



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**FOTOVOLTAİK MODÜLLERDE ELEKTROSTATİK
TEMİZLEME YÖNTEMİYLE TOZLANMA
KAYIPLARININ AZALTILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Harun GÜMÜŞ

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

İzmir
2020

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**FOTOVOLTAİK MODÜLLERDE ELEKTROSTATİK
TEMİZLEME YÖNTEMİYLE TOZLANMA
KAYIPLARININ AZALTILMASI**

HARUN GÜMÜŞ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ METE ÇUBUKÇU

**GÜNEŞ ENERJİSİ ANABİLİM DALI
ENERJİ TEKNOLOJİSİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**İZMİR
2020**

KABUL ONAY SAYFASI

Harun GÜMÜŞ tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Fotovoltaik Modüllerde Elektrostatik Temizleme Yöntemiyle Tozlanma Kayıplarının Azaltılması” başlıklı bu çalışma, EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 27.11.2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:**İmza:**

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Hayati OLGUN

Raportör Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mete ÇUBUKÇU

Üye : Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Fotovoltaik Modüllerde Elektrostatik Temizleme Yöntemiyle Tozlanma Kayıplarının Azaltılması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

27/11/2020

İmzası

Harun GÜMÜŞ



ÖZET**FOTOVOLTAİK MODÜLLERDE ELEKTROSTATİK TEMİZLEME YÖNTEMİYLE TOZLANMA KAYIPLARININ AZALTILMASI**

GÜMÜŞ, Harun

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mete ÇUBUKÇU

Kasım 2020, 69 sayfa

Bu tez kapsamında, fotovoltaik panellerin üzerinde oluşan tozlanma ve bu tozlanmayı gidermek adına kullanılan elektrostatik temizleme tekniği ele alınmıştır. Bu çalışmada, öncelikle toz oluşum sebepleri ve tozun panel üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ardından, temizleme yöntemlerinden bahsedilmiştir ve elektrostatik temizleme yöntemi değerlendirilmiştir. Oluşturulan elektrostatik temizleme sisteminde, bakır iletkenlerle ızgara şeklinde bir yapı tasarlanmıştır. İletkenler, bu yapıda, birbirine artı ve eksi kutuplar dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sonrasında, iletkenlere yüksek gerilim verilerek ve panel yüzeyinde elektrostatik alan oluşturularak temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu temizleme işleminin değişkenleri gerilim, toz yoğunluğu ve temizleme işleminin süresi olarak belirlenmiştir. Öncelikle temizleme işleminin süresi belirlenmiştir. Süre arttıkça, temizleme veriminin de arttığı, ancak belirli bir noktadan sonra (3 dk.) bu artışın göz ardı edilebileceği tespit edilmiştir. Elektrostatik temizleme işlemi için makul süre belirlendikten sonra gerilim miktarının bu temizleme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gerilim miktarı yükseltildikçe, temizleme veriminin de arttığı tespit edilmiştir. 300 mg toz ve 3 dk. boyunca yapılan temizleme işlemlerinde bakır iletkenlere 2,5 kV, 3 kV ve 3,5 kV gerilim uygulanmıştır. Elde edilen temizleme verimleri sırasıyla % 59,52, % 71,39 ve % 83,36'dır. Son olarak, panel üzerindeki toz yoğunluğunun temizleme performansına etkisi değerlendirilmiştir. Toz yoğunluğu belirli bir miktarın altında veya belirli bir miktarın üstünde ise temizleme performansının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu temizleme sisteminin en büyük avantajı, temizleme işlemi sırasında su kullanılmaması ve panellere herhangi bir zarar verilmemesidir.

Anahtar sözcükler: Fotovoltaik, Fotovoltaik Güç Sistemleri, Fotovoltaik Panellerde Kirlilik Etkisi, Elektrostatik Temizleme.



ABSTRACT**MITIGATION OF SOILING LOSS ON PHOTOVOLTAIC
MODULES BY USING ELECTROSTATIC CLEANING**

GÜMÜŞ, Harun

Master's Thesis in Solar Energy

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mete ÇUBUKÇU

November 2020, 69 pages

Within the scope of this thesis, the dusting that occurs on photovoltaic panels and the electrostatic cleaning technique used to remove this dusting are discussed. In this study, firstly, the reasons of dust formation and the effects of the dust on the panel are examined. Then, cleaning methods were mentioned and electrostatic cleaning method was evaluated. In the electrostatic cleaning system created, a structure in the form of a grid with copper conductors was designed. Conductors are placed in this structure with the positive and negative poles perpendicular to each other. Afterwards, high voltage was applied by changing polarity with 1 Hz to the conductors and the cleaning process was performed by creating an electrostatic field on the panel surface. The variables of this cleaning process are determined as the voltage, the amount of dust and the duration of the cleaning process. First of all, the duration of the cleaning process was determined. It was determined that as the duration increases, the cleaning efficiency rises, but after a certain point (3 min.) this increase can be ignored. After determining a reasonable time for the electrostatic cleaning process, the effect of the amount of voltage on this cleaning was examined. It was found that higher voltage means better cleaning efficiency. 2.5 kV, 3 kV and 3.5 kV voltage was applied to copper conductors throughout 3 minutes with 300 mg dust on the panel. The cleaning efficiencies were 59.52 %, 71.39 % and 83.36 %, respectively. Finally, the effect of the amount of dust on the cleaning performance was evaluated. It was observed that the cleaning performance decreases if the amount of dust is below or above certain amount. The biggest advantage of this cleaning system is that no water is used during the cleaning process and no damage is caused to the panels.

Keywords: Photovoltaic, Photovoltaic Power Systems, Soiling Effects on Photovoltaic Panels, Electrostatic Cleaning.

ÖNSÖZ

Enerji, insan refahı ve mutluluğu açısından en önemli girdilerden birisidir. Çoğu zaman da bir gelişmişlik göstergesi olarak görülmektedir. Gerçekten de insan yaşamının hemen her alanında vazgeçilmez bir yere sahiptir. Buna karşın, günümüzde, enerji üretiminde kullanılan girdilere bağlı olarak birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların başında küresel ısınma ve iklim değişikliği gelmektedir. Bu konu bütün bir insanlığın bugününü ve geleceğini tehdit eder düzeydedir. İklim değişikliği şeklinde gelişen küresel tehditlerin en önemli nedeni, karbon salınımına bağlı olarak gelişen sera etkisidir. Sera etkisi, önemli ölçüde, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, temiz enerji kaynakları küresel ısınma ve iklim değişikliği perspektifinde çok önemli bir değer ifade etmektedir. Temiz enerji kaynakları arasında ise güneş enerjisi üretiminin ve veriminin artırılması konusundaki çalışmalar önemli bir yere sahiptir. Bu çerçevede, bu tez kapsamında, güneş enerjisi panellerinde ortaya çıkan verim kayıpları arasında gösterilen tozlanma sorununun çözümüne katkı yapabilecek bir araştırma konusu seçilmiştir.

Araştırma konusunun seçiminde, konu ile ilgili deney düzeneğinin oluşturulmasında, elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, sonuç olarak araştırmanın her aşamasında değerli katkıları ve yönlendirmesiyle yakın ilgisini gördüğüm danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi Mete ÇUBUKÇU'ya çok teşekkür ederim.

Araştırmanın deneysel düzeneği, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Fizik Bölümü laboratuvarlarında oluşturulmuştur. Laboratuvar altyapısı kullanılmıştır. Araştırma ile ilgili deney düzeneğinin oluşturulmasında ve test edilmesi aşamalarında her türlü katkıyı yapan KTÜ Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU'na minnetlerimi ifade etmek isterim.

İZMİR

HARUN GÜMÜŞ

08/09/2020



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	8
2.1.Tozlanma ve Toz Oluşumunu Etkileyen Faktörler	8
2.1.1. Çevresel faktörler.....	10
2.1.1.1.Kurulum bölgesi.....	10
2.1.1.2. Nem.....	11
2.1.1.3. Rüzgâr.....	13
2.1.1.4. Toz özellikleri.....	15
2.1.1.5. Yağış.....	16
2.1.2. Eğim açısı ve yönelim.....	16
2.1.3. Kaplama ve yüzey özellikleri.....	19
2.2. Tozlanmanın FV Panel Üzerindeki Etkileri.....	21
2.2.1. Gelen ışınımı azaltama ve gölgelenmeye sebep olma.....	21
2.2.2. Modül camında aşındırma.....	22
2.2.3. Panel sıcaklığını artırma.....	23
2.3.Temizleme Yöntemleri.....	26

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)

2.3.1. Geleneksel temizleme yöntemleri ve elektrosatik temizleme yöntemi.....	26
2.3.2. Elektrosatik temizleme yöntemi ve temizleme performansını etkileyen faktörler	27
2.3.2.1. Cam levhanın kalınlığı	28
2.3.2.2. Elektrotların yerleşim düzeni	29
2.3.2.3. Rüzgar etkisi	30
2.3.2.4. Yapışma kuvveti	31
2.3.2.5. Yüzeydeki toz yoğunluğu	32
2.3.2.6. Parçacık çapı	33
2.3.2.7. Uygulanan gerilim ve frekans	33
2.3.3. Güç tüketimi	34
2.4. Ekonomik değerlendirme	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM	39
4. BULGULAR	49
4.1. İşlem Süresi	49
4.2. Gerilim Miktarı	50
4.3. Toz Yoğunluğu	52
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	56
KAYNAKLAR DİZİNİ	58
TEŞEKKÜR	68
ÖZGEÇMİŞ	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Küresel fotovoltaik kurulu güç kapasitesi ve yıllara göre değişimi	1
1.2 Türkiye’de kurulu FVGS kapasitesinin (GW) değişimi.....	2
1.3 Farklı FV teknolojilerin laboratuvar ölçeğinde hücre/modül verimlerinin karşılaştırması.....	3
1.4. Farklı FV teknolojilerin pazar payı.....	4
1.5. Dünyadaki toz yoğunluğunun ülkelere göre dağılımı.....	6
2.1. FV modül üzerinde toz birikme nedenleri	9
2.2. Su köprüsü	11
2.3. Semantasyon oluşumu	12
2.4. Neme göre Adezyon kuvveti değişimi	13
2.5. Rüzgar hızı ve toz birikme süresinin etkileri	14
2.6. Eğim açısı	17
2.7. Eğim açısına göre toz birikim yoğunluğu	18
2.8. Kaplamalı ve kaplamasız panellerde toz kayıpları	20
2.9. Gelen ışınımı engelleme	21
2.10. Modül camında aşındırma	23
2.11. Toz yoğunluğuna göre cam sıcaklıkları	24
2.12. Sıcaklığa göre gerilim-akım ve güç-gerilim değişimi	25
2.13. Sıcak leke oluşumu	25
2.14. Elektrostatik temizleme sisteminin şematik gösterimi.....	27
2.15. Elektrostatik temizleme sisteminin enine kesit gösterimi	27
2.16. Cam levhanın kalınlığının temizleme performansına etkisi	29
2.17. V-şekli konfigürasyon açısı ile temizleme veriminin ilişkisi (20° eğim, 100g/m ² yüzey tozu, 0.86 kV _{p-p} /mm, 1Hz)	29
2.18. Rüzgârın yüzeyde biriken toz yoğunluğuna göre temizleme performansına katkısı.....	30
2.19. Anti-toz kaplamanın yapışma kuvveti üzerindeki etkisi.....	31
2.20. Yüzey birikimi ile temizleme verimini arasındaki ilişkinin ölçülen ve hesaplanan değerleri	32

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

2.21. Sınıflandırılan parçacık boyutlarına göre temizleme verimleri (100 g/m ² toz birikimi, 20° eğim açısı, 0.7 kV _{p-p} /mm, 0.2 Hz)	33
2.22. Gerilimin parçacık hareketi üzerine etkisi.....	34
2.23. Frekansın parçacık hareketi üzerine etkisi	34
2.24. Elektrostatik temizleme sisteminin uygulanan frekans ve gerilim değerine göre güç tüketimi	35
2.25. Panelin temizlik yapılmadan önceki ve temizlik yapıldıktan sonraki hali	36
2.26. Ekonomik analiz	38
3.1. Temizleme mekanizmasının önden (sol resim) ve arkadan (sağ resim) görünüşü	39
3.2 a- 1 Hz dalga üretici, b- Yüksek gerilim polarite değiştirici devre	40
3.3. Elektrostatik temizleme sisteminin gösterimi	41
3.4. Devre Şeması.....	43
3.5. Temizleme işlemi.....	45
3.6. SHIMADZU AY120 tartım aleti.....	46
3.7. Gerilim kaynağı.....	46
3.8. Test düzeneğinin uzaktan genel görünümü.....	47
3.9. Test düzeneğinin genel yakından görünümü	48
4.1. İşlem süresine göre temizleme verimi	50
4.2. Yüksek gerilim ve verim ilişkisi	52
4.3. Toz yoğunluğu ve verim ilişkisi.....	54
4.4. Gerilim ve toz yoğunluğunun elektrostatik temizleme verimi üzerine etkisi..	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Küresel Fotovoltaik Kapasitesi	5
2.1. Farklı eğim ve farklı yönelimlerde açılarında toz birikimi.....	19
4.1. İşlem süresine göre temizleme verimi.....	49
4.2. Uygulanan gerilime göre temizleme verimi	51
4.3. Toz yoğunluğunun temizleme verimine etkisi.....	53





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler Açıklama

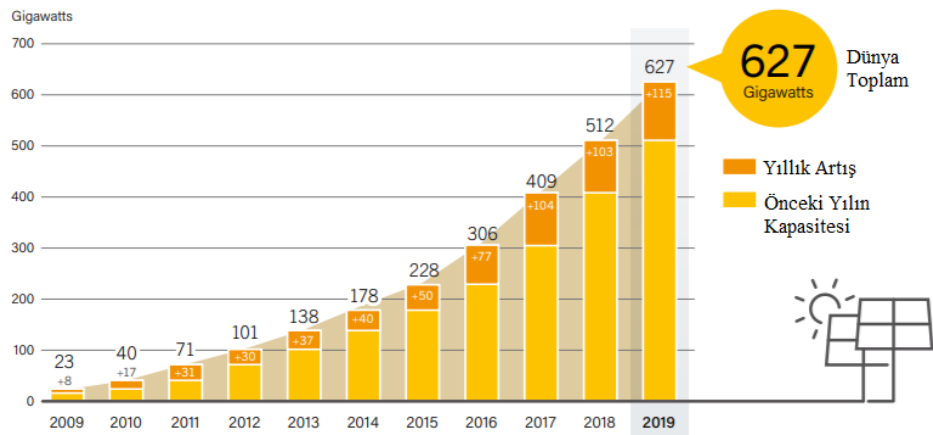
W	Watt
V	Volt
mA	Miliamper
FV	Fotovoltaik
FVGS	Fotovoltaik Güç Sistemleri
c-Si	Kristal silisyum
a/ μ m-Si	Amorf/mikromorf Silisyum
pc-Si	Çoklu Kristal Silisyum
nc-Si	Nanokristal Hücreler
CdTe	Kadmiyum Tellür
CPV	Odaklamalı Fotovoltaik Teknolojisi
DSSC	Boya Duyarlı Hücreler
TPV	Termofotovoltaik
HIT	Farklıklem Hücreler
ITO	İndiyum Kalay Oksit
C_{PL}	Elektrik Üretim Kaybı Maliyeti
C_{MA}	Temizleme Bakım Maliyeti
C_m	Materyal Maliyeti
C_{wf}	İşgücü Maliyetinin
T_M	Bakım Aktivitesinin Bakım Yapmaya Değer Zamanı
R_{inc}	kWh Başına Kurtarılan Her Üretim İçin Alınacak Teşviğin Değeri
R_s	kWh Başına Kurtarılan Her Üretimin Maddi Değeri
P_{gen}	Temiz Panel Tarafından Üretilen Güç (kW)
η_{corr_irr}	İnceleme Boyunca Gelen Işınım Değerinin Düzeltme Faktörü
η_{ineff}	Tozlanmadan Dolayı Verim Düşüm Oranı
DC	Doğru Akım



1. GİRİŞ

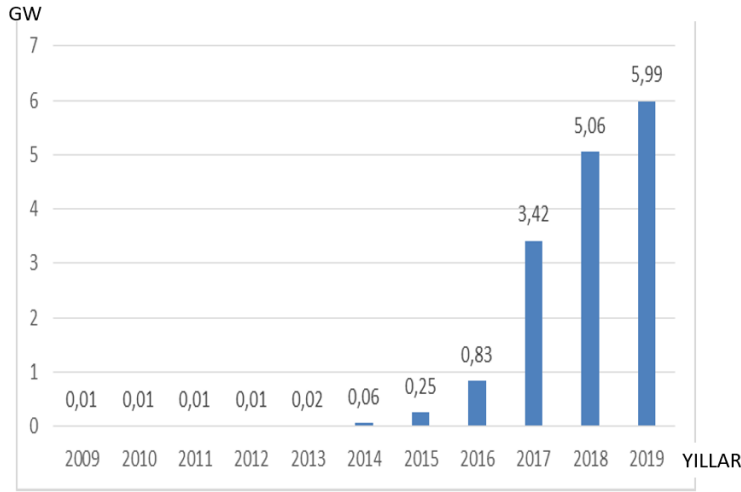
“Kalkınma” kavramı, en basit şekliyle, bir ülkede sosyal gelişmişlikle birlikte kişi başına gelirin artması olarak tanımlanabilir (Tolunay ve Korkmaz, 2003). Ülkelerin kalkınması için sanayi üretiminin artması gerekir. Bu durumda enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Enerji tüketimiyle kalkınma arasında bir ilişki olup, ekonomik gelişme ve refah arttıkça enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir (Arto et al, 2016; Asafu-Adjaye, 2000). Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır (Banda et al., 2019) Ancak fosil yakıt kullanımı hem fosil rezervlerin gelecekte tükenmesi hem de çevreye verdiği büyük zarar nedeniyle bazı endişeler barındırmaktadır (Adaramola and Vågnes, 2015; Stamford and Azapagic, 2014). Çevreye önemli ölçüde zarar veren bu kaynakların gelecek yıllarda yeni rezervler bulunmadığı takdirde de, tükenenleri öngörülmektedir (Höök and Tang, 2013; Shafiee and Topal, 2009). Bu nedenle alternatif enerji kaynaklarının kullanımı artık zorunlu hale gelmiştir. Son yıllarda yükseliş eğilimi gösteren güneş enerjisi, bu alanda en önemli alternatiflerden birisidir.

Güneş en ulaşılabilir enerji kaynağıdır. Fotovoltaik (FV) teknolojisi ile güneş enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Teknolojinin gelişmesi ve artan çevresel duyarlılıkla beraber, fotovoltaik teknolojisinin kullanımı günümüzde git gide artmaktadır. Küresel ölçekte fotovoltaik santral kurulu güç kapasitesi oldukça büyük bir artış göstermiştir. 2010 yılında sadece 40 GWp olan kurulu güç kapasitesi, 2019 yılı sonu itibari ile 627 GWp kurulu güce ulaşmıştır (REN21, 2020).



Şekil 1.1. Küresel fotovoltaik kurulu güç kapasitesi ve yıllara göre değişimi (REN21, 2020).

Fotovoltaik Güç Sistemleri (FVGS) sektörünün küresel ölçekte büyümesine benzer bir gelişme de, Türkiye fotovoltaik sektöründe görülmektedir. Son 10 yıl içerisinde, Türkiye’de kurulu FVGS kapasitesinin değişimi Şekil 1.2’de gösterilmektedir. 2016 yılı itibariyle sektörde hızlı bir gelişme yaşanmıştır ve 2019 yılsonu itibariyle kurulu FVGS güç kapasitesi 6 GWp değerine ulaşmıştır.



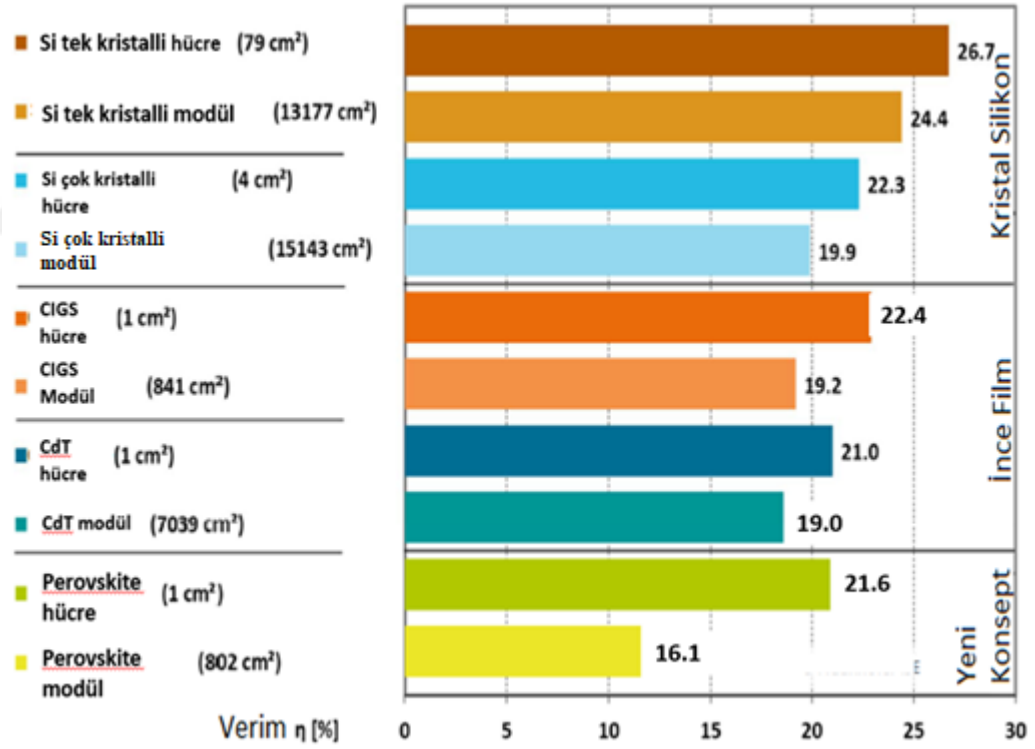
Şekil 1.2. Türkiye’de kurulu FVGS kapasitesinin (GWp) değişimi (Enerji Portalı, 2020).

Fotovoltaik teknoloji kendi içinde de farklı teknolojilere ayrılmaktadır. Bu teknolojiler şöyle sınıflandırılmaktadır:

1. Dilim tabanlı kristal silisyum teknolojisi (c-Si)
 - i. Tek kristal silisyum teknolojisi
 - ii. Çok kristal silisyum teknolojisi
2. İnce film teknolojileri
 - i. İnce film silisyum teknolojisi: Amorf/mikromorf silisyum (a/ μ m-Si)
 - ii. Kadmiyum Tellür ince film teknolojisi (CdTe)
 - iii. Bakır-İndiyum/Galyum diSelenid/disülfüt ince film teknolojisi.
3. Odaklamalı Fotovoltaik (CPV) teknolojisi
4. Yeni ve Gelişen FV Hücre Teknolojileri
 - i. Perovskite

- ii. Organik fotovoltaikler
- iii. Boya duyarlaştırıcı hücreler (DSSC)
- iv. Çok kristalli hücreler (pc-Si)
- v. Nanokristal hücreler (nc-Si)
- vi. Termofotovoltaik (TPV)
- vii. Farklıklem hücreler (HIT)
- viii. Kuantum nokta/kuyu/boru hücreler

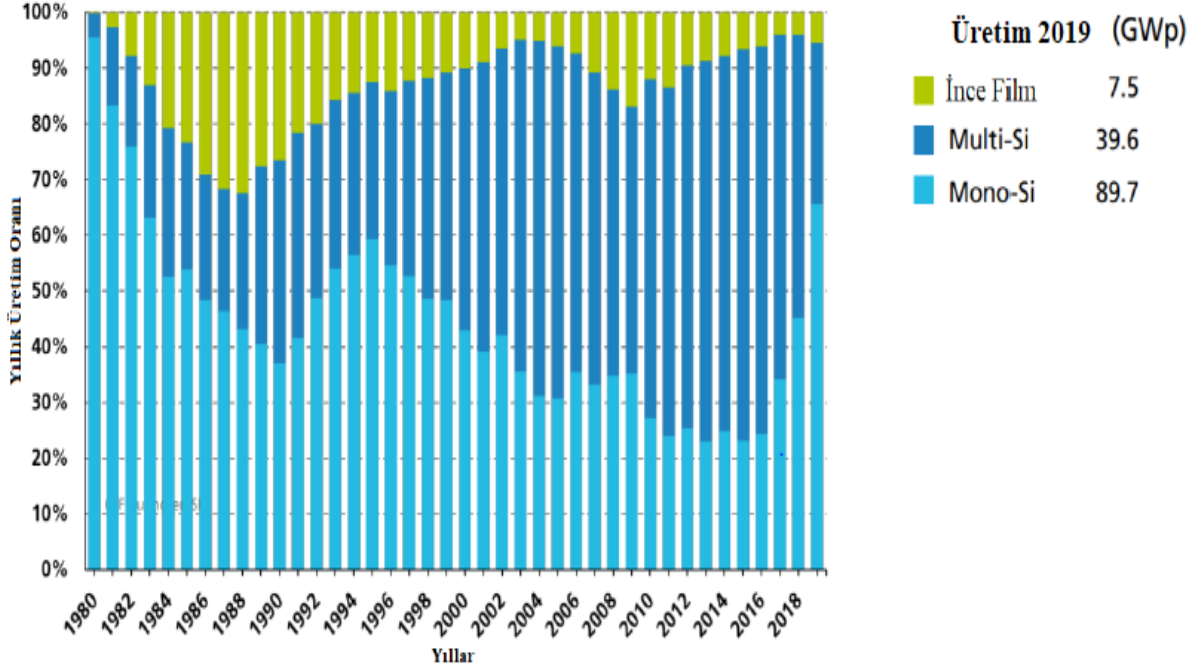
Farklı FV teknolojilerinin laboratuvar ölçeğindeki hücre/modül verimi Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Buna göre uygulama ölçeğinde, modüllerin verimleri bir miktar daha düşmektedir.



Şekil 1.3. Farklı FV teknolojilerin laboratuvar ölçeğinde hücre/modül verimlerinin karşılaştırması (Fraunhofer ISE 2020).

Farklı teknolojilerin pazar hacminin değişimi, Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, ince film teknolojisinin pazar payı zaman zaman artsa da, sonraki

yıllarda tekrar kristal silisyuma (c-Si) bir dönüş olmuştur. Hâlihazırda, c-Si teknolojisinin payı % 90'ları aşmış durumdadır.



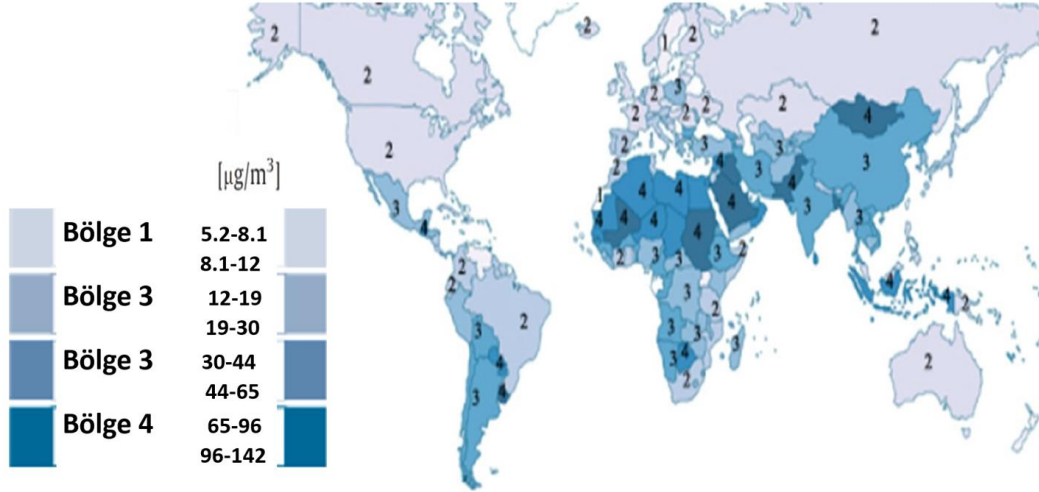
Şekil 1.4. Farklı FV teknolojilerin pazar payı (Fraunhofer ISE, 2020).

Fotovoltaik pazarın çok miktarda yağış alan ülkelerden, daha az yağış alan ülkelere kayması ile birlikte panel üzerindeki tozlanma problemi de artmaktadır. Bu kayma Türkiye için de geçerlidir. Özellikle 2017'de büyük bir artış gösteren Türkiye fotovoltaik pazarı, gün geçtikçe büyümektedir. Bu gelişmelere rağmen Türkiye güneş enerji potansiyelinden tam anlamıyla yararlanamamaktadır. Ortalama toplam yıllık ışınım şiddeti $1.527,46 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ ve yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat (günde 7,5 saat) olan Türkiye (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2020) Çizelge 1.1'de de görüldüğü üzere Fransa ve Almanya gibi daha düşük güneş enerji potansiyeline sahip ülkelerin FV kurulu güç kapasitesi bakımından oldukça gerisinde olduğu görülmektedir. Örneğin Almanya Türkiye'den daha kuzeyde ve dolayısıyla daha düşük bir güneş enerjisi potansiyeline sahip olmasına karşın 2019 yılsonu itibari ile kurulu FV güç santral kapasitesi 50 GWp seviyesindedir (SolarPower Europe, 2020). Bu durum Türkiye'nin güneş enerji potansiyelinden yeterince yararlanmadığını ve güneş enerjisinden elektrik üretmek adına katetmesi gereken önemli bir yolu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1.1. Küresel Fotovoltaik Kapasitesi (SolarPower Europe, 2020)

Ülkeler	2019 Toplam Kapasite (MWp)	2024 Toplam Kapasite Senaryosu (MWp)	2020-2024 Yeni Kapasite (MWp)	2020-2024 Yıllık Bileşik Artış Oranı (%)
Çin	205.187	485.987	280.800	19
ABD	76.119	178.869	102.750	19
Japonya	62.951	95.076	32.125	9
Almanya	49.729	78.643	28.914	10
Hindistan	42.031	111.881	69.850	22
İtalya	20.600	31.904	11.304	9
Avustralya	15.977	40.168	24.191	20
Güney Kore	10.872	28.456	17.584	21
İspanya	10.641	27.734	17.093	21
Fransa	9.874	22.033	12.159	17
Hollanda	6.559	23.495	16.936	29
Vietnam	6.458	23.720	17.262	30
Türkiye	5.994	13.139	7.145	17
Ukrayna	5.937	12.058	6.121	15
Brezilya	4.460	15.935	11.475	29
Tayvan	4.151	15.977	11.826	31
İsrail	2.104	7.999	5.895	31
Birleşik Arap E.	2.009	8.789	6.780	34
Suudi Arabistan	478	7.185	6.707	72

Küresel anlamda tozlanma yoğunluğu bölgeden bölgeye önemli farklılıklar göstermektedir. Tozlanma yoğunluğu açısından ülkeler 4 farklı kategoriye ayrılmaktadır (Şekil 1.5). Türkiye, tozlanma yoğunluğu açısından sorunlu ülkeler arasında olup, bu durum kurulan FV santrallerin performansını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle ülkemizde FV panellerin temizlenmesi önemlidir.



Şekil 1.5. Dünyadaki toz yoğunluğunun ülkelere göre dağılımı (Maghami et al., 2016).

Günümüzde panel temizleme işleminde; özel fırçalar kullanarak temizleme, mobil temizleyici ve panelleri yıkamak gibi geleneksel yöntemler kullanılmaktadır (Maghami et al., 2016; Kazmerski et al., 2013). Ancak bu yöntemler gerek insan gücü ve maliyet gerekse temizleme işlemi yapılırken modüllerde oluşabilen çatlaklar açısından elektrostatik temizleme ile kıyaslandığında oldukça geride kalmaktadır. Elektrostatik temizlemede ise yok denecek kadar az bir enerji kullanımı ile panellere herhangi bir zarar vermeden ve özellikle büyük ölçekli santraller için su tüketimi ve iş gücü düşünüldüğünde yüksek verimde bir temizleme işlemi sadece gerilim kaynağından kaynaklanan tüketim ile mümkündür (Kawamoto and Shibata, 2015; Kawamoto and Guo, 2018; Liu and Marshall, 2010). Bu da FV modüllerde elektrostatik temizliğin önemini ortaya koymaktadır. Ülkemizde hali hazırda kurulu olan fotovoltaik santrallerde tozlanma kayıplarını azaltmak adına geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu tezin konusu olan elektrostatik yöntemle tozlanma kayıplarını azaltmaya yönelik ise bir uygulama yoktur. Elektrostatik temizleme yöntemi ile ülkemizdeki fotovoltaik santrallerindeki tozlanma kayıplarının hem önemli ölçüde azaltılacağı hem de bu sistemin temizleme verimliliğinde geleneksel yöntemlere kıyasla, daha düşük maliyetle daha etkili bir sonuç vereceği düşünülmektedir. Ülkemizde henüz kullanılmayan bu yöntem, bu sebeplerle araştırmaya değer bir konudur.

Bu tezin 2. bölümünde, literatür taraması yapılarak tozlanmayı oluşturan faktörler, toz oluşumunun panel üzerindeki etkileri ve temizleme yöntemleri

incelenmiştir. 3. bölümde tez kapsamında oluşturulan elektrostatik temizleme sisteminin nasıl oluşturulduğu ve hangi şartlar altında testlerin yapıldığı incelenmiştir. 4. bölümde testler sonucunda elde edilen bulgular ortaya konulmuştur. “Sonuç ve Tartışma” başlığını taşıyan 5. bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve konu ile ilgili tartışmaya yer verilmiştir.

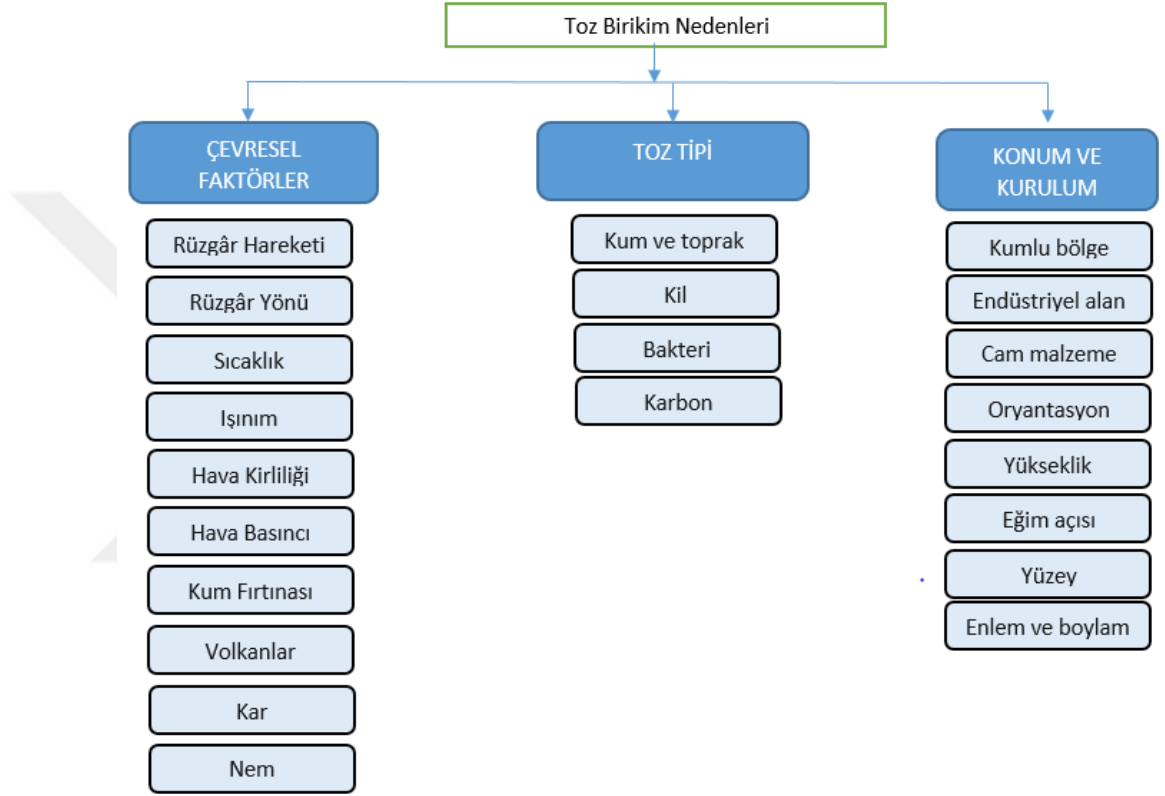


2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Tozlanma ve Toz Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Gelişen fotovoltaik teknolojisinde gerek sıcaklık, nem ve tozlanma gibi çevresel etkilerden gerekse uyumsuzluk kayıpları, evirici kayıpları gibi sistem içerisindeki bileşenlerden ve bağlantılarından dolayı oluşan kayıplar kaçınılmazdır (Alonso-Tristán et al., 2012; Wang et al., 2007). Bu kayıplar sistemin performansını önemli ölçüde düşürme potansiyeline sahiptir. Fotovoltaik modülde optimum hasadı belirleyen birçok faktör vardır. FV santralının kurulu olduğu çevre, direkt olarak fotovoltaik modülün performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Modüllerin zaman içerisinde tozlanması bu çevresel faktörlerin en önemlilerinden birisidir. Her bölgede ayrı bir özelliğe ve yoğunluğa sahip olan toz, dünyada yaygın bir dağılıma sahip olup, FV modüllerin yüzeyine yerleşir ve güneş ışınlarının geçişini engellemek, panelin sıcaklığını artırmak ve modül camını aşındırmak gibi etkilerle sistemin verimini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir (Ju and Fu, 2011). Tozlanma kayıplarından doğan etkileri azaltabilmek adına belirli bir plan dahilinde panellerin temizliği yapılmalıdır. Bu konuda yapılan literatür çalışmalarında, bu temizlikler yapılmadığı takdirde, ciddi ölçüde verim kayıpları oluşabildiği görülmüştür (Ghazi et al., 2014). Hindistan'da yapılan altı aylık farklı bir çalışmada ise tozlanmadan dolayı verim düşüşü bir ayın sonunda % 33,5, altı ayın sonunda ise % 65,8 olarak belirlenmiştir (Al-hasan and Ghoneim, 2007). Kaliforniya ve güneybatı Amerika'da yürütülen yaklaşık bir yıllık bir çalışmada ise şebeke bağlantılı bir FV sistemin enerji çıkışının ve veriminin yağış olmadığı takdirde tozlanmadan dolayı günlük % 0,2 azaldığı görülmüştür (Kimber et al., 2006). Meksika'da Ağustos ayından Aralık ayına kadar yapılan 90 günlük bir çalışmada, kristal ve amorf silisyum FV modüllerin veriminin sırasıyla % 4-7 ve % 8-13 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Cabanillas and Munguía, 2016). Nepal'in başkenti Katmandu'da yapılan bir çalışmada ise, beş aylık bir süre içerisinde panel üzerinde biriken tozların panelin verimini % 29,76 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu değer, günlük temizliği yapılan diğer panel performansları ile kıyaslanarak elde edilmiştir (Paudyal and Shakya, 2016). Riyad yakınlarında yapılan bir çalışmada ise toz birikiminden dolayı verimin % 32 düştüğü gözlemlenmiştir (Salim et al., 1988). İran'ın başkenti Tahran'da yapılan on aylık bir araştırmaya göre modülün kirlenmesinden dolayı güç düşümü yaklaşık % 60 olarak tespit edilmiştir (Asl-Soleimani et al., 2001). Bu bağlamda FV modülünün verimini artırmak ve güneş hücrelerini korumak için temizleme yöntemlerinin araştırılması önemli olmuştur (He et al., 2001).

Çapı 500 µm'den küçük ince, minik katı parçacıklar toz olarak tanımlanabilir. Toz oluşumunda çeşitli birçok faktör rol oynamaktadır. Bu faktörler doğal veya yapay sebeplerden oluşabilmektedir. Panel üzerindeki toz birikimi yaya hareketliliği, volkanik faaliyetler gibi olaylar sonucu rüzgârın da etkisi ile tozun panel üzerinde birikmesi ile oluşur (Kazmerski et al., 2013). Şekil 2.1'de fotovoltaik panel üzerinde toz birikme nedenleri gösterilmiştir (Maghami et al., 2016).



Şekil 2.1. FV modül üzerinde toz birikme nedenleri (Maghami et al., 2016).

2.1.1. Çevresel faktörler

2.1.1.1. Kurulum bölgesi

FV panellerin üzerindeki toz oluşumunda panellerin kurulduğu bölge önemli rol oynamaktadır. Zaman içerisinde elde edilen deneyimler panel üzerindeki tozlanma etkisinin çevre özelliklerine bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir.

İsviçre’de bulunan bir FV sistem, Bern-Zürich tren yolunun yaklaşık 50 m uzağında kurulmuştur. Burgdorf istasyonunda her gün çok sayıda tren yavaşlayıp durmakta veya belirli bir ivme ile istasyondan ayrılmaktadır. Bunun sonucunda modüller sürekli olarak tozlanmaktadır (Haeberlin and Graf, 1998).

Özellikle kurak veya yarı kurak iklimlerde gözlenen kum fırtınaları panel üzerinde toz oluşumu adına bir başka çevresel etki olarak değerlendirilebilir. Bu etki, bölgeden bölgeye farklılık gösterebilmektedir. Örneğin; Birleşik Arap Emirlikleri’nin başkenti Abu Dabi’ye yakın bir santralin kuvvetli kum fırtınalarının hüküm sürdüğü yaz aylarında, panellerin üzerindeki tozlanma miktarı önemli derecede artış göstermektedir (El-Nahar, 2009). Kum fırtınasından dolayı oluşan bu etki Mısır’da ise hâkim rüzgârların etkili olduğu Nisan ve Mayıs aylarında görülmektedir (Hegazy, 2001).

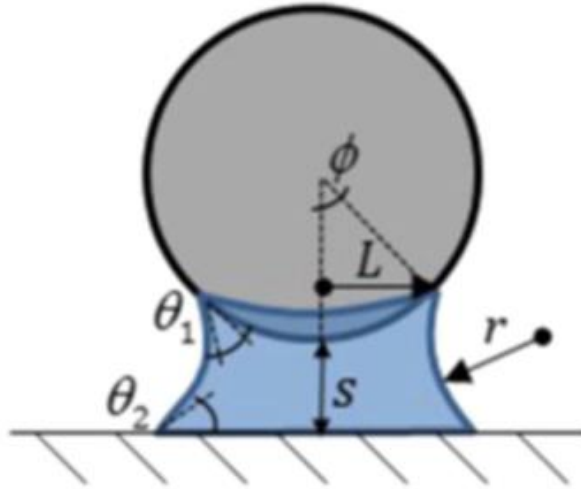
FV santralin kurulduğu bölgede bir tarım sahası varsa, bu durumun da panel üzerindeki tozlanma miktarını artırıcı özellikte olacağı düşünülebilir. Kaliforniya’da bulunan Orta Vadisi’nde kurulu bir FV santral tarım arazisine oldukça yakın bir noktadır. Buna bağlı olarak da panel üzerinde en çok toz birikimi tarımsal faaliyetlerin en yoğun olduğu zamanlarda görülmektedir (Caron and Littmann, 2013).

Artan insan nüfusu ve yükselen endüstriyel faaliyetlerle beraber panel üzerindeki tozlanma miktarları da artış göstermektedir. Bunun sebebi olarak ise artan nüfus yoğunluğu ile beraber trafik ve yaya hareketliliğinin artışı ve fosil yakıtların kullanımı ve endüstriyel süreçlerin gerçekleştirilmesinden kaynaklanır. Bu süreçlerin sonunda ise havada oluşan parçacıklar, panel üzerinde tozlanmaya sebebiyet verir (Kaldellis and Kokala, 2010). Bunun dışında volkanik faaliyetler, hayvan ve bitkilerden gelen polen hareketliliği ve bölgede bulunan inşaat aktiviteleri gibi olaylar da tozlanmaya sebebiyet verebilecek diğer unsurlardır (Lay-ekuakille et al., 2018; Tanesab et al., 2015).

2.1.1.2. Nem

Tozlanma sorununu daha kötü hale getiren faktörlerden birisi de nemdir. Nem, havada bulunan su buharı olarak tanımlanabilir. Bağıl nem ise havada bulunan su buharı basıncının o sıcaklıktaki doyma buharı basıncına oranı olarak tanımlanır. Bununla beraber nemden dolayı oluşan mikro veya nano ölçekli sıvı sütunu, herhangi bir yüzeyde oluşan çatlak veya çiziklerde birikebilir (Figgis et al., 2018).

Yüksek neme sahip bir ortama yerleştirilen FV panellerde nemden dolayı panel yüzeyi ile toz arasında bir su köprüsü oluşabilir. Bu durum, kapılar etkiyi artırıcı bir özellik sergiler. Bunun sonucu olarak yüzey ile tozlar arasındaki çekim kuvveti artar ve tozların panel üzerinden uzaklaştırılması zorlaşır. Yüksek nem ortamında eğer yüzeyde suyu seven bir yüzeyse parçacıklar ve yüzey arasında Şekil 2.2’de görüldüğü gibi bir su köprüsü oluşabilir. Ortamdaki nemden dolayı oluşan bu etkinin gücü yüzey geometrisine ve kontak açlarına (θ_1 , θ_2) bağlıdır (Brambilla et al., 2017; Ilse et al., 2018a; Ilse et al., 2019).



Şekil 2.2. Su köprüsü (Brambilla et al., 2017).

Nemin bir başka etkisi ise yüzey ile parçacıklar arasında katı bir köprü oluşturmasıdır. Nemli ortamlarda biriken tozun çözünür parçaları yüzey üzerindeki su varlığı ile birlikte kısmen veya tamamen çözülür. Çözülmeden kalan tuz kütlelerinin yanı sıra havadaki tozlardan dolayı cam yüzeyinde oluşan CO_2 , SO_2 ve NO_2 gibi su içerisinde bulunan gazlar ile oluşan karbonik, sülfürik ve nitrik asit, karbonatların ve silikatların hidrolizi de dâhil olmak üzere çeşitli reaksiyonlara sebebiyet verebilirler (Ilse et al., 2019). Bu reaksiyonların sonrasında, kuruma

periyodu ile beraber çözünmeyen materyaller ile cam yüzey arasında katı bir köprü oluşur. Bu oluşan köprü adezyon kuvvetini artırıcı bir etki gösterir (Ilse et al., 2018a; Ilse et al., 2019). Süreç içerisinde bu tip olayların tekrarlanması ve temizlik yapılmaması halinde ise yüzeyde biriken tozlar, zamanla çok katmanlı bir yapı halini alır (Şekil 2.3.) ve modül yüzeyini temizleme işlemi ile birlikte tozlardan arındırmak daha zor bir hale gelir. Bu süreç aynı zamanda cam yüzeyinin özelliğini kalıcı olarak değiştirme potansiyeline de sahiptir (Ilse et al., 2018b).



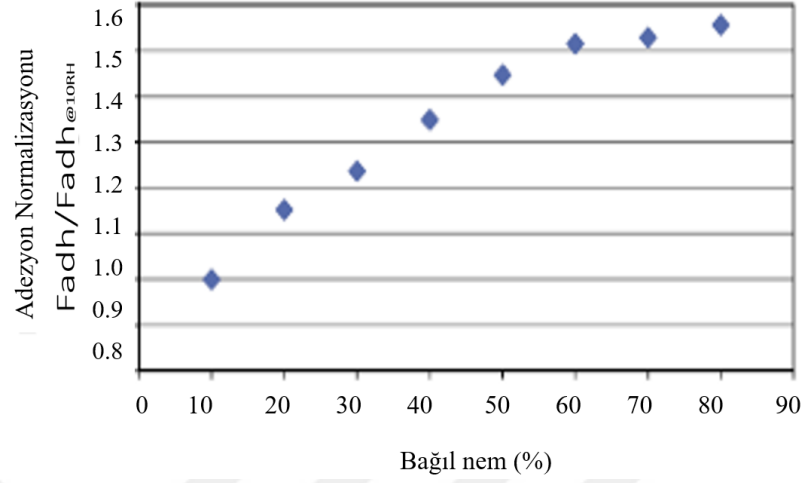
Şekil 2.3. Semantasyon oluşumu (Kazmerski et al., 2013).

Düşük nem ortamında, bu köprülerden yüzeyin en dışındaki pürüzlü bölgelerde çok az sayıda oluşur. Orta seviye bir nem ortamında daha fazla sayıda köprü oluşur ve kapılar kuvvet ise köprüyü oluşturan sıvı hacmi ile doğru orantılıdır. Yüksek nemde ise sürekli bir kapılar köprü oluşur ve gözle görünür hale gelen bu yapının geometrisi toplam kapılar kuvveti belirler (Kim et al., 2016).

Ortamda bulunan bağıl nemin artmasıyla beraber havada asılı olan tozlar da zamanla ağırlaşmaya başlar. Bunun sonucunda ağırlaşan bu tozların yerçekimi etkisi ile beraber panel yüzeyine yerleşme ihtimali de artış gösterir (Kim et al., 2016).

Sonuç olarak görülmektedir ki, nem miktarının artması çeşitli etkiler ile yüzey üzerindeki adezyon kuvvetini artırıcı etki gösterir. Nem miktarının artması ile birlikte hem artan adezyon kuvveti ile birlikte tozların yüzeyden uzaklaşması zorlaşır hem de panel yüzeyinde biriken toz miktarı artar. Bunun sonucunda da panel yüzeyinde biriken toz miktarı zamanla artış gösterir. Şekil 2.4. göstermektedir

ki, nem miktarı arttıkça adezyon kuvveti de bu artışa bağlı olarak artmaktadır (Said et al., 2014).

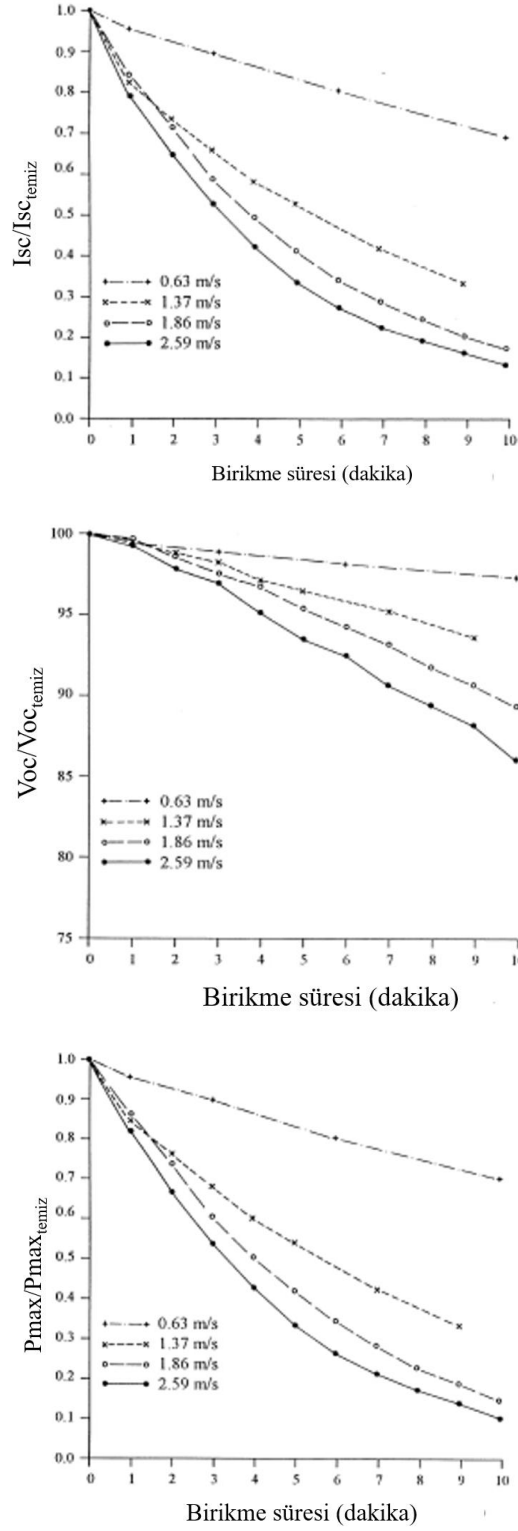


Şekil 2.4. Neme göre Adezyon kuvveti değişimi (Said et al., 2014).

2.1.1.3. Rüzgâr

Rüzgâr FV panel performansı için oldukça önemli bir parametredir. Bu bağlamda panellerin tozlanması üzerinde de önemli bir rolü vardır. Rüzgârın hızına bağlı olarak paneller üzerinde olumlu ve olumsuz etki gözlemlenebilmektedir. Rüzgârın FV modül üzerindeki bu etkisi temel olarak rüzgâr hızı, rüzgârın yönü, FV modül yüzeyinin yapısı ve toz birikimine bağlı olarak oluşur (Said et al., 2018).

Rüzgâr, panel temizliğinde önemli rol oynayan faktörlerden bir tanesidir. Ancak bu temizlik, rüzgâr hızına göre değişiklik gösterebilir. Yapılan bir çalışmada farklı rüzgâr hızlarının tozlanmaya etkisi değerlendirilmiştir. Bu çalışma için 0,63, 1,37, 1,86 ve 2,59 m/s olmak üzere dört farklı rüzgâr hızı kullanılmıştır. Bu hızlara göre santimetrekare başına 20 mg tozun birikme süresi gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda yüksek rüzgâr hızında panellerin daha çabuk kirlendiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, aynı rüzgâr değerleri altında tozlanmadan kaynaklı akım gerilim ve güç eğrileri değerlendirilmiştir.



Şekil 2.5. Rüzgar hızı ve toz birikme süresinin etkileri (Goossens and Kerschaefer, 1999).

Şekil 2.5’de görüldüğü üzere rüzgâr hızı arttıkça toz birikiminden dolayı FV sistem olumsuz etkilenmektedir. Sistemin açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve gücü düşüş eğilimi göstermektedir (Goossens and Kerschaefer, 1999). Bunun dışında, özellikle çöl iklimlerinde, kuvvetli rüzgârlarla beraber oluşan kum

fırtınaları fotovoltaik panel yüzeyini tamamen kapatabilmekte ve panelleri tamamen işlevsiz hale getirebilmektedir (Assi et al., 2012).

Rüzgâr, eğer yeterince güçlü ise tozu panelden alıp götürür. Ancak toz havada asılı şekilde kalır. Bu da güneş ışınımının modüllere daha az ulaşımı gibi olumsuz bir etkiye neden olabilir. Aynı zamanda atmosferde asılı kalan irili ufaklı tozlar nihayetinde tekrar panellere yerleşecek ve bunun sonucunda FV sistemlerin verimi düşecektir (Ghazi et al., 2014).

Rüzgâr, aynı zamanda yağmur ile beraber panelin temizlenmesine de yardımcı olur. Rüzgârın olmadığı durumlarda yağmur damlaları panel yüzeyine daha dik bir açıyla gelir. Ancak rüzgârlı durumlarda eğer rüzgâr gücü de yeterliyse, rüzgâra maruz kalan yağmur damlaları rüzgârın etkisiyle panel yüzeyine gelen açısını değiştirir ve tozları değişen bu açı sayesinde panel yüzeyine bir yıkama etkisi yaparak toz miktarını azaltabilir (Ju and Fu, 2011).

2.1.1.4. Toz özellikleri

Toz birikiminde tozun karakteristik özelliğinin önemli bir etkisi vardır. Tozun büyüklüğü, miktarı, yapısı, panel üzerindeki yoğunluğu gibi faktörler, panel üzerindeki tozlanmada önemli etkileri bulunan unsurlardır. Toz, kimyasal, biyolojik, elektrostatik ve fiziksel özellikleri ile karakterize edilebilir (Kazem et al., 2015).

Tozun farklı özelliklerdeki yapısı panel üzerinde farklı toz yerleşim koşullarına sebep olur. Örneğin; küçük parçacıkların yüzeye yerleşme eğilimi büyük parçacıklara göre daha fazladır (Rahman et al., 2017). Bu nedenle yağmurun küçük toz parçacıklarını temizlemede sınırlı bir etkisi varken, polen gibi büyük parçacıkları yağmur altında panelden temizlenebilmektedir (Appels et al., 2012).

Rüzgâr, yüzeydeki tozların panel üzerinden uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Rüzgâr hızı arttıkça da rüzgâr ile beraber oluşan temizleme işleminin verimi de artar. Bu temizleme işleminin performansı yüzeyde oluşan tozun parçacık çapı ve yüzeyde oluşan toz katmanının yapısı ile ilişkilidir. Yüzey üzerinde oluşan ince bir toz tabakası, rüzgâr hızı yüksek olsa bile kolaylıkla temizlenemez (Mazumder et al., 2014). Bununla beraber panel üzerindeki toz katmanının kalınlığı arttıkça yeni parçacıkların yüzeyde kalması kolaylaşır ve bu da paneldeki tozlanma miktarını artırıcı bir özellik gösterir (Tanesab, 2018).

Tozlar, farklı elektrostatik özelliklere sahip olabilirler (Mani et al., 2014). Yüklü parçacıklar arasında oluşan kuvvet nedeniyle nötr parçacıklardan daha fazla birikme eğilimindedir. Bu kuvvet, Coulomb kuvveti olarak bilinir (Rahman et al., 2017). Bir diğer yandan tozun kimyasal veya mineraloji bileşimi çevredeki ortama bağlı olarak bir konumdan diğerine farklı olacaktır (Elminir et al., 2016). Örneğin; Krugger ve arkadaşları, Çin ve Suudi Arabistan'dan topladıkları tozlarda yüksek oranda kalsiyum bulurken (Krugger et al., 2006), Fujiwara ve arkadaşları otomotiv endüstrisine yakın bir bölgede yaptıkları çalışmada demir, alüminyum, kalsiyum ve magnezyum tespit etmişlerdir (Gómez et al., 2011). Tozun yapısının bölgeden bölgeye değişmesi, tozun karakteristiğinden dolayı panel üzerinde birikiminde farklı etkiler ortaya çıkarmasına da sebep olacaktır.

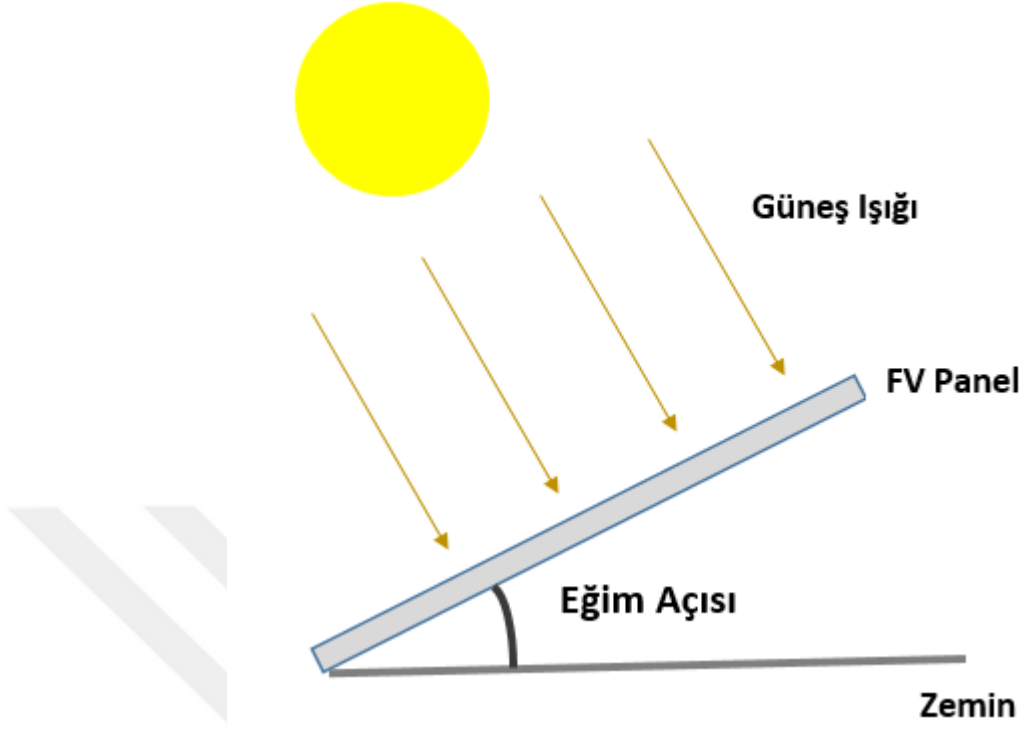
Sonuç olarak, tozun özellikleri panel üzerinde toz oluşumunda önemli rol oynar. Yukarıda bahsedilen özelliklere göre tozun panel üzerinden uzaklaşması daha kolay veya daha zor olabilir

2.1.1.5. Yağış

Yağış, panel üzerinde toz oluşumunda ve tozun temizlenmesinde doğal bir çevresel faktördür. Yağışın panellerdeki toz birikimi üzerine çift taraflı bir etkisi vardır. Yağış, düzenli ve yoğun bir şekilde olduğu durumlarda panel üzerindeki tozlanmanın önemli derecede önüne geçilebilmektedir. Ancak hafif veya yeni başlamış bir yağış için bu etki tersine dönüp panel üzerindeki toz oluşumunun artmasına sebebiyet vermektedir (Tanesab, 2018; Javed et al., 2016). Hafif bir yağış havada asılı halde duran toz parçacıklarını panel üzerine düşürme eğilimine sahipken; güçlü bir yağış, panel üzerindeki toz birikiminin temizlenmesine yardımcı olacaktır (Tanesab, 2018). Sonuç olarak, hafif bir yağış güçlü bir yağışa kıyasla daha fazla toz birikimine sebebiyet vermektedir.

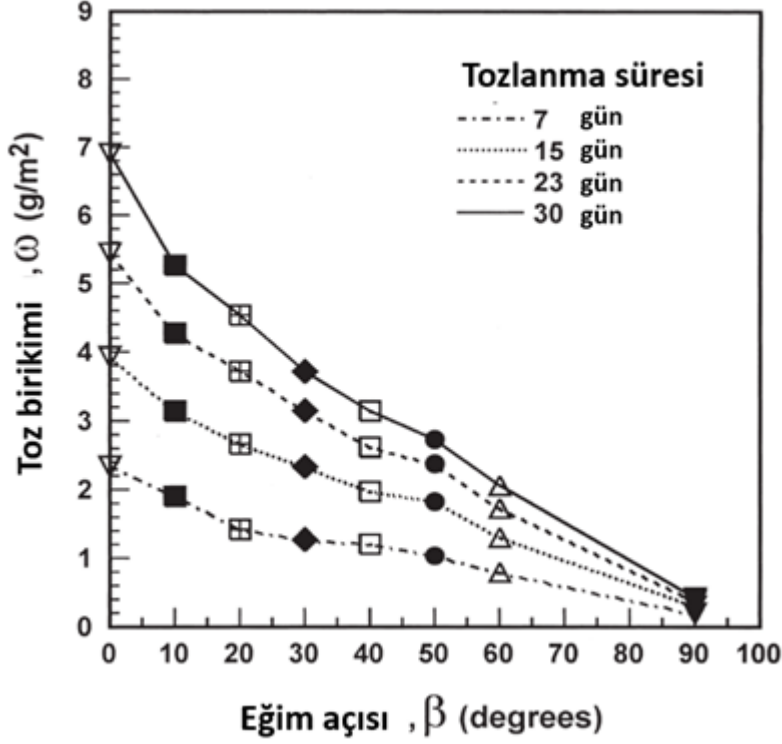
2.1.2. Eğim açısı ve yönelim

FV panellerin tozlanmasında rol alan bir diğer unsur, panelin eğim açısıdır (Şekil 2.6). Eğim açısı, panelin yatay ile yaptığı açı olarak tanımlanır. Montaj teknikleri, yer yüzeyinin fiziksel biçimi ve bölgenin iklim koşulları, en uygun eğim açısını belirlemek adına önemli faktörlerdir (Asl-Soleimani et al., 2001; Babatunde et al., 2018). Eğim açısı, FV modül üzerindeki tozlanmada önemli bir etkidir. Eğim açısı arttıkça, tozların panelden uzaklaşma eğilimlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Mani and Pillai, 2010).



Şekil 2.6. Eğim açısı

Yapılan bir çalışmada eğim açısı 0° 'den ve 60° 'ye olacak şekilde 10° 'lik artışlar ile yedi adet cam plaka yerleştirilmiştir. Ek olarak da yere dik bir şekilde (eğim açısı 90°) bir cam plaka yerleştirilmiş ve plaka üzerinde biriken toz yoğunluğu 7, 15, 23 ve 30 günlük birikimler kıyaslanmıştır (Hegazy, 2001).



Şekil 2.7. Eğim açısına göre toz birikim yoğunluğu (Hegazy, 2001).

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere, eğim açısı arttıkça toz yoğunluğunda bir azalma gözlenmiştir. Eğim açısının sabit tutulduğunda, geçen zamanla birlikte tozlanma miktarında da bir artış görülmektedir. Bununla beraber eğim açısı azaldıkça, geçen zamanın toz birikimine etkisinin daha belirgin hale geldiği ortaya konmuştur. Bunun sebebi ise, daha yüksek eğim açısına sahip yüzeylerin toz doygunluğuna daha erken ulaşmasıdır (Ni et al., 2017). Buna ek olarak, eğim açısı ile beraber rüzgârın panel temizleme performansı da değişmektedir. Yüksek rüzgâr hızlarında daha yüksek eğim açılı panellerde temizleme işleminin daha verimli olduğu değerlendirilmiştir (Mazumder et al., 2014). Sonuç olarak bir FV sistemde modüllerin üzerindeki oluşan tozun yoğunluğu ve miktarı yerleştirilen modüllerin eğim açısı ile doğrudan bağlantılı olup, eğim açısı arttıkça tozlanma miktarında azalma gözlemlenmektedir.

Yapılan başka bir çalışmada panel üzerindeki toz birikimi, eğim açısı ve yönelim ile beraber ele alınmıştır. Farklı eğim açısı ve yönelimde toz birikimi gözlemlenmiş ve sonuçlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, eğim 0 °C iken yüzey üzerindeki toz yoğunluğu 15,84 g/m² iken eğim 90 °C’ye çıkarıldığında bu yoğunluğun 2,48 g/m²’ye düştüğü gözlenmiştir (Elminir et al., 2006).

Aynı eğim açısına sahip olan panellerin üzerindeki toz yoğunluğu yönelim ile çok fazla değişmemektedir. Ancak bulunulan konuma bağlı olarak esen rüzgârların (Örneğin; kuzey rüzgârları gibi) etkisi panel üzerinde oluşan tozun miktarında değişikliğe sebep olabilmektedir (Elminir et al., 2006).

Çizelge 2.1. Panel eğim açısı ve yönü ile tozlanma arasındaki ilişki (Elminir et al., 2006).

Eğim Açısı	Panellerin Yönü															
	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	Δt	P_D	Δt	P_D	Δt	P_D	Δt	P_D	Δt	P_D	Δt	P_D	Δt	P_D	Δt	P_D
15°	41	12	46	11	45	12	47	13	46	14	46	14	43	12	44	12
30°	40	11	45	13	46	13	47	11	46	13	44	12	41	11	47	12
45°	40	11	41	12	42	12	44	12	45	13	43	14	42	12	44	10
60°	36	10	38	9	42	11	39	11	41	12	39	12	39	11	38	9
75°	27	7	26	6	29	8	27	8	29	9	41	7	28	7	25	6
90°	15	3	15	3	15	4	12	2.5	13	5	15	3	13	3	17	4

Sonuç olarak, panel üzerindeki tozlanmada panelin yönelimi ve eğim açısı panel üzerindeki toz yoğunluğunu belirlemede iki önemli faktördür. Eğim açısı ve yönelim değiştikçe, panel üzerindeki tozlanma miktarında da değişiklik görmek mümkündür.

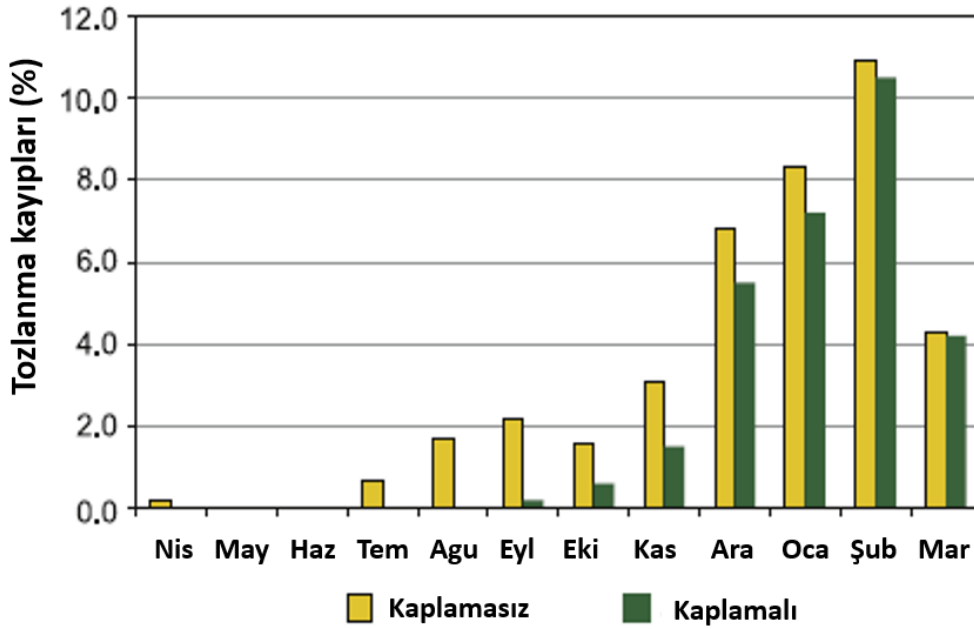
2.1.3. Kaplama ve yüzey özellikleri

Fotovoltaik panelin yüzey karakteristiği toz oluşumunda önemli rol oynamaktadır. Bu anlamda; panel yüzeyi, belirli özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Cuddihy, 1980; Kazmerski et al., 2013):

- Sert
- Pürüzsüz
- Hidrofobik (suyu sevmeyen)
- Düşük yüzey enerjisine sahip (mümkün olduğunca az kimyasal reaksiyon)
- Kimyasal olarak suda çözünmeyen tuzlar içermemesi
- Kimyasal olarak temiz (özellikle yapışkan malzemeler)

Bu etkenlerle beraber panelin yüzeyinde kullanılan malzemenin de toz birikiminde farklı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar göstermiştir ki, plastiğin toz tutma eğilimi cama göre daha fazladır (Nahar and Gupta, 1990; Garg, 1974).

Modül yüzeyinde kaplama kullanılması yüzey üzerinde oluşan tozlanmayı etkileyen bir diğer önemli faktördür. Kaplama, FV panel üzerinde biriken tozu önlemek amacıyla panel yüzeyinin suyu emebilen veya suyu sevmeyen materyal ile kaplanma işlemidir (Tanesab, 2018). Yapılan çalışmalar panel yüzeyine uygulanan kaplamanın yüzeydeki toz birikimini azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermiştir (Fathi et al., 2017). Piliouguine ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bu amaçla kaplamaya sahip ve herhangi bir kaplama uygulanması olmayan modüller aynı özelliklere dış saha ortamına yerleştirilmiş ve bir yıl boyunca veriler toplanmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, tozlanmadan dolayı kayıp oranlarının kaplama uygulanan panellerde % 2,5 iken herhangi bir kaplama uygulaması yapılmayan panellerde % 3,3 olarak tespit edilmiştir. Aylık kayıplar ise Şekil 2.8’de gösterilmiştir (Piliouguine et al., 2013).



Şekil 2.8. Kaplamalı ve kaplamasız panellerde toz kayıpları (Piliouguine et al., 2013).

Sonuç olarak, panelin yüzey özellikleri tozlanma miktarını etkileyici bir özellik göstermektedir. Bununla beraber, yüzeye uygulanan kaplama işlemi ile yüzeydeki tozlanma miktarını azaltmak mümkündür.

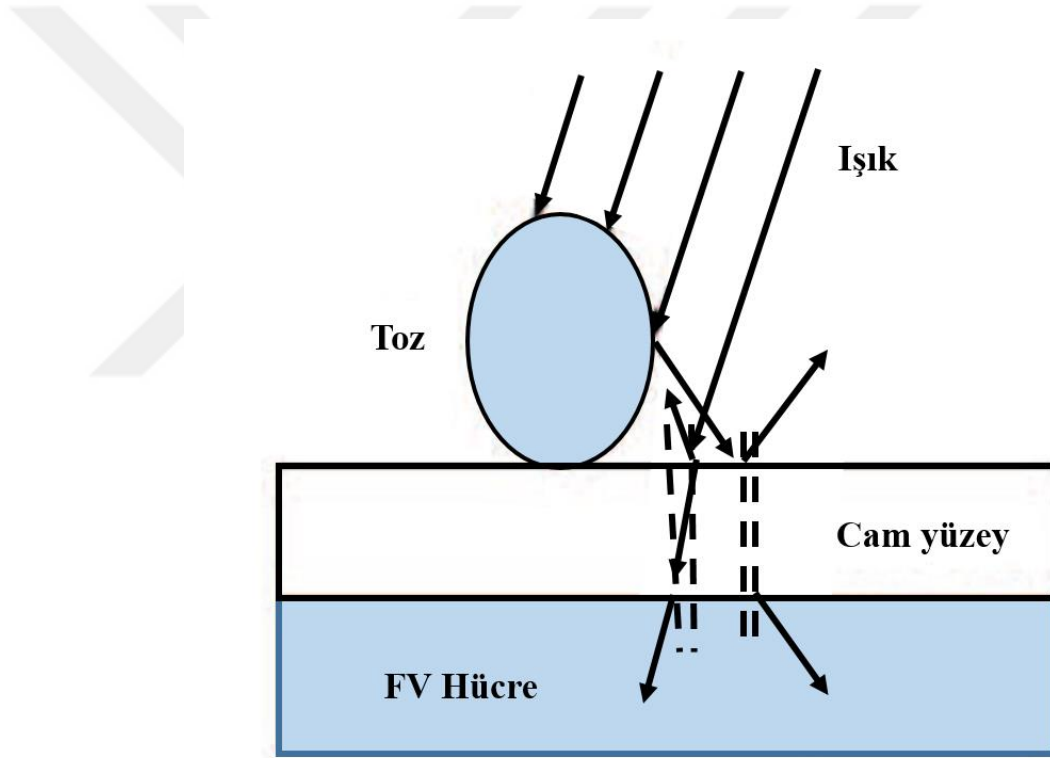
2.2. Tozlanmanın FV Panel Üzerindeki Etkileri

Tozlanma faktörünün FV panel üzerinde üç temel etkisi vardır: Bu etkiler panel sıcaklığını artırmak, gelen ışınım şiddetini düşürmek ve zaman içerisinde modül camını aşındırmak olarak tanımlanabilir.

2.2.1. Gelen ışınımı azaltma ve gölgelenmeye sebep olma

Bazı çevresel koşullar, panele gelen güneş ışınlarının miktarını önemli derecede etkileme potansiyeline sahiptir. Tozlanma faktörü de, bu faktörlerden bir tanesidir. Yaprak, kuş pisliği, tarımsal faaliyetler ve farklı aktivitelerden oluşan toz parçaları gibi etkenler FV modüldeki bazı hücreleri bloke edebilirler. Bu da enerji düşüşüyle beraber fotovoltaik hücreye ciddi şekilde zarar verebilir (Maghami et al., 2016).

Işık iletim ilkesine göre; belli bir dalga boyundaki ışık, cam kaplı farklı bir yüzeyle karşılaştığında ışık, kırınım ve yansımaya uğrar. Kırınıma uğrayan ışık cam kaplı yüzeyden geçerek fotovoltaik hücre tarafından soğurulur (Ju and Fu, 2011).



Şekil 2.9. Gelen ışınımı engelleme (Ju and Fu, 2011).

Ancak, yüzeyde toz varsa gelen ışınımın bir kısmı toza takılarak ısı enerjisine dönüşürken, diğer kısmı ise ancak tozun etkisiyle saçıldıktan sonra fotovoltaik yüzeye ulaşabilir. Bu durumda hücreye ulaşacak olan ışınım miktarı azaldığı için güç üretim kapasitesinde de azalma görülecektir (Ju and Fu, 2011).

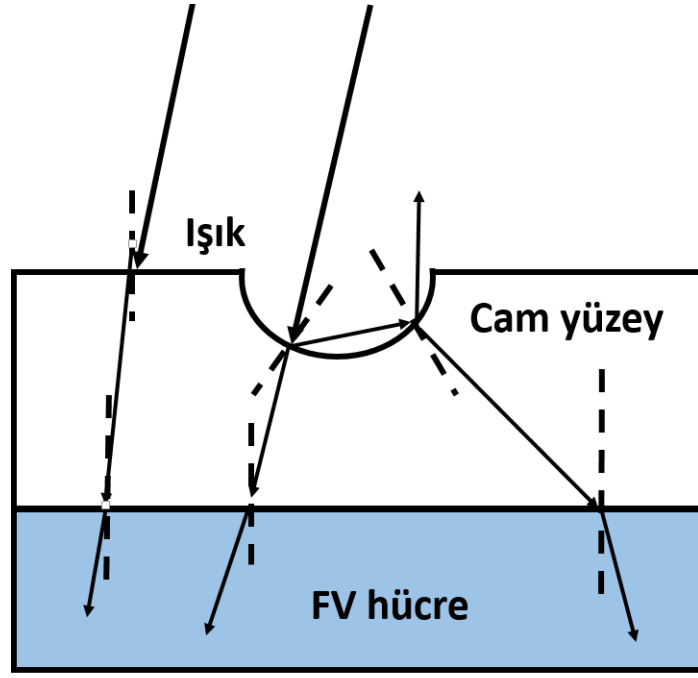
Tozlanmadan kaynaklanan gölgelenme hafif ve sıkı gölgelenme olarak iki kategoriye ayrılır. Hafif gölgelenme, hava kirliliği gibi etkenlerden oluşurken, sıkı

gölgelenme panelin üzerinde biriken katı toz kümelerinin güneş ışığını engellemesinden dolayı oluşur. Hafif gölgelenme, fotovoltaik modülün ürettiği akımı etkiler, ancak gerilim üzerinde önemli bir etki görülmez (Al-Ghandoor et al., 2018). Sıkı gölgelenmede ise, modülün performansı modüldeki tüm hücrelerin gölge altında kaldığı ya da sadece modüldeki bazı hücrelerde gölge oluşumuna göre değişir. Eğer sadece bazı hücreler gölgelenmişse gölgelenmeyen hücreler ışınımı alır ve bir akım meydana gelir. Ancak daha önce de bahsedildiği gibi bu durumda gölgelenmiş hücrelerde sıcak leke oluşabilir. Bütün hücrelerin gölgelenme durumunda ise modülden herhangi bir enerji iletimi söz konusu olmaz (Maghami et al., 2016).

Bu konu ile ilgili yapılan birçok çalışma vardır: Elminir ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, toz birikiminin eğim açısına göre en fazla panel yüzeyinde 15,84 g/m² ve en az 4,48 g/m² olarak tespit edilmiştir. Bu toz yoğunluğunun yüzeye gelen ışınım miktarını ise sırasıyla % 52,54 ve % 12,38 azalttığı tespit edilmiştir (Elminir et al., 2006). Yapılan başka bir çalışmada ise bir, iki, üç ve dört haftalık toz birikiminin ardından ışınım miktarının sırasıyla % 1,5-3,5, % 2-4,5, % 2,5-5 ve % 4-5,5 azalttığı belirlenmiştir (Ghazi and Ip, 2014). Bu ve buna benzer çalışmalar göstermektedir ki, panel yüzeyinde biriken toz ışığın hücreye ulaşımını engelleyebilmekte ve dolayısıyla hücreye gelen ışınım miktarını azaltarak performansını düşürücü bir etki sergileyebilmektedir.

2.2.2. Modül camında aşındırma

Toz asidik veya alkalidir. Nemli toz FV cam yüzeyine tutunduğunda camı oluşturan esas maddeler (silika, kireç taşı ve diğer maddeler) ile asit veya alkali reaksiyona girerler. Bu asit veya alkali ortamın artmasıyla cam yüzey yavaş yavaş aşınmaya başlar (Şekil 2.10). Bunun sonucunda, düz bir yüzey yerine pürüzlü ve engebeli bir yüzey oluşumuna sebebiyet verir (Ju and Fu, 2011).



Şekil 2.10. Modül camında aşındırma (Ju and Fu, 2011).

Toz panel yüzeyinden temizlenebilen bir maddedir. Ancak yüzeyde uzun süre kaldığında tozun yapısında bulunan maddeler yukarıda ifade edilen reaksiyonlara sebep olabilir. Bu durumda yüzeyde geri dönülmez değişimlere sebep olabilir. Cam yüzeyinde çatlaklar, oyuklar oluşabilir. Gelen ışık, yansımaya veya kırılmaya uğrayabilir. Bunun sonucu olarak da hücreye ulaşan ışınım miktarı düşer ve panelin performansı olumsuz şekilde etkilenir. Eğer yüzeydeki tozlanma uzun süre giderilmezse, uzun vadede hücrelere ve elektrik bağlantılara da zarar vermesi olasıdır (Lay-ekuakille et al., 2018).

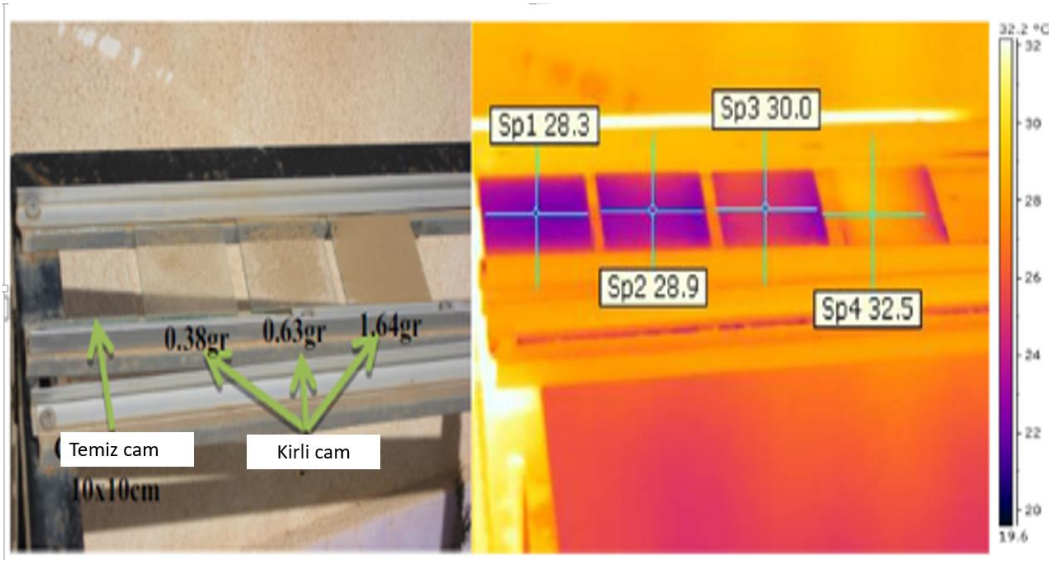
Sonuç olarak, panel üzerindeki tozlanma, gelen ışığın hücrelere ulaşmasını azaltma ve panelin sıcaklığını artırmanın yanı sıra panelin kendisine de zarar verebilir. Bu durumda, yüzey pürüzsüzlük özelliğini kaybedebilir ve bu andan itibaren panel üzerine gelen tozların panel üzerinden uzaklaşması da zorlaşır. Herhangi bir temizleme işlemi yapılmadığı takdirde ise panelin ömrünün olması, gerekenden daha kısa zamanda tükenebileceği söylenebilir.

2.2.3. Panel sıcaklığını arttırma

Tozun ısı iletkenliği çok düşüktür. Toz panelin üzerinde birikmeye başladığında ısınan panel, ısınıncı kolayca çevreye atamaz. Isı panel yüzeyine hapsedukça bu güçlü izolasyon, panelin sıcaklığının yavaş yavaş artmasına sebep olur (Ju and Fu, 2011).

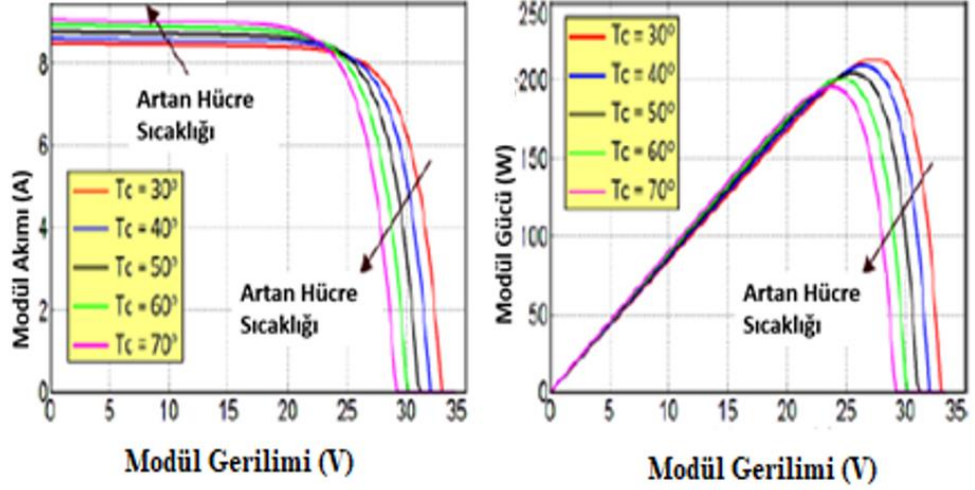
Tozlanma, bu anlamda, panel performansını iki şekilde etkileyebilir: Bunlardan birincisi, tozun panel yüzeyinde eşit şekilde dağılması ile oluşan etkidir. Bu durumda, panelin her bölgesi eşit derecede sayılabilecek bir sıcaklık artışı gösterir.

Şekil 2.11, termal kamera gözünden temiz ve üç farklı toz yoğunluğuna sahip cam örneklerini göstermektedir (Abderrezek and Fathi, 2017). Buradan anlaşılabilir ki; cam sıcaklığı ve toz yoğunluğu, orantılı bir şekilde değişiklik gösterir.



Şekil 2.11. Toz yoğunluğuna göre cam sıcaklıkları (Abderrezek and Fathi, 2017).

Malzemenin enerji aralığı, sıcaklığın artışıyla beraber daralır. Bu da, daha az enerjili fotonların da soğurulup devreye katılmasına yardımcı olur. Bu ekstra fotonlar, materyale nüfuz edebilir ve bunun sonucu olarak da kısa devre akımında artış meydana gelir (Radziemska and Klugmann, 2002). Ancak kısa devre akımında görülen bu artışın etkisi hafif bir seviyededir (Park et al., 2010). Bununla birlikte sıcaklık ile enerji aralığının azalması, daha fazla elektronun, enerji etkinliğini ısıl etki yoluyla aşmasını mümkün kılar. İletkenlik bandında termal olarak üretilen bu ek elektronlar ve değerlik bandındaki boşluklar, karanlık akımın artmasına ve sonuç olarak açık devre geriliminin düşmesine neden olur (Radziemska and Klugmann, 2002; Park et al., 2010). Şekil 2.12’de sıcaklığa göre gerilim-akım ve güç-gerilim değişim grafikleri gösterilmiştir (Vidyanandan, 2017).



Şekil 2.12. Sıcaklığa göre gerilim-akım ve güç-gerilim değişimi (Vidyanandan, 2017).

İkincisi ise, bölgesel toz birikimidir. Yaprak, kuş pisliği ve toz parçaları gibi bazı etkenler FV modüldeki bütün hücreleri olmamakla beraber bazı hücreleri bloke edebilirler. Bu durumda, hücrelerin bir kısmı üzerinde gölgelenme gözlenir ve hücreye gelen ışınım miktarında azalma görülür. Seri bağlı hücrelerden geçen akım miktarı aynı olması gerektiğinden, gölgelenmiş olan hücreye üzerinde herhangi bir toz olmayan hücrelerden akım iletmeye başlar ve gölgelenmiş hücre artık bir yük gibi davranmaya başlar. Bunun sonucu olarak, gölgelenmiş hücre ile tozdan dolayı bloke olmamış hücre arasında 20 °C'den fazla bir sıcaklık farkı oluşabilir. Bu durum, zaman içerisinde modül üzerinde tahrip edici etki gösterebilir ve bununla beraber modül performansını düşürmekler beraber modülün ömrünü azaltıcı etkide bulunabilir (Maghami et al., 2016; Elminir et al., 2006).



Şekil 2.13. Sıcak leke oluşumu (Maghami et al., 2016; Abderrezek and Fathi, 2017).

Sonuç olarak, tozlanmanın panel sıcaklığı üzerinde iki farklı etkisi söz konusudur: Bunlardan birincisi, tozun panel yüzeyine homojen bir şekilde yayılması durumudur. Bu durumda, panel üzerindeki sıcaklık her yerde neredeyse aynı derecede artacak ve bunun sonucu olarak gerilimde görülen düşüş sonucu panelin enerji üretiminde de bir düşüş gözlenecektir. İkincisi ise, tozun panel üzerinde belirli bir bölgede birikmesi sonucu oluşur. Bu durumda tozun biriktiği

bölgede, bariz bir sıcaklık farkı oluşur ve sıcak leke meydana gelir ve panelde uzun vadede ciddi zararlar oluşabilir ve kullanım ömrü kısalabilir.

2.3. Temizleme Yöntemleri

Fotovoltaik modüllerde daha önce bahsedilen enerji kayıplarının ve fotovoltaik modüllerin zarar görmemesi için, modüllerin temiz tutulması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, özellikle Türkiye gibi toz yoğunluğu fazla olan bölgelerde, panellerin belirli periyotlarla bakımlarının yapılması ve temizlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada, panelleri temizlemek için çeşitli yöntemler vardır.

2.3.1. Geleneksel temizleme yöntemleri ve elektrosatik temizleme yöntemi

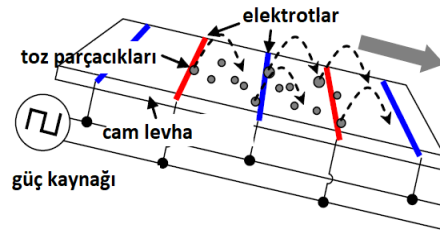
Panel temizlemede en çok uygulanan yöntemlerden birisi, el ile temizleme yöntemidir. El ile temizleme işlemi; fırça ile temizleme, panel yüzeyine üfleme ve panel üzerinde bir titreşim yaratarak panel yüzeyindeki tozları uzaklaştırma yöntemidir (Pandey et al., 2018). El ile temizleme yöntemi, binaların camlarını temizlemek işinden farksızdır. Temizleme işlemi yapmak için modülleri çizmemek için tasarlanmış özel fırçalar kullanılır. İş gücü gerektiren bir yöntemdir ve işi yapabilmek için panellerin yüksekliğinden dolayı bir merdiven veya uzun saplı bir fırça gerekebilir (Maghami et al., 2016). Bu yöntemde; panelleri silme işlemi, insanlar tarafından yapılabilmeyle birlikte bu iş için tasarlanmış robotlar da kullanılabilir. Eğer işlem insanlar tarafından gerçekleştiriliyorsa, yapılan temizliğin kalitesi görsel yöntemlerle değerlendirilir (Hudedmani et al., 2017). Temizleme işlemi insanlar tarafından yapıldığında, yüzeyde tortu halini almış toz ve kuş pisliği gibi zor temizlenen kirlilikler daha verimli bir şekilde temizlenebilir (Rahman et al., 2017). Bu işlem, otomatik temizleme robotu yardımı ile yapıldığında ise hem daha kısa sürede hem de daha verimli bir şekilde yapılması mümkündür (Pandey et al., 2018). Bir diğer yöntem, tozları uzaklaştırmak için kullanılan hava kompresörüdür. Ancak tozların havada asılı kalmasına sebep olmakla beraber, yalnızca küçük sistemler için elverişlidir (Ghazi et al., 2014). Öte yandan panel üzerinde titreşim yaratılarak yüzeydeki adezyon kuvvetini azaltmak da mümkündür. Böylece tozların panelden uzaklaştırılması kolaylaştırılır (Kazmerski et al., 2013).

Panellerin herhangi bir işlem uygulanmadan rüzgâr, yağmur, eriyen kar ve yerçekimi ile birlikte temizlenmesi de olanaklıdır. Yağmur, en etkili temizleme

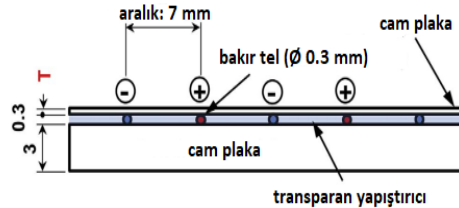
yollarından birisidir. Ancak hafif yağmur havadaki parçacıkları modül yüzeyinde yapışkan çamur parçalarına dönüştürebilir (Klugmann-Radziemska, 2015). Bu uygulamalarla beraber, panellerin eğim açısını değiştirerek tozları panellerden uzaklaştırmak mümkündür. Bu yöntemde paneller manuel olarak sabahın erken saatlerinde ya da akşamın geç saatlerinde, tozun panel üzerinden düşmesi için maksimum eğim açısına getirilir. Ancak bu, enerjinin ve iş gücünün fazla olduğu bir işlemdir ve sabit eğim açılı sistemler için geçerli değildir (Ghazi et al., 2014).

2.3.2. Elektrostatik temizleme yöntemi ve temizleme performansını etkileyen faktörler

Bir başka temizleme yöntemi ise, bu tezin konusunu oluşturan elektrostatik temizleme yöntemidir. Elektrostatik temizleme işleminde panelin cam plakasının altına, paralel şekilde konumlandırılmış elektrotlar yerleştirilir (He et al., 2001). Bu elektrotlara belirli bir frekans değerinde yüksek gerilim kaynağından üretilen tek fazlı AC gerilim uygulanarak bir elektrik alan yaratılır. Oluşan bu elektrik alan, panel üzerindeki tozları iterek panelden uzaklaştıracak ve tozlanmadan kaynaklı kayıpları azaltacaktır (Kawamoto and Shibata, 2015). Güneş panellerinin yüzeyinden tozu uzaklaştırmak için tasarlanan bu sistem, elektrostatik etki ile gelişmiş bir temizleme sistemi oluşturulur. Tozlanma etkisini azaltmak adına oluşturulan elektrostatik temizleme sisteminin şematik gösterimi ve enine kesiti sırasıyla, Şekil 2.14. ve Şekil 2.15’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Elektrostatik temizleme sisteminin şematik gösterimi (Kawamoto and Shibata, 2015).



Şekil 2.15. Elektrostatik temizleme sisteminin enine kesit gösterimi (Kawamoto and Shibata, 2015).

Kawamoto ve Shibata (2015) tarafından, üretim maliyetini azaltmak amacıyla İndiyum Kalay Oksit (ITO) elektrotları yerine, camın alt katmanı içine 7 mm ara ile 0,3 mm çapında bakırdan yapılmış paralel tel elektrotlar yerleştirilmiştir. Elektrotlar yerleştirildikten sonra yalıtım bozulmasını ve elektrik çarpmasını önlemek için camın alt tabakasına şeffaf bir yapıştırıcı ile ince bir borosilikat cam plaka yapıştırılmıştır. Metal tel elektrotlar, güneş panelinde bir gölge oluşturduğundan ve fotovoltaik panelin çıkış gücünü düşürdüğünden, ince bir tel ve konfigürasyonda elektrotlar arası geniş aralıklar kullanılmıştır.

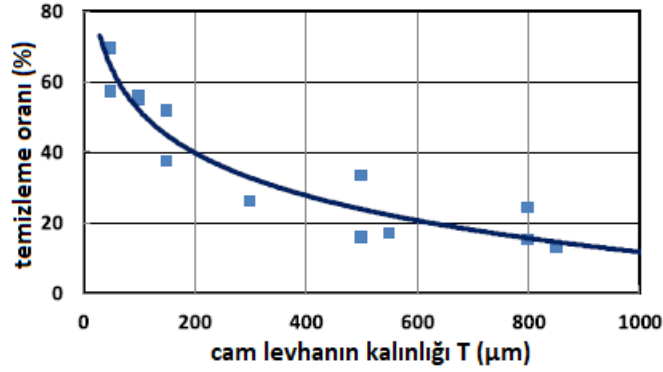
Sistemde elektrot bağlantılarındaki güç kaynağı ve bağlantılar arasındaki karmaşıklık azaltmak için üç fazlı gerilim kaynağıyla oluşturulan hareketli bir dalga yerine tek fazlı gerilim kaynağı ile oluşturulan durağan bir dalga kullanılmıştır (Liu and Marshall, 2010; Kawamoto and Miwa, 2011). Hareketli bir dalga, tek fazlı bir gerilimin uygulanmasıyla üretilmediğinden, parçacıklar bir yönde taşınmaktan ziyade, plakadan aşağı doğru hareket ettirilir. Panel üzerindeki tozlar ek olarak yerçekimi ve rüzgârın yardımı ile de aşağı doğru itilir (Kawamoto and Shibata, 2015; Kawamoto and Guo, 2018).

Toz parçacıklarının uzaklaştırılabilmesi için, elektrostatik kuvvet, yerçekimi kuvveti, rüzgâr gibi diğer kuvvetler ile toz parçacıkları ve cam levhanın arasındaki yapışma kuvvetinin toplamından büyük olmalıdır. Belirlenen yere kurulan panellerin eğimi ve toz parçalarının belirli ağırlıklarından dolayı yerçekimi kuvveti ile oynamak mümkün değildir. Bu yüzden temizleme performansını geliştirmek için diğer faktörler incelenir.

2.3.2.1. Cam levhanın kalınlığı

Temizleme performansını artıracak ilk olası yöntem, yüksek bir Coulomb Kuvveti uygulamaktır (Liu and Marshall, 2010). Alandaki toz parçacıklarının yükünü kontrol etmek zor olduğundan, daha güçlü bir elektrostatik alanın uygulanması, Coulomb Kuvvetini artırmak için tek olası stratejidir. Bu, yüksek gerilim uygulanarak ve cam levhanın kalınlığını azaltarak mümkün olur. Yüksek gerilim uygulanması yalıtım bozulması tarafından sınırlıdır (Kawamoto et al., 2011). Diğer yandan Şekil 2.16, cam levhanın kalınlığının azaltılmasını uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Cam levhanın kalın olması halinde temizleme performansı düşecektir. Çünkü tel elektrotlar ile cam levhanın yüzeyi arasındaki uzaklık sebebiyle cam tabakada daha az bir elektrostatik alan oluşacaktır (Kawamoto and Guo, 2018). Gelişmiş bir üretim teknolojisi, yalıtım gücünün artmasını ve cam levhanın kalınlığının endüstriyel ölçekte azaltılmasını

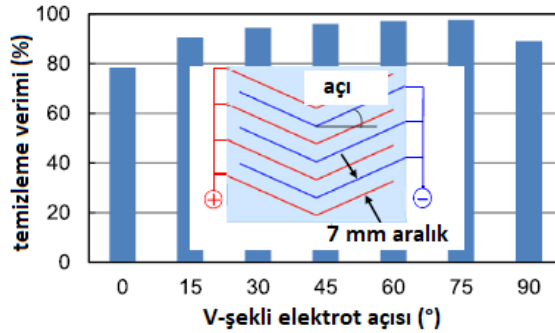
gerçekleştirebilir. Cam levhanın kalınlığının temizleme performansına olan etkisi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Cam levhanın kalınlığının temizleme performansına etkisi (Kawamoto and Guo, 2018).

2.3.2.2. Elektrotların yerleşim düzeni

Sistem performansını artırıcı bir diğer yöntem ise, paralel elektrotları V şeklinde yapılandırmaktır. 0° yatay (orijinal) konfigürasyona karşılık gelirken, 90° dikey konfigürasyona karşılık gelmektedir. Açıkça görülmektedir ki, elektrotların 45° ve 75° dereceler arası açıyla yerleşiminde temizleme performansı artmaktadır. Yüksek hızlı mikroskop kamerası ve sayısal hesaplamalar kullanılarak yapılan parçacık hareketinin dikkatli bir şekilde incelenmesi, V şeklindeki konfigürasyonun kullanılmanın daha etkili olacağını göstermektedir. Paneldeki bazı parçacıklar sadece aşağıya doğru değil, aynı zamanda panelin yan taraflarına doğru itilir. Bu da, panelin temizlenme performansını artırır (Kawamoto and Shibata, 2015). Şekil 2.17'de elektrotların yerleştirilme açıları ve buna bağlı olarak değişen temizleme performansının değerleri gösterilmektedir.



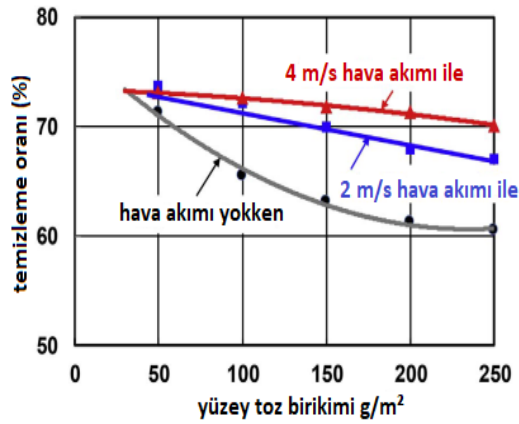
Şekil 2.17. V-şekli konfigürasyon açısı ile temizleme veriminin ilişkisi (20° eğim, 100g/m² yüzey tozu, 0.86 kV_{p-p}/mm, 1Hz) (Kawamoto and Shibata, 2015).

Daha güçlü elektrik alan oluşturmanın bir diğer yolu da elektrostatik alanın uygulandığı etkili alanı, elektrotlar arasındaki mesafeyi düşürerek artırmaktır

(Sayyah et al., 2016; Kawamoto et al., 2006). Uzaklaştırılmayan tozun, elektrostatik alanın düşük olduğu tel elektrotlar arasındaki orta alanda kaldığı görülmüştür. Ancak bu seçenek, elektrotlardan kaynaklı gölgeleri artırdığı ve ışık emilimine engel olduğu için tercih edilmez. Kullanılan elektrot telinin opak olması (saydam olmaması) durumunda, gücün azalması ve artması, sırasıyla gölgelenmenin ve temizleme performansının artması arasında bir denge vardır (Kawamoto and Guo, 2018). Sonuç olarak, bu seçenek düşük maliyetli bir şeffaf elektrot baskı teknolojisi mevcutsa kullanılabilir [Meenakshi et al., 2014; Hecht et al., 2011).

2.3.2.3. Rüzgar etkisi

Performansın artırılması için değerlendirilebilecek diğer bir strateji ise, doğal rüzgârı kullanmaktır. Rüzgârın etkisini değerlendirmek için eğimli cam tabakanın üstüne, tabakaya paralel bir fan yerleştirilmiştir. Panel üzerinden geçen havanın hızı, bir ısı anemometre ile cam levhanın yüzeyinin 2 mm üzerinden ölçülmüştür. Bu testte (Kawamoto and Guo, 2018), uzun ve geniş bir temizleme levhası kullanılmıştır (560x310 mm).



Şekil 2.18. Rüzgârın yüzeyde biriken toz yoğunluğuna göre temizleme performansına katkısı (Kawamoto and Guo, 2018).

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, panel yüzeyine düşük hızlı bir rüzgâr verilmesi durumunda bile, yüksek bir toz birikiminde temizleme performansında önemli bir artış sağlanabilir. Bu sonuç, temizleme sisteminin doğal rüzgârlarla senkronize bir şekilde çalıştırılmasının tercih edilebileceğini göstermektedir.

2.3.2.4. Yapışma kuvveti

Alınacak bir diğer önlem ise, yapışma kuvvetinin düşürülmesidir. Yapışma kuvvetinin düşürülmesi levha yüzeyine toz tutmayan kaplama uygulayarak gerçekleştirilebilir (Fathi et al., 2017). Bu aşamada, panel yüzeyine birkaç çeşit konvansiyonel kaplama maddesi uygulanarak sürtünme katsayısı ölçülür. Toz, yatay konumda tutulan ve toz önleyici kaplama maddesiyle kaplanmış olan cam plakaya düzgün bir şekilde serpilir. Daha sonra, plakanın eğimi, gerilim uygulanmadan kademeli olarak arttırılır ve her bir eğim açısı için düşen tozların ağırlığı ölçülür. Temizleme oranı, başlangıçta plaka üzerinde biriken tozların ağırlıklarının, düşen tozun ağırlığına oranı ile belirlenir (Kawamoto and Guo, 2018). Doha’da gerçekleştirilen bu işlemin sonucu, Şekil 2.19’da gösterilmiştir.

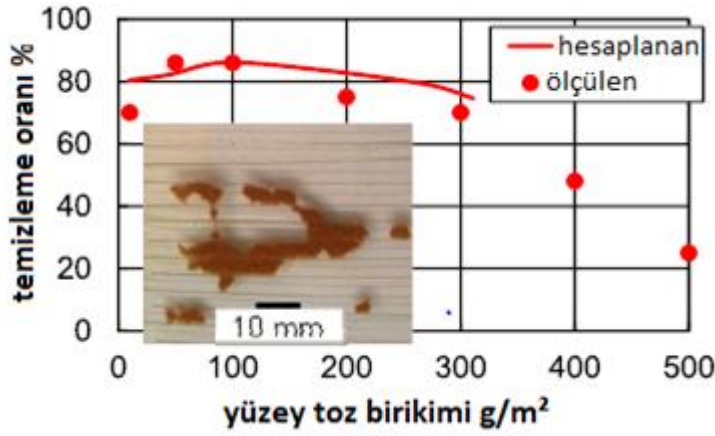


Şekil 2.19. Anti-toz kaplamanın yapışma kuvveti üzerindeki etkisi (Kawamoto and Guo, 2018).

Yapışma kuvvetini düşürmekle ilişkili bir diğer yol ise, işlem tasarısıdır. Çünkü birikmiş toz parçaları, plaka üzerinde birbirlerine bağlanır. Yüksek yapışma kuvveti sadece tanecikler ve plaka arasında değil, aynı zamanda tanecikler arasında da vardır. Bu yüzden; toz birikiminden önce, işlemin sıklıkla uygulanması tercih edilir (Kawamoto and Guo, 2018; 81). Aslında, sistemin toz birikimi ile eş zamanlı olarak çalıştırılması durumunda cam kapağa yaklaşan tozun uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu işlemde sistemin güç tüketimi, güneş hücresinin çıkış gücüne göre çok düşük olacağı ve sistemin çok kısa bir süre çalıştırılacağından, sık kullanılan çalışma şeması nedeniyle, bir güneş enerjisi santralının toplam enerji verimliliğinin düşmesi ihmal edilebilir bir düzeyde olacaktır (Kawamoto and Guo, 2018).

2.3.2.5. Yüzeydeki toz yoğunluğu

Temizleme performansını etkileyen bir diğer etken ise, yüzeyde biriken tozun miktarıdır. El-Shobokshy ve arkadaşları tarafından Suudi Arabistan, Riyad'da panel üzerinde günlük ortalama $0,387 \text{ g/m}^2$ ve aylık yaklaşık 10 g/m^2 toz birikimi tespit edilmiştir (El-Shobokshy et.al., 1985). Panel üzerinde biriken toz birikiminin miktarının temizlik yapılmadığı takdirde gün geçtikçe daha da yüksek miktarlara ulaşması söz konusudur. Panel üzerindeki toz birikimi, kurulum yapılan yerin coğrafi ve meteorolojik koşullarına bağlı olduğundan, toz birikimi için tam bir tasarım kriteri yoktur. Ancak, temizleme sisteminin 100 g/m^2 'den daha fazla tozu uzaklaştırması gerektiği konusundaki varsayım mantıklıdır. Bu nedenle temizleme performansını incelemek için yapılan deneyler ve hesaplamalar, yüksek miktarda toz birikimi altında gerçekleştirilir. Yüzey birikimi ve temizleme verimi ile ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki ilişki, Şekil 2.20'de gösterilmiştir (Kawamoto and Shibata, 2015).



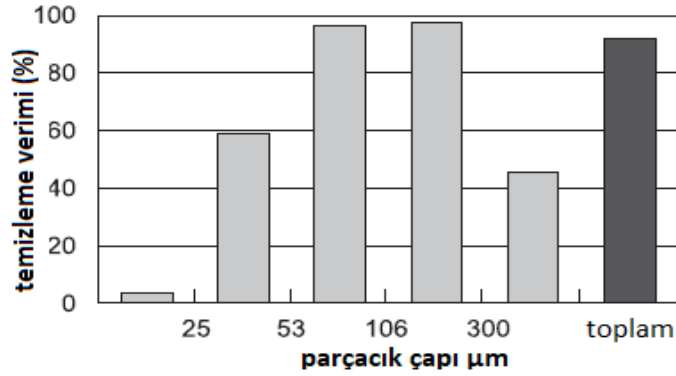
Şekil 2.20. Yüzey birikimi ile temizleme verimini arasındaki ilişkinin ölçülen ve hesaplanan değerleri (Kawamoto and Shibata, 2015).

Temizleme sisteminin performansı, yüksek toz birikimi koşullarında daha kötü bir değere sahip olsa da, deneysel olarak temizleme performansının elektrostatik temizleme işlemi sırasında, eğimli yüzeye paralel doğrultuda esen hafif bir rüzgârla (1-2 m/s'den daha büyük hıza sahip olan) temizleme performansının arttığı görülmüştür (Kawamoto and Shibata, 2015). Yüksek hızlı rüzgârın toz birikimini arttırdığı belirtilmekle beraber, elektrostatik kuvvet ile hareketlenen toz parçacıklarının rüzgâr varlığında temizleme performansını da

arttırdığı gözlemlenmiştir (Kawamoto and Shibata, 2015; Goossens and Kerschaefer, 1999).

2.3.2.6. Parçacık çapı

Bu sistem tarafından temizlenebilen parçacıkların boyutlarını belirlemek için, toz parçacıkları elek kullanılarak, boyutlarına göre beş sınıfta gruplandırılmıştır: Şekil 2.21 parçacıkların boyutlarının temizleme verimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Yapılan bu çalışmada, çapı 25 μm 'dan küçük ve 300 μm 'den büyük parçacıkların verimli temizlenmediği görülmüştür (Kawamoto and Shibata, 2015). Küçük parçacıklar büyük parçacıklara göre güneş panelinin performansında daha büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle bunların için temizleme sistemi ve çalışma şeması iyileştirilmeli ve optimize edilmelidir (Kawamoto and Miwa, 2011). Parçacık boyutlarına göre temizleme verimi sözü edilen şekilde gösterilmiştir.

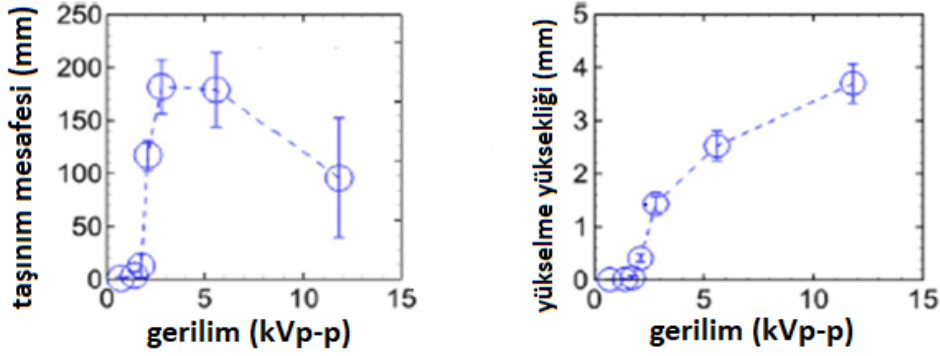


Şekil 2.21. Sınıflandırılan parçacık boyutlarına göre temizleme verimleri (100 g/m^2 toz birikimi, 20° eğim açısı, 0.7 $\text{kV}_{\text{p-p}}/\text{mm}$, 0.2 Hz) (Kawamoto and Shibata, 2015).

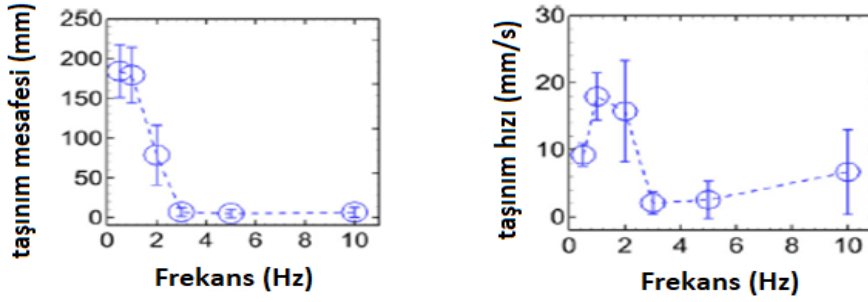
2.3.2.7. Uygulanan gerilim ve frekans

Yapılan çalışmalarda, uygulanan gerilim ve frekans değerleri elektrostatik temizleme performansında önemli iki etken olarak değerlendirilmektedir. Chesnutt ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bu iki parametrenin temizleme performansı üzerindeki etkisini göstermiştir. Yaptıkları çalışmada en küçük gerilim değeri olan 0,7 $\text{kV}_{\text{p-p}}$ gerilim değeri parçacıkları hareket ettirmeye yetmezken gerilim değeri yükseldikçe yüzeydeki parçacıklar daha uzak mesafelere taşınabilmektedir. Ancak gerilim değeri fazla arttırılırsa, çoğu parçacık yukarı doğru hareket eder ve yüzeyde aldığı mesafe azalır. Taşınım mesafesi, düşük frekans değerlerinde en yüksek

seviyeye ulaşır. En yüksek taşınım hızı ise 1-3 Hz değerleri arasında elde edilmiştir (Chesnutt et al., 2017).



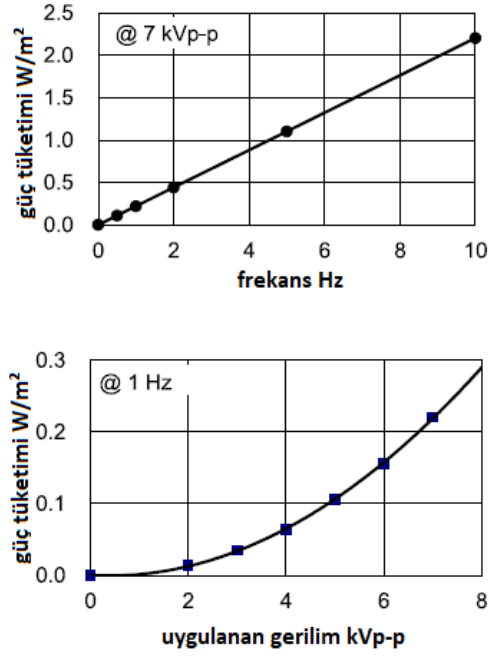
Şekil 2.22. Gerilimin parçacık hareketi üzerine etkisi (Chesnutt et al., 2017).



Şekil 2.23. Frekansın parçacık hareketi üzerine etkisi (Chesnutt et al., 2017).

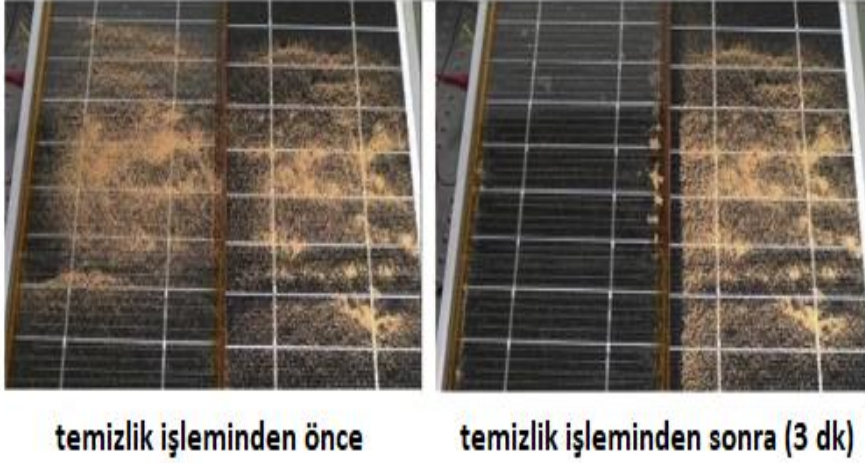
2.3.3. Güç tüketimi

Sistemin güç tüketimi, Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Güç tüketimi, frekans ile orantılıdır. Yapılan bir çalışmada, 800 V ve 10 Hz çalışma koşullarında 30 saniyelik temizleme işleminde harcanan enerji sadece 0.06 Wh olarak tespit edilmiştir (Kawamoto et al., 2011). Yalıtım bozulması, eşik gerilim değeri 7 mm aralıklarla yerleştirilen elektrotlar için 8,4 kVp-p ve optimum frekans 10 Hz'den düşük olduğundan, güç tüketimi 7 kVp-p ve 1Hz çalışma koşulları altında sadece 0,2 W/m²'dir. Enerji tüketimini etkileyen önemli bir faktör, işletim planına bağlı olan sistemin işletim zamanıdır. Yani, işlemin ne kadar tekrarlandığı ve süresi, örneğin, sistem günde yarım saat çalıştırıldığında günlük enerji tüketimi sadece 0,1 Wh/m² olur (Kawamoto and Shibata, 2015). Bu sistemin enerji tüketimi, tipik bir güneş panelinin enerji çıkışına kıyasla oldukça düşüktür.



Şekil 2.24. Elektrostatik temizleme sisteminin uygulanan frekans ve gerilim değerine göre güç tüketimi (Kawamoto and Shibata, 2015).

Sistemin performansı, gerçek güneş panelleri (560 mm x 320 mm) üzerinde test edilmiştir. Şekil 2.25, sol taraftaki resim panel üzerinde biriken tozu göstermektedir. Sağ taraftaki resim ise, panelin yarısına 3 dakika süre ile uygulanan temizleme işleminden sonrasına aittir. Verilen şekil, bu temizleme sisteminin tozu panelden uzaklaştırmakta etkili olduğunu açıkça göstermektedir. Yüzey, kum ile kaplandığında panel gücünün % 60 oranında düştüğü, işlemden sonra ise bu güç kaybının % 90 oranında geri getirildiği görülmüştür (Kawamoto and Shibata, 2015). Sistem sürekli çalıştırılırsa, kapak camına yaklaşan tozun itildiğini göstermek için başka bir deney yapılmıştır. Temizleme sisteminin performansının sürekli işletimde, aralıklı işleme kıyasla daha iyi olduğu belirlenmiştir (Kawamoto and Guo, 2018). En uygun işletim planını belirlemek ve ilgili yerin özel koşullarındaki etkinliğini göstermek için gerçek şartlar altında saha deneyi yapılmalıdır.



Şekil 2.25. Panelin temizlik yapılmadan önceki ve temizlik yapıldıktan sonraki hali (Kawamoto and Shibata, 2015).

Eğer yüzey yağış veya çiy nedeniyle ıslanmışsa veya kum fırtınası ve yağış aynı anda meydana gelirse, biriken toz yüzeye güçlü bir şekilde yapışır. Bu koşullar altında gerçekleştirilen temizleme deneyleri, ancak plaka kurutulduktan sonra yüksek performans elde edileceğini göstermektedir [He et al., 2011; Kawamoto and Shibata, 2015).

2.4. Ekonomik Değerlendirme

Temizleme işlemi, özellikle yoğun tozlanma bölgesinde bulunan FV santraller için oldukça önemlidir. Belirli aralıklarla panellerin temizlenmesi gerekmektedir. Bu aralıklar, bölgeden bölgeye ve santralin bulunduğu bölgenin hava koşullarına göre fark edebilir. Ancak panellerde temizlik işleminin ekonomik olarak da bir maliyeti bulunmaktadır ve bu maliyet göz önüne alınarak işlemin yapılması en verimli sonucu ortaya çıkaracaktır.

FV panel üzerinde toz birikimi, eğer kurulumun yapıldığı bölge kurak bir özellik sergiliyorsa veya ışınımın çok olduğu dönemde, aylarca yağış yoksunluğu çeken bölgelerde, FV performansı üzerinde ciddi etkilerde bulunabilirler. Trafik, endüstriyel aktiviteler ve evsel ısınma gibi nedenlerden kaynaklanan kirlilik nedeni ile oluşan bölgesel gölgelenmeden kaynaklı ekonomik kayıplar, geçici veya tesadüfi kayıplar olarak tanımlanır ve sistem performansını da güçlü bir şekilde etkileyebilir. Bunun sonucunda da santrallerin geri ödeme süreleri, tahmin edilenden daha uzun hale gelmektedir (Cristaldi et al., 2012).

FV şebeke bakım stratejisini en uygun hale getirmek adına, elektrik üretimindeki kayıplar ile işletme-bakım maliyeti arasındaki ilişkisini incelemek önemlidir. Bu ilişkiyi incelemek adına bazı parametreler aşağıda verilmiştir:

P_{gen} : Temiz panel tarafından üretilen güç (kW)

η_{corr_irr} : İnceleme boyunca gelen ışınım değerinin düzeltme faktörü. Eğer P_{gen} değeri η_{corr_irr} değerine bölünürse, referans şartlarındaki periyot boyunca üretilen gücü elde etmek mümkündür.

η_{ineff} : Tozlanmadan dolayı verim düşüm oranı; izleme periyodu boyunca sabit olduğu varsayılır.

Rs : kWh başına kurtarılan her üretimin maddi değeri

$Rinc$: kWh başına kurtarılan her üretim için alınacak teşviğin değeri

T_M : Bakım aktivitesinin bakım yapmaya değer zamanı

FV panelinin elektrik üretim kaybından dolayı oluşan maliyet (C_{PL}) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$C_{PL} = \frac{P_{gen} \cdot \eta_{ineff} \cdot T_M}{\eta_{corr_irr}} (Rs + Rinc)$$

Bir diğer maliyet ise tek bir temizleme işleminde oluşan bakım maliyetidir (C_{MA}). Bu da yaklaşık olarak kullanılan malzeme maliyeti (C_m) ve işgücü maliyetinin (C_{wf}) toplamı ile elde edilir (Tanesab et al., 2018):

$$C_{MA} = C_m + C_{wf}$$

Bakım faaliyeti, izleme faaliyetinin aşağıdaki eşitsizliğin artık sağlanmadığını gösterdiğinde gerçekleştirilmelidir.

$$C_{PL} \leq C_{MA}$$

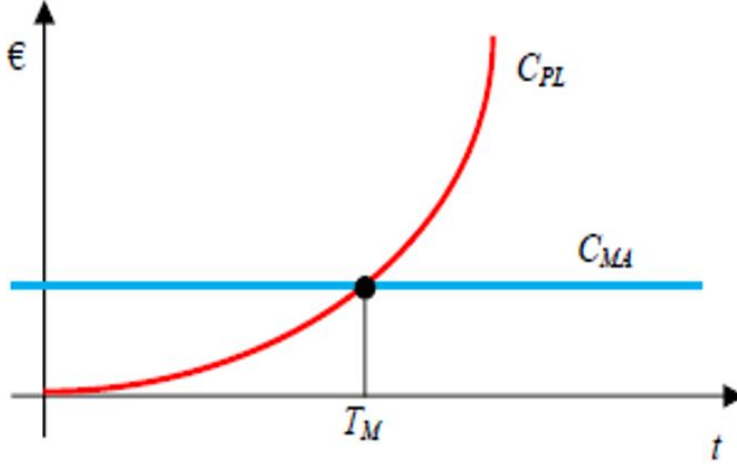
Bir diğer deyişle:

$$\left(\frac{P_{gen} \cdot \eta_{ineff} \cdot T_M}{\eta_{corr_irr}} \right) (Rs + Rinc) \leq C_{MA}$$

Bu eşitlik kullanılarak T_M elde edilebilir:

$$T_M = C_{MA} / \left(\frac{P_{gen} \cdot \eta_{ineff}}{\eta_{corr_irr}} \right) (Rs + Rinc)$$

Şekil 2.26, enerji üretim kaybından dolayı oluşan maliyet (kırmızı) ve bakım maliyetini (mavi) göstermektedir. T_M parametresinin en uygun değeri, enerji üretim kaybından dolayı oluşan maliyetin bakım maliyetine geçmeye başladığındaki zaman değeridir (Faifer et al. 2014).



Şekil 2.26. Ekonomil analiz

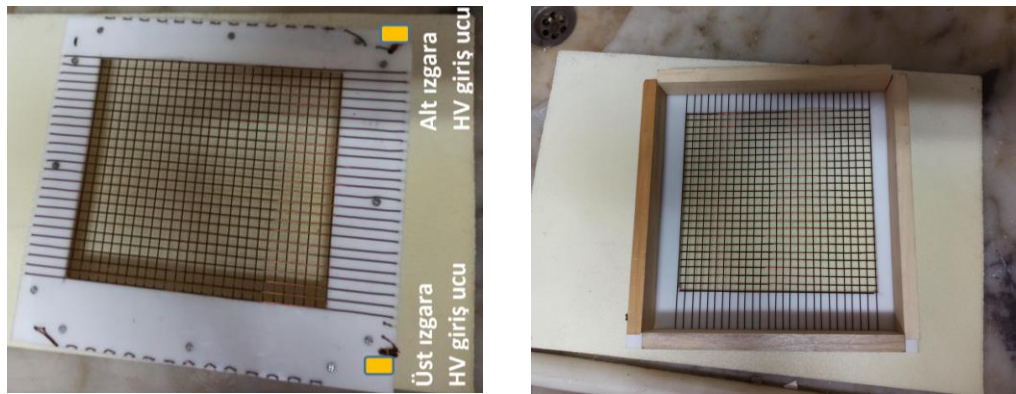
Panellerde temizleme işlemleri oldukça önemli olmakla beraber, bu işlemlerin bir de göz önüne alınması gereken ekonomik tarafı vardır. Yapılan temizlik işlemi, fotovoltaik santrali ekonomik açıdan zarara uğratmamalıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik panellerde oluşan ve panellerin enerji üretim gücünü önemli ölçülerde düşürebilen tozlanma sorunu ele alındı. Bu bağlamda tozlanma problemini çözmek için gelecek adına umut vaat eden elektrostatik temizleme yöntemi incelendi.

Elektrostatik temizleme yöntemini uygulayabilmek için öncelikle elektriksel olarak yalıtkan 5 mm kalınlığında kare biçiminde kesilmiş (150mm x 150mm) bakalit malzeme seçildi. Bu malzemenin ortasında 120 mm x 100 mm ölçüleri olan içerisine deney için kullanılacak fotovoltaik panelin sığabileceği bir boşluk oluşturuldu. Bakalit çerçevenin dört kenarına ortasında oluşturulan boşluk bölgesini örtecek biçimde yönlendirilmiş 5mm aralıklı ızgara oluşturmak için tel kanalları açıldı. Daha sonra, bu çerçevenin karşılıklı kenarları arasına 0,6 mm çapında, emaye kaplı bakır tel bir birine paralel olacak şekilde gerildi. Bu yapı hazırlanırken tellerin üst üste gelip bir birine temas etmemesi için bakalit malzemenin ön ve arka yüzeyi kullanılarak ızgara yapısı oluşturuldu.

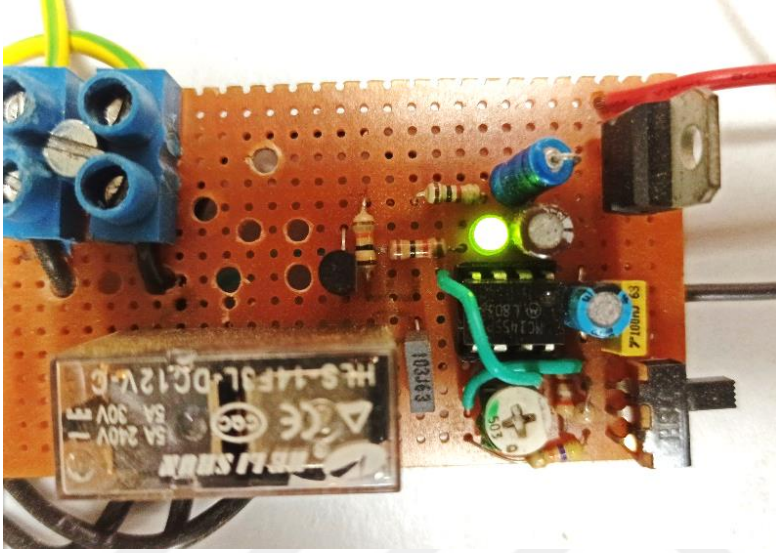
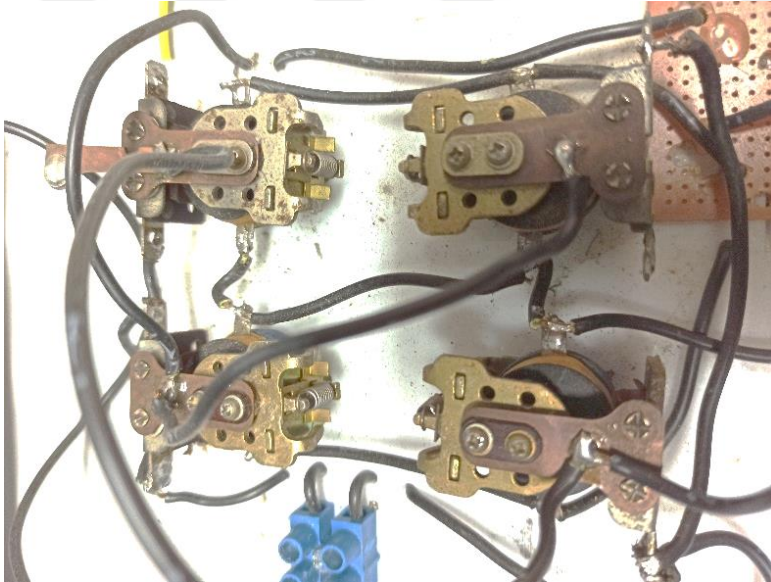
Oluşturulan alt ve üst teller arasında, yönelim olarak 90° açı olmasına dikkat edildi. Bu gerilen telin gerilme kenarları kazıtılarak birbirine lehimlendi. Böylece gerilen iletkenler arasında oluşan elektrostatik alanın panelin her yerinde aynı değerde olması sağlandı. Elde edilen ızgara yapısına sahip çerçeveye ait görüntü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Temizleme mekanizmasının önden (sol resim) ve arkadan (sağ resim) görünüşü.

Birbirine dik olarak yönelmiş iki paralel ızgaranın iletim uçları, yüksek gerilim doğru akım (DC) güç kaynağının pozitif ve negatif çıkış uçlarına bağlanarak teller arasında elektrostatik alan elde edildi. Elde edilen elektrostatik alanın toz

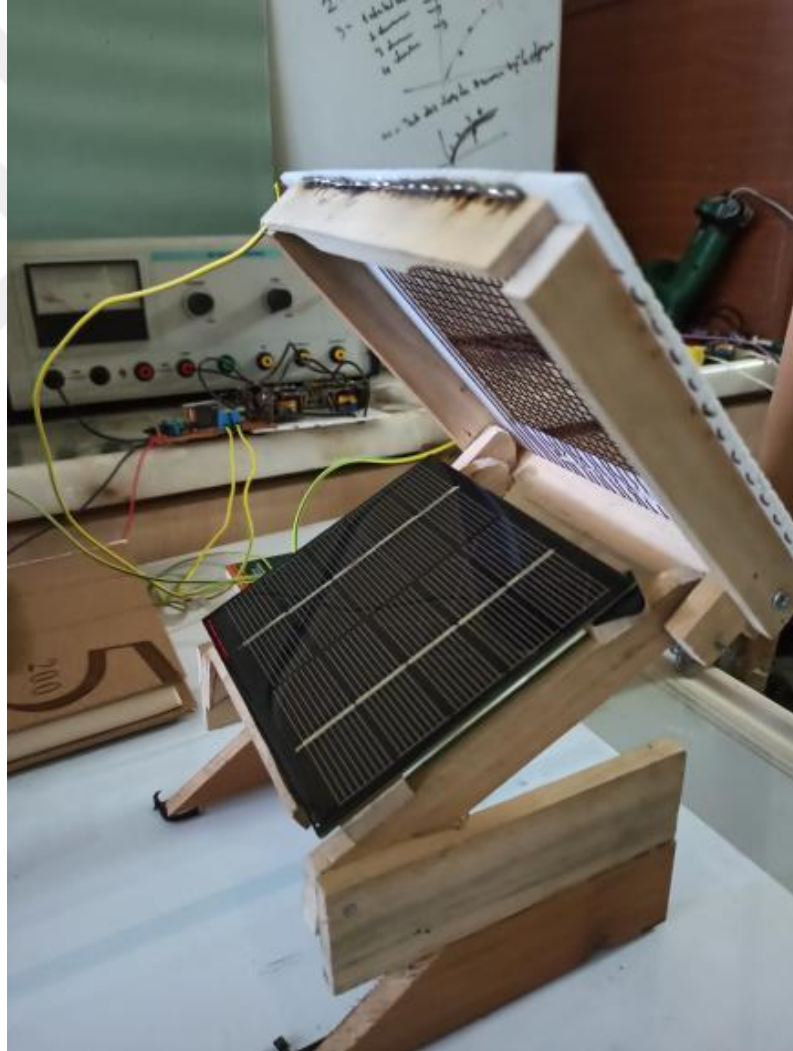
uzaklaştırma için kullanımı sırasında etki düzeyini arttırmak amacıyla paralel tellerdeki pozitif ve negatif kutupları sürekli olarak yer değiştirildi. Böylece, tozların sürekli hareket ettirilmesi sağlandı. Deney sisteminde doğru akım güç kaynağından alınan sabit DC yüksek gerilimden, 1 Hz frekansında kutup değişimi oluşturulması amacıyla bir elektronik devre tasarlandı ve temizleme sistemi oluşturulmuş oldu (Şekil 3.2 a ve b).

**a****b**

Şekil 3.2 a- 1 Hz dalga üretici, b- Yüksek gerilim polarite değiştirici devre.

Elde edilen temizleme sistemi, Türkiye'deki mevcut fotovoltaik panel uygulamaları dikkate alınarak, belli bir eğim açısında (32°) ışık kaynağına doğru yönlendirildi. Ancak deneyler sırasında güneş ışığının sabit şiddette elde edilememesi nedeniyle sistem oluşturulurken güneş ışığı yerine, genel davranış açısından güneş ışığını tam olarak örnekleyemese de, çalışmamız için fikir verebilecek bir ışık kaynağı olarak 1000 W'lık halojen lamba kullanıldı.

Bu işlemden sonra temizleme mekanizmasını her denemede istikrarlı sonuçlar vermesini sağlamak amacıyla panel üzerine toz giderici ızgara yerleştirilmesi sırasında, hassas bir biçimde konumlandırabilmek için hareketli eklem düzeneği oluşturdu (Şekil 3.3).



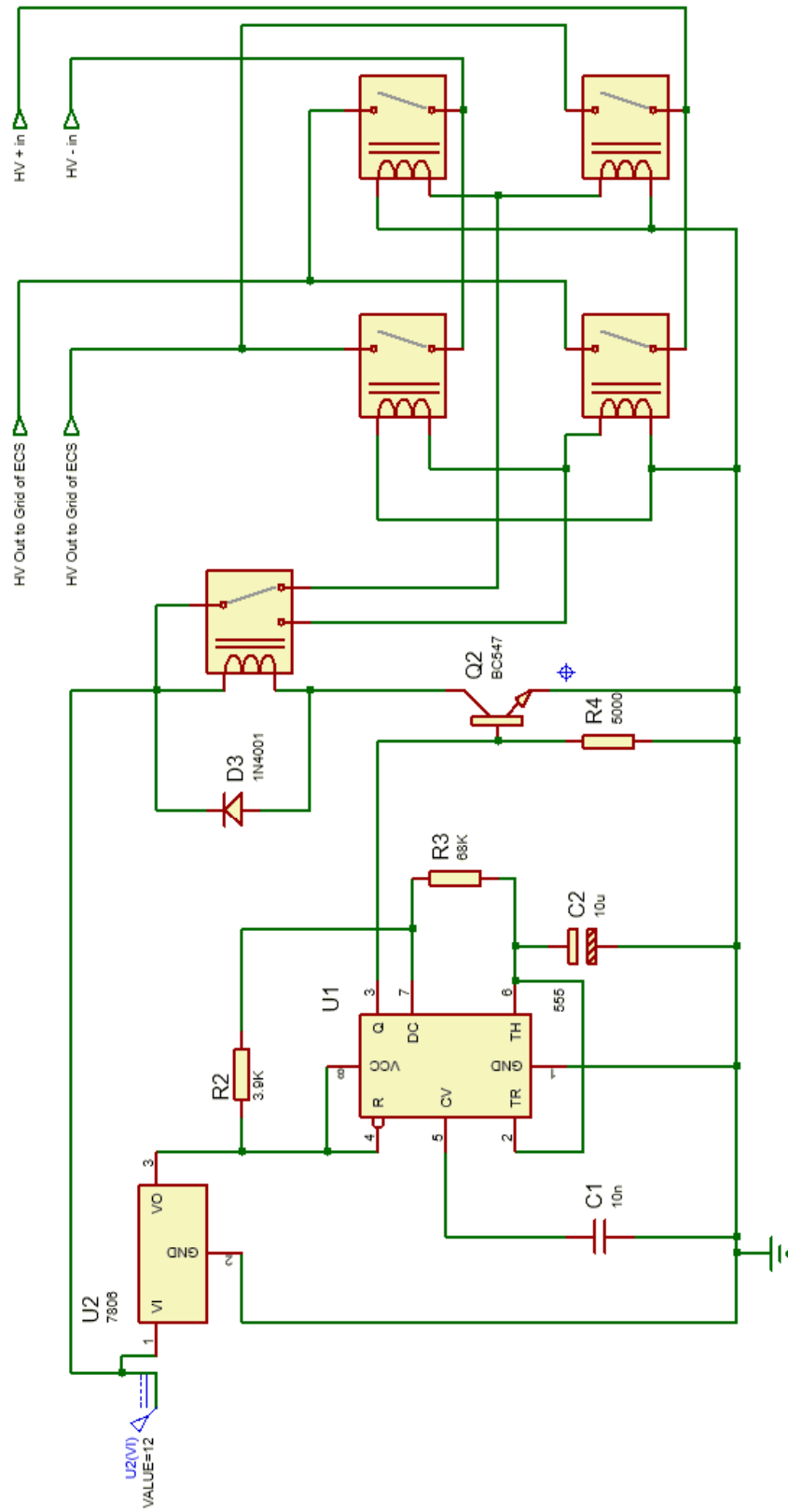
Şekil 3.3. Elektrostatik temizleme sisteminin gösterimi

Literatür araştırmalarında rastlanılan elektrostatik temizleme uygulamalarında, genellikle elektrotlar birbirine paralel şekilde yönlendirilerek

temizleme çerçevesi direkt olarak fotovoltaik panel yüzeyi içerisinde oluşturulmuştur. Bu tür uygulamalarda, elektrostatik temizleme işlemi sırasında tozlanmadan dolayı enerji kayıpları azaltılırken, panel üzerindeki sabit uygulamanın önemli ölçüde gölgeleme oluşturduğu görülmektedir. Bu sorunun önüne geçmek için çalışmada tasarlanan sistemin temizleme işlemini yapan kısmı (ızgara bölüm), işlem tamamlandıktan sonra yüzeyden uzaklaştırmak için yukarı kaldırılabilir şekilde tasarlandı. Bu tasarım, Kawamoto'nun yaptığı çalışmadan ilham alınarak yapıldı (Kawamoto, 2019). Ancak literatürde bulunan bu temizleme sisteminin aksine, çerçeve oluşturulan iskelete sabitlendi. Böylelikle, literatürde yer alan elektrostatik temizleme sistemlerinden farklı olarak, gölgeleme sorununun ortadan kaldırıldığı ve tasarlanan iskelet sayesinde hem daha tutarlı sonuçların elde edilebileceği hem de temizleme sisteminin panele olan uzaklığı kontrollü bir şekilde ayarlanabileceği bir düzenek oluşturuldu.

Tasarlanan temizleme sisteminin Türkiye koşullarında ideal şartlarda çalıştırılabilmesi ve değerlendirilmesi için Şekil 3.3'de görülen, tarafımızdan oluşturulan mekanizmada, fotovoltaik panel eğimli bir biçimde yerleştirilmiştir. Panelin eğimi, 32° olarak ayarlanmıştır. Bunun sebebi, yapılan çalışmalara göre Türkiye'nin konumundan dolayı panel üzerine düşen güneş ışığı miktarı en verimli biçimde bu yönelimle sağlanmaktadır. Oluşturulan bu mekanizma ile elektrostatik temizleme sisteminin Türkiye'deki uygulanabilirliğinin yaklaşık olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

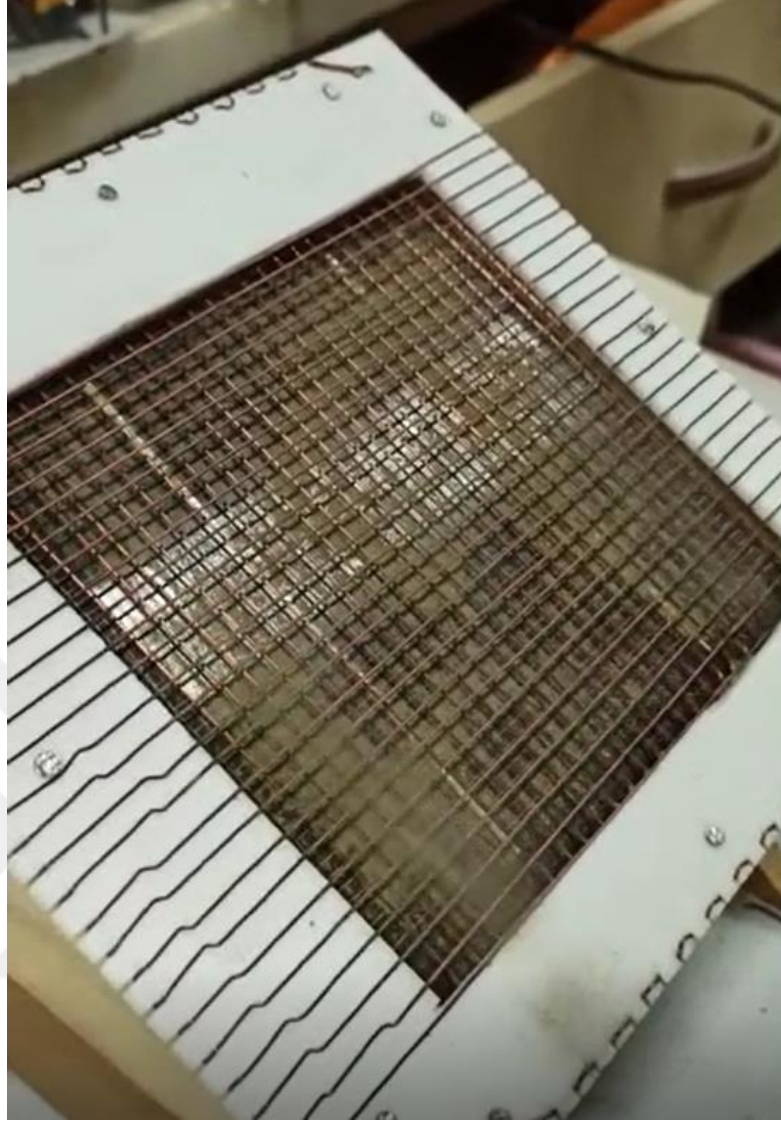
Oluşturulan düzenekte dış ortamlardaki fotovoltaik paneller üzerine kaplanabilecek dış ortam tozlarını sürekli bir şekilde hareket ettirebilmek için bakır tellere verilen DC gerilimin kutuplarının belirli sürelerle değişmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir devre tasarlanmıştır. Devre şeması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Devre Şeması.

Bahsi geçen devrede, öncelikle 555 entegresi kullanılarak 1 Hz'lik bir osilatör devresi kurulmuştur. Bu kurulan osilatör devresinin amacı, devrenin çıkışına bağlı olan röle aracılığı ile yüksek gerilim bağlı röle grubunu kontrol etmek ve belirli frekanslara göre ızgara yapıya uygulanan gerilimin polaritesinin değişmesini ve bunun sonucu olarak ızgara yapıda oluşturulan statik alanın etkisini arttırmayı sağlamaktır. Osilatör çıkışına bağlı olan röle eş zamanlı çalışacak biçimde düzenlenmiş, ikişer röleden oluşan tek kanallı röle gurubunu sıralı bir biçimde çalıştırarak ızgara girişine bağlanmış olan yüksek gerilimin kutuplarının değişmesi sağlanmıştır. Böylelikle, tozların sürekli olarak hareket ettirilmesi amaçlanmıştır.

Elektrostatik temizleme performansının değerlendirilebilmesi için 100 mm x 100 mm ebatlarında bir fotovoltaik panel kullanılmıştır. Yapılan deneyde önce, panelin ilk halinin akım ve gerilim değerleri 1000 W'lık bir halojen lamba altında ölçülmüştür. Panelin akım ve gerilim değerleri dikkate alınarak ilk halindeki güç değeri belirlenmiştir. Ardından panel kirletilerek bu değerler tekrar elde edilmiştir. Böylelikle panelin ne oranda bir güç düşümüne uğradığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu iki işlem gerçekleştirildikten sonra, panel yüzeyinde elektrostatik alan oluşturacak ızgara kapak panel üzerine kapatılmış ve belirli süreler boyunca, farklı değerlerde yüksek gerilim ve farklı miktarlarda toz kullanılarak temizleme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Temizleme işlemi.

Deney süresince, toz miktarını ölçmek için maksimum 120 g tartma kapasitesine sahip olan SHIMADZU AY120 marka hassas bir tartım aleti kullanılmıştır (Şekil 3.6). Yüksek gerilim miktarını ayarlamak için ise maksimum 5 kV gerilim üretebilen Philip Harris marka bir gerilim kaynağı kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. SHIMADZU AY120 tartım aleti.



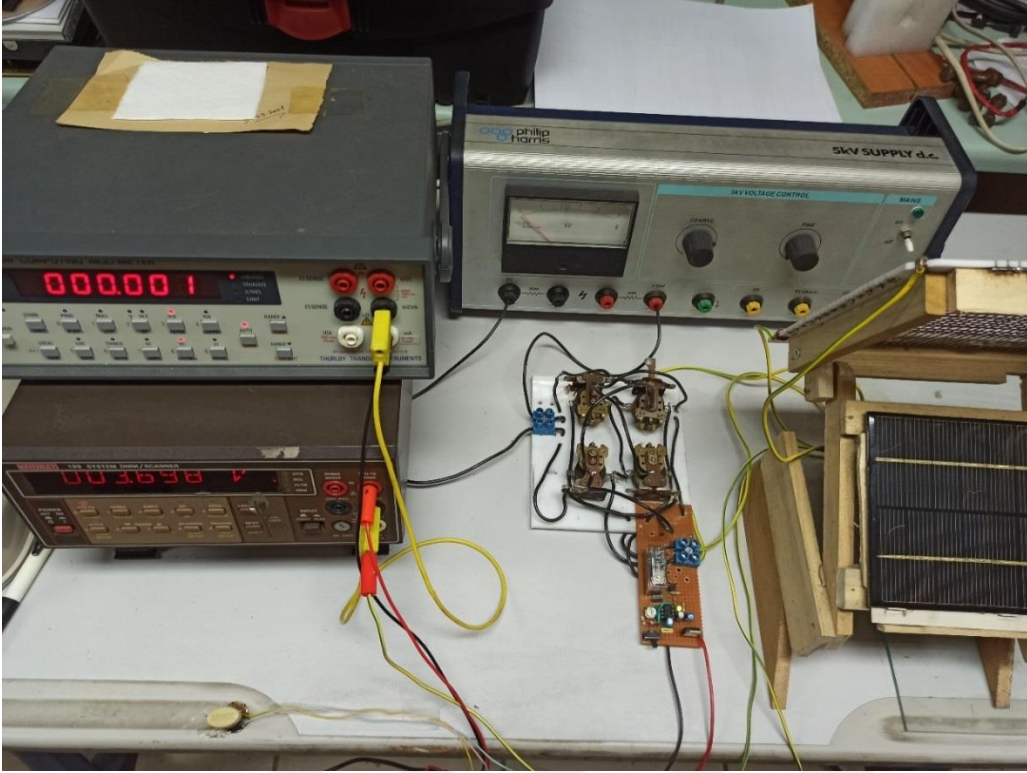
Şekil 3.7. Gerilim kaynağı.

Kurulan test düzeneğinde 1000 W'lık bir halojen lamba, panelin belirli bir miktar uzağına yerleştirilmiştir. Panelin temiz, kirli ve temizlenmiş halinin akım

ve gerilim değerlerini ölçmek için sırasıyla “TTI 1906 Computing multimetre” ve “Keithley 199 System DMM/Scanner” kullanılmıştır. Sistemin temizleme verimini hesaplamak için gerekli ölçümler, bu iki cihaz kullanılarak yapılmıştır. Test düzeneğinin genel ve yakından görünümü, Şekil 3.8’de ve Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Test düzeneğinin uzaktan genel görünümü.



Şekil 3.9. Test düzeneğinin genel yakından görünümü

4. BULGULAR

Yapılan çalışmada, üç farklı nokta üzerinde durulmuştur. Bunlar; en iyi temizleme veriminin elde edilebilmesi için temizleme işleminin ne kadar süre boyunca yapılması gerektiği, gerilim miktarının temizleme verimine etkisi ve yüzeyde bulunan toz yoğunluğunun temizleme verimini ne ölçüde etkilediği olarak tanımlanmıştır.

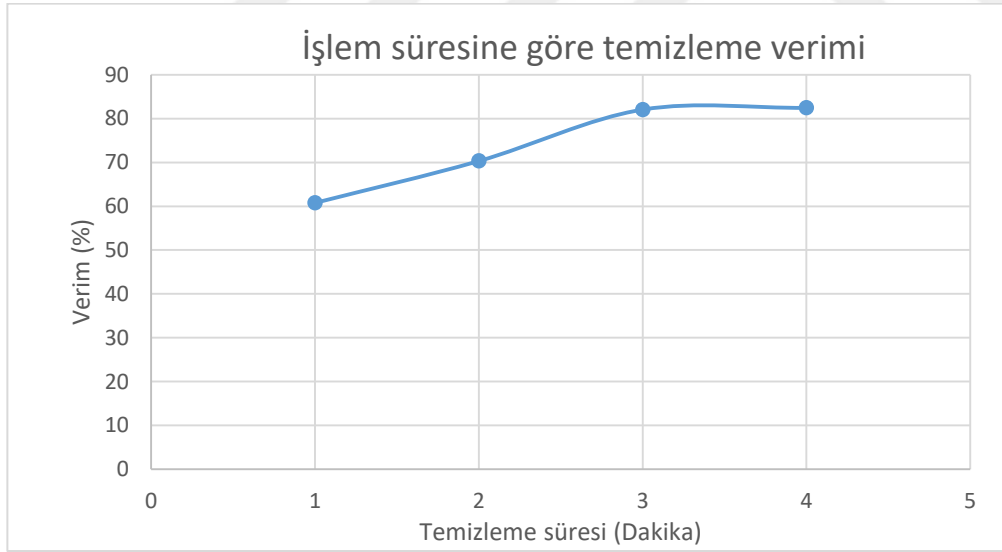
4.1. İşlem Süresi

Öncelikle temizleme işleminin ne kadar süre boyunca uygulanması gerektiğinin tespit edilebilmesi adına bir deney yapılmıştır. Bu deney için 300 mg toz kullanılmıştır. Tozun panel üzerine olabildiğince homojen bir dağılımla yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra tozun temizlenmesi için birer dakikalık periyotlarla temizleme işlemi uygulanmıştır. Bir dakika, iki dakika, üç dakika ve dört dakikalık süreler boyunca temizleme işlemi uygulanmıştır. Çizelge 4.1’de yapılan çalışmanın sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. İşlem süresine göre temizleme verimi.

100 mm X 100 mm Fotovoltaik Panel					
3,5kV 1 Hz 300 mg toz					
Süre (Dakika)	Temizlik durumu	Gerilim (V)	Akım (mA)	Güç (mW)	Verim (%)
1	Temiz	6,134	12,75	78,2085	60,76131
	Kirli	5,885	8,08	47,5508	
	HV Temiz	6,122	10,81	66,17882	
2	Temiz	6,172	13,06	80,60632	70,30332
	Kirli	5,865	8,14	47,7411	
	HV Temiz	6,118	11,58	70,84644	
3	Temiz	6,154	13,04	80,24816	82,04347
	Kirli	5,858	8,04	47,09832	
	HV Temiz	6,13	12,12	74,2956	
4	Temiz	6,176	13,01	80,34976	82,43846
	Kirli	5,841	7,52	43,92432	
	HV Temiz	6,127	12,07	73,95289	

Çizelge 4.1'deki veriler dikkate alındığında elektrostatik temizleme yöntemi kullanılarak yapılan temizleme işleminde, işlemin başladığı andan itibaren artan bir verim söz konusudur. Ancak bu verim artışının ivmesi, zaman geçtikçe azalmakta ve belli bir aşamadan sonra yapılan temizliğin süresi, verim üzerinde önemli bir fark ortaya koymamaktadır. Yapılan çalışmada 3 kV gerilim ve 1 Hz koşulları altında yapılan temizlik işleminin bir dakika süre boyunca uygulandığında % 60,7 oranında bir temizleme verimi elde edildiği belirlenmiştir. Temizleme süresi iki dakikaya çıkarıldığında temizleme veriminin % 70 civarına ulaştığı tespit edilmiştir. Bu deney, üç dakika için tekrarlandığında verimin önemli ölçüde artarak % 82 seviyesine ulaştığı görülmüştür. Bu aşamadan sonra ise temizleme verimine sürenin etkisi, minimal bir seviyeye gelmiştir. Dört dakika için yapılan deneyde elektrostatik temizleme veriminin üç dakikaya göre yalnızca % 0,3 civarında bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu da kurulan deney üzerinde ihmal edilebilir bir etki olarak kabul edilebilir. Bu nedenle yapılan deneyler sonucunda en uygun temizleme süresinin üç dakika olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen veriler, Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. İşlem süresine göre temizleme verimi

4.2. Gerilim Miktarı

Bu araştırmanın ikinci aşamasında, sisteme uygulanan gerilim miktarı değerlendirilmiştir. Elektrostatik temizleme sistemine farklı miktarlarda gerilim uygulanmıştır. Böylece temizleme veriminin değişen gerilim miktarına göre

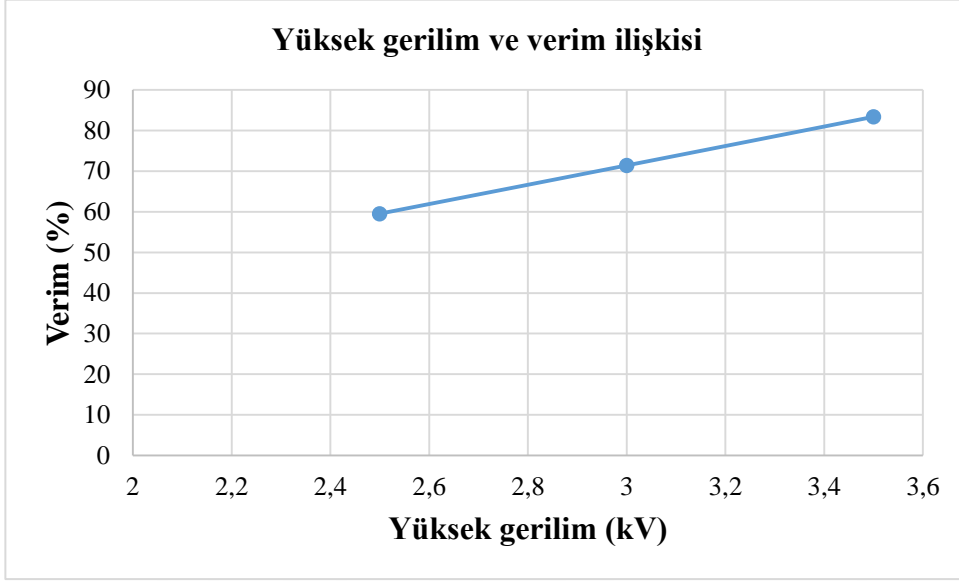
değerlendirmesi yapılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla sisteme sırasıyla 2,5 kV, 3 kV ve 3,5 kV gerilim değerleri uygulanmıştır. Bu işlem, panel üzerinde 300 mg toz varken yapılmış olup, işlem süresi araştırmanın birinci aşamasında elde edilen verilere dikkate alınarak 3 dakika olarak belirlenmiştir. Bu aşamada ulaşılan sonuçlar, Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Uygulanan gerilime göre temizleme verimi

100 mm X 100 mm Fotovoltaik Panel					
1 Hz 300 mg toz					
Gerilim (kV)	Temizlik durumu	Gerilim (V)	Akım (mA)	Güç (mW)	Verim (%)
2.5	Temiz	6,705	40,98	0,274771	59,52
	Kirli	6,345	18,027	0,114381	
	HV Temiz	6,599	31,8	0,209848	
3	Temiz	6,671	36,772	0,245306	71,39
	Kirli	6,41	17,982	0,115265	
	HV Temiz	6,569	31,68	0,208106	
3.5	Temiz	6,619	36,763	0,243334	83,36
	Kirli	6,367	22,987	0,146358	
	HV Temiz	6,592	34,465	0,227193	

Çizelge 4.2, panelin ilk (temiz) hali, kirli hali ve HV ile temizleme sonrası elde edilen verileri göstermektedir. Tozlanma ile birlikte akım ve gerilim değerlerinde bir düşüş söz konusudur. Bu düşüş, panelin akım miktarında daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Temizlik işlemi yapıldıktan sonra akım ve gerilim değerlerinde önemli miktarlarda bir geri dönüş gözlemlenmektedir. Ancak geri dönüş oranları, gerilim seviyesine göre değişmektedir. Buna bağlı olarak temizleme verimi de, farklı gerilim değerleri için farklı oranlardadır. Sonuçlar açıkça göstermektedir ki, sisteme uygulanan gerilim miktarı artırıldıkça, temizleme işleminin etkisi de artmaktadır. 2,5 kV, 3 kV ve 3,5 kV gerilim altında yapılan gözlemin sonucunda, temizleme verimi sırasıyla % 59,52, % 71,39 ve % 83,36 olarak tespit edilmiştir. Yapılan testlerde, en fazla 3,5 kV gerilim değeri uygulanabilmiştir. Bunun sebebi ise, temizleme sisteminde kullanılan rölelerin, DC

güç kaynağından uygulanan 3,5 kV geriliminden sonra ark yapmaya başlaması ve buna bağlı olarak görevlerini gerçekleştirememesidir. Bu nedenle, yapılan deneylerde uygulanan gerilimde bir üst sınır oluşmuştur. Eğer elimizde daha yüksek gerilim değerine ulaşabileceğimiz röleler olsaydı, elektrostatik temizleme işleminin veriminin de daha yüksek değerlere ulaşabileceği elde edilen veriler ışığında öngörülmektedir. Uygulanan gerilim ve buna bağlı olarak verimin nasıl değiştiği, Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Yüksek gerilim ve verim ilişkisi

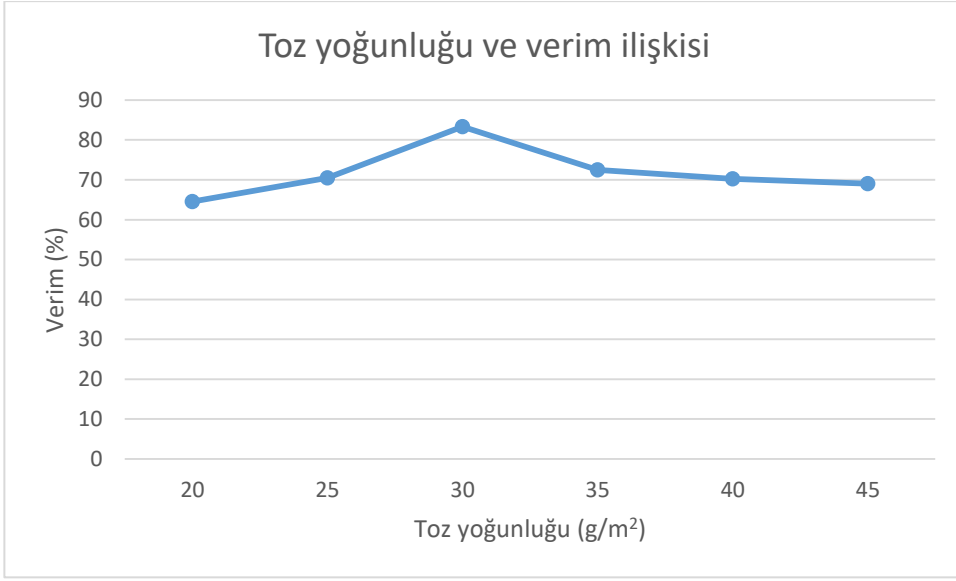
4.3.Toz Yoğunluğu

Son olarak, panel üzerindeki toz yoğunluğuna göre elektrostatik temizleme sisteminin verimine etkisi araştırılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı ise, elektrostatik temizleme sisteminin hangi toz yoğunluğunda daha iyi bir sonuç verebileceğini belirleyebilmektir. Bu bağlamda, altı farklı toz grubu hazırlanmıştır. Toz grupları 200 mg, 250 mg, 300 mg, 350 mg, 400 mg ve 450 mg olmak üzere altı farklı ağırlıkta düzenlenmiştir. Bu toz grupları sırayla panel üzerine yayılmıştır. Ardından her bir grup daha önce tespit edilen en uygun gerilim ve süre (3,5 kV gerilim ve 3 dakika) boyunca panel üzerinden temizlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Toz yoğunluğunun temizleme verimine etkisi.

100 mm X 100 mm Fotovoltaik Panel 3,5kV, 1 Hz					
Toz Yoğunluğu (g/m²)	Temizlik Durumu	Akım(mA)	Gerilim(V)	P(mW)	Verim (%)
20	Temiz	36,537	6,702	0,244871	64,51
	Kirli	23,672	6,497	0,153797	
	HV Temiz	32,093	6,623	0,212552	
25	Temiz	39,756	6,728	0,267478	70,49
	Kirli	18,028	6,474	0,116713	
	HV Temiz	33,592	6,638	0,222984	
30	Temiz	36,763	6,619	0,243334	83,36
	Kirli	22,987	6,367	0,146358	
	HV Temiz	34,465	6,592	0,227193	
35	Temiz	39,433	6,679	0,263373	72,51
	Kirli	18,703	6,09	0,113901	
	HV Temiz	33,638	6,608	0,22228	
40	Temiz	38,556	6,63	0,255626	70,28
	Kirli	17,151	6,363	0,109132	
	HV Temiz	32,39	6,548	0,21209	
45	Temiz	37,745	6,611	0,249532	69,02
	Kirli	16,89	6,297	0,112653	
	HV Temiz	31,286	6,558	0,205174	

Elde edilen veriler elektrostatik temizleme veriminin belirli bir toz yoğunluğu üzerinde ve altında düştüğünü göstermektedir. Toz yoğunluğunun en az olduğu 20 g/m² değeri ve en çok olduğu 45 g/m² değeri ile yapılan testte en düşük elektrostatik temizleme verimleri elde edilmiştir. Bu verim değerleri sırasıyla, % 64,51 ve % 69,02 olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeni, düşük toz yoğunluğunda tozların panel ile temasının daha çok olması, yüksek toz yoğunluğunda ise tozların kümeleşerek panel yüzeyinden atılmasının zorlaşmasıdır. Panel üzerinde 30 g/m² toz yoğunluğunda % 83,36 oranı ile en yüksek temizleme verimine ulaşılmıştır. Bu değer 25 g/m² ve 40 g/m² için ise % 70 mertebesindedir.

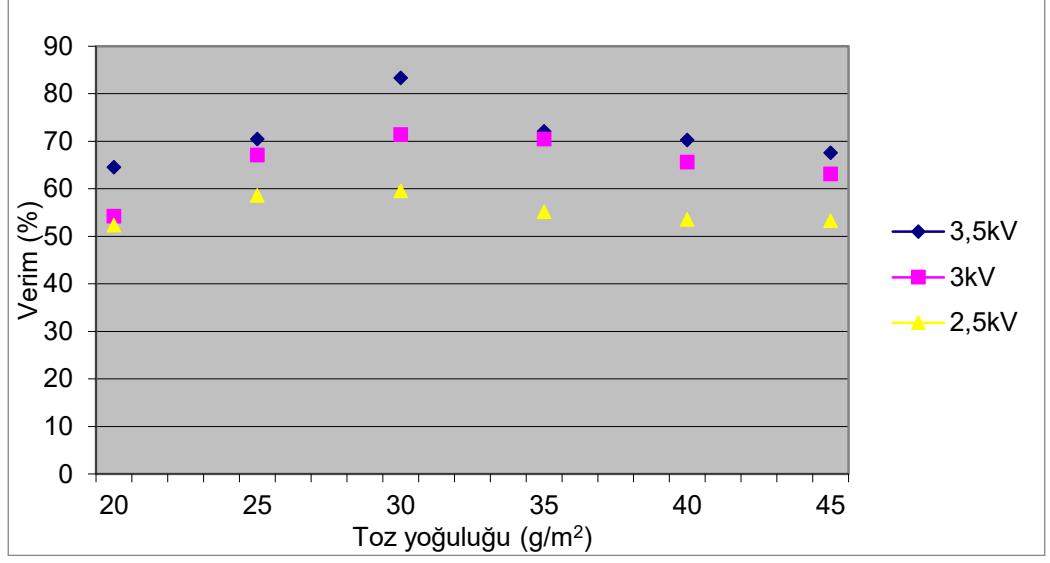


Şekil 4.3. Toz yoğunluğu ve verim ilişkisi.

Yapılan testlerin ışığı altında, panel yüzeyindeki toz yoğunluğu, oluşturulan bakır tel ızgaraya uygulanan gerilim ve temizleme işleminin süresinin elektrostatik temizleme verimini etkilediği görülmüştür. Gerilim miktarının elektrostatik temizleme verimi üzerinde önemli bir değişken olduğu tespit edilmiştir. Gerilim miktarı artırıldıkça, temizleme veriminin de önemli ölçüde geliştiği net bir şekilde tespit edilmiştir. Buna ek olarak, temizleme işleminin süresinin de iyi bir şekilde belirlenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Temizleme süresi artırıldıkça, temizleme veriminin de daha yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak bu artış süre uzadıkça, ivmesini kaybetmektedir. Belirli bir süreden sonra ise sadece minimal bir artış söz konusudur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre yukarıda da değinildiği gibi ancak belirli bir toz yoğunluğu aralığında yüksek verime ulaşmak mümkündür. Panel üzerindeki toz yoğunluğu belirli bir seviyenin üzerinde veya altında ise, elektrostatik temizleme sisteminin etkisinin panel üzerindeki tozları uzaklaştırmakta güçleşeceği görülmektedir.

Panel üzerinde üç dakika süre boyunca yapılan testlerin sonuçları toplu bir şekilde, Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Elde edilen veriler çerçevesinde, en yüksek elektrostatik verime 3,5 kV gerilim değerinde ve 30 g/m² tozlanma altında ulaşıldığı belirlenmiştir. En düşük verimin ise 2,5 kV gerilim altında ve 20 g/m² toz yoğunluğunda elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.4. Gerilim ve toz yoğunluğunun elektrostatik temizleme verimi üzerine etkisi.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Sonuç olarak, fotovoltaik pazarın dünya üzerinde az yağış alan bölgelerdeki kurulumunun yaygınlaşması ile tozlanma sorunu önemli bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle, FV panellerin enerji üretim verimini arttırmak adına, temizleme sistemleri üzerine araştırmalar yapmak çok önemlidir. Günümüzde, FV panel temizleme işlemi ağırlıklı olarak özel fırçalar kullanılarak yapılmaktadır. Ancak bu geleneksel yöntemler, hem insan gücü gerektirmekte hem de modüllerde çizik veya çatlaklar oluşturabilme gibi olumsuz özellikleri sahiptirler. Bunun yanında, özellikle büyük santrallerde yapılan temizlik sırasında kullanılan su miktarı da oldukça yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Bu durum, hem su tüketimini önemli miktarda arttırmakta hem de insan gücü ile beraber düşünüldüğünde yüksek temizleme maliyetine sebep olabilmektedir. Alternatif bir panel temizleme yöntemi olan elektrostatik temizleme yöntemi, panel yüzeyinde herhangi bir gölge oluşumuna neden olmaz. Aynı zamanda bu yöntem ile temizlik işlemi ihmal edilebilecek bir enerji kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

Elde edilen bulgular, kirlenen bir FV panelin elektrostatik temizleme yöntemi ile verimli bir şekilde temizlenebileceğini ortaya koymuştur. Bu aşamada temizleme süresi, gerilim miktarı ve panel üzerindeki toz yoğunluğu olmak üzere üç farklı değişken üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmalar, temizleme işlemi 3 dakika süreye kadar uygulandığında verimin önemli ölçüde arttığını, bu süreden sonra ise artış miktarının önemli ölçüde düştüğünü göstermektedir. Buna ek olarak gerilim arttıkça, temizleme performansının da iyileştiği görülmüştür. Panel üzerindeki toz yoğunluğu dikkate alındığında ise en iyi performans 30 g/m² toz yoğunluğunda ortaya çıkmaktadır (% 83,36). En düşük performansı ise 20 g/m² ve 45 g/m² toz yoğunluğunda sergilediği görülmüştür (sırasıyla % 64,51 ve % 69,02). Bu durum, belirli bir toz yoğunluğu aralığında elektrostatik temizleme sisteminin daha iyi çalıştığını göstermektedir.

Elektrostatik temizleme tekniği, fotovoltaik panellerde henüz yaygın olarak kullanılmamakla birlikte gelecek için umut vaat eden bir temizleme yöntemidir. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar da bu fikri doğrular niteliktedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, elektrostatik temizleme tekniğinin % 84'e varan bir temizleme performansı ortaya koyduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu performansın ileride daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Sistemin sahada kullanılan paneller için uygun hale getirilmesi ve panelin bir köşesine sabitlenerek, temizleme işlemi gerektiğinde panel üzerine otomatik bir şekilde yaklaşan ve panel üstüne kapanıp temizleme işlemini gerçekleştirecek bir yapı tasarlanabilir. Bu şekilde yan yana bulunan panellerin tek bir düzenele temizlenmesi sağlanabilecek olup, hem su hem de maddi anlamda ciddi bir tasarruf sağlanabilir.

Türkiye, nispeten az yağışlı bir coğrafyada yer alan bir ülkedir. Güneşlenme ve tozlanma konusunda farklı özelliklere sahiptir. Tozlanma konusu bir yönüyle de ülkenin jeolojik özellikleriyle de bağlantılı bir sorundur. Bu çalışma, Trabzon yöresinden toplanan tozlar kullanılarak yapılmıştır. Bununla birlikte bu kapsamda yapılan literatür taramasında, ülkemizde bu konuda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın literatürde yapılan benzer çalışmalardan farkı ise, hem temizleme işlemi sırasında bir gölgeleme sorununa neden olmaması, hem de temizleme amacı ile oluşturulan kapağın panel üzerine sabitlenebilmesidir. Böylece insan hatasından kaçınılmış ve gerektiği ölçüde panel ile iletkenler arası mesafenin ayarlanabilmesi sağlanmıştır.

İleride; ülkemizin farklı coğrafyalarında polen, yaprak gibi organik tozlar dâhil olmak üzere farklı içerikteki tozlar kullanılarak yapılacak çalışmalarla da desteklenebilecek bir potansiyel söz konusudur. Bununla beraber bu çalışmaya elektrotların yerleşim düzeni, frekans, rüzgâr, kullanılan iletkenin çapı gibi değişkenler de eklenebilir. Böylelikle elektrostatik temizleme sisteminin daha detaylı incelenmesinin yapılması düşünülebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abderrezek, M., Fathi, M.**, 2017, Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield, *Solar Energy*, 142:308–320 pp.
- Adaramola, M. S., Vågnes, E. E. T.**, 2015, Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions, *Energy Conversion and Management*, 90:458–465 pp.
- Al-hasan, A. Y., Ghoneim, A. A.**, 2007, A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface, *International Journal of Sustainable Energy*, 24:187–197 pp.
- Appels, R., Muthirayan, B., Beerten, A., Paesen, R., Driesen, J., Poortmans, J.**, 2012., The Effect of Dust Deposition on Photovoltaic Modules, 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 001886–001889 pp.
- Arto, I., Capellán-pérez, I., Lago, R., Bueno, G., Bermejo, R.**, 2016, The energy requirements of a developed world, *Energy for Sustainable Development*, 33:1–13 pp.
- Asafu-adjaye, J.**, 2000, The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries, *Energy Economics*, 22:615–625 pp.
- Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., Zabihi, M. S.**, 2001, The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran, *Renewable Energy*, 24:459–468 pp.
- Assi, A., Hassan, A., Al-Shamisi, M., Hejase, H.**, 2012, Removal of Air Blown Dust from Photovoltaic Arrays Using Forced Air Flow of Return Air from Air Conditioning Systems, 2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC). 1–5 pp.
- Babatunde, A. A., Abbasoglu, S., Senol, M.**, 2018, Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:1017–1026 pp.

- Banda, M. H., Nyeinga, K., Okello, D.**, 2019, Performance evaluation of 830 kWp grid-connected photovoltaic power plant at Kamuzu International Airport-Malawi, *Energy for Sustainable Development*, 51:50–55 pp.
- Brambilla, S., Speckart, S., Brown, M. J.**, 2017, Adhesion and aerodynamic forces for the resuspension of non-spherical particles in outdoor environments, *Journal of Aerosol Science*, 112:52–67 pp.
- Cabanillas, R. E., Munguía, H.**, 2011, Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3:043114 pp.
- Caron, J. R., Littmann, B.**, 2013, Direct Monitoring of Energy Lost Due to Soiling on First Solar Modules in California, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3:336–340 pp.
- Chesnutt, J. K. W., Ashkanani, H., Guo, B., Wu, C.**, 2017, Simulation of microscale particle interactions for optimization of an electrodynamic dust shield to clean desert dust from solar panels, *Solar Energy*, 155:1197–1207 pp.
- Cristaldi, L., Faifer, M., Rossi, M., Catelani, M., Ciani, L., Dove, E. Jerace, S.**, 2012, Economical Evaluation of PV System Losses Due to the Dust and Pollution, 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 614–618 pp.
- Cuddihy, E.F.**, 1980, Theoretical considerations of soil retention, *Solar Energy Materials*, 3:21–33 pp.
- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-goul, M. A., Alawadhi, H.**, 2015, Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:735–744 pp.
- Díez-Mediavilla, M., Alonso-Tristán, C., Rodríguez-Amigo, M.C., García-Calderón, T., Dieste-Velasco, M.I.**, 2012, Performance analysis of PV plants: Optimization for improving profitability, *Energy Conversion and Management*, 54:17–23 pp.

- El-nashar, A. M.**, 2009., Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant, *Desalination*, 239:66–81 pp.
- Elminir, H. K., Ghitas, A. E., Hamid, R. H., El-hussainy, F., Beheary, M. M., Abdel-moneim, K. M.**, 2006, Effect of dust on the transparent cover of solar collectors, *Energy Conversion and Management*, 47:3192–3203 pp.
- El-Shobokshy, M.S., Mujahid, A., Zakzouk, A.K.M.**, 1985, Effects of dust on the performance of concentrator photovoltaic cells, *IEE Proceedings*, 132:5–8 pp.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı**, “*Bilgi Merkezi*”, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim Tarihi: 7 Eylül 2020)
- Enerji Portalı**, “*Türkiye'nin Güneş Enerjisi Kurulu Gücü Yüzde 75 Arttı*”, <https://www.enerjiportali.com/turkiyenin-gunes-enerjisi-kurulu-gucu-yuzde-75-artti/> (Erişim Tarihi: 7 Eylül 2020)
- Faifer, M., Lazzaroni, M., Toscani, S.**, 2014, Dust effects on the PV plant efficiency: A new monitoring strategy, 20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop, 580–585 pp.
- Fathi, M., Abderrezek, M., Friedrich, M.**, 2017, Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19:577–585 pp.
- Fraunhofer ISE**, 2020, “*PHOTOVOLTAICS REPORT*”, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (Erişim tarihi: 1 Eylül 2020)
- Figgis, B., Nouviaire, A., Wubulikasimu, Y., Javed, W., Guo, B., Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Ahzi, S., Rémond, Y., Ennaoui, A.**, 2018, Investigation of factors affecting condensation on soiled PV modules, *Solar Energy*, 159:488–500 pp.
- Fujiwara, F., Rebagliati, R.J., Dawidowski, L., Gómez, D., Polla, G., Pereyra, V., Smichowski, P.**, 2011, Spatial and chemical patterns of size fractionated

road dust collected in a megacity, *Atmospheric Environment*, 45:1497–1505 pp.

Garg, H.P., 1974, Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors, *Solar Energy*, 15:299–302 pp.

Ghazi, S., Ip, K., 2014, The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK, *Renewable Energy*, 69:50–59 pp.

Ghazi, S., Sayigh, A., Ip, K., 2014, Dust effect on flat surfaces – A review paper, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33:742–751 pp.

Goossens, D., Kerschaefer, E. V., 1999, AEOLIAN DUST DEPOSITION ON PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS: THE EFFECTS OF WIND VELOCITY AND AIRBORNE DUST CONCENTRATION ON CELL PERFORMANCE, *Solar Energy*, 66:277–289 pp.

Haerberlin, H., Graf, J. D., 1998, Gradual Reduction of PV Generator Yield due to Pollution, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1–4 pp.

Hammad, B., Al-Abed, M., Al-Ghandour, A., Al Sardeah, A., Al-Bashir, A., 2018, Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:2218–2234 pp.

He, G., Zhou, C., Li, Z., 2011, Review of Self-Cleaning Method for Solar Cell Array, *Procedia Engineering*, 16:640–645 pp.

Hecht, D. S., Hu, L., Irvin, G., 2011, Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, *Graphene, and Metallic Nanostructures*, 23:1482–1513 pp.

Hegazy, A. A., 2001, Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors, *Renewable Energy*, 22:525–540 pp.

Hudedmani, M. G., Joshi, G., Umayal, R. M., Revankar, A., 2017, A Comparative Study of Dust Cleaning Methods for the Solar PV Panels,

Advanced Journal of Graduate Research, 1:24–29 pp.

Ilse, K., Figgis, B., Khan, M. Z., Naumann, V., Hagendorf, C., 2019, Dew as a Detrimental Influencing Factor for Soiling of PV Modules, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9:287–294 pp.

Ilse, K. K., Figgis, B. W., Naumann, V., Hagendorf, C., Bagdahn, J., 2018a, Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98:239–254 pp.

Ilse, K. K., Figgis, B. W., Werner, M., Naumann, V., Hagendorf, C., Pöllmann, H., Bagdahn, J., 2018b, Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 186:309–323, pp.

Javed, W., Guo, B., Wubulikasimu, Y., Figgis, B. W., 2016, Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust, 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 580–584 pp.

Ju, F., Fu, X., 2011, Research on Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance, 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 3601–3606 pp.

Jamil, W. J., Rahman, H. A., Shaari, S., Salam, Z., 2017, Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67:876–891 pp.

Kaldellis, J. K., Kokala, A., 2010, Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal, *Energy*, 35:4862–4869 pp.

Kawamoto, H., 2019, Electrostatic cleaning equipment for dust removal from soiled solar panels, *Journal of Electrostatics*, 98:11-16 pp.

Kawamoto, H., Miwa, T., 2011, Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration, *Journal of Electrostatics*, 69:365–369 pp.

- Kawamoto, H., Uchiyama, M., Cooper, B. L., McKay, D. S.**, 2011, Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic traveling-wave, *Journal of Electrostatics*, 69:370–379 pp.
- Kawamoto, H., Guo, B.**, 2018, Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels, *Journal of Electrostatics*, 91:28–33 pp.
- Kawamoto, H., Seki, K., Kuromiya, N.**, 2006, Mechanism of travelling-wave transport of particles, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39:1249–1256 pp.
- Kawamoto, H., Shibata, T.**, 2015, Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels, *Journal of Electrostatics*, 73:65–70 pp.
- Kim, Y., Wellum, G., Mello, K., Strawhecker, K. E., Thoms, R., Giaya, A., Wyslouzil, B. E.**, 2016, Effects of relative humidity and particle and surface properties on particle resuspension rates, *Aerosol Science and Technology*, 50:339–352 pp.
- Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., Wenger, H.**, 2006, The Effect Of Soiling On Large Grid-Connected Photovoltaic Systems In California And The Southwest Region Of The United States, 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 2391–2395 pp.
- Klugmann-radziemska, E.**, 2015, Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland, *Renewable Energy*, 78:418–426 pp.
- Krueger, B. J., Grassian, V. H., Cowin, J. P., Laskin, A.**, 2004, Heterogeneous chemistry of individual mineral dust particles from different dust source regions: the importance of particle mineralogy, *Atmospheric Environment*, 38:6253–6261 pp.
- Lay-ekuakille, A., Ciaccioli, A., Griffio, G., Visconti, P., Andria, G.**, 2018, Effects of dust on photovoltaic measurements: A comparative study, *Measurement*, 113:181–188 pp.
- Liu, G., Marshall, J. S.**, 2010, Particle transport by standing waves on an electric

curtain, *Journal of Electrostatics*, 68:289–298 pp.

Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., Hajighorbani, S., 2016, Power loss due to soiling on solar panel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59:1307–1316 pp.

Mani, M., Pillai, R., 2010, Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:3124–3131 pp.

Mastekbayeva, G. A., Kumar, S., 2000, Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate, *Solar Energy*, 68:135–141 pp.

Meenakshi, P., Karthick, R., Selvaraj, M., Ramu, S., 2014, Investigations on reduced graphene oxide film embedded with silver nanowire as a transparent conducting electrode, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128:264–269 pp.

Nahar, N.M., Gupta, J.P., 1990, Effect of dust on transmittance of glazing materials for solar collectors under arid zone conditions of India, *Solar & wind technology*, 7:237–243 pp.

Nimmo, B., Said, S.A.M., 1979, Effects of dust on the performance of thermal and photovoltaic flat plate collectors in Saudi Arabia: preliminary results, Proceedings of the 2nd Miami international conference on alternative energy sources, 223–225 pp.

Pande. P., 1992, Effect of dust on the performance of PV panels, In: Proceedings of the 6th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 539–542 pp.

Park, K. E., Kang, G. H., Kim, H. I., Yu, G. J., Kim, J. T., 2010, Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module, *Energy*, 35:2681–2687 pp.

Paudyal, B. R., Shakya, S. R., 2016, Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu, *Solar*

Energy, 135:103–110 pp.

Piliouguine, M., Cañete, C., Moreno, R., Carretero, J., Hirose, J., Ogawa, S., Sidrach-de-cardona, M., 2013, Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates, *Applied Energy*, 112:626–634, pp.

Radziemska, E., Klugmann, E., 2002, Thermally affected parameters of the current – voltage characteristics of silicon photocell, *Energy Conversion and Management*, 43:1889–1900 pp.

Rao, A., Pillai, R., Mani, M., Ramamurthy, P., 2014, Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance, *Energy Procedia*, 54:690–700 pp.

REN21, 2020, “RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT”, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf (Erişim tarihi: 1 Eylül 2020)

Said, S. A. M., Hassan, G., Walwil, H. M., Al-aeqli, N., 2018, The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:743–760 pp.

Said, S. A. M., Walwil, H. M., 2014, Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance, *Solar Energy*, 107:328–337 pp.

Salim, A.A., Huraib, F. S., Eugenio, N.N., 1988, PV power-study of system options and optimization, Proceedings of the 8th European PV solar energy conference, 688–692 pp.

Sarver, T., Al-qaraghuli, A., Kazmerski, L. L., 2013, A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:698–733 pp.

Sayyah, A., Horenstein, M. N., Mazumder, M. K., 2014, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, *Solar Energy*, 107:576–604

pp.

- Sayyah, A., Horenstein, M. N., Mazumder, M. K., Ahmadi, G.,** 2016, Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen, *Journal of Electrostatics*, 81:24–36 pp.
- Shafiee, S., Topal, E.,** 2009, When will fossil fuel reserves be diminished?, *Energy Policy*, 37:181–189 pp.
- SolarPower Europe,** “Global Market Outlook For Solar Power / 2020-2024”, https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2020/07/31-SPE-GMO-report-hr-hyperlinks.pdf?cf_id=17338 (Erişim tarihi: 1 Eylül 2020)
- Stamford, L., Azapagic, A.,** 2014, Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070, *Energy for Sustainable Development*, 23:194–211 pp.
- Syafiq, A., Pandey, A. K., Adzman, N. N., Rahim N. A.,** 2018, Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels, *Solar Energy*, 162:597–619 pp.
- Tanesab, J. A.,** 2018, The Effect of Dust on the Performance of Solar Photovoltaic Module: Case Studies in Nusa Tenggara Timur, Indonesia and Perth, Western Australia, PhD thesis, Murdoch University, 125p.
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., Urnee, T.,** 2018, Energy and economic losses caused by dust on residential photovoltaic (PV) systems deployed in different climate areas, *Renewable Energy*, 120:401–412 pp.
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., Urnee, T., Pryor, T.,** 2015, The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone, *Solar Energy*, 120:147–157 pp.
- Höök, M., Tang, X.,** 2013, Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change — A review, *Energy Policy* 52:797–809, pp.
- Tian, W., Wang, Y., Ren, J., Zhu, L.,** 2007, Effect of urban climate on building integrated photovoltaics performance, *Energy Conversion and Management*,

48:1–8 pp.

Vidyanandan, K. V., 2017, An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems, *Energy Scan*, 27:2–8 pp.

Xu, R., Ni, K., Hu, Y., Si, J., Wen, H., Yu, D., 2017, Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel, *Energy Conversion and Management*, 148:100–109 pp.



TEŞEKKÜR

Öncelikle desteğini ve ilgisini her zaman ve her konuda üzerimde hissettiğim, tecrübesi ve bilgisi ile bana destek olan, beraber çalışmaktan mutluluk duyduğum ve aynı zamanda danışman hocam olan Dr. Öğr. Üyesi Mete ÇUBUKÇU'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Covid-19 pandemi sürecinin yaşanması nedeniyle ailemin yaşadığı Trabzon'da yürütölmek zorunda kalınmıştır. Çalışmanın yürütölmesinde Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Fen Faköltei Fizik Bölümü laboratuvarları kullanılmıştır. Bu nedenle öncelikle Karadeniz Teknik Üniversitesi kurumuna teşekkür ederim. KTÜ Fen Faköltei Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU'nun katkıları ve laboratuvarların kullanımında gösterdiği anlayış için kendisine özellikle minnet duygularımı ifade etmek isterim.

ÖZGEÇMİŞ

Harun Gümüş, 09.06.1992 tarihinde Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini bu ilde tamamladıktan sonra, 2017 yılında Atılım Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Lisans öğrenimi sırasında Erasmus öğrencisi olarak Finlandiya'da bulunan Tampere Teknik Üniversitesi'nde eğitim aldı. 2018 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde yüksek lisan eğitimine başladı. 2019 yılında Antalya'da düzenlenen 10. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu'na katılarak Dr.Öğr.Üyesi Mete ÇUBUKÇU ile birlikte hazırladıkları "Elektrostatik Temizleme Yöntemiyle Fotovoltaik Modüllerin Tozlanma Kayıplarının Azaltılması" başlıklı bildiri sundu. Yine, Dr. Öğr. Üyesi Mete ÇUBUKÇU ile birlikte hazırladıkları "Performance analysis of a grid-connected photovoltaic plant in eastern Turkey" başlıklı makale de, SCI indeksinde yer alan "Sustainable Energy Technologies and Assessments" adlı dergide yayınlandı.