MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI KAPLAMALAR

MERVE YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Türkçe)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Nazmi EKREN

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Oğuzhan GÜNDÜZ

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI KAPLAMALAR

MERVE YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Türkçe)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

(523122010)

DANIŞMAN

Doç. Dr. Nazmi EKREN

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Oğuzhan GÜNDÜZ

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans eğitimim ve araştırmalarım süresince, fikir ve önerilerini esirgemeyen, tezimin yönlendirilmesinde bilgi ve tecrübeleri ile çalışmalarıma yol gösteren, destekleyici ve cesaretlendirici sözleriyle güven veren, çok kıymetli hocam Doç. Dr. Nazmi EKREN'e çok teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam süresince bilgisi ile yanımda olan değerli eş danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan GÜNDÜZ hocama teşekkür ederim.

Çalışmalarımda sıkça başvurduğum ve bilgilerinden faydalandığım hocalarım Prof. Dr. Canan DOĞAN, Dr. Samet SARKIN, Öğr. Gör. Fatih Serdar SAYIN ve tüm Nanoteknoloji ve Biyomalzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezi (NBUAM) ekibine teşekkür ederim. Destekleri ve bilgileriyle her zaman yanında olan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Şafak SAĞLAM, Prof. Dr. Erkan DURSUN ve Prof. Dr. Bülent ORAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan, en büyük destekçilerim babam Aydın YILMAZ, annem Selma YILMAZ ve abim Sefa YILMAZ'a teşekkür ederim. Öğrenimim boyunca ve hayatımın her aşamasında yanımda olan her sıkıntımı her sevincimi paylaştığım canım ablam Zehra KARATAŞ'a, beni akademiye yönlendiren, bir mühendis olarak daima bilgisinden faydalandığım abim Mehmet KARATAŞ'a teşekkür ederim. Son olarak sevgileriyle bana güç veren değerli arkadaşlarıma ve sevgili yeğenlerim Kerem ve Elif'e sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2024 **Merve YILMAZ**

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR **3**

İÇİNDEKİLER **4**

ÖZET **7**

ABSTRACT **9**

SEMBOLLER **11**

KISALTMALAR **13**

ŞEKİL TABLOSU **15**

TABLO LİSTESİ **18**

1. GİRİŞ **19**

1.1. Giriş **19**

1.2. Amaç ve Önem **20**

2. GENEL BİLGİLER **22**

2.1. Güneş Enerjisi **22**

2.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi **23**

2.3. Fotovoltaik Paneller (PV) **25**

2.4. Güneş Enerjisi **28**

2.4.1. Şebekeye Bağlı PV Paneller 28

2.4.2. Şebekeden Bağımsız PV Paneller 28

3. LİTERATÜR TARAMASI **29**

3.1. Verimliliği Etkileyen Faktörler **29**

3.2. Kirlenme Önleyici Kaplamalar **33**

3.3. Yansıma Önleyici Kaplamalar **37**

3.4. Kaplama Yöntemleri 38

3.4.1. Spin-Coating (Döndürerek Kaplama) 40

3.4.2. Elektroeğirme Yöntemi 40

3.4.3. Daldırma Yöntemi 42

3.4.4. Termal Buharlaşma Yardımlı Kaplama 43

3.4.5. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi 44

3.4.6. Püskürtme (Sprey) Yöntemi 45

3.4.7. RF ve DC Manyetron 46

3.4.8. Elektron Işını (E-beam) 46

3.4.9. 3D Yazıcı Yöntemi 47

4. MATERYAL ve METOT 52

4.1. Materyaller 52

4.1.1. Kaplama Materyalleri 52

4.1.2. Test Materyalleri 54

4.2. Metot 57

4.2.1. Çözelti Hazırlama 57

4.2.2. Elektroeğirme İşlemi 58

4.2.3. Parametrelerin Değiştirilerek Denenmesi 59

4.2.4. Mikroskop İncelemesi ve Işık Geçirgenliği Testi 61

4.2.5. Dış Ortam Testi 61

5. Bulgular ve Tartışma 64

5.1. Optik Sonuçlar 64

5.2. Elektriksel Sonuçlar 76

6. SONUÇ 80

KAYNAKLAR.....82

ÖZGEÇMİŞ.....94

ÖZET

ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI KAPLAMALAR

Fotovoltaik (PV) yöntemle güneş enerjisinden elektrik üretiminde, güneşten gelen ışığın bir kısmı fotovoltaik panelin koruyucu cam katmanından geri yansır, bir kısmı kırılır ve bir kısmı dağılır. Bu tez çalışmasında, fotovoltaik panellerin verimliliğini artırmak amacıyla nano yapılı kaplamalar hazırlanmış ve incelenmiştir. Kaplamalar, yansıma azaltıcı ve kirlenme önleyici özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Fotovoltaik panellerin verimliliği, yüzey yansımaları ve çevresel kirlilik gibi faktörler nedeniyle azalabilmektedir. Geliştirilen nano yapılı kaplamalar, bu olumsuz etkileri minimize ederek, güneş ışığının panel yüzeyine maksimum seviyede ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, kaplamalar, kir ve toz birikimini engelleyerek panellerin temiz kalmasına ve böylece uzun vadede daha yüksek verimle çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

Tez kapsamında, farklı nano yapılı kaplama malzemeleri sentezlenmiş ve bunların fotovoltaik panel yüzeyine uygulanabilirliği test edilmiştir. Kaplamaların optik ve mekanik özellikleri, laboratuvar ortamında detaylı analizlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, nano yapılı kaplamaların yansıma oranlarını belirgin şekilde azalttığını ve yüzey kirlenmesini önemli ölçüde önlediğini göstermektedir.

Bu çalışma, fotovoltaik panellerin enerji dönüşüm verimliliğini artırma ve bakım maliyetlerini azaltma potansiyeline sahip yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Geliştirilen kaplamalar, güneş enerjisinden daha etkin yararlanma ve sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunma açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Tez çalışmasında yöntem elektroeğirme yöntemi ile tercih edilmiştir. Hem maliyet açısından uygun hem de geniş yüzey alanlarını kaplamaya elverişli olması nedeniyle bu yöntem tercih edilmiştir. Bu kaplama yöntemiyle, kaplanmamış panellerde oluşan kaybın önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Laboratuvar çalışmalarında, çeşitli formülasyonlar denenmiş ve sonunda en başarılı sonuç olarak %3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,01 gr SiO_2 ve 0,01 gr TiO_2 nano

parçacık içeren bir sol-jel hazırlanmıştır. Elektroeğirme yöntemiyle yapılan kaplamalar sonucunda %84,613 oranında ışık geçirgenliğine sahip bir kaplama üretilmiştir. Kaplamaların su temas açısı ölçülmüş ve %77,9 bulunmuştur.

En verimli iki farklı formülasyonla PV panellere uygulanan kaplamaların 7 gün boyunca test edilmiştir. Günlük ortalama 10 saat veri alınarak yapılan dış ortam testlerinde, PV1 (O7) ve PV3 (U9) kodlu paneller, kaplamasız PV2 paneline göre daha düşük güç çıkışı vermiştir. Farklı hava koşullarına maruz bırakılan kaplamalı panellerde, çalışmanın amaçlarından biri olan kendi kendini temizleme özelliği, hidrofobik yüzey oluşumu sayesinde sağlanmıştır. Ancak 7 günlük dış ortam testinin kaplamaların deformasyona uğrayıp uğramadığını öğrenmek ve yüzeyde kalıcılığını incelemek için yeterli süre olmadığı kabul edilip çalışmaların devam ettirilmesine karar verilmiştir. Çalışmalar ya laboratuvar ortamında yaşlandırma testine maruz bırakılarak ya da gerçek hava koşullarında en az 12 ay test edilecektir.

Yapılan testler neticesinde, elektroeğirme yöntemi ile yapılan kaplamaların ışık geçirgenliğinin %84,613'e çıkarılabileceği görülmüştür. Bu sonuç literatürdeki elektroeğirme ile PV panel kaplama sonuçlarına bakıldığında en yüksek sonuçtur. Bununla birlikte yapılan kaplamaların homojenliğinin artırılması ve kaplama kalınlığının azaltılması gibi bazı parametrelerin değişimiyle fotovoltaik panellerde elektroeğirme yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verebileceği öngörülmüş ve çalışmaların devam ettirilmesine karar kılınmıştır.

ABSTRACT

EFFICIENCY INCREASING COATINGS ON PHOTOVOLTAIC PANELS WITH ELECTROSPINNING METHOD

In photovoltaic (PV) electricity generation from solar energy, a portion of the light from the sun is reflected off the protective glass layer of the photovoltaic panel, some is refracted, and some is scattered. In this thesis, nanostructured coatings have been prepared and examined to enhance the efficiency of photovoltaic panels. These coatings are designed to possess anti-reflective and anti-soiling properties. The efficiency of photovoltaic panels can decrease due to factors such as surface reflections and environmental contamination. The developed nanostructured coatings minimize these adverse effects, ensuring that the maximum amount of sunlight reaches the panel surface. Additionally, these coatings prevent the accumulation of dirt and dust, contributing to the panels' cleanliness and thereby facilitating higher efficiency over the long term.

Within the scope of the thesis, various nanostructured coating materials were synthesized and their applicability to the photovoltaic panel surface was tested. The optical and mechanical properties of the coatings were evaluated through detailed laboratory analyses. The obtained results indicate that the nanostructured coatings significantly reduce reflection rates and substantially prevent surface contamination.

This study presents an innovative approach with the potential to increase the energy conversion efficiency of photovoltaic panels and reduce maintenance costs. The developed coatings are considered a significant step towards more efficient utilization of solar energy and contribute to sustainable energy production.

The electrospinning method was chosen for the thesis study. This method was selected due to its cost-effectiveness and suitability for covering large surface areas. The objective of using this coating method is to prevent the losses that occur in uncoated panels. Various formulations were tested in the laboratory, and the most successful result was achieved with a sol-gel containing 3% PLA, 3% PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0.01 g SiO_2, and 0.01 g TiO_2

nanoparticles. As a result of the coatings made with the electrospinning method, a coating with 84.613% light transmittance was produced. The water contact angle of the coatings was measured to be 77.9%.

The coatings applied to PV panels with the two most efficient formulations were tested for 7 days. In outdoor tests, where data was collected for an average of 10 hours daily, panels coded PV 1 (O7) and PV 3 (U9) showed lower power output compared to the uncoated PV 2 panel. In the coated panels exposed to different weather conditions, the self-cleaning property, one of the aims of the study, was achieved thanks to the formation of a hydrophobic surface. However, it was acknowledged that the 7-day outdoor test period was insufficient to determine whether the coatings experienced deformation and to examine their durability on the surface, leading to the decision to continue the studies. These studies will either be subjected to aging tests in the laboratory environment or tested under real weather conditions for at least 12 months.

The tests revealed that light transmittance could be increased to 84.613% with coatings made using the electrospinning method. This result is the highest when compared to the PV panel coating results in the literature using electrospinning. Furthermore, it is anticipated that the electrospinning method could yield better results for photovoltaic panels compared to other methods by altering certain parameters, such as increasing the homogeneity of the coatings and reducing the coating thickness, leading to the decision to continue the studies.

SEMBOLLER

MW	MegaWatt
GWh	GigaWatt saat
m / sn	Metre / saniye
CO	Karbonmonoksit
CO2	Karbondioksit
Nox	AzotXoksit
°C	Derece Santigrat
Km	Kilometre
W / m^2	Watt / metrekare
kWh	KiloWatt saat
kW	KiloWatt
MWh	MegaWatt saat
kWh/m^2	KiloWattsaat / metrekare
kV	KiloVolt
Hz	Hertz
Nm	Nanometre
µm	Mikrometre
TiO2	Titanyum dioksit
Mm	Milimetre
Vmax	Maksimum gerilim çıkışı
P	Yansıma - Reflectance
T	Geçirgenlik - Transmittance

A	Emilim – Absorbance
SiO_2	Silisyum dioksit
MgF_2	MagnezyumFlorür
Si_3N_4	SilisyumNitrür
ZrO_2	Zirkonyum dioksit
H	Yansıtma indeksi
ηkaplama	Kaplamanın yansıtma indeksi
ηhava	Havanın yansıtma indeksi
ηyüzey	Yüzeyin yansıtma indeksi
Λ	Dalgaboyu (nm)
ZnO	Çinko oksit
ZnS	ÇinkoSülfit
Fe_2O_3	Demir oksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
$CHCl_3$	Kloroform – Chloroform
Ch_3Ch_2OH	Etanol
ml/saat	mililitre / saat
mm/sn	milimetre / saniye
Rth	Thevenin eşdeğer direnci
R	Yük direnci

KISALTMALAR

ABS	Acrylonitrile Butadien Styrene - Akrilonitril Bütadien Stiren
AC	Alternatif Akım
AFM	Atomic Force Microscopy
AM	Air Mass – Hava Kütlesi
a-Si	AmorphSilicon - Amorf-silikon
B	Boylam
CdTe	CadmiumTellure - Kadmiyum Tellür
CIGS	CopperIndiumGaliumSelenide- BakırİndiyumGalyumSelenid
CIS	CopperIndiumSelenide - BakırİndiyumSelenid
CSP	Concentrating Solar Power, Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi
CVD	Chemical Vapour Deposition – Kimyasal Buharlı Biriktirim
DC	Doğru Akım
DC-AC	Doğru Akımdan Alternatif Akıma
EDS/EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy - Spektroskobik Enerji Dağılımı
EVA	Ethylene Vinyl Acetate - EtilenVinilAsetat
MPPT	Maximum Power Point Tracking – Maksimum Güç Noktası İzleyicisi
OSC	Organic Solar Cells
p-n	Pozitif-Negatif kutup
PAN	Polyacrylonitrile - Poliakrilonitril
PC	Polycarbonate - Polikarbonat
PLA	Polylactic acid – Polilaktik asit
PMMA	Polymethylmethacrylate - Polimetilmetakirilat
PU	Polyurethane - Poliüretan
PV	Photovoltaic - Fotovoltaik

PVA	Polyvinlyalcohol - Polivinilalkol
PVAc	Polyvinlyacetate - Polivinilasetat
PVD	Physical Vapor Deposition - Fiziksel Buharlı Biriktirim
RF	Radyo Frekans
SEM	Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu
Sol-gel	Solution-Gel - Solüsyon-Jel
UV	Ultraviyole

ŞEKİL TABLOSU

Şekil 1: Yenilenebilir enerji üretiminin yıllara göre dağılımı (2000-2028)..... 23

Şekil 2: Türkiye güneş enerjisi potansiyel haritası 24

Şekil 3: PV panel bileşenleri..... 26

Şekil 4: Fotovoltaik etki..... 27

Şekil 5: (a) Manuel temizleme, (b) Otomatik temizleme robotu..... 30

Şekil 6: Panel yüzeyine toz yerleşimini etkileyen faktörler 32

Şekil 7: Su damlasının a) yuvarlanma ve b) kayma hareketi..... 34

Şekil 8: a) Su temas açısı (Ɵ), (b) Ölçülen su temas açısına göre ıslatma alanları..... 35

Şekil 9: Fotokataliz sürecini kendi kendini temizleme mekanizması..... 36

Şekil 10: Sol-jel yönteminin temel adımları 38

Şekil 11: Döndürerek kaplama yöntemi 40

Şekil 12: Elektroeğirme yönteminin şematik gösterimi 41

Şekil 13: Dip-coating yöntemi (a) Daldırma, (b) Kaplama süresi, (c) Çıkartma ve süzme, (d) Kuruma 43

Şekil 14: Termal buharlaşma ile kaplama yöntemini şematik gösterimi..... 44

Şekil 15: Elektron ışını ile kaplama yöntemi 47

Şekil 16: 3D yazıcı ile nano boyutta polimer kaplanması, 2) a- kaplanmış hidrofobik yüzeyin su teması, b- kaplama olmayan yüzeyin su teması 48

Şekil 17: a) Elektroeğirme cihazı, b) 21 numaralı elektroeğirme iğnesi, c) cam lam üzerine yapılan elektroeğirme işlemi, d) şırınga pompası, e) elektroeğirme cihazının kontrol düğmeleri 53

Şekil 18: a) Ohaus marka hassas terazi, b) Heidolph MR Hei-TEC model ısıtıcılı manyetik karıştırıcı..... 54

Şekil 19: a) Olympus-Colorview model optik mikroskop, b) Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope) (SEM) Zeiss EVO MA-10 55

Şekil 20: Shimadzu UV-VIS 1280 Spektrofotometre..... 55

Şekil 21: NI USB-6009 DAQ 57

Şekil 22: DAQ kartı blog diyagramı..... 62

Şekil 23: Dış ortam test düzeneği 63

Şekil 24: O3 kaplamasının optik mikroskop görüntüleri..... 64

Şekil 25: Lam üzerine uygulanmış bazı kaplama örnekleri..... 65

Şekil 26: %T ölçümü 66

Şekil 27: O7 kodlu kaplamanın EDX analizi..... 67

Şekil 28: U9 kodlu kaplamanın EDX analizi..... 68

Şekil 29: U9 kodlu kaplamanın AFM testi sonuçları 70

Şekil 30: O7 kodlu kaplamanın AFM testi çıktıları..... 73

Şekil 31: a) U9 kaplamasının su temas testi aşamaları, b) O7 kaplamasının su temas testi aşamaları..... 75

Şekil 32: a) O7 kaplamanın su teması, b) kaplamasız yüzeyin su teması, c) U9 kaplamasının su teması..... 76

Şekil 33: PV1, PV2 VE PV3 panellerinin 7 gün boyunca alınan güç çıkışları 77

Şekil 34: PV1 ve PV2 panellerinin güç çıkışları 78

Şekil 35: PV2 ve PV3 panellerinin güç çıkışları 78

TABLO LİSTESİ

Tablo 1: PV panel kaplamasında kullanılan başlıca malzemelerin karşılaştırılması 37

Tablo 2: PV panel kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması 49

Tablo 3: Solüsyon içerikleri 58

Tablo 4: Elektroeğirme işlemi parametreleri.....60

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Küresel enerji talebi, her geçen gün artmaktadır ve bu artış, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve mevcut kaynaklardan elde edilen enerjinin verimliliğinin artırılması gibi çeşitli çalışmaları beraberinde getirmektedir. Enerji üretimi, genellikle yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir. Yenilenemez enerji kaynakları, genellikle sınırlı olan kaynaklardan, örneğin fosil yakıtlardan elde edilirken, yenilenebilir enerji kaynakları dünyanın doğal süreçlerinden, örneğin güneş, rüzgâr ve suyun potansiyel enerjisinden elde edilmektedir [1, 2]

Ancak, mevcut enerji üretim yöntemlerinin çevresel etkileri, doğa kirliliği ve CO_2 salınımı gibi olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle, çevreye duyarlı ve doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır [3, 4]

Elektrik enerjisinin üretiminde verimlilik, çevresel etkiler, maliyet ve kaynağın kolay erişilebilir olması gibi faktörler dikkate alındığında, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları büyük bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi, temiz, düşük bakım gereksinimi olan, güvenilir ve sınırsız bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerji sistemlerinde, paneller aracılığıyla güneş ışınımı elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [5]

Ülkemiz, güneş enerjisi açısından elverişli bir konuma sahiptir ve fotovoltaik (PV) panellerin toplam kurulu güce etkisi gün geçtikçe artmaktadır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'nin raporlarına göre, güneş enerjisi için kurulu güç, 2014 yılında 40.2 MW iken, 2015 yılında 248.9 MW'a, 2016 yılında 832.5 MW'a ve 2017 yılı itibariyle 3421.7 MW'a yükselmiştir. 2023 yılı sonu itibariyle de PV panellerin toplam kurulu gücü 12445 MW olduğu açıklanmıştır. Bu veriler, Türkiye'nin Avrasya bölgesinde lider konumda olduğunu göstermektedir [6, 7].

Fotovoltaik panellerin enerji üretimindeki verimliliği, çeşitli faktörlerin etkisi altındadır. Özellikle çevresel kirlilik nedeniyle, panel yüzeyi toz, çamur ve CO_2 salınımından kaynaklı kirleticilerle kirlenebilir. Bu durum, panelin yüzeyini kaplayarak güneş ışığının emilimini azaltabilir ve dolayısıyla üretilen güç miktarını azaltarak verim kayıplarına neden olabilir.

Araştırmalar, bu tür kayıpların zamanla ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğini göstermektedir [8]. Bu nedenle, fotovoltaik panellerin enerji üretiminde dış etkenlerin etkisini anlamak ve bu etkileri azaltmaya yönelik çözümler geliştirmek, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Bu çalışmada ele alınacak konular şu başlıklar altında sıralanabilir:

• Fotovoltaik panellerin enerji üretimine etki eden dış faktörlerin detaylı bir şekilde incelenmesi,

• Daha önce literatürde ele alınmamış olan PV panellerin güç verimliliği için fotokatalitik, antibakteriyel ve yansımayı önleyici yüzey kaplamalarının uygulanabilirliğinin araştırılması,

• Cam fotovoltaik panel yüzeyine uygulanan Titanyum dioksit (TiO_2), Silisyum dioksit (SiO_2) ve Bor oksit (B_2O_3) gibi yüzey kaplamalarının etkisinin analiz edilmesi,

• Yüzey kaplamalarından elde edilen veri setlerinin enerji üretimindeki âtıl kapasite faktörünün belirlenmesidir.

Son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle enerjiye olan ihtiyaç artmış ve ülkemizde enerji arzı yetersiz olup, enerji ithalatı nedeniyle cari açık sorunu yaşanmaktadır. Bu durum, mevcut konvansiyonel enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin çevreye zarar vermesiyle birleşince, yenilenebilir enerji kaynakları ülkemiz için büyük bir potansiyele sahip hale gelmiştir. Güneş enerjisi sistemi kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalarda, panellerin yüzey kirliliğinden kaynaklanan %15 ve ışın yansımasından kaynaklanan %5 oranında verim kaybı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, panellerin yüzeylerine uygulanacak kaplamalarla bu verim kaybının önüne geçilmesi ve enerji üretiminin artırılması hedeflenmektedir[8].

1.2. Amaç ve Önem

Tezin amacı, güneş paneli üzerine anti-yansıtıcı ve kendi kendini temizleyen kaplamaların uygulanması için bir teknoloji sağlamaktır. Bu kaplamaların amacı, yansımayı azaltmak ve panel yüzeyinden sıvıların, yağmur gibi, kolayca akmasını sağlayarak yüzeyden kirleri

temizlemeyi kolaylaştırmaktır. Fotovoltaik (PV) sisteminin bulunduğu yere bağlı olarak toz, organik kalıntılar, nem, su damlacıkları ve kar gibi çeşitli kirleticiler göz önünde bulundurulmaktadır. Güneş ışığı bir yüzeye çarptığında üç şekilde davranır: yansıma (%R), geçirgenlik (%T) ve emilim (%A). Denklemde, güneşle ilgili çeşitli davranışlar arasındaki ilişkiyi açıklar. Emilim, yüzeyi oluşturan maddeye bağlı olarak belirlenir ve katı yüzeylerde minimaldir; ancak, emilen fotonlar Kirchhoff'un ışıma denklemine göre ısıya dönüşür. Kaplamaların amacı, ışık geçirgenliğini artırırken yansımayı azaltmaktır.

$1 = \rho + \tau + \alpha$ ya da $1 = R + T + A$

ρ Yansıma – Reflectance

τ Geçirgenlik - Transmittance

α Emilim – Absorbance

Panel üzerinde yansıma ve kirliliğin olmaması, gelen güneş ışığının hücrelere daha fazla ulaşmasını sağlayarak panelin verimini artırır. Kendini temizleme yetenekleri sağlamaya çalışırken, yüzey aynı zamanda hidrofobik özellikler kazanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu, yüzeye su temas ettiğinde kir ve tozun kolayca silinebilmesini sağlamak için yüzeye su itici özellikler kazandırmayı amaçlar. Tez kapsamında, yapılacak uygulamaların amacı ve konusunu kapsayan bir literatür araştırması yapılmış ve uygulamalarda kullanılan malzemeler ile yöntemler ayrıntılı olarak üçüncü kısımda sunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş, Dünya için potansiyel olarak sınırsız bir enerji kaynağıdır ve insanlığın bugüne kadar tükettiğinden çok daha fazla enerji üretir [8]. Her yıl Dünya yaklaşık olarak 4 milyon exajoule (1 EJ = 10^{18} J) güneş enerjisi alırken, bunun yaklaşık olarak 5×10^4 EJ'lik bir kısmı kolayca dönüştürülebilir[9]. Güneşin yüzey sıcaklığının yaklaşık 6000 Kelvin olduğu tahmin edilmektedir [10].

Güneş enerji sistemleri, kullanılabilirlik, fiyatlandırma, erişilebilirlik, kapasite, verimlilik ve gürültü azaltma gibi faktörler açısından diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını geride bırakmaktadır. Bu nedenle, tüketici talebini karşılamak için en etkili çözümlerden biri olacaktır [11, 12].

Güneş enerjisinin endüstride kullanımı için güneş kolektörleri, güneş takip sistemleri ve büyük aynalar gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Endüstride güneş enerjisi kullanımları genellikle güneş termal ve fotovoltaik olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Bu uygulamalar, sıcak su üretimi, buhar üretimi, kurutma işlemleri, pastörizasyon ve sterilizasyon, endüstriyel ısıtma ve gıda işleme gibi alanları içerir [12].

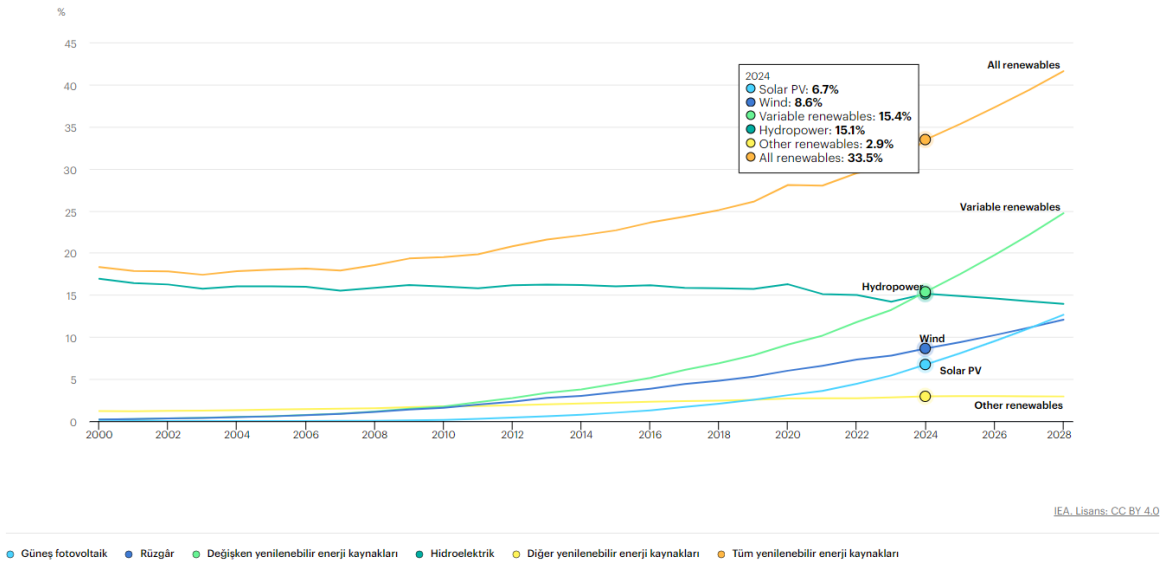
Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan 2023 Güneş Enerjisi Görünümü raporuna göre, güneş enerjisi önümüzdeki on yıl içinde küresel enerji sisteminde kritik bir rol üstlenmeye devam edecektir. Rapordaki öne çıkan bulgular şunlardır:

Küresel Elektrik Üretimindeki Payı: 2030 yılına kadar güneş enerjisinin küresel elektrik üretimindeki payının %16'ya ulaşması beklenmektedir. Bu, 2022'deki %11'lik paydan önemli bir artışı ifade etmektedir.

Yeni Elektrik Üretim Kapasitesi: Güneş enerjisinin, 2030 yılına kadar yeni kurulan elektrik üretim kapasitesinin %70'ini oluşturacağı öngörülmektedir. Bu durum, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Ekonomik Rekabetçilik: Güneş enerjisi, kömür ve nükleer enerjiden daha ucuz hale gelmektedir. Bu ekonomik avantaj, güneş enerjisini daha cazip bir yatırım seçeneği yaparak

daha geniş bir benimseme sağlamaktadır [13]. Şekil 1'de IEA'nın yenilenebilir elektrik üretiminin teknolojiye göre payı verilmiştir. Bu grafiğe göre dünyada 2028 yılına kadar güneş ve rüzgâr enerjilerinde herhangi bir azalma olmayacağı düşünülmektedir [14].



Şekil 1: Yenilenebilir enerji üretiminin yıllara göre dağılımı (2000-2028) [14]

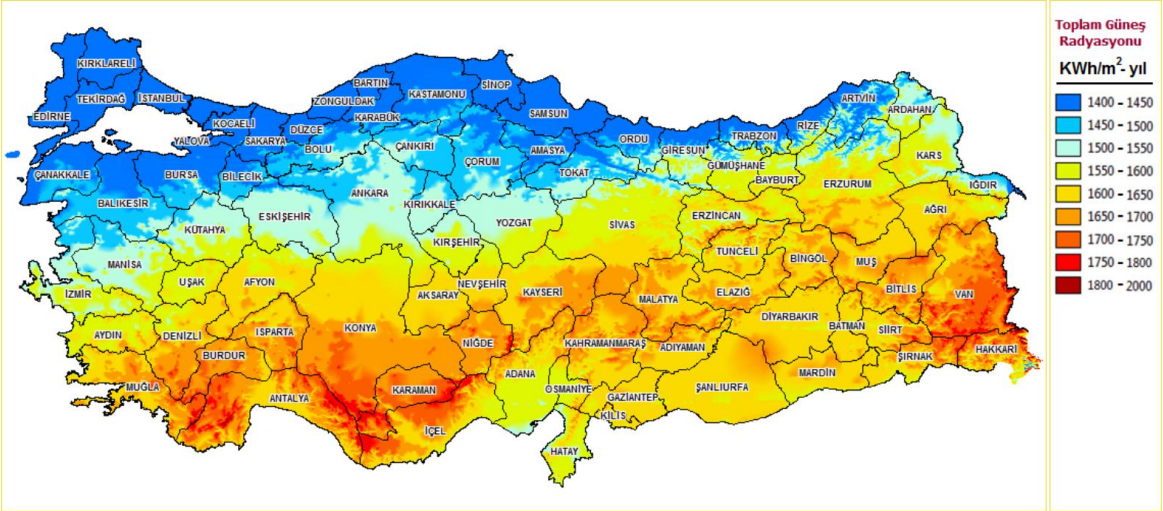
2.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi

Türkiye, son yıllarda enerji talebinde hızla artan bir trend yaşamaktadır. EPDK'nin verilerine göre, 2009 ile 2019 arasındaki on yıllık dönemde Türkiye'nin enerji tüketimi %51 oranında artmıştır. Bu artış, fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve enerji ithalatını önemli hale getirmiştir [15].

Türkiye'nin enerji yapısına baktığımızda, petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların hala en büyük paya sahip olduğunu görüyoruz. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasıyla birlikte, hidroelektrik enerji, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar da Türkiye'nin enerji portföyünde önemli bir yer tutmaktadır [16].

Güneş enerjisi Türkiye için büyük bir potansiyele sahiptir. Ülkenin coğrafi konumu, güneş enerjisi sistemleri için ideal koşullar sunmaktadır. Yıllık ortalama güneş radyasyonu süresi 2737 saat ve yıllık ortalama güneş enerjisi alımı 1527 kWh/m²'dir. Bu değerler, güneş enerjisi projelerinin başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir [17, 18].

2023 yılı sonu itibariyle, Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu gücü önemli bir artış göstererek 13.998 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına yaptığı yatırımların ve bu alandaki politikalarının bir sonucudur [19]. Ayrıca, birçok büyük ölçekli güneş enerjisi santrali projesi hayata geçirilmektedir. Özellikle Konya'nın Karapınar ilçesinde kurulmakta olan ve tamamlandığında Türkiye'nin en büyük güneş enerjisi santrali olması öngörülen tesis, 1.350 MW'lık kurulu güce ulaşmayı hedeflemektedir [20].



Şekil 2: Türkiye güneş enerjisi potansiyel haritası [21]

Türkiye'nin güneş enerji alanındaki hızlı gelişimi, enerji arzını çeşitlendirmenin yanı sıra enerji güvenliğini de artırmayı hedeflemektedir. Güneş enerjisi gibi yerli ve sürdürülebilir kaynaklara dayalı politikaların benimsenmesi, Türkiye'nin enerji ithalatına olan bağımlılığını azaltabilir ve çevresel sürdürülebilirliği sağlayabilir. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelini değerlendirme ve kullanma konusundaki çabaları, ülkenin enerji sektöründe önemli bir dönüşümü tetiklemiştir. Bu süreç, Türkiye'nin sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemli bir adım olabilir. Bu doğrultuda, Türkiye'nin enerji politikaları, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakları teşvik etmekte ve ülkenin enerji dönüşümünü hızlandırmaktadır [22].

IEA'nın Türkiye ile ilgili öngörülerine göre:

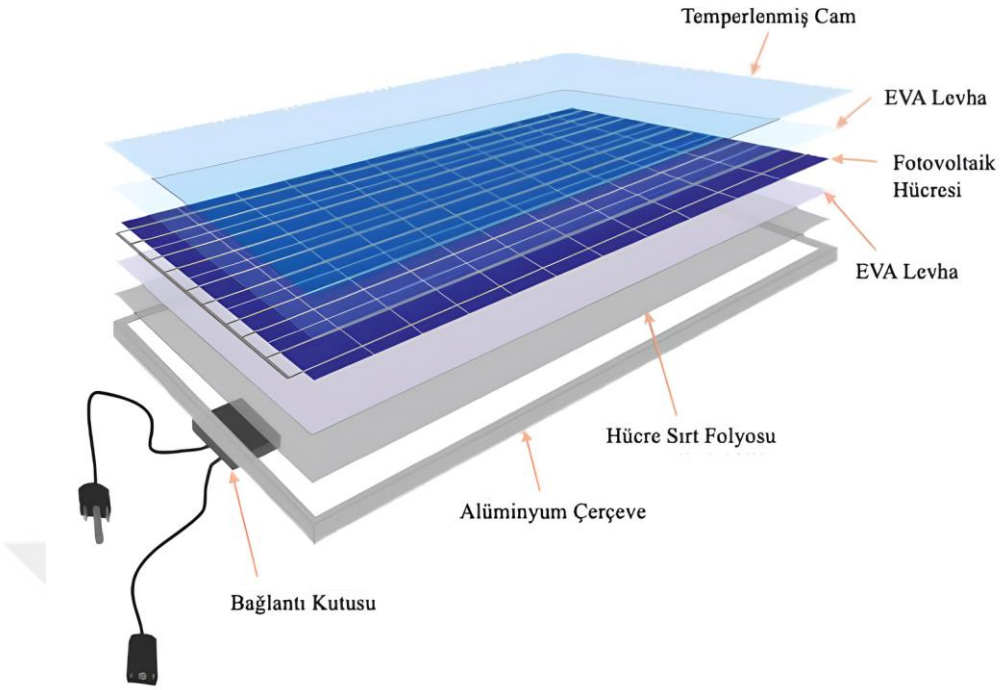
Kurulu Güç Artışı: Türkiye'nin 2030 yılına kadar güneş enerjisi kurulu gücünü beş kat artırarak 100 GW'a ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu durum, Türkiye'yi dünyanın en büyük on güneş enerjisinden elektrik üreten ülkesi haline getirecektir.

Elektrik Üretimindeki Rolü: Güneş enerjisinin, 2030 yılına kadar Türkiye'nin elektrik ihtiyacının %30'unu karşılayabileceği tahmin edilmektedir. Türkiye'de güneş enerjisinin kurulu güçteki payı 2023 yılı sonu itibari ile %11,5'tir. 2023 yılında üretilen elektrik enerjisinin tamamında ise güneş enerjisinin payı %5,8 olmuştur.

Genel olarak, IEA'nın raporu, güneş enerjisinin önümüzdeki on yıl içinde hem küresel hem de Türkiye'deki enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayacağını göstermektedir. Güneş enerjisi, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynayabilir [23, 24].

2.3. Fotovoltaik Paneller (PV)

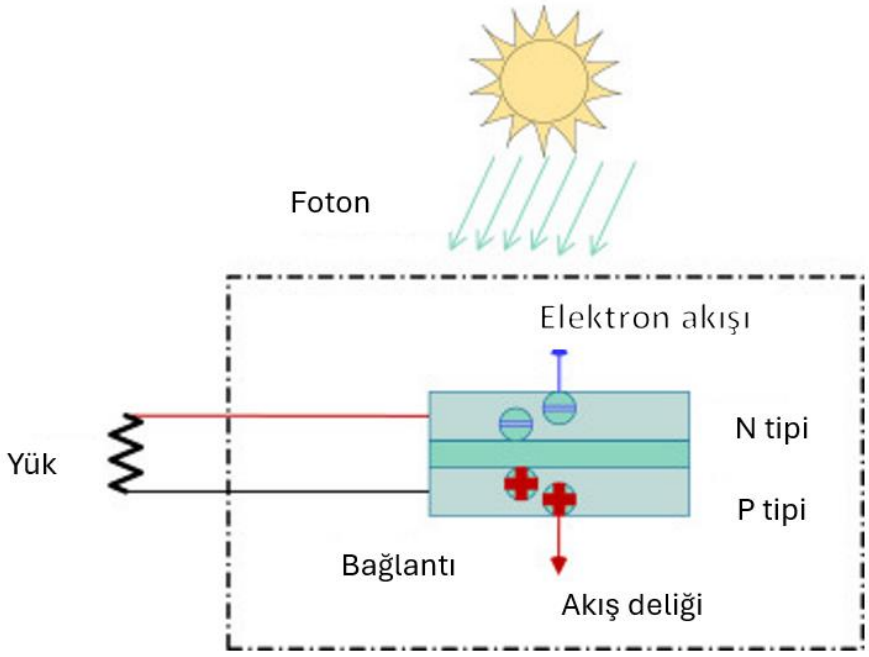
Fotovoltaik güneş panelleri veya modüller, fotovoltaik etki ile ışık enerjisini elektriğe dönüştüren paketlenmiş güneş hücreleridir. Hemen hemen tüm güneş hücreleri, yarı iletken malzemelerine göre adlandırılır [25, 26]. Güneş panelleri, güneş hücrelerine dayalı olarak üç ana nesile göre sınıflandırılır ve adlandırılır. İlk nesil ise geleneksel veya konvansiyonel olarak adlandırılır ve bugün en yaygın kullanılan PV güneş panelleridir [27]. Bu paneller, Şekil 3'te gösterildiği gibi tek kristalli ve polikristalli güneş panelleri gibi kristal silikon yapıda güneş hücrelerine sahiptir [28].



Şekil 3: PV panel bileşenleri [28]

İkinci nesil güneş panelleri, ince film teknolojisine dayanır. Bu paneller, plastik, cam veya metal gibi bir alt tabakaya ince film tabakalarının eklenmesiyle üretilir. Ticari olarak üç farklı yarı iletken malzeme kullanılarak üretilirler: a) Amorf silikon (a-Si), b) Kadmiyum tellür (CdTe), ve c) Bakır indiyum galium selenit (CIS/CIGS). Bu malzemelerin ince film tabakaları, güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için kullanılır [29].

Güneş ışınlarının taşıdığı enerjiyi fotonlar aracılığıyla aktarır. Bu fotonlar, güneş ışınımının açısı ve yönüne bağlı olarak farklı enerji miktarlarına sahiptir. Fotonlar panelin dış yüzeyine çarptığında, bir kısmı panel tarafından emilerek enerjiye dönüştürülür, bir kısmı yansır ve geri kalanı ise hücre içerisinden geçer. Şekil 4'te gösterilen fotovoltaik yapının içyapısından elektrik üretimi için gerekli olan koşul, güneş ışınımından gelen fotonların PV panel tarafından emilerek foto akım ve gerilim oluşturmasıdır. Temel ilke, güneş ışığının barındırdığı enerji yüklü fotonların hücre yapısındaki malzemelerin yüzeyine çarpması ve materyal ile etkileşime girerek, bu malzemelerin atomlarındaki elektronları harekete geçirmeye zorlamasıdır. Güneş ışınım enerjisi sonucunda, fotonlar enerjisini yarı iletken malzemenin atomlarındaki elektronlara enerji transfer eder. Bu enerjiyle elektronlar, elektrik akımı oluşturabilmek için negatif yüklü bölgeden pozitif yüklü polarizasyona akarlar [30, 31].



Şekil 4: Fotovoltaik etki [31].

2.4. Güneş Enerjisi

2.4.1. Şebekeye Bağlı PV Paneller

Güneş enerjisi sistemlerinde yer alan şebeke bağlantılı yapılar, fotovoltaik (PV) elektrik santrallerini kapsar ve şebeke bağımsız sistemlerden farklılık gösterir. Bu sistemler, genellikle güneş tarlalarını içerir ancak bağımsız kullanımlar için de uygundur. Çatı tipi üretimlerde, şebeke bağlantısına geçiş için çift yönlü elektrik sayaçları eklenerek lisansız kullanıcı anlaşmaları kolayca gerçekleştirilebilir.

Çatı tipi üretim sahalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntem, şarj kontrol cihazı ve Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) özelliğine sahip invertör cihazlarının kullanımını içerir. Bu yöntem, çatı tipi üretimlerde yüksek verim ve kaliteli elektrik üretimi sağlamak için tercih edilir. Çatı tipi üretim yerlerinde, tek fazlı veya üç fazlı çift yönlü sayaçlar kullanılarak iletim hatlarında ilgili yıllarda dengelemeler yapılmaktadır. Bu sistemler, kullanıcıların finansal imkanlarına ve kurulum yerine bağlı olarak PV panelleri yerleştirip ulusal şebekeye entegre olmalarına olanak tanır.

Türkiye'de, 2019 yılı itibarıyla lisanssız yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi için izin verilen 1 MW'lık sınır, 2019'dan itibaren 5 MW'a yükseltilmiştir [32, 33].

2.4.2. Şebekeden Bağımsız PV Paneller

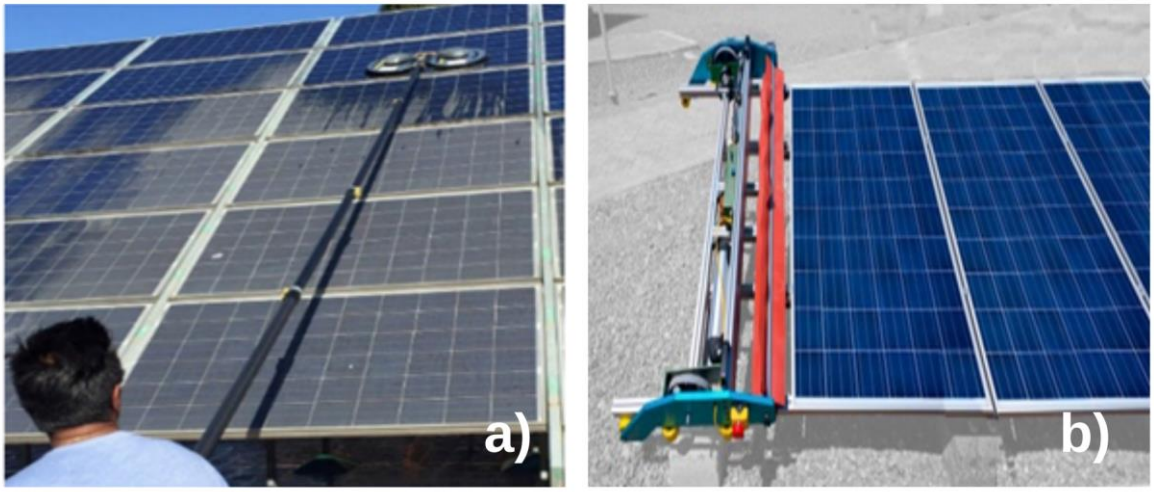
Şebekeden bağımsız fotovoltaik (PV) sistemler, genellikle erişimin zor veya ekonomik olarak imkânsız olduğu uzak bölgelerde kullanılan enerji çözümleridir. Bu sistemler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren PV panelleri, şarj regülatörleri, aküler ve gerektiğinde DC-AC invertör gibi bileşenlerden oluşur. Şebekeden bağımsız PV sistemleri, su temini, uzak bölgelere elektrik sağlanması ve sürekli güç kaynağı sunma gibi avantajlar sağlar. Ancak, bu sistemlerin bakımı, bileşenlerin değiştirilmesi ve enerji depolama kapasitesinin yeterliliği gibi zorluklar da vardır. Bu sistemler genellikle bol güneş ışığı alan ve elektriğin ulaşımının zor veya imkânsız olduğu tatil köyleri, karavanlar, tekneler, dağ evleri ve yönetim sistemleri gibi alanlarda tercih edilir. Şebekeden bağımsız PV sistemleri, enerji ihtiyacını karşılayarak ve enerji altyapısında önemli bir rol oynayarak sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunur [32, 33].

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Verimliliği Etkileyen Faktörler

Fotovoltaik (PV) paneller, endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan toz ve karbon gibi parçacıkların atmosferde birikmesi nedeniyle işletme etkinliğinde azalma yaşarlar. Bu birikim, özellikle Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) bölgesinde belirgin bir şekilde ortaya çıkar, yaygın toz birikimi ve az yağış ile karakterizedir. Bu iklim koşullarında, PV panellerinin düzenli olarak temizlenmesi, sistem verimliliğinin korunması için gereklidir. Ekonomik ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen, güneş PV enerjisi, toz birikimi, sıcaklık dalgalanmaları ve polen gibi faktörler nedeniyle verimlilikte azalma gibi bazı kısıtlamalarla karşılaşır. Çöl ortamlarında, toz veya polen birikimi nedeniyle verimlilik %30'a kadar azalabilir [34].

Panel eğimi, yönelimi, yüzey düzgünlüğü, kaplama bileşimi, ortam sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çeşitli faktörler, güneş panellerinin yüzeyinde toz birikimini etkiler. Ayrıca, tozun kimyasal, biyolojik ve elektrostatik özellikleri, PV panel yüzeylerindeki birikimi üzerinde etkilidir. Toz birikimi, güneş panellerine ulaşan ışığı engeller, bu da foton absorpsiyonunu azaltır ve panel çıkış gücünü düşürür. Geleneksel manuel temizleme yöntemleri ve otomatik veya robotik temizleme yaklaşımları, PV panellerinin temizliğini sağlamak için kullanılan iki temel stratejidir [34]. Aşağıdaki Şekil 5'te manuel temizleme işlemi ve otomatik temizleme robotu uygulamaları görülmektedir.



Şekil 5: (a) Manuel temizleme [35] , (b) Otomatik temizleme robotu [36]

Geleneksel manuel temizleme yöntemleri, zaman alıcı olmalarının yanı sıra uzun vadede yüzey çatlaklarına neden olabilmektedir. Ayrıca, bu yöntemler küçük partikülleri etkili bir şekilde gideremektedir. Bu nedenle, güneş panellerinin verimliliğini artırmak amacıyla farklı temizleme yöntemlerine olan talep giderek artmaktadır. Otomatik ve robotik temizleme yöntemleri, elektrostatik, mekanik veya kaplama tekniklerini kullanarak daha etkili çözümler sunmaktadır. Elektrostatik ve mekanik yöntemler ek enerji tüketimi ve daha yüksek maliyetlerle ilişkilendirilirken, kaplama yöntemleri ek enerji tüketimi gerektirmemekte ve bakım maliyetleri düşük olmaktadır.

Elektrostatik yöntemler, panellerdeki toz parçacıklarını elektrik alanları kullanarak uzaklaştırmakta, su kullanmadığı için tasarruf sağlamakta ve işletme maliyetlerini azaltmaktadır. Mekanik temizlik yöntemleri ise robotik sistemlerle, hava ve su püskürtme teknikleriyle veya ultrasonik titreşimlerle toz ve kirleri temizlemekte, belirli aralıklarla çalışarak panellerin temiz kalmasını sağlamakta ve insan müdahalesine gerek duymamaktadır. Ancak, temizleme robotları yüksek başlangıç maliyeti ve periyodik bakım masrafları gerektirmekte, ayrıca temizleme işlemi sırasında çizilme ve aşınma riski taşımaktadır.

Kaplama yöntemleri ise güneş panellerinin cam yüzeyine hidrofobik malzemeler uygulanmasını içermektedir. Bu kaplamalar, su ve kirin yüzeyden kolayca akmasını sağlayarak toz birikimini azaltmakta ve panelin verimliliğini artırmaktadır. Kaplama, tek seferlik bir uygulama olduğundan sürekli bakım gerektirmemekte ve yüksek verimlilik

sağlamaktadır. Ayrıca, mekanik temas gerektirmediği için panellere zarar vermemektedir. Yansıma önleyici kaplama daha fazla ışık emilimi sağlarken, kirlenme önleyici kaplama yüzeyin temiz kalmasını sağlamaktadır.

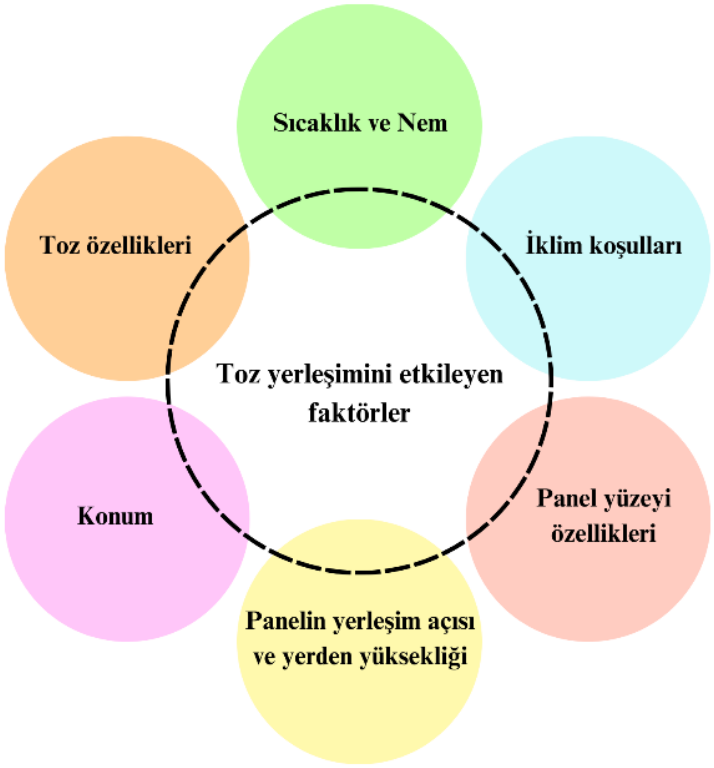
Fotovoltaik (PV) panellerde kaplama yapmanın manuel temizleme veya otomatik temizleme robotları yerine tercih edilmesinin başlıca nedenleri şunlardır:

1. Sürekli Koruma ve Verimlilik: Kaplama, uzun süre yüksek verimlilik sağlayarak zamanla azalmayan performans sunmaktadır.
2. Maliyet ve İşgücü Tasarrufu: Kaplama tek seferlik bir uygulama olduğundan bakım maliyetleri düşüktür ve düzenli işgücü gerektirmemektedir.
3. Zaman ve Operasyonel Verimlilik: Kaplama, temizleme işlemi gerektirmediği için zaman kaybı yaratmaz ve operasyonel süreçleri kesintiye uğratmamaktadır.
4. Mekanik Aşınma ve Hasar Riski: Kaplama mekanik temas gerektirmediği için panellere zarar vermez. Temizleme robotları ise çizilme ve aşınma riski taşımamaktadır.
5. Verimlilik Artışı: Yansıma önleyici kaplama, daha fazla ışık emilimi sağlarken; kirlenme önleyici kaplama yüzeyin temiz kalmasını sağlayarak verimliliği artırmaktadır. Temizleme robotları ise sadece temizlik sağlar, verimlilik artışına doğrudan katkı sağlamamaktadır.

Bu yenilikçi temizlik yöntemleri, güneş panellerinin bakımını kolaylaştırarak verimliliği artırmakta ve işletme maliyetlerini düşürmektedir. Bu durum, enerji üretiminde daha sürdürülebilir ve ekonomik bir yaklaşımı beraberinde getirmektedir [35, 36].

Fotovoltaik (PV) modüllerin verimliliğini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bunlar arasında Şekil 6'da göründüğü gibi güneş ışınımı yoğunluğu, ortam sıcaklığı, modül yüzeyinin temizliği, toz birikimi, modül eğimi, güneş ışınlarının geliş açısı, hava kirliliği, malzeme kalitesi ve özellikleri, bağlantılar ve kablo kayıpları yer alır. Güneş ışınımı yoğunluğu ve ortam sıcaklığı, modül elektrik üretimini etkileyen temel faktörlerdir. Modül yüzeyinin temizliği, toz birikimi ve güneş ışınlarının geliş açısı, modül yüzeyine düşen güneş ışığının verimini etkiler. Hava kirliliği, güneş ışığının modüle ulaşmasını azaltarak verimliliği düşürebilir. Malzeme kalitesi, modülün yüksek verim ve uzun ömürlü olmasında kritik bir öneme sahiptir. Bağlantılar ve kablo kayıpları, elektrik iletimi sırasında enerji

kayıplarına neden olabilir. Tüm bu faktörlerin dikkate alınması, PV modüllerin verimliliğini artırmak için önemli bir adımdır [11, 37].



Şekil 6: Panel yüzeyine toz yerleşimini etkileyen faktörler

Yansıma, diğer önemli bir faktördür. Yüzey kirliliği, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemlerinin yansımasını artırarak çıkış gücünde ciddi bir düşüşe neden olur [38, 39]. Güneş ışığı, panel yüzeyine belirli bir açıyla gelir ve koruyucu camdan geçerek hücrelere ulaşır. Ancak cam yüzeyine gelen ışığın tamamı hücreye iletilmez; yaklaşık olarak %8-10'u temiz bir cam yüzeyinden geri yansıtılır. Saf bir silikon hücre, güneş ışığının %35-36'sını yansıtır. Işık yansımaları, optik güç kaybına yol açar ve elektrik üretiminde kayıplara neden olur. Bu nedenle, optik kayıpların azaltılması, panelin verimliliğini artırmak için önemli bir faktördür. Optik kayıpları azaltmak için kapak camına hem yansımayı önleyici bir kaplama hem de kirlenme önleyici bir kaplama uygulanmaktadır [40-43].

Güneş panellerinde kullanılan koruyucu camlar, düşük demir içeriğiyle üretilir. Cam kalınlığı genellikle 2,0 mm, 3,2 mm veya 4,0 mm olabilir; daha kalın camlar ışık geçirgenliğini azaltırken mekanik direnci artırır. Günümüzde genellikle 3,2 mm kalınlığındaki düşük demirli camlar tercih edilmektedir [42]. Daha ince cam kullanımı ise

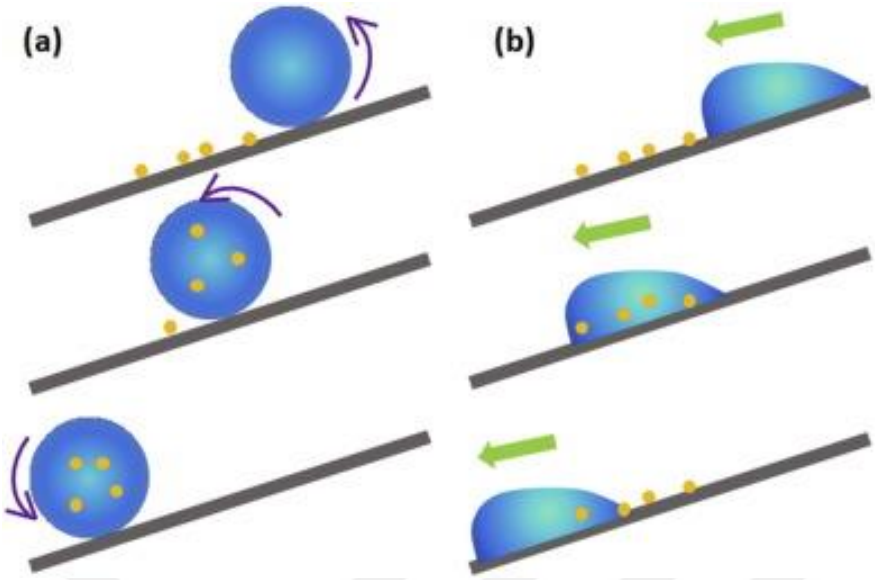
ışık soğurma kayıplarını azaltır. Kalın cam daha dayanıklı olmasına rağmen, ince camın avantajı yüksek ışık geçirgenliğine sahip olmasıdır [44].

Ayrıca, fotovoltaik sistemlerin performansını artırmak için otomatik temizleme sistemleri de kullanılmaktadır. Bu sistemler, su veya hava püskürtme yöntemleriyle güneş panellerinin üzerindeki tozu temizler ve verimliliği artırır. Otomatik temizleme sistemleri, düzenli bakım gerektirirken, fotovoltaik sistemlerin uzun vadeli performansını ve enerji üretimini optimize etmek için etkili bir çözüm sunar. Ancak, hız, kolaylık ve enerji üretiminde istikrarlı bir performans sağlamak için diğer teknolojiler üzerinde de çalışılmıştır [33, 44].

3.2. Kirlenme Önleyici Kaplamalar

Kendi kendini temizleyen kaplamaların iki türü mevcuttur: hidrofobik ve hidrofilik yüzeyler. Hidrofobik yüzeyler, hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyler olarak da sınıflandırılabilen damlacıkların hareketine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Bu bağlamda, yüzey ıslanabilirliği, etkili bir kendi kendini temizleme kaplamasının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kendi kendini temizleme, hidrofobik yüzeylerin su damlacıklarının hareketiyle toz parçacıklarını uzaklaştırma yeteneğiyle gösterilmektedir [45]. Şekil 7'de, damlacıkların kayma ve yuvarlanma hareketleri arasındaki farkları kendi kendini temizleme sürecinde göstermektedir. Örneğin, süperhidrofobik yüzeylerde, küresel damlacıklar toz ve kiri yuvarlanma hareketiyle uzaklaştırırken, hidrofobik yüzeylerde yarı küresel damlacıklar toz ve kiri kayma hareketiyle uzaklaştırmaktadır [46,47].

Parkin ve Palgrave [48] tarafından yapılan bir araştırma, damlacıkların yuvarlanma hareketinin yüzeyi temizleme açısından kayma hareketinden daha etkili olduğunu bulmuştur. Bu nedenle, etkili bir kendi kendini temizleme mekanizması elde etmek için hidrofobik yüzeyin çok yüksek bir statik su temas açısı (WCA) ve çok düşük bir yuvarlanma açısı olması gerekmektedir.



Şekil 7: Su damlasının a) yuvarlanma ve b) kayma hareketi [49]

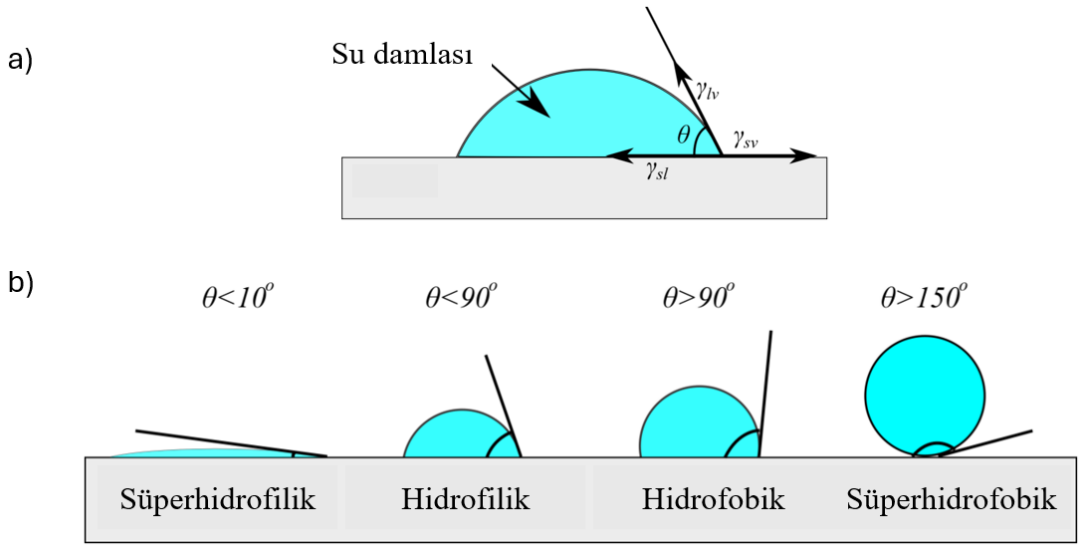
Süperhidrofobik yüzeyler, nilüfer yapraklarından esinlenerek geliştirilmiştir. Lotus yaprağının süperhidrofobik özelliği, hiyerarşik nano-mum kümeleşmeleri, nano-mum tübülleri ve mikro-papilla dizileri gibi pürüzlülük faktörlerinin ve mikro-nano yüzey yapılarının sinerjisiyle indüklenmektedir [50]. Şekil 7'te görülmektedir. Johnson ve ark., gerçek bir cam yüzey üzerinde süperhidrofobik yüzeylere öncülük eden çalışmalarında, Lotus yaprağının doğasını, Wenzel modeli ve Cassie-Baxter durumu gibi teorik ıslanabilirlik modelleriyle birleştirdiler [51]. Araştırmalarında, damla enerjisinin, damlaların titreşim enerjisi ve enerji bariyeri yüksekliğiyle doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Damlanın hareketi, damlanın çevresinin büzülmesini içerdiği için, yükseklik engelini aşmak için daha az enerji gerektirir. Düşme çevresi, ilerleyen eğri ve azalan eğri tarafından engellenir. İlerleyen açı eğrisi (Θ_A) ve azalan açı eğrisi (Θ_R), damlaların enerji bariyeri üzerindeki dinamik hareketini belirler. Histerezis temas açısı (Θ_H), sıvı damlacıklarının üçlü ara yüz temas hattındaki dinamik hareketini tanımlayan Θ_A ve Θ_R arasındaki farklarla belirlenir [49].

$$\Theta_H = \Theta_A - \Theta_R$$

Sıvının genleşmesi Θ_A, olarak adlandırılırken, sıvının büzülmesi Θ_R olarak adlandırılır. Mikro ve nano dokulara sahip hidrofobik yüzeyler, sıvının genleşme hareketini durdurarak

sıvı damlacıklarının temas açısını önemli ölçüde artırır. Bu sayede, sıvı damlacıklarının süperhidrofobik yüzeylerde daha yüksek bir hızda yuvarlanması mümkün olmaktadır.

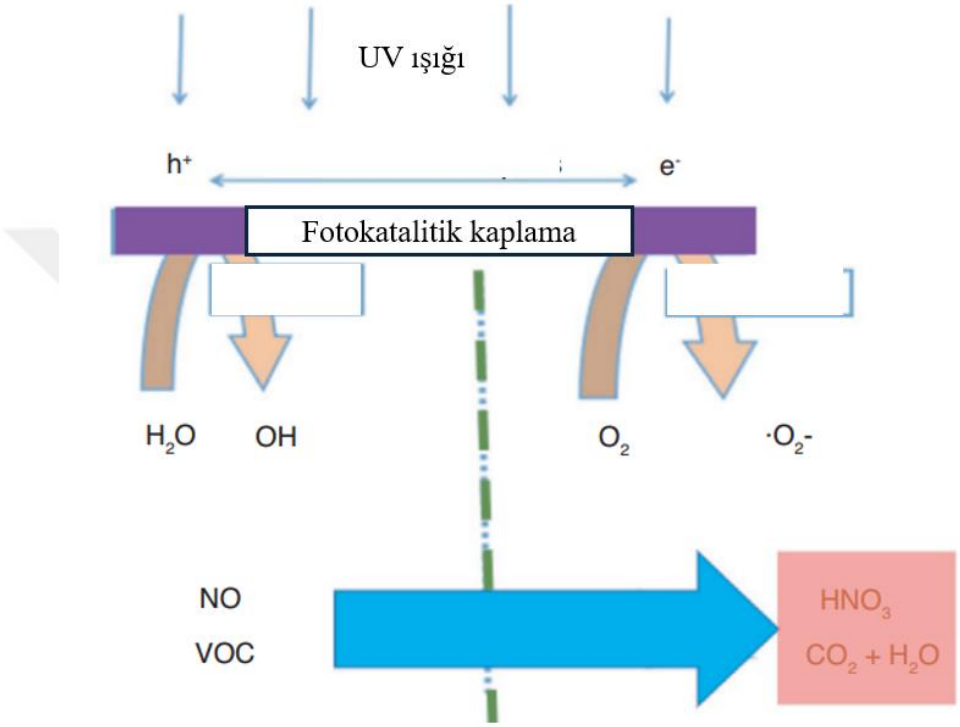
Yüzey ıslanabilirliği, sıvı temas açısı ile karakterize edilir ve su temas açısı (WCA), suyun ıslatma sıvısı olarak kullanıldığı durumdur. WCA'ya göre yüzey ıslanma davranışı dört kategoriye ayrılır: Hidrofilik yüzeyler 90°'den küçük, hidrofobik yüzeyler ise 90°'den büyük WCA'ya sahiptir. Süperhidrofilik yüzeyler, 10°'den küçük WCA'ya 1 saniyeden kısa sürede ulaşır; süperhidrofobik yüzeyler ise 150°'den büyük WCA'ya sahiptir [52]



Şekil 8: a) Su temas açısı (Θ), (b) Ölçülen su temas açısına göre ıslatma alanları [38]

Hidrofilik yüzeylerden farklı olarak, hidrofobik yüzeyler sıvının büzülme hareketini engelleyen ve sıvı damlacıklarının temas açısının azalmasına neden olan özelliklere sahiptir. Ayrıca, düşük Van der Waals kuvvetine sahip, toza zayıf yapışma özelliğine sahip bir kendi kendini temizleme kaplamanın geliştirilmesi önemlidir. Bu sayede, toz parçacıkları su damlacıklarına bağlı olmadan dış kuvvetler aracılığıyla kolayca uzaklaştırabilmektedir. Hidrofobik kaplamalı cam yüzeylerde düşük Van der Waals kuvveti ilkesi başarıyla uygulanmıştır. Bu ilke sayesinde, toz parçacıkları kuru hava veya nemli hava akımıyla başarılı bir şekilde uzaklaştırılmıştır [53].

Süperhidrofilik kaplamaların kendi kendini temizleme mekanizması, UV ışığına maruz kalınsın ya da olmasın başlatılabilir. Fotokatalizörler olarak kullanılan TiO_2 veya diğer yarıiletken malzemeler, süperhidrofilik yüzey üzerinde fotokatalitik bir mekanizma oluşturarak yeterli miktarda UV ışığına maruz kaldığında kir parçacıklarını azaltır. Şekil 9, fotokataliz sürecini kendi kendini temizleme mekanizması için göstermektedir [54].



Şekil 9: Fotokataliz sürecini kendi kendini temizleme mekanizması [55]

Süperhidrofilik kaplamalar, süperhidrofilik polimerlerin hidroksil, karboksil ve karbonil zincirleri gibi polar fonksiyonel gruplardan oluşması nedeniyle su damlacığını ince bir su tabakası halinde yayma özelliğine sahiptir. Polar fonksiyonel gruplar, katı yüzeyin su temas açısında tamamen ıslanmasına neden olmaktadır. Fotokataliz işlemi sırasında, su damlacıkları OH anyonlarına oksitlenirken, O_2 türü radikaller ise O_2 radikallerine indirgenmektedir. Elektron deliği radikalleri, organik kirleticileri ve mikro kirleticileri azaltmak için fotokatalitik oksidasyonu gerçekleştirmektedir. Genellikle TiO_2, fotokatalizör malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılır, ancak bant aralığı enerjisi yalnızca UV radyasyonunu soğurabilmektedir. Bu nedenle, TiO_2 malzemelerinin görünür ışık bölgesine duyarlılığını artırmak için polianilin, nitrojen, demir tungsten ve silikon dioksit gibi çeşitli safsızlıklar katılmaktadır [38].

3.3. Yansıma Önleyici Kaplamalar

Günümüzde fotovoltaik panellerinin %70'inden fazlasının sahip olduğu yansıma önleyici kaplamalar optik kayıpları minimuma indirmeyi hedeflemektedir. Yansıma önleyici kaplamalar çeşitli yöntem ve uygulama alanlarına sahiptir. Örneğin hem hücre yüzeyine hem de cam üzerine uygulanabilmektedir. Güneş panellerinde kullanılan yansıma önleyici kaplamalar, panel verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu kaplamalar farklı optik ve mekanik özelliklere sahip çeşitli malzemelerden yapılır:

- SiO_2 (Silisyum Dioksit): Düşük kırılma indisi ve yüksek optik şeffaflık.
- MgF_2 (Magnezyum Florür): Yüksek optik şeffaflık, düşük kırılma indisi.
- TiO_2 (Titanyum Dioksit): Yüksek kırılma indisi, dayanıklılık.
- Si_3N_4 (Silisyum Nitrür): İyi mekanik dayanıklılık, optik özellikler.
- ZrO_2 (Zirkonyum Dioksit): Yüksek kırılma indisi, sertlik.

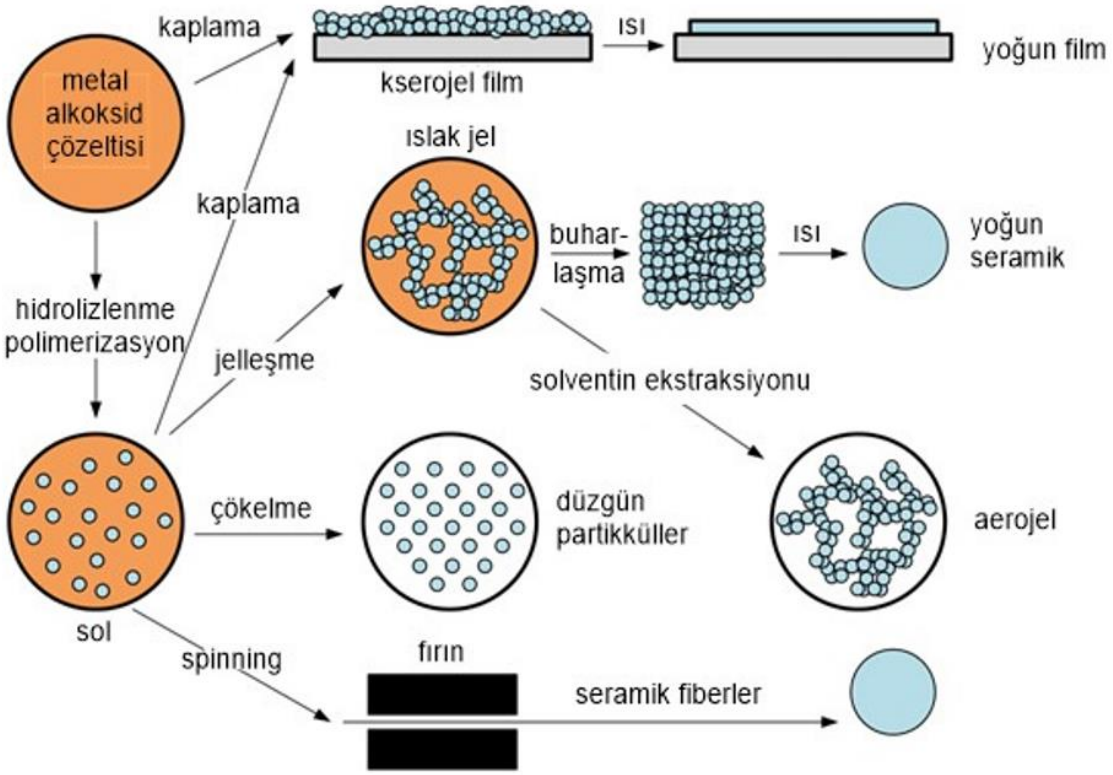
Bu malzemeler, güneş panellerinde ışık yansımasını minimize ederek verimliliği artırır ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı artırır [56].

Tablo 1: PV panel kaplamasında kullanılan başlıca malzemelerin karşılaştırılması

Malzeme	Kırılma İndisi	Kalınlık (nm)	Verimlilik Kazanımı (%)	Maliyet (USD/m^2)
SiO_2	1.46	100	2- 3	0.1- 0.2
MgF_2	1.38	100	3- 5	0.2- 0.3
TiO_2	2.55	50	5- 7	0.3- 0.4
Si_3N_4	2.02	100	4- 6	0.4- 0.5
ZrO_2	2.20	100	5- 7	0.5- 0.6

3.4. Kaplama Yöntemleri

Sol-jel yöntemleri, şeffaflık ve kendi kendini temizleme özelliklerine sahip süperhidrofobik ve süperhidrofilik kaplamaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır[57]. İnce film üretiminde sol-jel yönteminin geniş ölçüde kullanılmasının sebebi, nispeten basit ve maliyet etkin bir süreç olmasıdır. Sol-jel sürecinin prensibi, bir sıvı içindeki bir moleküler poli-kondensasyon reaksiyonları yoluyla bir oksit ağı oluşturmasıdır [55]. Şekil 10, sol-jel yöntemi kullanılarak kaplama hazırlamanın temel adımlarını göstermektedir.



Şekil 10: Sol-jel yönteminin temel adımları [58]

Yaygın olarak kullanıldığından, sol-jel tekniği istenen ürünleri elde etmek için parametrelerin değiştirilebileceği daha esnek bir süreçtir. En az kalınlığa sahip ince filmler, malzeme tüketimi açısından daha ekonomiktir ve genellikle filmlerin performansını iyileştirebilirler [59].

Örneğin, Choi ve ark. [60], UV ışığının TiO_2 filmlere nüfuz etme derinliğinin yaklaşık olarak 0.3 μm olduğunu ve daha ince filmlerin daha yüksek bir fotokatalitik verimlilik sağlayacağını rapor etmişlerdir. Ayrıca, sol-jel yöntemiyle geliştirilen ince fotokatalitik kaplamaların güneş paneli verimliliğini de artırdığı tespit edilmiştir.

Çalıgülü ve ark. [61], sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile TiO_2 ince filmler üretmişlerdir. Üretilen TiO_2 esaslı ince filmlerin Ca katkı oranıyla kristal yapısının değiştiğini gözlemlemişlerdir. Döndürerek kaplama işlemi için optimum döndürme süresini, döndürme hızını ve film katsayısını belirlemişlerdir. Ca katkı oranının artmasıyla yasak enerji aralığının arttığını tespit etmişlerdir.

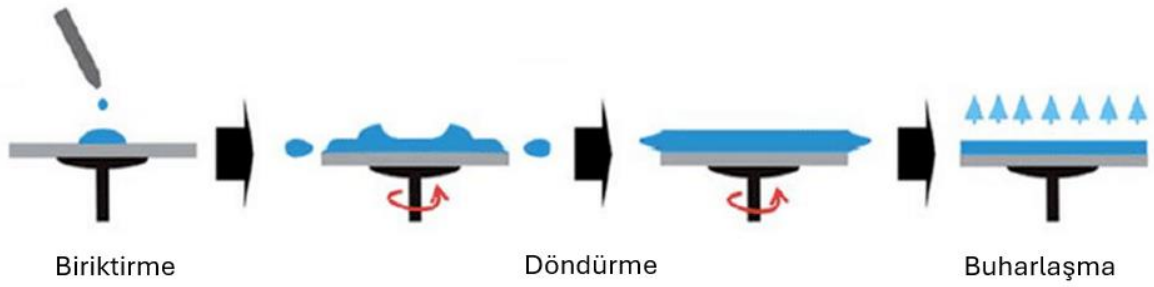
Minami ve ark. [58], sol-jel yöntemiyle hazırlanan gözenekli alumina jel filmlerini kaynar suda bekleterek alumina ince filmler ürettiler. Hidrolize edildiğinde, fluoroalkiltrimetoksisilan (FAS) alumina filmlerine kaplandı ve su temas açısının, bekletme süresinin artmasıyla arttığı ve 30 saniye beklemenin süper hidrofobiklik ve %92 geçirgenlikle yüksek şeffaflık sağlamak için yeterli olduğu bulundu.

Ayrıca, Tao ve ark. [62], metiltrietoksisilan ve tetraetoksisilan kullanarak sol-jel yöntemiyle anti reflektif (AR) kaplamalar hazırladılar; geliştirilen AR kaplamalar, güneş hücresi uygulamaları ve optik cihazlarda faydalı olan gelişmiş nem direncine sahipti.

Yuan Yang ve ark. [63]cam substratlar üzerinde sol-jel tekniği kullanılarak süperhidrofilik yansıma önleyici sağlam kaplamalar geliştirdi. Üç kat kendini SiO_2 -TiO_2, TiO_2 ve nanoporöz SiO_2 -TiO_2 tabakalarından oluşan bir üç katmanlı kaplama uygulandı. Geliştirilen yansıma önleyici filmler, 500-700 nm aralığında tutarlı yüksek geçirgenlik değerlerine sahipti ve bu bölgedeki ortalama geçirgenlik %99,4 idi. Süperhidrofilik özellikleri UV ışığı olmadan 30 gün boyunca devam edebildiğinden, kaplamaların sağlamlığı da dikkate değerdi. Ayrıca, bu üç katmanlı kaplamalar UV ışınları altında organik maddelerin parçalanmasında iyi bir yetenek gösterdiler.

3.4.1. Spin-Coating (Döndürerek Kaplama)

Spin-coating (döndürerek) kaplama işlemi sırasında çözelti, yüzeye yayılarak eşit bir şekilde dağıtılır ve yapışma ısının etkisiyle gerçekleştirilir. Döndürerek kaplama işlemi sırasında kaplama kalınlığı, çözeltinin viskozitesi, dönme hızı ve dönüş süresiyle kontrol edilir. Uygulama Şekil 11'de görüldüğü gibi, sol-jel biriktirme, döndürme, eğirme sonrası ve buharlaşma olmak üzere 4 aşamadan oluşur. Yüksek viskoziteye [64] ve düşük yoğunluğa sahip sol-jelin uygulanması zordur. Kaplama işlemi sırasında fazla sol-jel yüzeyden atıldığı için büyük miktarda sol-jel tüketimi gerçekleşir. Spin-coating ve dip-coating (daldırma), uygulama açısından ucuz ve hızlı yöntemlerdir [65].



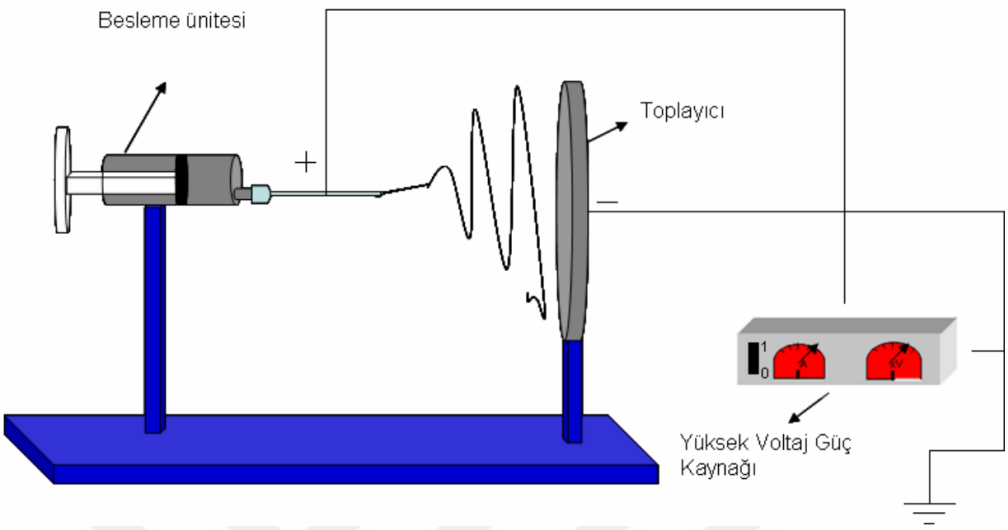
Şekil 11: Döndürerek kaplama yöntemi [66]

Öztürk ve ark. [67], kalınlıkları farklı cam ve p-tipi silikon alt tabakaları üzerine döndürerek çözelti kaplama metoduyla saf TiO_2 ince tabakalar üretmiştir. Bu tabakaların optik, elektriksel ve güneş enerjisi özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, kobalt tuzu ve çeşitli geçiş metalleri ekleyerek TiO_2 ince tabakaların güneş enerjisi özelliklerini geliştirdiklerini gözlemlemişlerdir.

3.4.2. Elektroeğirme Yöntemi

Elektroeğirme, polimerlerden sürekli olarak mikro/nanofiberlerin üretildiği basit ve esnek bir tekniktir [68]. Doğal ve sentetik polimerlerden süperhidrofobik kaplamalar geliştirmek için uyarlanabilen, Şekil 12'de de görüldüğü gibi nispeten basit bir tekniktir. Elektroeğirme işlemi, viskoz polimer çözeltisi içeren şırınga ile iletken alt tabaka arasında yüksek bir elektrik alan kullanılarak gerçekleştirilir. Düzenli fiberler oluşturmak için polimerin molekül ağırlığı ve çözeltinin konsantrasyonu dikkate alınmalıdır. Polimer ve hidrofobik

malzemenin karışımının elektroeğirlenmesi veya ikincil yapıların tanıtılmasıyla düzenli süperhidrofobik fiberler elde edilebilir [69, 70].



Şekil 12: Elektroeğirme yönteminin şematik gösterimi [71]

Elektroeğirlenmiş filmlerin morfolojileri, ıslanabilirliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmalar ayrıca, boncuk içeren bir yapıya sahip yüzeylerin, fiber içeren yüzeylere göre daha hidrofobik olduğunu ortaya koymuştur [66]. Bu nedenle, düşük molekül ağırlığına sahip bir polimerden yapılmış hidrofobik bir yüzey, yüksek molekül ağırlığına sahip bir polimerden yapılmış bir yüzeyden daha yüksek bir ıslanmazlık açısı (WCA) gösterir. Düşük molekül ağırlığına sahip polimerler boncuk benzeri yapılar oluşturur ve yaklaşık 167°'lik bir maksimum WCA üretir.

Ma ve ark. [72], poly(caprolectone) (PCL) elektroeğirmeleme ile polimerize perfluoroalkil etil metakrilat (PPFEMA) ile başlatılmış kimyasal buhar biriktirme (i-CVD) yöntemini birleştirerek 175°'lik bir WCA elde etmiştir. Böylece elde edilen hiyerarşik yüzey, son derece düşük bir yüzey enerjisiyle istikrarlı bir süperhidrofobiklik sergilemiştir.

Gu ve ark. [73], elektroeğirmeleme kullanarak düşük maliyetli, yüksek verimli su-yağ ayrımı için süper ince süperhidrofobik-süperoleofilik elyaflı poli(viniliden flourid) (PVDF) membranlar hazırlamıştır. Ultra ince elektroeğirlenmiş elyaflı PVDF membranlar, WCA'sını 153°'ye kadar göstermiştir.

Sarkın ve ark. [74], elektroeğirme yöntemiyle çeşitli kaplama çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada uygulama süresinin artması üst üste ve homojen olmayan bir görüntü oluşumuna sebep olmuş, akış hızının artırılması ise olumsuz etki yapmıştır. En ideal sonuçlar için akış hızı 0,1 ml/saat ve çalışma gerilimi 20 kV gerilimde elde edilmiştir. Ancak, elde edilen kaplamalar optik mikroskop ile incelendiğinde ve spektrofotometre ile ışık geçirgenlikleri (%T) ölçümleri yapıldığında, kaplamaların homojen dağılmadığı ve yüzey tutunumlarının düşük olduğu gözlenmiştir. En düşük ışık geçirgenlikleri %18,5 ile %27,1 arasında, en yüksek ışık geçirgenlikleri ise %64,4 ile %66,2 arasında ölçülmüş olup, bu veriler boş ve kaplamasız bir lamın %91,7 ışık geçirgenlik değerlerinin oldukça altında kalmıştır. Sonuç olarak, elektroeğirme yöntemiyle yapılan kaplamalar, homojen dağılım ve yeterli ışık geçirgenliği sağlayamadığı için başarılı bulunmamış ve alternatif yöntemlere yönelinmiştir.

Ayrıca, Fan ve ark. [71] cam substratlara poliviniliden florür (PVDF) ve florlu silan moleküllerinin (FSM) kombinasyonunu elektroeğirmeleme yöntemiyle uygulayarak çift katmanlı süperhidrofobik bir yüzey geliştirmişlerdir. Yüksek en-boy oranına sahip pürüzlü bir kaplama oluşturulmuş ve bu kaplamanın 170.2° WCA değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

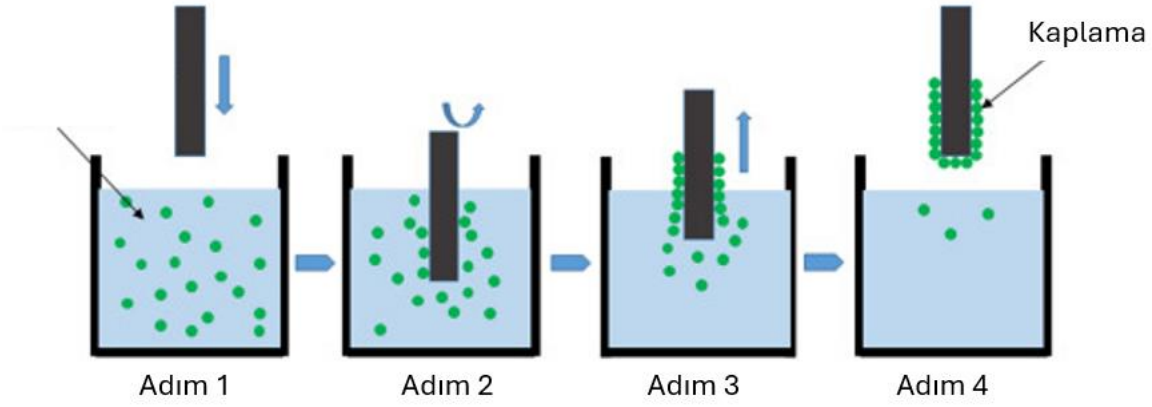
3.4.3. Daldırma Yöntemi

Daldırma kaplama, basitlik, kontrol edilebilirlik, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik gibi avantajlara sahiptir. Genellikle, süreç, substratın kontrollü bir hızda (besleme hızı) öncü çözeltiye daldırılması ve çıkarılması şeklinde tanımlanır. Şekil 13'te görüldüğü gibi, sürecin adımları, daldırma, başlatma, çöktürme, buharlaşma ve drene etme olarak özetlenebilmektedir. Daldırma kaplama, özellikle çift fonksiyonlu veya çok fonksiyonlu filmler için basit ve hızlı olduğu için nano yapısal kaplamaların hazırlanmasında sıkça tercih edilmektedir. Daldırma kaplama tekniğinin zamandan tasarruf sağlayan ve düşük maliyetli bir yöntem olarak yansıma önleyici kaplamaların üretilmesinde kullanılmasıyla ilgili birçok literatür raporu bulunmaktadır.

Helsch ve ark. [75], güneş enerjisi kule santrallerinin alıcı kapak malzemelerinin yansıtıcı kayıplarını en aza indirmek için silika cam üzerinde sol-jel daldırma kaplama yöntemiyle çeyrek dalga yansıma önleyici kaplamaları üretmişlerdir. Kaplanmış camın mükemmel

geçirgenliğe (%98.6) ve termal dirence sahip olduğu kanıtlanmıştır. Daldırma kaplamalarının diğer tekniklerle hazırlanan kaplamalara kıyasla homojenlik, stokiyometri kontrolü, saflık ve geniş ve karmaşık alan substratlar üzerine kaplama yapabilme yeteneği gibi mükemmel özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, bazı eksiklikler de bulunmaktadır. Örneğin, üretilen kaplamaların kalınlığı ve düzenliliği, substratlar ve sıvı banyo ve gaz akışı gibi akış koşulları gibi faktörlere duyarlıdır. Aynı zamanda, daldırma kaplama ile yüzey pürüzlülüğü kontrolü sağlamanın, sol-jel sıvısının hazırlama sürecinde akmasından dolayı hala bir zorluk olduğu bilim insanları için bir meydan okumadır [68, 75].

Zou ve ark. [76], süperhidrofilik silika nanoparçacık filmlerinin kendi kendini temizleme özelliklerini incelemiştir. Bu filmler, cam yüzeylere daldırma kaplama yöntemiyle uygulanmış ve ışık geçirgenliğini %4.3 oranında artırmıştır. Simüle edilmiş yağmur koşullarında test edilen bu filmler, güneş panellerinin verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, süperhidrofilik kaplamaların enerji uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir. Şekil 13'te daldırma yöntemi kısaca gösterilmiştir.



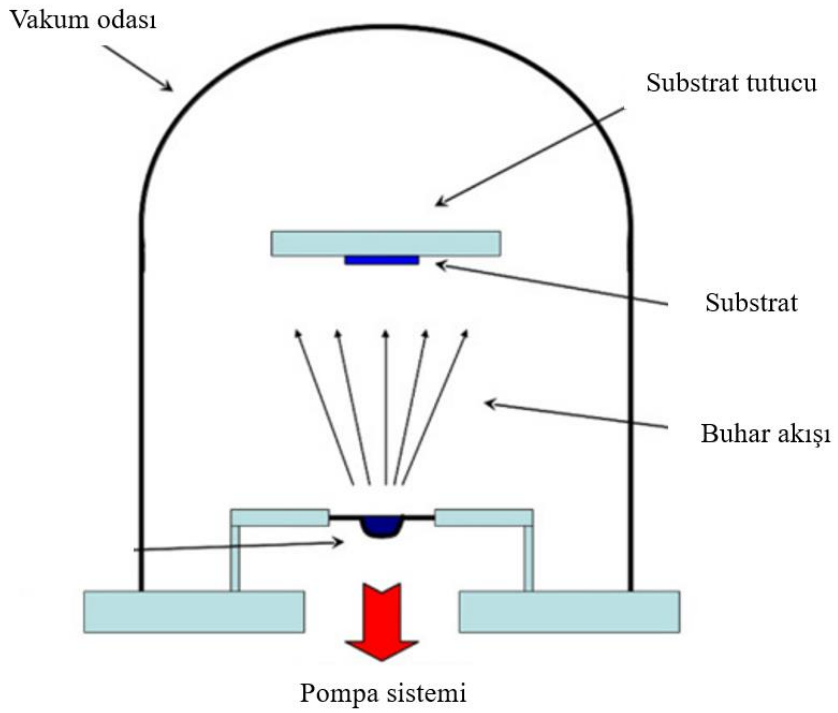
Şekil 13: Dip-coating yöntemi (a) Daldırma, (b) Kaplama süresi, (c) Çıkartma ve süzme, (d) Kuruma [76]

3.4.4. Termal Buharlaşma Yardımlı Kaplama

Süperhidrofobik hiyerarşik yapılar, gaz fazı ortamı kullanan teknikler aracılığıyla da üretilebilmektedir. Bu yöntemler, elektrotlar aracılığıyla desteklenen hassas ve kontrol edilebilir pürüzlü yüzeylere izin vermektedir. Bunlar arasında plazma etsi ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri yer alır [77]. Bu yöntemler kullanılarak, florokarbonlar, metal oksitler ve organik ve inorganik malzemeler de dahil olmak üzere çeşitli malzemeler kullanılarak

güneş paneli uygulamaları için süperhidrofobik kaplamalar üretilebilmektedir. Bu yöntem, birçok yansıma önleyici kaplamanın geliştirilmesi için kullanılmaktadır [78, 79].

Örneğin, Zaier ve ark. [80] şekil 14'te gösterilen termal buharlaştırma tekniğini kullanarak ZnO ince filmler hazırladılar ve ardından farklı sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilen ardışık ısıl işlemlerle yapısal, elektriksel ve optik özellikleri geliştirdiler. Bu tür kaplamalar, görünür dalga boyu aralığında %90' dan daha yüksek iletim spektrumları sergilemiştir.



Şekil 14: Termal buharlaşma ile kaplama yöntemini şematik gösterimi [81]

3.4.5. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi

Kimyasal buhar biriktirme (CVD), ince filmlerin ve kaplamaların çeşitli uygulamalarda, yarıiletkenlerden dielektriklere ve metalik kaplamalara kadar, biriktirilmesi için kullanılan çok yönlü bir biriktirme tekniğidir. CVD, yüksek sıcaklıklarda bir substrat yüzeyine kimyasal reaksiyonlar yoluyla ince bir film tabakası biriktirerek substrat yüzeyinin özelliklerini değiştirmektedir. CVD süreci, reaktif gazları ve/veya taşıyıcı gazı bir reaksiyon odasına taşımayı içerir ve ardından bir film oluşturmak için bir biriktirme işlemi gerçekleştirilir. Film tabakası çözülme, oksidasyon, hidroliz veya bileşik oluşumu yoluyla

gerçekleştirilebilir. Bu reaksiyonlar genellikle gaz fazında gerçekleşir ve ara gazlar substrata soğurma olur ve ardından yüzey reaksiyonlarına girmektedir. Ancak CVD, pahalı vakum fırınlarının gerektiği ve silisyum substratlar üzerinde anti-yansıtıcı (AR) ince film kaplamalarının büyütülmesini içerdiği için maliyetli bir süreçtir. Ayrıca, son derece toksik ve yanıcı olan silan gazı kullanılması süreci karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, ince filmler üretmek için değiştirilmiş yöntemler geliştirilmiştir [82].

Örneğin Leyden ve ark. [83] hibrit kimyasal buhar biriktirmeyi, güneş hücresi uygulamalarında daha yüksek verimlilik sunan organometal halojenid bazlı perovskit ince filmlerini üretmek için kullanmıştır.

CVD ayrıca nano-poröz yapılar ve pürüzlülüğe sahip yüksek derecede süperhidrofobik yüzeylerin üretilmesi için verimli bir yöntemdir. Rezaei ve ark. [78], TEOS (tetraetil ortosilikat) ve vinyltrimetoksisilan (VTMS) kullanarak yeni bir adımlı CVD ve değiştirilmiş yöntem kullanarak öz temizleme özelliklerine sahip süperhidrofobik silika yüzeyler hazırlamış, yüksek su temas açısı (> 160°) ve düşük kayma açısı (<5°) sergilemiştir. Bu işlemin bir örneği olarak Zheng ve ark. [84], kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle silikon substratlara kaplanmış nano çubuk dizileri ve nano tabakalardan oluşan ZnS hiyerarşik yapılar üretmiştir. Bu kaplamaların öz temizleme özellikleri test edildi ve 153.8° su temas açısı elde edilmiştir.

Ayrıca, son zamanlarda Parkin ve ark. [85], atmosfer basıncında CVD kullanarak cam substratlar üzerinde çok fonksiyonlu VO_2/SiO_2 /TiO_2 filmler geliştirmiştir. İnce filmler yüksek şeffaflık, karşılaştırılabilir öz temizleme özellikleri ve görünür ışık iletiminde %30 artış sergilemiştir. Kimyasal buhar biriktirme (CVD), geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan amorf, tek kristalli ve çok kristalli ince filmlerin ve kaplamaların biriktirilmesi için ana işleme yöntemlerinden biridir.

3.4.6. Püskürtme (Sprey) Yöntemi

Püskürtme tekniği, bir çözeltiyi püskürtmek suretiyle önceden ısıtılmış bir yüzeye uygulanır. Kaplama kalitesini belirleyen faktörler püskürtme süresi, püskürtme mesafesi, yüzey sıcaklığı ve çözelti içeriğidir [84]. Bu teknikte yüzey sıcaklığı en önemli parametre olarak öne çıkar. Bu teknik, büyük yüzeylere uygulanabilir, hızlı ve pratiktir. Çözelti

püskürtme sırasında oluşan damlacıklar, uygulamanın ortak bir zorluğudur. Uygulamadan sonra, yüzeye yapışan sıvı çözeltinin katılaşması için yeniden ısıtma işlemi gerçekleştirilebilir. Yansıma önleyici kaplamaların ince film tabakalarını biriktirmek için genellikle iyon-ışını püskürtme, reaktif püskürtme veya manyetron püskürtme gibi çeşitli biriktirme sistemleri mevcuttur [85].

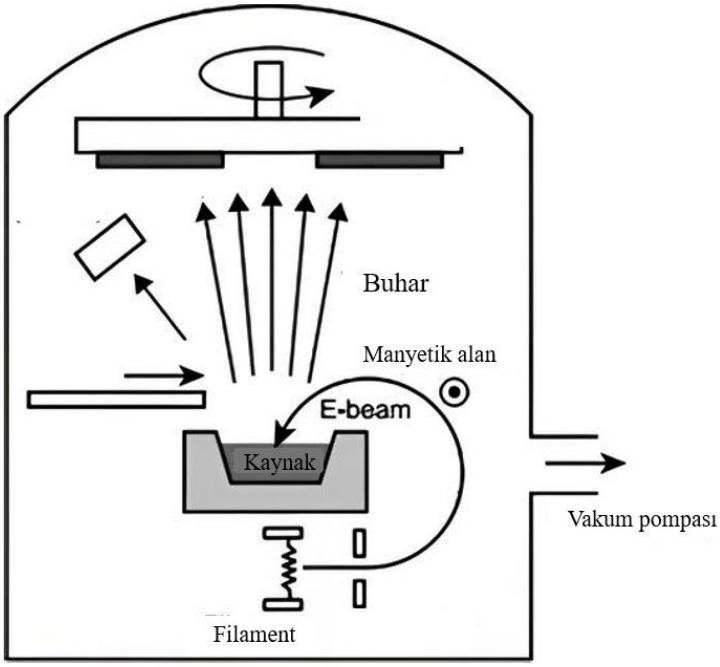
Örneğin, Zhaoyong Wang ve ark. [86] manyetron püskürtme tekniğini kullanarak tek malzeme TiO_2 ile çift katmanlı yansıma önleyici kaplama üretmiştir. Düşük yansıtma indisine sahip tabaka doğrudan reaktif manyetron püskürtme ile elde edilirken, yüksek yansıtma indisine sahip tabaka enerji filtreleme manyetron püskürtme ile hazırlanmıştır. Kaplama, görünür spektrumda ortalama ve maksimum geçirgenlik olarak sırasıyla %88.4 ve %98.9 olan mükemmel foto katalitik performans ve anti yansıma özellikleri sergilemiştir [87].

3.4.7. RF ve DC Manyetron

Sputterleme yöntemlerinin her ikisi de bir metal yüzeye veya metal bir maddeye kaplama yapmak için kullanılır. Elektriksel olarak iletken yüzeylere kaplama yapmak için tercih edilen DC manyetron yöntemi, 0-1000 V aralığında DC gerilimi uygular. RF manyetron yöntemi ise tüm yüzeylere uygulanabilir ve kaplamalar 13.56 MHz frekansında gerçekleştirilir. RF manyetron sputterleme yöntemi, DC manyetron yöntemine göre daha pahalıdır. RF yöntemi vakumlu bir odada uygulanır. Uygulama hızı diğer yöntemlere göre daha yavaş olmasına rağmen genellikle daha ucuzdur. İki yöntemin birlikte kullanıldığı hibrit çalışmalar da bulunmaktadır [81, 88].

3.4.8. Elektron Işını (E-beam)

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yönteminin bir alt uygulamasıdır. Şekil 15’te görülen E-beam yöntemi, termal buharlaşma yerine uygulanabilir. Vakumlu bir odada 10 kV DC gerilim uygulayarak yüzey ve maddeler ısıtılır ve kapalı bir ortamda kaplanır. Kaplanacak yüzeyin sıcaklığı 3000 °C'ye kadar artırılabilir. Bu sıcaklıklar, kaplanacak yüzeyde erime sorunlarına neden olabilir [89].



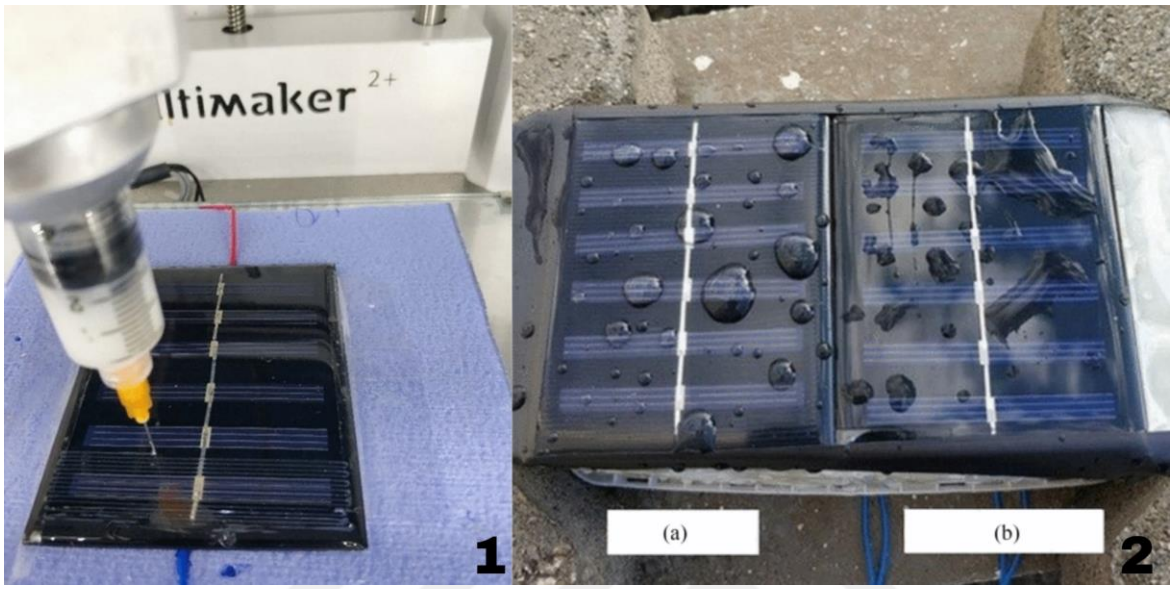
Şekil 15: Elektron ışını ile kaplama yöntemi [90]

3.4.9. 3D Yazıcı Yöntemi

Bu yöntemde sol-gel hazırlanarak 3D yazıcılar sayesinde nano boyutta kaplamalar yapılmaktadır. Sarkın ve ark. [91], güneş enerjisi panellerinin verimliliğini artırmak amacıyla 3 boyutlu yazıcı ile kaplama yöntemini geliştirdi. Bu yöntemde 3D yazıcı kullanılarak PV panellerin yüzeyine tek katlı kaplama uygulandı. Kaplamaların ışık geçirgenliğinin %84 olduğu görülmüştür. Yapılan dış ortam testleri sonucunda, kaplama uygulanan panellerin verimliliğinde %8,7' ye kadar bir artış gözlendi. Şekil 16 çalışıldığı gibi 3 boyutlu yazıcıların kullanılması, diğer kaplama yöntemlerinin aksine fotovoltaik panellere sonradan uygulanma olanak sunması sayesinde eşsiz bir özellik taşımaktadır. Bu yeni teknik, güneş enerjisi üretiminde potansiyel bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

Tüm bu kaplama yöntemlerini detaylı bir şekilde incelemek için Tablo 2 hazırlanmış ve kaplama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu tabloda yöntemler kısaca açıklanarak avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmektedir.

Tüm bu kaplama yöntemlerini detaylı bir şekilde incelemek için Tablo 2 hazırlanmış ve kaplama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu tabloda yöntemler kısaca açıklanarak avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmektedir [64, 91].



Şekil 16: 3D yazıcı ile nano boyutta polimer kaplanması, 2) a- kaplanmış hidrofobik yüzeyin su teması, b- kaplama olmayan yüzeyin su teması [91]

Tablo 2: PV panel kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Açıklama	Avantajı	Dezavantajı
Sol-Jel Yöntemi	PV panelinin yüzeyine koloidal bir çözelti olan bir sol uygulanır. Solun daha sonra sertleşmesine izin verilir ve istenen malzemeden ince bir film oluşturmaktadır.	Kolay uygulanabilir, düşük maliyetli, ince film kaplamaları oluşturabilmektedir	İşlem süresi uzun olabilir, bazı bileşenlerin termal kararlılığı düşük olabilmektedir.
Çözücü Bazlı Yöntemler	İstenen malzemeyi çözmek için aseton veya metanol gibi bir çözücü kullanılır. Çözelti daha sonra PV panelinin yüzeyine uygulanmaktadır.	Farklı malzemeler için uygulanabilir ve uygun maliyetlidir.	Çözelti hazırlama ve uygulama sürecinde kontrol zorluğu, solvent kullanımı çevresel sorunlara neden olabilmektedir.
Döndürerek (Eğirme) Kaplama	PV panelin yüzeyine az miktarda istenen malzeme yerleştirilir. Panel daha sonra yüksek hızda döndürülür, bu da malzemenin yayılmasına ve ince bir film oluşturmasına neden olur.	Yüzeyin homojen kaplanması ve yüksek kaplama verimine sahiptir.	Büyük ölçekli üretim için karmaşık ekipman gerektirebilmektedir.

Elektroeğirme Yöntemi	İstenen malzemenin yüklü bir çözeltisini oluşturmak için yüksek voltajlı bir elektrik alanı kullanılmaktadır. Çözelti daha sonra küçük bir damlacık olarak püskürtülür ve PV panelin yüzeyini ince fiberler kaplar.	Yüksek yüzey alanı, esneklik ve uyumlu kaplama, nano ölçekte kontrol edilebilmektedir.	Yavaş üretim hızı, karmaşık ekipman gerektirebilir ve nano ölçekte homojenlik sağlamak zor olabilmektedir.
Daldırma Yöntemiyle Kaplama	PV panelin kaplama çözeltisine daldırılmasıdır. Panel daha sonra çözeltiden çıkarılıp ve kurumaya bırakılmaktadır.	Kolay uygulanabilir, kaplama kalınlığının kontrolü, büyük ölçekli üretim için uygundur.	Kaplama malzemesi ve çözeltinin temizliği, bazı durumlarda homojenlik sağlanması zor olabilir
Buhar Yardımlı Kaplama Yöntemleri	Malzemenin buhar fazında oluşturulması ve PV panel yüzeyine kondensasyonudur.	Yüksek kaplama homojenliği, ince film kaplamaları oluşturabilir.	Pahalı ekipman gerektirebilir ve karmaşık işlem kontrolüne sahiptir.
Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemiyle Kaplama	PV panelinin yüzeyinde istenen malzemeden ince bir film oluşturmak için kimyasal bir reaksiyon kullanılmaktadır.	Yüksek kaplama kalitesi, kontrol edilebilir film kalınlığı, büyük ölçekli üretim için uygundur.	Yüksek maliyet, karmaşık ekipman gerektirmektedir.

Sprey (Püskürtme) ile Kaplama	PV panelinin yüzeyine bir kaplama püskürtülmektedir.	Kolay uygulanabilir, büyük ölçekli üretim için uygun, çeşitli malzemeler için uygulanabilmektedir.	Kaplama kalınlığı kontrolü zor olabilir, bazı malzemelerde termal hasar riski olabilmektedir.
RF ve DC Manyetron	Bir plazma oluşturmak için bir radyo frekansı (RF) veya doğru akım (DC) manyetronu kullanılır. Plazma daha sonra PV panelinin yüzeyinde istenen malzemeden ince bir film biriktirmek için kullanılmaktadır.	Yüksek kaplama hızı, uygun maliyetli, yüzeyin homojen kaplanmasını sağlamaktadır	Yüksek güç gereksinimi, karmaşık ekipman gerektirebilir, kontrol zorluğu bulunmaktadır.
Elektron Işını (E-Beam)	Bir plazma oluşturmak için elektron ışını kullanılır. Plazma daha sonra PV panelinin yüzeyinde istenen malzemeden ince bir film biriktirmek için kullanılır.	Yüksek kontrol edilebilirlik, ince film kaplamaları oluşturabilir, yüksek film kalitesi oluşturabilmektedir.	Pahalı ekipman gerektirebilir, vakum koşullarının sağlanması gerekmektedir.
Püskürtme ile Kaplama	Malzemenin yüzeye püskürtülmesidir.	Kolay uygulanabilir, büyük ölçekli üretim için uygun, çeşitli malzemeler için uygulanabilmektedir.	Kaplama kalınlığı kontrolü zor olabilir, bazı malzemelerde termal hasar riski olabilmektedir.

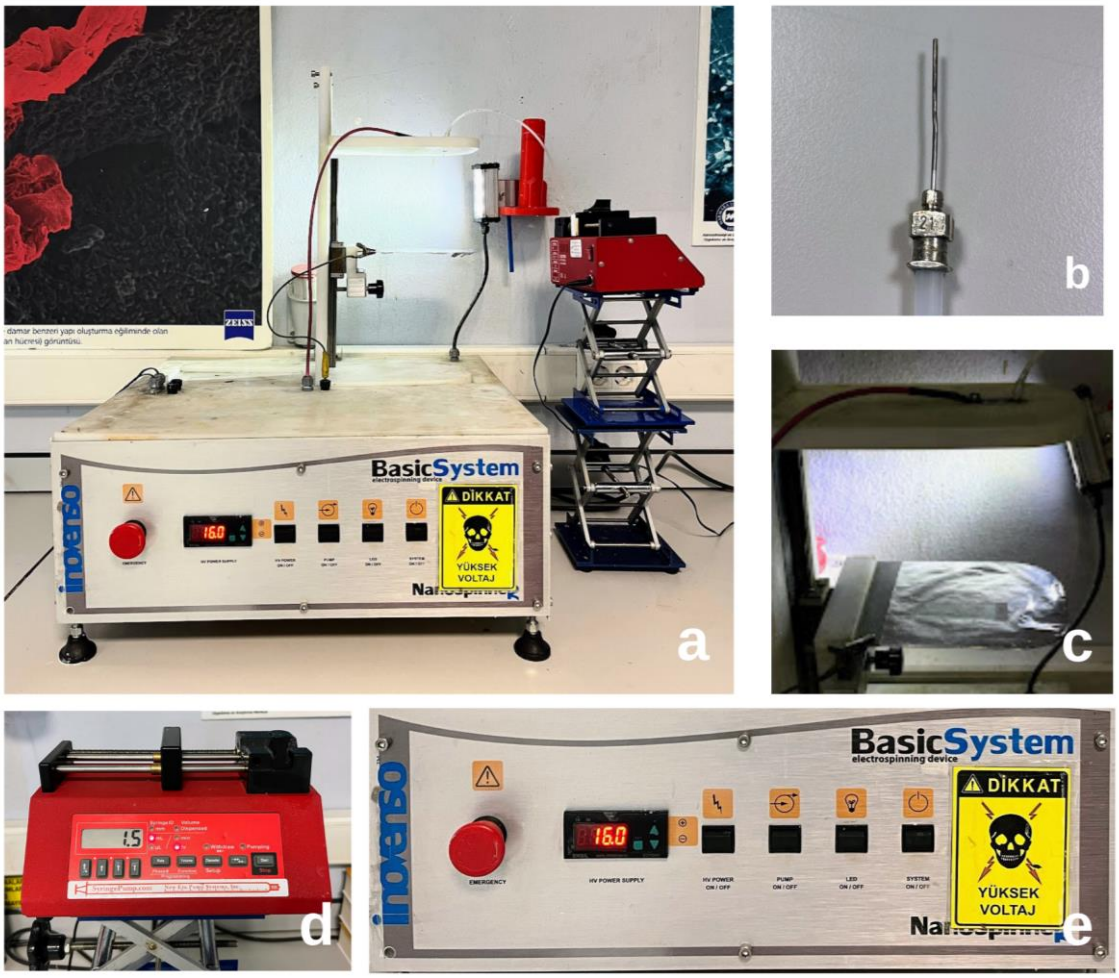
4. MATERYAL ve METOT

4.1. Materyaller

4.1.1. Kaplama Materyalleri

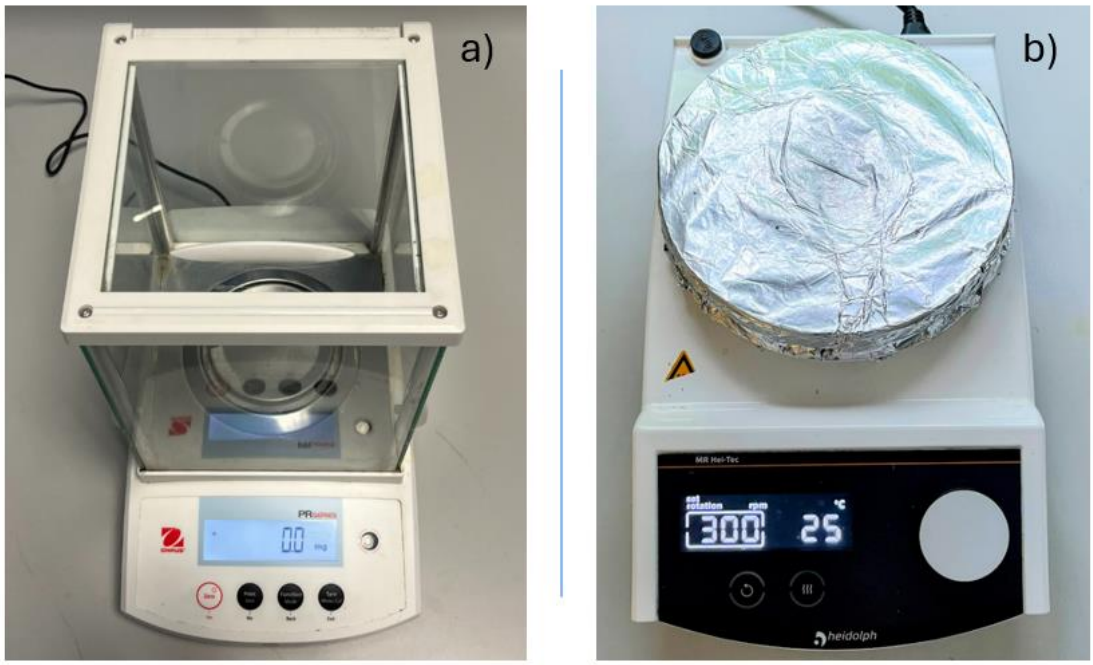
Araştırma sonucunda kullanılmaya karar verilen maddeler nano boyutlarda SiO_2 ve TiO_2 olup yöntem olarak elektroeğirme yöntemi tercih edilmiştir. İlk olarak, uygun polimer ve çözücülerle homojen bir sol-jel hazırlanması gerekmektedir. Bu amaçla, maddelerin boyutları ve özellikleri incelenerek, SiO_2 için Molchem-UK'den %99,5 saflıkta ve 10-20 nm boyut aralığında gözeneksiz nano partiküller temin edilmiştir. TiO_2 için ise rutil yapıda, Molchem UK markasından %99,5 saflıkta ve 10-30 nm boyut aralığında nano partiküller temin edilmiştir.

Bu çalışmada polimer olarak Polidimetilsiloksan (PDMS) ve Polilaktik asit (PLA) tercih edilmiştir. PLA, elektroeğirme uygulamasının ana maddesi olarak kullanılmıştır. PLA'nın 180°C erime sıcaklığı, %90 ışık geçirgenliği ve 1,482-1,492 kırılma indeksi gibi özellikleri uygulamalar için uygun bulunmuştur [92-94]. PDMS'in özellikleri ise şu şekildedir: PDMS, %92-95 ışık geçirgenliği, 1.40 kırılma indisi ve geniş bir sıcaklık aralığında (yaklaşık -50°C ile 200°C) termal stabiliteye sahiptir. Bu özellikler, PDMS'i optik uygulamalarda kullanıma uygun kılmaktadır [82, 95, 96].



Şekil 17: a) Elektroeğirme cihazı, b) 21 numaralı elektroeğirme iğnesi, c) cam lam üzerine yapılan elektroeğirme işlemi, d) şırınga pompası, e) elektroeğirme cihazının kontrol düğmeleri

Elektroeğirme yönteminde Şekil 17'de görülen düzlemsel kaplama yapabilen elektroeğirme cihazı kullanılmıştır. Inovenso markasına ait Basic System elektroeğirme cihazı, şırınga içerisindeki solüsyonun belirlenen hızda basılmasını sağlayan NE-1000 model şırınga pompası kullanılmıştır. Gerilim değeri, atış mesafesi, akış hızı, iğne ucu ve toplayıcı arası mesafe gibi parametreler bu sistemde elle girilmiştir. Toplayıcı üzerine koyulan cam lam üzerine elektroeğirme atışı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18: a) Ohaus marka hassas terazi, b) Heidolph MR Hei-TEC model ısıtıcılı manyetik karıştırıcı

Ölçümlerin doğruluğu açısından tüm laboratuvar aşamasında aynı cihazlar kullanılmıştır. Bunlardan biri Şekil 18'de görülen Ohaus marka hassas terazi, diğeri de Heidolph MR Hei-TEC model ısıtıcılı manyetik karıştırıcıdır. Hazırlanan çözelti, önce alüminyum folyoya sarılıp daha sonra parafilm ile kapatılmıştır. Nedeni Kloroformun uçuculuğu yüksek bir madde olmasıdır. Bu sayede çözeltide herhangi bir azalma olmamış ve derişimi değişmemiştir.

4.1.2. Test Materyalleri

Şekil 19'daki taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) Zeiss EVO MA-10 kullanılarak önce vakum yapılıp sonra spektroskopik enerji dağılımı (energy dispersive x-ray spectroscopy) (EDX) incelemeleri yapılmıştır. Numuneler, analizden önce bir Quorum SC7620 Mini Sprey Kaplayıcı kullanılarak altın paladyum 27 ile püskürtülerek

kaplanmıştır. %1 ve üzeri hassasiyetle yapılan EDX analizleri, alansal değil noktasal olarak yapılmıştır.



Şekil 19: a) Olympus-Colorview model optik mikroskop, b) Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope) (SEM) Zeiss EVO MA-10



Şekil 20: Shimadzu UV-VIS 1280 Spektrofotometre

Bu çalışmada, dış ortam testlerinde I-V (akım-gerilim) grafikleri elde etmek için Şekil 20' de bulunan National Instruments USB-6009 veri toplama (DAQ) kartı kullanılmıştır. NI USB-6009 DAQ kartı, kompakt yapısı ve çok yönlü özellikleri ile dikkat çekmektedir.

NI USB-6009, aşağıdaki özelliklere sahiptir:

Analog Girişler: 8 adet 14-bit çözünürlükte analog giriş kanalı bulunmaktadır. Bu girişler, -10V ile +10V aralığında hassas ölçümler yapabilmektedir.

1. **Analog Çıkışlar**: 2 adet 12-bit çözünürlükte analog çıkış kanalı sunar, bu da çeşitli kontrol ve simülasyon uygulamaları için kullanışlıdır.
2. **Dijital Giriş/Çıkışlar**: 12 adet dijital I/O kanalı ile dijital sinyallerin okunması ve yazılması sağlanmaktadır.
3. **Örnekleme Hızı**: 48 kS/s (kilo örnek/saniye) örnekleme hızı ile dinamik ölçümler için yeterli hızda veri toplama imkanı sunar.
4. **Bağlantı**: USB bağlantısı ile kolay entegrasyon sağlar ve taşınabilirliği artırır.
5. **Çalışma Gerilimi**: 5V USB gücü ile çalışır, bu da ek güç kaynağı gereksinimini ortadan kaldırır.
6. **Programlanabilirlik**: NI LabVIEW ve diğer NI yazılımları ile uyumlu çalışarak veri toplama, analiz ve kontrol işlemlerini kolaylaştırır.

Bu özellikler, NI USB-6009 DAQ kartını PV panellerin elektriksel performansının detaylı bir şekilde analiz edilmesi için ideal bir araç haline getirmektedir. Dış ortam testlerinde, Şekil 21'de gösterilen DAQ kartı aracılığıyla NI LabVIEW üzerinden toplanan akım ve gerilim verileri bilgisayara aktarılmış ve uygun yazılımlar kullanılarak I-V grafiklerine dönüştürülmüştür. Bu sayede, PV panellerin çeşitli çevresel koşullar altındaki performansı etkin bir şekilde değerlendirilmiştir.



Şekil 21: NI USB-6009 DAQ

4.2. Metot

4.2.1. Çözelti Hazırlama

- Öncelikle, Tablo 3'te görüldüğü gibi belirlenen oranlarda PLA ve kloroform ($CHCl_3$) cam beherlerde tartılarak hazırlanmıştır.
- Hazırlanan bu karışım, manyetik karıştırıcı kullanılarak homojen bir çözelti elde edilene kadar en az 1 saat karıştırılmıştır.
- PLA ve kloroform karışımı 1 saat karıştırıldıktan sonra, belirlenen oranlarda TiO_2 ve SiO_2 eklenmiştir.
- TiO_2 ve SiO_2 eklendikten sonra karışım, Heidolph MR Hei-TEC model ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda, 300 rpm, 25°C' de 1 saat daha karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanmıştır.
- TiO_2 ve SiO_2 ilavesinin ardından, karışıma belirlenen miktarda PDMS eklenmiştir.
- PDMS'in eklenmesinden sonra karışım, manyetik karıştırıcıda 20 dakika daha karıştırılarak son çözelti hazırlanmıştır.

Hazırlanan çözeltiler alfabetik olarak isimlendirilmiştir (Tablo 3). Her bir solüsyon, belirlenen formülasyonlara göre hazırlanmış ve farklı bileşen oranları ile

zenginleştirilmiştir. Örneğin, C solüsyonu %3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 mg TiO_2 ve 0,025 mg SiO_2 içermektedir.

Tablo 3: Solüsyon içerikleri

Solüsyonun Kodu	Solüsyon İçeriği
A	%1 PLA, 10 ml $CHCl_3$
B	%4 PLA, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
C	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
D	%2 PLA, %2 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
E	%2 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
G	%2 PLA, %2 PDMS, 10 ml $CHCl_3$
H	%6 PLA, %2 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,0125 gr TiO_2, 0,0125 gr SiO_2
H	%6 PLA, %2 PDMS ,10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
I	%2 PLA, %2 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,01 gr TiO_2, 0,01 gr SiO_2
K	%2 PLA, %2 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,01 gr SiO_2
L	%2 PLA, %2 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,01 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
M	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,025 gr SiO_2
N	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,01 gr SiO_2
P	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,01 gr TiO_2, 0,015 gr SiO_2
R	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,017 gr TiO_2, 0,017 gr SiO_2
O	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,01 gr SiO_2
Ö	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,01 gr TiO_2, 0,015 gr SiO_2
U	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,01 gr TiO_2, 0,01 gr SiO_2
Ü	%3 PLA, %3 PDMS, 10 ml $CHCl_3$, 0,025 gr TiO_2, 0,01 gr SiO_2

4.2.2. Elektroeğirme İşlemi

- Elektroeğirme işlemi öncesinde, cam lamların yüzey tutuculuğunu artırmak amacıyla literatüre uygun bazı işlemler uygulanmıştır.
- Cam lamlar sırasıyla su, asetik asit ve etanol ile yıkanmış ve yüzey aktif hale getirilmiştir.

- Elektroeğirme işlemi öncesinde, belirlenmiş voltaj değeri, atış mesafesi ve akış hızı ayarlanmıştır (Tablo 4).
- Hazırlanan solüsyon, belirlenen parametreler doğrultusunda elektroeğirme cihazı kullanılarak cam lamlar üzerine kaplanmıştır.

4.2.3. Parametrelerin Değiştirilerek Denenmesi

- Her bir solüsyonda yalnızca bir parametre değiştirilerek tüm olasılıklar denenmiştir. Bu parametreler şunlardır:
    - Akış hızı,
    - Atış mesafesi,
    - Voltaj değeri,
    - SiO_2 oranı,
    - TiO_2 oranı,
    - PDMS oranı,
    - PLA oranı,
    - $CHCl_3$ oranı,
    - Kullanılan elektroeğirme iğnesinin iç çapı.

Not: Karıştırma hızı, karıştırıcı sıcaklığı ve karıştırma süresi sürekli sabit tutulmuştur.

Elektroeğirme işlemlerinde, her denemede yalnızca bir parametre değeri değiştirilerek bu parametrenin etkisi değerlendirilmiştir. Tablo 4'teki parametreler, akış hızı, çalışma gerilimi ve mesafe gibi değişkenlerden oluşmaktadır. Her bir parametre değişikliğinin solüsyon üzerindeki etkisi analiz edilerek, en uygun koşullar belirlenmiştir.

Tablo 4: Elektroeğirme işlemi parametreleri

Solüsyonun Kodu	Solüsyon İçeriği		
	Akış Hızı	Çalışma Gerilimi	Mesafe
1	2 ml/saat	14 kV	15 cm
2	2 ml/saat	15 kV	15 cm
3	2 ml/saat	16 kV	15 cm
4	2 ml/saat	17 kV	15 cm
5	2 ml/saat	18 kV	15 cm
6	2 ml/saat	19 kV	15 cm
7	2 ml/saat	20 kV	15 cm
8	0,75 ml/saat	16 kV	15 cm
9	1,5 ml/saat	16 kV	15 cm
10	1,75 ml/saat	16 kV	15 cm
11	2 ml/saat	16 kV	15 cm
12	2,5 ml/saat	16 kV	18 cm
13	2 ml/saat	16,5 kV	16,5 cm
14	2 ml/saat	16,5 kV	13,5 cm

Elektroeğirme süreci Tablo 4'te belirtilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte her bir solüsyon, belirlenen akış hızı, çalışma gerilimi ve mesafe parametreleri ile tek tek test edilmiştir. Elektroeğirme işlemi sırasında her solüsyon, örneğin C solüsyonu ilgili parametre setine göre sırasıyla C-1, C-2, C-3...C-15 vb. şeklinde isimlendirilmiştir.

Her bir elektroeğirme atışının ardından mikroskop görüntüleri alınmış ve ışık geçirgenliği (%T) incelenmiştir. Bu analizler, solüsyonun performansını değerlendirmek ve optimize etmek için kullanılmıştır. Elektroeğirme işlemi sırasında uygun olmadığı belirlenen bazı solüsyonlar deneysel olarak elenmiştir. Denenen her bir solüsyonun performansı analiz edilerek, maksimum ışık geçirgenliğine sahip optimum solüsyon belirlenmiştir. Her denemeden elde edilen veriler ışığında, bir sonraki solüsyonun bileşimi ve parametreleri ayarlanmış ve bu şekilde en ideal sonuç elde edilmiştir. Elde edilen bu ideal sonuç en son aşamada cam lam üzerine değil 7cm X 10 cm büyüklüğünde 6V fotovoltaik panel üzerine kaplanmıştır.

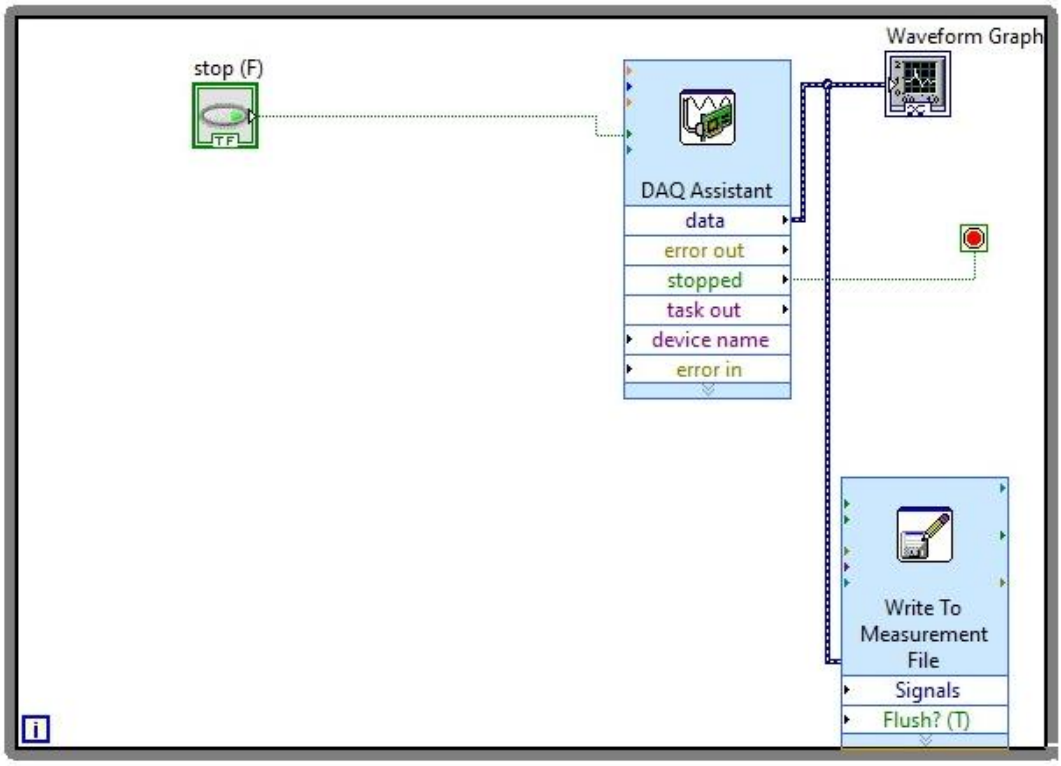
4.2.4. Mikroskop İncelemesi ve Işık Geçirgenliği Testi

- Elektroeğirme işlemi sonrası elde edilen kaplamalar, optik mikroskop altında incelenmiştir. Mikroskop incelemesi sonucu uygun görülen kaplamalar seçilmiştir.
- Mikroskop incelemesi ile uygun görülen kaplamalar, ışık geçirgenliği testine tabi tutulmuştur.

4.2.5. Dış Ortam Testi

Tez çalışmasının nihai aşamasında, PV panellerinin dış ortam koşullarında test edilmesi ve referans olarak alınan kaplamasız panellerle karşılaştırılması aşamasına geçilmiştir. Bu doğrultuda, Şekil 23'te gösterildiği gibi bir deney düzeneği oluşturulmuştur. O7 kodlu solüsyon ile kaplanmış panel PV 1, kaplamasız panel PV 2, U9 kodlu solüsyon ile kaplanmış panel ise PV 3 olarak adlandırılmıştır. Kaplama yapılmadan önce panellerin veri çıktıları kontrol edilmiş ve eş paneller seçilmiştir. Veri kaydı DAQ kartı aracılığıyla NI LabVIEW üzerinden yapılmıştır. DAQ kartının blog diyagramı Şekil 22'de gösterilmiştir.

Deney sırasında PV panellerinin gölgelenmesini engellemek amacıyla uygun bir yerleşim yapılmıştır. Paneller, maksimum güç elde edebilmek için hesaplanan 500 ohm dirençle yüklenmiştir.



Şekil 22: DAQ kartı blog diyagramı

Panellerden 7 gün veri alınmıştır. Her gün 08:00' de veri alınmaya başlanmış günlük güneşlenme süresine bağlı olarak devam ettirilmiştir. Günlük alınan veri sayısı:

1. Gün: 37397- 10 saat 38 dk

2. Gün: 38728- 11 saat15 dk

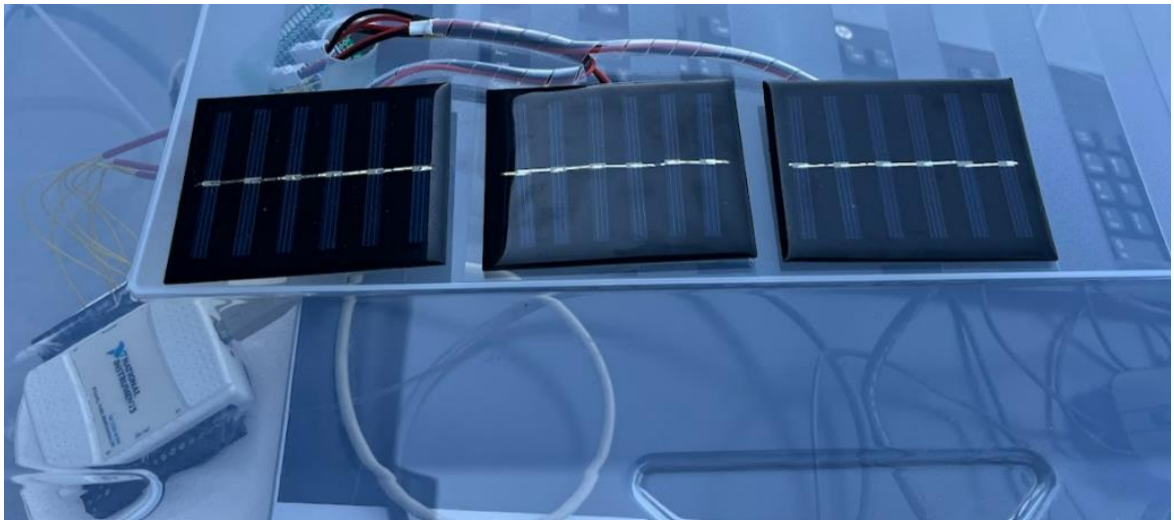
3. Gün: 37778- 10 saat 49 dk

4. Gün: 36990- 10 saat 27 dk

5. Gün: 38011- 10 saat 55 dk

6. Gün: 39495- 11 saat 37 dk

7. Gün: 37924- 10 saat 53 dk

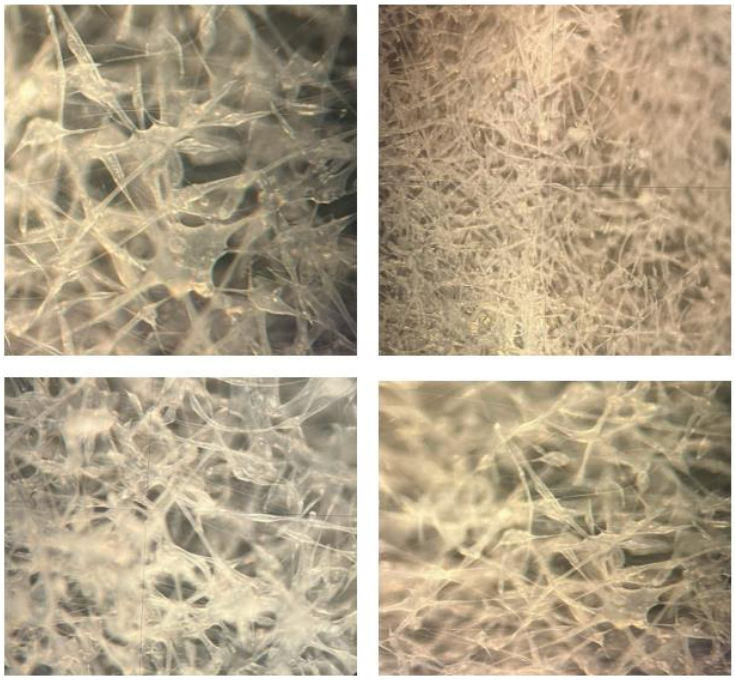


Şekil 23: Dış ortam test düzeneği

5. Bulgular ve Tartışma

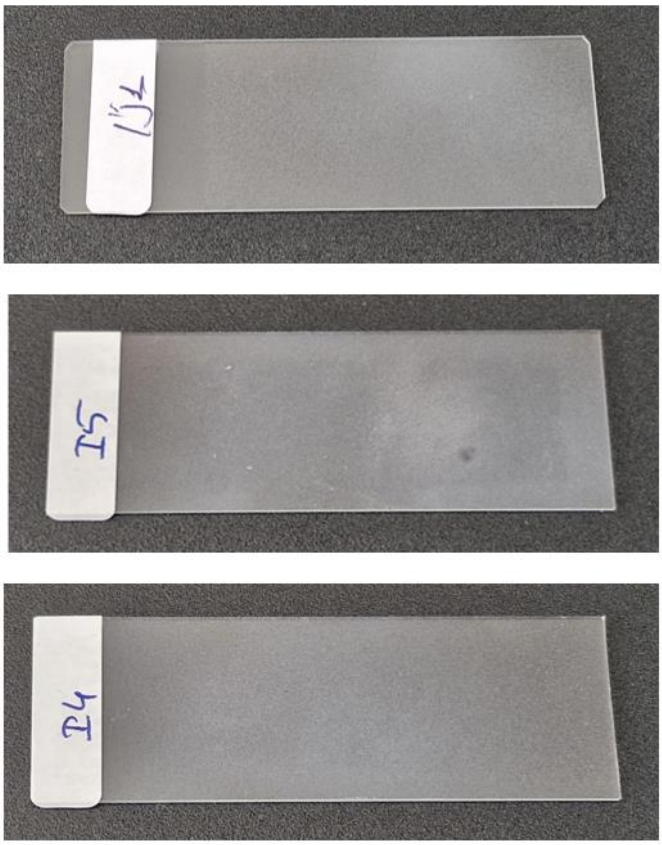
5.1. Optik Sonuçlar

Kaplama aşamasında numuneler ara ara optik mikroskopta incelenip homojen olarak bir görüntü oluşturulmaya çalışılmıştır. Şekil 24'te görülen bazı görüntüler bu atışlardan alınmıştır.



Şekil 24: O3 kaplamasının optik mikroskop görüntüleri

Şekil 24'te bulunan kaplamalar, 0,3 gr PLA, 0,015 gr SiO_2 ve 0,01 gr TiO_2 içeren O3 kodlu solüsyon kullanılarak hazırlanmıştır. Bu kaplama, 2 ml/saat akış hızında, 16 kV gerilim altında, 15 cm uzaklıkta ve 1 dakika süreyle uygulanarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 25'te bazı kaplamaların görüntüleri verilmiştir.

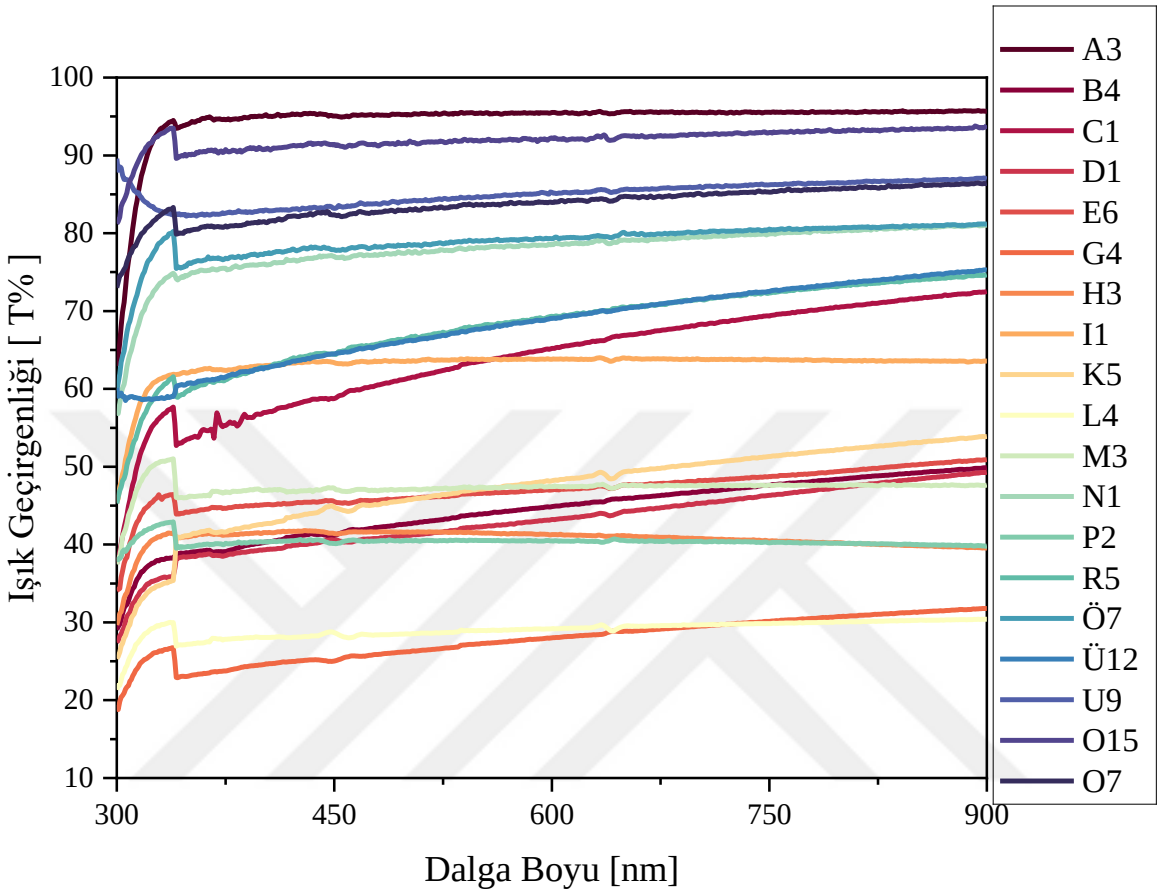


Şekil 25: Lam üzerine uygulanmış bazı kaplama örnekleri

Elektroeğirme yöntemiyle yapılan kaplamalarda deneme yanılma yoluyla bazı sonuçlar elde edilmiştir. Bunlardan ilki akış hızı arttığında kaplamalarda bölgesel olarak yığılmalar oluşmasıdır. Bir diğeri çalışma geriliminin çok düşmesi metal plaka ve çözeltinin aktığı iğne ucu arasındaki manyetik alanın azalması sonucu çözeltinin istenen yer harici başka noktalara sıçramasıdır. Benzer şekilde, plaka ve iğne ucu arasındaki mesafenin artırılması da manyetik alanı azaltmaktadır. Elektroeğirme işleminde akış hızının azaltılması, atıştan oluşan fiberlerin hem kalınlığını azaltıp hem de homojenliğini artırarak kaplamanın kalitesini artırsa da süresini çok fazla artırmaktadır. Sürenin artması sadece vakit kaybı değil aynı zamanda akışın olduğu iğne ucunun da polimerin orada donması nedeniyle tıkanmasına yol açmaktadır.

Optik mikroskop görüntüsüne göre 5x, 10x, 20x'te büyütülerek incelenen kaplamalar bir sonraki aşama olarak Şekil 25'te görüldüğü gibi spektrofotometre ile ışık geçirgenliği (%T) testine tabii tutulmuştur. Kaplamalar 300 nm ile 190 nm dalga boyu aralığında test edilmiştir. Her bir solüsyon hazırlanıp ışık geçirgenliği yapılmış ve o parametreler üzerinden

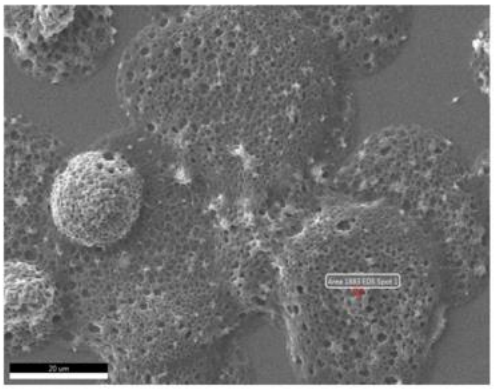
bir sonraki solüsyon belirlenmiştir. Şekil 26'da belirtilen bazı solüsyonlar iki kere yapılmış ışık geçirgenliğinin doğruluğuna bakılmıştır.



Şekil 26: %T ölçümü

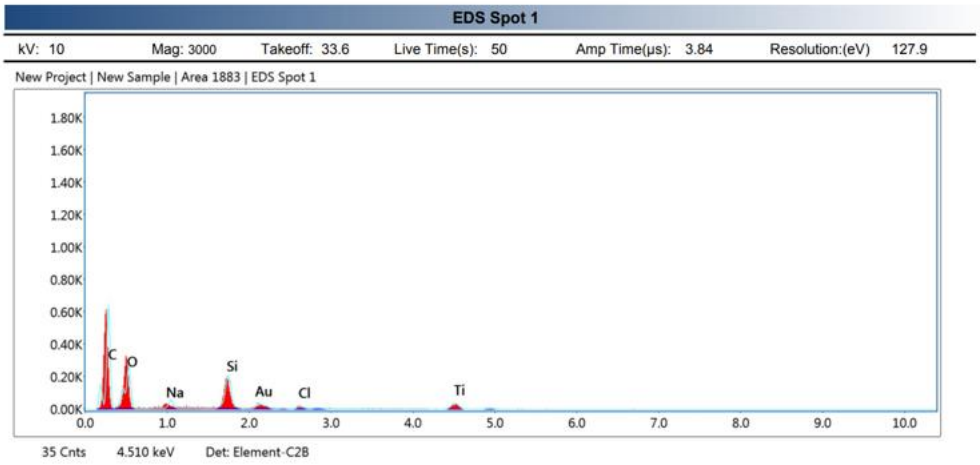
Literatürden edinilen bilgilere göre ışık geçirgenliğinde 550 nm dalga boyuna bakılmıştır. Maksimum ışık geçirgenliğini önce A3 kodlu solüsyon ile katkısız PLA olduğu ardından % 91,86 ışık geçirgenliği ile O15 kodlu boş lam olduğu görüşmüştür. Boş lamın ışık geçirgenliğine, spektrofotometre cihazında ölçümlerde baz alınması amacıyla bakılmıştır. Katkılı solüsyonlar arasında bakıldığında %84,613 oranıyla U9 solüsyonunun ışık geçirgenliğinin birinci sırada, O7 solüsyonun %83,647 ile ikinci sırada olarak belirlenmiştir.

Cam lamların EDX analizi için, önce lamlar üzerinde sputter kaplama yapılmış ve ardından SEM cihazında vakum altında görüntüleme gerçekleştirilmiştir. SEM incelemeleri sonucunda, silisyum ve titanyum nanopartiküllerinin kaplama yüzeyine homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. Görüntüleme analizlerinde, koyu renkli nanopartiküllerin silisyum, daha parlak beyaz renkte görülen partiküllerin ise titanyum nanopartikülleri olduğu tespit edilmiştir. EDX analizine neticesinde, kaplama yüzeyinde silisyum ve titanyum nanopartikülleri ile PLA polimeri dışında başka bir materyal veya partikül bulunmadığı gözlemlenmiştir.

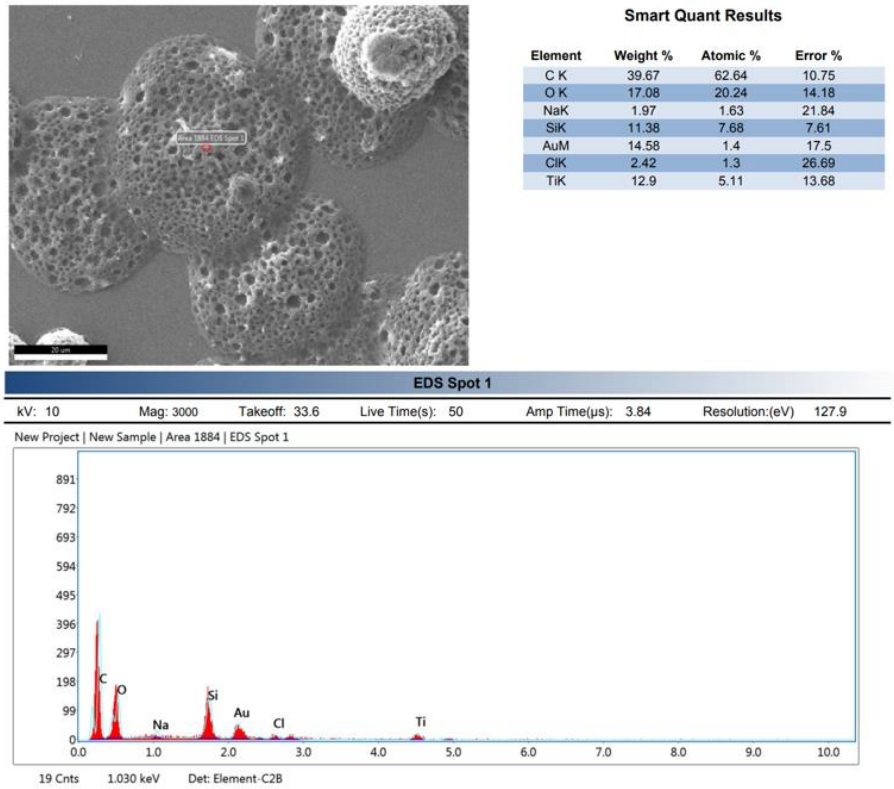


Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	40.13	59.34	10.01
O K	21.21	23.55	12.3
NaK	3.22	2.49	14.62
SiK	11.14	7.05	6.48
AuM	6.16	0.56	21.74
ClK	2.23	1.12	27.28
TiK	15.92	5.9	10.48



Şekil 27: O7 kodlu kaplamanın EDX analizi

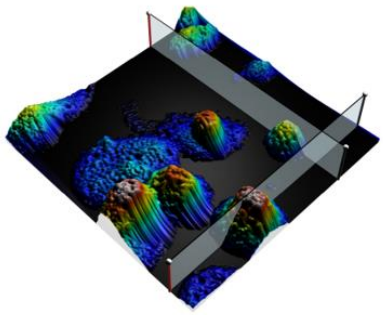


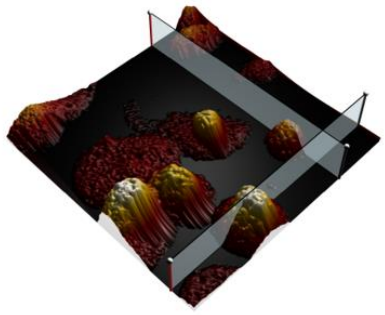
Şekil 28: U9 kodlu kaplamanın EDX analizi

Şekil 27 ve 28'den sonraki aşamada kaplamaların yüzey topografisinin analizi için AFM testi uygulanmıştır. Testlerde NCLR uç ile phase image mod kullanılmış ve tarama hızının 2.5 saniye/line olduğu belirlenmiştir. Analiz edilen yüzey 90 x 90 µm boyutlarındadır. Test sonuçları ISO 25178 standardına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen pürüzlülük parametreleri şu şekildedir:

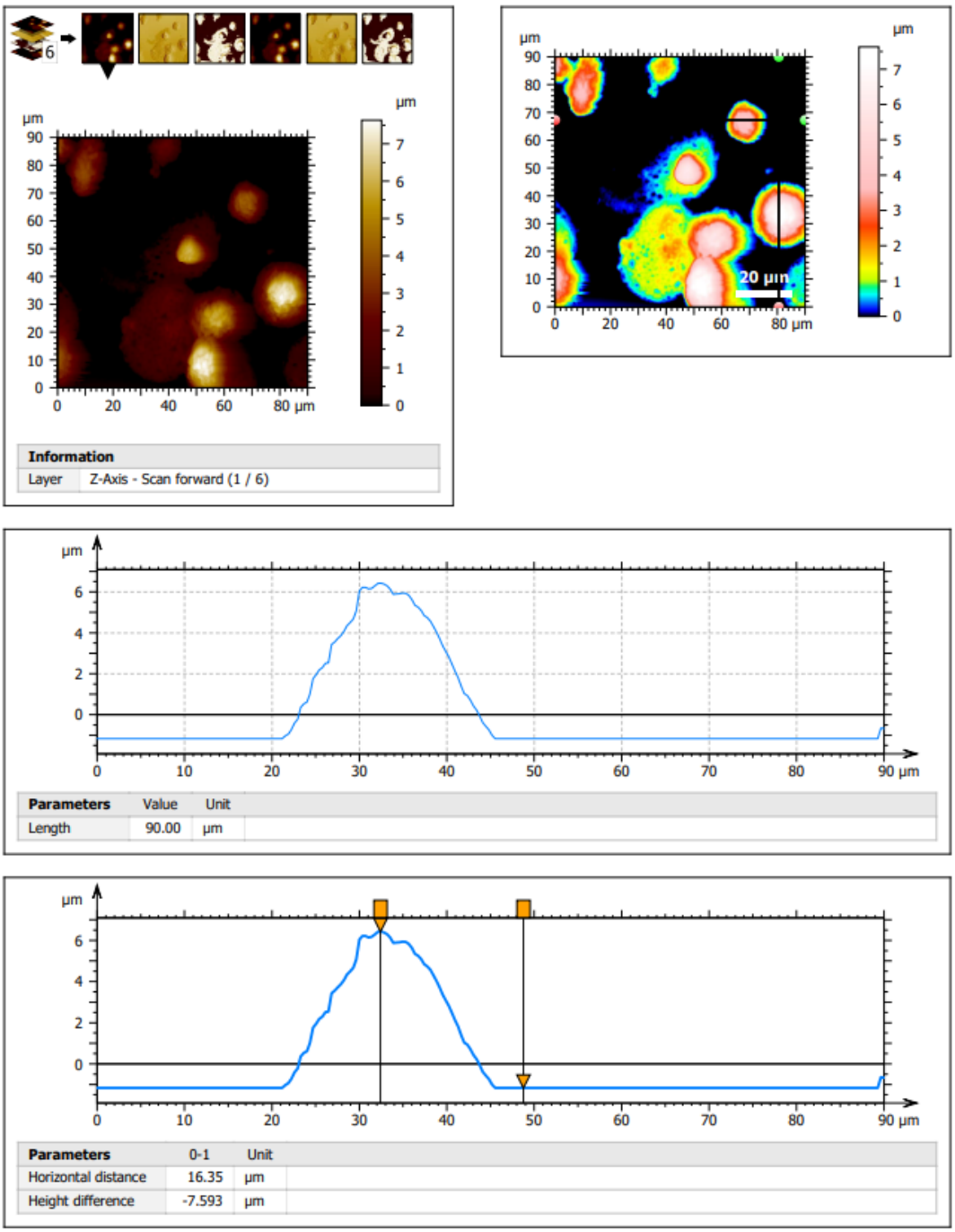
- RMS pürüzlülük (Sq) 31.11 nm olarak ölçülmüştür. Bu değer yüzeyin genel pürüzlülüğünü ifade eder.
- Skeçlik (Ssk) değeri 0.2869 olup yüzeyin asimetrik yapısını göstermektedir. Pozitif bir skeçlik değeri yüzeyde daha fazla çıkıntı olduğunu belirtir.
- Kurtosis (Sku) değeri 14.23 olarak belirlenmiş olup yüzeyde nadir ama yüksek çıkıntılar veya derin çukurlar bulunduğunu gösterir.
- Zirve yüksekliği (Sp) 310.3 nm, en düşük çukur derinliği (Sv) 257.7 nm ve toplam yükseklik farkı (Sz) 568.0 nm olarak ölçülmüştür.
- Ortalama pürüzlülük (Sa) değeri ise 15.92 nm'dir.

Bu sonuçlar kaplamanın yüzey topografisinin oldukça pürüzlü olduğunu ve çeşitli çıkıntı ve çukurların bulunduğunu göstermektedir.





ISO 25178 - Band-pass (S-L)		
F: None		
S-Filter: Gaussian, 0.0025 mm		
L-Filter: Gaussian, 0.0025 mm		
Height parameters		
Sq	31.11	nm
Ssk	0.2869	
Sku	14.23	
Sp	310.3	nm
Sv	257.7	nm
Sz	568.0	nm
Sa	15.92	nm



Şekil 29: U9 kodlu kaplamanın AFM testi sonuçları

Şekil 28 ve 29’ da gösterilen AFM testinin koşulları:

- Yüzey Pürüzlülüğü İncelenen Bölge: 90 mikron.
- Kullanılan Uç: NCLR uç.
- Mod: Phase image mod.
- Tarama Hızı: 2.5 saniye/line.

AFM Sonuçları:

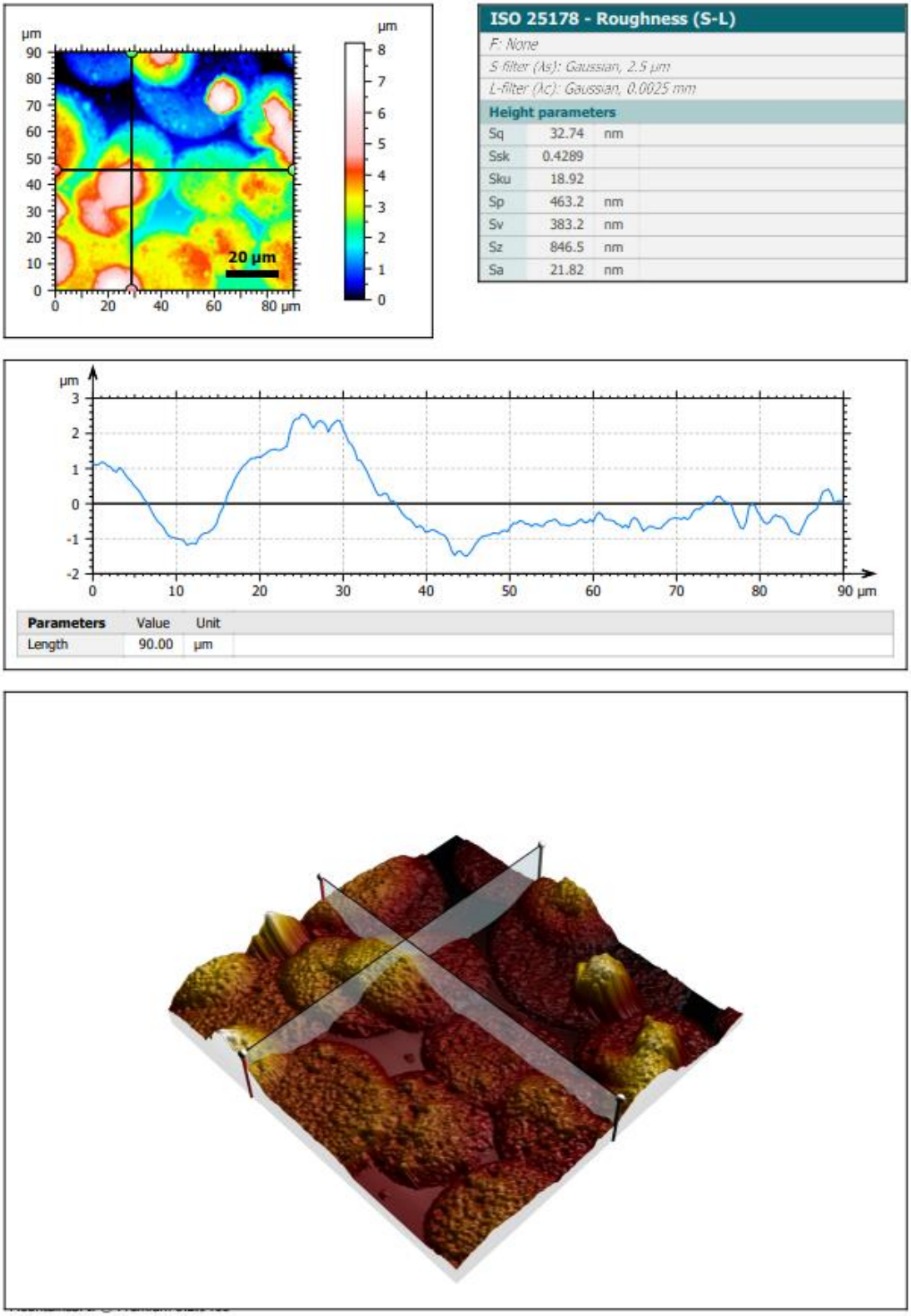
Topografik Ölçüm:

- Scan Area: 90 x 90 µm.
- Height Parameters (ISO 25178 - Band-pass S-L):
    - Sq (RMS Pürüzlülük): 31.11 nm
    - Ssk (Skeçlik): 0.2869
    - Sku (Kurtosis): 14.23
    - Sp (En Yüksek Zirve Yüksekliği): 310.3 nm
    - Sv (En Düşük Çukur Derinliği): 257.7 nm
    - Sz (Toplam Yükseklik Farkı): 568.0 nm
    - Sa (Ortalama Pürüzlülük): 15.92 nm

AFM testinde:

- Sq (RMS pürüzlülük): Yüzeyin pürüzlülüğünün kök ortalama karesini ifade eder. Bu değer yüzeyin genel pürüzlülüğünü gösterir ve 31.11 nm olarak ölçülmüştür.
- Ssk (Skeçlik): Yüzeyin asimetri derecesini ifade eder. Pozitif bir skeçlik değeri, yüzeyin daha fazla çıkıntılara sahip olduğunu gösterir. Bu değer 0.2869 olarak belirlenmiştir.
- Sku (Kurtosis): Yüzeyin yüksekliğinin dağılımının sivriliğini ifade eder. Yüksek bir kurtosis değeri, yüzeyde nadir ama yüksek çıkıntılar veya derin çukurlar olduğunu gösterir. Bu değer 14.23 olarak ölçülmüştür.
- Sp (Zirve yüksekliği): Yüzeydeki en yüksek çıkıntının yüksekliğini ifade eder ve bu değer 310.3 nm olarak belirlenmiştir.

- Sv (En düşük çukur derinliği): Yüzeydeki en derin çukurun derinliğini ifade eder ve bu değer 257.7 nm olarak ölçülmüştür.
- Sz (Toplam yükseklik farkı): En yüksek zirve ile en düşük çukur arasındaki toplam yükseklik farkını ifade eder ve bu değer 568.0 nm olarak ölçülmüştür.
- Sa (Ortalama pürüzlülük): Yüzeyin ortalama pürüzlülük değerini ifade eder ve bu değer 15.92 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 30: O7 kodlu kaplamanın AFM testi çıktıları

Şekil 30’da gösterilen AFM testinin koşulları:

- Yüzey Pürüzlülüğü İncelenen Bölge: 90 mikron.
- Kullanılan Uç: NCLR uç.
- Mod: Phase image mod.
- Tarama Hızı: 2.5 saniye/line.

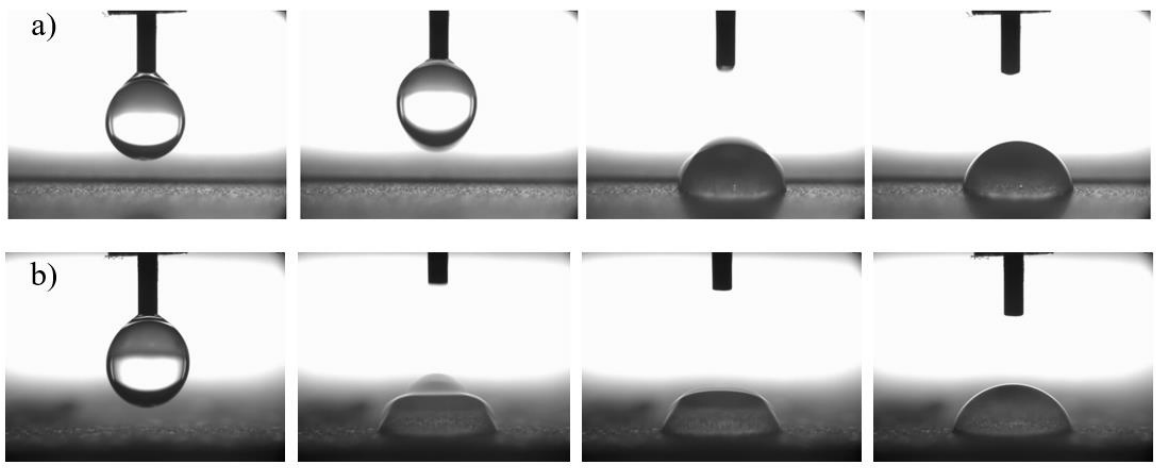
Topografik ölçüm sonuçları:

- Scan Area: 90 x 90 µm.
- Height Parameters (ISO 25178 - Band-pass S-L):
    - Sq (RMS Pürüzlülük): 32.74 nm
    - Ssk (Skeçlik): 0.4289
    - Sku (Kurtosis): 18.92
    - Sp (En Yüksek Zirve Yüksekliği): 463.2 nm
    - Sv (En Düşük Çukur Derinliği): 383.2 nm
    - Sz (Toplam Yükseklik Farkı): 846.5 nm
    - Sa (Ortalama Pürüzlülük): 21.82 nm

Yüzey pürüzlülüğü analizi için yapılan AFM testlerinde, yüzeyin genel pürüzlülüğü RMS pürüzlülük (Sq) ile 32.74 nm olarak ölçülmüştür. Yüzeyin asimetri derecesini ifade eden skeçlik (Ssk) değeri 0.4289, yüzey yüksekliğinin dağılımının sivriliğini belirten kurtosis (Sku) değeri ise 18.92 olarak belirlenmiştir. En yüksek zirve yüksekliği (Sp) 463.2 nm, en düşük çukur derinliği (Sv) 383.2 nm ve toplam yükseklik farkı (Sz) 846.5 nm olarak ölçülmüştür. Ortalama pürüzlülük (Sa) değeri ise 21.82 nm'dir. Bu sonuçlar, kaplamanın yüzey topografisinin detaylı bir analizi için temel veriler sağlar ve kaplamanın yüzey özelliklerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. PV panellerde verim artırıcı, su tutmayan ve yansıma azaltan kaplamaların performansını değerlendirmek amacıyla su temas açısı testi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 31’de, U9 kodlu kaplama kullanılmış ve PocketGoniometer® v3.4 cihazı ile çeşitli zaman aralıklarında su temas açısı, yükseklik, taban uzunluğu ve hacim gibi parametreler ölçülmüştür. Ölçümler, kaplamanın hidrofobik özelliklerini ve yüzeydeki su damlacıklarının davranışını belirlemek için kritik verilerdir.

Sonuçlar, U9 kodlu kaplamanın su temas açısının yüksek (yaklaşık 66-67 derece) olduğunu ve kaplamanın su itici özelliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu hidrofobik özellik, PV panellerin yüzeyinde suyun birikmesini engelleyerek yansıma kayıplarını azaltır ve böylece enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, ölçüm değerlerinin zaman içinde stabil kalması, U9 kodlu kaplamanın uzun ömürlü ve dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, geliştirilen U9 kodlu kaplamanın PV panellerde pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini ve enerji verimliliği üzerindeki potansiyel olumlu etkilerini vurgulamaktadır.



Şekil 31: a) U9 kaplamasının su temas testi aşamaları, b) O7 kaplamasının su temas testi aşamaları

PV panellerde verim artırıcı, su tutmayan ve yansıma azaltan kaplamaların performansını değerlendirmek amacıyla çeşitli kaplamaların su temas açısı testleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız bir panel referans değeri olarak kullanıldığında, su temas açısının 6.7 ile 8.7 derece aralığında olduğunu gözlemlenmiştir. Bu düşük temas açısı, yüzeyin hidrofilik özellikte olduğunu ve suyun yüzeye yayıldığını göstermektedir.

Test edilen Şekil 31’deki O7 kodlu kaplamanın su temas açısı ise 77.9 derece olarak ölçülmüştür. Bu yüksek temas açısı, yüzeyin oldukça hidrofobik olduğunu ve suyun yüzeyde damlacık şeklinde kalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. O7 kaplaması, su

itici özelliği sayesinde PV panellerde yansıma kayıplarını azaltabilir ve enerji verimliliğini artırabilmektedir.

Şekil 31'de gösterilen U9 kodlu kaplamanın su temas açısı ise 67.8 derece olarak ölçülmüştür. Bu da U9 kaplamasının hidrofobik özellik gösterdiğini, ancak O7 kaplaması kadar yüksek bir su temas açısına sahip olmadığını göstermektedir. Yine de U9 kaplamasının su itici özellikleri, yüzeyde su birikimini engelleyerek PV panellerin verimliliğini artırabilmektedir.

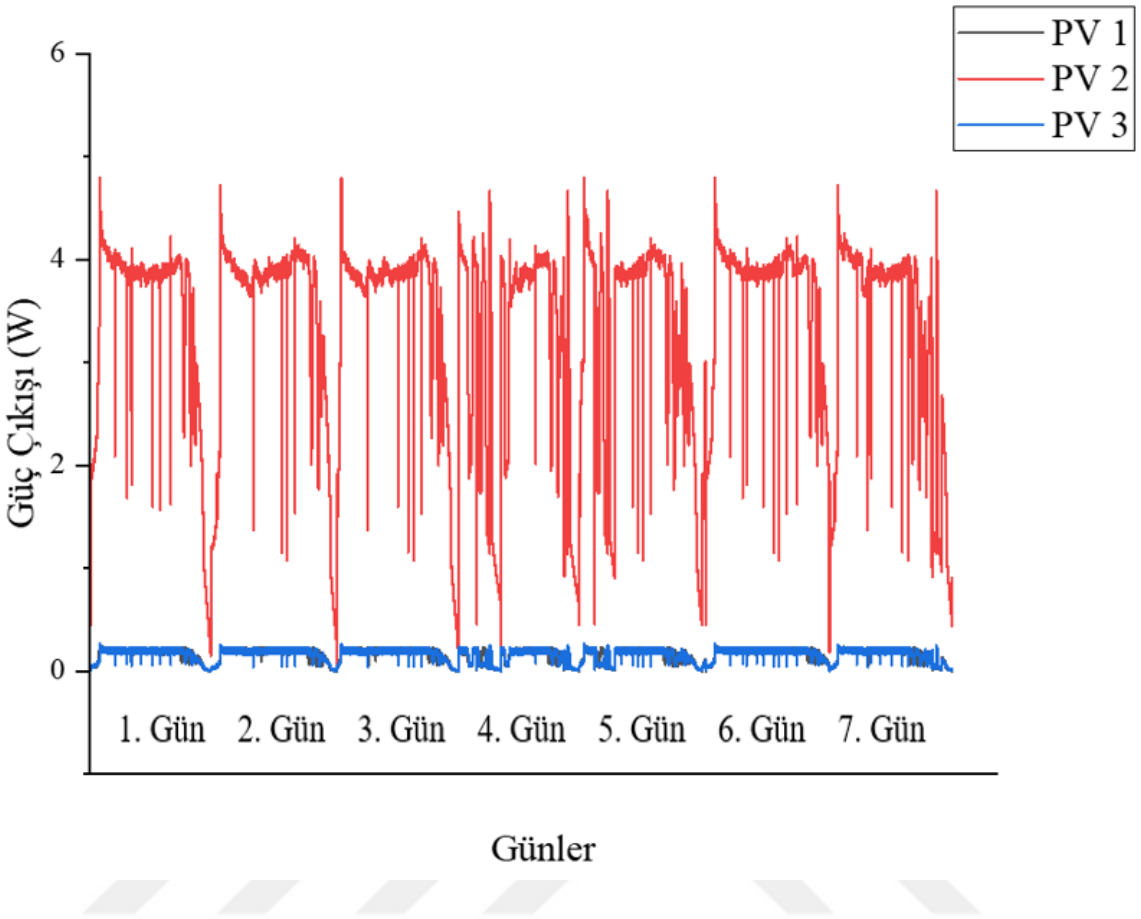
Bu sonuçlar, kaplamasız panellerin su temas açısının oldukça düşük olduğunu ve suyun yüzeyde yayıldığını, O7 ve U9 kaplamalarının ise hidrofobik özelliklere sahip olduğunu ve suyun yüzeyde damlacık olarak kalmasını sağladığını göstermektedir. O7 kaplaması, U9'a kıyasla daha yüksek bir su temas açısına sahip olup, daha güçlü su itici özellikler sergilemektedir.



Şekil 32: a) O7 kaplamanın su teması, b) kaplamasız yüzeyin su teması, c) U9 kaplamasının su teması

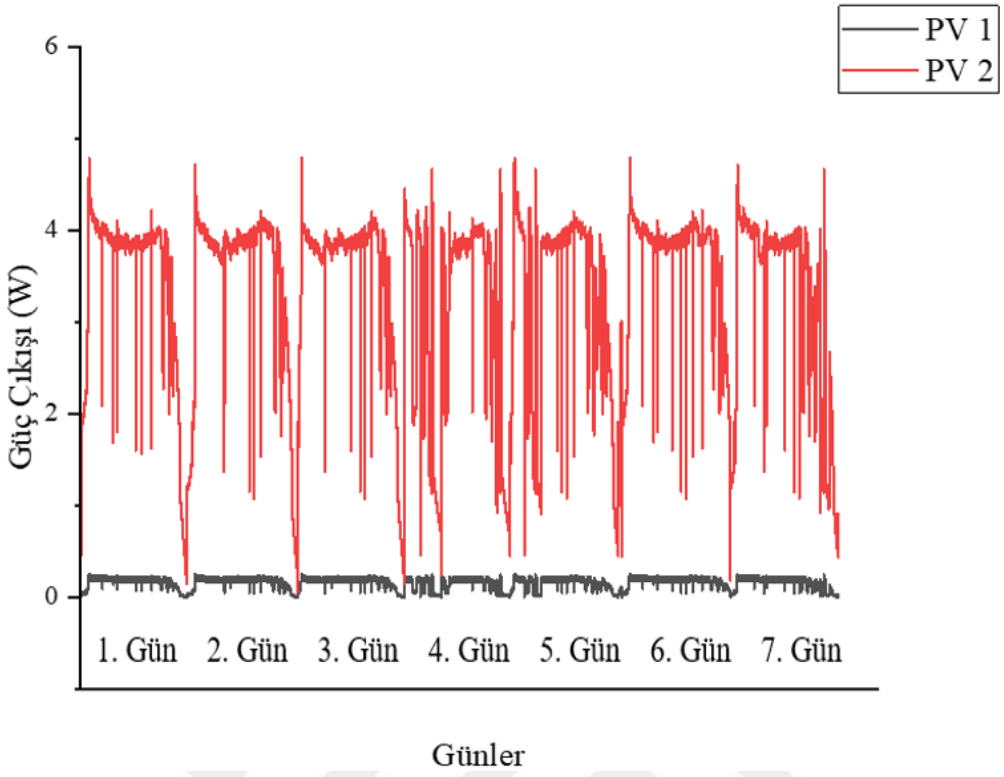
5.2. Elektriksel Sonuçlar

Tezin bu aşamasında PV 1, PV 2, PV 3 olarak adlandırılan paneller günlük ortalama 10 saat dış ortamda alınan veriler incelenecektir. Kaplamalı PV 1 ve PV 3 panellerin kaplamasız PV 2 paneline göre 7 gün boyunca güç çıkışları alınmıştır. Şekil 33'te gösterilmiştir.

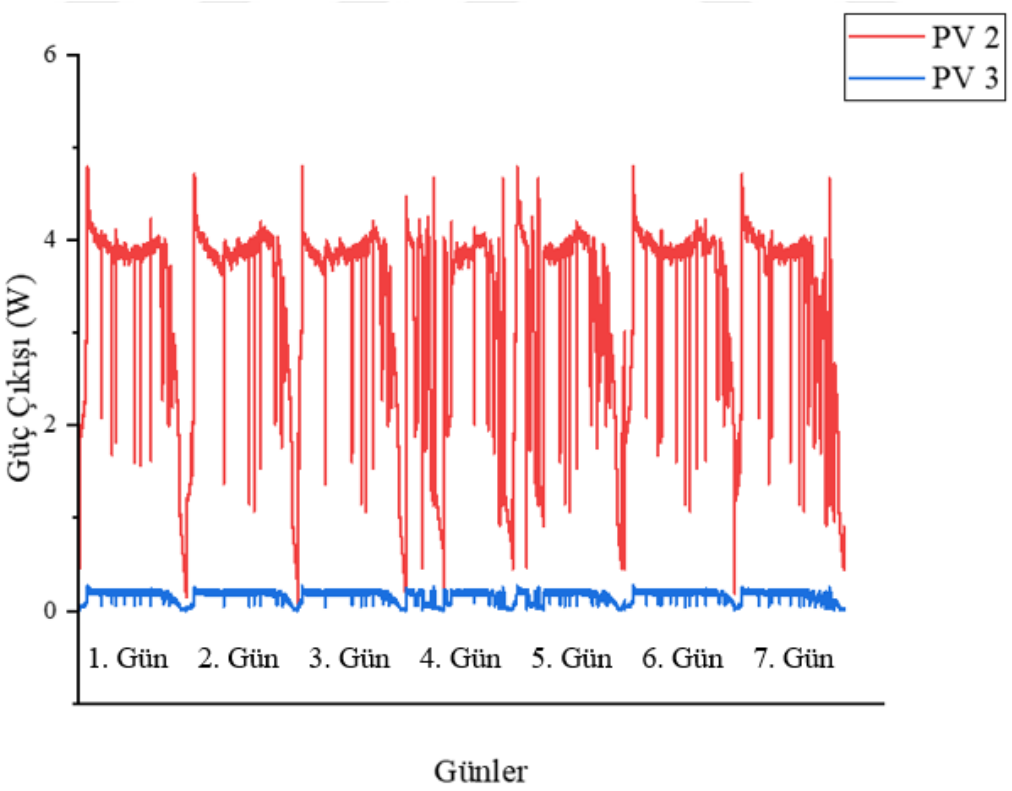


Şekil 33: PV1, PV2 VE PV3 panellerinin 7 gün boyunca alınan güç çıkışları

Şekil 33'te 7 günlük ölçüm süresi içerisinde PV 2 panelinin kaplamalı panellere göre daha fazla anlık maksimum güç çıkışı göstermiştir. Kaplamalı PV 1 ve PV 2 panellerinin günlük birbirine yakın güç çıkışı verdiği ve grafikte üst üste geldiği görülmektedir.



Şekil 34: PV1 ve PV2 panellerinin güç çıkışları



Şekil 35: PV2 ve PV3 panellerinin güç çıkışları

Şekil 34 ve Şekil 35'te sırasıyla kaplamalı PV panellerin kaplamasız PV 2 paneline göre güç çıkışları verilmiştir. Panellerde ani anlık güç dalgalanmaları yaşadığı gözlenmiştir. Bu ani güç değişimleri hava durumuna bağlı bulutlanma gibi etkilerle ve anlık ışınım şiddeti değişimi ile açıklanabilir. Genel olarak havanın açık olduğu günlerde yapılan bu test hidrofobiklik sayesinde kendi kendini temizleyen kaplamalı PV 1 ve PV 2 panellerinin, kaplamasız PV 3 paneline oranla çok düşük anlık güç çıkışı verdiği gözlemlenmektedir.

6. SONUÇ

Elektrik enerjisi ihtiyacı, sanayileşme ve nüfus artışı gibi faktörlerle dünya genelinde sürekli artmaktadır ve gelecekte de bu artışın devam etmesi beklenmektedir. Fosil yakıtların kullanımının çevresel sorunlara yol açması ve sınırlı olmaları, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önemli hale getirmektedir.

Türkiye'de hidroelektrik santraller, su kaynaklarının enerji potansiyelini değerlendirmekte ve elektrik üretiminde önemli bir paya sahiptir. 2024 yılı Mayıs ayı itibarıyla hidroelektrik santrallerin kurulu elektrik gücündeki payı %29,2 iken, 2020 yılında üretilen elektriğin %19,6'sı hidroelektrik kaynaklardan sağlanmıştır. Ayrıca, güneş, rüzgar ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlarla, 2024 yılı Mayıs ayı sonu itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 110.341 MW'a ulaşmıştır. Bu gücün %55,4'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir.

Güneş enerjisi gibi sonsuz ama kullanımı gün süresi ile sınırlı olan bir kaynaktan olabildiğince fazla verim almanın Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimine fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak güneş panellerinin verimliliğini etkileyen bazı optik ve fiziksel etmenler bulunmaktadır. Bunlardan biri, panel yüzeyinden gelen ışığın yansıması ve biriken toz, kir ve organik atıklardır.

Güneş enerjisinden maksimum verimi elde etmek için fotovoltaik (PV) panellerin verimliliğini artırmak önemlidir. Bu amaçla, PV panellerin yüzey temizliği ve bakımı düzenli olarak yapılmalıdır. Ayrıca, optik faktörlerin azaltılması ve panel teknolojisinin geliştirilmesiyle güneş enerjisi kullanımı daha etkin hale getirilebilir.

Ayrıca, elektroeğirme yöntemiyle yapılan kaplamaların incelenmesi sonucunda, akış hızı, çalışma gerilimi ve kaplama süresi gibi faktörlerin kaplama kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu yöntemin PV paneller üzerindeki etkisi daha detaylı olarak araştırılabilir.

Güneş enerjisi, sınırsız olmasına rağmen sadece gündüz saatlerinde kullanılabilen bir kaynaktır ve bu kaynaktan maksimum verim elde etmek, Türkiye'nin elektrik üretimi için büyük fayda sağlayacaktır. Bu amaçla, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren

fotovoltaik (PV) panellerin verimliliğini azaltan faktörler üzerinde durulmuş ve güneş ışığından maksimum verimi elde etmenin yolları araştırılmıştır. Fotovoltaik panellerin verimliliği optik ve elektriksel etkenlere bağlı olmakla birlikte fiziksel etkenlere de bağlıdır. Optik faktörler incelendiğinde, fotovoltaik panel yüzeyinden yansımanın verimliliği olumsuz etkilediği görülmüştür. Fiziksel faktörler arasında ise PV panel yüzeyinde biriken toz, kir ve organik atıklar, panelin daha az ışık almasına ve dolayısıyla güç çıkışının azalmasına neden olmaktadır.

Bu problemler temelinde literatür araştırması sonucu yansıtma engelleyici ve kendi kendini temizleyebilme özellikli tek veya çok katlı kaplamaların yapıldığı görülmüştür. Tez çalışmasında geleneksel yöntemlerin haricinde literatürde uygulaması bulunan elektroeğirme yöntemi denenmiş ve tek katlı kaplama yapılmıştır.

Kaplamalar öncelikle cam lam üzerine yapılmış ve sonrasında ışık geçirgenlik ölçümlerinde en yüksek geçirgenlik değerlerine sahip 2 solüsyon tekrar hazırlanmıştır. Solüsyonların ışık geçirgenliği sonuçları U9 için %84,613, O7 için %83,637'dir.

Yeniden hazırlanan solüsyonlar veri ve yöntem doğrulama için tekrar lam üzerine kaplanarak optik ölçümleri yapılmıştır. İki kere aynı parametreler ile kaplaması yapılan lamların optik sonuçları benzer çıkması ile PV panel üzerine kaplanmıştır. 2 adet kaplamalı PV panel (PV1 ve PV3) ve bir adet kaplamasız PV panel (PV2) olmak üzere dış ortamda 3 adet panel denenmiştir. Anlık olarak akım gerilim verisi alınan panellerin güç çıkışları incelenmiştir.

Sonuç olarak spektrofotometre sonuçları incelendiğinde, bu çalışmanın literatürde bu zamana kadar yapılan çalışmalar arasında elde edilen maksimum ışık geçirgenliği olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte kaplamaların uzun süreli kullanımda, farklı hava koşullarında aşınmalarını ve kalıcılıklarını incelemek için de en az 12 aylık dış ortam testi gerekmektedir. Bu nedenle kaplamanın dayanım ömrünün bulunabilmesi için daha uzun süreli dış ortam testleri yapılarak çalışmalara devam edilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] O. A. Al-Shahri *et al.*, "Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review," *J Clean Prod*, vol. 284, p. 125465, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125465.

[2] V. Singh, V. K. Yadav, and V. Mishra, "Nanotechnology: An Application in Biofuel Production," 2020, pp. 143–160. doi: 10.1007/978-981-13-9333-4_6.

[3] M. R. and P. R. Hannah Ritchie, "Renewable energy sources are growing quickly and will play a vital role in tackling climate change.," https://ourworldindata.org/renewable-energy#article-citation.

[4] Zhao Yongtao, "Clean energy can fuel the future — and make the world healthier," *Nature*, vol. 620, no. 7973, pp. 245–245, Aug. 2023, doi: 10.1038/d41586-023-02510-y.

[5] M. K. H. Rabaia *et al.*, "Environmental impacts of solar energy systems: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 754, p. 141989, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141989.

[6] F. Çanka, K. Doç, K. Üniversitesi, K. Myo, E. Ve, and E. Bölümü, "Solar Energy, Its Recent Status In Turkey And Productıon Technologıes Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu Ve Üretim Teknolojileri Öz."

[7] M. Louy, Q. Tareq, S. Al-Jufout, Q. Alsafasfeh, and C. Wang, "Effect of dust on the 1-MW photovoltaic power plant at Tafila Technical University," in *2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*, IEEE, Mar. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/IREC.2017.7926032.

[8] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, and H. Fayaz, "A review on global solar energy policy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 2149–2163, May 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.007.

[9] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K.-H. Kim, “Solar energy: Potential and future prospects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 894–900, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.094.

[10] S. Rühle, “Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells,” *Solar Energy*, vol. 130, pp. 139–147, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.02.015.

[11] N. Kannan and D. Vakeesan, “Solar energy for future world: - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1092–1105, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.022.

[12] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, “A review on solar energy use in industries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1777–1790, May 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.12.018.

[13] IEA (2024), “Renewables 2023,” https://www.iea.org/reports/renewables-2023, Jan. 2024.

[14] “Yenilenebilir elektrik üretiminin teknolojiye göre payı, 2000-2028,” https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2028.

[15] B. Özsoy *et al.*, “Orta Asya’da Enerji Politikaları ve Küresel Rekabet Bağlamında Türkiye’nin Rolü Üzerine Bir Değerlendirme An Assessment of the Role of Turkey in the Context of Energy Policies and Global Competition in Central Asia.” [Online]. Available: https://www.

[16] N. Mahmud, A. Zahedi, and Md. Shamiur Rahman, “Control of Renewable Energy Systems,” 2018, pp. 207–231. doi: 10.1007/978-981-10-7287-1_7.

[17] A. N. Celik and E. Özgür, “Review of Turkey’s photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110344, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110344.

[18] M. Cubukcu and H. Gumus, “Performance analysis of a grid-connected photovoltaic plant in eastern Turkey,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, p. 100724, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100724.

[19] “Güneş - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,” https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes.

[20] “Türkiye Elektrik İstatistikleri,” https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf;jsessionid=3ED0B130F6B237CD021B43F513C94844.

[21] “Güneş Enerjisi Potansiyelimiz,” https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes.

[22] M. S. Endiz and A. E. Coşgun, “Assessing the potential of solar power generation in Turkey: A PESTLE analysis and comparative study of promising regions using PVsyst software,” *Solar Energy*, vol. 266, p. 112153, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.112153.

[23] “Türkiye- Countries & Regions - IEA,” https://www.iea.org/countries/turkiye.

[24] “World Energy Statistics and Balances - Data product - IEA,” https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances.

[25] B. M. Abdurakhmanov, L. O. Olimov, and M. S. Saidov, “Electrophysical properties of solar polycrystalline silicon and its n +-p structures at elevated temperatures,” *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, vol. 44, no. 1, pp. 46–52, Feb. 2008, doi: 10.3103/S0003701X08010143.

[26] I. Dincer and Y. Bicer, “3.17 Photonic Energy Production,” in *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, 2018, pp. 707–754. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00336-9.

[27] U. Tampa Graduate Theses, D. USF Graduate Theses, M. M. Khaleel Alhussain, and M. M. Khaleel, “Fabrication and Characterization Methods of

Self-Cleaning Fabrication and Characterization Methods of Self-Cleaning Coatings for Solar Panels Application Coatings for Solar Panels Application Scholar Commons Citation Scholar Commons Citation 'Fabrication and Characterization Methods of Self-Cleaning Coatings for Solar Panels Application' (2021). USF Tampa Graduate Theses and Dissertations," 2021.

[28] H. Alahmad, E. Taşkesen, and E. N. Bilen, "Uzay Tabanlı Güneş Enerjisine Genel Bakış," *Ankara Scıence Unıversıty, Researcher*, vol. 3, no. 2, pp. 2717–9494, 2023, doi: 10.55185/researcher.1332802.

[29] D. Sica, O. Malandrino, S. Supino, M. Testa, and M. C. Lucchetti, "Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2934–2945, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.039.

[30] H. H. Öztürk, Ç. Üniversitesi, and Z. Fakültesi, "Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi Ve Etkili Etmenler."

[31] O. Çelen Danışman Doç. Dr. Mustafa UÇAR, İkinci Danışman Doç. Dr. Atilla EVCİN, "Fotovoltaik (PV) Paneller İçin Fotokatalitik, Antibakteriyel Ve Yansıma Önleyici Yüzey Kaplamaların Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi."

[32] "Lisanssız Elektrik Üretimi- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı," https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-uretim-faaliyetleri-lisassiz-elektrik-uretimi.

[33] A. S. Sarkın, N. Ekren, and Ş. Sağlam, "A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels," *Solar Energy*, vol. 199, pp. 63–73, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.01.084.

[34] M. Nezamisavojbolaghi, E. Davodian, A. Bouich, M. Tlemçani, O. Mesbahi, and F. M. Janeiro, "The Impact of Dust Deposition on PV Panels' Efficiency

and Mitigation Solutions: Review Article," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 24, p. 8022, Dec. 2023, doi: 10.3390/en16248022.

[35] A. Amin, X. Wang, A. Alroichdi, and A. Ibrahim, "Designing and Manufacturing a Robot for Dry-Cleaning PV Solar Panels," *Int J Energy Res*, vol. 2023, pp. 1–15, Feb. 2023, doi: 10.1155/2023/7231554.

[36] H. K. L. ve A. T. A. S. S. Hatif, "A Review of Automatic Solar Photovoltaic Panels Cleaning and Cooling Methods," in *AIP Conf Proc*, 2024.

[37] R. Josephs, *Solar cell array design handbook*, 1st ed., vol. 62. NASA, 1976.

[38] A. Sayyah, R. S. Eriksen, M. N. Horenstein, and M. K. Mazumder, "Performance Analysis of Electrodynamic Screens Based on Residual Particle Size Distribution," *IEEE J Photovolt*, vol. 7, no. 1, pp. 221–229, Jan. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2617088.

[39] M. K. Mazumder *et al.*, "Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses," in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2015. doi: 10.1109/PVSC.2015.7355973.

[40] J. Wang *et al.*, "Broadband antireflective double-layer mesoporous silica coating with strong abrasion-resistance for solar cell glass," *RSC Adv*, vol. 6, no. 30, pp. 25191–25197, 2016, doi: 10.1039/C6RA02281B.

[41] S. Yu, Z. Guo, and W. Liu, "Biomimetic transparent and superhydrophobic coatings: from nature and beyond nature," *Chemical Communications*, vol. 51, no. 10, pp. 1775–1794, 2015, doi: 10.1039/C4CC06868H.

[42] S. Sutha, S. Suresh, B. Raj, and K. R. Ravi, "Transparent alumina based superhydrophobic self–cleaning coatings for solar cell cover glass applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 165, pp. 128–137, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.02.027.

[43] T. Yamada, H. Nakamura, T. Sugiura, K. Sakuta, and K. Kurokawa, "Reflection loss analysis by optical modeling of PV module," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, no. 1–4, pp. 405–413, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0927-0248(00)00309-3.

[44] J. Schneider, M. Turek, M. Dyrba, I. Baumann, B. Koll, and T. Booz, "Combined effect of light harvesting strings, anti-reflective coating, thin glass, and high ultraviolet transmission encapsulant to reduce optical losses in solar modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, no. 7, pp. 830–837, Jul. 2014, doi: 10.1002/pip.2470.

[45] S. Maharjan *et al.*, "Self-cleaning hydrophobic nanocoating on glass: A scalable manufacturing process," *Mater Chem Phys*, vol. 239, p. 122000, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.122000.

[46] X. Gong and S. He, "Highly Durable Superhydrophobic Polydimethylsiloxane/Silica Nanocomposite Surfaces with Good Self-Cleaning Ability," *ACS Omega*, vol. 5, no. 8, pp. 4100–4108, Mar. 2020, doi: 10.1021/acsomega.9b03775.

[47] M. Nosonovsky and B. Bhushan, "Superhydrophobic surfaces and emerging applications: Non-adhesion, energy, green engineering," *Curr Opin Colloid Interface Sci*, vol. 14, no. 4, pp. 270–280, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.cocis.2009.05.004.

[48] I. P. Parkin and R. G. Palgrave, "Self-cleaning coatings," *J Mater Chem*, vol. 15, no. 17, p. 1689, 2005, doi: 10.1039/b412803f.

[49] S. Ashok, "Optimised model for community-based hybrid energy system," *Renew Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1155–1164, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.04.008.

[50] K. Abushgair and R. Al-Waked, "Effects of Coating Materials as a Cleaning Agent on the Performance of Poly-Crystal PV Panels," *Coatings*, vol. 11, no. 5, p. 544, May 2021, doi: 10.3390/coatings11050544.

[51] R. E. Johnson and R. H. Dettre, “Contact Angle Hysteresis. III. Study of an Idealized Heterogeneous Surface,” *J Phys Chem*, vol. 68, no. 7, pp. 1744–1750, Jul. 1964, doi: 10.1021/j100789a012.

[52] U. ScholarWorks, U. Graduate Theses, and C. Seth Thompson, “Highly Transparent, Self-cleaning, and Antireflective Nanoparticle Highly Transparent, Self-cleaning, and Antireflective Nanoparticle Coatings Coatings,” 2014. [Online]. Available: https://scholarworks.uark.edu/etd

[53] Y.-Y. Quan and L.-Z. Zhang, “Experimental investigation of the anti-dust effect of transparent hydrophobic coatings applied for solar cell covering glass,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 160, pp. 382–389, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2016.10.043.

[54] J. Chen and C. Poon, “Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications,” *Build Environ*, vol. 44, no. 9, pp. 1899–1906, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.01.002.

[55] F. Trindade and M. J. Politi, “Sol-Gel Chemistry—Deals With Sol–Gel Processes,” in *Nano Design for Smart Gels*, Elsevier, 2019, pp. 15–34. doi: 10.1016/B978-0-12-814825-9.00002-3.

[56] H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair, and S. Ramakrishna, “Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review,” *Energy Environ Sci*, vol. 4, no. 10, p. 3779, 2011, doi: 10.1039/c1ee01297e.

[57] X. Wu *et al.*, “Mechanically robust superhydrophobic and superoleophobic coatings derived by sol–gel method,” *Mater Des*, vol. 89, pp. 1302–1309, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.053.

[58] K. Tadanaga, N. Katata, and T. Minami, “Formation Process of Super-Water-Repellent Al $_2$ O $_3$ Coating Films with High Transparency by the Sol–Gel Method,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 80, no. 12, pp. 3213–3216, Dec. 1997, doi: 10.1111/j.1151-2916.1997.tb03253.x.

[59] J. W. G. W. J. S. S. M. Attia, “Review on sol-gel derived coatings: Process, techniques and optical applications,” *Journal of Material Science and Technology*, pp. 211–218, May 2002.

[60] X. Wang, F. Shi, X. Gao, C. Fan, W. Huang, and X. Feng, “A sol–gel dip/spin coating method to prepare titanium oxide films,” *Thin Solid Films*, vol. 548, pp. 34–39, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.tsf.2013.08.056.

[61] U. Çalıgülü, A. Orhan, Z. Barlas, And N. Darcan, “Döndürerek Kaplama Yöntemi ile Hazırlanan Ca katkılı TiO2 İnce Filmlerin Optik ve Morfolojik Özellikleri,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 33, no. 1, pp. 315–327, Feb. 2021, doi: 10.35234/fumbd.848793.

[62] C. Tao *et al.*, “Sol–gel preparation of moisture-resistant antireflective coatings from novel hollow silica nanoparticles,” *J Solgel Sci Technol*, vol. 80, no. 2, pp. 538–547, Nov. 2016, doi: 10.1007/s10971-016-4125-x.

[63] Y. Li *et al.*, “Preparation of mechanically stable triple-layer interference broadband antireflective coatings with self-cleaning property by sol–gel technique,” *RSC Adv*, vol. 7, no. 24, pp. 14660–14668, 2017, doi: 10.1039/C7RA00844A.

[64] M. Yılmaz, E. Dursun, N. Ekren, Z. Karagöz, “Efficiency Increasing Coatings on Photovoltaic Panels (PV),” *14th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-14)*, Dec. 2023.

[65] D. Bernsmeier, J. Polte, E. Ortel, T. Krahl, E. Kemnitz, and R. Kraehnert, “Antireflective Coatings with Adjustable Refractive Index and Porosity Synthesized by Micelle-Templated Deposition of MgF_2 Sol Particles,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 22, pp. 19559–19565, Nov. 2014, doi: 10.1021/am5052685.

[66] K. Acatay, E. Simsek, C. Ow-Yang, and Y. Z. Menceloglu, “Tunable, Superhydrophobically Stable Polymeric Surfaces by Electrospinning,”

Angewandte Chemie International Edition, vol. 43, no. 39, pp. 5210–5213, Oct. 2004, doi: 10.1002/anie.200461092.

[67] Sevdiye Öztürk, "TiO2 ince filmlerin üretilmesi ve fotovoltaik özelliklerinin incelenmesi," Fizik Ana Bilim Dalı, Yıldız Teknik, İstanbul, 2011.

[68] M. Ma, R. M. Hill, J. L. Lowery, S. V. Fridrikh, and G. C. Rutledge, "Electrospun Poly(Styrene- *block* -dimethylsiloxane) Block Copolymer Fibers Exhibiting Superhydrophobicity," *Langmuir*, vol. 21, no. 12, pp. 5549–5554, Jun. 2005, doi: 10.1021/la047064y.

[69] Z. E. K. A. Ç. T. K. Gamze Süpüren Mengüç, "Nano lifler," *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 17, pp. 83–89, 2007.

[70] M. Yılmaz ve N. Ekren, "Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin Geliştirilen Taşınabilir Elektroeğirme Cihazları," *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 26, no. 4, pp. 1061–1077, Dec. 2023, doi: 10.17780/ksujes.1323114.

[71] M. K. Sarkar, K. Bal, F. He, and J. Fan, "Design of an outstanding super-hydrophobic surface by electro-spinning," *Appl Surf Sci*, vol. 257, no. 15, pp. 7003–7009, May 2011, doi: 10.1016/j.apsusc.2011.03.057.

[72] M. A. Samaha, H. V. Tafreshi, and M. Gad-el-Hak, "Superhydrophobic surfaces: From the lotus leaf to the submarine," *Comptes Rendus. Mécanique*, vol. 340, no. 1–2, pp. 18–34, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.crme.2011.11.002.

[73] O. Sato, S. Kubo, and Z.-Z. Gu, "Structural Color Films with Lotus Effects, Superhydrophilicity, and Tunable Stop-Bands," *Acc Chem Res*, vol. 42, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2009, doi: 10.1021/ar700197v.

[74] Ali Samet Sarkın, "Fotovoltaik panellerde verim artırıcı nano yapılı kaplamalar," Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2022.

[75] G. Helsch, A. Mös, J. Deubener, and M. Höland, “Thermal resistance of nanoporous antireflective coatings on silica glass for solar tower receivers,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 12, pp. 2191–2196, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2010.07.011.

[76] R. Andrew Fleming and R. Andrew, “Silica Nanoparticle-Based Coatings with Superhydrophilic and Superhydrophobic Properties,” 2012. [Online]. Available: http://scholarworks.uark.edu/etdhttp://scholarworks.uark.edu/etd/580

[77] H.-M. Kim, S. Sohn, and J. S. Ahn, “Transparent and super-hydrophobic properties of PTFE films coated on glass substrate using RF-magnetron sputtering and Cat-CVD methods,” *Surf Coat Technol*, vol. 228, pp. S389–S392, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.085.

[78] S. Rezaei, I. Manoucheri, R. Moradian, and B. Pourabbas, “One-step chemical vapor deposition and modification of silica nanoparticles at the lowest possible temperature and superhydrophobic surface fabrication,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 252, pp. 11–16, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.cej.2014.04.100.

[79] X.-M. Bao *et al.*, “Facile preparation of superhydrophobic surfaces based on metal oxide nanoparticles,” *Appl Surf Sci*, vol. 303, pp. 473–480, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.03.029.

[80] A. Zaier, A. Meftah, A. Y. Jaber, A. A. Abdelaziz, and M. S. Aida, “Annealing effects on the structural, electrical and optical properties of ZnO thin films prepared by thermal evaporation technique,” *J King Saud Univ Sci*, vol. 27, no. 4, pp. 356–360, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jksus.2015.04.007.

[81] S.-S. Lin, J.-L. Huang, and P. Šajgalik, “The properties of Ti-doped ZnO films deposited by simultaneous RF and DC magnetron sputtering,” *Surf Coat Technol*, vol. 191, no. 2–3, pp. 286–292, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.03.021.

[82] D. Ebert and B. Bhushan, “Transparent, superhydrophobic, and wear-resistant surfaces using deep reactive ion etching on PDMS substrates,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 481, pp. 82–90, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jcis.2016.07.035.

[83] M. R. Leyden, L. K. Ono, S. R. Raga, Y. Kato, S. Wang, and Y. Qi, “High performance perovskite solar cells by hybrid chemical vapor deposition,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 44, pp. 18742–18745, 2014, doi: 10.1039/C4TA04385E.

[84] L. Yao, M. Zheng, S. He, L. Ma, M. Li, and W. Shen, “Preparation and properties of ZnS superhydrophobic surface with hierarchical structure,” *Appl Surf Sci*, vol. 257, no. 7, pp. 2955–2959, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.apsusc.2010.10.098.

[85] M. J. Powell *et al.*, “Intelligent Multifunctional VO_2 /SiO_2 /TiO_2 Coatings for Self-Cleaning, Energy-Saving Window Panels,” *Chemistry of Materials*, vol. 28, no. 5, pp. 1369–1376, Mar. 2016, doi: 10.1021/acs.chemmater.5b04419.

[86] Z. Wang, N. Yao, and X. Hu, “Single material TiO2 double layers antireflection coating with photocatalytic property prepared by magnetron sputtering technique,” *Vacuum*, vol. 108, pp. 20–26, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.vacuum.2014.05.009.

[87] D. Perednis and L. J. Gauckler, “Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis,” *J Electroceram*, vol. 14, no. 2, pp. 103–111, Mar. 2005, doi: 10.1007/s10832-005-0870-x.

[88] K. Ellmer, R. Cebulla, and R. Wendt, “Transparent and conducting ZnO(:Al) films deposited by simultaneous RF- and DC-excitation of a magnetron,” *Thin Solid Films*, vol. 317, no. 1–2, pp. 413–416, Apr. 1998, doi: 10.1016/S0040-6090(97)00633-0.

[89] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results,

literature, and mitigation approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 698–733, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.065.

[90] T. I. Awan, A. Ahmad, S. Bibi, A. Tehseen, and A. Bashir, "Nanomaterials," in *Chemistry of Nanomaterials*, Elsevier, 2020, pp. 225–269. doi: 10.1016/B978-0-12-818908-5.00009-3.

[91] N. Ekren, A. S. Sarkin, and S. Saglam, "A Hydrophobic Antireflective and Antidust Coating With SiO_2 and TiO_2 Nanoparticles Using a New 3-D Printing Method for Photovoltaic Panels," *IEEE J Photovolt*, vol. 12, no. 4, pp. 1014–1026, Jul. 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3177229.

[92] V. Bernardo, J. Martin-de Leon, J. Pinto, T. Catelani, A. Athanassiou, and M. A. Rodriguez-Perez, "Low-density PMMA/MAM nanocellular polymers using low MAM contents: Production and characterization," *Polymer (Guildf)*, vol. 163, pp. 115–124, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.polymer.2018.12.057.

[93] A. J. Müller, M. Ávila, G. Saenz, and J. Salazar, "CHAPTER 3. Crystallization of PLA-based Materials," 2014, pp. 66–98. doi: 10.1039/9781782624806-00066.

[94] L.-T. L. S. E. M. S. H. T. Rafael Auras, *Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. John Wiley & Sons, 2010.

[95] N. lari, S. Ahangarani, and A. Shanaghi, "Six-layer antireflection TiO2/SiO2 coatings for solar covers: role of Triton and PDMS additives," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 27, no. 7, pp. 7141–7149, Jul. 2016, doi: 10.1007/s10854-016-4677-0.

[96] J. Shin, K. Han, and H. Lee, "Anti-reflection and hydrophobic characteristics of M-PDMS based moth-eye nano-patterns on protection glass of photovoltaic systems," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, no. 3, pp. 339–344, May 2011, doi: 10.1002/pip.1051.

ÖZGEÇMİŞ

1. **Adı Soyadı** **:** Merve YILMAZ
2. **Unvanı** **:** Araştırma Görevlisi

	Okul	**Yıl**
Lise	Aybastı Anadolu Öğretmen Lisesi - Ordu	2013 - 2017
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği	2017 - 2021
Yüksek Lisans	Marmara Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği	2022 -

3. **Bilimsel Eserler**

M. Yılmaz ve N. Ekren, "Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin Geliştirilen Taşınabilir Elektroeğirme Cihazları," *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 26, no. 4, pp. 1061–1077, 2023, doi: 10.17780/ksujes.1323114.

M. Yılmaz, E. Dursun, N. Ekren, Z. Karagöz, "Efficiency Increasing Coatings on Photovoltaic Panels (PV)," *14th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-14)*, Dec. 2023.