



Fotovoltaik Panel Temizliğinde Yüzey Akustik Dalgaları Kullanımının Fotovoltaik Panel Performansına Etkilerinin İncelenmesi

Investigation of the Effects of Using Surface Acoustic Waves in Photovoltaic Panel Cleaning on Photovoltaic Panel Performance

Damla ERİŞGİN¹, Gürkan KARA², Hakan ÖZCAN³

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun
• damlaerisgin@gmail.com • ORCID > 0000-0002-7747-9860

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun
• gurkan.kara@omu.edu.tr • ORCID > 0000-0003-0365-3827

³Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun
• ozcanh@omu.edu.tr • ORCID > 0000-0002-7848-3650

Makale Bilgisi / Article Information

Makale Türü / Article Types: Araştırma Makalesi / Research Article

Geliş Tarihi / Received: 10 Haziran / June 2022

Kabul Tarihi / Accepted: 21 Haziran / June 2022

Yıl / Year: 2022 | **Cilt – Volume:** 2 | **Sayı – Issue:** 2 | **Sayfa / Pages:** 137-154

Atıf/Cite as: ERİŞGİN, D., KARA, G., ÖZCAN, H. "Fotovoltaik Panel Temizliğinde Yüzey Akustik Dalgaları Kullanımının Fotovoltaik Panel Performansına Etkilerinin İncelenmesi"
Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 2(2), Eylül 2022: 137-154.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Arş. Gör. Gürkan KARA

FOTOVOLTAİK PANEL TEMİZLİĞİNDE YÜZEY AKUSTİK DALGALARI KULLANIMININ FOTOVOLTAİK PANEL PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ:

Günümüzde nüfusun hızla artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Enerjiye duyulan ihtiyacın güneş gibi doğal ve yenilebilir, sınırsız bir enerji kaynağından elde edilmesi çevresel, sosyal ve ekonomik etkileri bakımından istenen bir durumdur. Fotovoltaik sistemler, ısı enerjisini elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren sistemlerdir ve son yıllarda kullanımları hızla artmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin performansları panelin üzerine gelen ve emilen güneş ışığı miktarıyla doğru orantılıdır. Bundan dolayı panel üzerine gelen ışınların panelden daha az emilmesine neden olacak toz, kir gibi faktörlerin yüzeyden uzaklaştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada mekanik ve temassız kendi kendini temizleme yöntemlerinin PV (fotovoltaik) panel performanslarına etkileri üç yöntem kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Birinci yöntemde (Yöntem I) levha üzerine yerleştirilen ultrasonik dönüştürücü tarafından üretilen titreşim, ultrasonik dönüştürücünün yerleştirildiği levha ve PV panelin dört köşesine yerleştirilen yaylar ile PV panele aktarılarak, oluşan titreşimin PV panel temizliğine dolayısıyla performansına etkileri incelenmiştir. İkinci yöntemde (Yöntem II), PV panelin üst kısımlarına yerleştirilen piezoelektrik dört adet aktuatör tarafından üretilen yüzey akustik ses dalgalarının panel temizliğine ve dolayısıyla panel performansına etkileri incelenmiştir. Üçüncü yöntemde (Hibrit Yöntem; Yöntem I ve Yöntem II birlikte) ise, kullanılan bu iki yöntemin bir arada yani hibrit kullanımının PV panel temizliğine dolayısıyla performansına etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, tamamen tozlanmış ve güç üretimi olamayan bir PV panelin, Yöntem I ile göreceli maksimum güç çıkışının %53.80, Yöntem II ile %55.48'e ve Hibrit yöntem ile %68.6'ya çıkarılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, sonuçlar panel eğim açısı arttıkça uygulanan yöntemlerin etkinliğinin arttığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Panel, Yüzey Akustik Dalga, Panel Verimi, Panel Temizliği.



INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF USING SURFACE ACOUSTIC WAVES IN PHOTOVOLTAIC PANEL CLEANING ON PHOTOVOLTAIC PANEL PERFORMANCE

ABSTRACT

Today, with the rapid increase in population and the development of technology, the need for energy is increasing day by day. Obtaining the need for energy from a natural and renewable, unlimited energy source such as the sun is a desirable situation in terms of environmental, social and economic effects. Photovoltaic systems are systems that directly convert light energy into electrical energy and their use has been increasing rapidly in recent years. The performance of photovoltaic systems is directly proportional to the amount of sunlight coming on and absorbed by the panel. For this reason, factors such as dust and dirt that will cause the rays coming on the panel to be absorbed less from the panel should be removed from the surface.

In this study, the effects of mechanical and non-contact self-cleaning methods on PV panel performances were experimentally investigated using three methods. In the first method (Method I), the vibration produced by the ultrasonic transducer placed on the plate is transferred to the PV panel with the springs placed on the four corners of the PV panel with the plate on which the ultrasonic transducer is placed, and the effects of the vibration on the cleaning and performance of the PV panel are investigated. In the second method (Method II), the effects of surface acoustic sound waves produced by four piezoelectric actuators placed on the upper parts of the PV panel on panel cleanliness and thus panel performance were investigated. In the third method (Hybrid Method; Method I and Method II together), the effects of these two methods used together, namely hybrid use, on PV panel cleaning and thus performance were investigated.

The results show that a completely dusty and no power generation PV panel can increase the relative maximum power output to 53.80% by Method I, to 55.48% by Method II, and to 68.6% by the Hybrid method. In addition, the results show that the effectiveness of the applied methods increases as the panel tilt angle increases.

Keywords: *Photovoltaic Panel, Surface Acoustic Wave, Panel Efficiency, Panel Cleaning.*

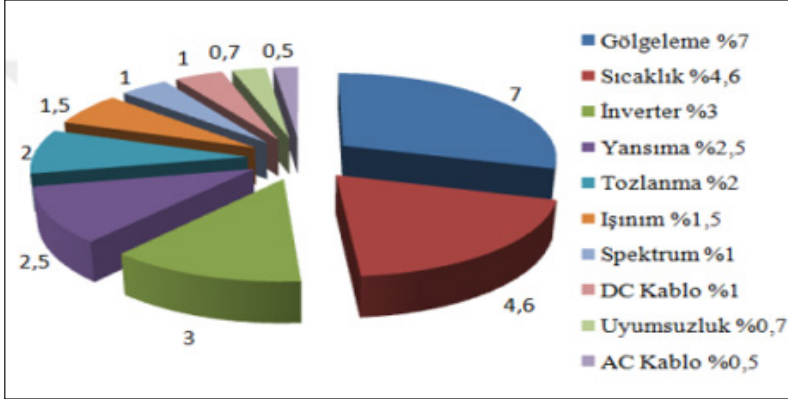


1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun hızla artmasıyla beraber ihtiyaçların karşılanması için çok miktarda enerji kullanılmakta ve bunun sonucunda da daha fazla enerjiye ihtiyaç

duyulmaktadır. Bununla birlikte gelişen teknoloji de enerji ihtiyacına neden olmaktadır. Bu nedenle doğa ve çevreyi kirletmeyen düşük maliyetli, sürdürülebilir sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Doğal ve yenilebilir kaynaklı olarak enerji üretiminde güneş enerjili sistemler, sahip olduğu sonsuz kapasite nedeniyle en fazla tercih edilen sistemler olmuştur. Güneş destekli fotovoltaik sistemler yapılarında bulunan fotovoltaik hücreler yardımıyla güneşten gelen ışık enerjisini direkt elektrik enerjisine dönüştürürler. Solar fotovoltaik panel sistemler enerji ve elektriğe ihtiyaç duyulan her alanda rahatlıkla kullanılabilir. Bu nedenle doğal bir kaynak olan güneş ışığını kullanarak ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin üretildiği bu sistemler, her geçen gün elektrik enerjisi üretimi konusunda önemini hızla artırmaktadır. Güneş potansiyeli olan her yerde rahatlıkla kurulabilen bu sistemler ulaşım problemi yaratmayan sistemlerdir. Bu nedenle merkezi ve kırsal olmak üzere her kesimde kullanılabilir. Güneş, dünyadaki her yerde ortak bir enerji üretim potansiyeli olduğundan dolayı dünya üzerindeki her ülke güneş destekli fotovoltaik sistemleri kullanarak kendi elektrik enerjisini üretecek potansiyele sahiptir. Fotovoltaik sistemler üzerinde bulunan, ışığı emen ve bakır, arsenit, galyum gibi yarı iletken maddeler yardımıyla güneşten aldığı ışık enerjisini elektrik enerjisine çeviren yapılara fotovoltaik hücre adı verilmektedir. Diğer adı güneş pili olan bu yapı kare, daire, dikdörtgen şeklinde biçimlere sahip olup alanı 100 cm² civarındadır. Fotovoltaik hücrelerin kalınlıkları ise en çok kullanılan silisyum hücre yapılarında 0.2-0.4 mm arasındadır [1]. Fotovoltaik hücrelerin enerji dönüşüm performansı pek çok farklı etkene göre değişiklik göstermektedir. Bu etkenler; Güneş ışınımının spektral özellikleri, PV hücre yüzey malzemesinin ışınım özellikleri, PV hücrenin kalınlığı, PV hücrenin iç seri direncinden kaynaklanan kayıplar, ortamdaki havanın sıcaklığı, güneş ışınlarının PV hücre üzerine geliş açısı, PV hücrenin eğim açısı, PV hücrenin temizliği şeklinde sınıflandırılabilir. Şekil 1'de görüldüğü gibi tipik bir PV sisteminde tozlanma kayıpları %2 civarındadır[2]. Kirleşmenin artış göstermesi, üretilen elektriğin miktarını düşürmektedir. Yapılan araştırmalar, tozlanmadan kaynaklanan kayıpların özellikle yağış oranının çok az olduğu alanlarda %15'e kadar ulaşabildiğini göstermektedir[2, 3]. Diğer yandan, PV Sistemlerde Oluşan Kayıplara neden olan etmenler değerlendirildiğinde verim düşüşüne neden olan kirli güneş panelleri düzeltilmesi en kolay olanıdır. Bakıldığında panel yüzeyini rüzgar veya yağmur suyu gibi doğal yollar ile temizlenmektedir. Ancak bu yöntemler panel yüzeyinde biriken tozların tamamen temizlenmesinde etkili değildir ve belli panel konumları gerektirir. Rüzgarsız ve yağmur almayan bölgelerde kurulu PV santrallerinde ise doğal yollarla temizlik mümkün olamamaktadır. Bundan dolayı güneş panellerinin etkin bir şekilde temizlenmesi için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemleri temaslı ve temassız olmak üzere iki grupta incelemek mümkündür. Temaslı sistemler güneş hücreleri ile temas ederek temizleme yaparken, temassız sistemler panele temas etmeden temizleme işlemini gerçekleştirmektedir. Temaslı sistemlerin en büyük dezavantajları, temizleme işlemi sırasında panel ile temas sözkonusu olduğundan panellerin zarar görebilmesi,

belirli bir takvim içerisinde yapılabilmesi ve yüksek su kullanımı iken, temassız sistemlerin en büyük dezavantajları ise bu sistemlerin göreceli olarak temassız sistemlere göre daha karmaşık ve pahalı olmasıdır.



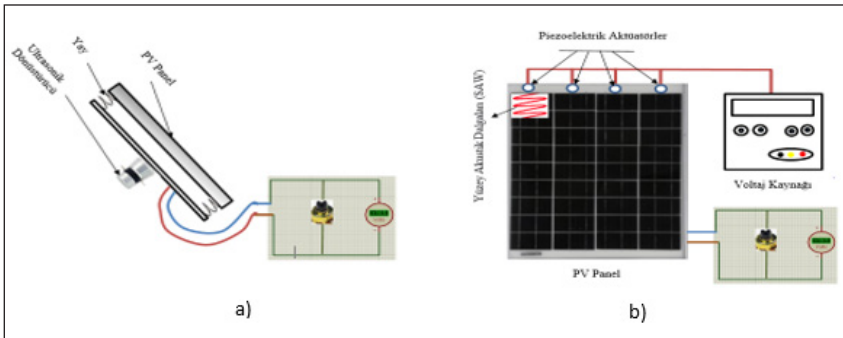
Şekil 1. PV Sistemlerde Oluşan Kayıpların Toplam Üretime Göre Yüzdesel Oranları[2]

Michele ve arkadaşları yaptığı makale çalışmasında çöl bölgelerinde doğa olaylarından dolayı paneller üzerinde hem toz hem de kum gibi yapıların yoğun olarak birikmesinden dolayı panellerin üzerini temizleyecek otomatik bir cihaz geliştirmiştir. Geliştirilen temizleme robotu zıt açıda olan sarmal fırçaları sayesinde panel üzerindeki toz ve kumu temizlemektedir. Konum, hız ve yörüngesinin ayarlanması için yüksek frekanslı ses dalgası anlamına gelen ultrasonik algılayıcılar kullanılmıştır[4]. Hiroyuki'nin yaptığı çalışmada fotovoltaik panellerin yüzeyine yapışmış toz parçacıklarını temizlemek amacıyla elektrodinamik kuvvet kullanan, sökülebilen özelliğine sahip bir temizleme cihazı geliştirilmiştir. Ayrıca yüzeyden kolayca giderilemeyen toz parçacıkları için operasyonel şema ayarlama, elektrot konfigürasyonunun iyileştirilmesi ve hava akışının kullanılması gibi önlemler alınmıştır[5]. Nasib ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada panel yüzeylerini temizleyen otomatik, ucuz ve performansı yüksek bir cihaz üretilmesi gerektiğinden bahsedilmektedir. Belirtilen gereklilik sonucu yapılan çalışmada tasarlanan cihazın, tasarım olarak temizleme robotu ve bir bulut arayüzünden oluştuğu, temizleme robotunun ileri geri hareketlerle paneli temizlediği ve bulut arayüzünün ise robotun uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesi görevini yaptığı belirtilmektedir [6]. Gaofa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada panellerin temizlenmesi için kullanılan doğal, mekanik, kendi kendini temizleyen ve elektrostatik yöntemlerden bahsedilmiştir. Yapılan bu çalışma ile güneş panelleri ve diğer cihazlar için otomatik temizleme yöntemi hakkında daha geniş bir bakış açısı kazandırılması amaçlandığı vurgulanmıştır[7]. Abdulsalam ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada mekanik, aktif ve pasif elektriksel sistemler olmak üzere birçok temizleme tekniğinin yanısıra modül titreşimi ve

akışkan jetleri ayrıca bunların birleşimini içeren mekanik yaklaşımlar anlatılmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda kumlu kirlenmenin kısa sürede sistem performansı üzerine büyük etkileri olduğu, yüksek hacim ve düşük basınçta optimize edilen su jetlerinin, performansta %27'nin üzerinde artış sağladığı, hava jetleri ve modül titreşimli sistemlerin performansı artırmada daha az etki sağladığı sonuçlarına varılmıştır[8]. Serkan ve arkadaşları yüzey yapısının bozulmuş panellerin performansı ile ilgili deneyler yapmış ve yüzey akustik dalgalarının yüzey temizliğine olan etkisini ortaya koymuşlardır [9]. Literatürde temaslı ve temassız temizleme yöntemlerinin panel performansı üzerine etkilerini inceleyen pek çok çalışma yapılmasına karşın günümüzde temaslı yöntemlere ticari yönden alternatif teşkil edebilecek herhangi bir yöntem henüz bulunamamıştır. Bu çalışma kapsamında temassız panel temizlik yöntemleri arasında en çok gelecek vadeden yöntemlerden biri olan yüzey akustik dalga ile temizlik yönteminin tek başına yahut mekanik yöntemler ile birlikte hibrit olarak kullanımının panel performansı üzerine etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

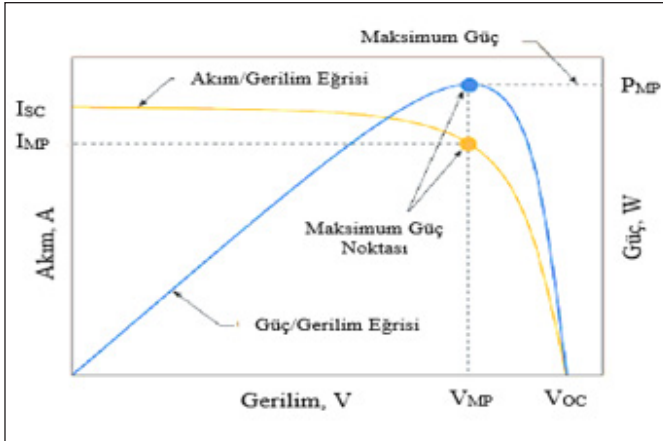
Mekanik ve temassız kendi kendini temizleme yöntemlerinin PV panel performansına etkileri üç yöntem kullanılarak deneysel bir çalışma ile incelenmiştir. Birinci yöntemde (Yöntem I), Şekil 2'de gösterildiği gibi levha üzerine yerleştirilen ultrasonik dönüştürücü tarafından üretilen titreşim, ultrasonik dönüştürücünün yerleştirildiği levha ve PV panelin 4 köşesine yerleştirilen yaylar ile PV panele aktarılarak, oluşan titreşimin PV panel temizliğine dolayısıyla performansına etkileri incelenmiştir. İkinci yöntemde (Yöntem II), Şekil 2'de gösterildiği gibi PV panel üst kısımlarına yerleştirilen piezoelektrik 4 adet aktuatör tarafından üretilen yüzey akustik ses dalgalarının panel temizliğine ve dolayısıyla panel performansına etkileri incelenmiştir. Üçüncü yöntemde (Yöntem III; Yöntem I ve Yöntem II birlikte) ise, kullanılan bu iki yöntemin bir arada yani hibrit kullanımının PV panel temizliğine dolayısıyla performansına etkileri araştırılmıştır.



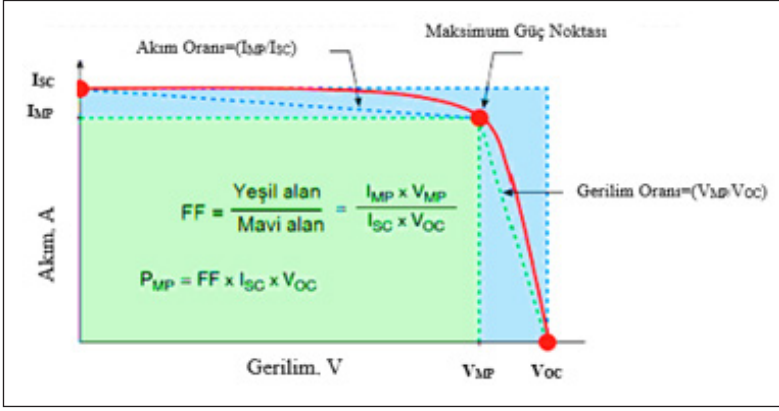
Şekil 2. Çalışmada Kullanılan Yöntemlerin Şematik Gösterimi. a) Mekanik Yöntem (Yöntem I) b) Yüzey Akustik Yöntem (Yöntem II)

Yapılan deneylerde panellerin üzerine farklı boyut ve özelliklerde kum ve tozlar hassas ayarlarda püskürtülerek panellerin %31,3 güç kaybına uğrayacak düzeyde tozlanması sağlanmış, sonrasında tozlanan paneller üzerinden performans parametrelerinin ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerde; Akım-Gerilim-Güç özellikleri, doluluk faktörü ve panel verimi, toz uzaklaştırma indeksi gibi parametreler ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada PV hücreye ait akım-gerilim (I-V) özellikleri ve güç-gerilim (P-V) özellikleri belirlenmiştir. Deneyler sabit bir ışık şiddeti altında (600 W/m^2) gerçekleştirilmiş, değişken bir direnç açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek, PV hücrenin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akım ölçülmüş, Akım-Gerilim-Güç özellikleri belirlenmiştir. Bir PV hücrenin açık devre gerilimi (V_{oc}), hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda hücre uçlarından ölçülen gerilimdir (Şekil 3).

PV hücrenin kısa devre akımı (I_{sc}) ise, sıfır gerilimde ve aydınlatma altında hücreden geçen akımdır (Şekil 3) ve paralel direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışınım şiddetine bağlıdır. Bir PV hücre, geniş bir gerilim (V) ve akım (I) aralığında çalışabilir. Maksimum güç noktası, sürekli olarak ışınım alan bir PV hücredeki direnç yükünü sıfırdan (kısa devre) çok yüksek bir değere (açık devreye) kadar sürekli arttırarak belirlenebilir. Maksimum güç noktasında $V \times I$ değeri yüksektir. Bu noktada, PV hücre bulunduğu ışınım seviyesinde en yüksek elektrik üretir. Dolgu Faktörü (FF), PV hücrenin ideallığının bir ölçüsüdür, bir PV hücrenin maksimum çıkış gücünü, açık devre gerilimi ve kısa devre akımına bağlı olarak tanımlamak için kullanılan bir değişkendir (Şekil 4) [12]. FF Denklem 1 ile hesaplanır, ideal bir PV hücrede, $FF=1$ 'dir. Bu nedenle, herhangi bir PV hücrede dolgu faktörünün 1'e yakın olması istenir.



Şekil 3. Tipik Bir PV Hücrenin Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Özellikleri[12]



Şekil 4. Doluluk Faktörü[12]

$$FF = \frac{P_m}{V_{ad} \times I_{kd}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{\eta \times I_s \times A_c}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (1)$$

PV hücre verimi, güneş enerjisinin fotovoltaik (PV) etkiyle elektriğe dönüştürülebilir bölümünü belirtir ve Denklem 2 ile hesaplanır. Deneylerde kullanılan LEXRON LXR-025M panelin ölçüleri 360x430x25 mm olup, Panel Alanı (Ac) 0.1548 m²'dir.

$$\eta = \frac{V_{OC} \times I_{SC}}{I_s \times A_c} \quad (2)$$

Tozlanma nedeniyle PV panelde oluşan verim kaybı ise Denklem 3 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{loss} = \frac{\eta_{clean} - \eta_{dirty}}{\eta_{clean}} \quad (3)$$

Tozlanmaya neden olan malzemenin boyutu ve birikim yoğunluğu PV sistemin güç çıkış kaybını etkileyen önemli iki parametredir. Tozlanma sadece PV panel üzerine gelen radyasyonu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda bu radyasyonun geliş açısına olan bağımlılığı da değiştirir. Toz giderme indeksi (I), herhangi bir parametrenin/yöntemin etkisini uyguladıktan sonraki son toz indeksi (Ia) ile aynı parametrenin/yöntemin uygulamadan önceki toz indeksi (Ib) arasındaki farkın, parametrenin/yöntemin uygulamadan önceki toz indeksine (Ib) oranıdır. Başka

bir ifadeyle, toz giderme indeksi, sadece panel yüzeyinden çıkarılan toz miktarını oransal olarak temsil eden bir sayıdır ve basitçe Denklem 4 ile hesaplanabilir.

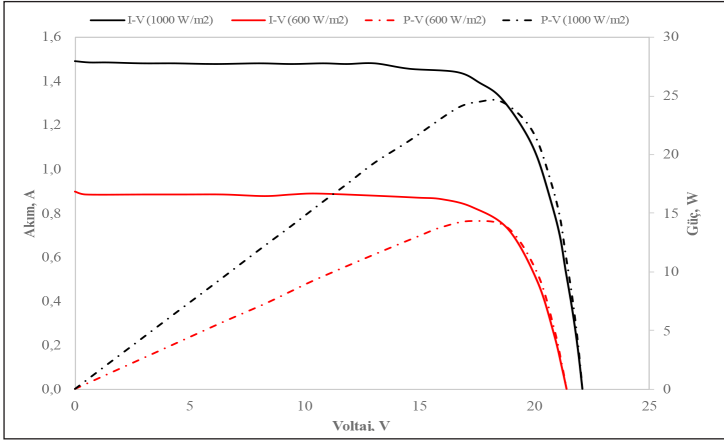
$$I = \frac{I_b - I_a}{I_b} \quad (4)$$

Toz giderme indeksinin değeri, sıfır ile bir arasında değişir. Panelden uzaklaştırılan toz miktarı arttıkça, toz kaldırma indeksi değeri bire yaklaşır. Deneylerden önce panel üzerine eklenen toz miktarı hassas terazi ile ölçülerek panel yüzeyine eşit olarak dağıtılmıştır. Toz uzaklaştırma yöntemleri uygulanırken panelden uzaklaştırılan toz bir perde aracılığıyla toplanmış sonra hassas terazide tartılarak uzaklaştırılan toz miktarları belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

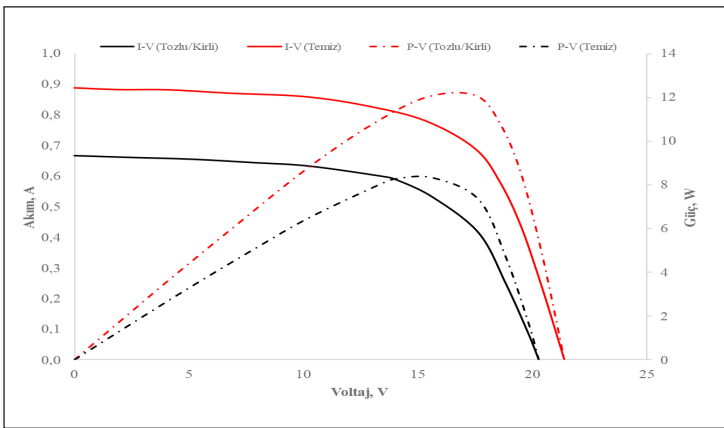
Toz ve lekelerin birikmesi, PV panelinin etkinliğini önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, PV panelin temizliği çok önemlidir. Birçok araştırmacı, dönem boyunca verimliliklerini korumak için güneş PV panelleri için etkili temizleme teknikleri geliştirmektedir. Doğal temizleme, manuel yıkama ve fırçalama, rüzgar üfleme, otomatik mekanik temizleme, otomatik su püskürtme, ultrasonik titreşim, mikrodenetleyici tabanlı otomatik temizleme, elektrostatik temizleme, süper hiperbolik kaplama ve süper hidrofilik gibi çeşitli PV panel temizleme teknikleri kaplama gibi bir çok yöntem tartışılmıştır [10]. Bu çalışmada, üç farklı toz uzaklaştırma yönteminin, PV panel performansına etkileri incelenmiştir. Deneylerde kullanılan PV panellerin, standart koşullar ile (25 oC ve 1000 W/m²) deney koşullarındaki (25 oC ve 600 W/m²) I-V, P-V eğrileri Şekil 5'de verilmiştir.

Şekil 5'de görüldüğü gibi PV panelin güneş ışınım şiddetine bağlı olarak akım ve gerilim büyüklükleri değişirken, bu büyüklüklerinin eğrileri arasında doğrusal olmayan bir yapı oluşmaktadır. Buna göre güneş ışınım değeri azaldıkça PV panelin üreteceği maksimum güç değeri de azalmaktadır. Ayrıca kısa devre akım değerinde yüksek oranda azalma görülürken, açık gerilim değerinde ise çok büyük bir fark olmadığı gözlenmiştir. İki farklı ışınım değerleri için, akım değerleri ve gerilim değerleri birbirinden farklı değerler alırken, sistemin maksimum güç noktalarına ulaştıkları değerler de değişmektedir.



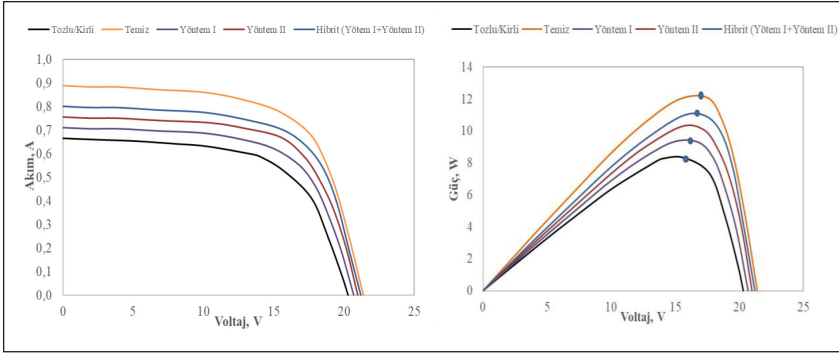
Şekil 5. Deneylerde Kullanılan PV Panellerin standart koşullardaki (25 °C ve 1000 W/m²) ve deney koşullarındaki (25 °C ve 600 W/m²) I-V ve P-V Karakteristik Eğrileri

Şekil 6'da tozlandırılmış ve temiz PV panellerin I-V ve P-V karakteristik eğrileri gösterilmiştir. Panel üzerine, 2,8 mg/cm² oranında toz eşit bir şekilde dağıtılmıştır. Bu durumda panelde %31,3 güç kaybı gerçekleşmiştir. Panel eğim açısı, β deneyler sırasında 15°'ye ayarlanmıştır. Bu açının seçilmesinde tozlandırmanın daha yüksek açılarda yerçekiminin etkisi nedeniyle ayarlanmasındaki güçlükler etkili olmuştur. Ayrıca daha yüksek açılarda yerçekimi etkisi de daha baskın hale geleceğinden toz uzaklaştırma başarısı daha da yüksek olacaktır. Dolayısıyla uygulanan toz uzaklaştırma yöntemlerinin en düşük başarı göstereceği açıda deneyler yapılarak yöntemlerin alt limit değerleri belirlenmiştir.



Şekil 6. %31,3 Güç Kaybına Uğratan Tozlandırılmış ve Temiz PV Panellerin I-V ve P-V karakteristik eğrileri (Panel Eğim Açısı, $\beta=15^\circ$; standart koşullardaki (25 °C ve 1000 W/m²) ve deney koşullarındaki (25 °C ve 600 W/m²))

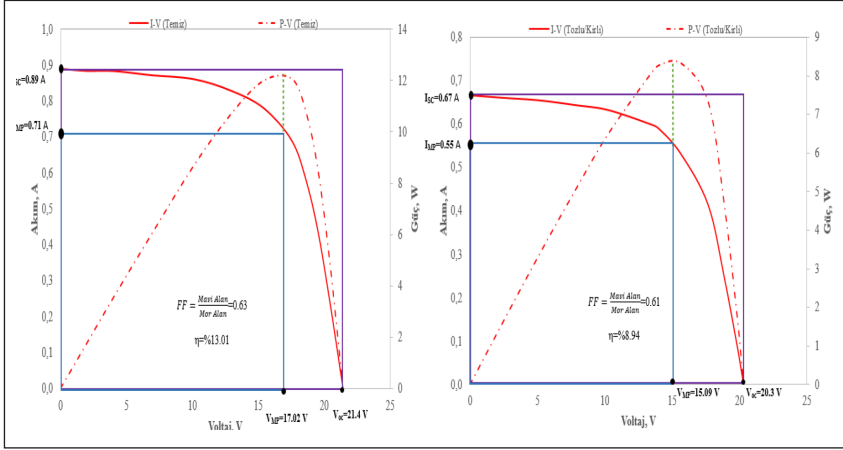
Şekil 7’de tozlandırılmış panele uygulanan temizleme yöntemlerinin PV panelin I-V ve P-V karakteristik eğrilerine etkileri gösterilmiştir. Panele daha önceki bölümde detayları verilen “Yöntem I, Yöntem II ve Hibrit yani Yöntem I ve Yöntem II” birlikte tozların uzaklaştırılması için uygulanmıştır.



Şekil 7. %31.3 Güç Kaybına Uğratan Şekilde Tozlandırılmış Panele Uygulanan Temizleme Yöntemlerinin PV Panelin a) I-V Karakteristik Eğrilerine b) P-V Karakteristik Eğrilerine Etkileri (Panel Eğim Açısı, $\beta=15$ o; Deney Koşulları; 25 oC ve 600 W/m²)

Tozlar, uygulanan yöntemlerin sağladığı titreşim ile yerçekiminin de etkisiyle panelden uzaklaştırılmıştır. Titreşim uygulandıktan kısa süre sonra tozların Yöntem I’de panelin merkezinden başlayarak, yöntem II’de ise panelin üst kısmında piezo sensörlerin yakın olan bölgeden hareket ederek panelin en alt kısmından panelden uzaklaşmışlardır. Gözle yapılan gözlemlerde piezo sensörler çalıştırdıktan kısa süre sonra tozların panelden uzaklaşmaya başladığı ve yaklaşık 60 s sonra bunun yavaşlamaya hatta neredeyse durma noktasına geldiği gözlemlenmiştir. Hibrit yöntemde ise hem üst hemde ortadan başlayarak iki tozların panelden uzaklaştığını ve daha hızlı ve yüksek oranda temizleme oranlarına ulaştığı gözlemlenmiştir. Beklendiği şekilde tozlandırılmış PV panel güç üretimi düşerken, uygulanan temizleme yöntemlerinin panel üzerindeki tozları uzaklaştırma başarısı ile doğru orantılı şekilde panelin ürettiği güç değerleri artmaktadır. Benzer şekilde panellerin maksimum güç üretme noktasında, grafikte sağa doğru kaydığı görülmektedir. Temizlenmiş PV panelin eğim açısı, $\beta=15$ o’ye ayarlanmış, 25 oC sıcaklık ve 600 W/m² radyasyon şiddeti altında deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen I-V ve P-V karakteristik eğrileri, doluluk Faktörü ve panel verimi PV panel temel performans parametreleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Bu şekilde görüleceği gibi deney şartlarında panelin kısa devre akımı 0.89 A, açık devre voltajı 21.4 V ölçülürken, maksimum güç noktasında akım ve voltaj değerleri sırasıyla 0.71 A ve 17.02 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca PV panelin doluluk faktörü 0.63 ve verimi %13.01 olarak hesaplanmıştır. Benzer deney şartlarında tozlandı-

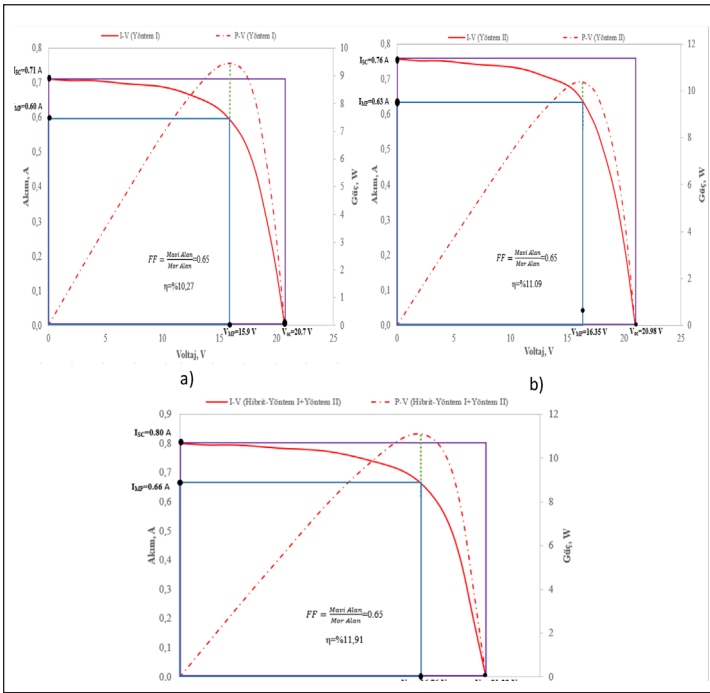
rılmış panelde deneylere tabi tutulmuştur. Tozlu panel için elde edilen I-V ve P-V karakteristik eğrileri, doluluk Faktörü ve panel verimi PV panel temel performans parametreleri Şekil 8b'de gösterilmiştir.



Şekil 8. a) Temiz PV Panelin b) Tozlu PV Panelin I-V ve P-V karakteristik eğrileri, Doluluk Faktörü ve Panel Verimi (Panel Eğim Açısı, $\beta=15^\circ$; Deney Koşulları; 25°C ve 600 W/m^2)

Bu şekilde görüleceği gibi deney şartlarında panelin kısa devre akımı dramatik şekilde azalarak 0.67 A, açık devre voltajı ise daha sınırlı oranda düşerek 20.3 V olarak ölçülürken, maksimum güç noktasında akım ve voltaj değerleri de benzer bir düşüş eğilimi göstererek sırasıyla 0.55 A ve 15.09 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca PV panelin doluluk faktörü az bir düşüşle 0.61 olurken, verimi dramatik bir düşüş göstererek %8.94 olarak gerçekleşmiştir. Tozlu panelin temizlenmesi için uygulanan Yöntem I, Yöntem II ve Hibrit Yöntem (Yöntem I ve Yöntem II birlikte) için, eğim açısı, $\beta=15^\circ$ öde, 25°C sıcaklık ve 600 W/m^2 radyasyon şiddeti altında elde edilen I-V ve P-V karakteristik eğrileri, doluluk Faktörü ve panel verimi gibi PV panel temel performans parametreleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'da görüleceği gibi Yöntem I uygulanmış panelde, tozlu panele göre kısa devre akımı artarak 0.71 A, açık devre voltajı ise sınırlı bir artış ile 20.7 V olarak ölçülürken, maksimum güç noktasında akım ve voltaj değerleri de benzer bir artış eğilimi göstererek sırasıyla 0.60 A ve 15.9 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca PV panelin doluluk faktörü artarak 0.65 olurken, verimde artarak %10.27 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 9b'de görüleceği gibi Yöntem II uygulanmış panelde, tozlu panele göre kısa devre akımı artarak 0.76 A, açık devre voltajı ise sınırlı bir artış ile 20.98 V olarak ölçülürken, maksimum güç noktasında akım ve voltaj değerleri de benzer bir artış eğilimi göstererek sırasıyla 0.63 A ve 16.35 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca PV panelin doluluk faktörü

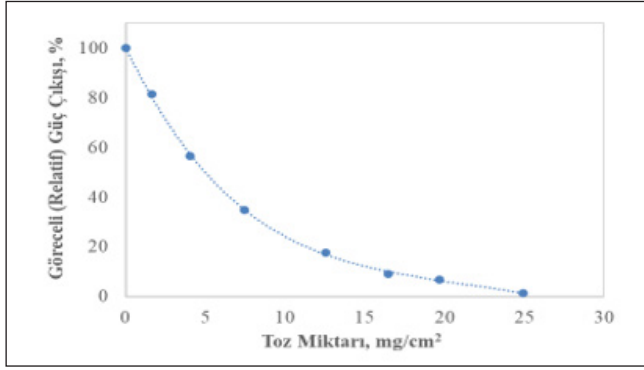
artarak 0.65 olurken, verimde artarak %11.09 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 9c'de görüleceği gibi hibrit yöntem yani yöntem I ve yöntem II aynı anda birlikte uygulandığında, tozlu panele göre kısa devre akımı artarak 0.80 A, açık devre voltajı ise sınırlı bir artış ile 21,22 V olarak ölçülürken, maksimum güç noktasında akım ve voltaj değerleri de benzer bir artış eğilimi göstererek sırasıyla 0.66 A ve 16.76 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca PV panelin doluluk faktörü artarak 0.65 olurken, verimde artarak %11,91 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 9'daki tüm veriler değerlendirildiğinde panel temizliği için uygulanan tüm yöntemlerin belirli oranlarda panel yüzeyinden tozların uzaklaştırılmasında başarı olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerden Hibrit Yöntem en başarılı olurken, onu Yöntem II ve Yöntem I takip etmiştir.



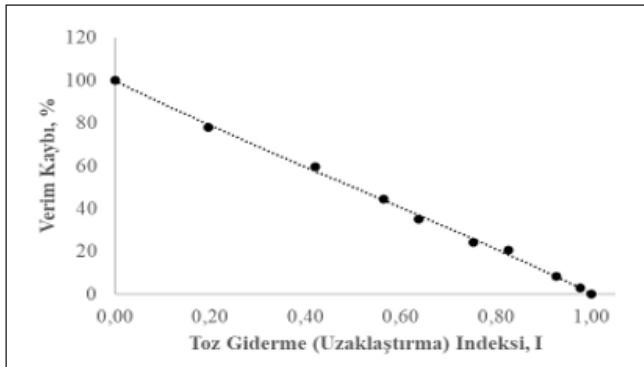
Şekil 9. Tozlu PV Panelin, a)Yöntem I b)Yöntem II c)Yöntem III ile Temizlenmesinin I-V ve P-V karakteristik eğrileri, Doluluk Faktörü ve Panel Verimine Etkileri (Panel Eğim Açısı, $\beta = 15$ o; Deney Koşulları; 25 oC ve 600 W/m²)

Şekil 10'da PV panelin göreceli (rölatif) güç çıkışının toz miktarıyla değişimi verilmiştir. PV panelin üzerinde toz miktarı arttıkça beklendiği üzere göreceli (rölatif) güç çıkışı azalmıştır. Güç çıkışı artan tozlanma miktarı ile birlikte logaritmik olarak azalarak, toz miktarı 25 gr/cm² üzerine çıktığında ise tamamen durmaktadır. Şekil 11'de verim kaybının PV panel toz giderme (uzaklaştırma) indeksi ile de-

ğişimi gösterilmiştir. Bu grafik verileri panel eğim açısı, $\beta=15^\circ$ için, 25°C sıcaklık ve 600 W/m^2 radyasyon şiddeti altında elde edilmiştir. Verim kaybı, toz giderme endeksi 1 (bir) oluncaya kadar lineer olarak azalarak 0 (sıfır) değerine ulaşmaktadır. Toz giderme endeksi 0 (sıfır) olması panel yüzeyinin tamamen tozla kaplı olduğunu ve panel veriminin 0 (sıfır) olduğunu göstermektedir. Toz giderme indeksinin 1 (bir) olması ise panel yüzeyinin tamamen tozdan arındırılmış olduğunu ve panel veriminin deney şartlarındaki normal değerinde olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu nokta referans değer olduğu için verim kaybı sıfırdır. Toz giderme endeksi sıfır değerine yaklaştıkça yani fiziksel olarak PV panel yüzeyindeki toz miktarı arttıkça verim kaybı da artmakta ve panel yüzeyinin tamamen ve yoğun bir şekilde tozla kaplandığı durumda güç üretimi sıfır olacağından verim değeri de sıfır olmaktadır. Başka bir ifadeyle verim kaybı %100 değerine ulaşmaktadır.

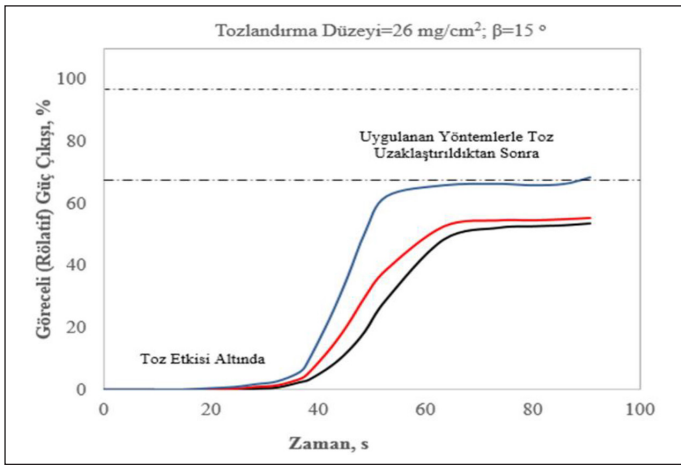


Şekil 10. PV Panelin Rölatif Güç Çıkışının Toz Miktarıyla Değişimi (Panel Eğim Açısı, $\beta=0^\circ$; Deney Koşulları; 25°C ve 600 W/m^2)

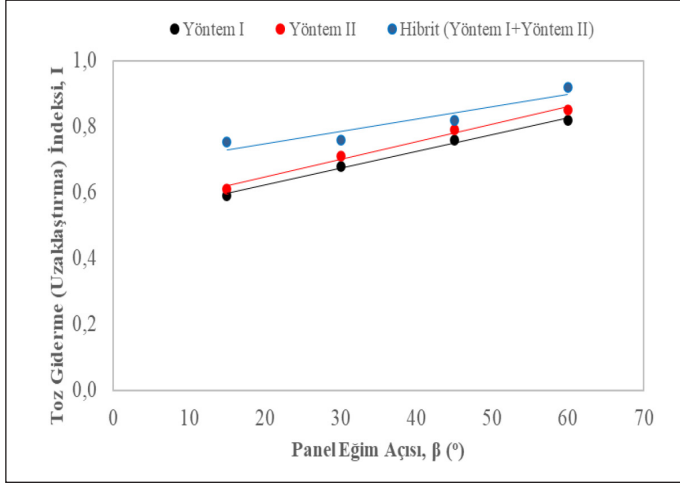


Şekil 11. PV Panelin Rölatif Güç Çıkışının Toz Miktarıyla Değişimi (Panel Eğim Açısı, $\beta=0^\circ$; Deney Koşulları; 25°C ve 600 W/m^2)

Şekil 12'de 26 mg/cm² Tozlandırma Düzeyinde, Panel Eğim Açısı, $\beta=15^\circ$ için, 25 oC sıcaklık ve 600 W/m² radyasyon değerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen bir PV panelin göreceli (Rölatif) güç çıkışının farklı temizleme yöntemleri ile değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden, Yöntem I, Yöntem II ve Hibrit Yöntem PV panele uygulanmaya başladıktan sonra yaklaşık 20 s gibi belirli bir süre boyunca panelin toz etkisi altında güç çıkışı üretmediği, 20 s sonunda ilk önce hibrit yöntemin, daha sonra Yöntem II'nin ve en sonunda Yöntem I'in panel üzerinden yeterli miktarda toz uzaklaştırmasının etkisiyle PV panelin güç üretmeye başladığı anlaşılmaktadır. Yine şekilden, uygulanan yöntemlerle toz uzaklaştırma işleminin hibrit yöntem ile yaklaşık 50 s, Yöntem II için yaklaşık 60 s, Yöntem I için ise yaklaşık 65 s sonra göreceli maksimumu güç çıkışına ulaşıldığı bu sürelerde sonra yöntemlerin etkisinin sabit kaldığı yani panelde kalan tozun uzaklaştırılmadığı görülmüştür. Yöntem I için göreceli maksimum güç çıkışı, %53,80, Yöntem II için %55,48 ve Hibrit yöntem için ise %68,6 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, uygulanacak yöntemlerin pratiğe aktarılması için her koşul için sistemlerin çalışma sıklıklarının ve sürelerinin optimize edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, toz modeline göre en iyi ve en uygun temizleme zamanını ve sıklığını belirleyebilecek akıllı temizleme sistemlerinin yanı sıra yapay zeka modellerinin geliştirilmesi şiddetle tavsiye edilmekte olup, özellikle tozlanma etkisinin yüksek ve suya ulaşım problemi olan bölgeler için bu yönde daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir [11].



Şekil 12. 26 mg/cm² Tozlandırma Düzeyinde PV Panelin Rölatif Güç Çıkışının Farklı Temizleme Yöntemleri ile Değişimi (Panel Eğim Açısı, $\beta=15^\circ$; Deney Koşulları; 25 oC ve 600 W/m²)



Şekil 13. 26 mg/cm² Tozlandırma Düzeyinde, Farklı Temizleme Yöntemleri için PV Panel Toz Giderme (Uzaklaştırma) İndeksinin (I) Panel Eğim Açısı ile Değişimi

Şekil 13'de 26 mg/cm² tozlandırma düzeyinde, farklı temizleme yöntemleri için PV panel toz giderme (uzaklaştırma) indeksinin (I) panel eğim açısı ile değişimi verilmiştir.

Bu şekilde görüldüğü gibi eğim açısı arttıkça toz uzaklaştırma indeksi de artmaktadır. Başka bir ifadeyle panel üzerinden uzaklaştırılan toz miktarı her üç yöntem içinde eğim açısına bağlı olarak lineer bir şekilde artmıştır. Bunun sebebi eğim açısının artışı ile yer çekim etkisinin daha baskın hale gelmesidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, mekanik ve temassız kendi kendini temizleme yöntemlerinin PV panel performanslarına etkileri üç yöntem kullanılarak deneysel bir çalışma yürütülerek incelenmiştir. Elde edilen ana sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. PV panelin güneş ışınım şiddetine bağlı olarak akım ve gerilim büyüklükleri değişirken, bu büyüklüklerinin eğrileri arasında doğrusal olmayan bir yapı oluşmaktadır. Buna göre güneş ışınım değeri azaldıkça PV panelin üreteceği maksimum güç değeri de azalmaktadır. Ayrıca kısa devre akım değerinde yüksek oranda azalmaya, açık gerilim değerinde ise çok büyük bir fark olmamaktadır. İki farklı ışınım değerleri için, akım değerleri ve gerilim değerleri birbirinden farklı değerler alırken, sistemin maksimum güç noktalarındaki değerleri değişmektedir.

2. Panel Tozlanması/kirliğinin, PV panel karakteristik eğrileri ve verimi üzerinde olumsuz etkiler olduğu görülmüştür.

3. Panel kirliliğinin artmasıyla, kirliliğinin panel karakteristik eğrileri ve verimi üzerinde olumsuz etkileri artmaktadır.

4. Tozlu panelin temizlenmesi için uygulanan Yöntem I, Yöntem II ve Hibrit Yöntemin hepsinin PV panel karakteristik eğrileri, doluluk faktörü ve verimini olumlu yönde etkiledikleri belirlenmiştir.

5. Uygulanan yöntemlerden, PV panel karakteristik eğrileri, doluluk faktörü ve verimini olumlu yönde etkilerinin en fazla sırasıyla Hibrit yöntemde, daha sonra Yöntem II'de ve en sonda Yöntem I'de olduğu görülmüştür.

6. PV panelin üzerinde toz miktarı artıkça göreceli (rölatif) güç çıkışı logaritmik olarak azalarak, toz miktarı 25 gr/cm² üzerine çıktığında ise tamamen durmaktadır.

7. Verim kaybı, toz giderme endeksi 1 (bir) oluncaya kadar lineer olarak azalarak 0 (sıfır) değerine ulaşmaktadır. Toz giderme endeksi sıfır değerine yaklaştıkça yani fiziksel olarak PV panel yüzeyindeki toz miktarı arttıkça verim kaybı da artmakta ve panel yüzeyinin tamamen ve yoğun bir şekilde tozla kaplandığı durumda güç üretimi sıfır olacağından verim değeri de sıfır olmaktadır. Başka bir ifadeyle verim kaybı %100 değerine ulaşmaktadır.

8. Yöntem I, Yöntem II ve Hibrit Yöntem PV panele uygulanmaya başladıktan sonra yaklaşık 20 s gibi belirli bir süre boyunca panelin toz etkisi altında güç çıkışı üretmediği, 20 s sonunda ilk önce hibrit yöntemin, daha sonra Yöntem II'nin ve en sonunda Yöntem I'in panel üzerinden yeterli miktarda toz uzaklaştırmasının etkisiyle PV panelin güç üretmeye başladığı belirlenmiştir.

9. Uygulanan yöntemlerle toz uzaklaştırma işleminin hibrit yöntem ile yaklaşık 50 s, Yöntem II için yaklaşık 60 s, Yöntem I için ise yaklaşık 65 s sonra göreceli maksimumu güç çıkışına ulaşıldığı bu sürelerde sonra yöntemlerin etkisinin sabit kaldığı yani panelde kalan tozun uzaklaştırılmadığı görülmüştür. Bu sonuç uygulanacak yöntemlerin pratiğe aktarılması için her koşul için sistemlerin çalışma sıklıklarının ve sürelerinin optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

10. Panel eğim açısı arttıkça toz uzaklaştırma endeksi de artmaktadır. Başka bir ifadeyle panel üzerinden uzaklaştırılan toz miktarı her üç yöntem içinde eğim açısındaki artışla yer çekimi etkisi nedeniyle lineer bir şekilde artmaktadır.

Deneyler kapalı ortamda laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir. İleri ki çalışmalarda, saha ölçümlerinde paneller üzerine biriken toz miktarı da dikkate alınarak uygulamaya dönük daha kapsamlı çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Yazar Katkı Oranları

- Çalışmanın Tasarlanması (Design of Study): Damla ERİŞGİN (%35), Hakan ÖZCAN (%65)
 Veri Toplanması (Data Acquisition): Damla ERİŞGİN (%70), Hakan ÖZCAN (%30)
 Veri Analizi (Data Analysis): Damla ERİŞGİN (%40), Gürkan KARA (%20), Hakan ÖZCAN (%40)
 Makalenin Yazımı (Writing Up): Damla ERİŞGİN (%10), Gürkan KARA (%50), Hakan ÖZCAN (%40),
 Makale Gönderimi ve Revizyonu (Submission and Revision): Gürkan KARA (%100)

KAYNAKLAR

- [1] ÖZTÜRK, Murat; ÇIRAK, Burcu Bozkurt; NURI, ÖZEK. Eysel Fotovoltaik Sistemlerin Ömür Boyu Maliyet Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18.1: 1-11, 2012.
- [2] Maghami, M.R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M.A., Rezadad, M.I. and Hajighorbani, S., Power loss due to soiling on solar panel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1307-1316, 2016.
- [3] SÁNCHEZ-ILLESAS, P. J., et al. Performance of photovoltaic modules with white reflective back sheets. In: Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2008.
- [4] ANTONELLI, Michele Gabrio, et al. Battery-powered autonomous robot for cleaning of dusty photovoltaic panels in desert zones. In: International Conference Mechatronics. Springer, Cham, 2017. p. 653-661.
- [5] KAWAMOTO, Hiroyuki; SHIBATA, Takuya. Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels. Journal of Electrostatics, 2015, 73: 65-70.
- [6] KHADKA, Nasib, et al. Current practices of solar photovoltaic panel cleaning system and future prospects of machine learning implementation. IEEE Access, 2020, 8: 135948-135962.
- [7] HE, Gaofa; ZHOU, Chuande; LI, Zelun. Review of self-cleaning method for solar cell array. Procedia Engineering, 2011, 16: 640-645.
- [8] ALGHAMDI, Abdulsalam S., et al. Dust removal from solar PV modules by automated cleaning systems. Energies, 2019, 12.15: 2923.
- [9] ALAGOZ, Serkan; APAK, Yasin. Removal of spoiling materials from solar panel surfaces by applying surface acoustic waves. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119992.
- [10] JADHAO, M., PATANE, P., NADGIRE, A., UTAGE, A., A Study on Impact of Various Solar Panel Cleaning Methods on Its Performance. In: Palani, I.A., Sathiya, P., Palanisamy, D. (eds) Recent Advances in Materials and Modern Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0244-4_78, 2022.
- [11] SHENOUDA, R., ABD-ELHADY, M.S. & KANDIL, H.A., A review of dust accumulation on PV panels in the MENA and the Far East regions. J. Eng. Appl. Sci. 69, 8 <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00052-6>, 2022.
- [12] ÖZTÜRK, H.H., Güneş enerjisinden fotovoltaik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri. 2017;1:1-4.

