MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI NANO YAPILI KAPLAMALAR

ALİ SAMET SARKIN

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Türkçe)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nazmi EKREN

EŞ-DANIŞMAN
Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

İSTANBUL, 2022

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI NANO YAPILI KAPLAMALAR

ALİ SAMET SARKIN

(723115001)

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Türkçe)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Nazmi EKREN

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

İSTANBUL, 2022

TEŞEKKÜR

Akademik gelişimime ve doktora süresince katkıları, destekleri, yönlendirmeleri ve gösterdikleri anlayışlarından dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Nazmi EKREN ve tez eş danışmanım Prof. Dr. Şafak SAĞLAM'a teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar ve cihaz altyapı desteğini esirgemeyen Marmara Üniversitesi Nanoteknoloji ve Biyomalzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezi yöneticilerine teşekkür ederim.

Doktora süresi boyunca desteklerini maddi ve manevi olarak esirgemeyen eşim Işıl SARKIN, çocuklarım Mete ve İlker ile tüm aileme teşekkür ederim.

Ocak 2022 **Ali Samet SARKIN**

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **vi**
YENİLİK BEYANI ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvi**
TABLO LİSTESİ ..... **xix**
BÖLÜM – I **1**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları 4
1.1.1. Rüzgâr enerjisi sistemleri 5
1.1.2. Biyokütle enerji sistemleri 7
1.1.3. Jeotermal enerji sistemleri 9
1.1.4. Dalga ve Gelgit enerjisi sistemleri 11
1.1.5. Güneş enerji sistemleri 13
1.1.5.1. Termal güneş enerjisi sistemleri 14
1.1.5.2. Fotovoltaik sistem 17
1.2. Fotovoltaik Enerji Sistemleri 19
1.2.1. Şebekeden bağımsız sistem 19
1.2.2. Şebeke bağlantılı sistem 20
1.2.3. Fotovoltaik sistemlerin parametreleri 22
1.2.4. Elektrik şebekeleri üzerine etkiler 23
1.3. Fotovoltaik Özellikli Yapılar 24
1.3.1. Kristal-silikon güneş hücreleri 25
1.3.2. İnce film 28
1.4. Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Durumlar 30

BÖLÜM – II **35**
2. MATERYAL VE YÖNTEM **35**
2.1. Tezin Amaçları 35
2.2. Literatür Araştırması 36
2.3. Materyaller ve Yöntemler 44
2.4. Deneysel Uygulamalar 48
BÖLÜM – III **63**
3. BULGULAR VE TARTIŞMA **63**
3.1. Elektrospin Yöntemi Optik Sonuçlar 64
3.2. 3 Boyutlu Yazıcı Yöntemi Optik Sonuçlar 67
3.3. Elektriksel Sonuçlar 74
3.3.1. Solar simülatör sonuçları 74
3.3.2. Dış ortam testleri 76
BÖLÜM -IV **95**
4. SONUÇ **95**
KAYNAKLAR **99**
ÖZGEÇMİŞ **121**

ÖZET

FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI NANO YAPILI KAPLAMALAR

Güneş enerjisinden elektrik üretimi yöntemlerinden olan fotovoltaik (PV) yöntemde, güneş ışığının bir kısmı PV panelin koruyucu camından geri yansır, bir kısmı kırılır bir kısmı ise saçınır. Yansımayı engellemek için yansıma engelleyici kaplamalar kullanılmaktadır. Bulundukları iklim ve coğrafi şartlara göre yıl içinde üzerlerinde kum, toz, kir ve organik atıklar birikebilir. Üzerlerine kaplanan kirleticiler ile ışık geçirgenliği azalır, elektrik enerjisi üretimleri azalır ve verimleri düşer. Verim kaybını önlemek için PV paneller üzerine yansıma engelleyici ve kendi kendini temizleme özellikli kaplamalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında; yansıtma engelleyici ve kendi kendini temizleme özelliklerini birlikte gösteren tek katlı bir kaplama literatürde bulunmayan yeni bir yöntem olarak 3 boyutlu yazıcı ile yapılmıştır. Bu yöntemin kullanılması ile kaplamasız panelden daha fazla elektrik enerjisi elde etmek amaçlanmıştır. 3 boyutlu yazıcının yanında alternatif yöntem olarak elektrospinning yöntemi de denenmiş ancak uygulamaları başarılı olmamıştır.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında farklı formasyonlar ile denenen uygulamalar sonucunda 1,6 gr PLA, 20 ml $CHCl_3$, 0,025 gr SiO_2 ve 0,025 gr TiO_2 nano parçacık içeren sol-jel elde edilmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile yapılan kaplamalarda %84 ışık geçirgenliğine sahip, 3,122 - 8,477 μm kalınlıklarında, homojen dağılım gösteren kaplama elde edilmiştir. 5 farklı formasyona sahip olarak PV paneller üzerine yapılan kaplamaların 10 günlük dış ortam testlerinde PV-4 ve PV-5 kodlu paneller kaplamasız olana göre %4,654 ve %8,7 daha verimli olmuşlardır.

Farklı günlük hava şartlarına maruz kalan tüm PV panellerde tez çalışmasının amaçlarından olan kendi kendini temizleme özelliği hidrofobik yüzey oluşumu ile sağlanmıştır. Bu sayede yağmurlu günlerde önceden yüzeyde biriken toz partikülleri itilmiş ve panel yüzeyi herhangi dış müdahale olmaksızın kendi kendine temizlenmiştir. Test süresi içerisinde kaplamaların deforme olmadığı ve yüzeyde kaldığı gözlenmiştir. Elde edilen verilerin incelenmesi ve değerlendirilmeleri sonucunda PV paneller üzerine yapılan 5 kaplamadan 2 tanesi başarılı olarak kabul edilmiştir. Ancak kaplamaların

dayanımının ömrü, ışık geçirgenliğinin zaman içerisindeki değişimi ve kaplamanın fiziksel olarak bozulumuna bağlı olarak elektriksel olarak oluşacak farklılıkların tespiti için uzun süreli test edilerek değerlendirilmesine karar verilmiştir.

Ocak 2022 **Ali Samet SARKIN**

ABSTRACT

NANOSTRUCTURED EFFICIENCY-ENHANCING COATINGS ON PHOTOVOLTAIC PANELS

In the PV method, which is one of the methods of generating electricity from solar energy, some of the sunlight is reflected back from the protective glass of the PV panel, some of it is refracted and some is scattered. Anti-reflection coatings are made to prevent reflection. Depending to the climate and geographical conditions where they are set up, sand, dust, dirt, and organic waste may accumulate on cover glass during the year. With the pollutants on the cover glass, the light transmittance, the generation of electrical energy, and panel efficiency decrease. In order to overcome decreasing in efficiency, anti-reflective and self-cleaning coatings are applied on PV panels.

In this thesis study; a single-layer coating that shows anti-reflective and self-cleaning properties together was made with a 3-D printer which is a new method that has not used in the literature. With the use of this method, it is aimed to obtain more electrical energy than the uncoated panel. The electrospinning method has also been tried as an alternative method to 3D printing, but its applications have not been successful.

In laboratory studies; as a result of the samples applied with different formations, a sol-gel containing 1.6 g PLA, 20 ml $CHCl_3$, 0,025 g SiO_2 and 0,025 g TiO_2 nanoparticles was obtained by optimizing. In the coatings made with a 3D printer, a homogeneous coating was obtained at 84% light transmittance and 3.122 – 8.477 μm thickness. In the 10-day outdoor tests of the coatings made on 5 PV panels made with different parameters, PV-4 and PV-5 panels were 4.654 and 8.7% more efficient than the uncoated ones.

In all PV panels exposed to different daily weather conditions, the self-cleaning property, which is one of the aims of the thesis study, was achieved by obtaining a hydrophobic surface. Thus, on rainy days, dust particles that had previously accumulated on the surface were repelled, and the panel surface was self-cleaned without any external interference. It was observed that the coatings were not deformed and remained on the surface during the test period. As a result of the analysis and evaluation of the obtained data, 2 of the 5 coatings on the PV panels were accepted as successful. But it was decided to evaluate the durability of coatings by long-term testing for monitor the life span, the change in light transmittance over time, and the change in efficiency due to physical deformation of

the coating.

January 2022 **Ali Samet SARKIN**

YENİLİK BEYANI

FOTOVOLTAİK PANELLERDE VERİM ARTIRICI NANO YAPILI KAPLAMALAR

Fotovoltaik güneş enerji santralleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artmasına yönelik yatırımlar ile güneş enerjisi Türkiye ve Dünya'da elektrik enerjisi üretiminde giderek daha fazla yer almaya başlamıştır. Fotovoltaik güneş enerji sistemlerinin kurulumunda ve işletilmesinde karşılaşılan ve güç üretimini azaltarak verimi düşüren olumsuz etkenlerin azaltılmasına yönelik literatürde pek çok çalışma yapılmaktadır. Tez çalışmasının amacı da PV panellerin verimlerini düşüren yansımayı azaltan yansıma engelleyici özellikli ve toz, kir ve organik atık gibi yüzeyi kirleten maddelerin yüzeyden itilmesine yönelik kendi kendini temizleme özellikli hidrofobik etki gösteren kaplama elde etmektir. Literatür incelendiğinde kaplamalar için SiO_2 ve TiO_2 nano veya mikro partikülleri ile SiO_2'ye alternatif olarak MgF_2, TiO_2'ye alternatif olarak Al_2O_3 ve ZnO'nun sıklıkla kullanıldığı görülmüştür. Kullanılan yöntemler açısından spin-coating, dip-coating, CVD, PVD, elektrospreyleme ve elektrospinning tekniklerinin kullanıldığı görülmüştür. Kaplamaların nano kalınlıklardan mikron kalınlıklara kadar olduğu ve tek katlı ve çok katlı olarak yapıldıkları da görülmüştür.

Literatür bilgilerine dayandırılarak PLA polimeri, SiO_2 ve TiO_2 nano partikülleri ile karakterize edilen sol-gel elde edilmiştir. Literatürde uygulamasına rastlanılmamış 3 boyutlu yazıcı kullanılarak PV paneller hazırlanan uygulama düzeneğinde tek katlı olarak kaplanmıştır. Bu yöntemin uygulanması ve özel olarak karakterize edilen sol-gel kaplama ile literatüre katkıda bulunulmuştur. 3 boyutlu yazıcıların kullanılması, diğer yöntemlerin aksine PV panellere sonradan uygulama imkânı vermesi açısından eşsizdir. Doktora tezi kapsamında yapılan çalışmaların yansıtma engelleyici ve kendi kendini temizleme özellikli yapılacak gelecekteki birçok çalışmaya da yön vereceği değerlendirilmektedir.

Ocak 2022

Doç. Dr. Nazmi EKREN **Prof. Dr. Şafak SAĞLAM** **Ali Samet SARKIN**

SEMBOLLER

TWh	TeraWatt saat
MW	MegaWatt
GWh	GigaWatt saat
$cent / kWh	1 kWh tüketim karşılığı Amerikan dolar cent bedeli
m / sn	metre / saniye
P_o	Türbin Çıkış Gücü (watt)
$V_{cut\text{-}in}$	Başlama hızı (m/sn)
V_r	Maksimum güç hızı (m/sn)
$V_{cut\text{-}out}$	Durdurma hızı (m/sn)
V_w	Rüzgâr hızı (m/sn)
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
NO_x	AzotXoksit
°C	Derece Santigrat
MW / m^2	MegaWatt / metrekare
km	Kilometre
W / m^2	Watt / metrekare
kWh	KiloWatt saat
Wp	PeakWatt – en fazla Watt
€	Euro para birimi
kW	KiloWatt
MWh	MegaWatt saat
kWh/m^2	KiloWattsaat / metrekare

gr/m^2	Gram / metrekare
kV	KiloVolt
Hz	Hertz
eV	ElektronVolt
nm	Nanometre
µm	Mikrometre
$SiHCl_3$	Triklorosilan
TiO_2	Titanyum dioksit
mm	milimetre
Isc	Short circuit current (A) – Kısa devre akımı (A)
Voc	Open circuit voltage (V) – Açık devre gerilimi (V)
Vmax	Maksimum gerilim çıkışı
ηc	Panel / hücre verimi
ηtref	Panelin referans test verimi
βref	Sıcaklık katsayısı
Tc	Panel sıcaklığı
Tref	Panel test referans sıcaklığı
T0	Anlık sıcaklık
ρ	Yansıma - Reflectance
τ	Geçirgenlik - Transmittance
α	Emilim – Absorbance
SiO_2	Silisyum dioksit
MgF_2	MagnezyumFlorür
Si_3N_4	SilisyumNitrür
ZrO_2	Zirkonyum dioksit

η	Yansıtma indeksi
$\eta_{kaplama}$	Kaplamanın yansıtma indeksi
η_{hava}	Havanın yansıtma indeksi
$\eta_{yüzey}$	Yüzeyin yansıtma indeksi
$d_{kaplama}$	Kaplamanın kalınlığı (nm)
λ	Dalgaboyu (nm)
ZnO	Çinko oksit
CdS	KadmiyumSülfür
ZnS	ÇinkoSülfit
WO_3	Tungsten trioksit
Fe_2O_3	Demir oksit
SnO_2	Kalay oksit
CeO_2	Seryum oksit
V_2O_5	Vanadyum pentaoksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Ta_2O_5	Tantal pentaoksit
HfO_2	Hafniyum oksit
SiO	Siliyum monoksit
$CHCl_3$	Kloroform – Chloroform
Ch_3COOH	Asetik Asit
Ch_3Ch_2OH	Etanol
ml/saat	mililitre / saat
mm/sn	milimetre / saniye
d/dk	devir / dakika
mA	miliAmper

Rth	Thevenin devresi eşdeğer direnci
Vr	Yük direnci gerilimi
P	Elektrik gücü
R	Yük direnci

KISALTMALAR

ABS	Acrylonitrile Butadien Styrene - Akrilonitril Bütadien Stiren
AC	Alternatif Akım
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
DC-DC	Doğru Akımdan Doğru Akıma
DG	Distributed Generation - Dağıtık Üretim
DSSC	Dye-sensitized Solar Cells
E	Enlem
ECD	Elektrochemical Deposition - Elektrokimyasal Biriktirim
EDS/EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy - Spektroskobik Enerji Dağılımı
Ext. Mp.	Extruder Multiplier – Ekstrüder Çarpanı
EVA	Ethylene Vinyl Acetate - EtilenVinilAsetat
GES	Güneş Enerjisi Santrali
I.P.	Infill Percentage – Doldurma oranı
JES	Jeotermal Enerji Santrali

MPPT	Maximum Power Point Tracking – Maksimum Güç Noktası İzleyicisi
OSC	Organic Solar Cells
p-n	Pozitif-Negatif kutup
PAN	Polyacrylonitrile - Poliakrilonitril
PC	Polycarbonate - Polikarbonat
PE-CVD	Plazma Enhanced CVD – Plazmalı CVD
PETG	Polyethylene terephthalate glycol - Polietilen Tereftalat
PLA	Polylactic acid – Polilaktik asit
PMMA	Polymethylmethacrylate - Polimetilmetakirilat
PP	Polypropylene - Polipropilen
PTC	Parabolic Through Collector, Parabolik Lineer Yoğunlaştırıcı
PU	Polyurethane - Poliüretan
PV	Photovoltaic - Fotovoltaik
PVA	Polyvinlyalcohol - Polivinilalkol
PVAc	Polyvinlyacetate - Polivinilasetat
PVD	Physical Vapor Deposition - Fiziksel Buharlı Biriktirim
PVF	Polyvinyl Flüoride - PolivinilFlorid
PVP	Polyvinlypyrrolidone - Polivinilpirolidon
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
RF	Radyo Frekans
RLC	Resistor-Inductor-Capacitor (Direnç-Bobin-Kondansatör)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition - Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama
SEM	Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu
Sol-gel	Solution-Gel - Solüsyon-Jel

THD	Total Harmonic Distortion - Toplam Harmonik Bozulumu
UN	United Nations- Birleşmiş Milletler
UV	Ultraviyole

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Türkiye kurulu elektrik gücünde kaynakların payı- Ağustos 2021 [7] 2

Şekil 1.2 Türkiye toplam elektrik enerjisi üretiminde kaynakların payı- 2020 yılı [9] ... 3

Şekil 1.3 Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması 4

Şekil 1.4 Rüzgâr türbini bileşenleri [20] 6

Şekil 1.5 Rüzgâr hızı ile güç çıkış ilişkisi [25] 7

Şekil 1.6 Biyokütleden elektrik üretimi yöntemleri 8

Şekil 1.7 Jeotermal enerji sistemi çevrimi 9

Şekil 1.8 Jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretim yöntemleri [37] 11

Şekil 1.9 Gelgit enerjisi üretim yöntemleri şeması [40] 12

Şekil 1.10 Dalga enerjisi üretim yöntemleri [42] 13

Şekil 1.11 Güneş kulesi yöntemleri, (a)Su, buhar, (b)Eritilmiş tuz [46] 15

Şekil 1.12 (a)Parabolik yoğunlaştırıcı, (b)Fresnel yansıtıcı [48, 49] 16

Şekil 1.13 Çanak yoğunlaştırıcı [43] 17

Şekil 1.14 Fotovoltaik olay [57, 58] 18

Şekil 1.15 Şebekeden bağımsız sistem 20

Şekil 1.16 Çatı tipi şebeke bağlantılı PV sistem 21

Şekil 1.17 PV güneş enerjisi santrali (GES) 21

Şekil 1.18 MPPT içeren merkezi invertör [64] 22

Şekil 1.19 (a)Adalanma, (b)Güç akışı [78, 75] 24

Şekil 1.20 PN jonksiyon için uygun dalga boyu [81] 26

Şekil 1.21 Czochralski metodu [83] 27

Şekil 1.22 Kristal silikon hücreler 28

Şekil 1.23 GIGS ve CdTe ince film katmanları [91, 93, 97, 99] 29

Şekil 1.24 PV panel bileşenleri [105] 31

Şekil 2.1 Dip-coating ve Spin-coating yöntemleri [145] 38

Şekil 2.2 (a) CVD [148], (b) Spray pyrolysis [147] 40

Şekil 2.3 Elektrospin yöntemi [149] 41

Şekil 2.4 (a)Tek katlı kaplama yansıma, (b) Çok katlı kaplama yansıma [124] 42

Şekil 2.5 (a)Hidrofilik (b) Hidrofobik 43

Şekil 2.6 Deneylerde kullanılan elektrospining cihazı 46

Şekil 2.7 Deneylerde kullanılan 3 Boyutlu yazıcı 47

Şekil 2.8 Çalışmaların aşamaları 49

Şekil 2.9 Elektrospin uygulaması 53

Şekil 2.10 3 Boyutlu yazıcı uygulaması 54

Şekil 2.11 Optik mikroskop 55

Şekil 2.12 Spektrofotometre 56

Şekil 2.13 3 boyutlu yazıcı ile PV panel kaplaması 57

Şekil 2.14 (a)Kaplama yapılmış PV, (b)Kaplamasız PV 57

Şekil 2.15 Sputter coater 58

Şekil 2.16 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) 59

Şekil 2.17 Solar simülatör 60

Şekil 2.18 Elektriksel test düzeneği 61

Şekil 3.1 (a) 3 boyutlu yazıcı (b) elektrospin lam üzerine yapılan kaplama örnekleri 64

Şekil 3.2 Elektrospin lam kaplamaları 65

Şekil 3.3 Elektrospin %T ölçümü 66

Şekil 3.4 3 boyutlu yazıcı lam kaplamaları 67

Şekil 3.5 3 boyutlu yazıcı ile elde edilen homojen kaplamalar 68

Şekil 3.6 3 boyutlu yazıcı %T ölçümü 69

Şekil 3.7 EDS analizi 71

Şekil 3.8 Kaplama kalınlıkları analizi 73

Şekil 3.9 Simülatör I-V eğrileri 74

Şekil 3.10 Simülatör güç-zaman eğrileri 75

Şekil 3.11 PV-1 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları 76

Şekil 3.12 PV-2 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları 77

Şekil 3.13 PV-3 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları 78

Şekil 3.14 PV-4 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları 78

Şekil 3.15 PV-5 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları 79

Şekil 3.16 PV-1 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi 81

Şekil 3.17 PV-1 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri 82

Şekil 3.18 PV-2 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi 83

Şekil 3.19 PV-2 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri 84

Şekil 3.20 PV-3 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi 85

Şekil 3.21 PV-3 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri 86

Şekil 3.22 PV-4 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi 87

Şekil 3.23 PV-4 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri 88

Şekil 3.24 PV-5 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi 89

Şekil 3.25 PV-5 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri 90

Şekil 3.26 Hidrofobik yüzey oluşumu (a)Kaplamalı PV (b)Kaplamasız PV 92

Şekil 3.27 Dış ortam test başlangıcında ve sonunda PV paneller (a)Kaplamalı PV, (b)Kaplamasız PV 93

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Termal yoğunlaştırma yöntemleri verimleri ve yoğunlaşma faktörü [43] ... 14

Tablo 2.1 Literatürde uygulanan düşük ve yüksek indeksli maddeler..... 44

Tablo 2.2 Solüsyon içerikleri..... 50

Tablo 2.3 Elektrospin yöntemi değişken değerleri 52

Tablo 2.4 3 Boyutlu yazıcı değişken değerleri 52

Tablo 3.1 Yeniden hazırlanan solüsyon isimlendirmeleri ve 3 boyutlu yazıcı parametreleri..... 70

Tablo 3.2 Test günleri hava durumu..... 80

Tablo 3.3 Kaplamalı panellerin verim kazançları..... 91

BÖLÜM – I

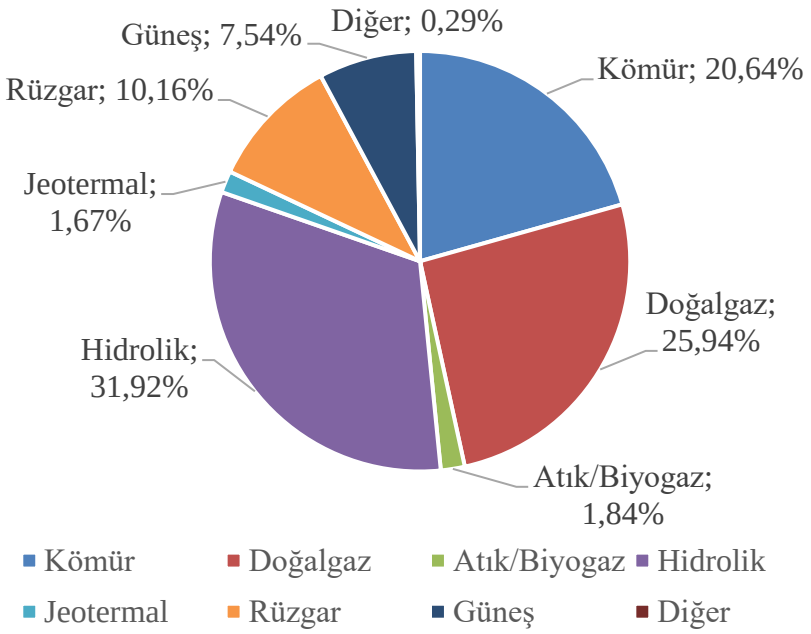
1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi günümüzde insan hayatında temel gereksinim haline gelmiştir. Bu ihtiyaca talep her geçen gün artmaktadır. Elektrik arz-talep dengesinin kurulabilmesi ve sürdürülebilmesi için elektrik enerjisi üretiminin çeşitlendirilerek süreklilik sağlanmalıdır. Elektrik enerjisinin üretimi için fosil kaynakların kullanımının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması günümüz ve gelecek için önemlidir.

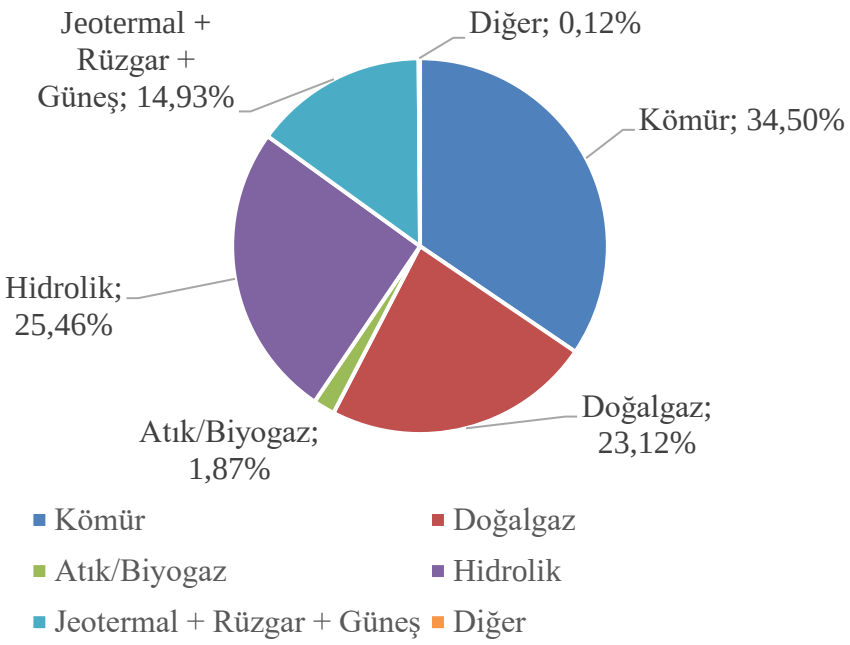
Elektrik enerjisinin üretiminde kullanılan kaynakları fosil kökenli kaynaklar, nükleer ve yenilenebilir kaynaklar olarak sınıflandırılabilir. Fosil yakıt olarak kömür, linyit, asfaltit, doğalgaz ve petrol ürünü olarak motorin ile fuel-oil kullanılır. Yenilenebilir kaynaklar ise hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga enerjisi ve biyokütledir [1]. Her üretim kaynağı ve üretim yönteminin enerji üretim profili farklıdır. Baz, orta ve puant olarak ayırılan temel yük santrallerinde hidroelektrik, kömür termik ve nükleer santraller baz yük talebinin karşılanması amacıyla çalışırlarken, kömür kaynaklı termik santraller orta yük talebi ve doluluk oranına bağlı olarak hidroelektrik santralleri ile doğalgaz termik santralleri de puant yük talebinin karşılanması amacıyla devreye alınırlar [2, 3]. Mevsimsel, ekonomik ve kaynakların bulunurluğu şartlarına göre bir kaynak kullanımı azalırken diğerlerinin üretimdeki payı artırılmaktadır.

Fosil yakıtların kullanımının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki payının artırılması yönünde gerek dünyada gerekse de Türkiye'de orta ve uzun vadeli planlar hazırlanmıştır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2019-2023 yılları 5 yıllık kalkınma planlarına yenilebilir enerjinin kurulu güce oranının artırılması, teşvik politikalarının uygulanması ve verimlilik artırılması hedeflerini eklemiştir [4]. Dünya genelinde ise Birleşmiş Milletler (United Nations, UN)'de yapılan görüşmeler sonucu 2005 yılında yürürlüğe giren İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi -Kyoto Protokolü ile yenilenebilir enerji türlerine ve karbondioksiti gideren teknolojilerin kullanımının artırılması, fosil kaynakların kullanımı sınırlandırılarak sera gazı salınımının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması başlıklarında ülkeler taahhütte bulunmuşlardır [5].

Küresel elektrik enerjisi üretimi ve talebi değişken iklim şartlarından etkilenmesine rağmen elektrik enerjisi üretimi son 20 yıl boyunca her yıl ortalama %3 artış göstererek 2019 yılı sonu itibari ile 27.000 TWh'i aşmıştır [6]. Türkiye'de 2021 yılı Ağustos ayı itibari ile kurulu güç 98.492,7 MW olup, 2020 yılı boyunca 2019 yılındaki 303.897,6 GWh'den %0,92 daha fazla elektrik enerjisi üretilerek toplam 306.703,1 GWh elektrik enerjisi üretilmiştir [7-9]. Türkiye'de kurulu elektrik gücünün ve üretilen toplam elektrik enerjisinin kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Türkiye kurulu elektrik gücünde kaynakların payı- Ağustos 2021 [7]



Şekil 1.2 Türkiye toplam elektrik enerjisi üretiminde kaynakların payı- 2020 yılı [9]

Türkiye'nin kurulu elektrik gücünün %46,87'ünü oluşturan fosil yakıtların payları %20,64, %25,94 ve %0,29 olan kömür, doğalgaz ve diğer sıvı yakıtlar oluşturmaktadır. 2020 yılı boyunca üretilen toplam elektrik enerjisine bakıldığında ise %34,50'si kömür ve linyitten, %23,12'si doğalgazdan ve %0,10'u da fuel-oil ya da dizel yakıtlı olmak üzere üretilen toplam elektriğin %57,72'si fosil kökenli yakıtlardan karşılanmıştır. Kurulu gücün %21,21'i hidrolik hariç güneş, rüzgâr, jeotermal ve atık/biyogaz kaynaklardan oluşmakta iken üretilen elektrik enerjisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %16,80'de kalmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyel güç ile gerçekleşen üretim arasında bulunan fayda sağlanamamış fark 13.525,6 GWh'e denk gelmektedir. Fosil yakıtların kurulu gücünün oranı %46,87 olmasına rağmen üretimde daha fazla faydalanıldığı ve üretimin %57,72'isinin karşılanması yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla gereksinimi göstermektedir.

Baz yük talebini karşılaması beklenen nükleer santrallerin Türkiye'de 2021 yılı itibari ile devreye girmemiş olmaları sebebiyle, baz yük hidrolik, doğalgaz ve kömür türlerinden karşılanmaktadır. Mevsimsel sebepler ile hidrolik kaynakların elektrik enerjisi üretimindeki paylarının azaltılması kömür ve doğalgaz kaynaklarının kullanımını artırmaktadır. Talep artışı kurulu güç artışını zorlamaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde kurulu güç artışı için yeni santrallerin devreye alınmasında alternatif kaynaklar olarak

yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve gerekliliği giderek önemli olmaktadır.

Kaynak çeşitliliğinin artırılması arz güvenliğini de sağlayacak olup kömür, doğalgaz ve hidrolik kaynaklara bağlılığın azalmasını da sağlayacaktır. Hidroelektrik santraller, kömür ve doğalgaz termik santralleri gibi Türkiye'nin üretiminin %83,19'unu oluşturan bu üretim merkezlerinin her zaman şehirlere yakın mesafede değildirler. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarından kurulum için uygun potansiyeli barındıran yerleşim alanlarına yakın kurulması sağlanarak enerji iletiminde kayıplar azaltılabilecektir. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji sistemlerinin şebekeye bağlanmasında karşılaşılan güç kalitesi sorunu çözülerek, koruma ve frekans stabilitesi sağlanıp gerilim dalgalanmaları önlenebilecektir [10]. Yakında üretim – yakında tüketim yaklaşımı oluşturarak Türkiye enterkonnekte şebekesinde büyük üretim santrallerinin yanı sıra potansiyeli mümkün olan yerleşim yerlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarından da üretim sağlayarak dağıtık üretim ile büyük ölçekte bir üretim yapısı oluşacak ve bu sayede şebeke verimliliği artırılarak, kesintisiz ve kaliteli elektrik sağlanacaktır.

1.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları "temiz enerji" ya da "yeşil enerji" olarak da ifade edilir ve doğa dostu, temiz, atıksız ve doğal olarak bulunabilen kaynaklar olarak tanımlanır [11]. Yenilenebilir enerji alanında kullanılan kaynaklar; hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyo enerji ve dalga enerjisi olarak Şekil 1.3'teki gibi sınıflandırılabilir [12].



Şekil 1.3 Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması

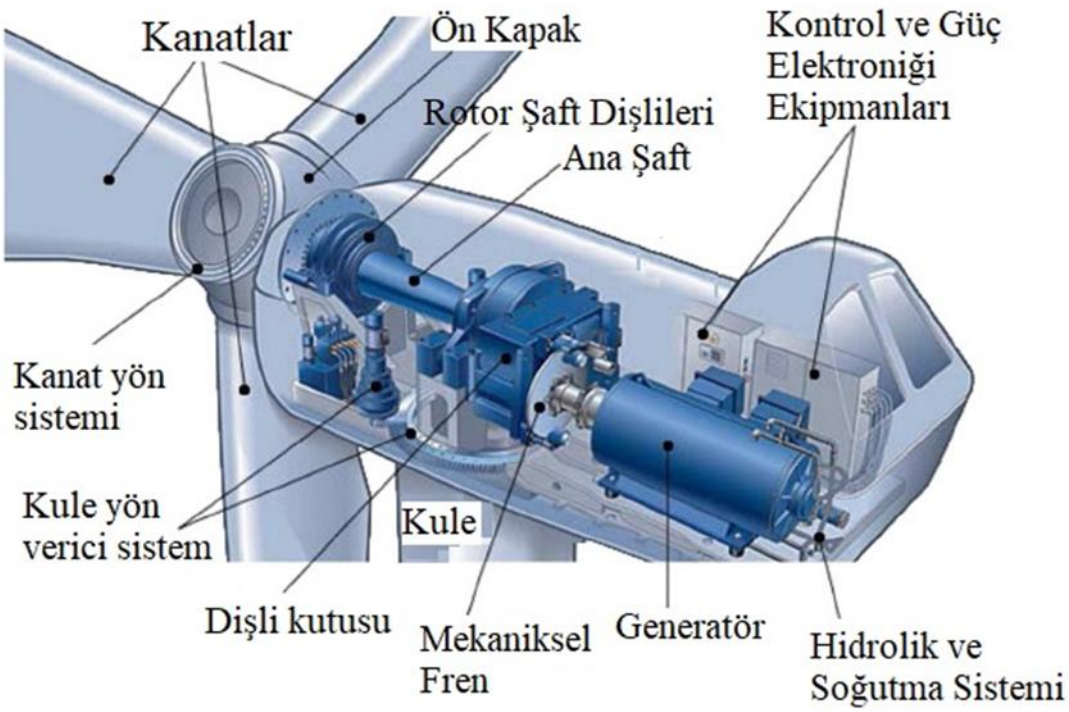
Yenilenebilir enerji kaynaklarının yeşil ya da temiz enerji olarak adlandırılmalarına rağmen çevreye etkileri, tarımsal etkiler, biyo çeşitlilik bozulması ve eko sistem üzerine olumsuz etkileri olduğu öne sürülmektedir [13]. Ayrıca ilk yatırım maliyetlerinin güneş, rüzgâr gibi kaynaklarda konvansiyonel yöntemlere göre daha yüksek oluşu, $cent/kWh oranının yüksekliği sebebiyle yenilenebilir enerji kaynakları diğer yöntemlerin gerisinde kalmaktadır. Mevcut ve yeni üretim tesislerinde kaynakların daha verimli kullanılarak üretimin sağlanması fosil kaynaklara göre çok daha az olan endişelerden tamamen arındıracaktır. Yapılan bu tez çalışması da yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin üretim yöntemlerinden birisi olan fotovoltaik(photovoltaic-PV) sistemde verim artırma konu edinilmiştir.

1.1.1. Rüzgâr enerjisi sistemleri

Rüzgâr enerjisi sistemleri genel bilinen adıyla rüzgâr türbinleri ile elektrik elde etme rüzgârın fiziksel kuvvetini yani kinetik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek generatör rotoruna hareket kazandırma prensibine dayanır. Rüzgâr türbinleri tasarımlarını yel değirmenlerinden almıştır [14]. Bir doğa olayı olan rüzgâr elektrik enerjisi üretiminde temiz, atıksız ve zehirli gaz salınımı olmayan bir kaynaktır. Elektrik enerjisi üretimi için yakıt maliyetinin olmaması, sadece işletme ve kurulum giderlerine sahip olması avantaj iken rüzgâr enerjisi santrallerinin rüzgâr şiddetinin uygun ve süreklilik barındırdığı bölgelerde kurulması bir dezavantaj olarak ifade edilebilir. Rüzgâr hızının sürekli olmayıp değişken bir yapıda olması ayrıca yoğun olmayan sıcak hava yerine daha yoğun bir akıma sahip soğuk rüzgârların olduğu bölgelerde verimli olmaktadır [15]. Rüzgâr hızının değişken yapıda olması sebebiyle güç dağıtımında puant yükü karşılayamazlar. Bunu yerine aktif oldukları zaman diliminde şebekeye bağlanarak baz veya orta yükleri karşılayabilirler. Dünya genelinde rüzgâr enerjisi santrallerinin (RES) kurulu gücü 2020 yılında 595 GW olup kurulu gücün büyük çoğunluğu Çin'de bulunmaktadır [12, 16]. Rüzgâr sistemleri dünya elektriğinin %8,4'ünü karşılayacak kurulu güce sahiptirler [17, 18].

Rüzgâr türbinleri içerisinde bulunan generatör ile elektrik üretimini doğrudan alternatif gerilim (AC) olarak üretir. Bir rüzgâr türbininde rotor bıçakları (kanatlar), dişli kutusu, generatör, kule, yön verici, fren, enerji iletim kabloları ve rüzgâr hız sensörleri bulunur

[19]. Bir rüzgâr türbini birleşenleri Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

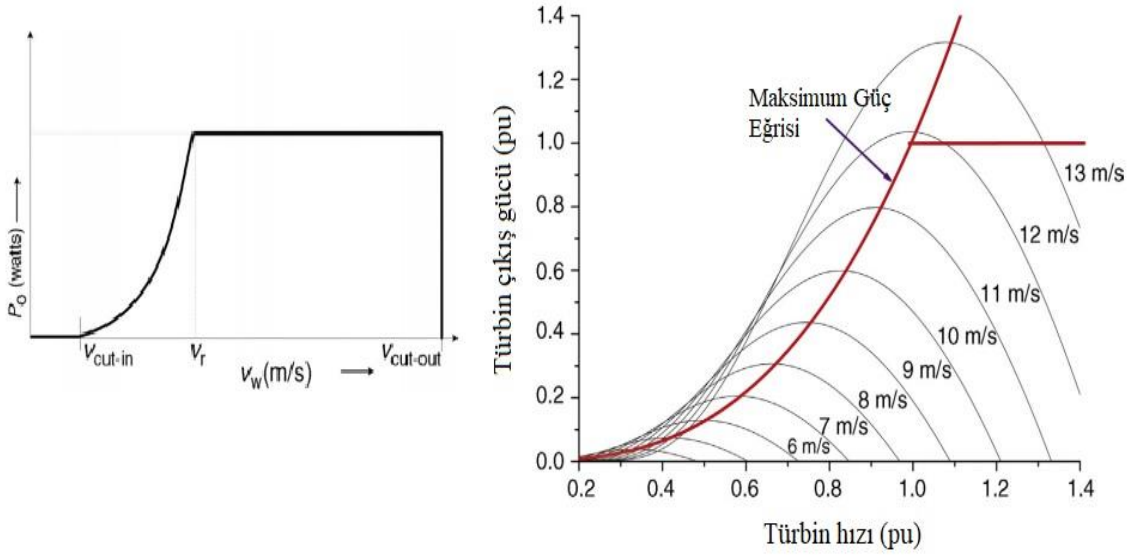


Şekil 1.4 Rüzgâr türbini bileşenleri [20]

Büyük, ağır ve çok sayıda mekanik ve elektronik bileşen içeren rüzgâr türbinlerinde düşük hızda kanat dönüşünü generatör rotoruna artırarak ileten dişli sistemi (gearbox) bulunur. Bu parça rotor ve kanatların iki ucu ile şaft üzerindedir. En sık yapısal arıza kanatların aşınmasıdır ancak dişli kutusu türbindeki en ağır parça olmakla birlikte bakımı en sık yapılarak yağlanması gereken parçadır [21-23]. Kanatların hızının artırılması ya da yavaşlatılması için kanatların rüzgârı yakalamasını sağlayan yön sistemi(pitch) ve türbinin kendisinin(nacelle) rüzgâr yönüne doğru dönüşünü sağlayan kule yön verici (raw) sistem bulunur. Dönüş sistemi içerisinde bulunan fren ile bakım ya da fırtınalı hava şartlarında türbinin dönüşünü geçici süreliğine kilitlemek amacıyla bulunur. Bu sistemler hız ve yön sensörlerinden alınan bilgiye göre kontrol sistemi ile hareket ettirilir. Elektrik aksamı generatör, transformatör, sensörler ve kontrol ve kumanda elektroniğinden meydana gelir. Arıza oranı en yüksek parçalar elektriksel aksamda bulunurlar ve hassas olmalarından dolayı kontrol edilmeleri gerekmektedir [24].

Rüzgâr enerjisinde generatörün rotoruna hareketi sağlayan rüzgâr hızı Şekil 1.5'teki gibi

belirli hızın altında ya da üzerinde kaldığında hareket durur. Yavaş hızda rotorun yeterince ivmelenememesi olurken yaklaşık 25 m/sn hızlarından yüksekte rotorun sarsılmaması, kanatların yıpranmaması ve mekaniksel problemlerin oluşmaması için Şekil 1.4'teki mekanik fren ile durdurulur [25].



Şekil 1.5 Rüzgâr hızı ile güç çıkış ilişkisi [25]

Şekil 1.5'teki verilenlerden;

P_o Türbin Çıkış Gücü (watt)

$V_{cut\text{-}in}$ Başlama hızı (m/sn)

V_r Maksimum güç hızı (m/sn)

$V_{cut\text{-}out}$ Durdurma hızı (m/sn)

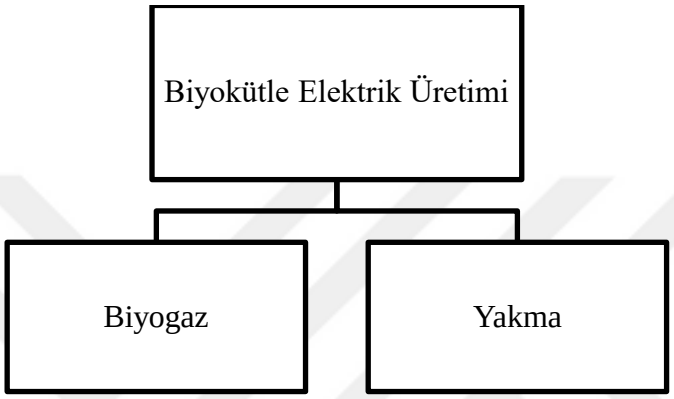
V_w Rüzgâr hızı (m/sn)

ifade etmektedir. Devreye girme hızı yaklaşık 6 m/sn, devreden çıkma hızı ise 25 m/sn civarındadır [26]. Anma güç çıkışı verecek rüzgâr hızına 11,7 m/sn'de ulaşmakta ve bu hızdan yüksekte frenleme çalışmaya başlamaktadır [27].

1.1.2. Biyokütle enerji sistemleri

Biyokütle enerji sistemleri, kaynağı güneş olan diğer bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütle amaçlı yetiştirilen tarımsal ürünler ve genel tarımsal artıklar, hayvan atıkları,

ağaç ve bitki atıkları gibi doğal artıklar biyokütle sistemlerinin temel girdileridir. Biyokütle ile elektrik üretilebileceği gibi ısınma amaçlı da kullanılabilir. Kimyasal işlemler sonrasında etanol, metanol, bitkisel yağ ve biogaz elde etmek amaçlı biyokütle kaynakları kullanılabilir [28]. Biyokütle kaynaklarının doğrudan yakılarak elektrik üretilebileceği gibi ikincil ürün haline getirilerek de elektrik üretimi sağlanabilir. Biyokütle kaynakları ile elektrik enerjisi üretimi Şekil 1.6'da gösterildiği gibi 2 yöntemle yapılabilir.



Şekil 1.6 Biyokütleden elektrik üretimi yöntemleri

Biyokütle ile elektrik üretiminde 2 yöntem temel alınır. Bu yöntemlerin birisi kaynakları ya da atıkları kurutarak ilk önce nem ve ıslaklığının alınması sonrasında yakma kazanında doğrudan yakarak(combustion) elektrik üretimidir. Biyokütle kaynaklarının yakılması ile kapalı çevrimde bulunan suyun sıcaklığı artırılarak sıcak buhar türbini çevrilir. Bu yöntem ile elektrik üretimi klasik bir termik yöntemdir. Doğrudan yakım sonrası kül birikimi ve CO, CO_2 ve NOx salınımı olmaktadır [29]. Diğer yöntem ise piroliz yöntemi ile atıklardan metan gazı oluşumu sağlayıp gazın depolara alındıktan sonra yakılmasıdır. Ancak biyogaz yönteminde de metan gazı yakımı sonrasında da karbon gazı salınımı olması bu yöntemde tamamen temiz enerjinin üretilmesinin önüne geçmektedir.

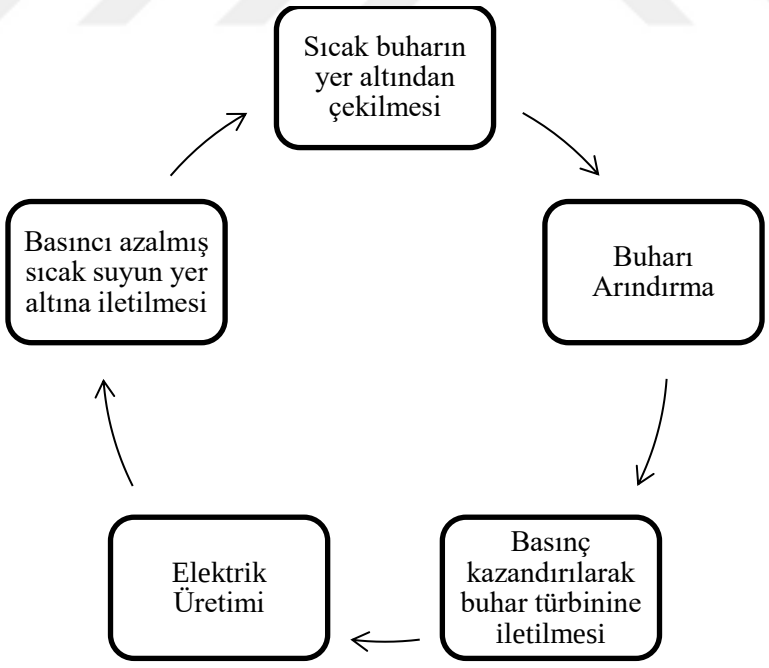
Biyokütle enerji sistemlerinin getirdiği en büyük fayda evsel atıkların bertaraf edilmesi noktasında doğrudan yakma ya da biyogaz elde edilerek ortadan kaldırılmasıdır. Ancak bu üretim yönteminde merkezin daima beslenmesi, üretimin durmaması için sürekli olarak atıkların getirilmesi ve bu kaynaklara yakın yerde inşa edilmesi gibi olumsuz yönleri olduğu söylenebilir. Türkiye'de 1138 MW biyogaz, 371 MW doğrudan yakma olmak üzere 1509 MW kurulu güce sahip biyokütle elektrik enerji üretim sistemi

mevcuttur [1].

1.1.3. Jeotermal enerji sistemleri

Jeotermal enerjiden elektrik üretimi yer altı sıcak buhar rezervuarlarına açılan kanallardan basınçlı buharın ve sıcak suyun alınarak basınç kazandırılması ve sıcak basınçlı buharın buhar türbinine gönderilmesi prensibine dayanır. Elektrik üretimi buhar türbini vasıtası ile gerçekleşir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının temel özellikleri olan atıksız, doğal ve yakıtsız olması özelliklerine sahip olan jeotermal enerji sistemleri (JES) güneş ve rüzgâr enerjisinden farklı olarak zamana ve atmosfer koşullarına bağlı kalmadan elektrik enerjisi sürekliliği sağlayabilmeleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu avantajları ile baz yükü karşılayabilirler. Durdurma ve başlatma süreleri kısadır. Ancak yeraltı rezervuarlarına bağlı olmaları her yerde tesis edilememelerini dezavantaj haline getirmektedir. İlk yatırım maliyetlerinin 2/3'ünü kazı ve sondaj maliyetleri oluşturur ancak üretim uzun yıllar süreklilik arz etmektedir ve elektrik üretim $cent/kWh maliyetleri oldukça düşüktür [30]

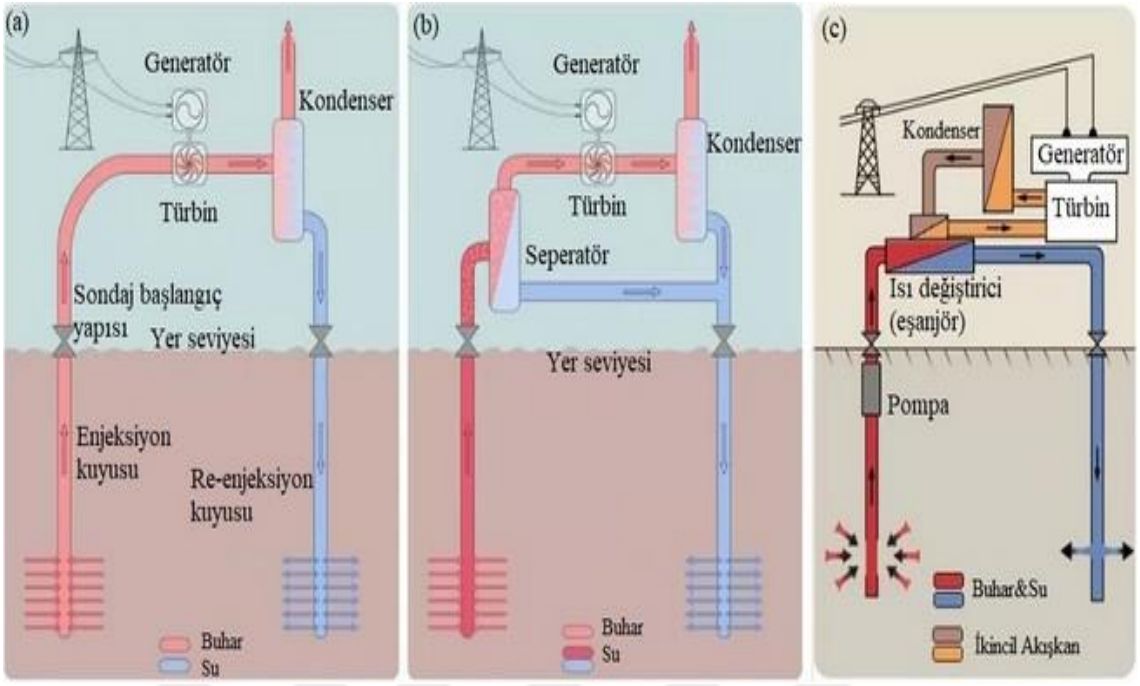
Jeotermal kaynaklar ile elektrik üretiminin yanında konut ısıtması, kaldırım-cadde ısıtması, seracılık, kaplıca ve mineralli su amaçlı kullanılırlar [31].



Şekil 1.7 Jeotermal enerji sistemi çevrimi

Şekil 1.7'de verilen örnek bir jeotermal enerji sistemlerinde elektrik üretimi çevrimi

konvansiyonel buhar türbini ile gerçekleşmektedir. Jeotermal enerji sistemlerinde 3 santral tipi vardır. Bunlar; Kuru buharlı, Flash buharlı ve Çevrim(Binary) sistemlidir. Kuru buhar akımlı jeotermal enerji santralleri (Şekil 1.8.(a)) yüksek sıcaklığa sahip buhar rezervuarlarına kurulurlar. Açılan enjeksiyon kuyularından tamamen 230-235℃ sıcaklıkta buhar geldiği bu sistem verimi en yüksek ve inşa maliyeti en düşük olan sistem olmasına rağmen en seyrek görülen santral türüdür. Bu yöntemde rezervuar iç sıcaklığının düşmemesi için geri dönüş (re-enjeksiyon) kuyularının enjeksiyon kuyularından yeterince uzakta olmasına dikkat edilir [32]. Flash sistemleri (Şekil 1.8.(b)) yüksek sıcaklıktaki su rezervuarları üzerine kurulurlar. Flash sistemleri ıslak buharlı olarak da adlandırılırlar [33]. Yaklaşık 180℃ sıcaklıktaki sıcak su ile karışık olan su buharı bu sistemde separatör tankına alınarak sıcak su ile buhar ayrıştırılır [34]. Tankta sıkıştırılan buharın basıncı da artar ve türbine sadece buhar gönderilmiş olur. Çevrim sistemleri (Binary Cycle)(Şekil 1.8.(c)) yer altından alınan 150℃ derecenin altı gibi daha düşük sıcaklıklardaki sıcak suyun kapalı bir çevrime sahip sistemde ısı transferi yapılmasına prensibine dayanır [35, 36]. Böylece sistemde kayıp ve kaçak olmaksızın kaynaktan çekilen su sıcaklığı düşük olmasına rağmen sıcaklık kaybı minimumda tutularak re-enjeksiyon kuyusu ile rezervuara geri gönderilir. Verimleri yaklaşık %12 gibi düşük olmasına rağmen küçük jeotermal rezervuarlarına kurulumları uygundur. Şekil 1.8'de jeotermal üretim yöntemleri bir arada verilmiştir.



Şekil 1.8 Jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisi üretim yöntemleri [37]

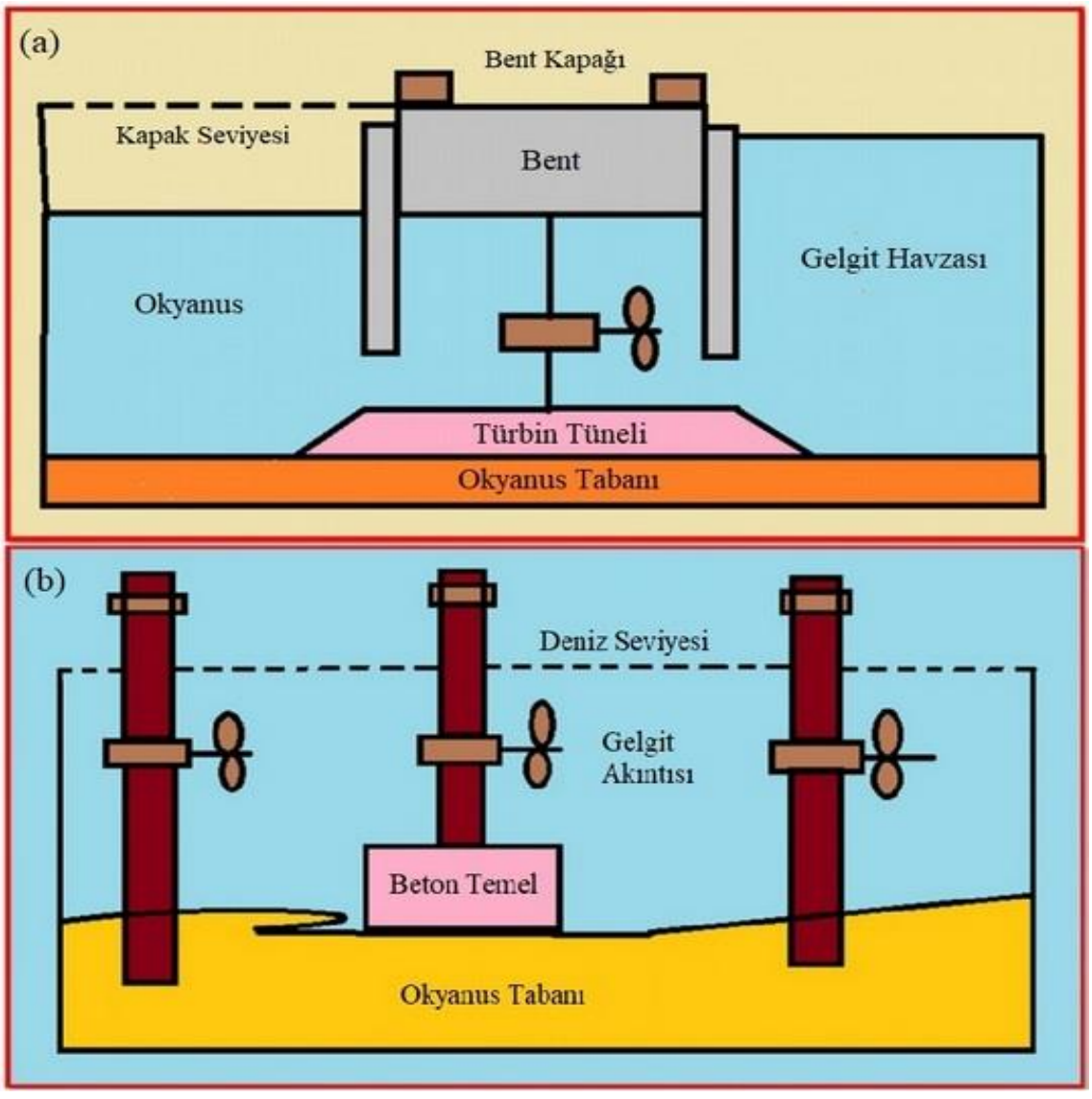
Türkiye'nin elektrik kurulu gücünde 2019 yılı itibariyle en küçük pay oranı toplam kurulu gücün %1,66'ine denk gelen 1514 MW ile jeotermal elektrik enerjisi üretim santralleri yer almakta olup jeotermal kurulu gücü 2020 yılı sonunda 1624 MW'a yükseltilmiştir [1, 38]. Bu üretim sistemi sürdürülebilir ve yenilenebilirliği yüksek kaynak olmasına rağmen Türkiye'de sadece Denizli, Aydın ve Manisa illerinde jeotermal elektrik üretim santralleri kuruludur.

1.1.4. Dalga ve Gelgit enerjisi sistemleri

Dalga ve gelgit enerjileri, okyanus enerjisi olarak da adlandırılır. Deniz yüzeyi veya içerisindeki suyun hareketinin sahip olduğu kinetik enerjinin mekanik enerjiye aktarılması prensibine dayanır. Dalga ve Gelgit enerjisi yöntemi dünya genelinde farklı ülkelerde bulunsa da Türkiye'de bu yöntemler ile elektrik üretimi gerçekleşmemektedir.

Gelgit enerjisi dünya ve ay yüzeyleri arasındaki mesafenin yıl içinde değişmesi ile aralarındaki çekim gücünün değişmesi ile kıyılardan suların çekilip geri gelmesidir. Bu yöntemde Şekil 1.9(b)'de görülen suyun içine rüzgâr türbini benzeri yapı oluşturarak aktif akıntılardan faydalanıldığı gibi Şekil 1.9(a)'da görülen deniz ya da okyanusun körfez veya koy gibi yerlerinde suyun önüne set çekilerek suyun bu sete yerleştirilen

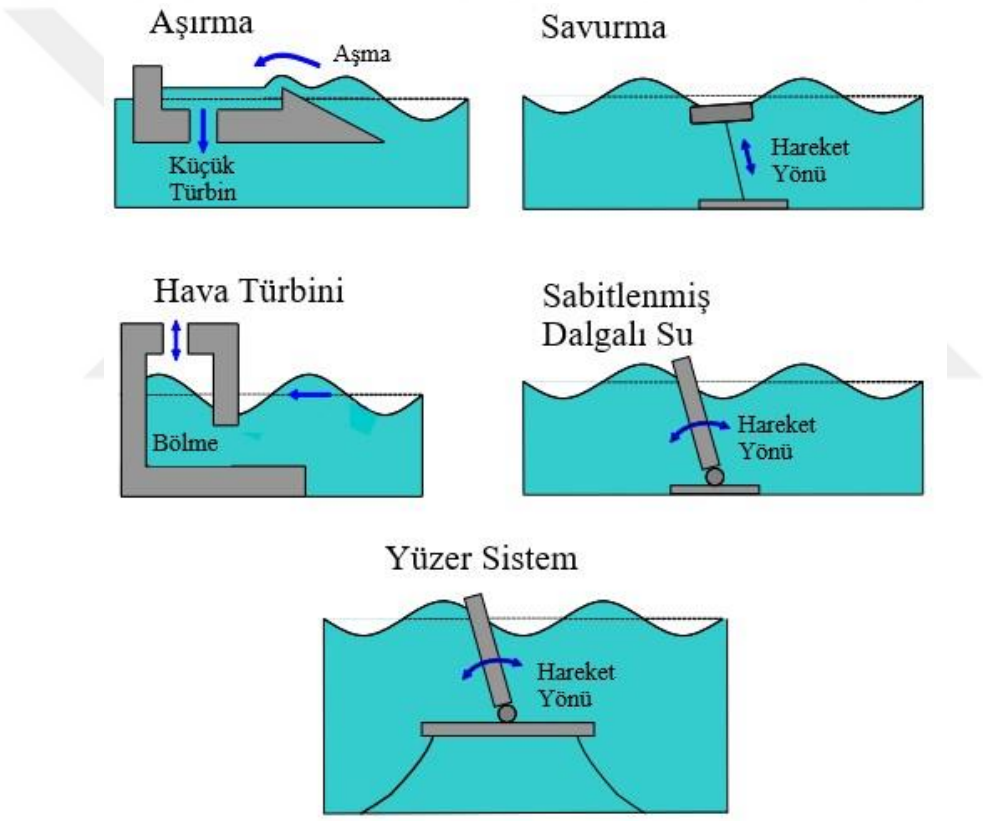
türbinlerden geçişi gerçekleşir [39]. Bu yöntemin avantajı gelgitin her durumu için çift yönlü elektrik üretimine olanak sağlamasıdır. Okyanus ya da deniz içerisine gömülü ya da asılı olan yöntemin avantajı ise akıntı debisinin yüksek olduğu kanal ya da doğal akıntılı yerlere kurularak sürekli ve doğrusal güç üretimi sağlamasıdır. Her iki yöntemde de gelgit enerjisinden elektrik üretim sistemlerinin inşa ve işletim giderleri yüksek olmakta ve bakım ile arıza şartları da zorluk olarak durmaktadır. Elektrik enerjisi üretim maliyetleri ($cent/kWh) güneş ve rüzgâr santrallerinden yüksektir.



Şekil 1.9 Gelgit enerjisi üretim yöntemleri şeması [40]

Dalga, rüzgârın sahip olduğu enerjinin suyun üzerinde basınç oluşturarak enerjisini aktarması ile oluşur. Buradan hareketle rüzgârın hızının yüksek olması dalga enerjisi için

uygunluk oluşturmaktadır. Dalga enerjisi sistemleri, deniz yüzeyindeki suyun hareketi prensibiyle çalışırlar. Kıyıdan yakına ve uzağa kurulabilirler. Yakın kıyılarda deniz tabanına sabitlenirken, 100 metreden derin sularda yüzer sistemler kullanılır. Kıyılarda su aşırma yöntemi ile taşan suyun türbinden geçirilmesi ya da dar alanda havanın sıkıştırılarak hava türbini yöntemi ile elektrik üretimi mevcuttur. Yakın kıyı ya da açıkta üretimde temel nokta dalganın yaptığı elektriksel gücü oluşturacak osilasyon hareketidir. Dalganın elektrik enerjisi potansiyel gücü ise suyun derinliğine, dalganın hızına, dalganın yüksekliğine, dalgalar arası süreye ve dalgalar arası mesafeye bağlıdır. Su derinliği arttıkça dalganı yüksekliği de artar ve yüksek gelen dalgalar potansiyel gücü artırır [41]. Şekil 1.10'da dalga enerjisi ile üretim örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 1.10 Dalga enerjisi üretim yöntemleri [42]

1.1.5. Güneş enerji sistemleri

Güneş enerji sistemleri termal ve fotovoltaik olarak ayrılırlar. Termal sistemler geniş alana yayılmış bir termik santral gibi davranırlarken fotovoltaik sistemler yarıiletken temellidir. Termal yöntemler parabolik yoğunlaştırma, çanak yoğunlaştırma, güneş

bacası gibi başlıklar altında incelenebilir.

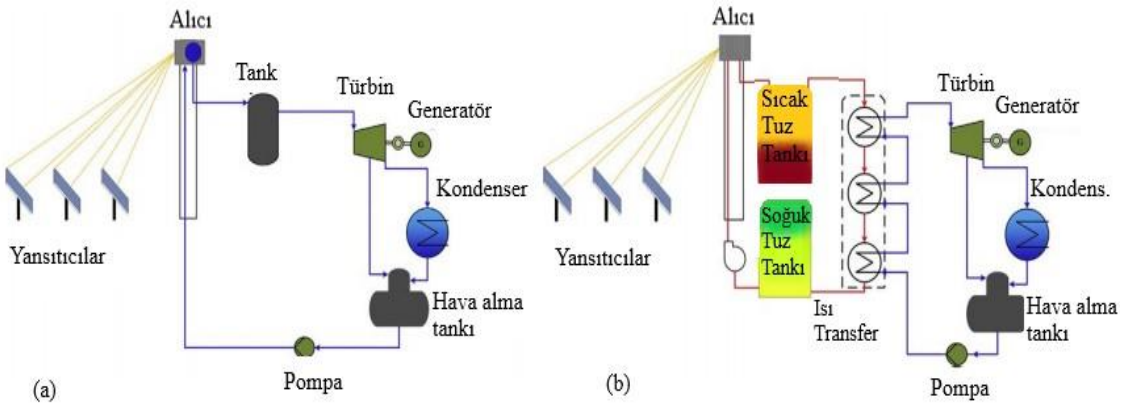
1.1.5.1. Termal güneş enerjisi sistemleri

Termal sistemler yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (Concentrating Solar Power(CSP) sistemleri olarak adlandırılırlar. Doğrudan güneş altında olan kolektörler aracılığı ile içerisinde sıvı olan tüp veya benzeri ekipmanlar barındırırlar. Güneş kulesi, lineer parabolik ve fresnel yoğunlaştırıcı ile çanak yoğunlaştırıcı olarak ayrılırlar. Güneş altında anlık verimleri %20'nin üzerinde olsa da yıllık bazda verimleri %8'e kadar düşmektedir. Bu yöntemlerin anlık ve yıllık verimleri ile yoğunlaşmaları Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Termal yoğunlaştırma yöntemleri verimleri ve yoğunlaşma faktörü [43]

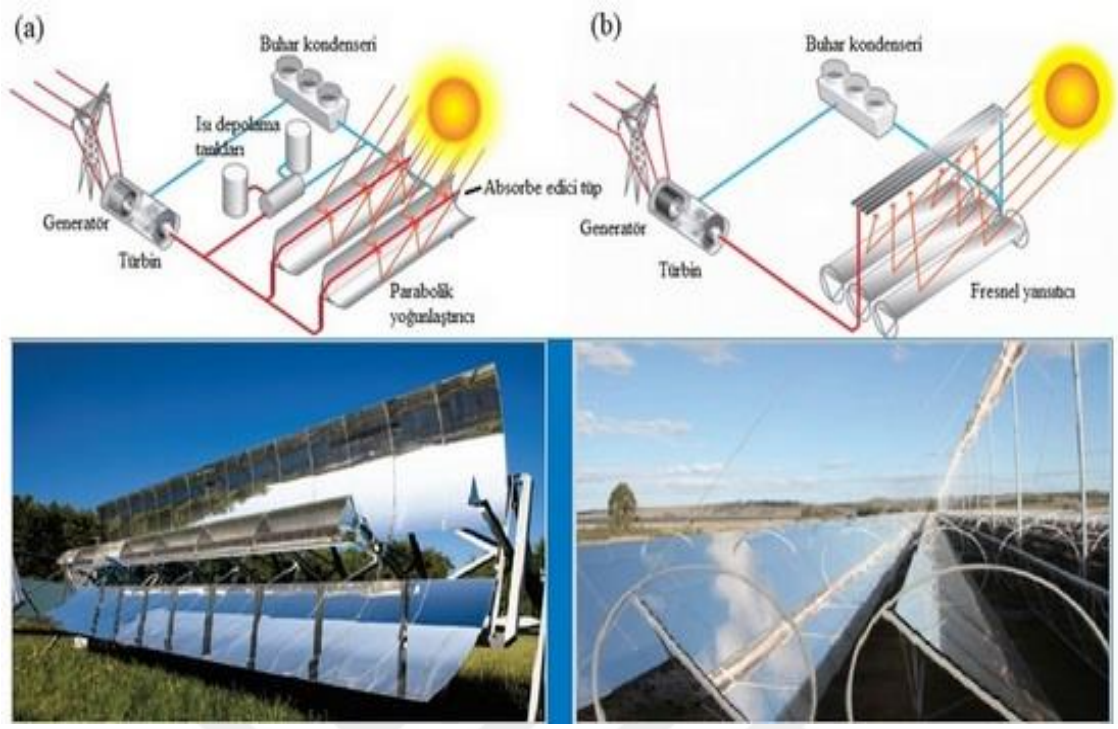
	Pik Verim	Yıllık Verim	Yoğunlaşma
Parabolik	%21	%10-16	70-100
Fresnel	%20	%9-13	25-100
Kule	%23	%8-23	300-1000
Çanak	%29	%16-28	1000-3000

Güneş kulesi yöntemi, güneş bacası ya da merkezi alıcılı güneş sistemi olarak da adlandırılır. Bu yöntem, tamamı düzlem aynalardan(heliostat) oluşan ve tüm aynaların güneş ışığını merkezi bir alıcı noktaya yansıtmasına dayanır. Tüm yansıtıcıların tek noktaya odaklanması ile yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Ancak güneşin gün içindeki hareketini ve yıl içindeki konumunu takip etmesi için her aynada ya da ayna grubunda tek tek yüksek hassasiyete sahip takip sistemleri kullanılması gerekmektedir. Kurulumu ve inşa maliyeti diğer sistemlere göre daha ucuzdur. Kurulum maliyetinin %70 kadarını yansıtıcılar oluşturur [44]. Merkezi alıcı kulede ise su, buhar veya eritilmiş tuz bulunur. Kule iç sıcaklığı erimiş tuzlu sistemde 600℃'ye, su veya buharlı sistemde 1000-1200℃ sıcaklığa erişebilir [45]. Yıllık ortalama verimleri %15 dolayındadır.



Şekil 1.11 Güneş kulesi yöntemleri, (a)Su, buhar, (b)Eritilmiş tuz [46]

Şekil 1.12(a)'da görülebilen Lineer parabolik yoğunlaştırıcılar (Parabolic through collector (PTC)), parabolik şekilli çukurlaştırılmış sıralı yansıtıcılardır. Şekil 1.12(b)'de bulunan Fresnel yansıtıcılar ise düz aynalardan oluşan sıralı yansıtıcılardır. Parabolik yoğunlaştırıcılar ve Fresnel yoğunlaştırıcılar güneş ışığını merkezinde içerisinde yağ, buhar veya erimiş tuz gibi akışkan bulunan sabit halde duran tüpe odaklar. Yoğunlaştırma oranları düşüktür. Her iki yöntemdeki aynalar yüksek yansıtıcılığa sahiptir. Fresnel yöntemi inşa ve üretim yönünden parabolik yoğunlaştırıcılardan ucuzdur. Fresnel ve Parabolik yoğunlaştırıcı yöntemlerinde her zaman alıcı tüpe odak sağlamak için güneş takip sistemleri kullanılmaktadır. Fresnel yöntemi ile merkezdeki emici bir tüpe odaklanan ayna sayısı aynı tüpün sırası üzerinde artırılabilir. Parabolik yöntemde bu tüpe sadece bir adet parabolik ayna koyulabilmektedir. Fresnel yoğunlaştırıcıda 450°C, Parabolik yoğunlaştırıcıda 400°C sıcaklıklarda tüp içi sıcaklık elde edilmektedir [47]. Toz sebebiyle yansıtma ve yoğunlaştırma oranları düşmekte olduğundan belirli aralıklarla ayna üzerlerinin temizlenme ihtiyacı vardır. Lineer parabolik ve lineer fresnel yoğunlaştırıcılarda karşılaşılan bir zorluk da minimum gölgelenme ve güneş ışınlarının bir başkası tarafından engellenmesi için yansıtıcıların daha geniş alanlara kurulması gerektiğidir.



Şekil 1.12 (a)Parabolik yoğunlaştırıcı, (b)Fresnel yansıtıcı [48, 49]

Çanak yoğunlaştırıcı sistemleri (parabolic dish) ise uydu alıcısı anteni görünümlü ve her biri kendi yoğunlaştırıcı merkezine sahiptir. Elektrik üretimi odaklanma merkezinde yer alan mikro generatörde gerçekleşmektedir. Brayton ve Stirling sistemleri ile iki ayrı sistem olarak kullanılırlar. Stirling motoruna sahip sistem, ısıtılan sıcak havanın basıncının artması ve hareket ettireceği bir piston ya da kapağa bağlı milin rotoru döndürmesi ile elektrik üretimi prensibine bağlıdır. Her ünite diğerlerinden bağımsız olarak elektrik enerjisi üretmektedir. Bu sistemde aslında sıcak havanın yer aldığı kapalı bölümün sürekli olarak ısıtılması gerekmektedir. 750℃ sıcaklığı erişebilmesi ile bu termal yöntemler arasında en verimli olandır ancak yüksek kurulum maliyetleri vardır. Stirling sisteminde en yüksek verim ise %29,4 olarak elde edilmiştir [50]. Brayton yönteminde ise sistem tamamen ya da kısmen yakıt kullanmaktadır. Sıcak havanın kaybının önlemesi ve verimi artırmak için sıcak hava Brayton türbininin çıkışından tekrar havanın sıkıştırıldığı kompresöre verilir. Bu yöntemde türbine giren havanın sıcaklığı 850℃'e ulaşabilmekte ve sistemin verimi %30'dur [51]. Brayton sisteminde harici yakıt kullanılması sebebiyle hibrit sistem olarak değerlendirilebilir ve tamamen yenilenebilir enerji kaynağı olmaktan uzaklaşmaktadır.



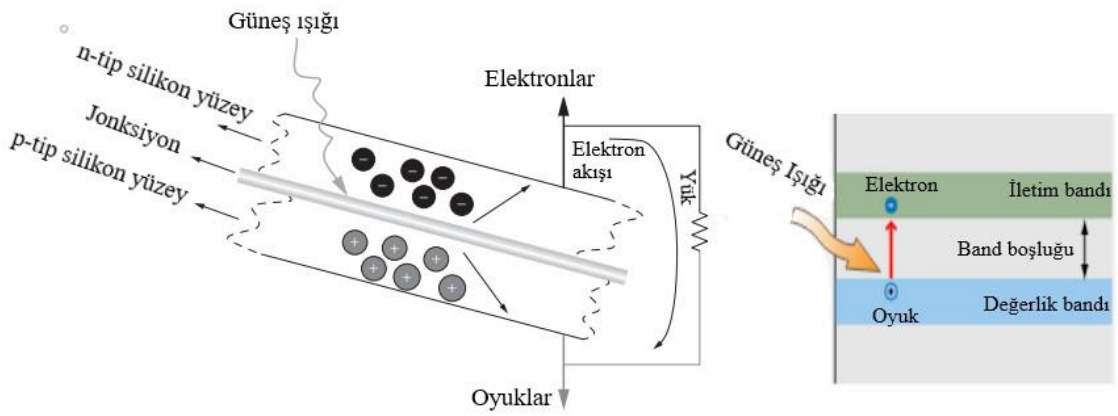
Şekil 1.13 Çanak yoğunlaştırıcı [43]

1.1.5.2. Fotovoltaik sistem

Fotovoltaik yöntem güneş enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm elektrofiziksel ve fotofiziksel bir olaydır [52, 53]. Güneş kendi yüzeyinde 63 MW/m^2 radyoaktif güç oluşturur ve bu güç evrene yayılır. Güneş ile Dünya arasında bulunan 150 milyon km mesafe, bu enerji miktarını atmosfer üzerinde ortalama 1367 W/m^2 güneş ışınımı ulaştırır [54]. Atmosfer dışında 1367 W/m^2 olan güneş ışınımı değeri güneş sabiti (solar constant) olarak adlandırılır. Ancak bu değer dünyanın ile güneş arasındaki mesafeye bağlı olarak aydan aya değişmektedir. Yaklaşık olarak Güneş'ten Dünya'ya bir günde 4000 trilyon kWh'e denk gelecek bir elektromanyetik radyasyon ulaşır [55]. Bu enerji miktarı dünya 'da bir yılda tüketilen elektrik enerjisinin binlerce kat fazlasına denk gelmektedir.

Güneş, ışınımı ile insan, bitki ve diğer canlıların birçoğunun yaşamı için önemli bir kaynaktır. Güneş ışınlarının barındırdığı fotonların fotovoltaik hücrede oluşturduğu yüklü parçacıkların etkisi ile elektrik akımı oluşur. Hücre yüzeyine gelen güneş ışınları içerisindeki fotonlar sahip oldukları enerjilerini fotovoltaik hücrenin negatif yüzeyi üzerindeki elektronlara aktararak onları harekete geçirirler. Negatif yüzeyde bulunan eksi yüklü elektronlar ile pozitif yüzeyde bulunan pozitif yüklü oyuk ya da delikler iki yüzey arasında karşılıkları bulurlar. Yani bir jonksiyon meydana gelir. Yeterli miktarda güneş enerjisi olduğunda yani güneş enerjisinin sahip olduğu enerji hücrede kullanılan maddenin band enerjisinden (bandgap) fazla olduğu taktirde elektronlar hareket eder ve

elektrik akımı oluşur [56]. Serbest kalan elektronlar negatif kutuptan pozitif kutba akarlar. P-N jonksiyon olarak da isimlendirilen bu harekette elektronlar negatif kutuptan pozitif yöne doğru akarken pozitif kenarda hareketin karşılığı olan pozitif yük olan oyuklar negatif kutba doğru akarlar. Yüke doğru oluşan akım doğru akımdır. Bu olaya fotovoltaik etki denir. Fotovoltaik etki güneş ışınlarının fotovoltaik hücre tarafından elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak da açıklanabilir. Fotovoltaik etki Şekil 1.14'te gösterilmiştir. Bu süreç içerisinde yakıt kullanılmaması ve karbon emisyonu olmaması süreç sonucunda elde edilen enerjisinin tamamen temiz olmasını sağlamaktadır. Fotovoltaik yöntem ile elektrik enerjisi elde edilmesi yenilenebilir enerji kaynakları arasında bu özelliği ile öne çıkmaktadır. Fotovoltaik enerji sistemleri alternatif akım ile beslenen bir şebekede en az bir fotovoltaik güneş paneli, şarj kontrol cihazı, invertör (doğru akım ile beslenen şebekede bulunmaz) ya da şarj kontrol ve inverter özellikli maksimum güç izleme cihazı (MPPT) ile kullanım amacına bağlı olarak aküden oluşur. Sisteme panellerin gün boyu ve yıl boyu güneş enerjisinden maksimum faydalanması sağlayabilmek için güneş takip sistemi de eklenmektedir. Güneş takip sistemleri genellikle büyük ölçekli fotovoltaik güneş santrallerinde yaygın olarak kullanılmazlar.



Şekil 1.14 Fotovoltaik olay [57, 58]

2020 yılı itibari ile Dünya elektrik enerjisi üretiminde PV sistemler %5'lik bir paya sahip olmaktadır. Türkiye'de ise üretimdeki oran yıllık elektrik enerjisi üretimi içerisinde %3,57 kadardır [59]. PV sistemlerin kurulum maliyetleri diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre yüksektir. Bu noktada kurulum maliyetlerini küçük ölçekli ve büyük ölçekli olarak değerlendirmek gerekmektedir. Çatı tipi PV sistemlerde Wp maliyeti 2,20

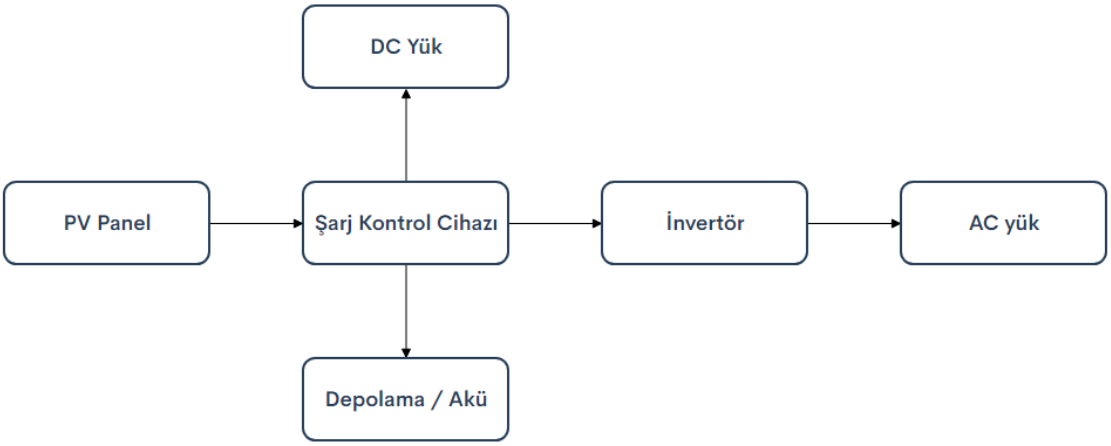
€ iken, 500 kW üzeri olan büyük ölçekli sistemlerde 0,81 €'a kadar düşmektedir [60, 61]. PV sistemler güneş enerjisine bağlı olarak yılın hemen hemen her günü elektrik enerjisi kaynağı sağlarken birçok ülkede MWh başına alım garantisi verilerek PV enerji santrallerinin kurulumu teşvik edilmektedir. Dünya'da Abu Dabi ve Suudi Arabistan'da 20 $cent/kWh, Türkiye'de 13 $cent/kWh birim fiyat ile alım garantisi verilmektedir [62].

1.2. Fotovoltaik Enerji Sistemleri

Fotovoltaik sistemler doğru akım üretirler. Üretilen doğru akımın alternatif akıma dönüştürülerek alternatif akım aygıt ve cihazlarında kullanılması mümkündür. İhtiyaç duyulan veya tasarım gereksinimine göre sistem çıkış gerilimi panellerin birbirine seri ve paralel bağlanması ile elde edilir. Sistem gerilimi DC-DC konvertörler ile yükseltilerek DC-AC invertörler ile alternatif akıma dönüştürülerek alçak gerilimde doğrudan veya orta gerilimde şebekeye bağlanarak hizmete sunulur. PV paneller kullanım alanları çok yaygın olmakla birlikte şebekeden bağımsız olarak(off-grid) ya da şebekeye bağlantılı(on-grid) olarak kullanılabilir.

1.2.1. Şebekeden bağımsız sistem

PV sistemin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı durumlar dağlık arazi, tarla sulama, aydınlatma ya da sinyal ya da iletişim cihazları amacının olduğu şebeke bağlantısının uzak olduğu koşullar için tercih edilir. Şebekeden bağımsız sistemler(off-grid) çatı tipi(rooftop) olarak tekil bağımsız(stand-alone) sistemleri de ifade etmektedir. Şebeke bağımsız sistemler genelde küçük güçlerin kullanıldığı yerlerde inşa edilirler. Ayrıca potansiyele sahip olan uygun yerleşim yerlerinde de izole sistem kurmak için tasarlanabilirler. Bu sistemde talep gücü karşılayacak şarj kontrol cihazı ile bu gücü karşılayacak invertör tayin edildikten sonra depolama ve PV paneller kurulumda genel maliyeti oluşturmaktadır. Şebekeden bağımsız bir PV sistemin bağlantı diyagramı Şekil 1.15'te gösterilmiştir. İnvertör ile DC gerilim AC gerilime dönüştürüldükten sonra AC yükler beslenebileceği gibi şarj kontrol cihazı ile varsa DC yükler de beslenebilmektedir.



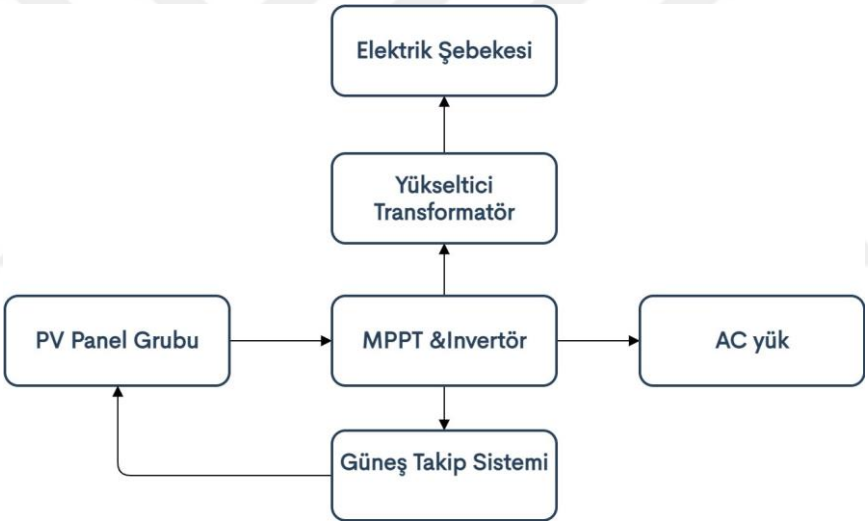
Şekil 1.15 Şebekeden bağımsız sistem

1.2.2. Şebeke bağlantılı sistem

Şebeke bağlantılı sistem, şebekeden bağımsız sistemden farklı olarak tüm PV elektrik santrallerinin (güneş tarlası) dahil olduğu sistemdir. Sadece PV santrallerde değil müstakil kullanım için de şebeke bağlantılı sistemler uygulanmaktadır. Çatı tipi üretim için, şebekeden bağımsız sistemlere eklenecek çift taraflı elektrik sayaçları ile şebeke bağlantılı PV sisteme geçiş lisansız kullanıcı anlaşması kolaylıkla yapılabilmektedir. Şarj kontrol cihazı ve MPPT özelliğine sahip invertör cihazı kullanımı da çatı tipi için kaliteli ve yüksek verimli çıkış için tercih edilen en yaygın yöntemdir. Çatı tipi üretim yapılan yerlerde kullanılan tek fazlı ya da 3 fazlı çift taraflı sayaç sayesinde dağıtım şebekesi ile dönem sonu mahsuplaşma yapılmaktadır. Böylece kullanıcı maddi ve kurulum yeri imkânı ölçüsünde PV panel yerleştirerek ulusal şebekeye de dahil olmaktadır. Ayrıca zaman içerisinde invertör ve şarj kontrol cihazı ya da MPPT özellikli invertör cihazının çıkış gücüne bağlı olarak sisteme PV panel ekleme imkanına sahip olunmaktadır. MPPT özellikli invertör cihazının gücünün aşılacağı durumlarda invertör gücü artırılarak sistem sürekliliği sağlanmaktadır. Türkiye'de 1 MW olan sınırlama 2019 yılından itibaren 5 MW'a kadar kurulu güce yükseltilerek lisanssız olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine izin verilmektedir [63]. Şekil 1.16'da çatı tipi uygulama ve Şekil 1.17'de PV güneş enerjisi santrali (GES) uygulamalarının diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.16 Çatı tipi şebeke bağlantılı PV sistem



Şekil 1.17 PV güneş enerjisi santrali (GES)

Tipik bir PV GES, her panelde mikro invertör ile kurulabileceği gibi bir panel grubu birden fazla MPPT ve solar invertör cihazı ile kurulabilir. Ya da günümüzde en yaygın kullanıldığı üzere birkaç MW'a kadar güçlü merkezi bir MPPT ve solar invertör ile de çalışabilir. Merkezi MPPT kullanılan GES'lerde verimin artırılması ile üretilen elektrik enerjisinin %98'i şebekeye verilebilmektedir. Şekil 1.18'de 2 MW'a kadar güç desteği olan merkezi bir MPPT içeren solar invertör cihazı örneği gösterilmektedir.



Şekil 1.18 MPPT içeren merkezi invertör [64]

1.2.3. Fotovoltaik sistemlerin parametreleri

Fotovoltaik sistemlerin parametrelerini sistem öncesi ve sonrası olarak değerlendirmek gerekirse sistem kurulumu öncesi; kurulum yapılacak konumun coğrafi şartları, meteorolojik veriler, kurulum sahası planı, kurulum gücü tespiti ile MPPT içeren invertör gücü tespiti ve bağlantı kurulacak gerilim kademesi olarak değerlendirilir. Kurulum alanın coğrafi şartlarında dikkat edilecek noktalar, arazi şartlarının engebeli ya da düz olup olmaması, gölgeleme yapacak ağaç veya ağaçlık alan olup olmaması, çatı tipi ise gölgelenmeye sebep olacak bina olup olmamasıdır. Coğrafi bilgiler aynı zamanda enlem(E) ve boylam(B) ile bölgenin rakımı da çıkış gücünü etkileyen parametrelerden oluşmaktadır. Meteorolojik veriler; yıllık güneşlenme süreleri(saat/gün), yıllık güneş radyasyonu(kWh/m^2), yıllık sıcaklık değerleri ve rüzgâr hızları, yıllık tozlanma miktarları (gr/m^2)'dır [65]. Kurulum sahası açısından değerlendirildiğinde merkezi veya gruplandırılmış planlı bir dağılım için her PV panel grubunun bağlanacağı MPPT ve invertör ile ve en fazla güç çıkışı için en fazla miktarda PV paneli yerleşiminin yapılması gereklidir. Fotovoltaik güneş enerjisi santralleri genellikle orta gerilim seviyesinden şebekeye bağlanırlar. Ancak santralin iletim hattına uzaklığına bağlı olarak yüksek gerilim ile bağlanması da mümkündür. Bağlantı gerilim kademesi belirlenmesi kurulacak şalt sahası ekipmanları için belirleyici olacaktır. Gerilim seviyesinden bağımsız olarak yakın tüketim merkezine eklenme oranının (penetration level) belirlenmesi kurulum sonrası harmonik, frekans gibi durumların izlenmesi açısından önemli bir parametre olarak durmaktadır.

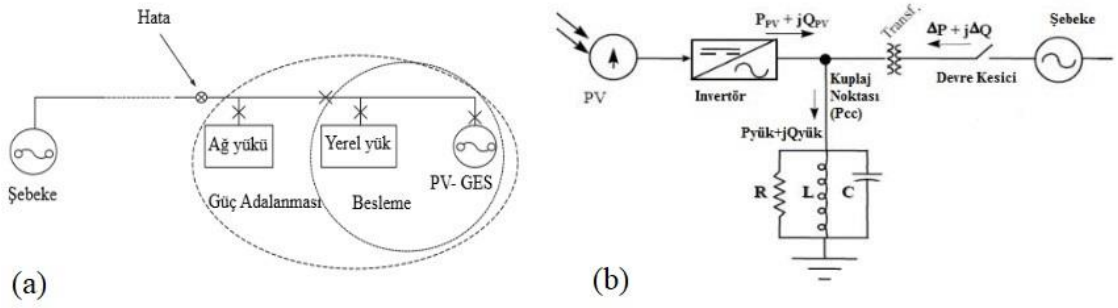
Kurulum sonrası parametrelere bakıldığında, güneş takip sistemi olmayan GES'ler için günlük ve sezonluk panellerin yön ve açısının ayarlanması, gölgelenme durumunda güç çıkışının dalgalanma durumlarının takibi, panel yüzey sıcaklığı, şebeke frekansı uyumu, harmonik izlenmesidir.

1.2.4. Elektrik şebekeleri üzerine etkiler

PV sistemlerin dağıtık güç sistemlerinde şebekeye yüksek oranda bağlanmaları elektrik şebekesi üzerine olumsuz etkiler doğurabilmektedir. PV GES'ler şebekeye 11-22-33-66 kV orta gerilim ve 154 kV yüksek gerilim kademesinden bağlanırlar [66]. Dağıtık güç sistemlerinde (Distributed Generation- DG) şebekeye bağlanma oranları şebeke üzerine etkiler vardır. Bağlanma oranları GES'in şebekeye verdiği güç oranında yıl içinde değişiklik göstermektedir [67]. %20'e kadar çok küçük, %40'a kadar küçük, %60'a kadar orta, %80'e kadar yüksek ve %100'de çok yüksek bağlanma oranları olarak sınıflandırılır [68]. Yüksek ve çok yüksek bağlanma oranları barada güç akışının bozulmasına, gerilim dalgalanmalarına, trafoların teknik ömrünün azalmasına, harmonik ve adalanma etkisine sebep olabilmektedir. GES'lerin bağlandığı ulusal şebekedeki alıcılar (tüketiciler) non-lineer yüklerdir Talep zaman içerisinde hızla veya ani olarak değişebilmektedir. Yük talebinin değişimini izlemek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir [69]. Yük talebinin değişimi anında, farklı algoritmalara sahip MPPT cihazı invertör giriş akımını artırır ya da azaltarak şebeke gerilim ve frekansını dengede tutar. PV GES'in şebekeye verdiği çıkış geriliminin 207-253 Volt ve 48-50,5 Hz frekans aralıklarında olması gereklidir. Bu aralıklar EN50438 standardı ile belirlenmiştir [70]. Bu sebeple invertör girişi invertör kontrolörü ile hızlı bir şekilde ayarlanmalıdır. İnvertör aracılığı ile oluşturulan AC gerilim yapay sinüsoidal eğri olarak izlendiğinden harmonik üretirler. Harmonikler zaman içerisinde trafo bozulmalarına, elektrik motorlarında dengesiz çalışmaya, iletim hattı iletkenlerinde ısınmaya yol açar [71]. Harmoniklerin ekipmanlarda bir arıza meydana getirmemesi için toplam harmonik bozukluğu (Total Harmonic Distortion – THD) %5'in üzerinde olmaması beklenmektedir [72]. Harmonikler seri ve paralel RLC(resistor-inductor-capacitor) devreleri ile kompanze edilebilir. Seri ve paralel filtre devreleri harmonik akımıyla aynı büyüklüğe ancak 180 derece faz farkı ile devreye alınırlar [73].

Elektrik şebekesine belirli bir oranda bağlanan PV GES'ler şebeke ile birlikte yükleri

beslerler. Herhangi bir sebep ile şebeke güç akışının kesilmesi durumunda GES'lerin bu durumdan habersiz ve bağımsız olarak geri kalan tüm şebekeyi ve yükleri beslemeye devam etmesi durumu oluşur. Bu duruma Adalanma olayı (Islanding) adı verilir [74, 75]. Bu durumun oluşması ile şebekeden güç akışı kesilir ancak PV GES şebeke yükünü beslemeye devam eder. PV GES'in çıkış değerleri yükün değerlerine doğru kaymaya başlar ve eşitlendiğinde adalanma tespit edilemez. Bunun için şebeke kesintisinde adalanma oluşmadan hızlı tespiti için uzaktan veya yerinden tespit yöntemleri kullanılır [76, 77]. Uzaktan tespitte SCADA(Supervisory Control and Data Acqusition) ve hata sinyali haberleşme yöntemleri sıklıkla kullanılır. Yerinden tespit yöntemlerinde ise aktif, pasif ve hibrid yöntemler vardır. Pasif yöntemler geleneksel yöntemler olarak, düşük/aşırı gerilim tespiti, düşük/yüksek frekans tespiti, faz kayması tespiti ve harmonik tespiti ile uygulanır. Şekil 1.19(a)'da Adalanma olayı ve Şekil 1.19(b)'de güç akışı durumları gösterilmiştir.



Şekil 1.19 (a)Adalanma, (b)Güç akışı [78, 75]

Adalanma olayı gerçekleştiği durumlarda GES frekans ve gerilimi, yüke doğru azalmaya başlayacağından bu durum yük tarafında cihaz ve ekipman arızalarına yol açabilmektedir. Santral tarafında ise invertör, MPPT ve trafo arızaları ile sonuçlanmakta ve hatta iş kazalarına sebep olabilmektedir. Bu sebeple aktif ve pasif yöntemler içeren hibrid yöntemler ile adalanma olayının hızlı tespit edilmesi güvenlik açısından önemlidir.

1.3. Fotovoltaik Özellikli Yapılar

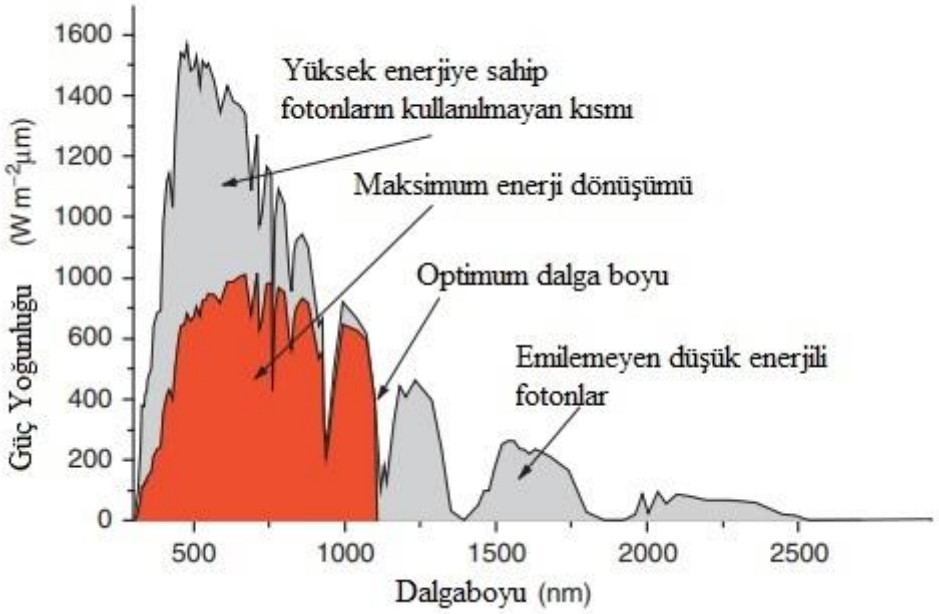
Fotovoltaik özellik gösteren yapılar güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. En yaygın kullanımda olan silikon hücrelerin yanı sıra ince-film teknolojileri ile birlikte yeni geliştirilen fotovoltaik yapılar da vardır. Kalınlıkları 1 mikrondan 1000 mikrona kadar olabilen güneş hücrelerinin verimleri de %1'den %24'e kadar değişiklik gösterir.

Fotovoltaik jonksiyon temelli yapıları şu şekilde sıralayabiliriz;

- Kristal hücreler
    - Monokristal hücre
    - Polikristal hücre
- İnce film yapılar
    - Kadmiyum Tellur (CdTe)
    - Bakır-İndiyum-Galyum-Selenid (CIGS)
    - Bakır-İndiyum-Selenid (CIS)
    - Amorf-silikon (a-Si)
- Gelişmekte olan yeni nesil hücreler

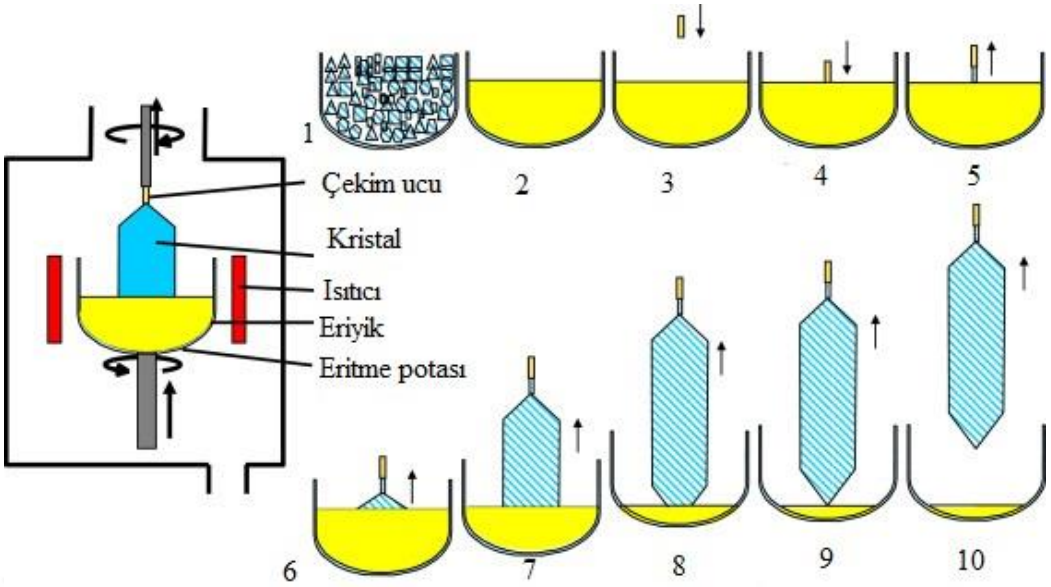
1.3.1. Kristal-silikon güneş hücreleri

Silikon güneş hücreleri PV pazarının %90'ının oluşturan hammaddesi doğada oksijenden sonra en bol madde olan kum veya kuartz halde bulunan silisyumdur. Kimyasal olarak işlenebilir ve zararlı bir madde olmaması, silisyum (silikon) hücreleri en yaygın PV hücresi haline getirmektedir. Üretim süreçlerine göre monokristal ve polikristal silikon olarak 2 çeşit hücre tipi vardır. Silikon hücreler band-gap 1.11 eV değeri ile AM1.5 radyasyon spektrumunda en fazla verimin alındığı hücre tipidir [79]. Ultraviyoleden, infrared sprekturumunun band-gap aralığı 0,5'ten 2,9'a kadar olması silikon hücrelere geniş jonksiyon aralığına imkân tanır [80]. 1,5 AM güneş spektrum yayılımında 300-1100 nm dalgaboyu aralığında silikon hücrelerin enerji dönüşümü için en uygun aralık olduğu Şekil 1.20'de ortaya konmuştur.



Şekil 1.20 PN jonksiyon için uygun dalga boyu [81]

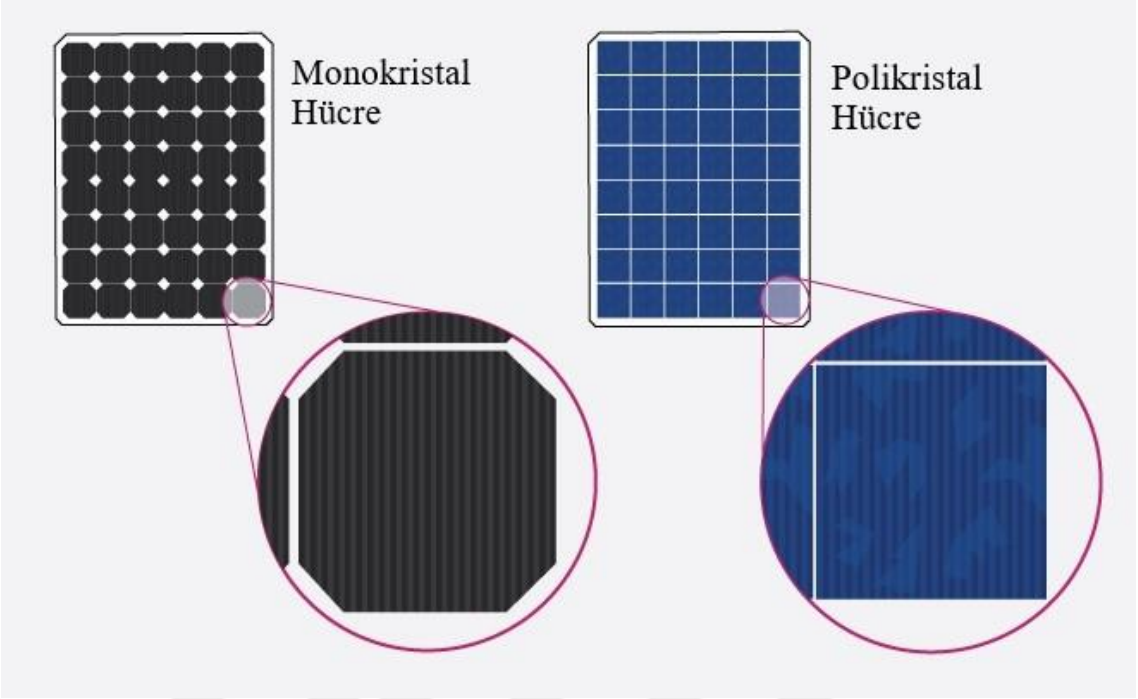
Ham silisyum fiziksel ve kimyasal olarak işlenerek saflaştırılır ve güneş hücresi haline getirilir. 1415℃ erime noktasına sahip silisyum, Czochralski metodu ile ingot haline getirilir (Şekil 1.21). Czochralski yöntemi ile ingot olarak alınan silikon dilimleme işlemi yapılarak 200 µm kalınlıklarında wafer haline getirilir ve kimyasal işleme tabi tutulur [82]. Elde edilen yüzeyin ince olması verimin artmasını sağlamaktayken kırılganlığını ve hassasiyetini de artırır. Sonrasında yansıtma önleyici kaplama yapılır ve bu işlem aşamasında aynı zamanda elektrik enerjisi iletimi için finger'ler ve busbar'lar oluşturulur. Bu süreç sonunda fotovoltaik hücre elde edilir. Hücrelerin seri ve paralel bağlanması ile istenilen akım, gerilim çıkışları belirlenerek istenilen panel gücüne ulaşılır.



Şekil 1.21 Czochralski metodu [83]

Üretim aşamasından önce $SiHCl_3$ (trichlorosilane) eklenerek silikon saflaştırılır ve sonrasında üretim aşamasına sokulur. Bu yöntem ile mono-kristal silikon hücre elde edilir. Bu aşamada polikristal hücre elde edilmesi için kimyasal buharlı biriktirim (Chemical Vapour Deposition – CVD) yöntemi kullanılır [66]. Silikonun saflaştırılarak defektlerinden arındırılması ile daha yüksek verime sahip hücre elde edilir ancak bu da ek maliyet ve proses getirir. Ek süreçlerin olması, monokristal hücrelerin üretim hızlarını hem yavaşlatır hem de maliyetlerini artırır.

Shockley-Queisser bağıntısına göre p-n jonksiyon temelli PV hücrelerinin verimleri teorik olarak en fazla %31 olarak sınırlıdır [84, 85]. Monokristal hücreler verim açısından incelendiğinde laboratuvar ortamında %26,7, polikristal hücreler ise laboratuvar şartlarında %22,3 gibi bir verime ulaşmıştır [86]. Ticari kullanımda olan hücrelerde ise, üretim süreçleri daha kolay olan polikristal hücreler %12-17 arası verimli iken monokristal hücrelerin verimleri %15-20 arasındadır [87, 88]. Şekil 1.22'de monokristal ve polikristal hücreler görülebilir.



Şekil 1.22 Kristal silikon hücreler

1.3.2. İnce film

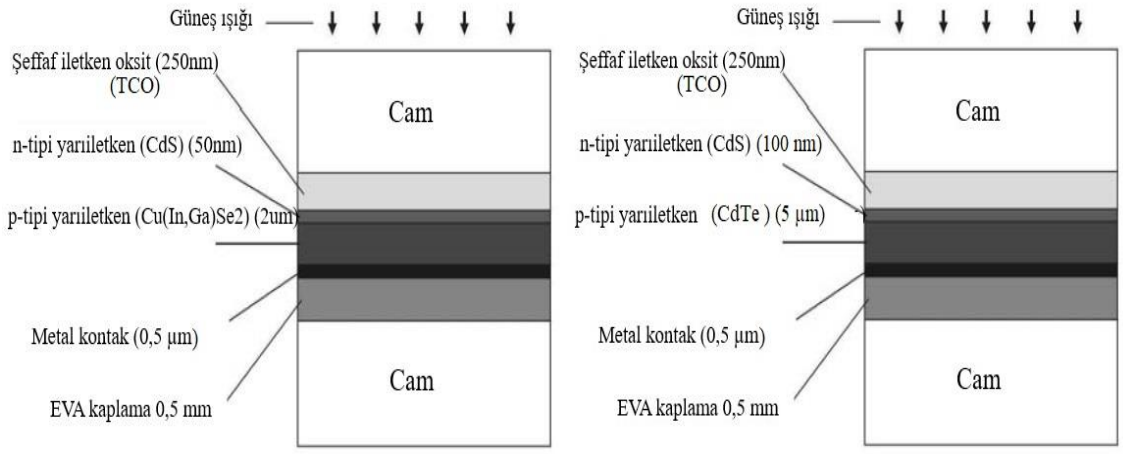
Birinci nesil olarak kabul edilen kristal silikon hücrelerden sonra yeni nesil ince film teknolojileri geliştirilmeye başlanmıştır. Maliyet ve üretim yöntemlerine çeşitlilik getirilerek verimleri gün geçtikçe artmaktadır. Çeşitli materyaller ile meydana getirilen ince film yapıları amorf-silikon(amorphous-silicon)(A-si), CdTe(Kadmiyum-tellur), CIGS(Bakır-İndiyum-Galyum-Selenyum) ve CIS(Bakır-İndiyum-Selenyum)'dir. Son yıllarda üzerinde çalışılan renk-hassasiyetli(dye-synsetized), molekül bazlı ve polimer bazlı gibi teknolojiye sahip üçüncü nesil güneş hücreleri de vardır.

Amorf silikon hücreler kristal hücreler gibi düzgün ve doğrusal atom dizilimine sahip değildir. Hidrojen katkılı olarak da ifade edilebilir. Kâğıt, plastik benzeri yüzeylere istenilen boyutlarda yapılabilir. Esnek yüzeylere de yapılabilmesi ile öne çıkmaktadır. 1,7 eV bandgap aralığı ile kristal silikon hücrelerden daha fazla ışık absorbe edebilir. Teorik olarak %24 verime ulaşabileceği hesaplanmıştır ancak günümüzde deneysel %10 ama seri üretim olarak %5 verime sahiptir [89, 90].

CdTe ince film yapıları en yaygın ve yüksek verimde olan yapılardır [91]. 1,4 eV bandgap ile kristal silikon hücrelerden daha fazla foton absorbe edebilirler [89, 92]. Sahip olduğu

bandgap, 1,2- 1,5 eV bandgap genişliğinin maksimum enerji dönüşümü sağlaması sebebiyle fotovoltaik yapılar için uygun teknolojidir [93]. Kristal silikon hücrelerin 200 µm kalınlıkta ulaştığı absorbe değerine CdTe hücreler 1 µm kalınlıkta ulaşarak güneş ışığının %92'sini absorbe edebilir [94]. Son çalışmalarla %16,5 verim elde edilebilmiştir [95]. Bu verimi ile polikristal hücrelerin verimlerine ulaşmıştır. Genellikle şeffaf olan Kadmiyum-sülfid'in(CadmiumSulfide-CdS) en üst katman olarak birlikte (CdS/CdTe) kullanılmaktadır(Şekil 1.23). Böylece her katmanında farklı yapı ve jonksiyon olması sebebiyle ince filmler çoklu jonksiyona sahiptir.

Cam veya alüminyum üzerine yapılabilen CIS, %10'a yakın verime sahiptir. CIS, 1 µm kalınlıkla %90 foton absorbe edebilme ile öne çıkmaktadır. CIGS ince filmlerin verimleri ise 2000'li yıllarda %20'e yaklaşmıştır [96-98]. Silikon hücrelere kıyasla 100 kat daha fazla güneş ışığı absorbe kapasitesi vardır. 2 µm kalınlıkta dahi görünür ve yakın-infrared dalga boyunun %90'ının absorbe edebilir [90]. CdS katmanının 2,4 eV bandgapa sahip olması onun spektrumun çoğunda duyarsız ve geçirgen hale getirir, böylece en üst katmanda kullanılması olanağı olur [90].



Şekil 1.23 GIGS ve CdTe ince film katmanları [91, 93, 97, 99]

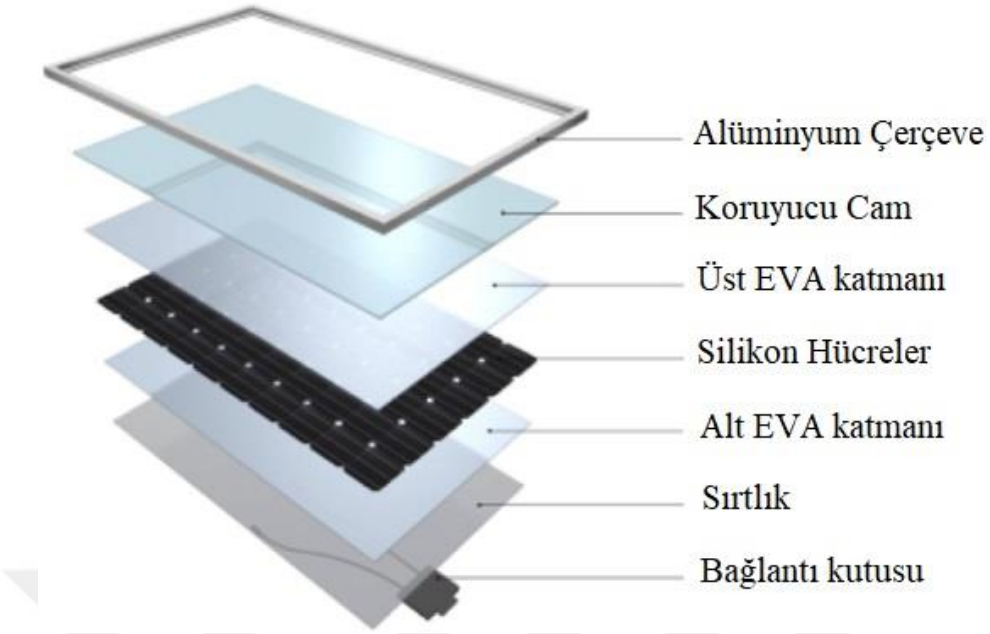
İnce film ve kristal silikon hücrelerin yanı sıra geliştirilmekte olan yeni teknolojiler vardır. Bunlar; bir p-n jonksiyona sahip olmayan boyaya sentezlenmiş (Dye-Sensitized Solar Cells) (DSSC)'dir. Bir boya içerisine sentezlenmiş TiO_2 barındırır. Bu teknolojide teorik maksimum verimin %11 gibi düşük olmasına ve dayanım ömrünün ise kısa olmasına rağmen ucuz bir yöntemdir [100]. Perovskite hücreler ise kristal atomlarının

kalsiyum titanyum oksit ile aynı kristal yapı diziliminden ismini alırlar. Teorik verimleri %25,2'dir [101] Hammaddesi ucuz ve fabrikasyonları kolaydır ancak üretim maliyetleri ve geri dönüş süreleri yüksektir [102]. Bunun yanında Organik hücreler (Organic Solar Cell) (OSC) de bulunmaktadır. Organik polimer temellidir ve bu polimerler amorf ve kristal bölgelerin karışımını içerir. Organik yarıiletkenlerin verimleri teorik olarak %17,3 olsa da kullanımdaki verimleri henüz çok düşüktür [103, 101]. Yeni nesil hücreler üçüncü nesil fotovoltaik hücreler olarak adlandırılırlar. Verimleri teorik olarak kristal silikon hücrelere denk veya fazla olsa da kullanımlarında silikon hücreler gibi stabil değildirler. Çok katmanlı ve neredeyse tüm dalga boyunda (full spectrum) ışığın emilimini sağlayarak dalga boyunu verimli kullanmayı ve böylece kendi verimlerini de artırmayı hedefler.

1.4. Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Durumlar

PV sistemlerinde hücre verimi laboratuvar ortamlarında gösterilse de hem hücrelerin panel haline getirilmesiyle hem de kullanım sırasında verimlerinde azalma olur. Panel haline getirilmesi sırasında doğrudan güneş ışığı ile temas etmeyerek arada bir başka katmanın olması verimlerini azaltır. Kullanım sırasında ise elektriksel ve meteorolojik kaynaklı verimde azalmalar meydana gelir.

Fotovoltaik hücreler üretimden sonra kendi aralarında seri ve paralel bağlanarak panel haline getirilirler. Bunun için Şekil 1.23'te görüldüğü gibi katmanlar bir araya getirilerek vakumlu, hava ve su sızdırmayan, elektriksel olarak izoleli, metal bir çerçeveli olarak nihai ürün haline gelir. Panelin en üst katmanı olarak kırılmaz, 3,2-4 mm standartlarında soda-lime adı verilen ve düşük demirli ya da demirsiz cam kullanılır. Cam ile hücre arasında sızdırmazlık ve iki katmanı birbirine yapıştıran EVA (ethylene vinyl acetate) bulunur. 0,5-0,7 mm kalınlı aralığında olan EVA laminasyon aşamasında 145-200℃ sıcaklıkta eriyerek hücreleri cama yapıştırır, sızdırmazlık sağlar ve hücrelerin oksijen veya su ile temasını engelleyerek oksitlenmelerini engeller [104]. Hücrelerin altında tekrar bir EVA katmanı ve alt katman olarak bir Tedlar (Polyvinyl flüoride) (PVF) içeren sırtlık vardır.



Şekil 1.24 PV panel bileşenleri [105]

Fotovoltaik panellerin verimleri hücrelerin verimlerinden düşük olmaktadır. Verim, hücrelerin sıcaklığının artışı ile, anlık güneş radyasyonuna, kirliliğe ağaç, bina gibi gölgelenme faktörü gibi değişkenlere bağlı olarak düşebilir. Gölgelenme olayı herhangi bir panelde olabileceği gibi bir panel grubunda ya da GES'e bağlı tüm panellerde gerçekleşebilir. Bir PV ya da PV grubunda gölgelenmeye bağlı bir güç düşüşü olduğunda bağlı bulunduğu invertörün ve MPPT cihazının kararsız hale gelmemesi için panel arkasındaki bağlantı kutusuna panelin Isc akımının %40'ı değerde bir diyot bağlanır. Bypass diyotu olarak adlandırılan bu diyot, gölgelenme durumunda panelin Isc akımı %60'tan fazla azaldığında panelin güç çıkışını kesecek ve invertör beslenmeyerek ilgili PV panel ya da grubu sistemden kolaylıkla ayrılacaktır [106].

Tüm hücre ve panel testleri AM (Air Mass)1,5 standardında ve güneş ışınımı yüzeye 90° dik gelecek şekilde konumlandırılarak yapılır. Bu standart 25℃ ve 1000 W/m^2 ışınım şiddetine denk gelir. PV akım çıkışı sıcaklığa bağlı değildir. Akım çıkışı çok küçük miktarda artış gösterebilirken, gerilim çıkışı(Voc) sıcaklıkla ters orantılı olarak her 10℃ artışa karşılık verim %4-5 azalmaktadır [89, 107]. Sıcaklık arttıkça Vmax azalması inverter girişini etkiler ve tüm PV panellerde genel bir inverter hatasını önlemek için aşırı yüzey sıcaklığında enerji üretimi durdurulabilir. Denklem 1.1'de görüleceği üzere yüzey sıcaklığı arttıkça PV panel verimi her derece artışına bağlı olarak düşmektedir.

$$\eta c = \eta tref[1 - \beta ref(Tc - Tref)] \quad (1.1)\ [108]$$

ηc panel / hücre verimi,

ηtref panelin referans test verimi,

βref sıcaklık katsayısı (üretici tarafından verilir),

Tc panel sıcaklığı,

Tref panel test referans sıcaklığıdır.

AM1,5 standart test koşulları altında dahi olsa ortam sıcaklığı anlık olarak farklılık gösterebilmektedir. Üreticiler bu şartları alıcılara bildirmektedir [109]. Bu sıcaklık Tref olarak kabul edilir. βref, üreticiler tarafından bildirilse de Denklem 1.2'den ayrıca hesaplanabilir. Bu formül aynı zamanda panelin ya da hücrenin yüksek sıcaklıklarda veriminin azalacağına ve 270°C sıcaklıkta veriminin "0"a ineceğini göstermektedir [110, 111].

$$\beta\text{ref} = \frac{1}{T0 - Tref} \quad (1.2)\ [108]$$

T0 anlık sıcaklık.

PV verimini etkileyen önemli faktörlerden birisi de kirliliktir. Kirlilik; toz, kuş pislikleri, kar ve yağmur sonrası oluşur ve kurulu bulunulan enleme göre değişiklik göstererek meydana gelebilir. Çorak bölgelerde kirlilik daha çok yüzeyde kum ve toz birikmesi olmaktadır. PV panel üzerinde genellikle kuş pislikleri gibi bölgesel kirlilik olduğunda mikro generatör tipi üretim yapılan GES'lerde ilgili invertörde GES'in geri kalanından frekans ve gerilimde sapmalar görülür. Kir ve pislik kaynaklı enerji üretim kaybı yıllık ortalama %4, çöl gibi şartlarda tozlanma oranı yüksek bölgelerde ise %20'e kadar kayıp oluşabilmektedir [89, 112].

Yansıma ve kırılma, güneş ışınlarının PV panelinin koruyucu camı (cover glass) üzerine geldiğinde bir kısmı yüzeyden geri yansırken geriye kalan kısmı kırılarak hücreye ulaşır. Koruyucu cam üzerinden geri yansıyan kısım güneş ışığının %10 kadarını oluşturur. Cam düşük demirli ve 2 mm, 3,2 mm ve 4 mm kalınlıklarında kullanılır. Camların kalınlıkları iklim şartlarına göre tercih edilmektedir. Kalın camlar dayanıklılığı artırırken hücreye ulaşan foton miktarı da azalmaktadır. Günümüzde 3,2 mm kalınlığındaki camlar yaygın

kullanımdadır [113]. Yansımanın ve kirliliğin verim azalmasındaki iki önemli faktör olmasından dolayı yansıma önleyici (Anti-reflection) ve yüzeye su geldiğinde kendi kendine temizlenmesini kolaylaştıran kendini temizleyebilme (Self-cleaning) kaplamaları yapılmaktadır. Kaplamalar ayrı ayrı yapılabildiği gibi iki kaplamanın bir arada olduğu tek katlı bir kaplama ya da çok katlı kaplamalarda kullanılmaktadır.

BÖLÜM – II

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Tezin Amaçları

Tez çalışmasında anti-reflection ve self-cleaning özellikli kaplamalar elde ederek bunları PV panel üzerine kaplama yöntemi geliştirmektir. Kaplamaların özelliği sayesinde yansımayı azaltmak ve kirliliği panel üzerine gelen yağmur gibi su sayesinde kolayca yüzeyden akıtmanın sağlanarak yüzeyin temizlenmesi hedeflenmiştir. Kirlilik kabul edilen etmenler olarak; fotovoltaik (PV) sistemin kurulu olduğu yere bağlı olarak toz, organik atık, nem, su damlaları ve kar sayılabilir.

Herhangi bir yüzeye gelen güneş ışığı 3 biçimde davranır. Yansıma (Reflection-%R)), geçirgenlik (Transmittance-%T) ve emilme (Absorption-%A). Güneş ışınlarının bu davranışına ilişkin bağıntı Denklem 2.1'de verilmiştir. Emilim yüzeyin meydana geldiği maddeye dayanır ve rijit yüzeylerde ihmal edilecek kadar düşüktür ancak emilen fotonların Kirchoff'un ışınım kanunu gereği ısıya dönüşür. Güneş ışınları ya yansıyacak ya da maddenin içinden geçerek iletilecektir. Yapılan kaplamaların amacı ışık geçirgenliğini artırmak ve yansıtmayı azaltmaktır.

$1 = \rho + \tau + \alpha$ ya da $1 = R + T + A$ (2.1) [114]

ρ Yansıma – Reflectance

τ Geçirgenlik - Transmittance

α Emilim – Absorbance

Yansıma ve kirliliğin panel üzerinde olmaması, panele gelen güneş ışığının içerisindeki fotonların hücreye daha fazla miktarda ulaşmasını sağlayacak ve panel verimi artacaktır. Kendini temizleme özelliği kazandırırken yüzeye hidrofobik özellik kazandırılması da hedeflenmiş ve bu sayede yüzeyin su itici özelliğinin olmasına ve yüzeye su geldiğinde kir ve tozu kolayca yüzeyden akıtarak temizlemesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılacak uygulamalar için amaç ve konuyu içeren literatür taraması yapılarak Başlık 2.2.'de uygulamalarda kullanılan maddeler ve yöntemler bakımından ayrı değerlendirilerek sunulmuştur.

2.2. Literatür Araştırması

PV panel koruyucu cam üzerine yapılan literatürdeki verim artırıcı kaplamalar, kullanılan maddeler, kimyasal çözücüler, yöntemler olarak ayrılarak araştırılmıştır. Literatürde sadece koruyucu cam üzerine değil aynı zamanda hücre üzerine yapılan kaplamalarda görülmüştür. Saf silikon hücreden ışığın %35-36'sı yansır [115, 116]. Bu sebeple hücreler üretim aşamasında busbar ve finger oluşturma aşamasından sonra anti-reflective kaplama yapılarak yansıma azaltılmaya çalışılır. Panel bir bütün haline getirildiğinde ve hücreden hiç yansıma olmasa dahi koruyucu cam üzerinden yansıyan ışık miktarı %8-10 kadardır [117-120]. Hücreden ve koruyucu cam üzerinden yansıyan ışık optik kayıplardır. Optik kayıplar neticesinde verimin azalması ile elektriksel kayıplar oluşur. Optik kayıpların azaltılması panel verimini artırır, böylece elektrik güç çıkışında artış elde edilir.

Koruyucu cam üzerine yapılan yansıtma engelleyici kaplamalarda yaygın olarak kullanılan maddeler SiO_2, MgF_2, TiO_2, Si_3N_4 ve ZrO_2 olduğu görülmüştür. Bu maddeler çok katlı kaplama yapıldığında, yüzey üzerinde ilk önce yüksek indeksli madde kaplanarak en altta kalması sağlanarak, en düşük indeksli maddeye kadar sırayla kaplanırlar. Böylece ilk katta (en alt kat) en yüksek yansıtma indeksli, son katta (en üst kat) ise en düşük yansıtma indeksli maddenin olduğu kaplamalar ile çok katlı kaplama yapılır. PV panel camının indeksi ise "1,52"dir [121]. Anti-reflection kaplamasındaki amaç kaplama ile 1,52 değerini havanın "1,00" olan yansıtma indeksi(η) değerine yaklaşmaktır. Böylece ışığın düşük indeksli hava ortamından daha yüksek indeksli kaplama üzerine geçmesi hedeflenir [122]. Kaplamalar camın panelin iç tarafında lamine edilen yüzüne de yapılabilmektedir. Ancak piyasada bulunan PV panellerin %70'inde bu kaplamaların camın hava ile temas ettiği ön yüzüne yapıldığı bilinmektedir [123]. Kaplamanın yansıtma indeksi, hava ve cam yüzeyin yansıtma katsayının çarpımının karekökü kadar olmalı ve herhangi bir dalgaboyu için yansıtmanın olmamasını sağlamak için kaplama kalınlığı, kaplamanın bir dalgaboyunun 4'te 1'i katı olmalıdır [124, 125]. Bu bağıntılar Denklem 2.2 ve Denklem 2.3'te görülmektedir.

$$\eta_{kaplama}=\sqrt{\eta hava.\ \eta yüzey} \qquad (2.2)\ [126]$$

$$d_{kaplama}=\frac{\lambda}{4*\eta arc} \qquad (2.3)\ [127]$$

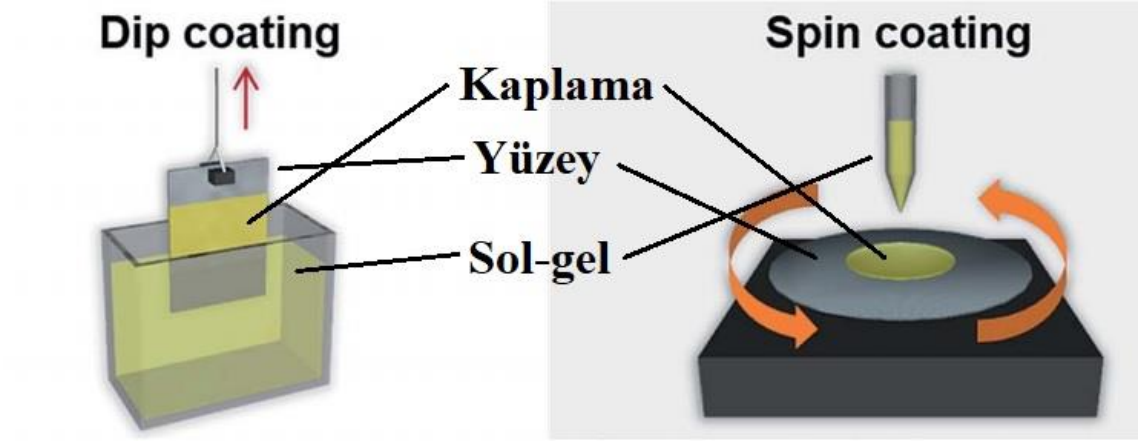
$\eta_{kaplama}$	Kaplamanın yansıtma indeksi
η_{hava}	Havanın yansıtma indeksi
$\eta_{yüzey}$	Yüzeyin yansıtma indeksi
$d_{kaplama}$	Kaplamanın kalınlığı (nm)
λ	Dalgaboyu (nm)

Denklem 2.2'de ifade edilen havanın yansıtma indeksi (η_{hava}) 1,00'dir. Yüzey olarak kullanılan camın yansıtma indeksi ($\eta_{yüzey}$) ise 1,52 olduğundan ideal bir kaplamanın yansıtma indeksi ($\eta_{kaplama}$) 1,23 olmalıdır. Dalgaboyu değiştikçe enerji yoğunluğu değişeceğinden ışığın belirli bir dalga boyunda sahip olduğu tüm enerjisinin hücreye iletimi için gerekli olan kaplama kalınlığı değişmektedir. Görünür ışık bölgesinin 380-700 nm dalga boyunda olduğu bilinmektedir [128]. 380 nm altı yani ultraviyole bölge ve 700 nm yukarısı olan kızılötesi (infrared) bölgelerde enerji yoğunluğu Şekil 1.20'deki gösterildiği gibi yeterli değildir. Görünür bölgede ışığın en fazla enerji barındırdığı dalgaboyu 550 nm'dir. Kaplama yapılırken bu dalga boyu esas alınabilir. Bu bağlamda Denklem 2.3'e göre ideal bir kaplamanın kalınlığı yaklaşık 112 nm olmalıdır. Görünür bölgedeki ideal kaplama kalınlık aralığı ise 77-142 nm kalınlıklarında olmaktadır. Tek katlı yapılan kaplamalar tüm dalga boylarında etkinlik gösteremez. Bu sebeple literatürde çok katlı kaplamaların yapıldığı görülmüştür.

Denklem 2.3'te bahsedildiği gibi tek katlı kaplamaların geniş spektrumda yansıtmayı azaltamadığı bunun için çok katlı ve her katında farklı maddelerin kullanıldığı kaplamalar yapılır [129]. Kaplamalar camın 1,52'li indeksi baz alındığında, ondan daha yüksek yansıtma indeksli TiO_2 gibi ve düşük yansıtma indeksli SiO_2, MgF_2 gibi maddeler içerir [130]. En yaygın kullanılan madde olan SiO_2 1,46 yansıtma indeksli iken MgF_2 1,32 indekslidir [115, 131-133]. Yüksek yansıtma indeksli maddeler yansıtma engelleme özellikli kaplamalarda camdan daha fazla ışığı yansıttığı için kullanılmaz. Ancak fotokatalik özellikli maddeler ultraviyole (UV) bölge dalgaboyundan itibaren ışık etkisi ile elektron çifti ve boşluğu oluşturarak self-cleaning etkisi gösterirler [134]. Fotokatalizör olduğu bilinen maddeler TiO_2, ZnO, CdS, ZnS, SrO_2, WO_3, Fe_2O_3, SnO_2, ZrO_2, CeO_2, V_2O_5'tir [135, 136]. Yüksek yansıtma indeksi maddelerden TiO_2 yansıtma indeksi 2,43 iken, alternatif olarak kullanıldığı görülen Al_2O_3'nin 1,65, Si_3N_4'ün 2,05,

ZnO'nun 2, ZrO_2'nin 2,15'tir [133, 137-140].

Kaplamalarda süperhidrofobik ve süper hidrofilik yüzey oluşumunda sol-gel, elektrokimyasal biriktirim (electrochemical deposition – ECD), elektrospin, plazma, fiziksel buharlı biriktirim (physical vapor deposition – PVD), kimyasal buharlı biriktirim (chemical vapor deposition – CVD), fotolitografi ve plazma yöntemleri kullanılmaktadır [141]. Tek katlı ve çok katlı kaplamaların görüldüğü literatürdeki uygulamalar açısından en yaygın yöntem; kolay ve hızlı uygulama olduğu bilinen ve ilk kullanımı 1864 yılına dayanan sol-gel(solution-gel) (jel kıvamlı solüsyon)'dir [142]. Koruyucu cam üzerine yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılan en kolay ve hızlı yöntemler sol-gel ile dip-coating ve spin-coating yöntemleri olduğu görülmüştür. Bu iki yöntemin uygulaması Şekil 2.1'de görülebilir. Spin-coating ve dip-coating yöntemleri için öncelikle bir sol-gel hazırlanmalıdır. Sol-gel için ise su veya alkol bazlı çözücüler(öncül-presursor) ile maddeler homojen bir jel kıvamına gelinceye kadar karıştırılır [143, 144]. Sol-gel hazırlanırken öncüller, kimyasal çözücüler, maddeler, karışım oranları, viskozite ve karışım süresi sol-gel karakteristiğini etkilemektedir.

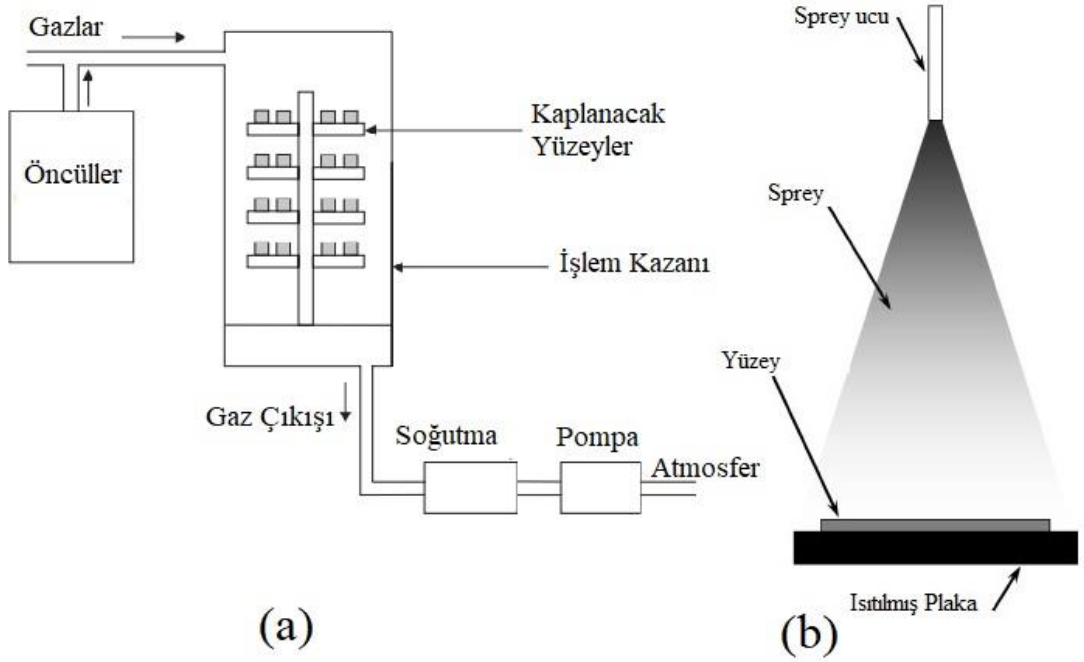


Şekil 2.1 Dip-coating ve Spin-coating yöntemleri [145]

Dip-coating yönteminde kaplanacak yüzey ve materyal hazırlanan sol-gel içerisine tamamen daldırılır. Genellikle boyama, galvaniz kaplama gibi uygulamalarda yaygın kullanıma sahip olan bu yöntemde maddenin her iki yüzeyi de kaplandığı için PV panellerde yüksek miktarda sol-gel kullanımı oluşturmaktadır. Çünkü materyal daldırılıp kontrollü çıkartıldığı için yüzeyde kalan sol-gel miktarı uygulanan buharlaştırma sıcaklığı ile ayarlanmaktadır. Yöntemin avantajı koruyucu camın PV panel birleştirilmeden önce

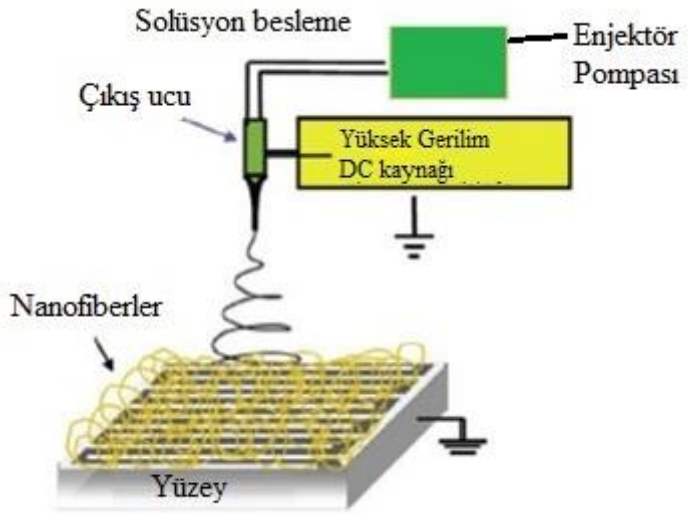
üretim aşamasında kaplaması yapılarak montaja hazır olmasının camın her iki yüzeyine de kaplama avantajı sunmaktadır. Spin-coating yöntemi ise istenilen miktarda sol-gel kaplanacak yüzey üzerine bırakılır ve ayarlanan dönme hızında merkezkaç kuvveti etkisi ile sol-gel alana yayılır. Kalan miktar buharlaştırma ile kaplama sertleştirilerek yüzeyde sol-gel kalmaz. Uygulanan sol-gel'in viskozitesi düşük ise homojen bir kaplama elde edilemeyebilir. Daldırarak kaplamanın spin-coating yönteminden daha kolay ve beklemeden uygulanabilir olması aynı zamanda tüm yüzeyin kaplanıyor olması avantaj olarak görülürken bir diğer önemli avantajı da büyük alanlarda kullanımının daha kolay olmasıdır. Dip-coating ve spin-coating yöntemleri hızlı ve kontrol edilebilir birer yöntem olsalar da istenilen yere taşınabilir değildirler. Kullanılan yöntemlerde sadece elektrospin ve spray-pyrolysis yöntemleri istenilen yerde uygulama avantajına sahiptirler.

Kimyasal buharlı biriktirim (Chemical Vapour Deposition-CVD) yöntemi, fiziksel buharlı biriktirim (Physical Vapour Deposition – PVD), termal buharlaştırma (thermal evaporation), spray-pyrolysis, sputtering, RF ya da DC magnetron yöntemlerinin kullanıldığı görülmüş olup elektrospin yönteminin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bu yöntemlerin birbirinden farklı avantajları ve dezavantajları vardır. En yaygın olmasına rağmen sol-gel yöntemi dahi solüsyon cam üzerinde kuruduktan sonra çekilme yaparak homojen kaplama yapısının dağılmasına neden olmaktadır. CVD yöntemi daha çok saf silikon hücre üzerine kaplamalar için kullanılmıştır. 200℃'den 1000℃ sıcaklıklara kadar bir kapalı ortama verilen gazlar ile istenilen maddeler yüzeye çöktürülür. Bu yöntemde de plazma ile güçlendirilmiş CVD (plasma-enhanced-CVD) (PE-CVD) tekniği uygulanmaktadır. CVD yönteminin yanı sıra sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem olan spray pyrolysis yöntemi, önceden ısıtılan yüzeye solüsyonun spreylenmesidir. Isı etkisi ile solüsyon içeriğindeki maddeler yüzeye yapışır. Buharlaşan solüsyon ile maddeler yüzeyde kalmış olur. Spreylemenin süresi, mesafesi, solüsyon içeriği spray pyrolysis yönteminin belirleyici etkenleri iken yüzey sıcaklığının ayarlandığı sıcaklık değeri yapışma için en önemli belirleyici parametre olarak görülmektedir [146, 147]. Şekil 2.2'de CVD ve spray pyrolysis yöntemleri görülmektedir.



Şekil 2.2 (a) CVD [148], (b) Spray pyrolysis [147]

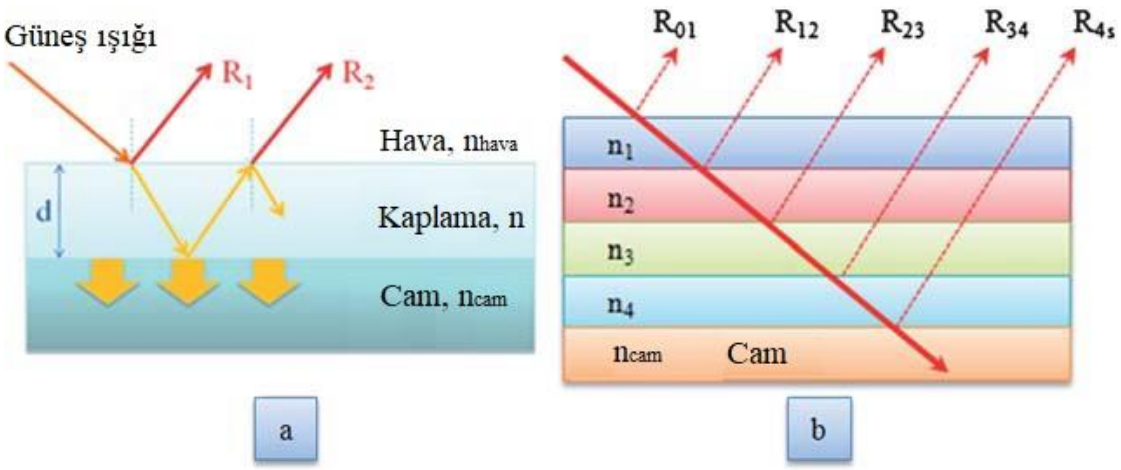
Kullanılan yöntemlerde elektrospin bir alternatif yöntem olarak görülmüştür. Elektrospin son yıllarda ilgi çeken bir yöntemdir ve bu teknik ile yapılan çalışmalarda artış gözlenmiştir. Elektrospinde yüksek gerilim altında negatif ve pozitif kutuplandırılmış bir kaynak ve bir alıcıdan oluşur. Kaynak pozitif kutuplu iken alıcı negatif kutupludur. Kaynakta hazırlanan karışım, alıcıda ise kaplamanın olacağı yüzey ya da materyal bulunur. Solüsyon karakteristiğinin yanı sıra elektrospinde gerilim (kV), akış hızı (ml/saat), iğne ucu (mm), kaynak ve alıcı arası mesafe ile uygulama süresi yöntemin değişkenleridir [149, 150]. Şekil 2.3.'de elektrospin yönteminin uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Elektrospin yöntemi [149]

Çalışmalarda SiO_2 anti-reflection kaplamalar için en yaygın madde olduğu görülmüştür. SiO_2'nin birlikte en çok kullanıldığı madde TiO_2 olmuştur. Dip-coating yöntemi ile yapılan bir çalışmada yansıma %60 azalarak ışık geçirgenliği artırılmıştır [151]. Dip coating ile yapılan bir başka çalışma da ise ışık geçirgenliği %6 artırılmıştır [152]. Sol-gel yöntemi ile hazırlanan karışımın dip-coating yöntemi ile kaplama yapılmasıyla %4,17 verim artışı elde edilmiştir [153]. Kaplamalarda sol-gel yönteminin çok sıklıkla dip-coating yöntemleri etkili ve başarılı sonuçlar aldığı görüşmektedir. Homojen bir kaplama yerine gözenekli kaplamalarla daha düşük yansıtma indeksleri elde edilmiştir. SiO_2 kullanılan bir çalışmada 1,14 indekse, MgF_2 kullanılmış bir başka gözenekli kaplama çalışmasında da 1,11-1,23 arası yansıtma indeksleri elde edilmiştir [154, 155]. CVD ile yapılan bir çalışmada homojen bir katman elde edilebilmiştir [156]. Elektrospin ile TiO_2 kullanılarak hazırlanan kaplamada 10 cm ve 30 kV değerlerinde 1-3 dk aralıklarında uygulama süreleri denenerek kaplama elde edilmiş daha sonra 30 dk boyunca 450°C sıcaklıkta ısıyla gözeneklilik oluşturulmuştur. Bu çalışma sonucunda ışık geçirgenliği veya yansıtma azaltılmasa da yüzeyde süperhidrofilik özellik elde edilmiştir [157].

Yüksek indeksli-düşük indeksli maddelerin kullanımı tek katlı kaplamalarda birlikte, çok katlı kaplamalarda Şekil 2.4'teki gibi maddenin üzerinde önce yüksek yansıtma indeksli onun da üzerine daha düşük yansıtma indeksli madde kaplama yolu izlenir.



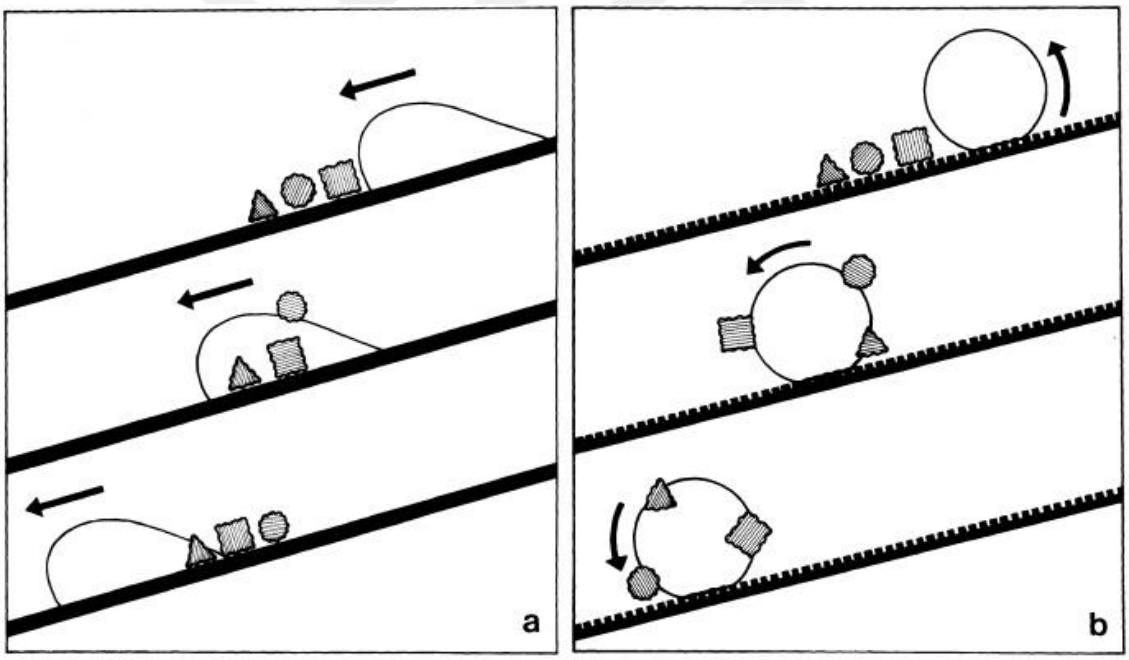
Şekil 2.4 (a)Tek katlı kaplama yansıma, (b) Çok katlı kaplama yansıma [124]

Şekil 2.4(b)'de 4 katlı bir kaplama örneği verilmiştir. Kaplamalarda kat sayısına göre yansıtma indeksi en yüksek olan madde en altta olacak şekilde nkat>n4>n3>n2>n1 şeklinde sıralanır [158]. Literatür çalışmalarında tek katlı kaplamalarda SiO_2 ve TiO_2 birlikte aynı kaplama içerisinde iken, çok katlı kaplamalarda en alt katta TiO_2 onun üzerinde SiO_2 uygulanmaktadır. Yaygın yansıtma engelleme ve kendini temizleme kaplamalarında çok katlı kaplamalarda yaygın olarak 2 katlı ve 4 katlı olarak kaplama yapıldığı bir çalışmada 6 kat uygulandığı görülmüştür [159]. Ancak kaplama sayısı arttıkça kaplama kalınlığının artması kaplamaların etkinliğini düşürmektedir.

Çok katlı kaplamalarda, farklı ince film hücreleri üzerine yapılmış bir çalışmada ZrO2 ve SiO_2 maddeleri DC magnetron yöntemi ile uygulanmış ve %64-85 arası yansıtmanın azaldığı ölçülmüştür [160]. Aynı maddeleri RF magnetron yöntemi kullanılarak cam yüzey üzerine yapılan kaplamada yansıma %1,61'e düşürülmüştür [161]. Kaplamaların hem formu hem de yüzey yapışması ve dayanımı kum fırtınası, yüksek sıcaklık veya UV dalgalanmasında bozulabilir [162]. Kaplamanın dayanımını artırmak için sol-gel yönteminde karışım içerisine epoksi reçine, benzoksazin (benzoxazine), metilfenil(methylphenyl) silikon reçine, hidroksil akrilik (hydroxyl acrylic) reçine, polidimetilsiloksan (polydimethylsiloxane) ve polisiloksan (polysiloxane) karıştırıldığı görülmüştür [163-169].

Kaplamalarda TiO_2 gibi ışık etkisi ile fotokatalizör özellik gösteren maddelerin kullanılması ile yüzeye kendini temizleme özelliği kazandırılır. Bu özellik self-cleaning olarak bilinir ve bunu su damlası ile yapar. Hidrofobik (su iticilik - water-repelling) ya da

hidrofilik (su yaydırıcılık) özellikte olan yüzey, su damlasının davranışını belirler. Yüzeyin hidrofobik özellikte olması üzerinde bulunan su damlasının yüzey ile yaptığı temas açısının 90°'den fazla olmasıdır [170]. Bu sayede su yüzeyde top şeklini alacak ve temas ettiği diğer su damlaları ile büyük bir top halinde yüzeyden tamamen akarak toz, kir gibi maddeleri süpürerek akıtacaktır [171, 172]. Temas açısının 150°'den fazla olması yüzeye süperhidrofobik özellik kazandırır ve bu özellikli yüzeyde su damlalarının gözle görünür şekilde büyük olarak yüzeyden akmaktadır [173]. Yüzey temas açısının 90°'den az olması yüzeyin hidrofilik özellikte olduğunu ve 10° altında olması ise süperhidrofilik özellik göstermektedir. Hidrofilik özellikte su damlasının yüzeye yayılarak alan temizliği yapmaktadır [174]. Ancak su damlası hareketinden daha çok yayılarak hareket ettiği için kirlerin tamamını alamaz ve bölgesel kirleri üzerine alır [175]. Hidrofobik ve hidrofilik su damlalarının yüzey üzerindeki hareketleri ve toz, kir gibi maddelere karşı davranışı Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5 (a)Hidrofilik (b) Hidrofobik

Literatür araştırmasında PV panel üzerine kendi kendini temizleme kaplamalarında hidrofobik yüzeyler oluşturma üzerine çalışmaların çok daha fazla olduğu görülmüştür. Hidrofobik kaplamalarda için, MgF_2 kullanılarak sol-gel ile hazırlanarak dip-coating yöntemi ile uygulanan süperhidrofobik kaplamalar sadece kendini temizleme amaçlı değil aynı zamanda buzlanma önleyici olarak da kullanılabilir [176]. PV panel üzerine

Al_2O_3 maddesiyle sol-gel ile hazırlanıp spin-coating yöntemi yapılan kaplamada 161° temas açısı ve %95 ışık geçirgenliğine sahip süperhidrofobik yüzey elde edilmiştir [177]. Başka bir çalışmada, sol-gel ile hazırlanarak spin-coating yöntemi ile yapılan süperhidrofobik kaplamada ışık geçirgenliğinde %3 artış elde edilerek ısıl işlemden (550°C'de 3 saat) önce 1,5056 olan yansıtma indeksi 1,4265'e kaplama kalınlığı ise 858 nm'den 107 nm'e düşürülmüştür [178]. Koruyucu cam üzerine yapılan ısıl işlem, hücreye uygulanmasının yerine daha kullanışlı ve hücrenin yarıiletken yapısına zarar vermemektedir. Kaplamanın yüzeyde tutunmanın iyi olması için yüzeyde pürüzlülük ve aşındırma, yansıtma engelleyici kaplamalarda olduğu gibi kendini temizleme özelliği gösteren kaplamalarda da yapılmaktadır [179, 180].

Literatürde kullanılan maddeler ve yansıtma indeksleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Literatürde uygulanan düşük ve yüksek indeksli maddeler

	Maddeler	Yansıtma indeksi(η)
Düşük indeksli	SiO_2	1,46
	MgF_2	1,32-1,38
	PV Camı	1,52
Yüksek indeksli	TiO_2	2,43
	Al_2O_3	1,65
	ZnO	2,00
	Si_3N_4	2,05
	Ta_2O_5	2,10-2,30
	ZrO_2	2,15
	HfO_2	2,02
	CeO_2	2,20-2,40
	SiO	1,80-1,90

2.3. Materyaller ve Yöntemler

Literatürden araştırması sonrası kullanılmasına karar verilen maddeler SiO_2 ve TiO_2 nano

boyutta maddeler, yöntemler ise elektrospin ve literatürde uygulaması görülemeyen 3 Boyutlu yazıcı olarak seçilmiştir. Öncelikle maddelerin uygun polimer ve çözücülerle homojen bir sol-gel hazırlanması gereklidir. Bu kapsamda maddelerin boyutları ve özellikleri araştırılarak SiO_2 için Molchem-UK'den %99,5 saflıkta, 10-20 nm boyut aralığında ve gözeneksiz nano partiküller temin edilmiştir. TiO_2 için rutil yapıda Molchem UK marka, %99,5 saflıkta, 10-30 nm boyut aralığında nano partikül alınmıştır.

Nano maddeleri homojen ve bağlayıcı olması açısından Polylacticacid(PLA), Polyvinlypyrrolidone (PVP), polyacrylonitrile (PAN), polyurethane (PU), polyvinlyalcohol (PVA), polyvinlyacetate (PVAc), Polymethylmethacrylate (PMMA), polimerleri ile kullanıldığı görülmüştür [181]. 3 boyut yazıcılarda PLA, ondan daha sert ve şeffaf olmayan bir yapıda olan PETG (Polietilen Tereftalat), ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), Polikarbonat(polycarbonate-PC), Polipropilen (polypropylene-PP), PVA ana materyal olarak kullanılırlar. Polimer olarak PMMA ve PLA polimerleri seçilmiştir. PLA polimeri, elektrospinde kullanılımı mevcut iken 3 Boyutlu yazıcılarda filamentin ana maddesi olması sebebiyle uyumlu olması için seçilmiştir. PLA 180°C erime sıcaklığı, %90 ışık geçirgenliği ve 1,482-1,492 kırılma indekse sahip olması sebebiyle uygulamalar için uygun görülmüştür [182, 183]. Kaplamalarda PLA yanında alternatif olarak PMMA kullanılmıştır. PMMA, 160°C erime sıcaklığı, %92 ışık geçirgenliği ve 1,49 kırılma indeksi ile PLA'ya benzerlik göstermektedir [184].

Polimerlerin kimyasal olarak çözdürülerek homojen bir jel haline getirilmesi ve içine nano maddelerinin katılmasıyla sol-gel elde edilmesi için kimyasal çözücüler kullanılmıştır. Ana polimer olarak seçilen PLA'yı çözücü olarak Kloroform (Chloroform)($CHCl_3$), Asetik asit (Asetic acid)(CH_3COOH) ve Etanol (Ethanol)(CH_3CH_2OH) kullanılmıştır. Çözücü olarak seçilen kloroform'un PLA'nın iyi bir çözücüsü olduğu bilinmektedir [185]. Asetik asit ve etanol de solüsyon hazırlamada etkisini incelemek amacıyla denenmiştir.

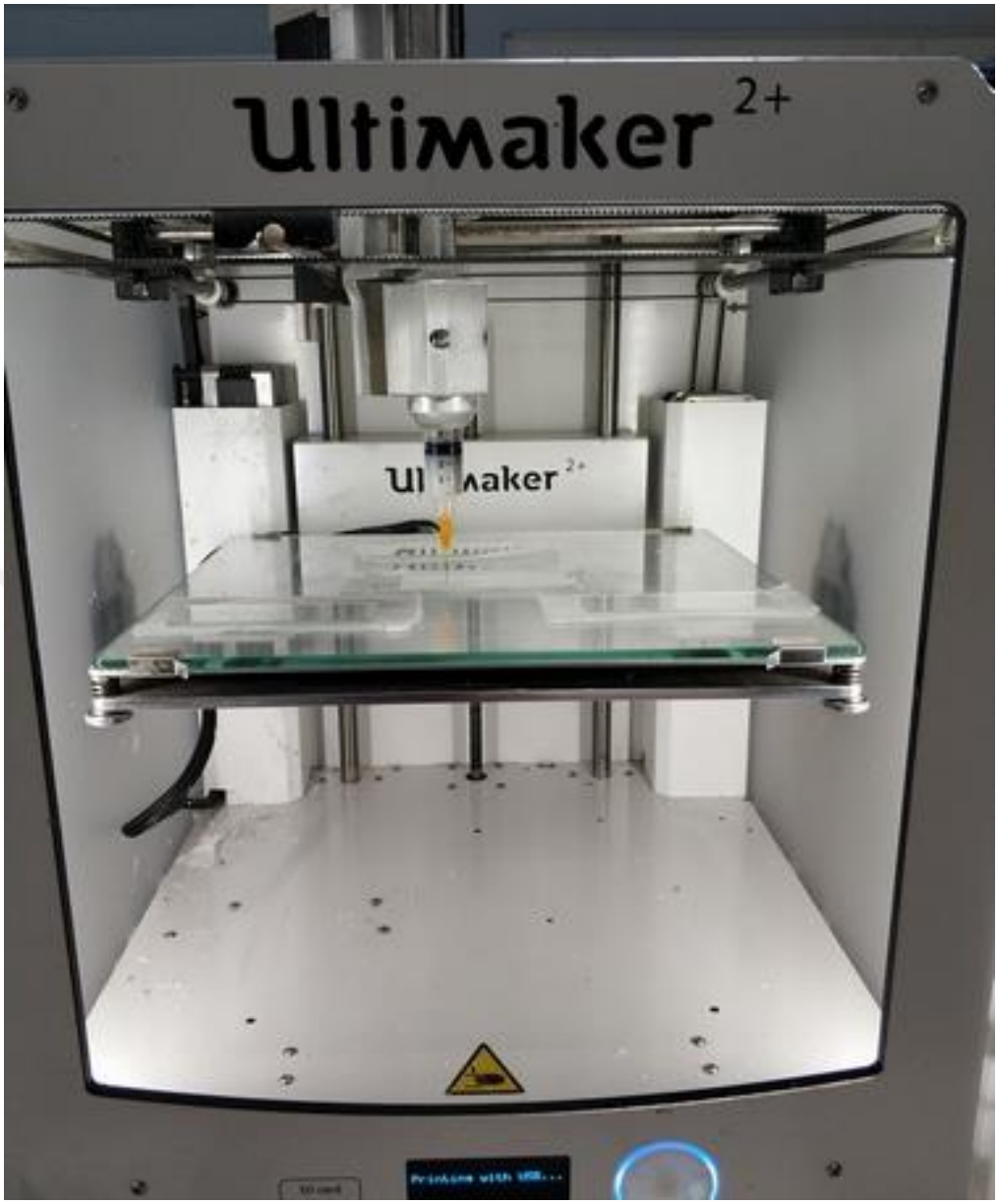
Uygulama yöntemlerinde elektrospin ve 3D printer yöntemleri kullanılarak farkları ve ikisinin vereceği sonuçlar araştırılmıştır. Elektrospin yönteminde Şekil 2.6'da görülebilen düzlemsel kaplama yapabilen elektrospin cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.6 Deneylerde kullanılan elektrospining cihazı

Kullanılan cihaz Marmara Üniversitesi Nanoteknoloji ve Biyomalzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarında bulunan İnovenso – Basic system modelidir. Elektrospinning cihazları Şekil 2.3'te gösterildiği gibi solüsyonun otomatik basılmasını sağlayan pompa ile kullanılır. Bu sistemde İnovenso – IPS12 model otomatik enjektör pompası kullanılmıştır. Enjektör pompasından enjektör kapasitesi, eğer biliniyorsa solüsyon miktarı da olabilir, ve akış hızı (ml/saat) girilmektedir. Solüsyondan kalan miktar ekranda görülebilir. Elektrospin cihazı üzerinden ise gerilim kademesi (kV) ayarlanır, cihaz üzerinden kaynak ve alıcı arasındaki mesafe ayarlanabilir.

Kullanılan diğer yöntem olan 3 Boyutlu yazıcı olarak yine aynı laboratuvarda bulunan Şekil 2.7'de görülen Ultimaker 2+ model kullanılmıştır.



Şekil 2.7 Deneylerde kullanılan 3 Boyutlu yazıcı

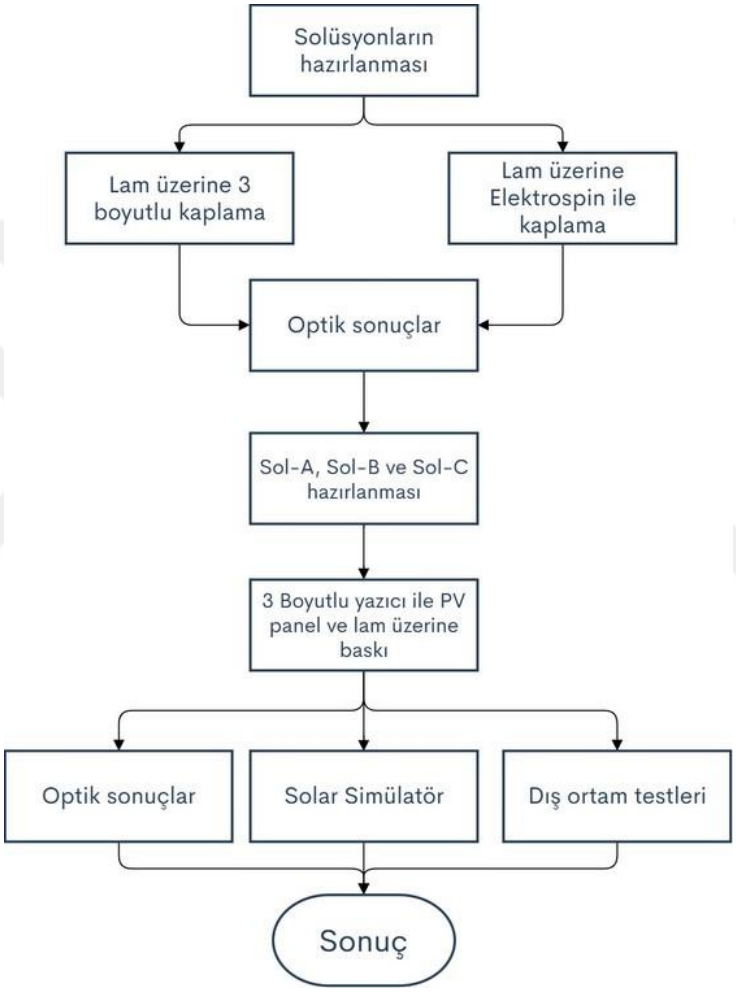
3 Boyut yazıcılar PLA gibi polimerler içeren filamentin yazıcı ucunda sıcaklık ile eritilerek baskı yaparlar. Kullanılan 3 Boyutlu yazıcı araştırma merkezince biyo malzeme yazımına uyumlu hale getirilmiştir. Modifiye edilen 3 Boyutlu yazıcıda filament yerine solüsyon kullanılması hazırlayacağımız sol-gel karışımı için kullanılabilirdir. 20x20x25 cm ölçülerinde ürün ya da prototip basılabilmektedir. 3 Boyutlu yazıcıda baskı için öncelikle bilgisayar bağlantılı olarak bir çizim modeli oluşturulmalıdır. Model ilk olarak 3x3 cm ölçülerinde oluşturulmuş daha sonra PV panel için gerçek ölçülere uyarlanmıştır. 3 Boyutlu yazıcıda yazıcı ayarlarına bakıldığında elektrospin yöntemine göre çok daha

fazla parametreler vardır. Bunlar, Doldurma oranı (infill ratio ya da infill percentage), Çıkış hızı (Extruder Multiplier)(Ext. M.p.), Çıkış genişliği (Extruder Width), ilk kat yüksekliği (Primary layer height), Toplam yükseklik (Total height), X/Y eksenlerinde hareket hızı (X/Y axis movement speed), Baskı hızı (printing speed) ve çıkış ucu sıcaklığı (nozzle temperature)'dır. Infill percentage değeri 3 Boyutlu yazıcı iğne ucunun izlediği yolun bir sonraki çizgiyi (yolu) oluşturmada ne kadar aralık vereceği ile ilgilidir. Bu değer her üründe tekrardan ayarlanmalıdır. Kaplamalarda bu değer değişken parametredir. Ext. M.p. değeri baskının hızını ve şiddetini gösterir. Çalışmada kullanılan solüsyon olduğu için luer-lock tipli enjektöre yukarıdan uygulanan baskının şiddetini gösterir. Böylece solüsyonun enjektörden çıkış miktarı ayarlanır. Ext. M.p. değeri kaplamalarda değişken parametre olarak kullanılmıştır. Ext. M.p. deneysel olarak farklı değerler denenerek uygun değerleri uygulamalar ile bulunmuştur. Extruder width, filament temelli yazıcılarda filamentin çıkış yaptığı ucun genişliğini gösterir. Kullandığımız solüsyon temelli biyo uyumlu yazıcıda luer-lock enjektör iğnesi çevrilerek istenilen uç genişliğinde iğne takılabilmektedir. Kullanılan iğne ucu 23 Gauge ölçüsünde, dış çapı 0,63 mm ve iç çapı 0,35 mm olan iğne tipidir. Bu sebeple Extruder width sabit olup 0,35 mm genişliktedir. Daha ince iğne olan 25 Gauge ölçüsündeki iğne tipinin iç genişliği 0,20 mm'de tıkanıklık yaşandığı için kullanılmamıştır. Primary layer height, baskıda ilk katın yüksekliğini belirler. Üretici firmalar ilk katın her zaman daha yavaş ve ince yapılmasını önermektedir. Tek katlı kaplama yapıldığı için Primary layer height ve Total layer height yazıcının en ince yapabildiği kat ayarı olan 0,05 mm'e ayarlanmıştır. X/Y axis speed X ve Y eksenlerindeki yazma işlemi olmadığındaki hareketin hızıdır. Bu parametre 4800 mm/sn'de sabit tutulmuştur. Printing speed ise baskı yapılma(extruding) işlemi sırasındaki hızdır. Printing speed 300 mm/sn olarak ayarlanmıştır. Nozzle temperature solüsyon kullanıldığı ve enjektör içerisinde donma olmadığı için "0" olarak ayarlanmıştır.

2.4. Deneysel Uygulamalar

Çalışmalarımızda yansıtma engelleyici ve kendini temizleme özellikli kaplamalar yapılarak PV panellerin verimini artırma ve böylece aynı panelden daha fazla güç çıkışı alma hedeflenmiştir. Tez çalışmalarında Şekil 2.8'de gösterilen akış şeması izlenmiştir. Tez laboratuvar çalışmaları 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Farklı oran ve içeriklerde solüsyonların hazırlanması,
- 3 Boyutlu yazıcı ve Elektrospin yöntemlerinin farklı parametreleriyle lam üzerine kaplamalar ve bunların optik incelemeleri
- En iyi sonuçların alındığı 3 solüsyonun tekrar hazırlanarak 3 Boyutlu yazıcı ile lam ve PV panel üzerine yapılması
- Optik, simülatör ve dış ortam testleridir.



Şekil 2.8 Çalışmaların aşamaları

İlk aşama olan solüsyon hazırlanmasında literatüre bağlı kalınsa da tüm maddeler ve çözücülerin uygunluğu ve bunların hangi oranlarda ve sürelerde karıştırılması gerektiği deneysel olarak bulunmuştur. Bunun için 12 adet farklı içerikli sol-gel hazırlanmıştır. Solüsyon formülü oluşturulurken tüm oranları kullanmak yerine oranlardan bazılarını uygulayarak sonuçlarına göre en uygunları tekrar yapılmış ve böylece hem zaman ve hem de iş gücünden kazanılmıştır. Solüsyonlara, içeriklerine göre sıra kodu verilmiştir. Tablo

2.2'de hazırlanan tüm solüsyon içerikleri görülebilir.

Tablo 2.2 Solüsyon içerikleri

Solüsyon numarası	PLA (gr)	PMMA (gr)	$CHCl_3$ (ml)	SiO_2 (gr)	TiO_2 (gr)
1	-	2	20	0,1	0,1
2	1,6	-	20	0,2	0,2
3	2	-	20	0,1	-
4	2	-	20+Eth+Ast.A.	-	0,1
5	2	-	20	-	0,05
6	1,6	-	20	0,05	0,05
7	2	-	20	0,05	-
8	1,6	-	20	0,025	0,025
9	-	1,6	20	0,025	-
10	-	1,6	20	0,025	0,025
11		1,6	20	0,05	0,05
12	2	-	20	0,05	0,05

Solüsyon 1 ve 11 hazırlandığında yüksek ve düşük viskozite sorunu sebebiyle akışkanlık problemi görülmüş ve kullanılamamışlardır. Tüm karışımlar için aynı hassas terazi (Precisa XB 220A) ve manyetik karıştırıcı (Daihan MSH-20A) kullanılmıştır. Tüm solüsyonlarda farklılık olmaması için manyetik karıştırıcıda sıcaklık kapatılarak ortam sıcaklığında (25℃) ve 1000 d/dk'ya ayarlanmıştır. Karışımlar hava sızdırmayacak şekilde parafilm ile üzerleri kapatılıp uçuculukları önlenmiştir. Karışımlar sonrası hiçbir sol-gelde eksilme olmamıştır.

Solüsyon-2 (Sol-2) hazırlanırken 1,6 gr PLA, 20 ml $CHCl_3$, 0,2 gr SiO_2 ve 0,2 gr TiO_2 hepsi aynı anda bir beher içerisinde manyetik karıştırıcıda 4 saat karıştırılmıştır. Solüsyon-3 hazırlanırken 2 gr PLA 20 ml $CHCl_3$ ile 2 saat çözdürüldü sonra 0,1 gr SiO_2 eklenerek 2 saat daha manyetik karıştırıcıya bırakılarak hazırlanmıştır. Solüsyon-4 hazırlanmasında 2 gr PLA, 20ml $CHCl_3$, 1,5 ml Etanol ve 1,5 ml Asetik asit ile 4 saat karıştırılarak PLA tamamen çözdürülerek jel haline getirilmiştir. 0,1 gr TiO_2 eklenmesi ile birlikte 2,5 saat daha karıştırılmıştır. Bu sol-gelde literatürdeki etanol ve asetik asit

kullanımı deneysel olarak gözlemlemek için denenmiştir. Solüsyon-5, 2 gr PLA 20 ml $CHCl_3$ içerisinde 2 saat manyetik karıştırıcıda çözdürülerek 0,05 gr TiO_2 eklendikten sonra 18 saat daha karıştırıcıya bırakılmıştır. Bu sol-gel karışımına nano maddenin karışım süresinin etkisi incelenmiştir. Solüsyon-6'da 1,6 gr PLA 20 ml $CHCl_3$ içerisinde 2 saat süresince manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra 0,05 gr SiO_2 ve 0,05 gr TiO_2 eklenerek 3 saat boyunca daha karıştırılarak homojenize edilmiştir. Solüsyonda 2 saatlik karışım ile PLA polimerinin homojenize süresinin minimum süresi bulunmuştur. Solüsyon-7'de sol-5'e benzerlik göstererek aynı oranlarda TiO_2 yerine SiO_2 eklenmiştir. Sol-7, 2 gr PLA 20 ml $CHCl_3$ içerisinde 2 saatlik karıştırılarak çözdürüldükten sonra 0,05 gr SiO_2 eklenerek 3 saat daha karıştırılarak hazırlanmıştır. Solüsyon-8 hazırlanmasında 1,6 gr PLA 20 ml $CHCl_3$ ile 2,5 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılarak homojen hale getirildikten sonra 0,025 gr SiO_2 ve 0,025 gr TiO_2 birlikte eklenerek 4 saat daha karıştırılarak homojen sol-gel elde edilmiştir. Solüsyon-9, 10 ve 11 hazırlamasında ise PLA polimeri yerine PMMA polimeri kullanılmıştır. Sol-9, 1,6 gr PMMA 20 ml $CHCl_3$ içerisinde homojen olana kadar 2 saat boyunca karıştırılmış daha sonra 0,025 gr SiO_2 eklenerek 18 saat daha karıştırılarak elde edilmiştir. Sol-10, oransal olarak sol-9 ile aynı olup sadece içerik olarak TiO_2 farklılığı bulunmaktadır. 1,6 gr PMMA ile 20 ml $CHCl_3$ 1 saat karıştırılarak yeterli homojenlik görülmüş ve 0,025 gr SiO_2 eklendikten sonra 3 saat SiO_2 karıştırılmıştır. SiO_2'nin yeterli homojenliğe eriştikten sonra 0,025 gr TiO_2 eklenerek 2 saat daha karıştırılarak sol-gel elde edilmiştir. Solüsyon-11'de, sol-10'daki nano maddelerin oranları iki katına çıkartılmış ancak viskozite problemi görüldüğünden uygulanması yapılmamıştır. Solüsyon-12, 2 gr PLA ile 20 ml $CHCl_3$'ün 2 saat karıştırılıp çözdürüldükten sonra, 0,05 gr SiO_2 ve 0,05 gr TiO_2 birlikte eklenerek 2,5 saat boyunca karıştırılarak hazırlanmıştır.

Solüsyonlar hazırlandıktan sonra bekletilmeden enjektöre alınıp 3 Boyutlu yazıcı ve elektrospin ile kaplamalara geçilmiştir. Kaplamalar, çalışmaların ilk aşamasında standart 25x75 mm ebatlarında ve 1 mm kalınlığında önceden temizlenmiş laboratuvar lamı üzerine yapılmıştır. Elektrospin yöntemi ile kaplamada kullanılan parametreler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Elektrospin yöntemi değişken değerleri

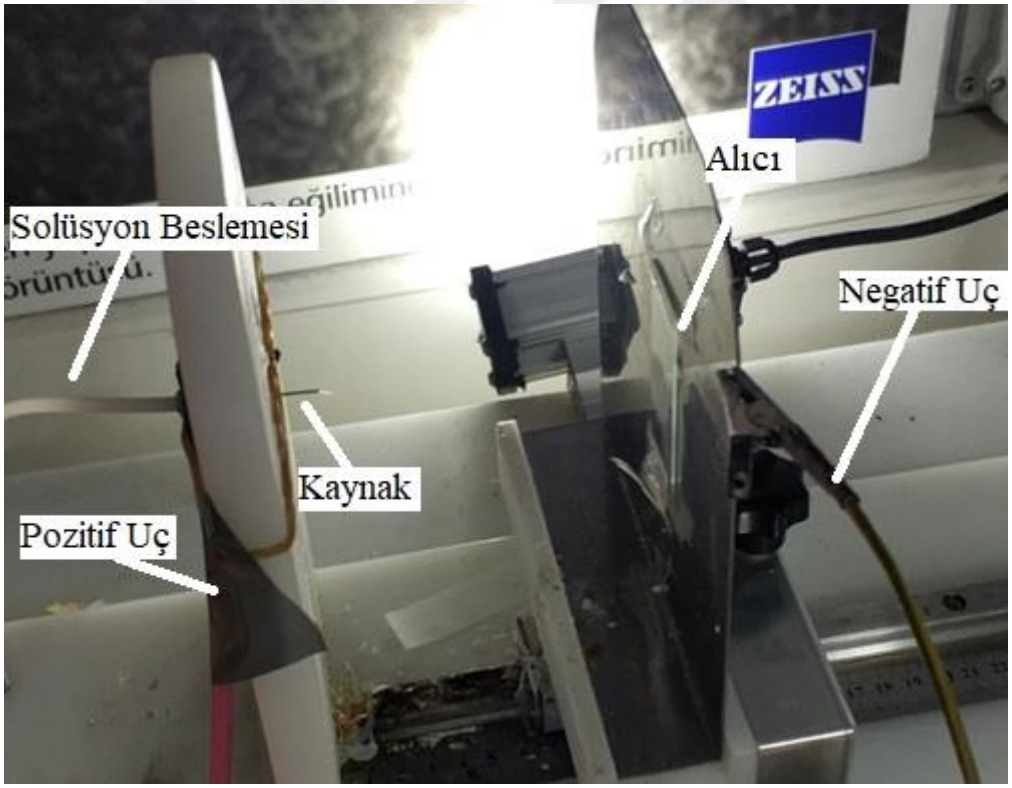
Akış miktarı (ml/saat)	Gerilim (kV)	Uygulama süresi (sn)	Mesafe (cm)
0,1	16	60	10
0,2	20	120	15
0,3	22	150	
0,5	24	180	
		210	
		240	
		300	

3 boyutlu yazıcıda kullanılan parametreler ise Tablo 2.4'te verilmiştir.

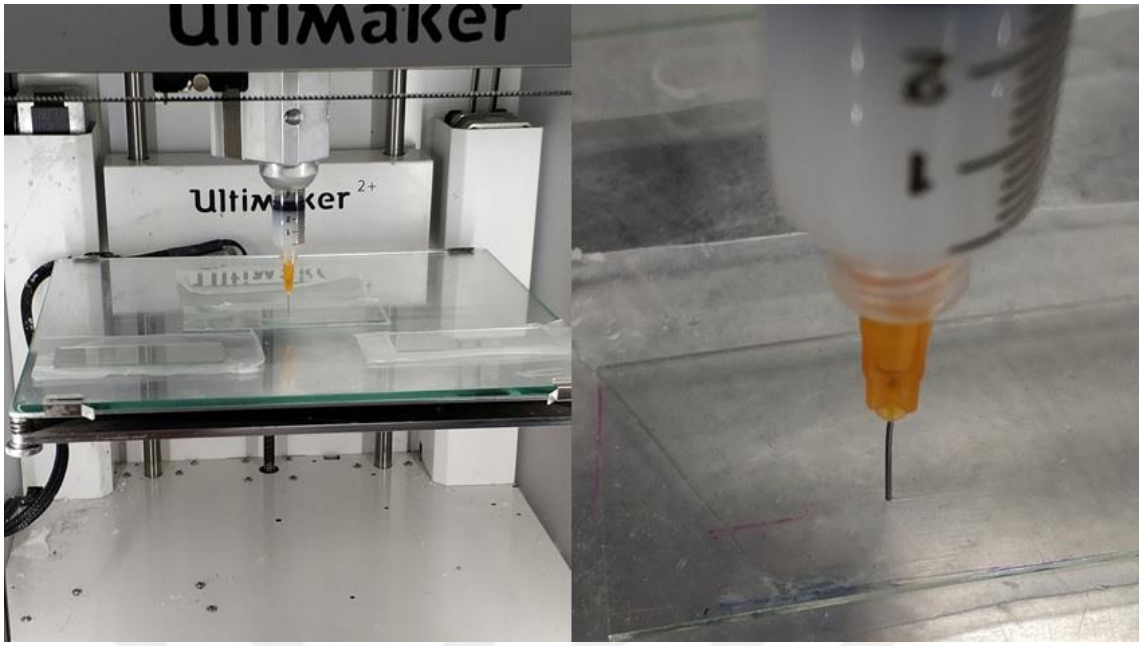
Tablo 2.4 3 Boyutlu yazıcı değişken değerleri

Doldurma oranı (%)	Extruder M.p.
20	0,05
25	0,2
30	0,75
35	1
40	1,5
50	2
60	3
65	4
75	6
80	7
100	8
	10
	15
	25
	40
	50

Tablo 2.3 ve 2.4'te verilen parametreler her kaplama için her sütundaki bir değerin seçilerek kullanılması ile uygulanmıştır. Elektrospin uygulamalarında değişken sayısının 4 olması ile çalışmaların ilk aşaması olan lam üzerine kaplamaların sayısı daha fazladır. Tüm oranların kullanılması ile 224 kaplama ortaya çıkması gerekirken parametrelerin ihtimalleri sıralanarak uygulanan kaplama sayısı yaklaşık olarak yarı yarıya azaltılarak 102 adet kaplama örneği hazırlanmıştır. Şekil 2.9'da elektrospin ile uygulama sırasındaki düzenek görülebilir. Elektrospin cihazı karşılıklı ya da düşey olarak düzenlenebilmektedir. Uygulama süreleri genellikle kısa tutulmuştur. 180 saniyeden daha fazla uygulama süreleri ile az sayıda kaplama yapılmıştır. Akış miktarı ise her solüsyon içeriğine göre akışkanlık değiştiği için her solüsyonda farklı kullanılmıştır. Her parametre bir kaplama sırasında seçilerek (örnek; akış miktarı: 0,2 ml/saat, gerilim: 24 kV, uygulama süresi: 150 sn, mesafe: 10 cm) uygulanmıştır. Şekil 2.10'da ise 3 boyutlu yazıcı ile yapılan uygulama görülmektedir.

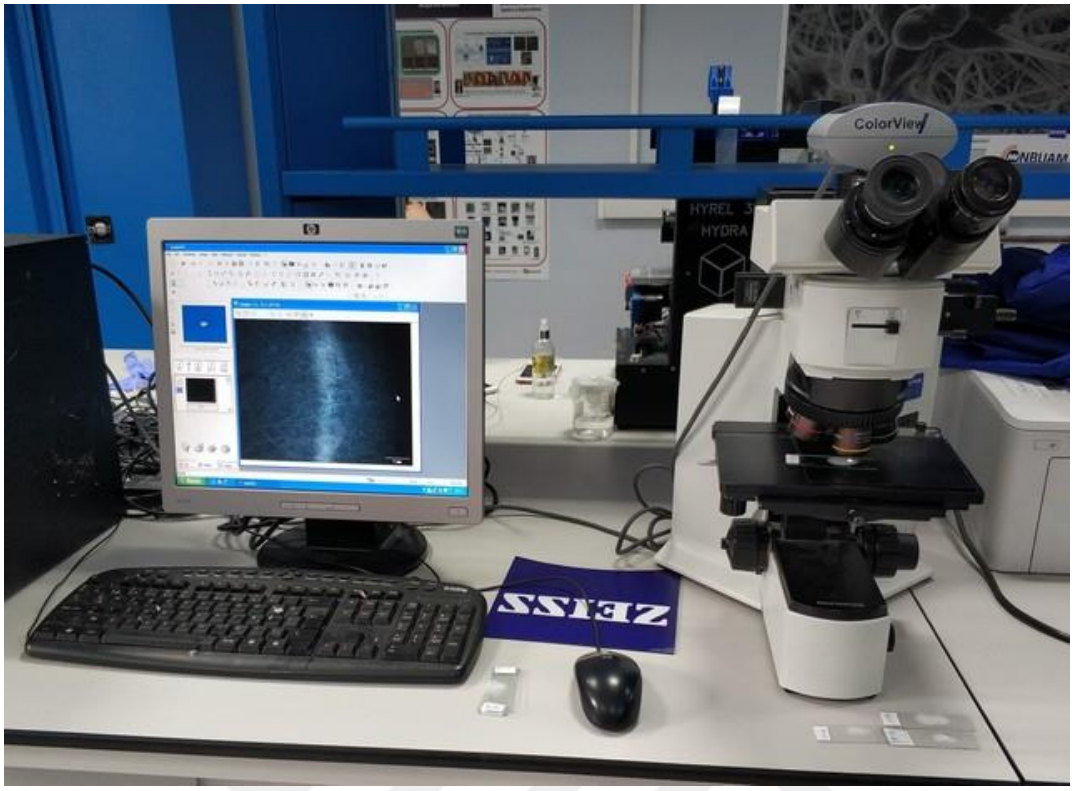


Şekil 2.9 Elektrospin uygulaması



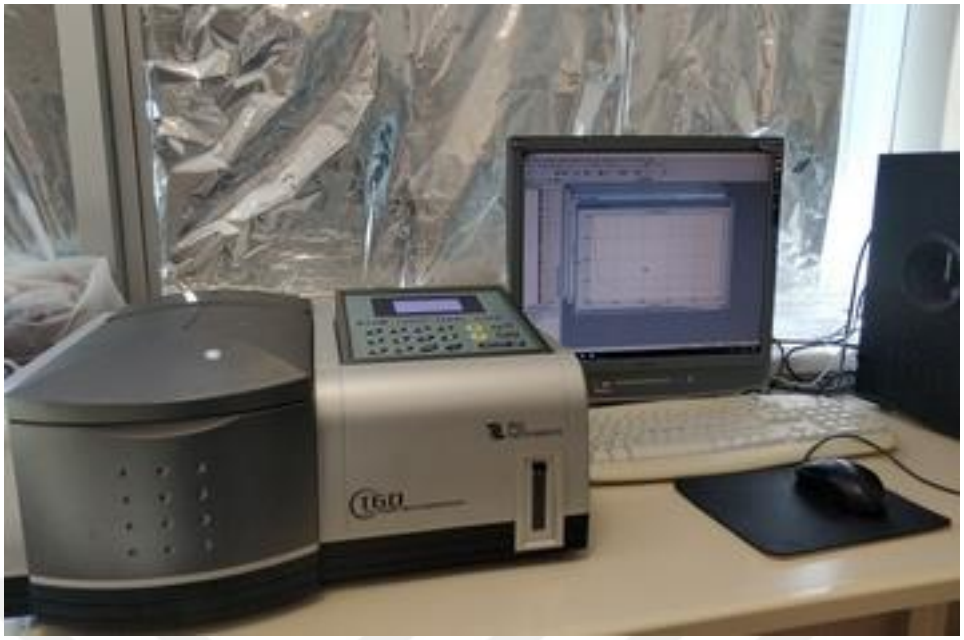
Şekil 2.10 3 Boyutlu yazıcı uygulaması

3 boyutlu yazıcılarda kullanılan parametreler iki adettir. Diğer parametreleri ön denemeler ile bulunarak sabitlenmesi ile geriye Infill Percentage ve Extruder M.p. değerleri kalmıştır. Bu değerler de deneysel olarak farklılıklarını gözlemlemek ve PV panel üzerine yapılacak kaplamalardaki değerlerin bulunması amacıyla 120 adet lam üzerine kaplama elde edilmiştir. Şekil 2.10'da lam üzerine yapılan kaplama görülmektedir. Çalışmaların ilk aşamasından sonra lam üzeri kaplamalar Olympus-Colorview optik mikroskop ile 5x-10x-20x yakınlaştırmada görüntülenmiştir. Kaplamalar elektrospin yönteminde fiber oluşumu, homojen dağılım, maddelerin dağılımı bakımından, 3 boyutlu yazıcı yöntemi ise hat oluşumu, yüzey yapışması, hatlarda kopukluk olup olmaması hattın homojenliği ve nano maddelerin kaplamadaki dağılımları bakımından incelenmiştir. Şekil 2.11'de kullanılan optik mikroskop görülmektedir.



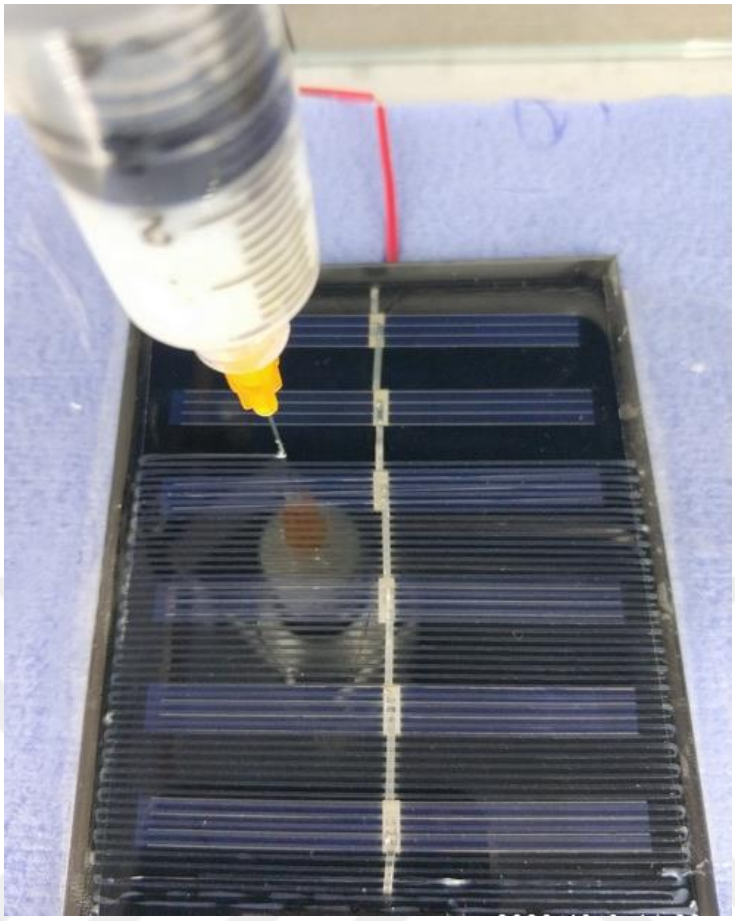
Şekil 2.11 Optik mikroskop

Optik mikroskopta incelenen lam kaplamaların yapıları sonrası Şekil 2.12'de görülen PG Instrument-T60 UV-VIS Spektrofotometre cihazı ile 300-800 nm dalgaboyu aralığında lam kaplamalarının ışık geçirgenlikleri (%T) ölçülmüştür. Aynı özelliklerde lamın kaplama yapılmamış durumda olanı baz ölçüm için ölçülmüştür.

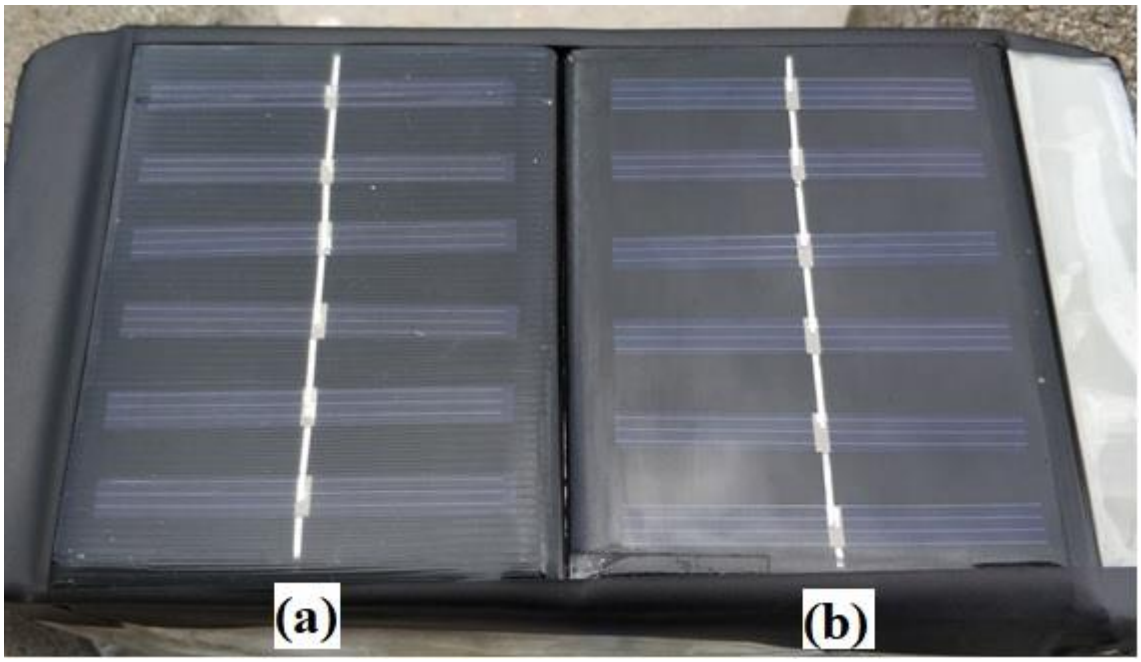


Şekil 2.12 Spektrofotometre

Optik ölçümler sonrası tez uygulamalarının 3. aşamasına geçilmiştir. En iyi sonucu veren solüsyon ve başarılı olduğu görülen 3 boyutlu yazıcı yönteminin parametreleri belirlenerek 5 adet PV panel üzerine kaplama Şekil 2.13'teki gibi yapılmıştır. Kaplamalar daha sonra aynı parametreler değiştirilmeden lam üzerine doğrulama ölçümü yapabilmek için tekrar yapılmışlardır. Elde edilen kaplamalı PV panel örneği de Şekil 2.14(a)'da görülebilir



Şekil 2.13 3 boyutlu yazıcı ile PV panel kaplaması



Şekil 2.14 (a)Kaplama yapılmış PV, (b)Kaplamasız PV

Tez çalışmalarının 3. aşaması olan 3 boyutlu yazıcı ile lam ve PV panel üzerine kaplamaların yapılmasından sonra 4. ve son aşamaya geçilmiştir. Lam üzerine kaplamaların optik sonuçlarını doğrulamak için tekrar Spektrofotometre ile %T ölçümü yapılmıştır. Lamlar daha sonra Şekil 2.15'te görülen Quorum SC7020 Sputter Coater ile SEM analizi için 15 mA akım ile 120 sn süresince argon gazı verilerek altın-paladyum kaplanmıştır. Sputter kaplama öncesi vakum yapılmıştır.



Şekil 2.15 Sputter coater

Sputter kaplama sonrasında Şekil 2.16'da yer alan Zeiss EVO MA-10 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) (SEM) ile önce vakum yapılıp sonra kaplama kalınlığı ve spektroskobik enerji dağılımı (energy dispersive x-ray spectroscopy) (EDS ya da EDX) incelemeleri yapılmıştır. EDS incelemeleri bölgesel olarak %1 üzeri hassasiyet ile çalıştığı için analizler alan değil noktasal olarak alınmıştır.



Şekil 2.16 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM görüntülemelerinden sonra lamların kullanıldığı ölçüm ve analizler tamamlanarak PV paneller üzerine kaplamaların solar simülatör ve gerçek ortamda testlerine geçilmiştir. Dış ortam elektriksel olarak testlerin yapılmasından önce Şekil 2.17'de görülen Luzchem-SolSim solar simülatör ile AM1,5, 1000 W/m^2, 25°C deney standardında I-V eğri grafikleri elde edilmiştir. Kaplamasız bir eş panel ve 5 adet kaplamalı panel test edilmiştir.



Şekil 2.17 Solar simülatör

Solar simülatör I-V eğri grafiklerinin oluşturulması ile laboratuvar ortamın yapılan çalışma, ölçüm ve analizler bitirilerek dış ortam testlerine geçilmiştir. Dış ortam testleri için 1 adet kaplamalı ile 1 adet kaplama olmayan eş PV panel aynı tarihli kalibrasyon belgesi bulunan 2 adet UNI-T UT803 model masa tipi multimetre ile 30 saniye aralıklarla 10 gün süresince ölçülerek her 10 günlük ölçüm için 28.800 veri alınmıştır. 10 günlük periyotlar halinde kaplamasız olan panel temizlenip yeni bir kaplamalı panel koyularak ölçümlere devam edilmiştir. Yer konumu olarak 37.04N-35.30E koordinatlarında dış ortamda elektriksel ölçüm için Şekil 2.18'de bulunan dış ortam deneysel düzeneği hazırlanmıştır. Ölçüm için, deney devresinde PV panellerin Voc ve Isc değerlerinden hesaplanan maksimum güç çekilebilmesi için Rth değeri deneysel olarak ölçülerek 53 ohm olarak hesaplanmıştır. R direnci üzerine düşen gerilim (Vr) değerinden $P=Vr^2/R$ formülü ile yük gücü (Pr) hesaplanmıştır. Her iki panele de seri ve aynı cins 53 ohm direnç bağlanmıştır. Paneller güney yönlü (Azimuth 180◦), yer düzlemine paralel olarak eğim olmadan (Tilt 0◦) ve gün doğumundan gün batımına kadar hiç gölgelenmeyecek pozisyonda izolasyonları sağlanarak yerleştirilmişlerdir.

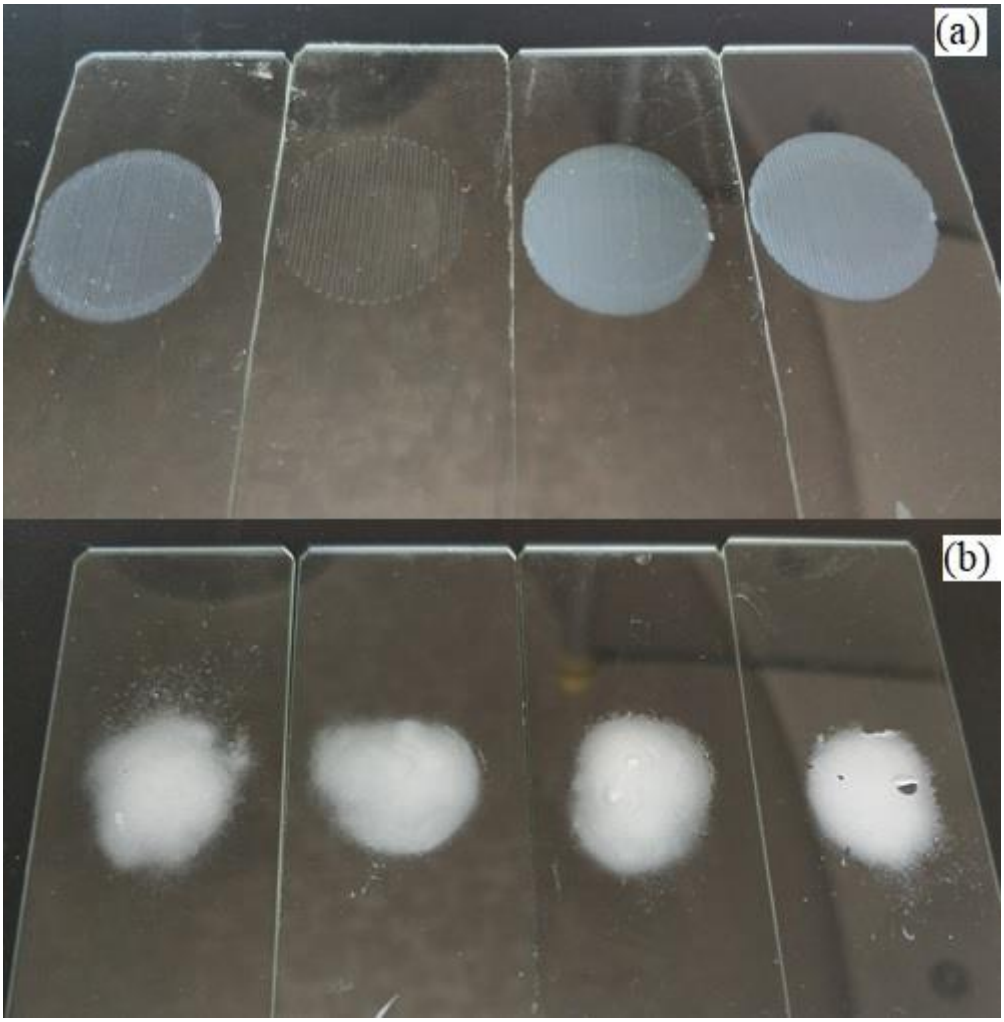


Şekil 2.18 Elektriksel test düzeneği

BÖLÜM – III

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

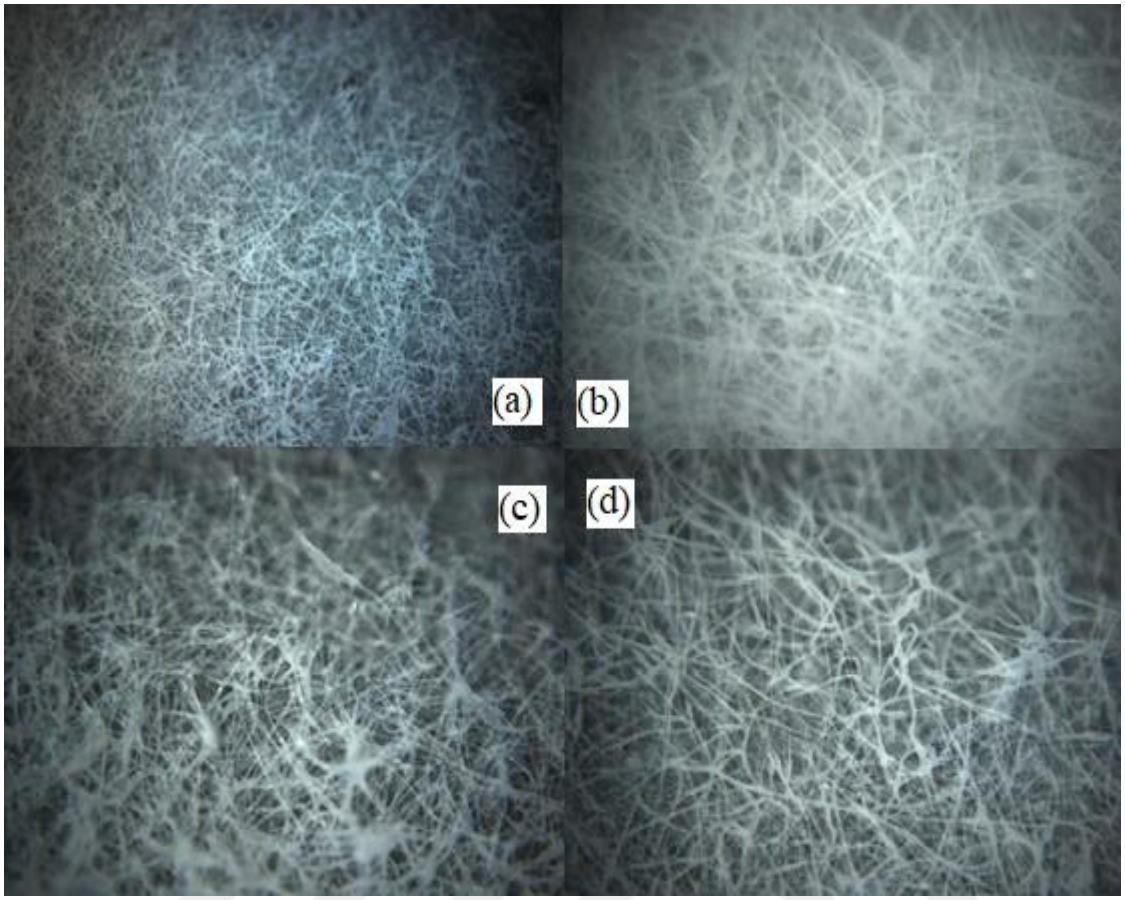
Solüsyonların ilk hazırlanması ile PMMA ve PLA polimerlerinin ve nano maddelerin viskozite üzerine etkisi görülmüştür. Uygun karışım oranının 1,6 gr ve 2 gr olması ve karışım oranlarının ise 0,05 gr ve 0,025 gr olması gerektiği uygulamalı olarak bulunmuştur. Karışım süreleri için polimer ve çözücünün 2-2,5 saat aralığında manyetik karıştırıcıda karıştırılarak homojen hale geldiği deneysel olarak tespit edilmiştir. Nano maddelerin jel haldeki polimere eklenerek 2,5-4 saat aralığında aynı koşullarda karıştırılmasının uygun sürelerde olduğu bulunmuş ve bu sürelerde homojen sol-gel elde edilmiştir. Çözücü olarak kullanılan kloroform'un($CHCl_3$) PLA ve PMMA polimerlerini çözmede başarılı olduğu görülerek etanol veya asetik asit'in kullanılmasına gerek olmadığına karar verilerek çözücü olarak kloroform ile devam edilmiştir. Tek tek hazırlanan sol-geller sırası ile elektrospin ve 3 boyutlu yazıcı üzerine lam kaplaması yapılmıştır. Şekil 3.1(a)'da 3 boyutlu yazıcı ile ve Şekil 3.2(b)'de elektrospin ile kaplama yapılmış lam örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.1 (a) 3 boyutlu yazıcı (b) elektrospin lam üzerine yapılan kaplama örnekleri

3.1. Elektrospin Yöntemi Optik Sonuçlar

Kaplamaların optik analizleri optik mikroskop ve spektrofotometreden oluşmaktadır. Optik mikroskopta 5x-10x ve 20x yakınlaştırma ile kaplamalar incelenmiştir. Şekil 3.2'de elektrospin yönteminin kullanıldığı kaplama örneklerinin 20x yakınlaştırılarak alınan görüntülemeleri verilmiştir.



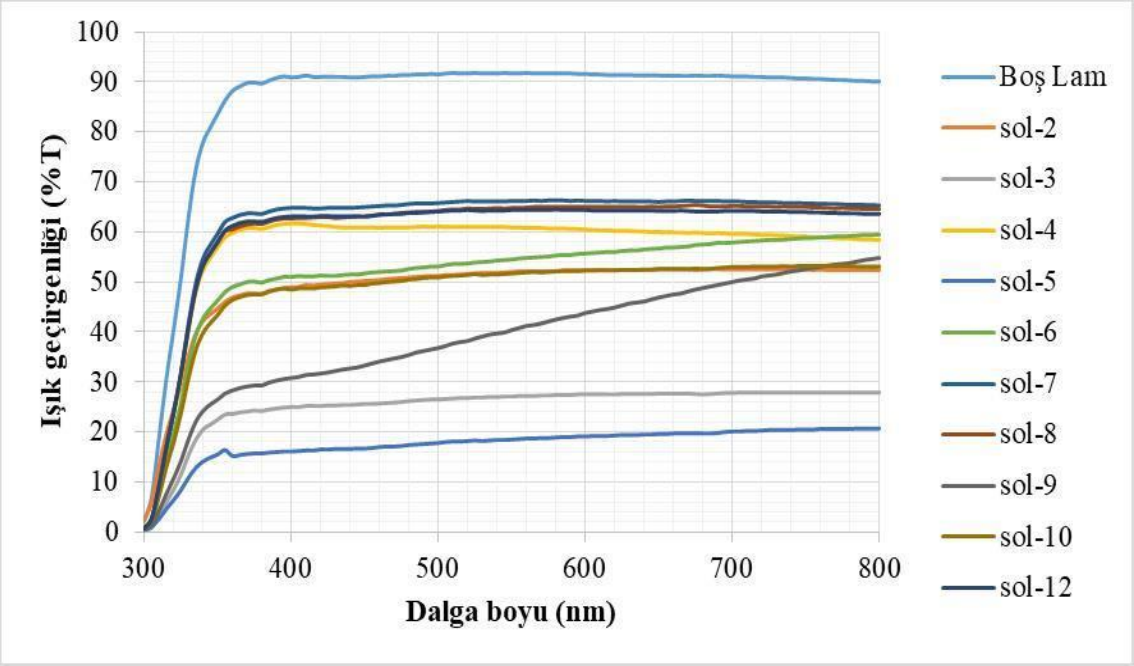
Şekil 3.2 Elektrospin lam kaplamaları

Şekil 3.2'deki kaplamalar 1,6 gr PLA, 0,025 SiO_2 ve 0,025 TiO_2 içeren sol-8 kullanılarak hazırlanmıştır. Şekilde 3.2(a)da görülen kaplama 0,2 ml/saat akış hızında, 24 kV gerilim kademesinde ve 1 dk süre uygulanarak hazırlanmıştır. Şekil 3.2(b)'de ise 0,3 ml/saat akış hızında, 20 kV gerilim kademesinde ve 3 dk uygulama süresine sahip kaplama görülmektedir. Şekil 3.2(c) ise 0,1 ml/saat akış hızında, 20 kV gerilimde ve 1 dakika uygulama süresinde hazırlanmıştır. Şekil 3.2(d)'de ise 0,2 ml akış hızı, 20 kV gerilim ve 1 dakika uygulama süresi ile hazırlanmıştır.

Elektrospin yönteminde uygulama süresinin artması Şekil 3.2(b)'deki gibi yoğun bir görüntü oluşumuna sebep olmuştur. Akış hızının artırılması da uygulama süresi gibi olumsuz etki yapmaktadır. 0,1 ml/saat ve 0,2 ml/saat değerleri akışın kontrol edilmesi ve yoğun polimer oluşmasını engellemektedir. Gerilim ayarı ise Şekil 3.2(b), (c) ve (d)'de 20 kV olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.2(c)'de 0,1 ml/saat ve 20 kV dengeli ve fiber oluşumu ideal gözlenmiştir. Şekil 3.2(a)'da ise 0,2 ml/saat akış hızı ve 24 kV gerilim ile daha hızlı

akış sağlarken 24 kV gerilim ise daha hızlı çekim yapılmasını sağlamış ve daha yoğun fiber oluşturmuştur. Akış hızı ve uygulama süresinin artırılması 24 kV gerilim kademesinde çekim ucunun tıkanmasına veya sorunlu bir kaplama ile sonuçlanmasına neden olmuştur.

Lam üzerindeki kaplamaların optik mikroskop ile görüntülenmesinden sonra Spektrofotometre ile %T ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.3'te her solüsyonun yer aldığı en yüksek ışık geçirgenliği sonuçları verilmiştir.

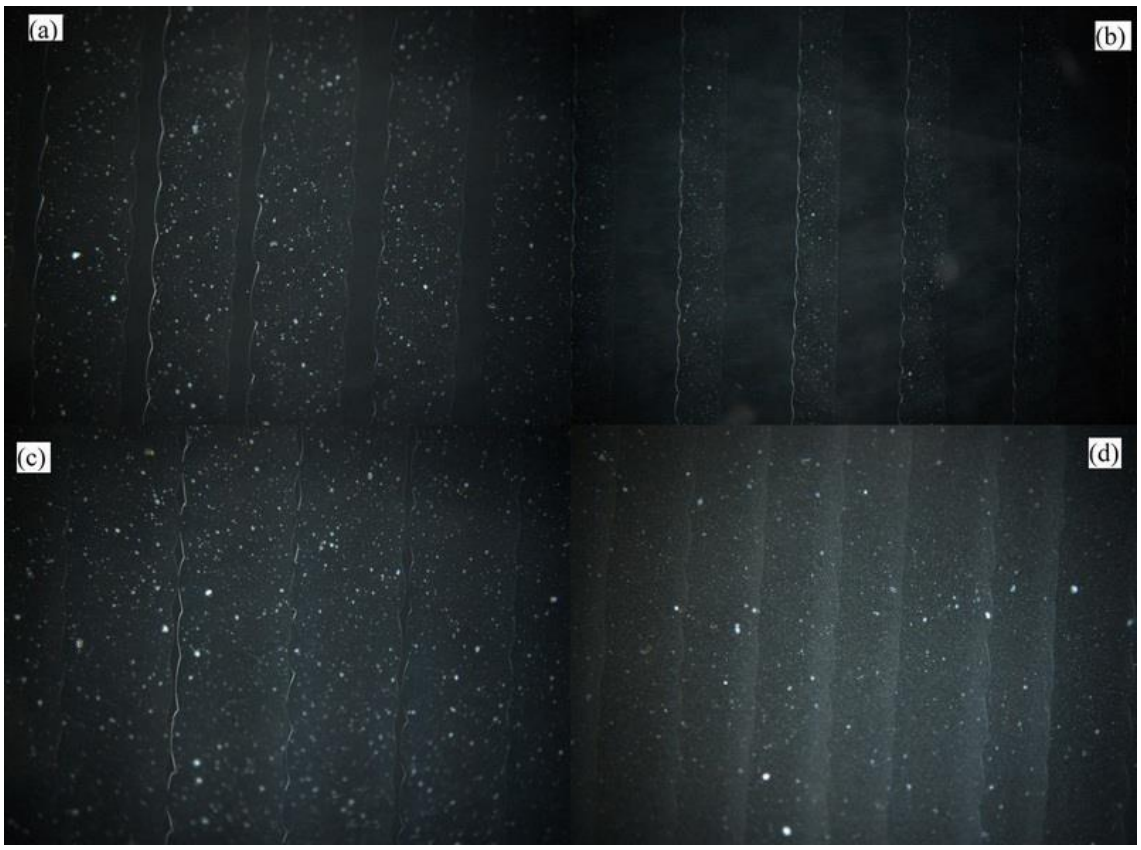


Şekil 3.3 Elektrospin %T ölçümü

Elektrospin ile elde edilen kaplamalarda sol-5 kullanılanlarda %18,5, sol-3 kullanılan kaplamalarda ise %27,1 ile en düşük ışık geçirgenlikleri elde edilmiştir. Kaplamalarda en yüksek ışık geçirgenlikleri sol-7, sol-8 ve sol-12'de sırasıyla %66,2, %64,8 ve %64,4 olduğu ölçülmüştür. Bu değerler ile boş ve kaplamasız bir lamın %91,7 ışık geçirgenliği değerlerinin çok altında kalmıştır. Fiziksel incelemede ise kaplamaların yüzeye homojen bir dağılım göstermediği ve yüzey tutunumlarının düşük olduğu görülmüştür. Fiziksel yapı incelemesinin ve optik ölçümlerin sonucunda elektrospin yöntemi, çalışmaların bir sonraki aşamasında kullanılmamıştır.

3.2. 3 Boyutlu Yazıcı Yöntemi Optik Sonuçlar

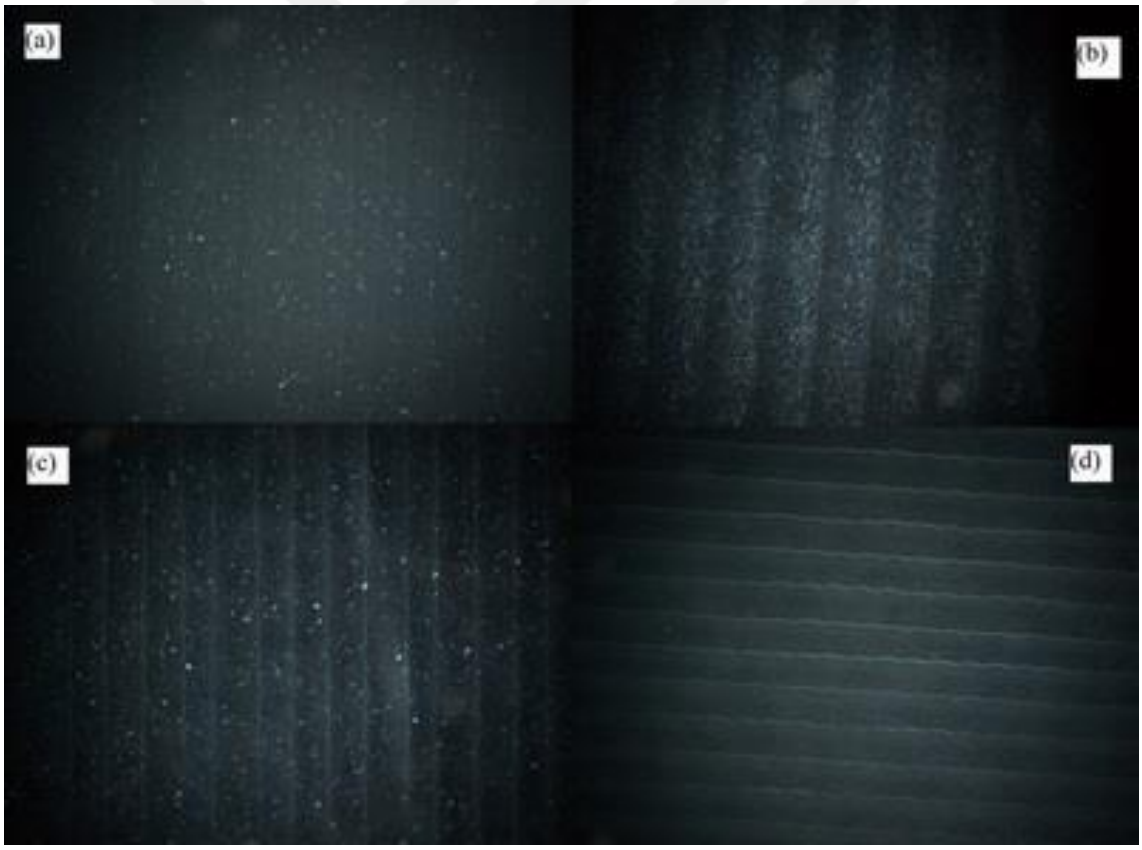
Solüsyon parametreleri optimize edilerek kaplamalar için hazır hale getirildikten sonra, elektrospin ve 3 boyutlu yazıcı için kullanılmışlardır. 3 boyutlu yazıcı parametreleri değiştirilerek elektrospin yöntemine göre daha kolay ve başarılı kaplamalar yapılabilmiştir. 3 boyutlu yazıcı parametrelerinden Extruder multiplier ve Infill percentage değerleri değiştirilerek kaplamalarda farklı örneklemeler elde edilmiştir. Şekil 3.4'te 3 boyutlu yazıcı ile elde edilen kaplama örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.4 3 boyutlu yazıcı lam kaplamaları

Şekil 3.4'teki örneklerden Şekil 3.4(a)'da sol-7 ile hazırlanmış ve Infill percentage %35 ve Extruder m.p. 10 olarak uygulanmıştır. Şekil 3.4(b) ise aynı sol-7'de Infill percentage %25 ve Extruder m.p. 10 olarak uygulanmıştır. Şekil 3.4(c) sol-7 kullanılarak Infill percentage %50 ve Extruder m.p. 7 olarak uygulanmıştır. Şekil 3.4(d) ise sol-8 kullanılarak Infill percentage %75 ve Extruder m.p. 7 olarak uygulanmıştır. Tüm kaplamalar 10x yakınlaştırma ile görüntülenmiştir. Infill percentage oranının değişiminin çizgiler arası boşluklara etkisi görülmektedir. Infill percentage %35'ten küçük iken hatlar

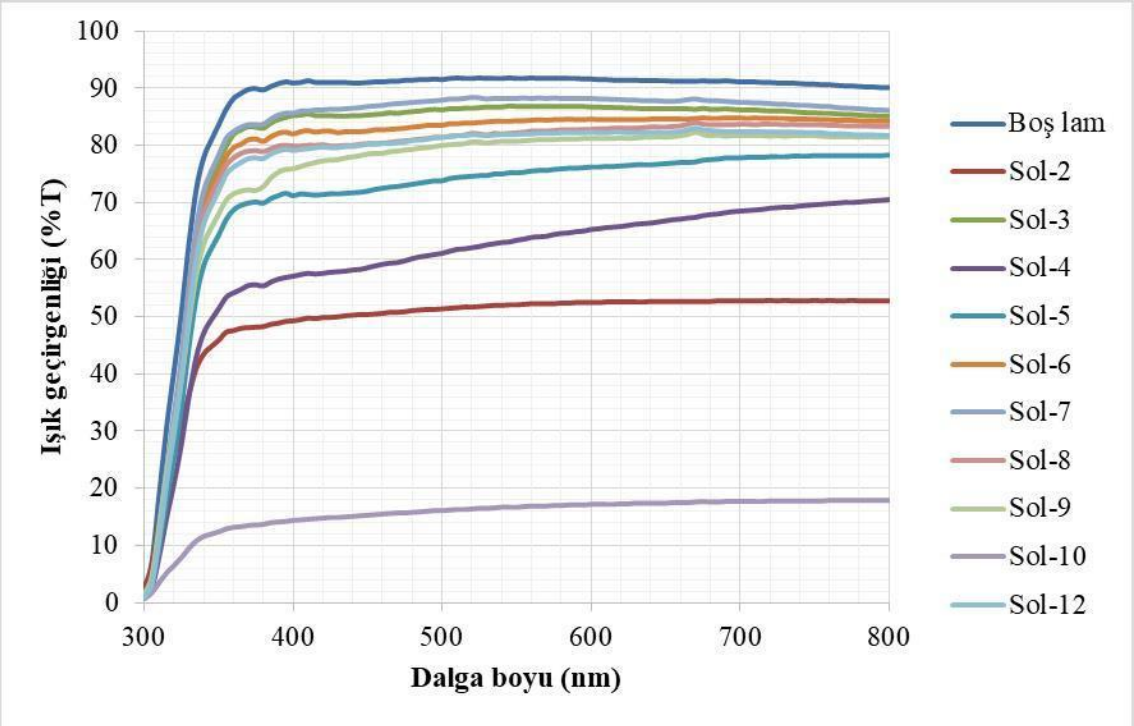
arası mesafe oluşmakta %50'den fazla iken hatlar üst üste binmektedir. Infill percentage oranının bu sebeple 35-50 arasında uygulanmasının hatlar arasındaki boşluğu azalttığı ve homojen bir kaplama elde edilebildiği görülmüştür. Akış hızı ile doldurma oranı arasındaki dengeyi kurarak homojen kaplamaların yapılması için Extruder m.p. değerinin 7-10 aralığında olmasının da yeterli bir akış hızı sağladığı tespit edilmiştir. 10 değerinden fazla akış hızı olması durumunda hatlarda aşırı sol-gel birikmesi olmaktadır. Bu sebeple doldurma oranının azaltılması ya da baskı hızının artırılması gerekmektedir. Baskı hızı sabit tutulduğundan kaplamaların yapılmasında viskoziteye bağlı olarak Extruder m.p. değeri belirlenmiştir. Extruder m.p. değerinin 7'den küçük olması durumunda ise hatlar arası kopukluk oluşmaktadır. Bunu önlemek için baskı hızının düşürülmesi gereklidir. Yazıcı parametreleri optimize edilerek Şekil 3.5'te elde edilen ideal homojen kaplamalar görülebilir.



Şekil 3.5 3 boyutlu yazıcı ile elde edilen homojen kaplamalar

Hazırlanan tüm sol-gel'lerin kullanılarak lam üzerine kaplamaların elde edilmesi ile ışık geçirgenlikleri spektrofotometre cihazı ile ölçülmüş ve tüm sonuçlar Şekil 3.6'da

verilmiştir.



Şekil 3.6 3 boyutlu yazıcı %T ölçümü

3 boyutlu yazıcı ile elde edilen kaplamalarda sol-2 kullanılanlarda %52,1, sol-4 kullanılan kaplamalarda ise %64,3 ve sol-10 kullanılarak hazırlanan kaplamalarda ise %16,7 değerleri ile en düşük ışık geçirgenlikleri elde edilmiştir. Diğer solüsyonlar ile yapılan kaplamalardaki ışık geçirgenlikleri ise sol-3'te %86,8, sol-6'da %84,3, sol-7'de %88,2, sol-8'de %82,2, sol-9'da %80,7 ve sol-12'de %81,9 olarak ölçülmüştür. Boş ve kaplamasız bir lamın %91,7 ışık geçirgenliği değerine yakın değerler alınmıştır. Fiziksel incelemede ise kaplamaların yüzeye homojen bir dağılım gösterdiği (Şekil 3.5) ve yüzey tutunumu açısından başarılı olduğu görülmüştür. SiO_2 ve TiO_2 kullanılan solüsyon değerlerine bakıldığında PMMA polimerinin olduğu sol-10 %16,7 ışık geçirgenliği elde edilmişken aynı oranlarda PLA polimeri kullanılan sol-8'de %82,2 ışık geçirgenliğine ulaşılmıştır. PLA polimeri ile SiO_2 ve TiO_2 nano maddelerinin kullanıldığı sol-6 ve sol-12'de ise sırasıyla %84,3 ve %81,9 ışık geçirgenlikleri elde edilmiştir. Kaplamasız bir lamın %91,7 ışık geçirgenliğine yakın değerlerde olan sol-6, sol-8 ve sol-12 sol-gel karışımları çalışmaların bir sonraki aşaması olan PV paneller üzerine kaplamalar için nihai sol-geller olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

Lam üzerine yapılan kaplamaların ışık geçirgenliği sonuçları alındıktan sonra sol-6, sol-8 ve sol-12 ile yeniden hazırlanan solüsyonlar lam ve PV panel üzerine kaplama işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler sonucunda Şekil 2.5'teki işlem basamağında gösterildiği gibi solüsyonlar yeniden isimlendirilerek tekrar hazırlanmıştır. Bu aşamada;

- sol-6 sol-A,
- sol-8 sol-C,
- sol-12 sol-B

olarak isimlendirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile en iyi optik sonuçların alındığı bu 3 solüsyon tekrar lam üzerine ve 5 adet PV panel üzerine baskı yapılmıştır. Elde edilen 5 adet lam ve PV panelinin 3 boyutlu yazıcı parametreleri ve isimlendirilmeleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

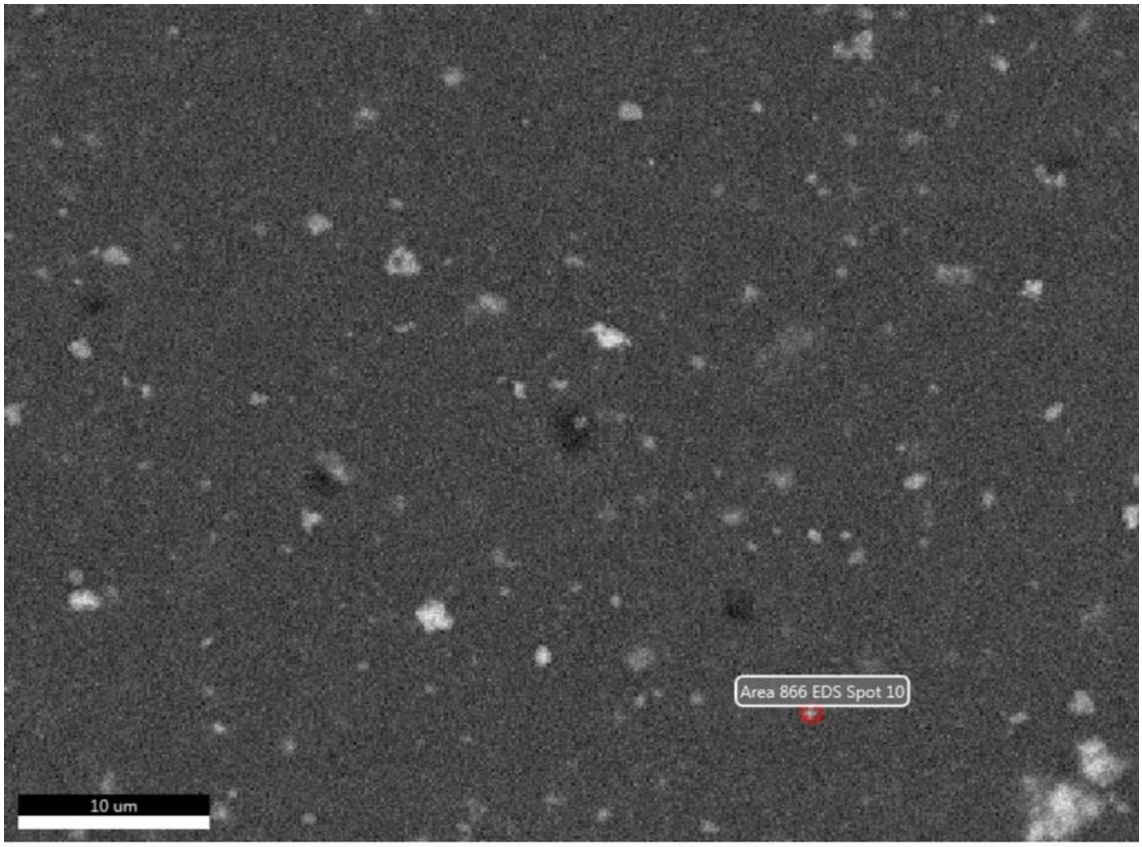
Tablo 3.1 Yeniden hazırlanan solüsyon isimlendirmeleri ve 3 boyutlu yazıcı parametreleri

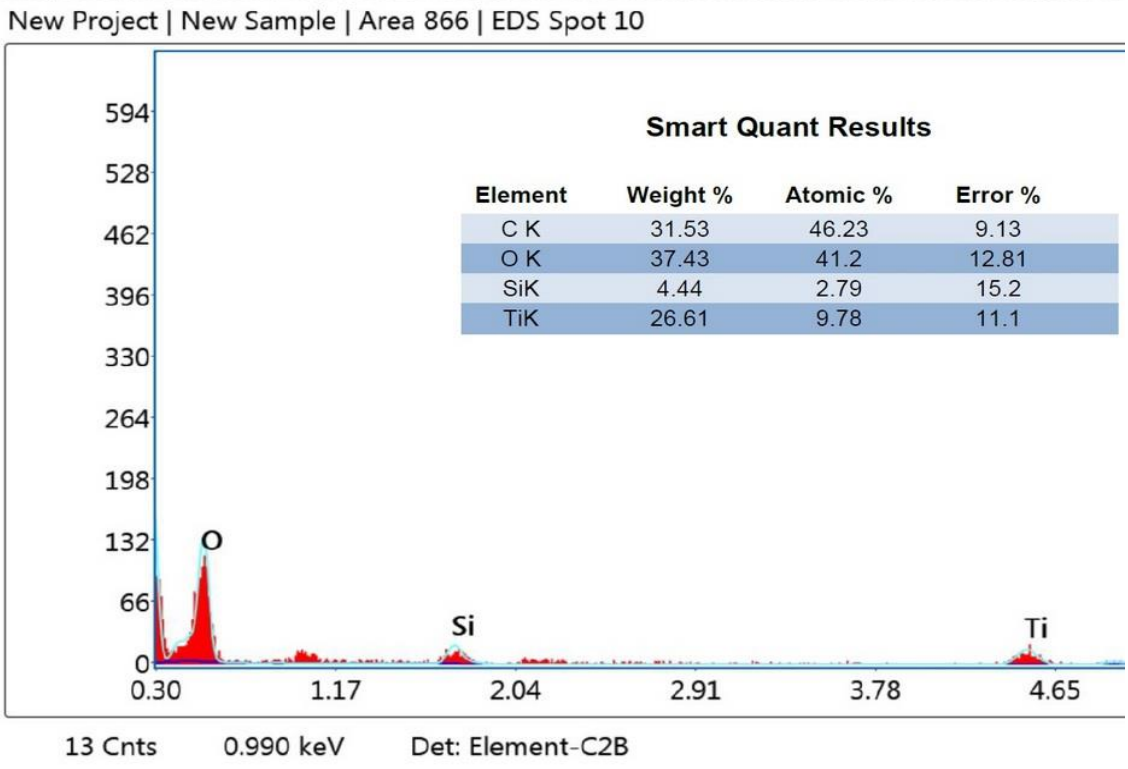
Solüsyon eski isim	Solüsyon yeni isim	Lam ve PV	Infill Percentage (%)
Sol-6	Sol-A	1	%35
Sol-6	Sol-A	2	%20
Sol-12	Sol-B	3	%40
Sol-8	Sol-C	4	%50
Sol-8	Sol-C	5	%35

Kaplaması yapılarak elde edilen nihai PV panellerin aynı parametreleri ile kullanılarak lam üzerine yapılan kaplamaların ışık geçirgenlikleri UV-VIS Spektrofotometre cihazında ölçülmüştür. Analiz sonucuna göre sol-A %84,8, sol-B %83 ve sol-C ile yapılan kaplamalar %84 ışık geçirgenliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu değerlerin ilk yapılan kaplamalar ile hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

Lamların EDS(EDX) analizi ve kaplama kalınlıklarının ölçümü için öncelikle sputter kaplama yapılıp daha sonra SEM cihazına koyulmuş ve vakumlanarak görüntülenmiştir.

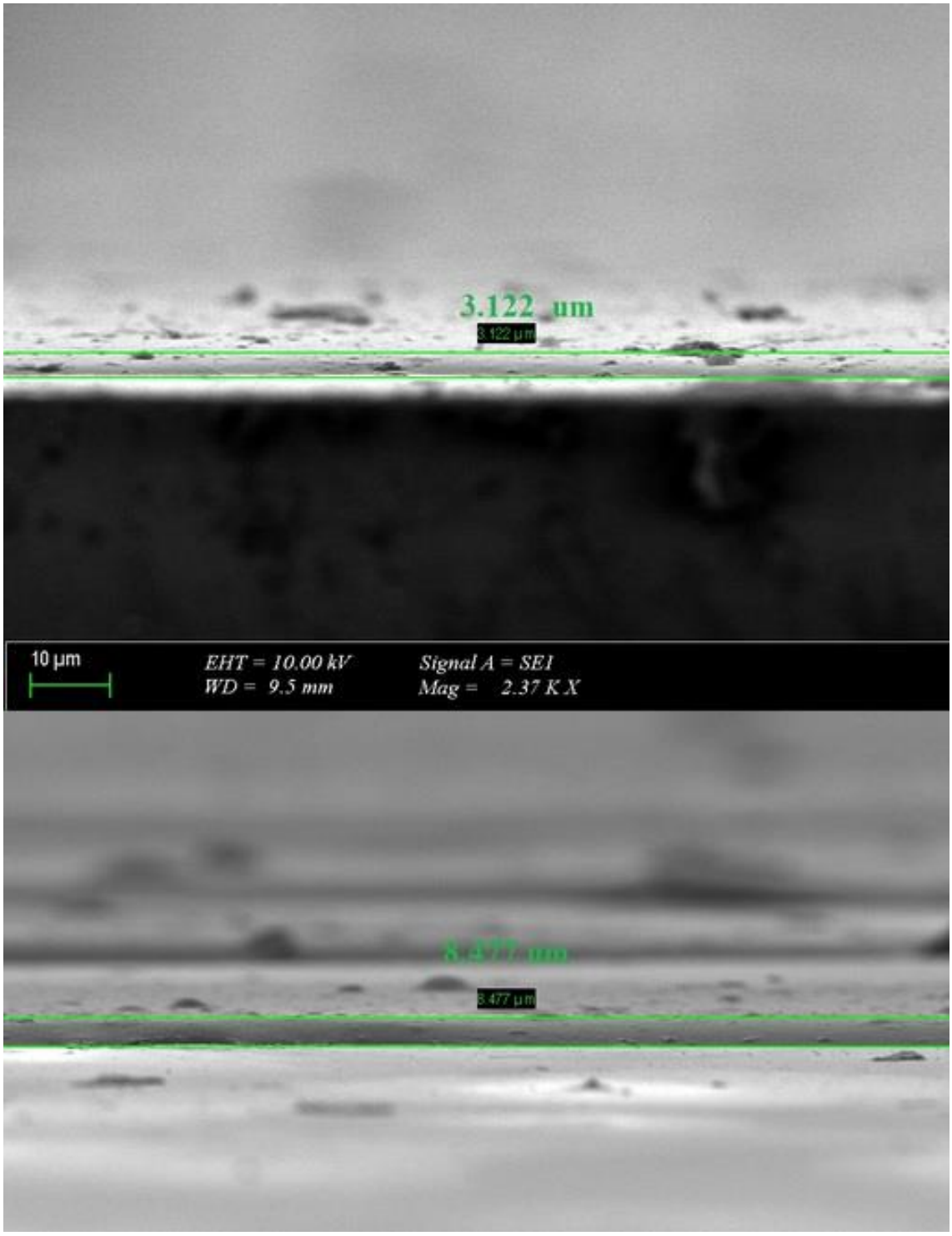
Şekil 3.7’de SEM altında yapılan örnek bir EDS analizi görülmektedir.





Şekil 3.7 EDS analizi

SEM incelemesine göre silisyum ve titanyum nano partiküllerinin kaplama yüzeyine homojen yayıldığı görülmüştür. Görüntülemelerde koyu renkli nano partikülerin silisyum nano partikülleri olduğu ve daha parlak beyaz görünümlü parçacıkların ise titanyum nano partikülleri olduğu analiz edilmiştir. EDS analizine göre yüzeyde silisyum ve titanyum nano partikülleri ile PLA polimeri içeriğinden başka materyal veya partikül olmadığı gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlıkları incelenmesi açısından örneklere bakılarak Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Kaplama kalınlıkları analizi

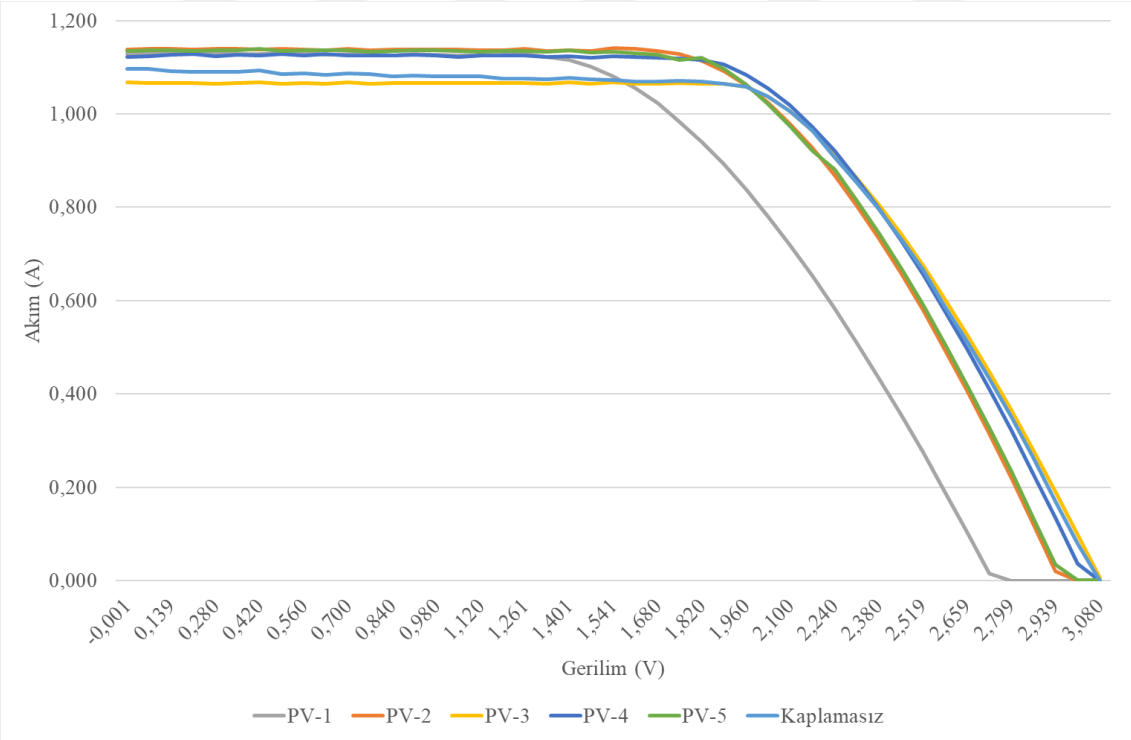
Kaplamalar incelendiğinde Şekil 3.8'de verildiği üzere 3,122 µm ile 8,477 µm kalınlıkları arasında kaplama kalınlıkları elde edildiği görülmüştür. Kaplamalar, 3 boyutlu yazıcı ile en düşük kalınlık ayarı olan 50 µm'de yapılmış olup 25°C ortam sıcaklığında solüsyonun

ağırlıkça yaklaşık %92'sini oluşturan içeriğindeki kloroformun buharlaşması ile yüzeyde PLA ve SiO_2 ve TiO_2 nano partiküllerinin oluşturduğu kaplamadır. Kaplama kalınlığı buharlaşma ile 50 µm'den 3 µm kalınlığa kadar incelerek nano boyutta kalınlığa yaklaşmıştır. Daha ince baskı özelliği olan 3 boyutlu yazıcı ile buharlaşma etkisi ile nanometre kalınlıklarında olan daha fazla ışık geçirgenliğine sahip kaplama elde edilebilecektir.

3.3. Elektriksel Sonuçlar

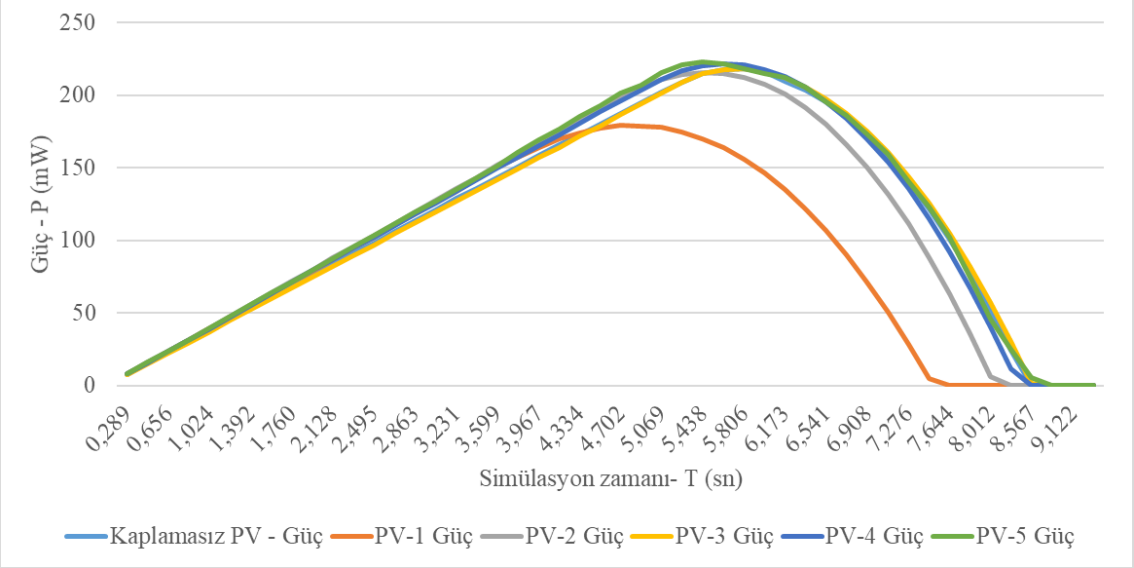
3.3.1. Solar simülatör sonuçları

Sol-A, Sol-B ve Sol-C ile kaplama yapılan lam ve PV panellerden lamlar üzerindeki optik analizler tamamlandıktan sonra PV panellerin solar simülatör ve dış ortam testlerine geçilmiştir. Dış ortam testi öncesinde Şekil 2.17'de görülen solar simülatörde simülatör deney şartları sağlanarak 5 adet kaplamalı PV panel ve 1 adet kaplamasız eş PV panel test edilmiştir. Simülatör analizi sonrası elde edilen Akım-Gerilim(I-V) eğrileri Şekil 3.9'da ve PV panellerin güç eğrileri-zaman(P-T) Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Simülatör I-V eğrileri

Şekil 3.9'da görülen 6 PV panele Solar simülatörde, simülasyon süresi içerisinde kaynaktan gönderilen ışınım şiddetine(W/m^2) bağlı olarak PV panellerin uçları arasında oluşan gerilim ve çekilen akım miktarları ölçülmüştür. Solar simülatörde alınan sonuçlara göre PV panellerin maksimum uç gerilimi 3,1 V olurken maksimum akım çıkışı 1,068 V – 1,142 V aralığında olduğu görülmüştür. Bu eğrilerden Şekil 3.10'da görülen simülasyon zamanına bağlı olarak güç eğrileri türetilmiştir. Oluşturulan güç eğrilerine göre Şekil 3.9'daki eğrilerde maksimum güç noktaları da bulunmuştur.



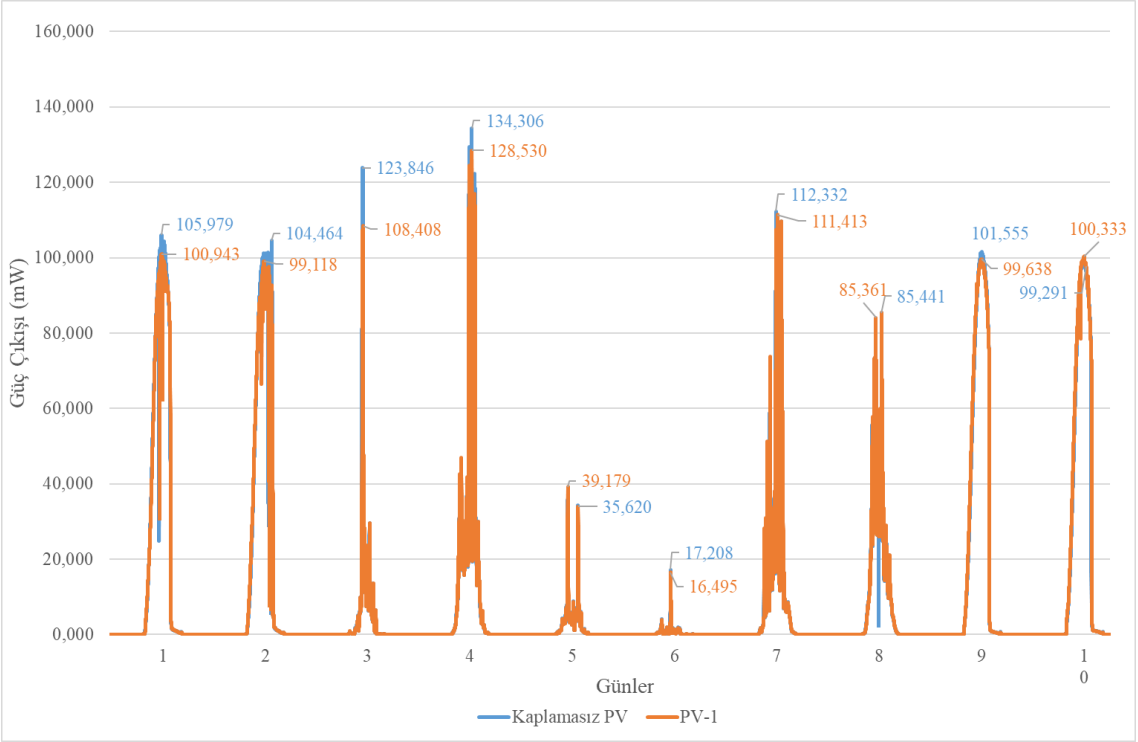
Şekil 3.10 Simülatör güç-zaman eğrileri

Şekil 3.10'da PV panellerin maksimum güç çıkışları gösterilmiştir. Solar simülatör testlerine göre oluşturulan bu güç eğrilerine göre kaplamasız PV panel en fazla 218 mW çıkış gücüne sahip olduğu görülmüştür. Kaplamalı panellerde ise PV-1 178 mW, PV-2 215 mW, PV-3 218 mW, PV-4 221 mW ve PV-5 223 mW maksimum güç çıkışları olduğu simüle edilmiştir. Solar simülatör testlerine göre PV-1 kodlu panelin I-V eğrilerine göre daha az uç gerilimi üretmesi sebebiyle akım çıkışı daha dar aralıkta kalmakta olduğundan maksimum çıkış gücü de diğer panellerin gerisinde kalmıştır. PV-4 ve PV-5 panellerinin simülatör sonucunda göre test süresi içerisinde daha fazla güç çıkışı olabileceği görülmüştür. Solar simülatör testleri AM1,5 standardında ve 25°C test ortamı sıcaklığında yapılmış olup bu testlerin gerçek zamanlı karşılaştırılması için PV paneller dış ortam testlerine tabi tutulmuştur.

3.3.2. Dış ortam testleri

Tez çalışmasının son aşaması olan PV panellerin dış ortamda gerçek zamanlı olarak test edilmesi ve kaplamasız olan ile karşılaştırılması aşamasına geçilmiştir. Bu çalışma için Bölüm 2.4'te ve Şekil 2.18'de belirtildiği gibi deney düzeneği kurulmuştur. Test sırasında PV paneller gölgelenmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Paneller maksimum gücü karşılayabilmesi için hesaplanarak bulunan 53 ohm direnç yüklenmişlerdir. Kurulan elektrik devresinde yük üzerine düşen gerilim (Vr) ölçülmüştür. Vr gerilimi değeri $P=Vr^2/R$ formülü ile tüketilen yani panelin ürettiği anlık maksimum güç çıkış değerine mW cinsinden olarak dönüştürülmüştür. Kaplamasız PV panel ve kaplamalı paneller sırasıyla test tek test edilmişlerdir. PV panellerden her 30 saniyede bir alınan anlık güç değerleri Şekil 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 ve 3.15'te verilmiştir.

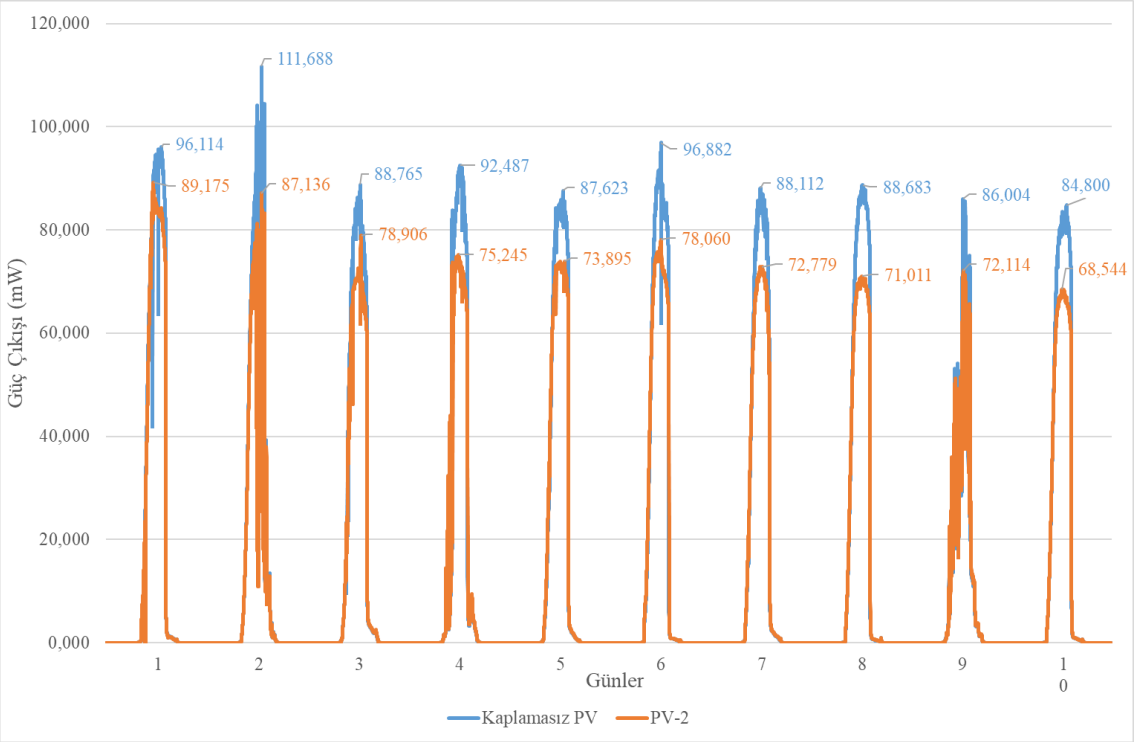
Sol-A ile hazırlanan PV-1 ve kaplamasız eş panele ait 10 günlük güç çıkışı Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 PV-1 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları

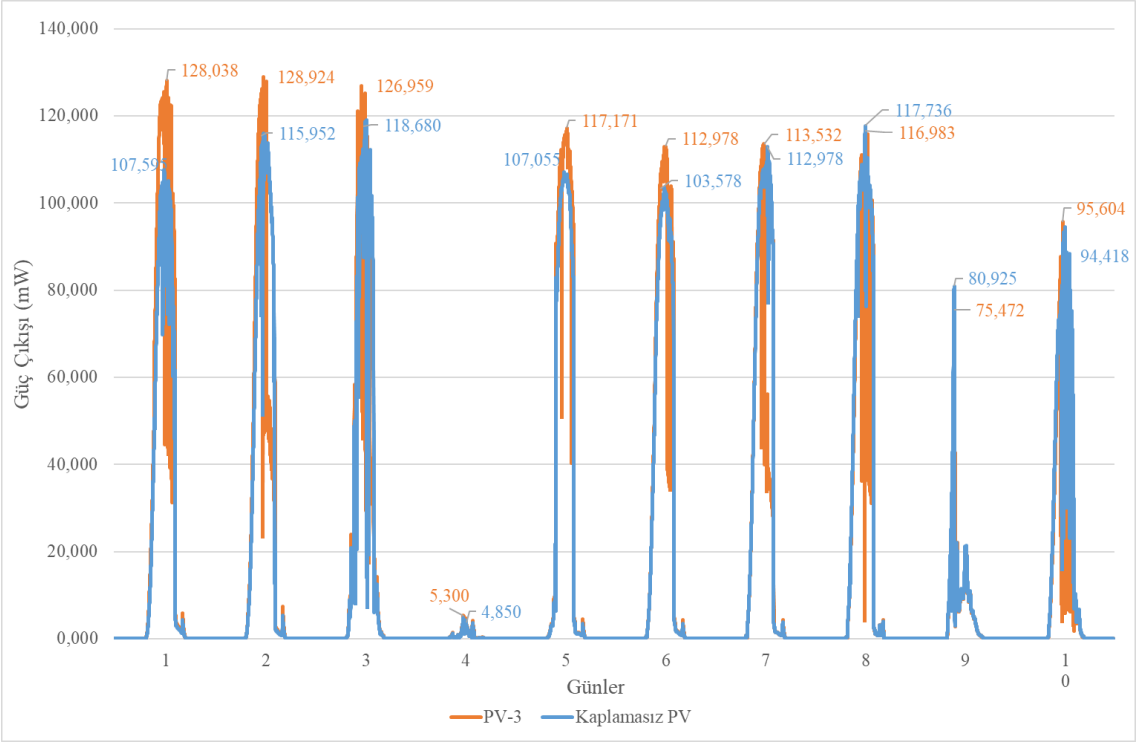
Şekil 3.11'de 10 günlük ölçüm süresi içerisinde sadece 5., 8. ve 10 günlerde PV-1 paneli kaplamasız olana göre daha fazla anlık maksimum güç çıkışı göstermiştir. Günlük olarak

maksimum güç çıkışları arasındaki en fazla fark 3. günde kaplamasız PV panelde 123,846 mW iken kaplamalı PV-1 panelinin 108,408 mW olmuştur. Maksimum güç çıkışları arasındaki en az fark ise 8. günde 0,08 mW ile gerçekleşmiştir. Özellikle 3., 4., 7. ve 8. günlerde dengesiz güç üretimi olduğu görülmekte ve ani güç çıkışı yükselmeleri çok sıklıktadır.

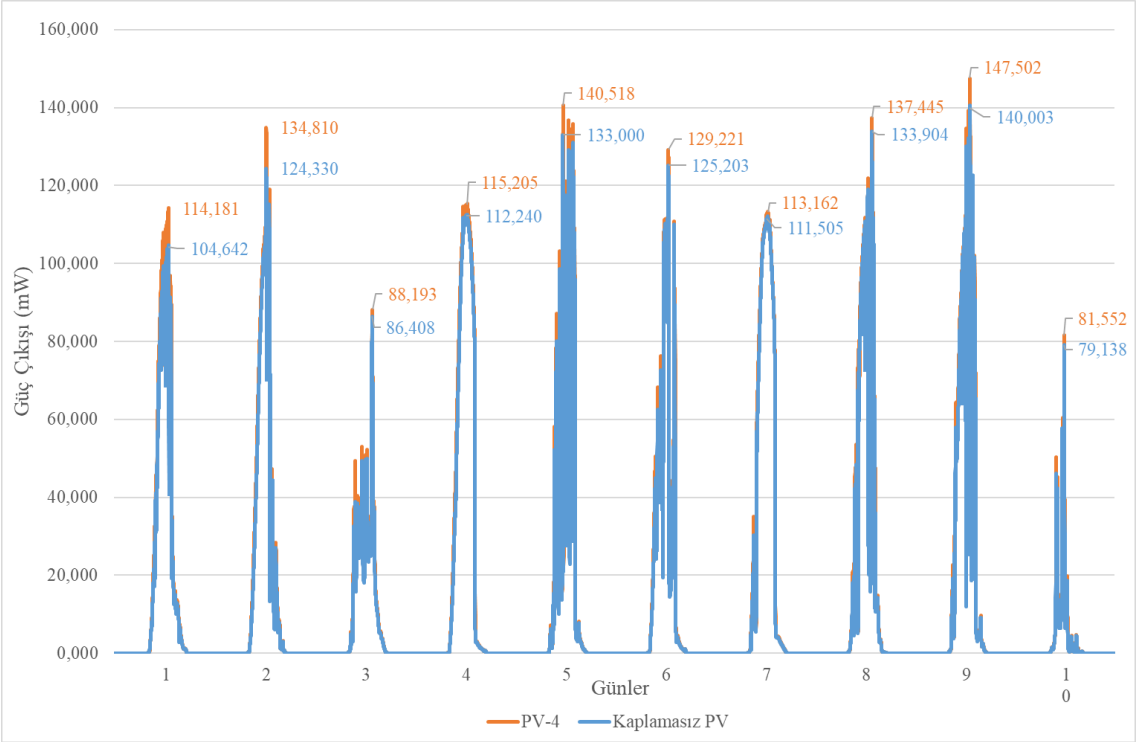


Şekil 3.12 PV-2 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları

Solüsyon-A (sol-6) ile kaplaması yapılan PV-2 ise ölçümün yapıldığı 10 günlük sürenin tamamında kaplamasız PV panelin anlık maksimum güç üretiminden geride kalmıştır. PV-1 paneline göre daha dengeli güç çıkışı görülen PV-2 de sadece 2. ve 9. Günlerde ani güç çıkışları ve dalgalanmaları gözlenmiştir. Şekil 3.13'te sol-B(sol-12) ile hazırlanan PV-3 güç çıkışları görülmektedir. PV-3 güç içerisindeki maksimum güç çıkışı değerlerinde kaplamasız PV panelden daha iyi görünse de güç çıkışları çok değişken olmuştur. 5., 6., 7. ve 8. günlerde kaplamasız PV panel dengeli ve ideal güç çıkışı vermiştir. 1., 2., 3., 9., ve 10. günlerde kaplamasız PV panel ve PV-3 anlık güç çıkışları düzensizdir ve değişkenlik göstermiştir. 7. ve 8. günlerde ise kaplamasız PV panel dengeli güç çıkışı verirken PV-3 güç çıkışında ani çıkış ve azalışların olduğu dengesiz bir güç çıkışı oluşturmuştur.



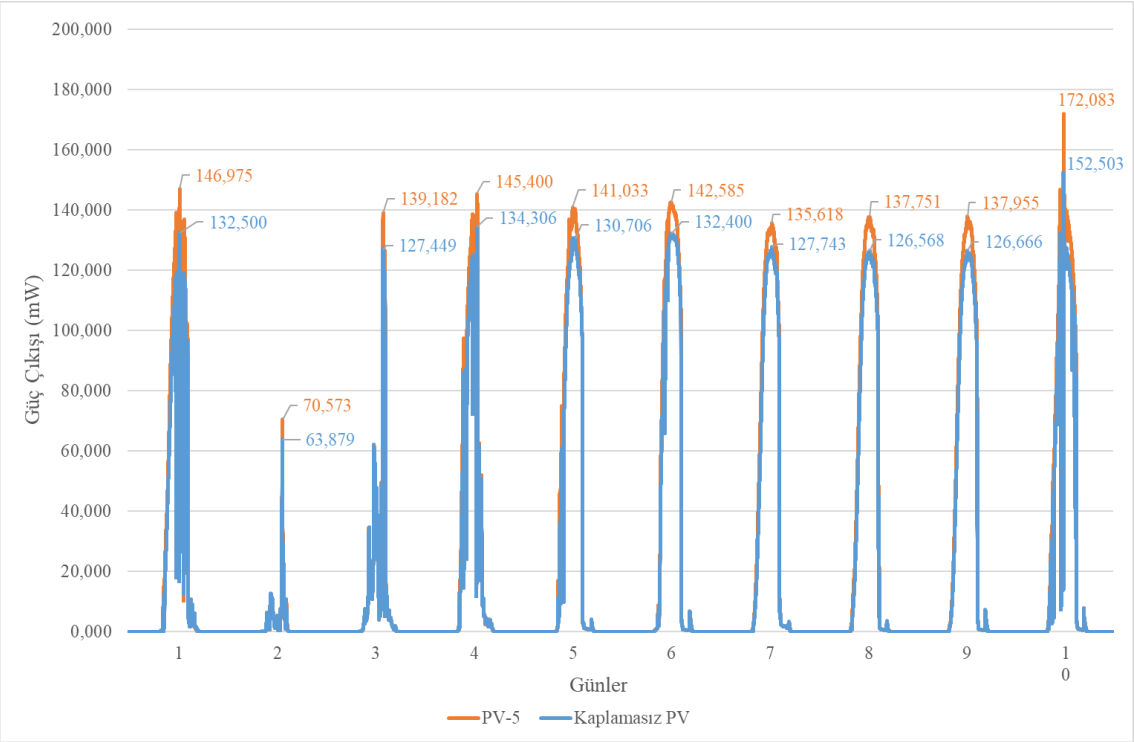
Şekil 3.13 PV-3 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları



Şekil 3.14 PV-4 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları

Şekil 3.14'te görülen Sol-C(sol-8) ile kaplanan PV-4'ün güç çıkışı kaplamasız PV panel

ile dengesiz güç çıkışı olan ve dengeli güç çıkışı olan günlerde benzerlik göstermiştir. Test edilen 10 günlük süre boyunca her iki panel de aynı zaman dilimlerinde güç çıkışlarına sahip olduğu görülmüştür. PV-4 paneli kaplamasız olana göre tüm günlerde daha fazla anlık güç çıkışı göstermiştir. Bunun yanında her iki panel de 3., 5., 6., 8. ve 9. günlerde ani anlık güç dalgalanmaları yaşadığı gözlenmiştir. Bu ani güç değişimleri hava durumuna bağlı bulutlanma, yağmur gibi etkilerle ve anlık ışınım şiddeti değişimi ile açıklanabilir.



Şekil 3.15 PV-5 ve kaplamasız PV panelin güç çıkışları

PV-5 panelinde de diğer paneller gibi gün içerisinde güç çıkışlarında dalgalanmalar görülmüştür. Ancak test edilen tüm günlerde anlık maksimum güç çıkışı kaplamasız olan PV panelden daha fazla olduğu da görülmüştür. 1. ve 10. günlerde ani anlık güç çıkışlarında dalgalanmaların olduğu ölçülmüştür. 5-9. günler aralığında anlık güç çıkışları oldukça ideal güç çıkışı göstermiştir. Ancak 1., 3., 4. ve 10. günlerde her iki panelde de kararsızlık olduğu görülmüş olup 2. ve 3. günlerde güç çıkış eğrisi gözlenmemiştir.

Şekil 3.11 – 3.15 elde edildikten sonra anlık güç çıkışları anlamlı ifade olabilmesi için zamana eklenerek enerji üretimi cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Anlık güç çıkışları 30 saniyede bir ölçülen bir değer olduğundan bu güç değerinin 30 saniye boyunca

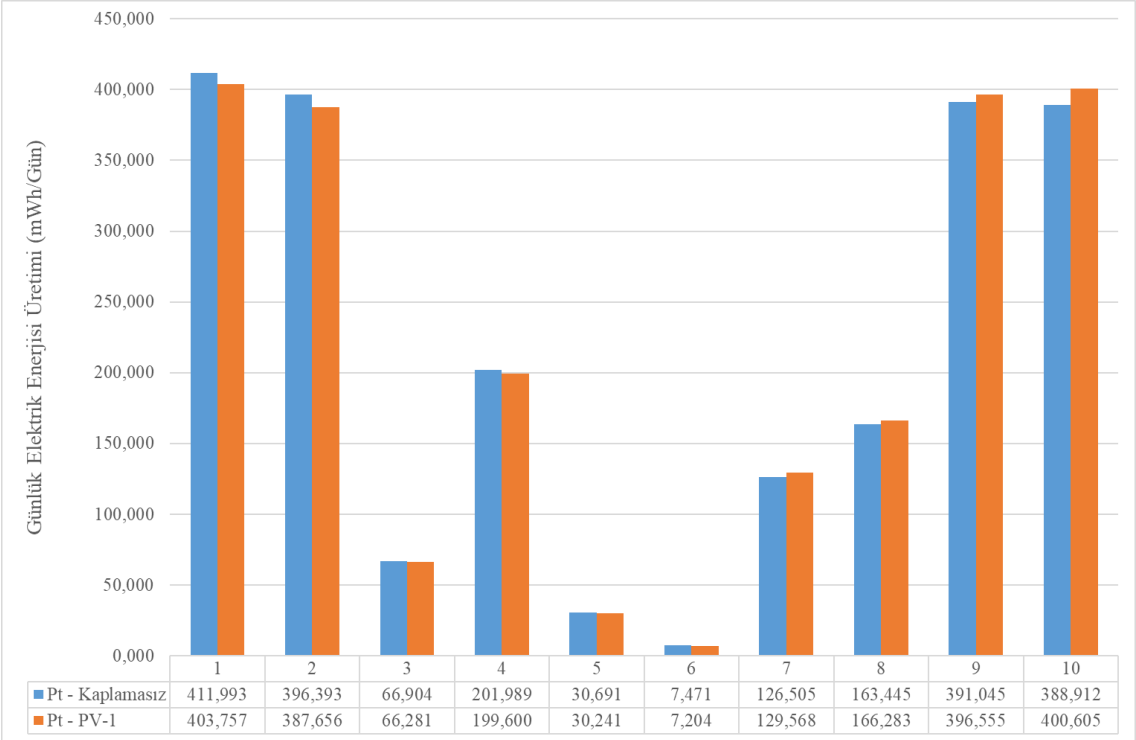
aynı kaldığı kabul edilerek ölçüm aralığı ile çarpılıp tüm aralıkların toplanması ile günlük elektrik enerjisi üretimleri mWh/gün olarak bulunmuştur. Günlük toplam elektrik enerjisi üretimlerini ve birim zamandaki güç çıkışlarının değerlendirilebilmesi için tüm panellerin test günlerinde hava koşulları Açık-Parçalı Bulutlu ve Bulutlu olarak kaydedilmiştir. Havanın bulutsuz, güneşli ve tamamen açık olduğu günler Açık(*), kısmi bulutlu veya zaman zaman güneşli olduğu günler Parçalı Bulutlu(**) ve gün boyu bulutlu, kapalı, güneşsiz ya da yağmurlu olduğu günler Bulutlu(***) olarak değerlendirilmiştir. Test günlerindeki hava durumu Tablo 3.2'den görülebilir. PV panellerin elektrik enerjisi üretimi açısından değerlendirilmesi için Tablo 3.2'deki hava durumları göz önüne alınmıştır.

Tablo 3.2 Test günleri hava durumu

(*)Açık, (**)Parçalı bulutlu, (***)Bulutlu

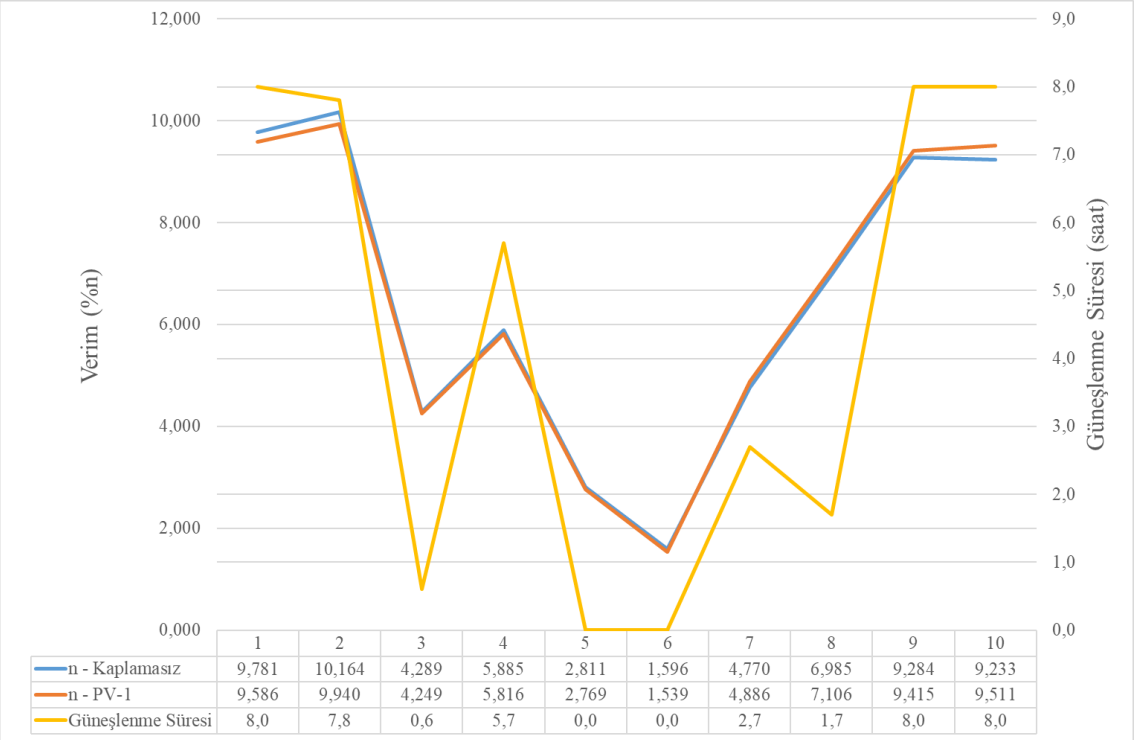
PV	1.Gün	2.Gün	3.Gün	4.Gün	5.Gün	6.Gün	7.Gün	8.Gün	9.Gün	10.Gün
PV-1	*	*	***	**	***	***	**	***	*	*
PV-2	*	**	*	*	*	*	*	*	**	*
PV-3	*	**	**	***	*	*	**	**	***	**
PV-4	**	**	***	*	***	***	*	**	**	***
PV-5	**	***	***	**	*	*	*	*	*	**

Test süreleri içerisinde hava durumlarının 3 kategori altında kaydedilmesinin yanı sıra Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden test günleri ve test koordinatlarına ait günlük güneş ışınımı(kWh/m^2) ve günlük güneşlenme süreleri(saat) temin edilmiştir. Günlük güneş ışınımı verileri PV panelin yüzey alanına orantılanarak PV panellerin ürettiği günlük elektrik enerjisi (mWh/gün) olarak çevrilmiştir. Bu sayede PV panellerin verimleri de kıyaslanabilmiştir. PV panellerin verimleri ve hava durumlarına göre elektrik enerjisi üretimleri ayrı ayrı sırasıyla değerlendirilmiştir. PV-1 – PV-5 panellerine ait olan elektrik enerjisi üretim grafikleri ve verimlerin karşılaştırılmaları ayrı ayrı olarak sırasıyla Şekil 3.16 – Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.16 PV-1 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi

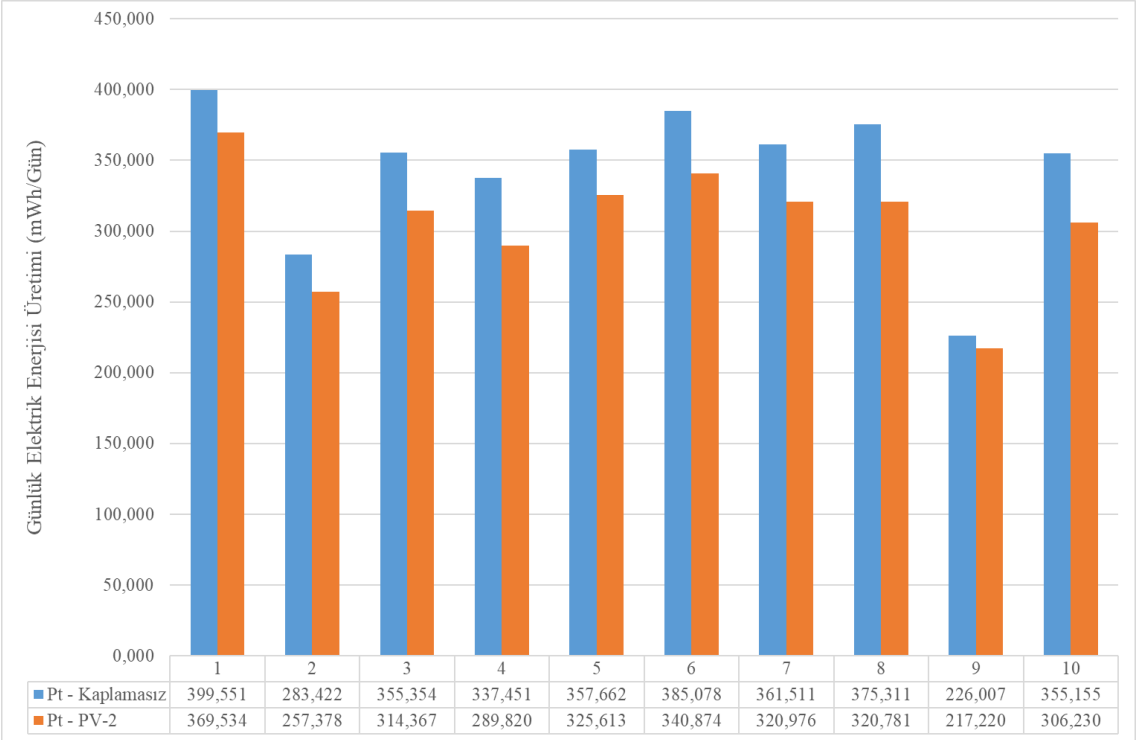
Şekil 3.16'da kaplamasız PV ile karşılaştırılan PV-1'e ait 10 günlük elektrik enerjisi üretimi göre hava durumunun açık(*) olduğu 1., 2., 9. ve 10. günlerde Şekil 3.11'deki anlık güç çıkışlarında da olduğuna benzerdir. Havanın açık olduğu günlerde ortalama elektrik enerjisi üretimleri birbirine eşittir. 7., 8., 9., ve 10. günlerde kaplamasız olan panelden daha fazla günlük toplam elektrik enerjisi üretimi gerçekleşmiştir. Daha fazla güç çıkışları görülen 5., 8., ve 10. günlerin elektrik enerjisi üretiminde de benzerlik gösterdiği görülmüştür. Ancak 7. ve 9. günlerde günlük elektrik enerjisi olarak değerlendirildiğinde daha fazla elektrik enerjisi üretimi olduğu ortaya çıkmıştır. 3. ve 4. günler anlık güç çıkışı olarak en yüksek iki günü gösterse de elektrik enerjisi üretimi olarak oldukça geride kalmışlardır. Bu iki günde bulutlu ve parçalı bulutlu olarak kaydedilmiştir. Havanın bulutlu olduğu 3., 5., 6. ve 8. günlerde iki panel arasında elektrik üretimi açısından bir fark ölçülmemiştir. PV-1 paneli kaplamasız PV panelden 10 günlük test süresi içerisinde %0,11 daha fazla elektrik enerjisi ürettiği görülmüştür. Şekil 3.17'de PV-1'in test günleri içerisindeki verimi gösterilmiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n - Kaplamasız	9,781	10,164	4,289	5,885	2,811	1,596	4,770	6,985	9,284	9,233
n - PV-1	9,586	9,940	4,249	5,816	2,769	1,539	4,886	7,106	9,415	9,511
Güneşlenme Süresi	8,0	7,8	0,6	5,7	0,0	0,0	2,7	1,7	8,0	8,0

Şekil 3.17 PV-1 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri

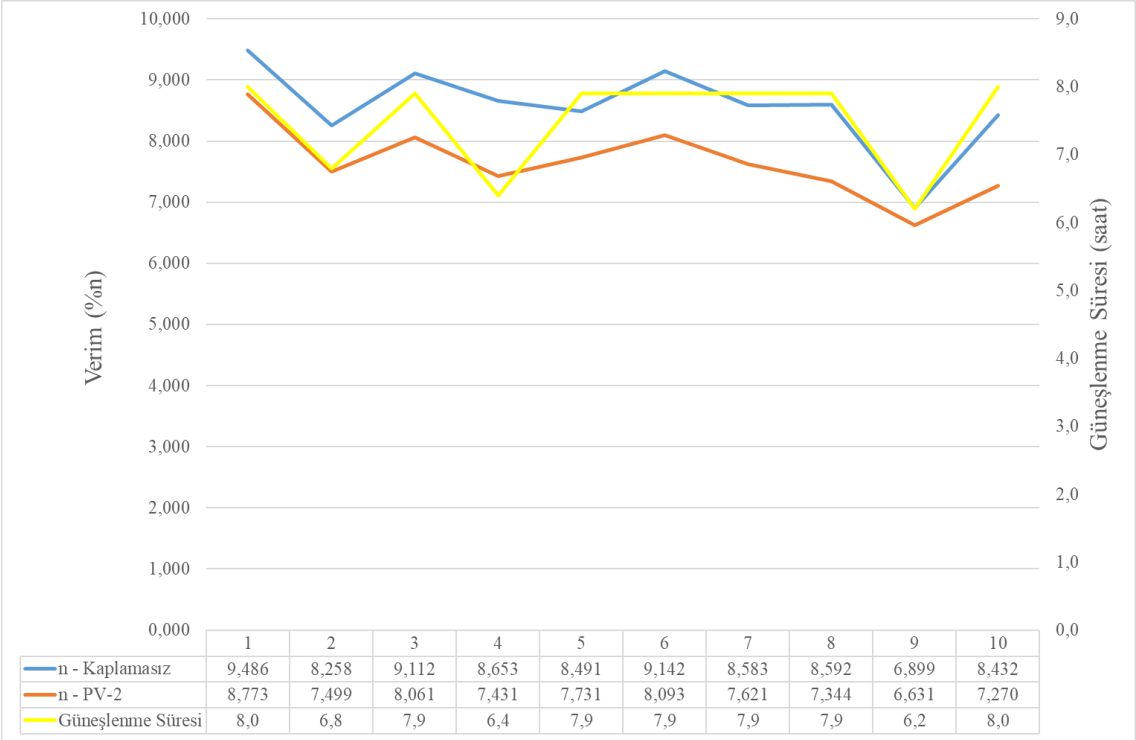
Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan günlük toplam güneş ışınımı şiddeti(kWh/m^2) ve güneşlenme süreleri PV panellerin yüzey alanına orantılanarak karşılaştırılmıştır. Buna göre PV-1 paneli elektrik enerjisi üretimi ile karşılaştırıldığında havanın açık olduğu günler %9 verim seviyelerindeyken havanın bulutlu/kapalı olduğu 3., 5., 6. ve 8. günlerde güneşlenme süreleri 0,0-2,7 saat aralığında olup panel verimleri de güneşlenme süreleri ve elektrik enerjisi üretimlerine paralellik göstererek %1,5-7 aralığında olmuştur.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt - Kaplamasız	399,551	283,422	355,354	337,451	357,662	385,078	361,511	375,311	226,007	355,155
Pt - PV-2	369,534	257,378	314,367	289,820	325,613	340,874	320,976	320,781	217,220	306,230

Şekil 3.18 PV-2 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi

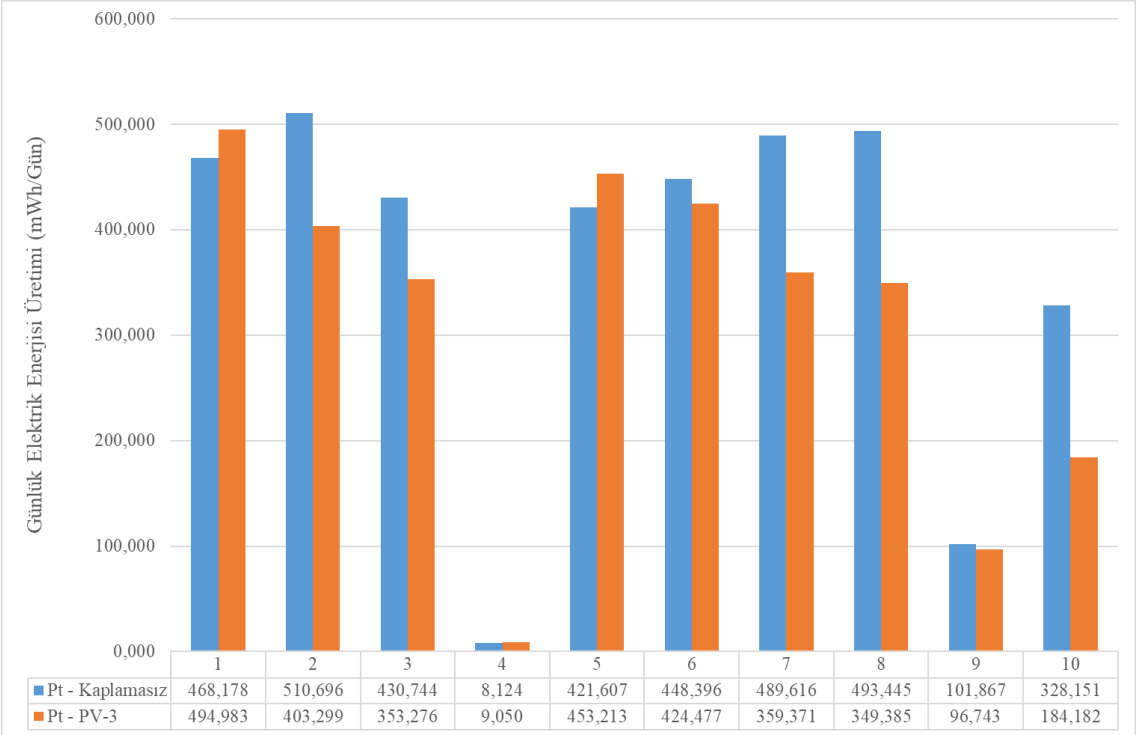
PV-2 paneli kaplamasız PV panele göre elektrik enerjisi üretiminde tüm test süresi içerisinde farklı hava koşullarında da geri kalmıştır. Havanın parçalı bulutlu olduğu 2. günde %10, 9. günde ise %5 kadar daha düşük elektrik enerjisi üretimi gerçekleşmiştir. Havanın açık olduğu diğer günlerde de ortalama %10 daha az elektrik enerjisi üretimi olarak kaplama elektrik enerjisi üretimi açısından başarılı olamamıştır. PV-2 paneli 10 günlük test süresi içerisinde kaplamasız PV panelden toplamda %10,875 daha az elektrik enerjisi üretimi sağladığı ölçülmüş olup yapılan kaplama elektrik enerjisi açısından başarısız olarak değerlendirilmiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n - Kaplamasız	9,486	8,258	9,112	8,653	8,491	9,142	8,583	8,592	6,899	8,432
n - PV-2	8,773	7,499	8,061	7,431	7,731	8,093	7,621	7,344	6,631	7,270
Güneşlenme Süresi	8,0	6,8	7,9	6,4	7,9	7,9	7,9	7,9	6,2	8,0

Şekil 3.19 PV-2 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri

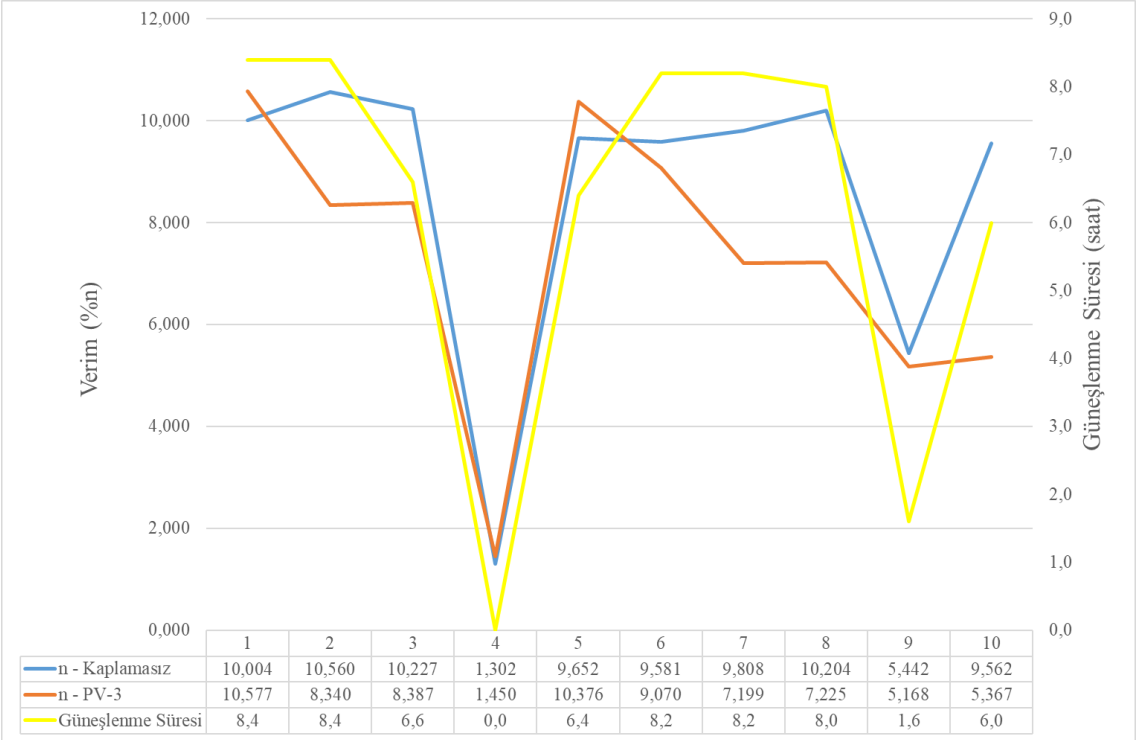
PV-2 panelinin günlük toplam güneş ışınımı şiddetine bağlı olarak elde edilen verimlerine bakıldığında Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan güneşlenme sürelerine bağlı olarak tutarlı olduğu görülmüştür. Parçalık bulutlu olarak değerlendirilen 2. ve 9. günlerde de panellerin verimleri güneşlenme süresine uyumludur. Verim karşılaştırmalarında PV-2 paneli kaplamasız PV panelinden tüm günlerde daha düşük verimdedir. Havanın açık olduğu günlerde kaplamasız panel PV-1'de olduğu gibi eşit güneşlenme sürelerinde aynı verime ulaşmıştır. PV-2 paneli havanın açık ve güneşlenme sürelerinin 6,4-8 saat aralığında olduğu günlerde %7,2-8,7 verime ulaşmıştır. Kaplamasız PV panel ise aynı günlerde %8,2-9,4 verim aralığında olmuştur.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt - Kaplamasız	468,178	510,696	430,744	8,124	421,607	448,396	489,616	493,445	101,867	328,151
Pt - PV-3	494,983	403,299	353,276	9,050	453,213	424,477	359,371	349,385	96,743	184,182

Şekil 3.20 PV-3 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi

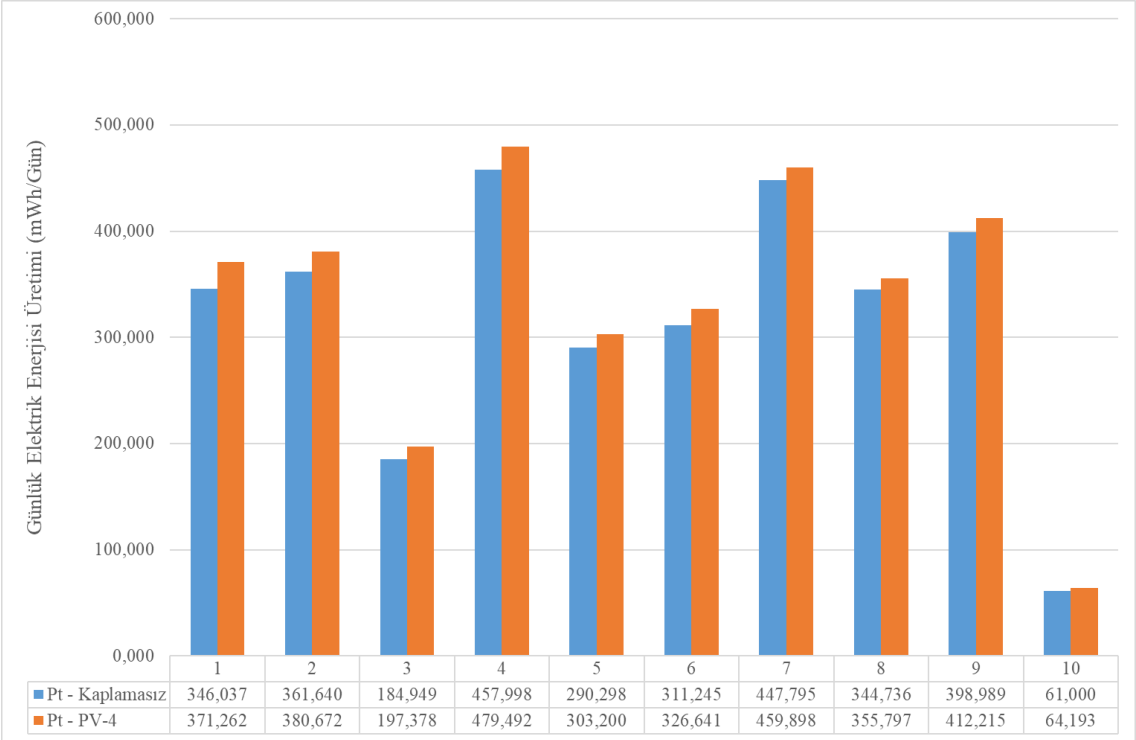
Farklı hava şartları altında test edilen PV-3 elektrik enerjisi üretimi açısından havanın açık olarak kaydedildiği 1. ve 5. günlerde daha fazla elektrik enerjisi üretimi sağlamıştır. Havanın açık olarak kaydedildiği 6. günde ise geride kalmıştır. Hava durumunun parçalı bulutlu olduğu ve anlık güç çıkışlarının da düzensiz olduğu 2., 3., 7. ve 8. günlerde ise PV-3 paneli elektrik enerjisi üretiminde oldukça geride kaldığı görülmektedir. Havanın bulutlu olduğu 4. ve 9. günlerde de elektrik enerjisi açısından her iki panelde düşük iken günlük güneşlenme süresinin 0,0 olduğu 4. günde PV-3 %11 daha fazla elektrik enerjisi üretmiştir. Anlık güç çıkışlarının havanın bulutlu olarak kaydedildiği 4. ve 9. günlerde ise Şekil 3.21'de görülebilen güneşlenme sürelerinin 0,0 ve 1,6 saat olması ile elektrik enerjisi üretimi oldukça düşük kalmıştır. 10 günlük test süresi içerisinde PV-3 paneli kaplamasız PV panelden toplamda %15,479 daha az elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirmiştir. PV-3 panelinin kaplamasında kullanılan Sol-B elektrik enerjisi üretiminde başarısız olarak değerlendirilmiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n - Kaplamasız	10,004	10,560	10,227	1,302	9,652	9,581	9,808	10,204	5,442	9,562
n - PV-3	10,577	8,340	8,387	1,450	10,376	9,070	7,199	7,225	5,168	5,367
Güneşlenme Süresi	8,4	8,4	6,6	0,0	6,4	8,2	8,2	8,0	1,6	6,0

Şekil 3.21 PV-3 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri

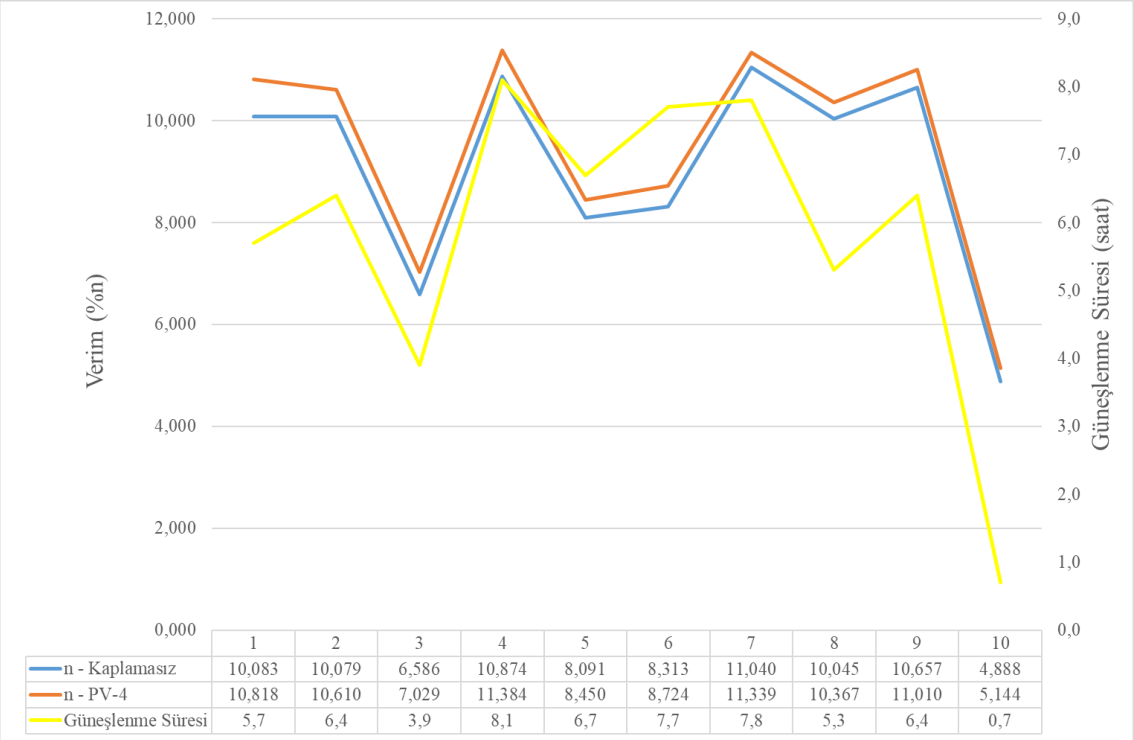
Havanın bulutlu olarak kaydedildiği 4. ve 9. günlerde güç çıkışı ve elektrik enerjisi üretimine paralel olarak PV panel verimleri %1,3-5,4 aralığında kalmıştır. PV-3 paneli elektrik enerjisi üretiminde de geride olduğu 7. ve 8. günlerde panel verimi kaplamasız panele göre çok düşük kalmıştır. PV-3 panelinin hava şartlarına toleransı olmadığı sadece havanın açık ve güneşlenme sürelerinin yüksek olduğu 1., 5. ve 6. günlerde veriminin yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre Sol-B solüsyonunun olduğu PV-3'teki yansıtma engelleyici ve ışık geçirgenliğini artıran kaplamanın başarısız olduğu değerlendirilmektedir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt - Kaplamasız	346,037	361,640	184,949	457,998	290,298	311,245	447,795	344,736	398,989	61,000
Pt - PV-4	371,262	380,672	197,378	479,492	303,200	326,641	459,898	355,797	412,215	64,193

Şekil 3.22 PV-4 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi

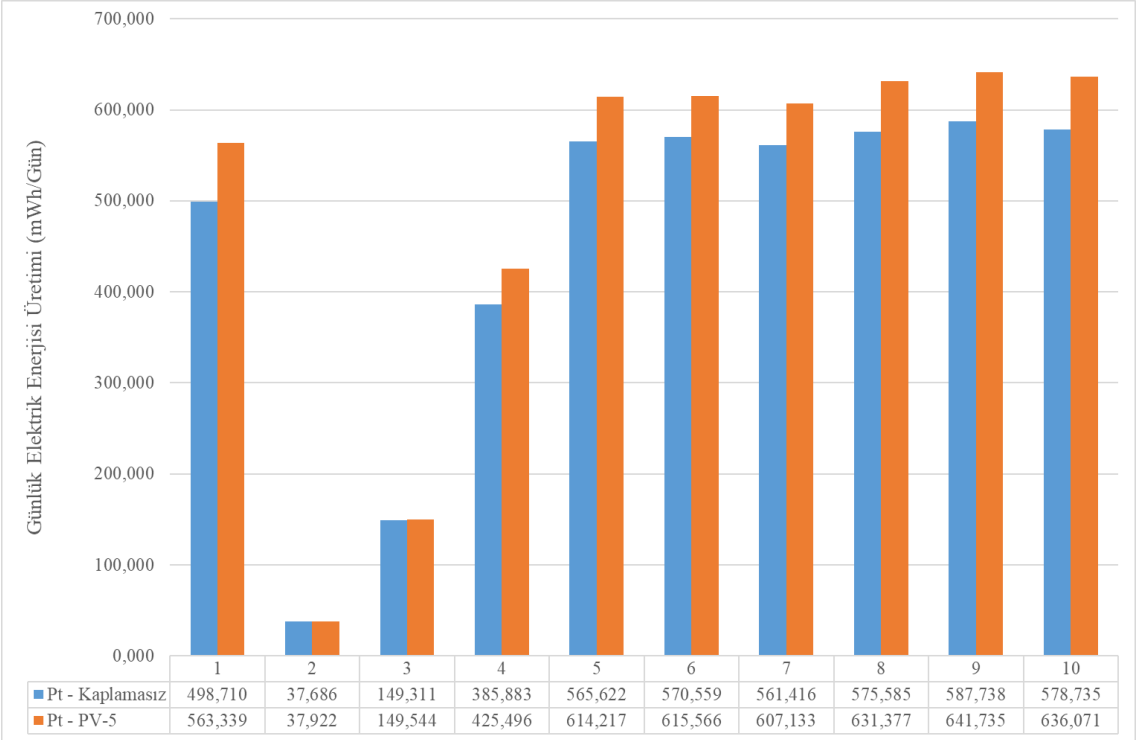
Sol-C ile hazırlanan PV-4 anlık güç çıkışları ile birlikte değerlendirildiğinde; 10 günlük deney sürecinde tüm hava şartlarında kaplamasız PV panelden daha fazla elektrik enerjisi üretmiştir. Havanın açık olduğu 4. ve 7. günlerde toplam elektrik enerjisi üretimi diğer hava şartlarının olduğu günlerden en az %10 daha fazladır. Havanın parçalı bulutlu veya bulutlu olduğu 1., 2., 5., 6., 8. ve 9. günlerde maksimum anlık güç çıkışının havanın açık olduğu 7. günden daha fazla olduğu gözükmesine rağmen günlük toplam elektrik enerjisi üretimi açısından karşılaştırıldığında 7. günün bahsi geçen diğer günlerden daha fazla elektrik enerjisi ürettiği görülmüştür. Bu durum parçalı bulutlu hava şartında anlık güç çıkışında sık değişkenlik göstermesine rağmen açık hava durumundan daha yükseklere çıkarken elektrik enerjisi üretimi açısından bakıldığında açık hava durumu şartından olması gerektiği gibi geride olduğu görülmektedir. Bulutlu hava durumu koşulunda ise anlık güç çıkışı daha az değişkenlik göstermekte ve anlık güç çıkışlarında daha düşükte kalarak beklenildiği gibi davranmıştır. Test süresi sonunda PV-4 paneli kaplamasız PV panelden toplamda %4,558 daha fazla elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirerek tezin amacına uygun sonuç vermiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n - Kaplamasız	10,083	10,079	6,586	10,874	8,091	8,313	11,040	10,045	10,657	4,888
n - PV-4	10,818	10,610	7,029	11,384	8,450	8,724	11,339	10,367	11,010	5,144
Güneşlenme Süresi	5,7	6,4	3,9	8,1	6,7	7,7	7,8	5,3	6,4	0,7

Şekil 3.23 PV-4 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri

PV-4 paneli tüm günlerde ve hava şartlarında kaplamasız PV panelden daha fazla verime ulaşmıştır. Havanın bulutlu olduğu 3., 5., 6. ve 10. günlerde güneşlenme süresinin 0,7 – 3,9 saat olduğu 3. ve 10. günlerde %4,8 ila %7 verimde olmuştur. Havanın bulutlu olmasına rağmen güneşlenme süresinin yüksek olduğu 5. ve 6. günlerde toplam elektrik enerjisi üretimi panel verimi 3. ve 10 günlerden fazla, havanın parçalı bulutlu olduğu 1., 2., 8. ve 9. günlerden daha az verimde ve daha az elektrik enerjisi üretmiştir. Güneşlenme süresinin hava koşuluna etkisi elektrik enerjisi üretimi açısından olmamakta ancak PV panelin verimini artırdığı bu günlerden görülmektedir. Havanın açık olduğu 4. ve 7. günlerde PV-4 paneli %10 verimin üzerine çıkmıştır. PV-4 paneli bu sonuçlar ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

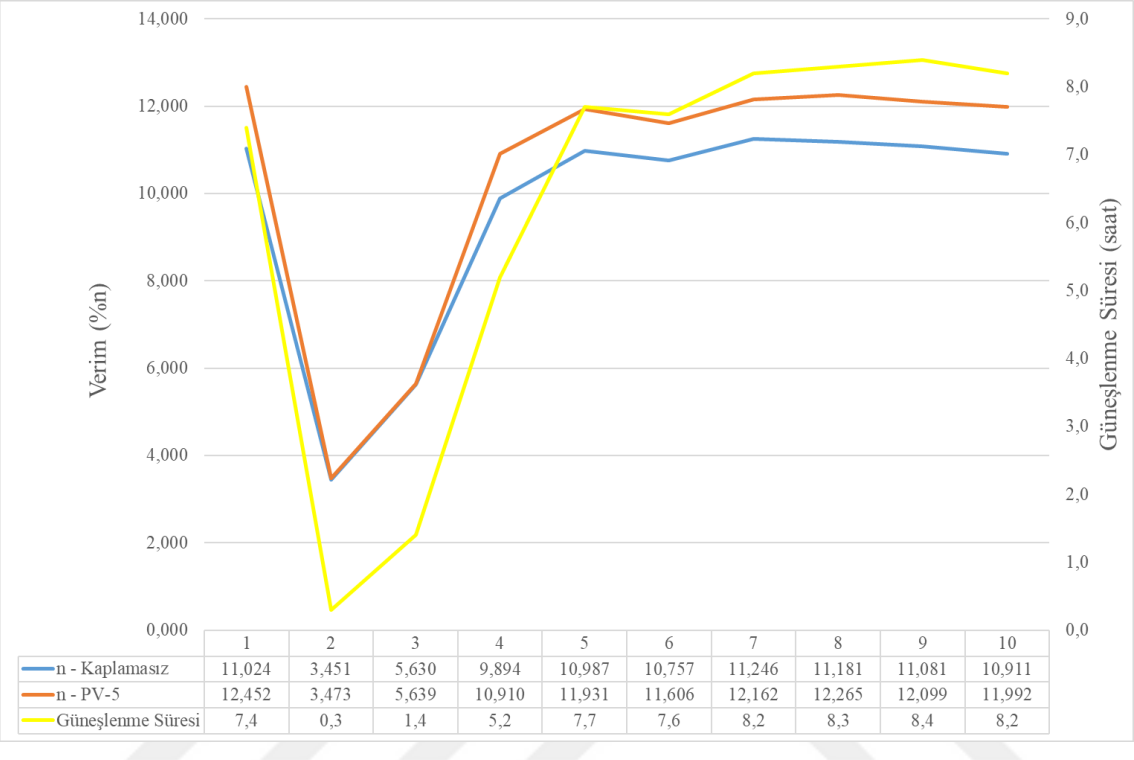


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt - Kaplamasız	498,710	37,686	149,311	385,883	565,622	570,559	561,416	575,585	587,738	578,735
Pt - PV-5	563,339	37,922	149,544	425,496	614,217	615,566	607,133	631,377	641,735	636,071

Şekil 3.24 PV-5 ve kaplamasız PV panelin günlük elektrik enerjisi üretimi

Sol-C ile hazırlanan bir diğer PV panel PV-5'tir. PV-5 ile PV-4 aynı solüsyonda hazırlanırken sadece 3 boyutlu yazıcı parametrelerinde Infill percentage oranı PV-4'te %50 iken PV-5'te %35 olarak ayarlanmıştır. PV-5'in test süresi içerisindeki performansına bakıldığında günlerin tamamında kaplamasız PV panelden daha fazla elektrik enerjisi üretmiştir. Hava durumlarına göre değerlendirildiğinde; havanın açık olduğu 5., 6., 7., 8. ve 9. günlerde %8-10 aralığında daha fazla elektrik enerjisi ürettiği görülmüştür. Bu durum, güneş ışınımının daha fazla olduğu günlerde PV panel yüzeyinden ışığın yansımanın azaltılarak panel içerisine daha fazla güneş ışığının geçirildiği ve hücre tarafından daha fazla foton soğurulduğunu göstermektedir. Havanın açık ve güneşli olduğu günlerin anlık güç çıkışı eğrilerine uyumlu olan elektrik enerjisi üretimi dengeli ve kararlı olduğu görülmüştür. Bu değerlendirmeye göre de bu kaplama PV-4'te olduğu gibi havanın açık olduğu günlerde yansımanın azaltılarak kaplamalarının başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Havanın parçalı bulutlu olduğu 1., 4. ve 10. günlerde Şekil 3.15'teki güç çıkış eğrilerinin her iki PV panelde de düzensiz ve ideal güç çıkışı olmamasına rağmen PV-5 panelinin toplam elektrik enerjisi üretiminde %10-%13 kadar daha fazla elektrik enerjisi ürettiği ölçülmüştür. Havanın bulutlu olarak kaydedildiği 2.

ve 3. günlerde ise her iki panelinde elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık olarak aynı olduğu ölçülmüştür. 10 günlük test süresi içerisinde PV-5 panelinde kaplamasız PV panelden tüm elektrik enerjisi üretiminde %9,114 artış elde edilmiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n - Kaplamasız	11,024	3,451	5,630	9,894	10,987	10,757	11,246	11,181	11,081	10,911
n - PV-5	12,452	3,473	5,639	10,910	11,931	11,606	12,162	12,265	12,099	11,992
Güneşlenme Süresi	7,4	0,3	1,4	5,2	7,7	7,6	8,2	8,3	8,4	8,2

Şekil 3.25 PV-5 ve kaplamasız PV panelin günlük verimleri

PV-5 panelinin tüm günlerde ve hava şartlarında verimine bakıldığında kaplamasız PV panelden daha fazla verime ulaştığı ve diğer kaplamalı PV paneller arasında %12,452 verim ile en yüksek günlük verim elde edilmiştir. Havanın açık olduğu 5., 6., 7., 8. ve 9. günlerde güneşlenme sürelerinin 7,6 – 8,4 saat aralıklarında verimler %11,6 ila %12,265 aralığında olmuştur. Havanın parçalı bulutlu olmasına rağmen güneşlenme süresinin yüksek olduğu 1. ve 10. günlerde verim, havanın açık olduğu diğer günlere eşit veya daha fazla olmuştur. Havanın parçalı bulutlu olduğu 1., 4. ve 10. günlerde verim %10,9, %11,992 ve %12,452 olmuştur. Havanın parçalı bulutlu ve 7,4 saat güneşlenme süresinin olduğu 1. gün günlük elektrik enerjisi üretimi açısından havanın açık olduğu günlerden geride olsa da tüm PV paneller ve test günleri içerisinde ışınım miktarına bağlı en yüksek verimin elde edildiği gün olmuştur. Güneşlenme süresi hava koşuluna bağlı olarak elektrik enerjisi üretimini etkilemektedir ve güneşlenme süresi düştükçe PV panellerin verimi de göreceli olarak azalmaktadır. Havanın bulutlu olduğu 2. ve 3. günlerde PV-5

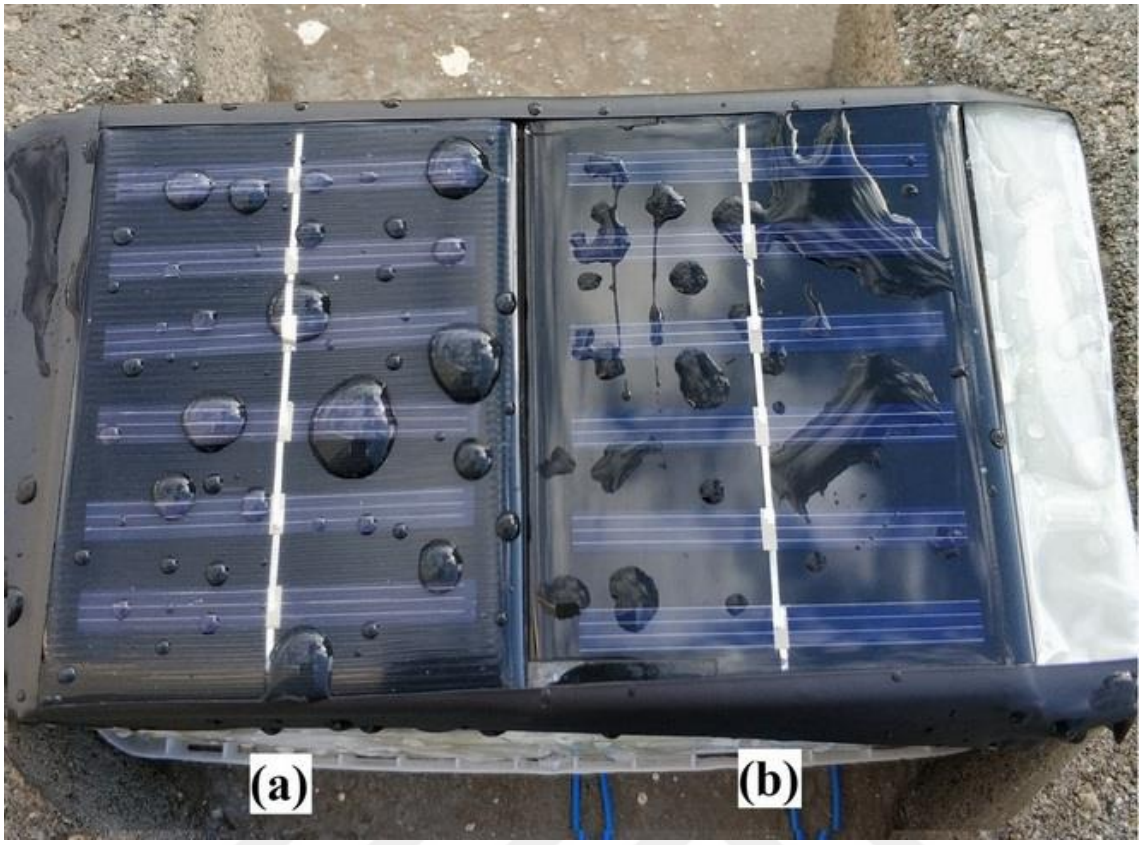
paneli 0,3-1,4 saat güneşlenme sürelerine sahiptir ve bu günlerde ışınım şiddeti ve güneşlenme sürelerine bağlı olarak verimleri %3,4-%5,6'ya kadar düşmüştür. PV-5 paneli bu sonuçlar ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Tüm PV panellerin dış ortamda elektriksel olarak alınan verimleri değerlendirilmiş ve Tablo 3.3'te yer alan şekilde gerçekleşmiştir. Buna göre etken maddesi nano boyutta SiO_2 ve TiO_2 olan bağlayıcı polimerinin PLA polimeri olduğu bir kaplamada kaplamasız olana göre PV-4 paneli %4,654, PV-5 paneli ise %8,7 daha fazla verimli olmuştur.

Tablo 3.3 Kaplamalı panellerin verim kazançları

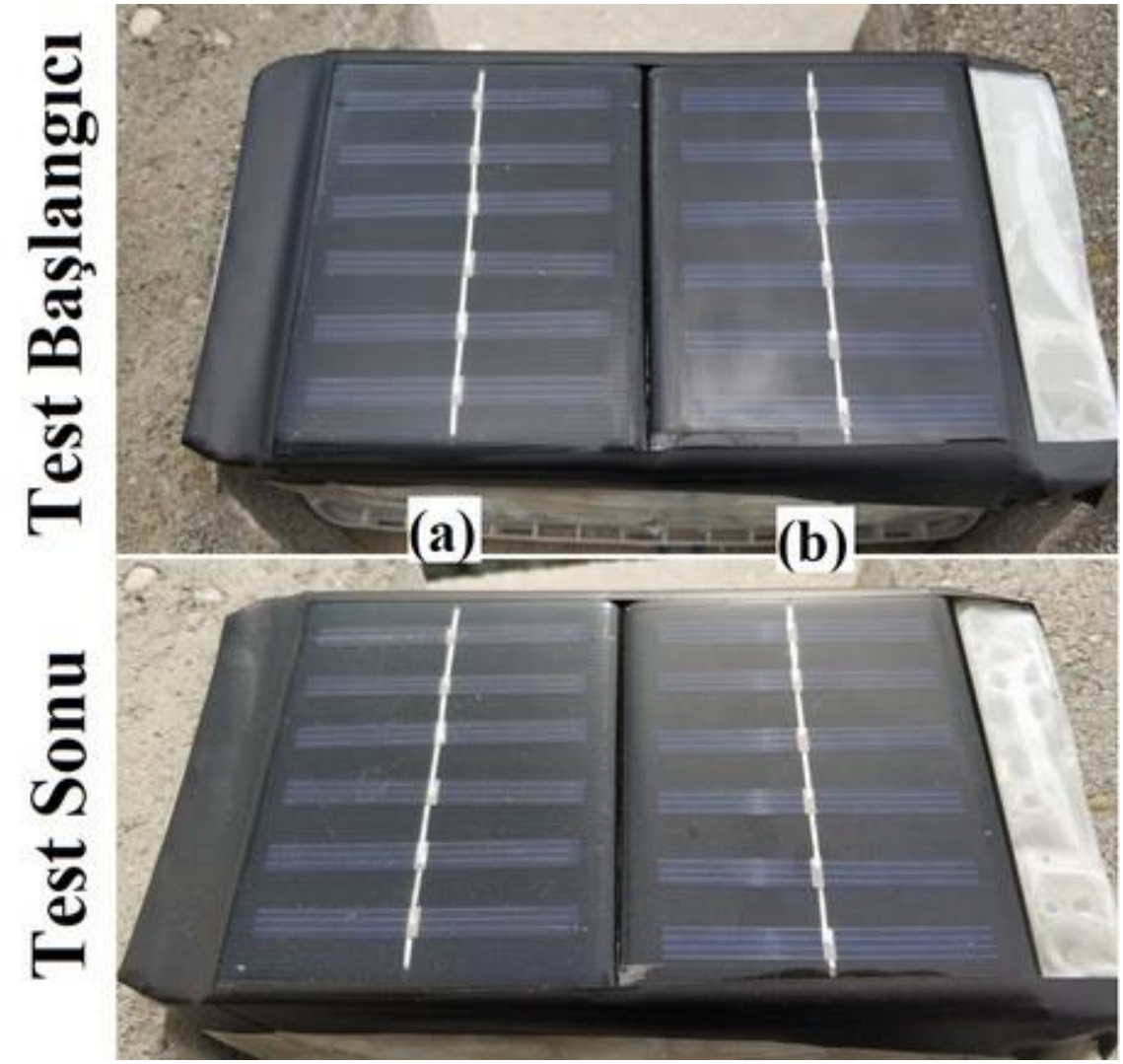
PV panel	Verim kazancı
PV-1	%0,027
PV-2	-%10,735
PV-3	-%15,269
PV-4	%4,654
PV-5	%8,7

PV-4 ve PV-5 panellerinin kaplamalarının tez çalışmasının amaçlarından olan yansıtma engelleme özelliği gösterdiği daha fazla ışığın güneş hücresine girerek panellerin daha fazla güç çıkışı verdiği görülmüştür. Çalışmanın bir diğer amacı olan kendi kendini temizleme özelliği incelendiğinde havanın yağmurlu olduğu günlerde Şekil 3.26'daki gibi kaplamalı panel üzerinde hidrofobik yüzeyin oluştuğu ve üzerine düşen su damlalarını yüzeyden iterek temas açısını azalttığı görülmüştür. Su damlasının panelden itilerek temas noktasının azaltılması ile su damlası yüzeyden kaymakta ve böylece yüzeyin kolaylıkla kendi kendine temizlendiği görülmüştür.



Şekil 3.26 Hidrofobik yüzey oluşumu (a)Kaplamalı PV (b)Kaplamasız PV

Şekil 3.26(a)'da kaplamalı PV panel üzerinde görülen su damlalarının top şekline gelerek bir araya gelmesi ile hidrofobik yüzey oluşmuştur. Şekil 3.26(b)'de kaplamasız PV panelde su damlaları yüzeye yayılarak yüzeyde kalmıştır. Yüzeyde zaman içerisinde kuruması beklenildiği için hem ışığı daha fazla kırmış hem de ışık geçirgenliğini düşürmüştür. Test süresi başında ve sonunda kaplamalı ve kaplamasız PV panellerin durumu ise Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27 Dış ortam test başlangıcında ve sonunda PV paneller (a)Kaplamalı PV, (b)Kaplamasız PV

PV panellerin Şekil 3.27'de görülen test başlangıcındaki ve test süresi bitimindeki görüntülerinde kaplamalı PV paneller üzerindeki toz birikiminin kaplamasız PV panele göre daha az olduğu ayrıca kirlilik olmadığı görülmüştür. 10 günlük süre sonunda farklı ortam ve sıcaklık şartlarına maruz kalan kaplamaların herhangi bir deformasyona uğramadığı görülmektedir. Ancak uzun süreli dayanımları test edilmesi ile kaplamanın ömrü konusunda fikir sahibi olunacaktır.

BÖLÜM -IV

4. SONUÇ

Küresel çapta elektrik enerjisi ihtiyacı sanayileşme ve nüfus artışına bağlı olarak yıllar içinde artmış ve gelecek yıllarda da artması beklenmektedir. Günümüzde elektrik enerjisi kömür, linyit, doğalgaz gibi fosil kaynaklar, nükleer santrallerden, su, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve dalga gibi yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Fosil temelli kaynakların üretim sonrası atık oluşturması ve zehirli gaz salınımı gibi olumsuzluklarının yanında tükenebilir kaynaklar olması sebebiyle üretim kaynakları olarak kullanılması zaman içerisinde azaltılmalıdır. Elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artırılarak fosil kaynakların kullanımının azaltılması önem arz etmektedir.

Türkiye'de halihazırda hidroelektrik enerji santralleri ile su kaynaklarının potansiyeli kullanılmakta olup hidroelektrik santrallerin 2021 Ağustos ayı itibari ile kurulu elektrik gücündeki oranı %31,92 olup, 2020 yılı elektrik gücü üretimindeki payı ise %25,46 olmuştur. Güneş, rüzgâr ve jeotermal kaynakların potansiyel güçlerini kullanıma kazandırmak için yıllar içinde yapılan yatırımlar ile 2021 yılı Ağustos ayı itibari ile kurulu gücün %7,54'ü güneşten, %10,16'sı rüzgârdan ve %1,67'si jeotermal enerjiden sağlanmaktadır. Toplamda kurulu gücün %51,29'u yenilenebilir enerji kaynaklarından meydana gelmektedir.

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. Bu kapsamda güneş enerjisinden elektrik üretiminin en yaygın yöntemi olan fotovoltaik panellerin verimini azaltan sebeplere yönelerek güneş ışığından en yüksek oranda faydalanmanın yolları aranmıştır. PV panellerde verim optik, fiziksel ve elektriksel temellidir. Optik sebeplere bakıldığında PV panel yüzeyinden yansımanın başlıca etken olduğu görülmüştür. Fiziksel sebeplerde ise PV panel yüzey üzerine biriken toz, kir veya organik atıklar ile PV panel içerisine daha az ışık girmesi sonucu panel güç çıkışlarında azalış gerçekleşmektedir.

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 elektrospinning yöntemi denenmiş ve uygulaması daha önce görülmeyen 3 boyutlu yazıcı ile kaplamayı yeni bir yöntem olarak kullanarak tek katlı kaplama yapılmıştır. Kaplamalar öncelikle laboratuvar lamı üzerine elektrospinning ve 3 boyutlu yazıcı ile yapılmış ve sonrasında ışık geçirgenlik ölçümlerinden sonra en yüksek geçirgenlik değerlerine sahip solüsyon içerikleri tekrar hazırlanmıştır. Elektrospinning ile hazırlanan kaplamaların yüzeye homojen dağılmadığı ve en yüksek ışık geçirgenliğinin %66 olması sebebiyle bu kaplama yönteminin uygulanması başarılı olmamıştır. 3 boyutlu yazıcı yöntemi ile hazırlanan kaplamaların %82-88 aralığında olması ile bu yöntem üzerinden tez çalışmasına devam edilmiştir. 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 5 adet PV panel üzerine kaplama yapılmıştır. 5 PV panel ve bir adet kaplamasız PV panel solar simülatör testlerinden sonra dış ortamda gerçek zamanlı 10 günlük uygulama testlerine sokulmuştur.

PV paneller dış ortam testleri sonrası yapılan değerlendirmeye göre elektriksel olarak ve yansıtma engelleme ile kendi kendini temizleme yönünden başarılı olan PV-4 ve PV-5 panellerinin hazırlandığı sol-B karakteristiğindeki solüsyonun içeriği ve 3 boyutlu yazıcının parametreleri dikkate alınmıştır. Sol-B, 20 ml $CHCl_3$ içerisine 1,6 gr granül PLA polimeri 2,5 saat karıştırılarak çözdürülmüş ve 0,025 gr SiO_2 ile 0,025 gr TiO_2 eklenerek 4 saat daha karıştırılarak tam homojen hale getirilerek ideal jel kıvamlı solüsyon elde edilmiştir. Sol-gelin uygulanması için 3 boyutlu yazıcı parametrelerinde çok sayıda deneme yapılarak uygun parametre aralıkları tespit edilmiştir. 3 boyut yazıcı da sabit ayarlanan parametrelerden ilk kat yüksekliği 50 mikrometre yüksekliğe, X/Y eksen hareket hızı 4800 mm/sn'e, baskı hızı 300 mm/sn'e ve çıkış ucu sıcaklığı 0 olarak ayarlanmıştır. Değişken parametrelerde Infill percentage (doldurma oranı) %35-50 aralığında olması gerektiği ve Extruder multiplier(çıkış ucuna baskı şiddeti) 7-10 aralığında olması gerektiği yapılan uygulamalar ile bulunmuştur. 3 boyutlu yazıcı ile yapılan kaplama; tek katlı, üniform yapıda, 3,122- 8,477 µm aralığında kalınlıkta, %84 ışık geçirgenliği özelliklerindedir.

Farklı hava şartları altında dış ortam testlerinin sonucunda tez çalışmasının iki amacından olan kendi kendini temizleme özelliği olan hidrofobik yüzey oluşumunun yağmur sırasında ve sonrasında oluştuğu Şekil 3.26'da görüldüğü gibi gözlenmiştir. Tüm PV panellerin test süreleri içerisinde benzer hava koşulları oluşmuştur. Yansıma engelleme amacı ile kullanılan SiO_2'nin etkisinin gözlendiği, ışık geçirgenliğinin artırılarak hücreye daha fazla ışık gelmesi ve aynı zamanda fotokatalik bir madde olan TiO_2'nin kullanılması ile ışık geçirgenliğinin %84 olduğu görülmüştür. Işık geçirgenliğindeki azalışa rağmen yansımanın da azalması ile PV panel içerisine daha fazla ışık girmesi sağlanmıştır. 10 günlük test süresi sonunda PV-4 ve PV-5 panellerinden kaplamasız olan panele göre sırasıyla %4,654 ve %8,7 verim artışı elde edilmiştir. 10 günlük süre sonunda kaplama maddesinin deforme olmadığı görülmüştür. Kaplamanın dayanım ömrünün bulunabilmesi için daha uzun süreli dış ortam testleri yapılarak sunulması düşünülmektedir.

Türkiye'nin elektrik üretiminde giderek daha fazla önem verilen yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi PV paneller üzerine geliştirilen yeni bir kaplama yöntemi ve kaplama maddesi içeriği ile %8,7'e kadar verim artışı elde edilebileceği ortaya konulmuştur. Bu sayede ülkenin elektrik arzına ve ekonomisine büyük miktarda fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Kullanılan yöntem ile PV paneller düzenli aralıklar ile temizlenme ihtiyacı azalacak böylelikle iş gücü ve zaman kazancı da elde edilecektir.

Geliştirilen yöntem, taşınabilir hale getirilmesi ile halihazırda kullanılan güneş enerjisi santrallerindeki PV panellere kaplama yapılmasına da imkân vermektedir. Böylece diğer kaplama yöntemlerinin aksine sadece üretim aşamasında değil aynı zamanda mevcut kullanımda olan PV panellere de istenilen yerde ve üretimi etkilemeden örneğin gece saatinde kaplama işlemleri yapılması da mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi - T. E. İ. A. Ş., «Yük Tevzi Bilgi Sistemi (YTBS),» https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf, [Erişim Tarihi: 15.03.2021].

[2] Warwick W., (2002). «A Primer on Electric Utilities, Deregulation, and Restructuring of U.S. Electricity Markets,» The U.S. Department of Energy-Federal Energy Management Program, USA.

[3] Shivakumar A., Taliotis C., Deane P., Gottschling J., Pattupara R., Kannan R., Jaksic R., Stupin K., Hemert R., Normark B. ve Faure-Schuyer A., (2017). «Chapter 21 - Need for Flexibility and Potential Solutions,» *Europe's Energy Transition Insights for Policy Making*, Academic Press.

[4] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2019), «2019-2023 Stratejik Planı» Ankara, Türkiye.

[5] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, «Kyoto Protokolü» https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/kyoto_protokol.pdf. [Erişim Tarihi: Mayıs 2021].

[6] Nalley S., (2021) «Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021),» U.S. Energy Information Administration (EIA), USA.

[7] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi T.E.İ.A.Ş., (2021) «2020 Yılı Elektrik Üretim-Tüketim Raporu - Ağustos 2021,» T.E.İ.A.Ş. Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı.

[8] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi T.E.İ.A.Ş., (2020) «2019 Yılı Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı» T.E.İ.A.Ş. Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı.

[9] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi T.E.İ.A.Ş., (2021) «Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı - 2020 Yılı,» T.E.İ.A.Ş..

[10] Mahmud N., Zahedi A. ve Rahman M.S., (2018). «Control of Renewable Energy Systems,» *Renewable Energy and the Environment*, Springer, Singapore.

[11] Keramitsoglou K., Mellon R., Tsagkaraki M. ve Tsagarakis K., (2016). «Clean, not green: The effective representation of renewable energy,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 59, 1332-1337.

[12] Roy N.K. ve Das A., (2018). «Prospects of Renewable Energy Sources,» *Renewable Energy and the Environment*, Springer, Singapore.

[13] Gibson L., Wilman E. ve Laurance W., (2017). «How Green is 'Green' Energy?,» *Trends in Ecology & Evolution,* 32(12), 922-935.

[14] Hau E., Wind turbines: fundamentals, technologies, applications, economics, (2013). 3rd Edt., Springer Science & Business Media, Berlin.

[15] Miller L.M., Keith D.W.,(2018). «Climatic Impacts of Wind Power,» *Joule,* 2(12), 2618-2632.

[16] U.S. Energy Information Administration (EIA) World Energy Projection System, (2021). «Table E1.cap. Electricity installed generating capacity: World, Reference case,». https://www.eia.gov/outlooks/ieo/data/pdf/ref/E_cap_r.pdf. [Erişim Tarihi: 05.12.2021].

[17] Lingyue L., Xiaoqing R., Yanli Y., Peidong Z., Xiao C., (2018). «Analysis and recommendations for onshore wind power policies in China,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 82, 156-157.

[18] Farah M.E.M., (2013). «Fuzzy logic control of the wind energy conversion

system,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy,* 5, 1-13.

[19] Patel M.R., (1999). Wind and Solar Power Systems, CRC Press, USA.

[20] Chakoua P., Wamkeue R., Ouhrouche M., Slaoui-Hasnaoui F., Tameghe T., Ekemb G., (2014). «Wind turbine condition monitoring:state-of-the-art review, new trends, and future challenges,» *Energies,* cilt 7, 2595-2630.

[21] Ciang C., Lee J.-R., Bang H.-J., (2008). «Tructural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods,» *Measurement Science and Technology*, cilt 19, 122001-(1-20).

[22] Zaher A., McArthur S., Infield D., Patel Y., (2009). «Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis,» *Wind Energy,* cilt 12, 574-593.

[23] Sheng S., Veers P., (2011) «Wind turbine drivetrain condition monitoring-an overview». *Applied Systems Health Management Conference 2011*, Virginia, U.S.A..

[24] Le B., Andrews J., (2016). «Modelling wind turbine degradation and maintenance,» *Wind Energy,* cilt 19, 571-591.

[25] Beig A.R., Muyeen S.M., (2016). «Wind energy,» *Electric Renewable Energy Systems*, Academic Press.

[26] Breeze P., (2016). «The Wind Energy Resource,» *Wind Power Generation*, Academic Press.

[27] Simani S., Farsoni S., (2018). Fault Diagnosis and Sustainable Control of Wind Turbines, Butterworth-Heinemann.

[28] Edomah N., (2018). «Economics of Energy Supply,» *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.

[29] Vakkilainen E.K., (2017). «Solid Biofuels and Combustion,» *Steam Generation from Biomass*, 1st Edition, Butterworth-Heinemann.

[30] «Renewable Energy - ICAR e-Course». www.agrimoon.com. [Erişim Tarihi: 20.05.2021].

[31] Mertoğlu O., (2017) «Jeotermal Enerjinin Değerlendirilmesi, Yatırımlarının Teknolojisi ve Ekonomisi,» TMMOB Makine Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.

[32] Soelaiman T., (2016). «Geothermal energy,» *Electric Renewable Energy Systems*, Academic Press.

[33] Gupta H., Roy S., (2007). «Exploration Techniques,» *Geothermal Energy*, Elsevier Science.

[34] Dincer I., Abu-Rayash A., (2020). «Chapter 3 - Energy systems,» *Energy Sustainability*, Academic Press.

[35] DiPippo R., (2016). «Binary Cycle Power Plants,» *Geothermal Power Plants, 4th Edition*, Butterworth-Heinemann.

[36] Dickson M.H., Fanelli M., (2003). Geothermal Energy - Utilization and Technology, 1st Edition, Routledge, London.

[37] University of Calgary, Energy Education Encyclopedia, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_power_plants. [Erişim Tarihi: 20.05.2021].

[38] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi T.E.İ.A.Ş., (2020) « 3-GRAFİK I.IV- 2019 KURULU GÜCÜNÜN BİRİNCİL ENERJİ KAYNAKLARINA GÖRE DAĞILIMI (MW),» Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2019 Yılı İstatistikleri Ankara.

[39] Bryden I., (2004). «Tidal Energy,» *Survey of Energy Resources*, 20th Edition, Elsevier Science.

[40] Khare V., Khare C., Nema S., Baredar P., (2019). «Chapter 2 - Introduction of Tidal Energy,» *Tidal Energy Systems*, Elsevier.

[41] Neill S., Hashemi M., (2018). Fundamentals of Ocean Renewable Energy - Generating Electricity From the Sea, Academic Press.

[42] Babarit A., (2018). Ocean Wave Energy Conversion - Resource, Technologies and Performance, ISTE Press - Elsevier.

[43] Pitz-Paal R., (2020). «Concentrating Solar Power,» *Future Energy*, 3rd Edition, Elsevier.

[44] Rodríguez-Sánchez M., Soria-Verdugo A., Almendros-Ibáñez J., Acosta-Iborra A., Santana D., (2014). «Thermal Design Guidelines of Solar Power Towers,» *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 428-438.

[45] Kreith F., Goswami D., (2007). Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, cilt 95 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton.

[46] Karellas S., Roumpedakis T., (2019). «Solar thermal power plants,» *Solar Hydrogen Production*, Academic Press.

[47] Hoffschmidt B., Alexopoulos S., Göttsche J., Sauerborn M., Kaufhold O., (2012). «High Concentration Solar Collectors,» *Comprehensive Renewable Energy - Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.

[48] Purohit I., Purohit P., (2019). «Solar Thermal Power Generation,» *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.

[49] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable, «Concentrating Solar Power - Parabolic Reflector Technologies,»

https://solareis.anl.gov/documents/docs/NREL_CSP_3.pdf. [Erişim Tarihi: 05.07.2021].

[50] Hijazia H., Mokhiamara O., Elsamnib O., (2016). «Mechanical design of a low cost parabolic solar dish concentrator,» *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 1-11.

[51] Poullikkas A., Kourtis G., Hadjipaschalis I., (2010). «Parametric analysis for the installation of solar dish technologies in Mediterranean regions,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2772-2783.

[52] Abdurakhmanov B., Olimov L., Saidov M., (2008). «Electrophysical Properties of Solar Polycrystalline Silicon and Its n+-p Structures at Elevated Temperatures,» *Applied Solar Energy*, 44(1), 46-52.

[53] Dincer I., Bicer Y., (2018). «Photonic Energy Production,» *Comprehensive Energy Systems*, cilt 3, Elsevier, USA.

[54] Ramalingam K., Indulkar C., (2017). «Chapter 3 - Solar Energy and Photovoltaic Technology,» *Distributed Generation Systems - Design, Operation and Grid Integration*, Butterworth-Heinemann.

[55] Gupta P., (1999). «Renewable energy sources-a longway to go in India,» *Renewable Energy*, 16(1-4), 1216-1219.

[56] Hussain C., (2018). «Chapter 41 - Engineered Nanomaterials for Energy Applications,» *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*, Elsevier.

[57] Khaligh A., Onar O., (2018). «Energy Sources,» *Power Electronics Handbook*, 4th Edition, Butterworth-Heinemann.

[58] Green Rhino Energy, «http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_cells.php,» [Erişim Tarihi: 10.07.2021].

[59] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi T.E.İ.A.Ş., (2020) «38-Grafik III.I - 2020 Yılı Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı,» https://webapi.teias.gov.tr/file/56774b2a-087b-4431-9479-29f1cb5d0d87?download. [Erişim Tarihi: 6.12.2021].

[60] Louwen A., v. Sark W., (2020). «Photovoltaic solar energy,» *Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System*, Academic Press.

[61] Barbose G., Darghouth N., (2018). Tracking the Sun—Installed Price Trends for Distributed Photovoltaic, 2nd Edition, Berkeley LAB, Berkeley, CA USA.

[62] Solar Power Europe, (2019) «Global Market Outlook for Solar Power 2019-2023,» https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/07/SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf [Erişim Tarihi: 12.12.2021].

[63] Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, «Elektrik Piyasası Lisanssız Üretim Listesi,» https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-92/elektriklisanssiz-uretim. [Erişim Tarihi: 10.7.2021].

[64] FIMER, «https://www.fimer.com/sites/default/files/FIMER_PVS800-57B-from1645to1732_EN_RevB_0.,» https://www.fimer.com/sites/default/files/FIMER_PVS800-57B-from1645to1732_EN_RevB_0. [Erişim Tarihi: 10.07.2021].

[65] Garni H.A., Awasthi A., (2018). «Chapter 2 - Solar PV Power Plants Site Selection: A Review,» *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Elsevier Science.

[66] Satpathy R., Pamuru V., (2021). Solar PV Power- Design Manufacturing and Applications From Sand to Systems, Academic Press & Elsevier, India.

[67] Maciel R., (2012). *Otimização multiobjetivo na análise da integração de geração distribuída às redes de distribuição,* Universidade Estadual Paulista, Faculdade de

Engenharia de Ilha Solteira, Spain.

[68] Severino M., (2008). *Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para o atendimento a comunidades isoladas da Amazônia,* Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade de Brasilia, Brasil.

[69] Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., (2016). «Grid-connected PV Monitoring System(GCPV-MS),» *Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), 2016 4th International Symposium*, 2016, Serbia, Belgrade.

[70] *EN50438 - Requirements for the Connection of Micro Generators in Parallel With Public Low Voltage Distribution Networks*, European Committee for Electro technical Standardization, 2007.

[71] Dugan R., McGranaghan M., Santoso S., Beaty H., (2012). Electrical Power System Quality, 3th Edition, McGraw-Hill, NewYork, USA.

[72] Yang Y., Zhou K., Blaabjerg F., (2013). «Harmonics Suppression for Single-phase Grid-Connected PV Systems in Different Operation Modes,» *Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 28th Annual IEEE*, 2013, CA, USA.

[73] Akagi H., Watanabe E., Aredes M., (2007). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, 1st edition, IEEE Press, John Wiley and Sons, NewJersey, USA.

[74] Ahmad K., Rahim N., Selvaraj J., Rivai A., Chaniago K., (2013). «An effective passive islanding detection method for PV single-phase grid-connected inverter,» *Solar Energy*, 97, 155-167.

[75] Khamis A., Shareef H., Bizkevelci E., Khatib T., (2013). «A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 483-493.

[76] Zeineldin H., Salama M., (2011). «Impact of Load Frequency Dependence on the NDZ and Performance of the SFS Islanding Detection Method,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 58(1), 139-146.

[77] Moradzadeh M., Rajabzadeh M., Bathaee M., Novel A., (2008). «Hybrid islanding detection method for distributed generations,» *Third international conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies*, 2008, China.

[78] Hanif M., Basu M., Gaughan K., (2011). «A Discussion of Anti-islanding Protection Schemes Incorporated in a Inverter Based DG,» *School of Electrical and Electronic Engineering Conference Papers*, 2011, Dublin.

[79] Kalogirou S., (2014). Solar Energy Engineering Processes and Systems, 2nd Edition, Elsevier - Academic Press.

[80] Foster R., Ghassemi M., Cota A., (2010). Solar Energy: Renewable Energy and the Environment, A. Ghassemi Editor, CRC Press, FL, USA.

[81] Glunz S., Preu R., Biro D., (2012). «Crystalline Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and Future Developments,» *Comprehensive Renewable Energy*, A. Sayigh Editor, Elsevier.

[82] Goetzberger A., Knobloch J., Vob B., (1998). Crystalline Silicon Solar Cells, John Wiley & Sons, Stutgart, Germany.

[83] Friedrich J., (2016). «Methods for Bulk Growth of Inorganic Crystals: Crystal Growth,» *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier.

[84] Jestin Y., (2012). «Down-Shifting of the Incident Light for Photovoltaic Applications,» *Comprehensive Renewable Energy*, cilt 1, A. Sayigh Editor, Elsevier.

[85] Hirst L., (2012). «Principles of Solar Energy Conversion,» *Comprehensive Renewable Energy*, cilt 1, A. Sayigh Editor, Elsevier.

[86] Green M., Dunlop E., Levi D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Ho-Baillie A., (2019). «Solar cell efficiency tables (version 54),» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565-575.

[87] Chen H., Chang L., Jeng M., Lai C., (2011). «Characterization of laser carved micro channel polycrystalline silicon solar cell,» *Solid-State Electronics*, 61(1), 23-28.

[88] Mah O., (1998). «Fundamentals of Photovoltaic Materials,» National Solar Power Reasearch Institute, Inc..

[89] Bayod-Rújula A., (2019). «Solar photovoltaics (PV),» *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*, Academic Press - Elsevier.

[90] Chen C., (2011). Physics of Solar Energy, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.

[91] Britt J., Ferekides O., (1993). «Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency,» *Applied Physics Letters*, 62, 2851-2852.

[92] Mathew X., Enriquez J., (2000). «Temperature dependence of the optical transitions in CdTe thin film – investigation with photoresponse spectra,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 63, 347-354.

[93] Chopra K., Das S., (1983). Thin Film Solar Cells, Plenum Press, NewYork, USA.

[94] Burgelman M., (2006). «Cadmium Telluride Thin Film Solar Cells: Characterization, Fabrication and Modeling,» *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*, V. A. J. Poortmans Editor, John Wiley & Sons, England.

[95] Wu X., Keane J., Dhere R., DeHart C., Duda A., Gessert T., Asher S., Levi D., Sheldon P., (2002). «16.5 %-efficient CdS/CdTe polycrystalline thin film solar cell,» *Proceeding 17th European Photovoltaic*, 2002, Munih Germany.

[96] Chopra K., Paulson P., Dutta V., (2004). «Thin-film solar cells: an overview,» *Progress in Photovoltaics*, 12, 69-92.

[97] Powalla M., Bonnet D., (2007). «Thin-film solar cells based on polycrystalline compound semiconductors CIS and CdTe,» *Advances in Optoelectronics,* cilt 2007, 97545.

[98] Stanbery B.J., (2002). «Copper indium selenides and related materials for photovoltaic devices,» *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 27, 73-117.

[99] Shay J., Wagner S., (2007). «Efficient CuInSe2/CdS solar cells,» *Applied Physics Letters*, 27, 89-90.

[100] Rosa A., (2013). «Chapter 14 - Photovoltaic Converters,» *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, Third Edition, Elsevier-Academic Press.

[101] Purabgola A., Kandasubramanian B., (2020). «Ch.3 - Thin films for planar solar cells of organic-inorganic perovskite composites,» *Hybrid Perovskite Composite Materials Design to Applications*, Woodhead Publishing.

[102] Belyakov N., (2020). Sustainable Power Generation Current Status, Future Challenges, and Perspectives, Elsevier - Academic Press.

[103] Akınoğlu B., Tuncel B., Badescu V., (2021). «Beyond 3rd generation solar cells and the full spectrum project. Recent advances and new emerging solar cells,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101287.

[104] Krauter S., (2006). Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy

Systems, Springer, Netherlands.

[105] «Questions & Answers Ground-Mounted Solar Photovoltaic Systems,» www.mass.gov/eea/docs/doer/renewables/solar/solar-pv-guide.pdf. [Erişim Tarihi: 20.07.2021].

[106] Zhang D., Allagui A., (2021). «Fundamentals and performance of solar photovoltaic systems,» *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*, M. Assad ve M. Rosen Editors, Elsevier - Academic Press, U.S.A., United Kingdom.

[107] Javed A., (2014). «The Effect of Temperatures on the Silicon Solar Cell,» *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, 14(643), 305-308.

[108] Evans D., Florschuetz L., (1977). «Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration,» *Solar Energy*, 19, 255-262.

[109] Dubey S., Sarvaiya J., Seshadri B., (2013). «Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review,» *Energy Procedia*, 33, 311-321.

[110] Garg H., Agarwal R., (1995). «Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells,» *Energy Conversion and Management*, 36, 87-99.

[111] Evans D., Florschuetz L., (1978). «Terrestrial concentrating photovoltaic power system studies,» *Solar Energy*, 20, 37-43.

[112] Aghaei M., Eskandari A., Vaezi S., Chopra S., (2020). «Solar PV power plants,» *Photovoltaic Solar Energy Conversion Technologies, Applications and Environmental Impacts*, S. Gorjian ve A. Shukla Editors, Academic Press.

[113] Zhang Y., Dun T., Du J., Liu X., Li H., Dong Q., Liu T., Huang Y., Jia H., Mai

Y., (2013). «How double-glass laminated amorphous silicon solar modules break in the field: A case study,» *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013, FL,USA.

[114] Kim H., Verboncoeur J., (2007). «Reflection, absorption and transmission of TE electromagnetic waves propagation in a nonuniform plasma slab,» *Computer Physics Communications*, 177, 118-121.

[115] Lee S., Choi S., Yi J., (2000). «Double-layer anti-reflection coating using MgF2 and CeO2 films on a crystalline silicon substrate,» *Thin Solid Films*, 376, 208-213.

[116] Ali K., Khan S., MatJafri M., (2014). «Effect of Double Layer (SiO2/TiO2) Anti-reflective Coating on Silicon Solar Cells,» *Int. Journal of Electrochem. Sci.*, 9, 7865-7874.

[117] Pop S., Abbaraju V., Brophy B., Yang Y., Maghsoodi S., Gonsalves P., (2014). «A Highly Abrasive-Resistant, Long-Lasting Anti Reflective Coating for PV Module Glass,» *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, USA.

[118] Sutha S., Suresh S., Raj B., Ravi K., (2017). «Transparent alumina based superhydrophobic self–cleaning coatings for solar cell cover glass applications,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 165, 128-137.

[119] Yu S., Guo Z., Liu W., (2015). «Biomimetic transparent and superhydrophobic coatings: from nature and beyond nature,» *Chemical Communication*, 51(10), 1775-1794.

[120] Jeong S., Kim J., Kim B., Shim S., Lee B., (2004). «Characterization of SiO2 and TiO2 filmsprepared using rf magnetron sputtering and their application to anti-reflection coating,» *Vacuum*, 76, 507-515.

[121] Khan S., Wu H., Pan C., Zhang Z., (2017). «A Mini Review: Antireflective Coatings Processing Techniques, Applications and Future Perspective,» *Research Reviews: Journal of Material Science,* 5(4), 36-54.

[122] Nayshevsky I., Xu Q., Barahman G., Lyons A., (2017). «Anti-reflective and anti-soiling properties of a KleanBoost™, a superhydrophobic nano-textured coating for solar glass,» *45th IEEE-PVSC 2018 Conference,* 2017, USA.

[123] «International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) Results,» (2014). ITRPV, https://resources.solarbusinesshub.com/images/reports/37.pdf

[124] Raut H., Ganesh V., Nair A., Ramakrishna S., (2011). «Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review,» *Energy & Environmental Science,* 4, 3779-3804.

[125] Nubile P., (1999). «Analytical design of antireflection coatings for silicon photovoltaic devices,» *Thin Solid Films,* 342, 257-261.

[126] Macleod H., (2001). Thin-Film Optical Filters, 4th Edition, Taylor & Francis.

[127] Hedayati M., Elbahri M., (2016). «Antireflective Coatings: Conventional Stacking Layers and Ultrathin Plasmonic Metasurfaces, A Mini-Review,» *Materials,* 9(6), 497-519.

[128] «U.S. NASA Science - visible light,» https://science.nasa.gov/ems/09_visiblelight. [Erişim Tarihi: 20.7.2021].

[129] Kim M., Kang T., Kim S., Jung E., Park H., Seo J., Lee S., (2019). «Antireflective, self-cleaning and protective film by continuous sputtering of a plasma polymer on inorganic multilayer for perovskite solar cells application,» *Solar Energy Materials and Solar Cells,* 191, 55-61.

[130] Asghar M., Placido F., Naseem S., (2007). «Reactively evaporated multilayer antireflection coatings for Ge optical window,» *Journal of. Phys. D: Appl. Phys.,*

40, 2065-2070.

[131] Chunder A., Etcheverry K., Wadsworth S., Boreman G., (2009). «Fabrication of anti-reflection coatings on plastics using the spraying layer-by-layer self-assembly technique,» *Journal of the Society for Information Display*, 14(4), 389-395.

[132] Lennie A., Abdullah H., Shaari S., Sopian K., (2009). «Fabrication of Single Layer SiO2 and Si3N4 as Antireflection Coating on Silicon Solar Cell Using Silvaco Software,» *American Journal of Applied Sciences*, 6(12), 2043-2049.

[133] Neander M., Gromball F., Neumann D., Harder N., Nositschka W., (2006). «Anti-Reflective-Coating Tuned for Higher Solar Module Voltage,» *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, USA.

[134] Sakka S., (2013). «Sol–Gel Process and Applications,» *Handbook of Advanced Ceramics Materials, Applications, Processing, and Properties*, Second Edition, Academic Press - Elsevier.

[135] Molinari R., Argurio P., Bellardita M., Palmisano L., (2017). «Photocatalytic Processes in Membrane Reactors,» *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, Second Edition, cilt 3, E. Drioli, L. Giorno ve E. Fontananova Editors, Elsevier.

[136] Yadav S., Yadav A., (2020). «Chapter 18 - Biological and physicochemical combination processes,» *Nanomaterials for Air Remediation- Micro and Nano Technologies*, Elsevier.

[137] Kicschkat J., Peters S., Gruska B., Semtsiv M., Chashnikova M., Klinkmüller M., Fedosenko O., Machulik S., Aleksandrova A., Monastyrskyi G., Flores Y., Masselnk W., (2012). «Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride,» *Appl. Opt.*, 51(28), 6789-6798.

[138] Pakhuruddin M., Yusof Y., Ibrahim K., AbdulAziz A., (2013). «Fabrication and characterization of zinc oxide anti-reflective coating on flexible thin film microcrystalline silicon solar cell,» *Optik*, 124, 5397-5400.

[139] Wood D., Nassau K., (1982). «Refractive index of cubic zirconia stabilized with yttria,» *Applied Optics*, 21(16), 2978-2981.

[140] Garshin A., Shvaikovskii V., (1998). «Theoretical analysis of defect formation processes in silicon nitride,» *Refract Ind. Ceram.*, 39, 169-176.

[141] Reddy A., Reddy G., Sivanjineyulu V., Jayaramudu J., Varaprasad K., Sadiku E.R., (2016). «Chapter 17 - Hydrophobic/Hydrophilic Nanostructured Polymer Blends,» *Design and Applications of Nanostructured Polymer Blends and Nanocomposite Systems - Micro and Nano Technologies*, William Andrew Publishing.

[142] Ebelmen, (1946). *Annales de Chimie et de Physique*, 3(57), 319.

[143] Brinker C., Hurd A., (1994). «Fundamentals of sol-gel dip-coating,» *Journal de Physique III*, 4(7), 1231-1242.

[144] Walheim S., (1999). «Nanophase-Separated Polymer Films as High-Performance Antireflection Coatings,» *Science*, 283(5401), 520-522.

[145] Barroso G., Li Q., Bordia R., Motz G., (2019). «Polymeric and ceramic silicon-based coatings – a review,» *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 1936-1963.

[146] Kumar D., Kumar B., Mahesh H., (2018). «Chapter 3 - Quantum Nanostructures (QDs): An Overview,» *Synthesis of Inorganic Nanomaterials - Advances and Key Technologies - A volume in Micro and Nano Technologies*, S. Bhagyaraj, O. Oluwafemi, N. Kalarikkal ve S. Thomas Editors, Woodhead Publishing.

[147] Perednis D., Gauckler L., (2005). «Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis,»

Journal of Electroceramics, 14, 103-111.

[148] Wheeler D.W., (2006). «Chemical vapour deposition methods for protection against wear,» *Surface Coatings for Protection Against Wear,* B. Mellor Editor, Woodhead Publishing.

[149] Taher F., Abdeltwab E., (2019). «Chapter-3 Chemical Approaches for 1D Oxide Nanostructures,» *Nanomaterials Synthesis Design, Fabrication and Applications Micro and Nano Technologies*, Y. Pottathara, S. Thomas, N. Kalarikkal, Y. Grohens, V. Kokol Editors, Elsevier.

[150] Raut H., Nair A., Dinachali S., Ganesh V., Walsh T., Ramakrishna S., (2013). «Porous SiO2 anti-reflective coatings on large-area substrates by electrospinning and their application to solar modules,» *Solar Energy Materials and Solar Cell,* 111, 9–15.

[151] Cao X., Wang N., Law J., Loo S., Magdassi S., Long Y., (2014). «Nanoporous Thermochromic VO2 (M) Thin Films: Controlled Porosity, Largely Enhanced Luminous Transmittance and Solar Modulating Ability,» *ACS Langmuir,* 30(6), 1710–1715.

[152] Mahadik D., Lakshmi R., Barshilia H., (2015). «High performance single layer nano-porous anti reflection coatings on glass by sol–gel process for solar energy applications,» *Solar Energy Materials & Solar Cells,* 140, 61-68.

[153] Wang N., Fang J., Zhang X., Wang G., Wang L., Liu C., Zhao H., Chen Z., Chen X., Sun J., Zhao Y., (2014). «Combined SiO2 antireflective coatings with MOCVD-ZnO:B to improve light absorption in thin-film solar cells,» *Solar Energy Materials & Solar Cells,* 130, 420-425.

[154] Falcaro P., Malfatti L., Kidchob T., Giannini G., Falqui A., Casula M., Amenitsch H., Marmiroli B., Grenci G., Innocenzi P., (2008). «Hierarchical Porous Silica Films with Ultralow Refractive Index,» *Chem. Mater.,* 21, 2055-2061.

[155] Bernsmeier D., Polte J., Ortel E., Krahl T., Kemnitz E., Kraehnert R., (2014). «Antireflective Coatings with Adjustable Refractive Index and Porosity Synthesized by Micelle-Templated Deposition of MgF2 Sol Particles,» *ACS Applied Materials Interfaces,* 6(22), 19559-19565.

[156] Lee H., Song M., Jurng J., Park Y.-K., (2011). «The synthesis and coating process of TiO2 nanoparticles using CVD process,» *Powder Technology,* 214(1), 64-68.

[157] Ganesh V., Nair A., Raut H., Walshc T., Ramakrishna S., (2012). «Photocatalytic superhydrophilic TiO2 coating on glass by electrospinning,» *RCS Advances,* 2, 2067-2072.

[158] Guo X., Liu Q., Li C., Zhou H., Lv B., Feng Y., Wang H., Liu W., (2015). «Optimization of broadband omnidirectional antireflection coatings for solar cells,» *Cornell University Arxiv Physics Optics*.

[159] Zhang H., Hu X., Sun Y., Zheng Y., Yan L., Jiang B., Chen H., Zhang X., (2016). «Design and sol-gel preparation of six-layer tri-wavelength ORMOSIL antireflective coating for high power laser sys,» *RCS. Adv.*, 6, 31769-31774.

[160] Kaminski P., Womack G., Walls J., (2014). «Broadband Anti-Reflection coatings for Thin Film Photovoltaics,» *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, Denver, USA.

[161] Womack G., Kaminski P., Walls J., (2015). «High temperature stability of broadband Anti-Reflection coatings on soda lime glass for solar modules,» *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015, USA.

[162] Huang Q., Fang Y., Liu P., Zhu Y., Shi J., Xu G., (2018). «A novel strategy for durable superhydrophobic coating on glass substrate via using silica chains to fix silica particles,» *Chemical Physics Letters,* 692, 33-37.

[163] Wu Y., Zhao M., Guo Z., (2017). «Robust, heat-resistant and multifunctional

superhydrophobic coating of carbon microflowers with molybdenum trioxide nanoparticles,» *J. Colloid Interf. Sci.,* 506, 649-658.

[164] Wang Z., Zhu H., Cao N., Du R., Liu Y., Zhao G., (2017). «Superhydrophobic surfaces with excellent abrasion resistance based on benzoxazine/mesoporous SiO2,» *Mater. Lett.,* 186, 274-278.

[165] Martin S., Bhushan B., (2017). «Transparent, wear-resistant, superhydrophobic and superoleophobic poly (dimethylsiloxane) (PDMS) surfaces,» *J. Colloid Interface Sci.,* 488, 118-126.

[166] Ye H., Zhu L., Li W., Liu H., Chen H., (2017). «Constructing fluorine-free and cost-effective superhydrophobic surface with normal alcohols modified hydrophobic SiO2 nanoparticles,» *ACS Appl. Mater. Interfaces,* 9, 858-867.

[167] Yang J., Tang Y., Xu J., Chen B., Tang H., Li C., (2015). «Durable superhydrophobic/superoleophilic epoxy/attapulgite nanocomposite coatings for oil/water separation,» *Surf. Coat. Tech.,* 272, 285-290.

[168] Bai X., Xue C., Jia S., (2016). «Surfaces with sustainable superhydrophobicity upon mechanical abrasion,» *ACS Appl. Mater. Interf.,* 8, 28171-28179.

[169] Hao L., Gao T., Xu W., Wang X., Yang S., Liu X., (2016). «Preparation of crosslinked polysiloxane/SiO2 nanocomposite via in-situ condensation and its surface modification on cotton fabrics,» *Appl. Surf. Sci.,* 371, 281-288.

[170] Isbilir K., Maniscalco B., Gottschalg R., Walls J., (2017). «Test Methods for Hydrophobic Coatings on Solar Cover Glass,» *44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC),* 2017, USA.

[171] Dodiuk H., Rios P., Dotan A., Kenig S., (2007). «Hydrophobic and self-cleaning coatings,» *Polym. Adv. Technol.,* 18(April), 746-750.

[172] Parkin I., Palgrave R., (2005). «Self-Cleaning coatings,» *J. Mater. Chem.,* 15(17),

1689-1695.

[173] Barthlott W., Neinhuis C., (1997). «Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces,» *Planta,* 202, 1-8.

[174] Son J., Kundu S., Verma L., Sakhuja M., Danner J., Bhatia C., Yang H., (2012). «A practical superhydrophilic self cleaning and antireflective surface for outdoor photovoltaic applications,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells,* 98, 46-51.

[175] Thompson C., Fleming R., Zou M., (2013). «Transparent self-cleaning and antifogging silica nanoparticle films,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells,* 115, 108-113.

[176] Ahmad M., Eshaghi A., (2018). «Fabrication of antireflective superhydrophobic thin film based on the TMMS with self-cleaning and anti-icing properties,» *Progress in Organic Coatings,* 122, 199-206.

[177] Sutha S., Suresh S., Raj B., Ravi K., (2017). «Transparent alumina based superhydrophobic self–cleaning coatings for solar cell cover glass applications,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells,* 165, 128-137.

[178] Zhi J., Zhang L., (2018). «Durable superhydrophobic surface with highly antireflective and self-cleaning properties for the glass covers of solar cells,» *Applied Surface Science,* 454, 239–248.

[179] Chen Y., Huang Z., Yang H., (2015). «Cicada-Wing-Inspired Self-Cleaning Antireflection Coatings on Polymer Substrates,» *ACS Appl Mater Interfaces,* 7(45), 25495-25505.

[180] Ji H., Chen G., Yang J., Hu J., Song H., Zhao Y., (2013). «A simple approach to fabricate stable superhydrophobic glass surfaces,» *Applied Surface Science,* 266, 105-109.

[181] Lin Z., Wang J., (2014). Low-cost Nanomaterials Toward Greener and More

Efficient Energy Applications, Springer, UK.

[182] Muller A., A´Vıla M., Saenz G., Salazar J., (2015). «Chapter: Crystallization Of PLA-Based Materials,» *Poly(Lactic Acid) Science And Technology Processing, Properties, Additives And Applications,* The Royal Society Of Chemistry(RCS), UK.

[183] J. C. I. M. C.M.B. Goncalves, (2010). «Chapter: Optical Properties,» *Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, And Applications,* John Wiley & Sons.

[184] Bernardoa V., Leona J., Pintob J., Catelanic T., Athanassioub A., Rodriguez-Perez M.A., (2019). «Low-density PMMA/MAM nanocellular polymers using low MAM contents: Production and characterization,» *Polymer,* 163, 115-124.

[185] Södergard A., Stolt M., (2002). «Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition,» *Progress in Polymer Science,* 27, 1123-1163.

[186] Türkiye Elektrik İletim A.Ş., (2020). «Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu,» T.E.İ.A.Ş., 2020.

[187] Yu N., Xiao X., Ye Z., Pan G., (2018). «Facile preparation of durable superhydrophobic coating with self-cleaning property,» *Surface& Coating Technology,* 347, 199-208.

[188] Zhong M., Zhang Y., Li X., Wu X., (2018). «Facile fabrication of durable superhydrophobic silica/epoxy resin coatings with compatible transparency and stability,» *Surface & Coatings Technology,* 347, 191-198.

[189] Ganesh I., Gupta A., Kumar P., Sekhar P., Radha K., Padmanabham G., Sundararajan G., (2012). «Preparation and Characterization of Ni-Doped TiO2 Materials for Photocurrent and Photocatalytic Applications,» *The Scientific World Journal,* pp. 127326-127342.

[190] Ganesh I., (2017). «Effects of phosphorus-doping on energy band-gap, structural, surface, and photocatalytic characteristics of emulsion-based sol-gel derived TiO2 nano-powder,» *Applied Surface Science,* 414, 277-291.

[191] Liu Z., Sun D., Guo P., Leckie J., (2007). «An Efficient Bicomponent TiO2/SnO2 Nanofiber Photocatalyst Fabricated by Electrospinning with a Side-by-Side Dual Spinneret Method,» *Nano Letters,* 7(4), 1081-1085.

[192] Li D., Xia Y., (2003). «Fabrication of Titania Nanofibers by Electrospinning,» *Nano Letters,* 3(4), 555-560.

[193] Tricoli A., Righettoni M., Pratsinis S., (2009). «Anti-Fogging Nanofibrous SiO2 and Nanostructured SiO2-TiO2 Films Made by Rapid Flame Deposition and In Situ Annealing,» *Langmuir,* 25(21), 12578-12584.

[194] Cebeci F., Wu Z., Zhai L., Cohen R., Rubner M., (2006). «Nanoporosity-Driven Superhydrophilicity: A Means to Create Multifunctional Antifogging Coatings,» *Langmuir,* 22(6), 2856-2862.

[195] Bayer I., Tiwari M., Megarid C., (2008). «Biocompatible poly(vinylidene fluoride)/cyanoacrylate composite coatings with tunable hydrophobicity and bonding strength,» *Appl. Phys. Lett.,* 93(17), 173908.

ÖZGEÇMİŞ

1. **Adı Soyadı** **:** Ali Samet SARKIN
2. **Unvanı** **:** Öğretim Görevlisi (M.Sc.)
3. **Öğrenim Durumu:**

Derece	**Alan**	**Okul**	**Yıl**
Lise	Elektrik	Yakacık Anadolu Teknik Lisesi	2005
Lisans	Elektrik Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2010
Lisans	Endüstri Mühendisliği	Hoca Ahmet Yesevi Uluslararası Türk-Kazak Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	Elektrik Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2013
Doktora	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2015-Devam

4. **Yayınlar**

4.1. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. DİNDAR T., **SARKIN A. S.**, ÖZDEMİR N. C., "Renewable Energy Resources Potential In Turkey, Production And Consumption". Applied Researches In Technics, Technologies And Education, 5(1), 44-51., 2017, Doi: 10.15547
2. **SARKIN A. S.**, DİNDAR T., "The Effect Of Latitude Differences, Sunshine Periods, Solar Radiation Quantities And Air Temperatures On Solar Electricity Generation", Transactions On Smart Grid And Sustainable Energy, 1(1), 20-23, 2017.

3. **SARKIN A. S.**, EKREN N., SAĞLAM Ş., "A Review Of Anti-Reflection And Self-Cleaning Coatings On Photovoltaic Panels", Solar Energy, 199, 63-73., 2020, Doi: 10.1016/J.Solener.2020.01.084

4.2. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. DİNDAR T., BEKTAŞ Y., MUTLU A., **SARKIN A. S.**. "Piezo Elektrik ile Temiz Enerji Elde Edilmesi ve Metrolarda Aydınlatılmanın Sağlanması", 1st International Symposium On Multidisciplinary Studies And Innovative Technologies, 152-153, Özet Bildiri, 2017, Tokat.
2. BEKTAŞ Y., DİNDAR T., MUTLU A., **SARKIN A. S.**. "Ofislerde Aydınlatma Kontrol Sisteminin Enerji ve Çevre Performanslarının Değerlendirilmesi", 1st International Symposium On Multidisciplinary Studies And Innovative Technologies, 239-242, Tam Metin Bildiri, 2017, Tokat.
3. DİNDAR T., **SARKIN A. S.**, ÖZDEMİR N. C.. "Fault Detection And Prevention With Thermal Cameras On Electrical Lines And Components", 8th International Advanced Technologies Symposium, 532-538, Tam Metin Bildiri, 2017, Elâzığ.
4. **SARKIN A. S.**, SAĞLAM Ş.. "PV Güç Sistemlerinin Şebekeye Bağlanmasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Yöntemleri", 8th International Advanced Technologies Symposium, Tam Metin Bildiri, 2017, Elâzığ.
5. EYİMAYA S. E., DİNDAR T., **SARKIN A. S.**, HÜNER E.. "Güneş Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi ve PV Güç Sistemi Modellenmesi", Uluslararası Mesleki Bilimler Sempozyumu, 253-254. Özet Bildiri, 2017, Antalya.
6. DİNDAR T., EYİMAYA S. E., HÜNER E., **SARKIN A. S.**. "Meslek Yüksekokullarında Uygulamalı Eğitim Modeli (UYEM)", Uluslararası Mesleki Bilimler Sempozyumu, 195-196. Özet Bildiri, 2017, Antalya.
7. **SARKIN A. S.**, KEREM A.. "Afet ve Acil Durumlarda Elektrik Enerjisi İhtiyacının Modüler Fotovoltaik Paneller ile Karşılanması; Orman Yangını Örneği", International Mediterranean Science And Engineering

Congress(IMSEC), Poster, 2016, Adana.

8. **SARKIN A. S.**, GÖRGÜLÜ S.. "Güvenli Katı Atık Konteyneri ve Toplama Sistemi Tasarımı", International Mediterranean Science And Engineering Congress(IMSEC), Tam Metin Bildiri, 2016, Adana.

4.3. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. **SARKIN A. S.**, Cadde ve Sokak Aydınlatmasında Enerji Tasarrufu Yöntemi Olarak LED Armatürlerin İncelenmesi", Yüzey İşlemler (106), 62-71, 2016.
2. EYİMAYA S. E., DİNDAR T., **SARKIN A. S.**, HÜNER E., "Güneş Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi ve PV Güç Sistemi Modellenmesi", Mesleki Bilimler Dergisi, 6(3), 363-368, 2017.
3. DİNDAR T., EYİMAYA S. E., HÜNER E., **SARKIN A. S.,** "Meslek Yüksekokullarında Uygulamalı Eğitim Modeli (UYEM)", Mesleki Bilimler Dergisi, 6(3), 369-373, 2017.

5. Projeler:

1. T.C. Kalkınma Bakanlığı Sosyal Destek Programı, "Gençler Bilişimde Devleşiyor" Projesi (Proje No:2015-080-0133), Eğitmen: **SARKIN A. S.**, 01/10/2015 - 30/09/2016 (ULUSAL).

6. Çalışma Alanları:

1. Yenilenebilir enerji kaynakları
2. Fotovoltaik enerji sistemleri
3. Elektrik enerjisi üretimi-iletimi ve dağıtımı