



Fotovoltaik Modüllerde Elektrostatik Temizleme Yöntemiyle Tozlanma Kayıplarının Azaltılması Üzerine Deneysel Bir Çalışmanın Değerlendirilmesi

Evaluation of an Experimental Study on Mitigation of Soiling Loss on Photovoltaic Modules through the Use of Electrostatic Cleaning

Harun Gümüş^{1*}, **Mete Çubukçu²**

^{1,2} Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: harun.gumus@ege.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 25.03.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 24.08.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257317

Atıf şekli/ How to cite: GÜMÜŞ, H., ÇUBUKÇU, M. (2023). Fotovoltaik Modüllerde Elektrostatik Temizleme Yöntemiyle Tozlanma Kayıplarının Azaltılması Üzerine Deneysel Bir Çalışmanın Değerlendirilmesi. DEÜ FMD 25(73), 205-216.

Öz

Bu çalışma, bir fotovoltaik modül için tasarlanmış bir elektrostatik temizleme sistemini analiz etmektedir. Elektrostatik temizleme yönteminin performansını değerlendirmek için katlanır bir ızgara mekanizması oluşturulmuştur. Bu mekanizmaya yerleştirilen iletkenler, artı ve eksi kutuplar birbirine dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Çalışma kapsamında gerilim, toz yoğunluğu ve temizleme işleminin süresi olmak üzere üç değişken analiz edilmiştir. Uygulanan gerilimin temizleme performansı için en belirleyici faktör olduğu görülmüştür. Gerilim miktarı yükseltildikçe, temizleme veriminin de arttığı tespit edilmiştir. 30 g/m² 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. En iyi temizleme verimi ise belirli bir toz yoğunluğunda (30 g/m²) ortaya çıkmıştır. Üç dakikayı aşan temizleme sürelerinde verim artışı ihmal edilebilir seviyededir.

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

Abstract

This study analyses an electrostatic cleaning system designed for a photovoltaic module. A folding grid structure was designed with copper conductors placed perpendicular to each other on positive and negative poles. Three variables—voltage, amount of dust and operation time of the cleaning process—were analysed within this study. It was observed that the applied voltage is the most determinative factor for the cleaning performance. It was determined that as the voltage amount is increased, the cleaning efficiency also increases. 2.5 kV, 3 kV and 3.5 kV voltages were applied to the copper conductors during the cleaning process with 30 g/m² dust and 3 minutes. The obtained cleaning efficiencies were 59.52%, 71.39% and 83.36%, respectively. The best cleaning efficiency was obtained for a certain range of dust amount. After 3 min. of cleaning process, the increase of efficiency can be considered negligible.

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

1. Giriş

Artan çevre bilinciyle birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları dünya enerji talebini karşılamak adına daha yaygın hale gelmiştir. Güneş enerjisi, bu konuda muazzam potansiyele sahip en umut verici enerji kaynaklarından biridir. Fotovoltaik (FV) teknolojisi ile güneş enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Teknolojinin gelişmesi ve artan çevresel duyarlılıkla beraber, fotovoltaik teknolojinin kullanımı günümüzde git gide artmaktadır. Bu doğrultuda, küresel ölçekte fotovoltaik santral kurulu güç kapasitesi oldukça büyük bir artış göstermiştir. 2010 yılında sadece 40 GWP olan kurulu güç kapasitesi, 2020 yılı sonu itibari ile yaklaşık 760 GWP kurulu güce ulaşmıştır [1].

Fotovoltaik santraller maksimum enerji üretecek şekilde tasarlanırlar. Ancak, bir fotovoltaik santralde kayıp kaçınılmazdır. Bu kayıp; gölgeleme, tozlanma, kablolama, uyumsuzluk ve evirici performansı, nem, sıcaklık gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir [2-4]. Fotovoltaik modülde optimum hasadı belirleyen birçok faktör vardır. Modüllerin zaman içerisinde tozlanması 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 [5]. 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 oluşabileceği görülmüştür [6-10]. Enerji kayıplarını ve modüllerin hasar görmesini önlemek için fotovoltaik modüllerin temiz tutulması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle modüller belirli periyotlarla temizlenmelidir.

FV modüllerini temizlemek için kullanılan birçok yöntem vardır. Manuel ve mekanik temizleme yöntemleri, fotovoltaik modül yüzeyinden toz parçacıklarının uzaklaştırılması için kullanılan en yaygın yöntemlerdir. Manuel temizleme yöntemi insan gücünden yararlanır. Temizleme işlemi özel fırçalar kullanılarak yapılır [2,11]. Bu yöntem, iyi düzenlenmiş bir temizleme programı

ile faydalı olabilir. Temizleme işlemi insanlar tarafından yapıldığında, yüzeyde tortu halini almış toz ve kuş pisliği gibi zor temizlenen kirlilikler daha verimli bir şekilde temizlenebilir. Bununla birlikte, bu yöntemin su ve işçilik maliyeti gibi bazı dezavantajları vardır. Özellikle su tüketimi ve işçilik giderleri, büyük ölçekli fotovoltaik santraller için ciddi bir sorun olabilir [12]. FV panellerini temiz tutmanın bir başka yolu da mekanik temizleme sistemidir. Mekanik temizlik, temizleme sisteminin nasıl çalıştığına bağlı olarak farklı şekillerde uygulanabilir. Mekanik temizleme sistemi, yatay veya dikey hareketli fırça veya silici kullanabilir [12]. Manuel yöntem ile kıyaslandığında, temizleme işlemi daha yüksek verim ve daha düşük temizleme süresi ile tamamlanabilir. Ancak mekanik temizleme sisteminin başlangıç maliyeti yüksek olabilir [13].

FV yüzeyinin kaplanması, FV panellerini temiz tutmak için alternatif bir çözümdür. Bu çözüm, FV yüzeyini hidrofobik veya hidrofilik malzemelerle kaplayan bir tekniktir [14]. Çalışmalar, kaplama yönteminin yüzeydeki toz birikimini azaltmada etkisi olduğunu göstermiştir [15,16].

Fotovoltaik pazarın çok miktarda yağış alan ülkelerden, daha az yağış alan ülkelere kayması ile birlikte panel üzerindeki tozlanma problemi de artmıştır. Bu bağlamda FV panellerin verimini artırmak için temizleme yöntemlerinin araştırılması oldukça önemlidir.

Bu makalede elektrostatik temizleme yöntemi ele alınmaktadır. Bu yöntemde elektrostatik kuvvet, FV yüzeyindeki toz parçacıklarını yüzeyden uzaklaştırmak için kullanılır. Bu bağlamda elektrostatik kuvvetle parçacıkların taşınması fikri 1972'de ortaya çıkmıştır [17]. Bu yöntem, kirlenme sorununu hafifletmek için FV panellerde uygulanabilir. Yöntemin temel prensibi, iletkenlere uygulanan gerilim ile birlikte panel yüzeyinde elektrostatik bir kuvvet oluşturmak ve toz parçacıklarının uzaklaştırılmasıdır. Bu konuda yapılan birçok çalışma vardır [18-25].

Toz, kimyasal, biyolojik, elektrostatik ve fiziksel özellikleriyle karakterize edilebilir. Her coğrafi bölgenin kendine özgü toz özelliği vardır [26]. Bu çalışma, Türkiye'nin kuzeydoğusundan toplanan toz parçacıkları ile gerçekleştirilmiş olup, çalışmada elektrostatik temizleme yönteminin, Türkiye'nin bu coğrafi bölgeye yerleştirilmiş FV

panellerden toz parçacıklarını uzaklaştırmayı ne ölçüde başardığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

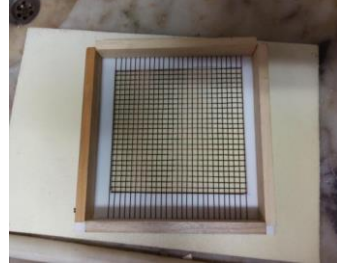
Bu çalışmada, fotovoltaik panellerde oluşan ve panellerin enerji üretim gücünü önemli ölçülerde düşürebilen tozlanma sorunu ele alınmıştır. Bu bağlamda tozlanma problemini çözmek için gelecek adına umut vaat eden elektrostatik temizleme yöntemi incelenmiştir.

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

Oluşturulan alt ve üst teller arasında, yönelim olarak 90° açı olmasına dikkat edilmiştir. Bu gerilen telin kenarları kazıtılarak birbirine lehimlenmiştir. Böylece gerilen iletkenler arasında oluşan elektrostatik alanın panelin her yerinde aynı değerde olması sağlanmıştır. Elde edilen ızgara yapısına sahip çerçeveye ait görüntü Şekil 1'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1. Temizleme çerçevesinin önden (a) ve arkadan (b) görünümü.

Fig. 1. Front (a) and back (b) view of the cleaning frame.

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 edilmiştir. Elde edilen elektrostatik alanın toz uzaklaştırma için kullanımı sırasında etki düzeyini arttırmak amacıyla paralel tellerdeki pozitif ve negatif kutupları sürekli olarak yer değiştirilmiştir. Böylece, tozların sürekli hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Deney sisteminde doğru akım güç kaynağından alınan sabit DC yüksek gerilimden, 1 Hz frekansında kutup değişimi oluşturulması amacıyla bir elektronik devre tasarlanmıştır ve temizleme sistemi oluşturulmuştur.

Bahsi geçen devrede, öncelikle 555 entegresi kullanılarak 1 Hz'lik bir osilatör devresi kurulmuştur. Bu kurulan osilatör devresinin amacı, devrenin çıkışına bağlı 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.

Tasarlanan temizleme sisteminin Türkiye koşullarında ideal şartlarda çalıştırılabilmesi ve değerlendirilmesi için Şekil 2'de görülen 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 [27]. Oluşturulan bu mekanizma ile elektrostatik temizleme sisteminin Türkiye'deki

uygulanabilirliğinin yaklaşık olarak incelenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. Elektrostatik temizleme mekanizmasının yapısı.

Fig. 2. Structure of the electrostatic cleaning mechanism.

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.

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

3. 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.

Temizleme verimi aşağıdaki formülle ifade edilmiştir:

$$Verim = \frac{P_{temizlenmiş} - P_{tozlu}}{P_{temiz} - P_{tozlu}} \quad (1)$$

Panelin temiz, tozlu ve temizlenmiş hallerinin akım ve gerilim değerlerini ölçmek için sırasıyla "TTI 1906 Computing Multimeter" ve "Keithley 199 System DMM/Scanner" cihazları kullanılmıştır. Ölçümler sırasında, ölçüm aletlerinin hata payları göz ardı edilmiştir. Deneyler, aynı şartlarda aynı cihazlar kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu sayede, ölçüm güvenilirliği sağlanmıştır.

3.1. İşlem Süresi

Öncelikle temizleme işleminin ne kadar süre boyunca uygulanması gerektiğinin tespit edilebilmesi adına bir deney yapılmıştır. Bu deney için 30 g/m² toz kullanılmıştır. Tozun panel üzerine olabildiğince homojen bir dağılımla yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Aynı gramajdaki toz grupları, panelin 5 cm üzerinden dökülmüştür ve her noktasına eşit bir şekilde fırça ile yayılmıştır. 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. Tablo 1'de yapılan çalışmanın sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 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, en düşük bir

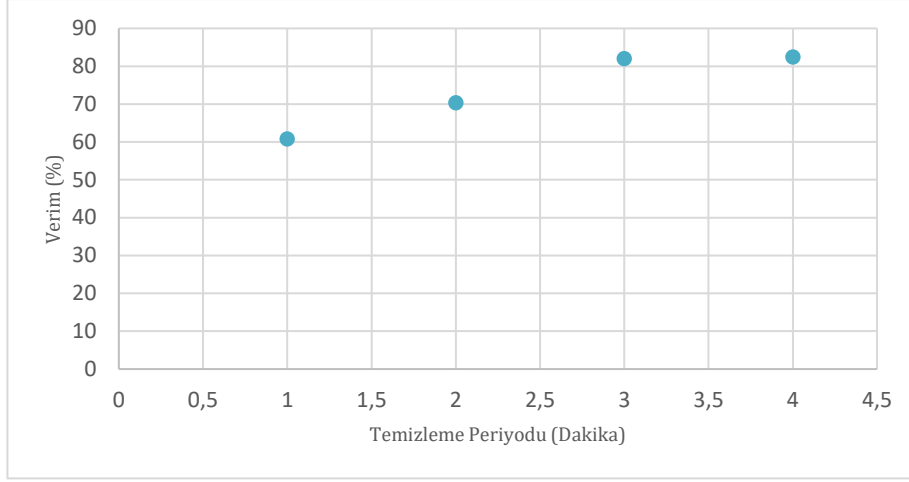
seviyeye gelmiştir. Dört dakika için yapılan deneyde elektrostatik temizleme veriminin üç dakikaya göre yalnızca % 0,3 civarında bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra sürenin arttırılmasının temizleme verimine katkısı olmadığı görülmüştür. Bu da kurulan

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 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. İşlem süresine göre temizleme verimi.

Table 1. Electrostatic cleaning efficiency based on operation time.

100 mm x 100 mm fotovoltaik modül, 3,5 kV, 1 Hz, 30 g/m ² toz					
Süre (Dakika)	Temizlik Durumu	Gerilim (V)	Akım (mA)	Güç (mW)	Verim (%)
1	Temiz	6,13	12,75	78,21	60,76
	Tozlu	5,89	8,08	47,55	
	Temizlenmiş	6,12	10,81	66,18	
2	Temiz	6,17	13,06	80,61	70,30
	Tozlu	5,86	8,14	47,74	
	Temizlenmiş	6,12	11,58	70,85	
3	Temiz	6,15	13,04	80,25	82,04
	Tozlu	5,86	8,04	47,10	
	Temizlenmiş	6,13	12,12	74,30	
4	Temiz	6,18	13,01	80,35	82,44
	Tozlu	5,84	7,52	43,92	
	Temizlenmiş	6,13	12,07	73,95	



Şekil 3. İşlem süresine göre temizleme verimi.

Fig. 3. Electrostatic cleaning efficiency with respect to time.

3.2. 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 yapılmıştır. Bu amaçla

sisteme sırasıyla 2,5 kV, 3 kV ve 3,5 kV gerilim değerleri uygulanmıştır. Bu işlem, panel üzerinde 30 g/m² toz varken yapılmış olup, işlem süresi araştırmanın birinci aşamasında elde edilen veriler dikkate alınarak 3 dakika olarak belirlenmiştir. Bu aşamada ulaşılan sonuçlar, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Uygulanan gerilime göre temizleme verimi

Table 2. Relationship between electrostatic cleaning efficiency and applied voltage.

100 mm X 100 mm fotovoltaik modül, 1 Hz, 30 g/m² toz

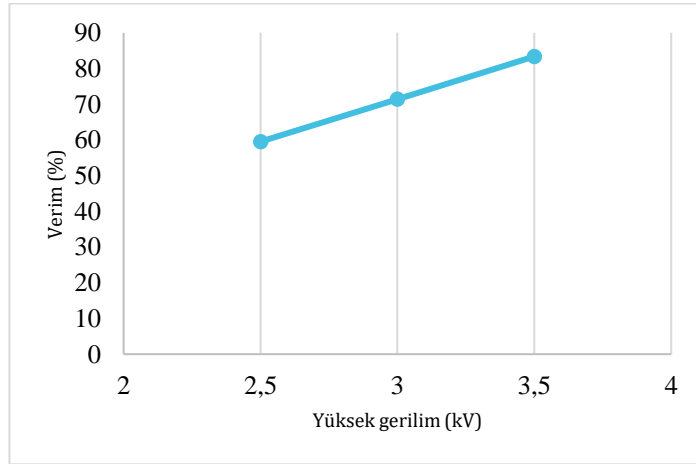
Gerilim (kV)	Temizlik durumu	Gerilim (V)	Akım (mA)	Güç (mW)	Verim (%)
2,5	Temiz	6,705	40,98	0,274771	59,52
	Tozlu	6,345	18,027	0,114381	
	Temizlenmiş	6,599	31,8	0,209848	
3	Temiz	6,671	36,772	0,245306	71,39
	Tozlu	6,41	17,982	0,115265	
	Temizlenmiş	6,569	31,68	0,208106	
3,5	Temiz	6,619	36,763	0,243334	83,36
	Tozlu	6,367	22,987	0,146358	
	Temizlenmiş	6,592	34,465	0,227193	

Tablo 2, panelin ilk (temiz) hali, tozlu hali ve yüksek gerilim (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 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'te gösterilmiştir.

3.3 Toz Yoğunluğu

Son olarak, panel üzerindeki toz yoğunluğuna göre elektrostatik temizleme sisteminin verimine etkisi araştırılmıştır. 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 20 g/m², 25 g/m², 30 g/m², 35 g/m², 40 g/m² ve 45 g/m² olmak üzere altı farklı toz yoğunluğunda düzenlenmiştir. Bu toz grupları sırayla panel üzerine, panelin 5 cm üzerinden panelin her noktasına eşit bir şekilde yayılmaya çalışılmıştır. 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, Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yüksek gerilim ve verim ilişkisi.

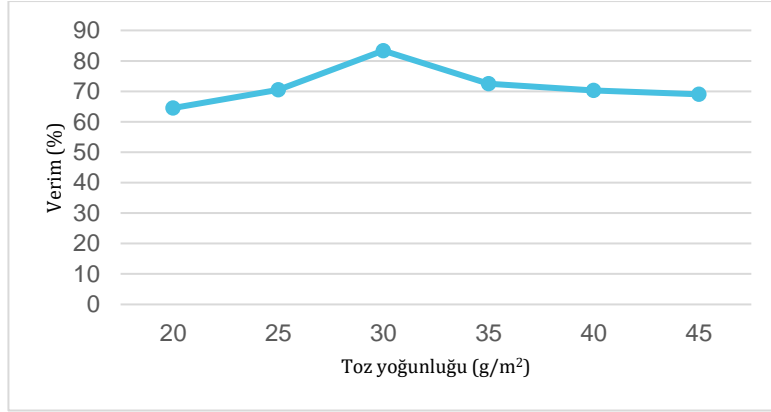
Fig. 4. Relationship between voltage and cleaning efficiency.

Tablo 3. Toz yoğunluğunun temizleme verimine etkisi.**Table 3.** Relationship between dust density and efficiency.

100 mm X 100 mm fotovoltaik modül, 3,5kV, 1 Hz					
Toz Yoğunluğu (g/m ²)	Temizlik Durumu	Akım (mA)	Gerilim (V)	P (mW)	Verim (%)
20	Temiz	36,537	6,702	0,244871	64,51
	Tozlu	23,672	6,497	0,153797	
	Temizlenmiş	32,093	6,623	0,212552	
25	Temiz	39,756	6,728	0,267478	70,49
	Tozlu	18,028	6,474	0,116713	
	Temizlenmiş	33,592	6,638	0,222984	
30	Temiz	36,763	6,619	0,243334	83,36
	Tozlu	22,987	6,367	0,146358	
	Temizlenmiş	34,465	6,592	0,227193	
35	Temiz	39,433	6,679	0,263373	72,51
	Tozlu	18,703	6,09	0,113901	
	Temizlenmiş	33,638	6,608	0,22228	
40	Temiz	38,556	6,63	0,255626	70,28
	Tozlu	17,151	6,363	0,109132	
	Temizlenmiş	32,39	6,548	0,21209	
45	Temiz	37,745	6,611	0,249532	69,02
	Tozlu	16,89	6,297	0,112653	
	Temizlenmiş	31,286	6,558	0,205174	

Elde edilen veriler açıkça göstermektedir ki, elektrostatik temizleme verimi belirli bir toz yoğunluğu üzerinde ve altında düşmektedir. 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 mertebesinde (Şekil 5).



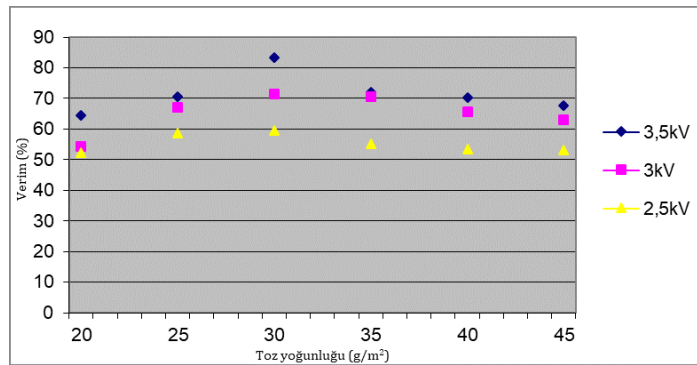
Şekil 5. Toz yoğunluğu ve verim ilişkisi.

Fig. 5. The relationship between dust density and cleaning efficiency.

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 gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, temizleme işleminin süresinin de iyi bir şekilde belirlenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Temizleme süresi artırıldıkça, temizleme veriminin de daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Ancak bu artış, süre uzadıkça, ivmesini kaybetmektedir. Belirli bir süreden sonra ise çok düşük (ihmal edilebilir) bir artış

söz konusudur. Bu çalışmada, herbir koşul için deneyler üçer kez tekrarlanmıştır ve sonuç olarak bu üç tekrarın ortalaması alınmıştır. Tekrarlarda ihmal edilebilir farklılıklar görülmüştür. Böylelikle ortalama değerler, nihai sonuç olarak değerlendirilebilmiştir.

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 daha az etkili olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Gerilim ve toz yoğunluğunun elektrostatik temizleme verimi üzerine etkisi.

Figure 6. Effect of voltage and dust on electrostatic cleaning.

4. Tartışma ve Sonuç

Elektrostatik temizleme yöntemi FV panellerin temizliği için iyi bir alternatif olabilir. Türkiye koşullarında elektrostatik performansı belirlemek için Türkiye'den toplanan toz parçacıkları ile elektrostatik temizleme sisteminde testler yapılmıştır.

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. Bu üç değişkenin öne çıkan bazı etkileri aşağıdaki gibidir:

- Uygulanan gerilimin temizleme performansının en belirleyici faktörü olduğu görülmüştür: Bakır iletkenlere panel üzerinde 30 g/m² toz varken 2,5 kV, 3 kV ve 3,5 kV gerilim 3 dakika boyunca uygulanmıştır. Sırasıyla %59,52, % 71,39 ve % 83,36 temizleme verimi elde edilmiştir.
- Fotovoltaik panel üzerindeki toz miktarı ile temizleme etkinliği arasındaki ilişki, farklı toz yoğunlukları (20-45 g/m²) dikkate alınarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, tasarlanan temizleme sisteminin belirli bir toz yoğunluğunda (yaklaşık 30 g/m²) daha başarılı olabileceğini kanıtlamaktadır.
- Farklı çalışma süreleri (1-4 dakika) için elektrostatik temizleme işlemi uygulanmıştır. Elektrostatik temizleme verimi temizleme işlemi süresiyle artmakla birlikte, bu artışın ivmesi zamanla düşüş eğilimi göstermekte ve 3 dakikadan sonra süre verimde önemli bir farklılık ortaya çıkarmamaktadır.

Literatürde, elektrostatik temizleme tekniğinin çoğu, elektrotların fotovoltaik panelin kapak camına gömülü olmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, toz parçacıklarının uzaklaştırılmasında etkili bir teknik olsa da, gölgeleme kaybına neden olur ve uzun vadede fotovoltaik panellerin kullanım ömrünü olumsuz etkileyebilir. 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.

Elektrostatik temizleme tekniği, fotovoltaik panellerde henüz yaygın olarak kullanılmamakla birlikte gelecek için umut vaat eden bir temizleme yöntemidir. Bu çalışmada 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. Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında ise herhangi bir su kullanımının olmaması özellikle su sorunu yaşayan bölgeler için büyük bir avantajdır.

5. Discussion and Conclusion

Under this study, the tests were conducted with dust particles collected from Turkey to determine the electrostatic performance in Turkey conditions. The electrostatic cleaning method can be a good alternative to keep PV power plants clean. It was also observed that voltage is the most determinative factor of the cleaning performance.

The findings revealed that the electrostatic cleaning method can efficiently clean a soiled PV panel. The variables of this cleaning process are determined as the voltage, the amount of dust and the duration of the cleaning process. Some of the prominent effects of these three variables are as follows:

- The applied voltage has been found to be the most determining factor of cleaning performance: While there was 30 g/m² dust on the panel, 2.5 kV, 3 kV and 3.5 kV voltages were applied to the copper conductors for 3 minutes. Respectively, 59.52%, 71.39% and 83.36% cleaning efficiency were obtained.
- The relationship between the amount of dust on the photovoltaic panel and the cleaning efficiency was analyzed considering different dust densities (20-45 g/m²). The results prove that the designed cleaning system can be more successful at a certain dust density (approximately 30 g/m²).

- Electrostatic cleaning was applied for different operation durations (1-4 minutes). Although the efficiency of electrostatic cleaning increases with the duration of the cleaning process, the acceleration of this increase tends to decrease over time, and after 3 minutes, the time does not reveal a significant difference in efficiency.

In literature, most of electrostatic cleaning techniques are based on electrodes embedded in the cover glass of photovoltaic panels. Although this manner can be an efficient technique for removing dust particles, it causes shading loss and shows a negative effect on the lifetime of the photovoltaic panels in the long term. The difference between this study and similar studies is that it does not cause a shading problem during the cleaning process and that the cover created for cleaning can be fixed on the panel. Thus, human error was avoided and the distance between the panel and the conductors could be adjusted as needed.

Although the electrostatic cleaning technique is not widely used in photovoltaic panels yet, it is a promising cleaning method for the future. The results obtained in this study also confirm this idea. The data obtained as a result of the experiments show that the electrostatic cleaning technique provides a cleaning performance of up to 84%. However, it is thought that this performance can be further improved in the future. Compared to traditional methods, the absence of any water use is a great advantage, especially for regions with water shortages.

6. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”.

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”.

Kaynakça

- [1] REN 21. 2021. RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf (Erişim Tarihi: 28.02.2022).
- [2] Tian, W., Wang, Y., Ren, J., Zhu, L. 2007. Effect of urban climate on building integrated photovoltaics performance, Energy Conversion of Management, Cilt. 48, s. 1-8. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.05.015.
- [3] Reza, M., Hizam, H., Gomes, C., Amran, Ismael, M. M., Hajighorbani, S. 2016. Power loss due to soiling on solar panel: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt. 59, s. 1307-1316. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.044.
- [4] 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 of Management, Cilt. 54, s. 17-23. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.09.013.
- [5] Ju, F., Fu, X. 2011. Research on Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance, 2011 International Conference on Electrical Control Engineering, s. 3601-3606. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6058487.
- [6] Ghazi, S., Sayigh, A., Ip, K. 2014. Dust effect on flat surfaces - A review paper, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt. 33, s. 742-751. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.016.
- [7] 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, Cilt. 22, s. 698-733. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.065.
- [8] Abderrezek, M., Fathi, M. 2017. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield, Solar Energy, Cilt. 142, s. 308-320. DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.040.
- [9] Ghazi, S., Ip, K. 2014. The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK, Renewable Energy Cilt. 69, s. 50-59. DOI: 10.1016/j.renene.2014.03.018.
- [10] Hammad, B., Al-Abed, M., Al-Ghandoor, 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, Cilt. 82, s. 2218-2234. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.070.
- [11] Al-Sabounchi, A.M., Yalyali, S.A., Al-Thani, H.A. 2013. Design and performance evaluation of a photovoltaic grid-connected system in hot weather conditions, Renewable Energy Cilt. 53, s. 71-78. DOI: 10.1016/j.renene.2012.10.039.
- [12] Jamil, H., Abdul Rahman, W.J., Shaari, S., Salam, Z. 2017. Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt. 67, s. 876-891. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.072.
- [13] 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 Cilt. 162, s. 597-619. DOI: 10.1016/j.solener.2017.12.023.

- [14] 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 Julius.Murdoch Üniversitesi, Doktora Tezi, 125s, Perth.
- [15] Fathi, M., Abderrezek, M., Friedrich, M. 2017. Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Cilt. 19, s. 577–585. DOI: 10.1007/s10098-016-1233-9.
- [16] Piliougine, 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*, Cilt. 112, s. 626–634. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.01.048.
- [17] Masuda, S., Fujibayashi, K., Ishida, K., Inaba, H. 1972. Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain, *Electrical Engineering in Japan*, Cilt. 92, s. 43–52. DOI: 10.1002/ej.4390920106.
- [18] Kawamoto, H., Shibata, T. 2015. Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels, *Journal of Electrostatics*, Cilt. 73, s. 65–70. DOI: 10.1016/j.elstat.2014.10.011.
- [19] Liu, G., Marshall, J.S. 2010. Particle transport by standing waves on an electric curtain, *Journal of Electrostatics*, Cilt. 68, s. 289–298. DOI: 10.1016/j.elstat.2010.02.004.
- [20] Kawamoto, H. 2020. Improved detachable electrodynamic cleaning system for dust removal from soiled photovoltaic panels, *Journal of Electrostatics*, Cilt. 107 s. 103481. DOI: 10.1016/j.elstat.2020.103481.
- [21] 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*, Cilt. 155, s. 1197–1207. DOI: 10.1016/j.solener.2017.07.064.
- [22] 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*, Cilt. 69, s. 370–379. DOI: 10.1016/j.elstat.2011.04.016.
- [23] Kawamoto, H., Miwa, T. 2011. Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration, *Journal of Electrostatics*, Cilt. 69, s. 365–369. DOI: 10.1016/j.elstat.2011.04.015.
- [24] Kawamoto, H. Guo, B. 2018. Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels, *Journal of Electrostatics*, Cilt. 91 s. 28–33. DOI: 10.1016/j.elstat.2017.12.002.
- [25] Kawamoto, H. 2019. Electrostatic cleaning equipment for dust removal from soiled solar panels, *Journal of Electrostatics*, Cilt. 98, s. 11–16. DOI: 10.1016/j.elstat.2019.02.002.
- [26] 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*, Cilt. 41, s. 735–744. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.068.
- [27] GLOBAL SOLAR ATLAS, Turkey, <https://globalsolaratlas.info/detail?r=TUR&c=39.027719.35.244141.6> (Erişim Tarihi: 25.07.2022).