı atmosferinde I-V grafiği alınmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği verilmiştir. Şekil 4.46’dan görüleceği gibi kısa devre akımdan elde edilen akım yoğunluğu ifadesi -60 μ A seviyesine gerilemiştir. Buna karşın açık devre gerilimi 0,52 V seviyesine yükselmiştir. Açık devre gerilimindeki artışın nedeni oksijen moleküllerinin yüzeye tutunarak oluşturdukları shunt direncinin değişimden kaynaklıdır. Dolum faktörü ifadesi ise %51 değerine yükseldiği görülmektedir. Her ne kadar dolum faktörü açık devre geriliminin artışından kaynaklı bir önceki yaşlandırılmış duruma göre artış göstermiş gibi görünse de kısa devre akımındaki büyük azalmadan kaynaklı olarak verimlilik değerinin %6’dan %1’e düşmesine sebep olmuştur.

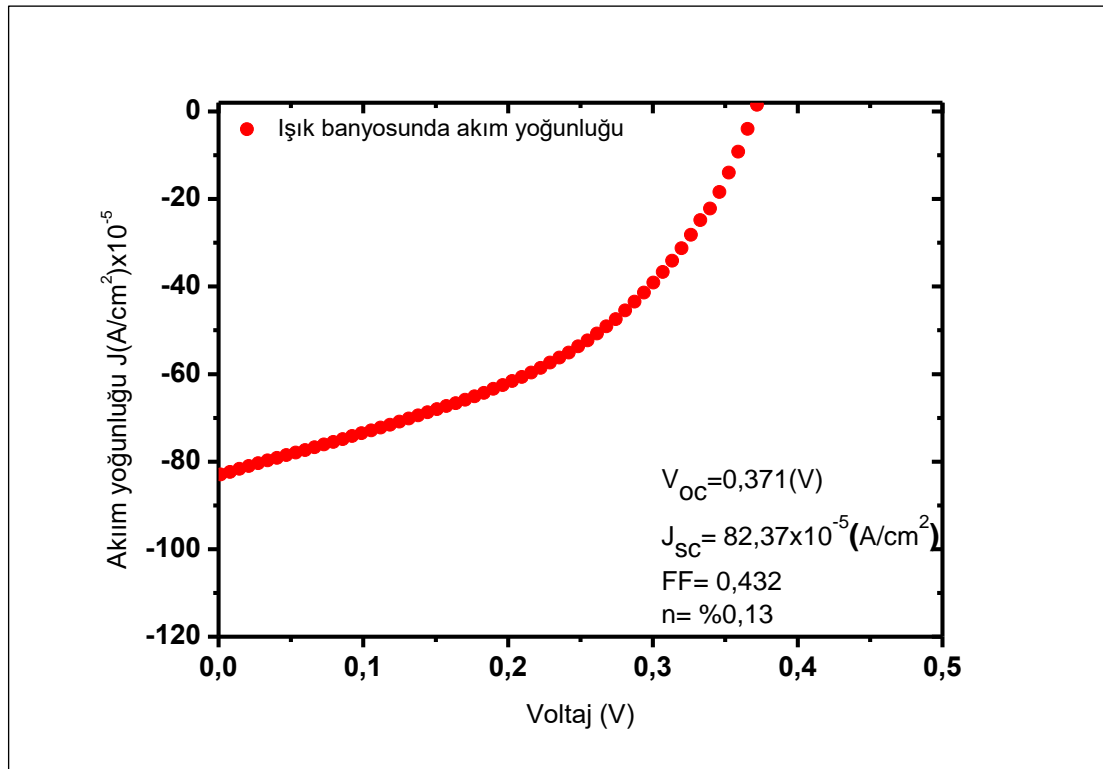


Şekil 4.47. Oksijende yaşlandırılmış vakum atmosferinde perovskit güneş hücresinin aydınlıkta akım yoğunluğu grafiği

Oksijen gazında yaşlandırılmış olan perovskit güneş hücresi vakuma alınarak 30 dakika beklendikten sonra yeniden I-V ölçümü yapılmış ve J-V grafiği çizdirilmiştir. Şekil 4.47’de Oksijen atmosferinde yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin vakum atmosferinde aydınlık akım yoğunluğu grafiği verilmiştir. Şekil 4.47’den görüleceği gibi kısa devre akımından elde edilmiş akım yoğunluğu ifadesi bir önceki duruma kıyasla

yaklaşık iki kat artarak $-133 \mu\text{A}$ seviyesindedir. Açık devre gerilimi ise $0,52\text{V}$ 'dan sistemin vakuma alınması ile $0,37 \text{ V}$ değerine gerilemiştir. Perovskit güneş hücresinin oksijen yaşlandırmasından sonra sistemin vakuma alınması ile akım yoğunluğunda artış olsa da açık devre gerilimindeki düşüşten kaynaklı olarak dolun faktörü bir öndeki durumda göre %51'den %44'e gerilemiştir. Oksijen yaşlandırması sonrası vakum atmosferinde elde edilen verimlilik değeri ise %2 olarak kaydedilmiştir.

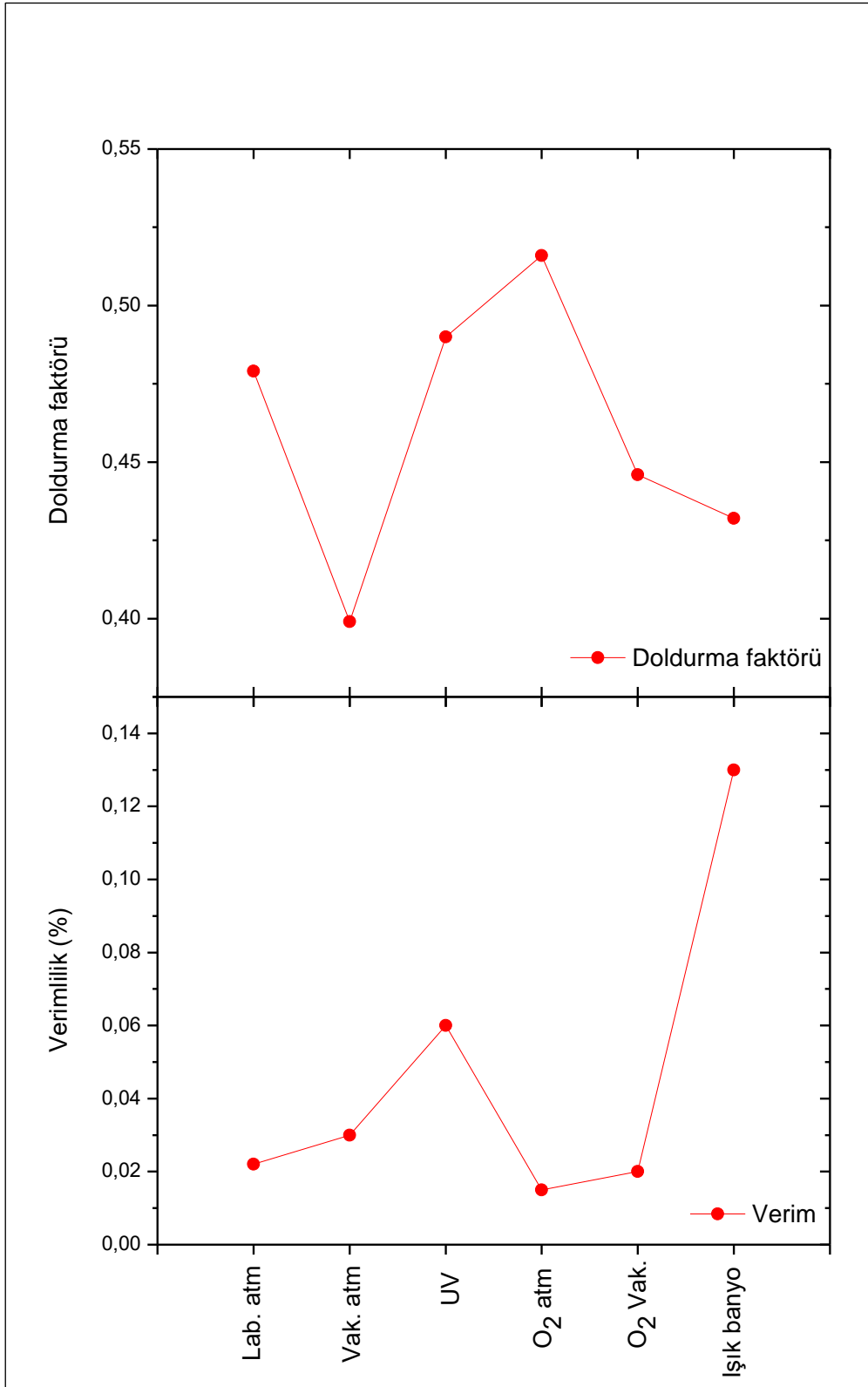
Sistem vakum atmosferinde 30 dakika bekletildikten sonra 15 dakika boyunca ışık banyosuna maruz bırakılmıştır. Işık banyosu sonrası vakum atmosferinde I-V ölçümü alınarak J-V grafiği çizdirilmiş ve Şekil 4.48'de sunulmuştur.



Şekil 4.48. Işık banyosunda yaşlandırılmış perovskit güneş hücresinin aydınlık akım yoğunluğu grafiği

Işık banyosu sonrası perovskit güneş hücresinin kısa devre akımından hesaplanan akım yoğunluğu ifadesi $-912 \mu\text{A}$ seviyesine yükselmiştir. Bu durum ışık banyosundan kaynaklı olarak oksijen gazında yaşlandırma sonrası vakum atmosferinde elde edilen akım yoğunluğu ifadesine göre tam 7 katlık bir artış olduğunu göstermektedir. Bununla

beraber açık devre gerilimi 0,37 V olarak belirlenmiştir. Açık devre geriliminde bir önceki duruma göre artış ya da azalma yoktur. Elde edilen parametrelerden dolun faktörü değeri ise %43'dür. Ancak ışık banyosundan kaynaklı olarak kısa devre akımındaki artış kendisini verimlilik ifadesinde de göstermektedir. Hesaplanan verimlilik değeri %13 olarak belirlenmiştir. Bu değer aynı hücre için elde edilen en yüksek verim olarak kaydedilmiştir. Bu durum kısa süreli ışık banyosunun perovskit güneş hücresi üzerinde ısıya sebep olması ve bu ısıdan kaynaklı olarak perovskit tabakasındaki kristallenmenin artışına bağlı olarak malzemenin verimliliğine katkı sağlaması olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.49. Perovskit güneş hücresinin doldurma faktörü ve verimlilik özet grafiği

Şekil 4.49'da üretilen perovskit güneş hücresinin stres faktörlerine bağlı olarak dolum faktörleri ve verimlilik değerleri özet grafiği sunulmuştur. Laboratuvar atmosferinden sonra vakum atmosferine geçişle dolum faktöründe azalma gözlemlenirken verimlilik değerinde kısmi bir artış belirlenmiştir. Dolum faktöründeki azalmanın nedeni maksimum güç noktasının belirlendiği parametrelerdeki gerilim değerindeki düşüşten kaynaklanmaktadır. Yine Şekil 4.49'da perovskit güneş hücresinin UV yaşlandırma sonrası elde edilen değerler incelenecek olunursa dolum faktörünün laboratuvar atmosferindeki değere geri geldiği hatta bir miktar artış gösterdiği görülmektedir. Bununla beraber UV yaşlandırmadan sonra verimlilik değerlerinde kayda değer bir artışta net olarak görülmektedir. Bu artışların nedeni incelenecek olunursa hücrenin maksimum güç değerinde açık devre geriliminin laboratuvar atmosferindeki değerle aynı olmasına karşın maksimum akım değerinin yaklaşık 3 kat artışından kaynaklı olduğu söylenebilir. Oksijen atmosferinin ise perovskit güneş hücrelerinin verimliliklerinde belirgin azalmaya neden olduğu net olarak görülmektedir. Ancak oksijen gazından kaynaklı olarak verimlilik değerlerindeki azalma perovskit güneş hücresinin ışık banyosuna maruz bırakılması ile tamamen geri dönüşümlü hatta malzemenin verimlilik değerlerini iyileştirici bir etki oluşturduğu net olarak Şekil 4.49'da görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında FTO/TiO₂/MAPbI₃/C₆₀/Ag konfigürasyonunda perovskit güneş hücresi üretilmiş ve bozunma mekanizmaları farklı atmosferik koşullarda incelenmiştir. Buna ek olarak bozunma mekanizmalarında hangi tabakanın hangi stres faktöründen etkilendiğine dair bilgi edinilebilmesi için perovskit güneş hücrelerinde en çok kullanılan TiO₂, MAPbI₃ tabakaları bağımsız olarak üretilerek güneş hücrelerine uygulanan stres koşulları uygulanmıştır.

Tez kapsamında ETL tabakası olarak TiO₂ kullanılmıştır. Ancak literatürde de tanımlı olduğu üzere TiO₂ tabakası üretimden sonra uygulanan ikinci ısıl işlem ile yapısal olarak değişimler olduğu bilinmektedir. Bu nedenle üretilen TiO₂ tabakaları 300 °C, 500 °C ve 700 °C derecelerde ısıl işleme tabi tutulduktan sonra yaşlandırma işlemlerine ve elektriksel karakterizasyonlarına geçilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında laboratuvar atmosferinden vakum atmosferine geçiş sırasında TiO₂ malzemelerin hiçbirinde iletkenlik anlamında bir değişim gözlemlenmemiştir. Malzemelerin uzun süre ışık banyosunda maruz bırakılmalarında ise 700 derecede ikincil ısıl işleme maruz bırakılan TiO₂'de hiçbir değişim olmazken 500 ve 300 derece de ışık banyosuna maruz kalan malzemelerde karanlık iletkenlik değerlerinde artış belirlenmiştir. UV yaşlandırması sonrası ise bütün TiO₂ malzemelerin karanlık iletkenlik seviyelerinde 2 ile 3 katlık artış belirlenmiştir. Oksijen yaşlandırmasında ise karanlık iletkenlik değerlerinde bir değişim olmadığı belirlenmiştir. TiO₂ malzemelerin fotoiletkenlik ölçümleri incelendiğinde ise ışık banyosu sonrası bütün TiO₂ malzemelerin fotoiletkenliklerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Ancak bu artış ısıl işlem sonrasında TiO₂-1'de tamamen geri dönüşümlü olurken diğer malzemelerde geri dönüşümsüz olarak belirlenmiştir. UV yaşlandırmada ise TiO₂-1 tamamen geri dönüşümlü bir etki gösterirken TiO₂-2 ve 3 tamamen geri dönüşümsüz artış etkisi gösterdiği belirlenmiştir. Oksijen uygulamasında ise bütün TiO₂ tabakalarının fotoiletkenlik değerlerinde belirgin ve geri dönüşümsüz bir artış belirlenmiştir. Genel olarak TiO₂ tabakasındaki bozunmalar özetlenecek olursa laboratuvar atmosferinden etkilenmediği, ışık banyosu ve UV yaşlandırmadan kaynaklı fotoiletkenlik değerlerinde artış olduğu söylenebilir.

MAPbI₃ ince film malzemeler üzerindeki kararsızlık mekanizmaları anlaşılabilmesi için tek atmosfer koşulunda farklı stres faktörlerine maruz bırakılarak karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Stres faktörleri uygulamaları arasında sistemin vakum ortamında tutulmasının iki önemli nedeni vardır. Bunlardan ilki her stres faktörünün tek başına etkisinin anlaşılmasına yardımcı olması, ikincisi ise hücre üretimi sonrasında MAPbI₃ tabakası diğer tabakalar arasında kalacağından dolayı bir nevi vakum atmosferinde gibi davranacak olmasıdır. MAPbI₃ ince filmi üzerine uygulanan stres faktörlerinden sonraki karanlık altında oluşan elektriksel değişimlere bakılacak olunursa, karanlık iletkenlik değeri sistemin vakuma alınması ile azaldığı net olarak görülmektedir. Bu azalmanın temel nedeni yüzeye tutunan gaz molekülleridir. Buna ek olarak ışık banyosu sonrası yine karanlık iletkenlik değerinde azalma belirlenmiştir. Bu azalma ısı işlem uygulanması ile kısmi olarak ortadan kalksa da ana hatları ile ışık banyosunun malzeme üzerinde oluşturduğu elektronik etki verileri ve grafiklerle net olarak görülmektedir. Bununla beraber ışık banyosu sonrası uygulanan UV yaşlandırma ya da yüksek saflıktaki oksijen gazı uygulaması MAPbI₃ ince filmin karanlık iletkenlik değerlerinde bir değişim oluşturmamıştır. Benzer şekilde MAPbI₃ ince filmi üzerine uygulanan stres faktörlerinden sonraki kalibre ışık altında oluşan elektriksel değişimlere bakılacak olunursa, fotoiletkenlik değeri karanlık iletkenlikle benzer şekilde ısı işlem uygulanması ile azalmıştır. Işık banyosu uygulaması sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerleri ise 1 mertebeye varan ve malzemedeki en büyük değişimi oluşturan bir etki göstermiştir. Karanlık iletkenlik değerleri ile benzer şekilde UV ve yüksek saflıktaki oksijen uygulaması ile MAPbI₃ ince filmin fotoiletkenlik değerlerinde değişim gözlenmemiştir. Elde edilen bulgular gösteriyor ki malzemeye uygulanan stres faktörleri arasında en etkili olanı ışık banyosudur. Diğer stres faktörleri malzemeye uygulanmış olsa dahi ışık banyosu sonrası elde edilen fotoiletkenlik değerlerini değiştirecek bir etki oluşturamamaktadır.

Literatürdeki bütün bilgiler laboratuvar atmosferinde farklı stres faktörleri aynı anda uygulanarak sunulduğundan literatürdeki bu bilgileri karşılaştırmak mümkün değildir. Perovskit güneş hücresinin verimlilik değerlerinden elde edilen bulgular ışığında üretim sonrasında laboratuvar atmosferinde verimlilik değeri %2 iken sistemin vakuma alınması ile verimlilik değerinin %3'e çıktığı görülmektedir. Bu durum perovskit güneş hücresinin

açık yüzeylerine laboratuvar atmosferinde tutunmuş olan moleküllerin vakum etkisi ile yüzeyden uzaklaşmasına ve buna bağlı olarak tutunmuş moleküllerin oluşturmuş olabileceği potansiyel farkın ortadan kalkmasına sebep olmuş ve sonuç olarak perovskit hücrelerinin gerçek verimlilik değerlerine ulaşılmasına yardımcı olunmuş olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Diğer bir stres faktörü UV yaşlandırmadır. Tabakalı yapılarda MAPbI₃ ince film yapısında UV'den kaynaklı bir değişim net olarak gözlenmezken TiO₂ ince film yapısında UV kaynaklı olarak iletkenlik değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde perovskit güneş hücrelerinin UV yaşlandırmaya tabii tutulması sonrası verimlilik değeri vakum atmosferindeki değere kıyasla 2 kat artarak %6 seviyesine ulaşmıştır. ***Bu durum UV yaşlandırmanın perovskit güneş hücrelerinin içerisinde bulunan TiO₂ tabakasını iyileştirdiği şeklinde yorumlanabilir.*** Diğer bir stres faktörü ise oksijen gazıdır. Oksijen gazı MAPbI₃ ince film tabakasında ya da TiO₂ ince film tabakalarına maruz bırakıldıklarında belirgin bir değişim oluşmamıştır. Ancak Perovskit güneş hücrelerinde ise oksijen uygulaması güneş hücrelerinin verimlilik değerlerini belirgin olarak azaltmıştır. Öyle ki oksijen uygulaması sonrası elde edilen verimlilik değerleri laboratuvar atmosferindeki elde edilen verimlilik değerlerinin bile altına inilmesine neden olmuştur. Bu durum ilk olarak kontakların oksitlenmesi şeklinde değerlendirilmiş olsa bile ışık banyosu uygulamasından sonra verimlilik değerlerinde artış oluşunun gözlemlenmesinden sonra bu ihtimalin mümkün olmadığı değerlendirilmiştir. Oksijen gazından kaynaklı verimlilik değerlerindeki azalmanın ışık banyosundan sonra ortadan kalkması oksijen gazının güneş hücresi üzerinde tamamen geri dönüşümlü bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak oksijen gazı yine perovskit güneş hücrelerinin kontaklarının dışındaki açık bölgelerine fiziksel olarak tutunmuş ve vakum etkisi ile ortadan kalktığı şeklinde yorumlanmıştır. ***Yani oksijen gazı yüzey yük yoğunluğunu değiştirmekte ancak bu etki vakum ile ortadan kalkmaktadır.*** Son stres faktörü ise ışık banyosudur. Işık banyosu MAPbI₃ ince film malzemesi üzerinde iletkenlik değerlerini azaltıcı bir etki oluşturmuştur. TiO₂ ince film yapısında ise ışık banyosundan kaynaklı kayda değer bir değişim belirlenmemiştir. ***Perovskit güneş hücrelerinin uzun süreli ışık banyosuna maruz kalmaları güneş hücrelerini belirgin olarak bozarken kısa süreli ışık banyosunun verimlilik değerlerini artırıcı bir etki oluşturduğu belirlenmiştir.*** Bu durum iki ana nedenle olmuş olabilir. İlk neden ışık banyosunun uygulanması ile perovskit güneş hücresi içerisinde bulunan MAPbI₃

tabakasının ısı etkisi ile kristal hacim oranında artışa ve buna bağlı olarak elde edilen akım değerlerinde de artışa neden olmuş olabilir. Ancak uzun süre ışık banyosuna maruz kalındığında MAPbI₃ ince filmlerde görüldüğü gibi güneş hücresinin bozulmasına neden olmaktadır. Diğer bir neden ise kısa süreli ışık banyosu uygulaması ile yine güneş hücresinde ısıya neden olması ve bu ısıya bağlı olarak ara yüzeylerdeki yapının oturarak ara yüzeylerde oluşmuş olabilecek elektronik kusur durumlarının azalmasına buna bağlı olarak da hücre içerisindeki akımda artışa neden olmuş olabileceği fikridir. Her iki durumda da akım yoğunluğundaki artışın bu iki ihtimalin tek tek ya da her ikisinin de aynı anda gerçekleşme olasılığını güçlendirmektedir.

Sonuç olarak tez çalışmasında elde edilen bulgular gösteriyor ki, literatürde tanımlı stres faktörleri kesinlikle tek başına uygulanması gerekmektedir. Tabakalarda stres faktörlerine bağlı olarak elde edilen bulgular hücre içerisinde de genellikle benzer etkileri oluşturmaktadır. Literatürde tanımlanmış olan UV yaşlandırması MAPbI₃ tabakasında kayda değer bir değişim oluşturmazken TiO₂ tabakasında iletkenliğin artmasına buna bağlı olarak hücre uygulamasında verimliliğin TiO₂ tabakasından kaynaklı olarak artışına neden olmaktadır. UV uygulaması güneş hücresini bozmamakta tam aksine güneş hücresinin TiO₂ tabakasını ve ara yüzeylerini olumlu etkileyerek verimlilik artışına neden olmaktadır. Bu tez çalışmasından sonra üretilen perovskit güneş hücrelerinin belirli bir süre bilinçli olarak UV'ye maruz bırakılması güneş hücresi üretim prosedürünün bir parçası olabilir. Oksijen gazı yaşlandırmasının yüzey yük yoğunluğuna neden olduğu ve oksijenin literatürde tanımlandığı gibi hücre üzerinde yıkıcı bir etkiye neden olmadığı gözlemlenmiştir. Literatürde oksijen gazından kaynaklı olarak tanımlanan bozunmaların aslında aynı anda atmosferik gazlar (su buharı) etkisi ile birleşerek bir etki oluşturduğu düşünülmektedir. Öyle ki oksijen gazının uygulandığı ortamın vakuma alınması ile oksijen gazının yüzeyde oluşturduğu etki azalmaya başlamakta ve hücrenin verimlilik değerlerinde artış olmaya başlamaktadır. Bu nedenle perovskit güneş hücresi üretiminden sonra gerçekleştirilecek enkapsülasyon açık yüzeylere atmosferik gazların tutunması ve malzemede yüzey yük yoğunluğu oluşturmasını engellemek açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

Aktuna, M. S. (2016). *Yarıiletken polimerlerden hazırlanan ince filmlerin elektriksel ve spektroskopik özelliklerinin incelenmesi ve organik güneş hücreleri* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Anonim, (2022a). Erişim adresi: (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>)

Anonim, (2022b). Erişim adresi: <http://fizikkaralamalari.blogspot.com/2012/04/kat-acya-dair.html>

Arslan, Y. (2015). *Nano Material Doped Organic Solar Cell Production And Characterization*. [Yüksek Lisans Tezi, Fatih Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Asghar, M. I., Zhang, J., Wang, H. ve Lund, P. D. (2017). Device stability of perovskite solar cells—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 131-146. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.003>

Ayas, D. H. (2017). *Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Hazırlanan (Cu-Ag) İnce Filmlerinin Fiziksel özelliklerinin İncelenmesi Ve K β /K α X-Işını Şiddet Oranlarının Ölçülmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

Badawy, W. A., Elmeniaawy, S. A. ve Hafez, A. N. (2013). Improvement of the power of industrially fabricated solar cells by etching of the Si surface and the use of surface analytical techniques. *Egypt J Anal Chem*, 22, 97-113.

Badawy, W. A. (2015). A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots. *Journal of advanced research*, 6(2), 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.10.001>

Bunshah, R. F. (1994). *Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, technology, and applications*. William Andrew.

Capozzi, V., Casamassima, G., Lorusso, G. F., Minafra, A., Piccolo, R., Trovato, T. ve Valentini, A. (1996). Optical spectra and photoluminescence of C60 thin films. *Solid State Communications*, 98(9), 853–858. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(96\)00060-9](https://doi.org/10.1016/0038-1098(96)00060-9)

Chen, R., Su, X., Wang, J., Gao, D., Pan, Y., Wang, Y. ve Wang, L. (2021). The roles of surface defects in MAPbBr₃ and multi-structures in MAPbI₃. *Optical Materials*, 122 (2021) 111600. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111600>

Christians, J. A., Manser, J. S. ve Kamat, P. V. (2015). Best practices in perovskite solar cell efficiency measurements. Avoiding the error of Making Bad Cells Look Good. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(5), 852–857. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b00289>

Chuang, S. Y., Chen, H. L., Lee, W. H., Huang, Y. C., Su, W. F., Jen, W. M. ve Chen, C. W. (2009). Regioregularity effects in the chain orientation and optical anisotropy of composite polymer/fullerene films for high-efficiency, large-area organic solarcells. *Journal of Materials Chemistry*, 19(31), 5554-5560. <https://doi.org/10.1039/B904870G>

Clark, J., Silva, C., Friend, R. H. ve Spano, F. C. (2007). Role of intermolecular coupling in the photophysics of disordered organic semiconductors: Aggregate emission in regioregular polythiophene. *Physical Review Letters*, 98(20), 1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.206406>

Colinge, J.-P. ve Colinge, C.A. (2005). *Physics of semiconductor devices* (1st ed). Springer.

Dudenko, D., Kiersnowski, A., Shu, J., Pisula, W., Sebastiani, D., Spiess, H. W. ve Hansen, M. R. (2012). A strategy for revealing the packing in semicrystalline π -conjugated polymers: Crystal structure of bulk poly-3-hexyl-thiophene (P3HT). *Angewandte Chemie - International Edition*, 51(44), 11068-11072. <https://doi.org/10.1002/anie.201205075>

Eklund, P. C., Rao, A. M., Wang, Y., Zhou, P., Wang, K. A., Holden, J. M., Dresselhaus, M. S. ve Dresselhaus, G. (1995). Optical properties of C60- and C70-based solid films. *Thin Solid Films*, 257(2), 211-232. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(94\)05706-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(94)05706-0)

Etgar, L., Gao, P., Xue, Z., Peng, Q., Chandiran, A. K., Liu, B., Nazeeruddin, M. K. ve Grätzel, M. (2012). Mesoscopic CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ heterojunction solar cells. *Journal of the American Chemical Society*, 134(42), 17396-17399. <https://doi.org/10.1021/ja307789s>

Faiman, D., Goren, S., Katz, E. A., Koltun, M., Melnik, N., Shames, A. ve Shtutina, S. (1997). Structure and optical properties of C60 thin films. *Thin Solid Films*, 295(1-2), 283-286. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09043-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09043-8)

Gao, D., Yang, L., Ma, X., Shang, X., Wang, C., Li, M., Zhuang, X., Zhang, B., Song, H., Chen, J. ve Chen, C. (2022). Passivating buried interface with multifunctional novel ionic liquid containing simultaneously fluorinated anion and cation yielding stable perovskite solar cells over 23% efficiency. *Journal of Energy Chemistry*, 69, 659-666. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.02.016>

Green, M. A., Ho-Baillie, A. ve Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8(7), 506-514. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.134>

Grill, A. (1993). *Cold Plasma in materials fabrication*, IEEE Pres.

Huang, Y., Liu, L., Zhao, W. ve Chen, Y. (2017). Preparation and characterization of molybdenum disulfide films obtained by one-step atomic layer deposition method. *Thin Solid Films*, 624, 101-105. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.01.015>

- Im, J. H., Lee, C. R., Lee, J. W., Park, S. W. ve Park, N. G. (2011). 6.5% Efficient Perovskite Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell. *Nanoscale*, 3(10), 4088–4093. <https://doi.org/10.1039/c1nr10867k>
- Jalali, E., Maghsoudi, S. ve Noroozian, E. (2020). A novel method for biosynthesis of different polymorphs of TiO₂ nanoparticles as a protector for *Bacillus thuringiensis* from Ultra Violet. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57407-6>
- Johnson, R. L. (2005). *Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers*. [Yüksek Lisans Tezi, Iowa State University]. Electrical Engineering, Ames, Iowa. <https://doi.org/10.2172/850081>
- Jung, H. S. ve Park, N. G. (2015). Perovskite solar cells: From materials to devices. *Small*, 11(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/sml.201402767>
- Kayunkid, N., Uttiya, S. ve Brinkmann, M. (2010). Structural model of regioregular poly (3-hexylthiophene) obtained by electron diffraction analysis. *Macromolecules*, 43(11), 4961-4967. <https://doi.org/10.1021/ma100551m>
- Kim, H. S., Lee, C. R., Im, J. H., Lee, K. B., Moehl, T., Marchioro, A., Moon, S. J., Humphry-Baker, R., Yum, J. H., Moser, J. E., Grätzel, M. ve Park, N. G. (2012). Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Scientific Reports*, 2, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep00591>
- Kojima, N., Sugiura, Y. ve Yamaguchi, M. (2006). Optical properties of C60/aC superlattice structures for solar cell applications. *Solar energy materials and solar cells*, 90(18-19), 3394-3398. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.01.003>
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y. ve Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Krüger, J., Plass, R., Cevey, L., Piccirelli, M., Grätzel, M. ve Bach, U. (2001). High efficiency solid-state photovoltaic device due to inhibition of interface charge recombination. *Applied Physics Letters*, 79(13), 2085–2087. <https://doi.org/10.1063/1.1406148>
- Leijtens, T., Eperon, G. E., Pathak, S., Abate, A., Lee, M. M. ve Snaith, H. J. (2013). Overcoming ultraviolet light instability of sensitized TiO₂ with meso-superstructured organometal tri-halide perovskite solar cells. *Nature Communications*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms3885>
- Li, X. ve Zhu, H. (2015). Two-dimensional MoS₂: Properties, preparation, and applications. *Journal of Materiomics*, 1(1), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2015.03.003>
- Liu, J., Wu, Y., Qin, C., Yang, X., Yasuda, T., Islam, A., Zhang, K., Peng, W., Chen, W. ve Han, L. (2014). A dopant-free hole-transporting material for efficient and stable

perovskite solar cells. *Energy and Environmental Science*, 7(9), 2963–2967. <https://doi.org/10.1039/c4ee01589d>

Liu, M., Johnston, M. B. ve Snaith, H. J. (2013). Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 501(7467), 395–398. <https://doi.org/10.1038/nature12509>

Liu, Q., Ma, Z., Li, Y., Yan, G., Huang, D., Hou, S., Zhou, W., Wang, X., Ren, J., Xiang, Y., Ding, R., Yue, X., Du, Z., Zhanga, M., Zhang, W., Duane, L., Huang, Y. ve Mai, Y. (2022). Heterogeneous Lead Iodide Obtains Perovskite Solar Cells with Efficiency of 24.27%. *Chemical Engineering Journal*, 137676. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137676>

Mei, A., Li, X., Liu, L., Ku, Z., Liu, T., Rong, Y., Xu, M., Hu, M., Chen, J., Yang, Y., Grätzel, M. ve Han, H. (2014). A hole-conductor-free, fully printable 373 mesoscopic perovskite solar cell with high stability. *Science (New York, 374 NY)*, 345(6194), 295-8. <https://doi.org/10.1126/science.1254763>

Ortiz-López, J. ve Gómez-Aguilar, R. (2003). Dielectric permittivity and AC conductivity in polycrystalline and amorphous C60. *Revista Mexicana de Física*, 49(6), 529–536.

Özel, H. İ. (2017). *Karbon Nanotüp katkılı organik güneş hücresi yapımı ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Özgöçmen, A. (2007). *Güneş panelleri kullanarak elektrik üretimi*. [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Pehlivan, E., Koc, K., Tepehan, F. Z. ve Tepehan, G. G. (2016). Structural, optical and electrochromic properties of tantalum pentoxide-doped niobium pentoxide thin films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 77(1), 172-178. <https://doi.org/10.1007/s10971-015-3841-y>

Ren, S. L., Wang, Y., Rao, A. M., McRae, E., Holden, J. M., Hager, T., Wang, K. A., Lee, W. T., Ni, H. F., Selegue, J. ve Eklund, P. C. (1991). Ellipsometric determination of the optical constants of C60 (Buckminsterfullerene) films. *Applied Physics Letters*, 59(21), 2678–2680. <https://doi.org/10.1063/1.105907>

Rhee, J. H., Ha, B. ve Sharma, S. C. (2008). Electronic structure and electrical properties of Na-doped C60 thin films. *Thin Solid Films*, 517(2), 522–524. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.06.066>

Rose, A. (1978). Concepts in photoconductivity and allied problems.

Sasaki, I., Janata, J. ve Josowicz, M. (2007). Stabilization of electronic properties of (1R)-(-)-10-camphorsulfonic acid doped polyaniline by UV irradiation. *Polymer Degradation and Stability*, 92(7), 1408–1416. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.02.021>

- Shaikh, J. S., Shaikh, N. S., Sheikh, A. D., Mali, S. S., Kale, A. J., Kanjanaboos, P., Hong, C. K., Kim, J. H. ve Patil, P. S. (2017). Perovskite solar cells: In pursuit of efficiency and stability. *Materials and Design*, *136*, 54–80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.037>
- Shen, H. ve Maes, B. (2011). Combined plasmonic gratings in organic solar cells. *Optics Express*, *19*(106), A1202-A1210. <https://doi.org/10.1364/OE.19.0A1202>
- Spano, F. C. (2005). Modeling disorder in polymer aggregates: The optical spectroscopy of regioregular poly(3-hexylthiophene) thin films. *Journal of Chemical Physics*, *122*(23). <https://doi.org/10.1063/1.1914768>
- Sun, H., Peng, T., Liu, B. ve Xian, H. (2015). Effects of montmorillonite on phase transition and size of TiO₂ nanoparticles in TiO₂/montmorillonite nanocomposites. *Applied Clay Science*, *114*, 440-446. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.026>
- Thapliyal, P., Kandari, A. S., Lingwal, V., Panwar, N. S. ve Rao, G. M. (2021). Post deposition annealing dependent structural and CV characteristics of (Ta₂O₅)_{0.965}-(TiO₂)_{0.035} thin films. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 3946-3950. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.297>
- Wang, X., Huang, S., Liu, D. ve Sa, R. (2021). Stable and high efficiency mixed-cation lead-based halide perovskite: A theoretical study. *Physica B: Physics of Condensed Matter Physica B* *610* (2021) 412938. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412938>
- Xing, G., Mathews, N., Sun, S., Lim, S. S., Lam, Y. M., Grätzel, M., Mhaisalkar, S. ve Sum, T. C., (2013) . Long-range balanced electron-and hole-transport lengths in organic-inorganic CH₃NH₃PbI₃. *Science*, *342*(6156), 344-347. <https://doi.org/10.1126/science.1243167>
- Zhang, H., Wu, C., Liang, L., Chen, Y., He, Y., Zhu, Y., Ke, N., Xu, J.B., Wong, S.P., Wei, A. ve Peng, S. (2001). Structural, morphological and optical properties of C60 cluster thin films produced by thermal evaporation under argon gas. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *13*(13), 2883.
- Zhang, J., Fu, J., Chen, Q., Ma, H., Jiang, Z., Zhang, Z., Zhou, Y. ve Song, B. (2022). 3, 5-Difluorophenylboronic acid-modified SnO₂ as ETLs for perovskite solar cells: PCE> 22.3%, T₈₂> 3000 h. *Chemical Engineering Journal*, *433*, 133744. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133744>
- Zhou, H., Shi, Y., Dong, Q., Zhang, H., Xing, Y., Wang, K. ve Ma, T. (2014). Hole-conductor-free, metal-electrode-free TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ heterojunction solar cells based on a low-temperature carbon electrode. *The journal of physical chemistry letters*, *5*(18), 3241-3246. <https://doi.org/10.1021/jz5017069>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ayşegül Taşcıoğlu
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 28.11.1988
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Cumhuriyet Lisesi
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Mühendisliği
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

İletişim (e-posta) : atascioglu@mehmetakif.edu.tr

Yayımları :

Yılmaz, G., Çoşğun, A. ve Taşcıoğlu, A. (2021). Lead iodide thin-film morphological-dependent metastability investigation by electrical conductivity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(3), 3222-3231. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-05071-2>

Çoşğun, A., Taşcıoğlu, A. ve Yılmaz, G. (2021). İnce Film Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ve Çeşitleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 351-363. <https://doi.org/10.29048/makufebd.861301>

Taşcıoğlu, A. ve Keser, H. Y. (2019). Solar energy in the logistics sector: assessments on Turkey. *Journal of Business and Social Review in Emerging Economies*. 5(2), 225-236. <https://doi.org/10.26710/jbsee.v5i2.822>

Taşcıoğlu, A., Taşkın, O. ve Vardar, A. (2016). A power case study for monocrystalline and polycrystalline solar panels in Bursa City, Turkey. *International Journal of Photoenergy*. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7324138>