

Kirliliğin PV Panel Verimine Etkisi ve Panel Temizleme Yöntemleri

Yasin İçel¹

Özet

Kalkınmanın sürdürülebilmesi için kesintisiz, ucuz ve yüksek kalitede bir enerji arzına ihtiyaç duyulduğu bilinen bir gerçektir. Çevresel dezavantajlar dikkate alındığında alternatif enerji kaynakları arayışı, bu alandaki çalışmaların, güvenilir ve çevre dostu, neredeyse limitsiz bir enerjiye sahip yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi üzerinde toplanmasını sağlamıştır. Güneş panellerinin verimini etkileyen bir diğer önemli çevresel faktör ise panel yüzeyinin toz, çamur, kuş dışkısı, yaprak vb kirlenmesidir. Özellikle güneş panellerinin yerleştirildiği bölgenin coğrafi konumu, panel yüzeylerinin kirlenmesi sonucu enerji verimliliğini yüksek oranda etkilemektedir. Panel yüzeylerinin özellikle tozdan kirlenmesi yüzünden verimlerinin %4 ile %32 oranında etkilendiği tespit edilmiştir. Ülkemizde en yüksek miktarda sayıya sahip olan PV santrallerinin verimini artırma için en önemli parametrelerden biri olan toz ve kir parametresinin etkilerinin en aza indirilmesi çok büyük önem arz etmektedir. PV panel temizlik maliyeti ve günümüz dünyasında hayat kaynağımız olan suyun tasarrufu açısından elektrostatik temizleme önerilmektedir.

1. Giriş

Enerjinin artık bu yüzyılda medeniyet ve teknolojinin temel taşlarından biri ve sosyo-ekonomik, gelişmişliğin en önemli bileşeni olduğu ve insanların yaşam standartlarını yükseltmede çok önemli bir yere sahip olduğu aşikardır. Sanayi devriminin başlaması ile insanlık, enerjinin vazgeçilmez bir güç olduğunu anlamış ve medeniyet ve güçlü olma, hükmetme dürtüsü ile başlayan enerji üretimi ve tüketimi süreci, zamanla yön değiştirmiş ve günümüzde artık mutlak bir ihtiyaç haline gelmiştir. Teknolojik gelişimin devam etmesi için kesintisiz, düşük maliyetli ve yüksek performansla sahip

1 Dr. Öğr. Üyesi, Adıyaman Üniversitesi, TBMYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, yasinicel@gmail.com, ORCID ID:0000-0001-9529-4811

bir enerji arzına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüz modern teknoloji ve bilgi toplumunda; sanayi, sağlık, teknoloji, iletişim, sosyal, ulaşım, eğitim gibi hayatımızın her evresinde vazgeçilmezi haline gelmiş tüm alanlarda ihtiyaç duyulan enerji, artık günümüzün en değerli ve en önemli bir kaynağı olmuştur (Varınca ve Varank, 2005; İçel, 2012). Enerji kaynakları, yenilenemeyen enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Teoride yakın bir gelecekte tükenebileceği varsayılan yenilenemeyen enerji kaynakları olan fosil kaynaklar (kömür, doğalgaz ve petrol ürünleri) ve çekirdek kaynaklar (nükleer enerji- uranyum) olarak iki farklı şekilde gruplandırmak mümkündür (Şenel, 2012). Günümüzde halen çok tercih edilen enerji kaynakları olan kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil kaynakların gün geçtikçe hızlı azalması ve özellikle de bu kaynaklardan ortaya çıkan çevresel problemler, hem bu kaynakların rasyonel ve ekonomik şekilde kullanımını, hem de enerji verimliliği kavramını ortaya çıkarmaktadır [4]. Çevresel dezavantajlar dikkate alındığında alternatif enerji kaynakların arayışı, bu konudaki çalışmaların, güvenilir ve çevre dostu, neredeyse sınırsız bir enerjiye sahip yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi üzerinde toplanmasını sağlamıştır.

Güneşin ışınım enerjisi, dünyamızın atmosfer ve yeryüzü sistemlerindeki fiziksel oluşumlara etki eden bir enerji kaynağıdır. Dünyamızda yer alan madde ile enerji akışları ancak güneş enerjisi sayesinde mümkün olabilmektedir. Dalga, rüzgâr, biokütle ve okyanus enerjileri, güneş enerjisinin değişim geçirmiş formudur. Güneş enerjisi, aynı zaman da doğamızdaki su döngüsünün sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesinde de etkin rol oynadığından akarsu gücünü de meydana getirmektedir. Aslında fosil kaynaklı enerjilerin de biokütle niteliğindeki yer altı materyallerinde birikmiş güneş enerjisi olduğu bilinmektedir (Varınca, 2006).

Özellikle son yıllarda, güneş enerjisinin elektrik enerjisine direkt olarak dönüştürülmesinde kullanılan fotovoltaik panel üretim teknolojilerindeki gelişmeler, üretim yapan firma sayılarında artışa ve firmalar arasındaki rekabetin de fotovoltaik panel fiyatlarında düşüşe neden olmaktadır. Bunun sonucunda da güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, yalnızca enerji iletim ve dağıtımının zor veya imkânsız olduğu yerlerde değil de enterkonnekte enerji sistemine dâhil edilerek, ülkelerin toplam enerji üretimi ortalamasında çok ciddi bir yer almasını sağlamıştır.

Fotovoltaik panel sistem tasarımlarında dikkate alınana veri girdileri temel olarak iki grupta incelenebilir. Birinci grupta kullanılacak PV sistem bileşenlerinin teknik karakteristikleri yer alır. Uluslararası standartlar dikkate alınarak yapılan sistem bileşenlerinin seçimi sonucunda bu ürünlerin

genel kabul edilen uluslararası testlerini başarılı bir şekilde tamamladığını göstermektedir. İkinci grupta yer alan veriler ise PV sistemin kurulacağı alandaki iklim verileri, kurulum yapılacak alanın fiziki şartları ve gerekli yük miktarı gibi parametrelerdir. PV sistem tasarımının verim ve güvenilirliği, temelde ikinci grupta tanımlanan verilerin doğruluğu ile belirlenmektedir (Çubukçu, 2011).

Fotovoltaik güç sistemini etkileyen temel iklimsel koşullar şunlardır:

- Güneş ışınımı
- Sıcaklık değişimleri
- Nem
- Rüzgâr
- Toz vb. kirliler
- Yağmur, kar ve dolu

2. Kirliliğin Fotovoltaik Panel Verimine Etkileri

Fotovoltaik (PV) paneller, üretildikleri yarı iletken malzemenin özelliğine bağlı olmak şartıyla güneş enerjisini %6-%35 verim ile elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Düşük verimliliğe sahip PV panellerin üretim verimine etki eden birçok dış etken de bulunmaktadır. Bunlar; panel eğim açısı, sıcaklık, gölgelenme, PV sıcaklığı, güneş ışınım şiddeti, rüzgâr hızı, toz, kir, kar yükü, nem ve diğer kayıplardır (Irwanto ve ark., 2014; Bhol ve ark., 2015).

Güneş panellerinin elektrik enerjisi üretim verimini etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biri panel yüzeyinin toz, çamur, kuş dışkısı, yaprak vb kirlenmesidir. Özellikle güneş panel sisteminin kurulacağı bölgenin coğrafi konumu, panel yüzeylerindeki kirlenme sonucu enerji verimliliğinde yüksek oranda olumsuz etki yaratmaktadır. Yapılan birçok çalışma sonucunda; PV panel yüzeylerinin özellikle de tozdan kirlenmesinden kaynaklı verimlerinin %4 ile %32 oranında olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Bu alanda ilk çalışma 1942 yılında güneş ışınları ile su ısıtma sağlayan sisteme sahip bir düzenek üzerinde gerçekleştirilmiş ve tozun (PV panelin yüzeyindeki kirliliğin) verimi %4,7 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Yarıiletken teknoloji alanında gerçekleşen ilerlemeler ve PV panellerin kullanım yelpazesinin artmasıyla bu alandaki çalışmalarda artmıştır (Wakim, 1981; Mekhilef ve ark., 2016; Kaldellis ve Kokala, 2010; Dorobantu ve ark., 2011).

Toz; biyolojik, kimyasal, elektrostatik ve fiziksel özelliklere sahip bir oluşum olarak karakterize edilmektedir. Her coğrafik bölgede ayrı bir özelliklere ve

yoğunluklara sahip olan toz, dünya üzerinde yaygın bir dağılıma sahip olup, PV panel modüllerin yüzeyine yerleşerek güneş ışınlarının panel yüzeyine geçişini engellemekte, panelin sıcaklığını artırmakta ve panel modül camının aşınması gibi olumsuz etkilerle PV enerji sisteminin verimini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ju ve Fu, 2011).

Güneş panelleri üzerindeki kir birikiminin karakterizasyonu, tozun özelliği ve yerel çevreyi etkileyen birbirine bağlı iki parametre vardır. Tozun özelliği boyut, bileşenler, şekil ve ağırlıktan oluşur. Ayrıca yüzey, kirlenme sürecine katkıda bulunan çok önemli bir faktördür. Yüzey pürüzsüz değil de pürüzlü, sert, yapışkan vb. ise daha fazla toprağın birikmesine neden olur. Panelin güneş ışığı yönüne ve rüzgâra bağlı konumu da kirlenme işleminde önemlidir. Yüzey ne kadar yatay olursa o kadar fazla toz birikebilir. Ayrıca, yavaş esen rüzgâr da toz birikmesine neden olabilirken kuvvetli rüzgâr panel yüzeyini temizleyebilir. Ancak rüzgârdan kaynaklanan hava akışı, güneş panelinin belirli yerlerinde toz birikmesini veya dağılmasını etkileyebilir (Maghami ve ark. 2016).

Günlük düzenli olarak temizlenen PV panellerinin üretim gücünün, kirli PV güneş panellerin gücüne kıyasla ciddi ölçüde yüksek olacağından PV panellerinin günlük düzenli olarak temizlenmesi PV güneş enerjisi santrallerinin verimini ciddi oranda etkilemektedir. Ancak PV panellerinin günlük düzenli olarak temizlenmesi, işçilik, saf su ya da temizlik sıvısı vb ek maliyetleri de beraberinde getireceği dikkate alındığında panellerin haftalık olarak temizlenmesinin gider maliyetleri açısından daha uygulanabilir olacağı kesindir. Ayrıca aylık yapılacak bir panel temizliği her ne kadar yeterli olmazsa da hiç temizlenmeyen PV panellere nazaran verimde artış olacağı aşıkardır. Toz ve kirlenme kaynaklı verim kayıplarının minimuma indirgenmesi amacıyla uygulanacak en uygun temizlik periyodu PV sistemin kurulacağı farklı coğrafik bölgeler için ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Farklı özelliklerdeki coğrafik bölgeler, tozlanma yoğunluğu, panel güneşlenme süresi ve temizlik periyodunda etkili olacaktır. Ayrıca mevsimlerdeki farklılıklar da verimi etkilemektedir. Bu kayıpları en aza indirmek için günümüzde yoğun olarak üzerinde çalışma yapılan konuların başında temizleme biçimi, yöntemi gelmektedir. Küçük ölçekli gerçekleştirilen PV sistem kurulumları için insan eliyle manuel gerçekleştirilen temizleme işlemi basit görünse de özellikle büyük ölçekli PV güneş santrallerinde manuel temizleme uygulaması hem zaman hem de uygulama zorluğu açısından uygun gözükmemektedir. Geliştirilen bazı otomatik temizleme robotik uygulamaları mevcut olsa da daha kullanışlı ve ekonomik bir temizleme sistemi arayışı üzerinde yapılan çalışmalar halen devam etmektedir (Gürbüz, 2018).

Fotovoltaik panelde meydana gelen tozun, güneş radyasyon değerinin hücrelere erişimini yarı yarıya azalttığını bununla birlikte panel yüzeyinin güneşi alma açısında kırılmalara neden olduğunu ileri sürmüş bu sebeple panelin elektrik üretim değerlerinde yüzde elliden fazla düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir. Açık veya güneşli bir günde bu kaybın yüzde yirmiye yakın olduğunu yıllık kayıpların hesaplanmasında açık ve kapalı günlerin ortalaması alındığında bu kaybın artacağını ileri sürmüştür. Fotovoltaik panellerdeki kirli yüzeylerin yüzdelik üretime yansımalarını hesaplamışlar ve nitel gözlem ile değerlendirmişlerdir (Casanova ve ark., 2011).

Fotovoltaik panellerin yüzeyinde meydana gelen toz, kum, yosun benzeri maddeler nedeniyle fotovoltaik panellerin üretim gücünü %85 oranında düşüreceğini kanıtlamışlar ve panellerin yüzeylerinin belirli aralıklarla temizlenmesinin üretim değerlerine katkı sağlayacağını belirtmişlerdir (Sulaiman ve ark., 2014).

3. Fotovoltaik Panel Temizleme Yöntemleri

Genel olarak bakıldığında fotovoltaik yüzey temizleme yöntemleri araştırmacılar arasında pek ilgi odağı olmamıştır. Bu dikkat eksikliği, bölgedeki yağış miktarının PV yüzeyini temizlemeye yeterli olduğu düşüncesinden kaynaklanabilir. Tam tersine, kirlenme, yoğun yağış alan bölgelerde bile enerji verimi üzerinde ciddi bir etkiye sahip olabilir.

Yağışlar ücretsizdir ancak mevsimsel olarak değişkendir. Bu nedenle, özellikle kirlenmenin yoğun olduğu ve yağış miktarının veya yoğunluğunun toprağı yıkamak için yeterli olmadığı durumlarda bu temizleme yönteminin güvenilirliği sorgulanabilir.

Hafif bir yağıştan sonra çeşitli durumlarda performansta keskin düşüşler fark edilmiştir. Rüzgâr ayrıca kirlenmenin belirli bir dereceye kadar azaltılmasına veya ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilir, ancak optimum enerji üretimi için yüzeyi temizleyecek suya ihtiyaç vardır (Kimber ve ark., 2006).

Literatürün ve çevrimiçi kaynakların incelenmesinden, PV modülü temizleme yöntemleri aşağıdaki gibi kategorize edilebilir:

Manuel Temizleme: Bu yöntem, binaların pencerelerini temizlemek için kullanılan prosedürün aynısını izler. Toprağı yüzeyden temizlemek için özel kılımlara sahip fırçalar, modüllerin çizilmesini önleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bazı fırçalar aynı zamanda yıkama ve fırçalamayı aynı anda gerçekleştirmek için doğrudan su kaynağına da bağlanır. Erişilemeyecek bir yerde bir merdivene ve uzun saplı bir fırçaya ihtiyaç duyulabilir.

Mobil Temizleyiciler: Bu yöntem, görevi yerine getirmek için makinelerden yararlanır ve su temini için bir depo veya Yağmurlama sistemi, PV yüzeyini temizlemenin en iyi yollarından biridir. Tozun etkisini azaltmak için önerilen temizleme döngüsünü, kurak mevsimlerde haftalık temizliği ve yoğun toz birikimi için önerilen günlük yıkama olarak uygulamak daha verimli sonuçlar verecektir (Maghami ve ark., 2016; Altıntaş, 2021).

Kirli PV'lerin yüzeyini temizlemek için çeşitli yenilikçi yöntemler kullanılmış olsa da farklı iklim koşullarında temizleme mekanizmasının gösterilmesi için bütünsel bir yaklaşımın kullanılması gerekmektedir. Bu incelemede üç zaman dilimindeki çeşitli referanslardan elde edilen bulguları vurguluyor ve benzerliklerine odaklanıyor. Uygun hafifletme yönteminin ölçeğini büyütmek için havada asılı parçacıklara dayalı olarak dört farklı küresel bölge araştırıldı. Sonuç olarak, dünyanın farklı bölgelerindeki toz dağılım şekli değerlendirilerek Orta Doğu ve Kuzey Afrika'nın dünyadaki en kötü toz birikim bölgelerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Ghazi ve ark., 2014).

Bir diğer çalışmada, Irak'taki güneş enerjisi santral uygulamalarında birçok sorunla karşı karşıya olduğunu ve bu sorunlardan en önemlisinin, güneş panellerinin yüzeyinde tozun birikmesi olduğu ve bu sebeple panel performansının keskin bir şekilde düştüğünün ileri sürülmüştür. Araştırmacılar çalışmalarında, güneş paneli yüzeyinde biriken tozu azaltmak için iki eksenli güneş takip sistemi kullanarak yeni bir teknik sunmuşlar ve 30° ve 45° eğim açalarına monte edilen sabit güneş panelleri ile karşılaştırmışlardır. Araştırma sonucunda, sabit güneş panellerinde toz birikmesi nedeniyle çıkış gücünün maksimum kayıplarının 34 günlük birikim dönemi için sırasıyla yaklaşık %31,4 ve %23,1 olduğunu (18-2-2010- 25-3-2010 arasında), iki eksenli izleme sistemine sahip güneş paneli için maksimum çıkış gücü kaybı, aynı birikim süresi için yaklaşık %8,5 olarak tespit etmişlerdir (Abbas ve ark., 2010).

Toz birikiminin PV modülü performansı üzerindeki etkilerinin ve bunların azaltılmasına yönelik tedbirlerin gözden geçirilmesini amaçlayan bir diğer çalışmada; araştırmacılara göre, Nijerya'da yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmanın önündeki engel toz nedeniyle PV' den kaynaklanan enerji kayıpları göz ardı edilemeyecek bir konudur. Araştırmacılar çalışmalarında, belirli bir performans seviyesini korumak için kullanılabilecek bir dizi etki azaltma tekniği sunmaktadır. Nijerya'daki tüm jeopolitik bölgelerde tozun etkileri üzerine, her bir alandaki kirlerin etkilerini azaltmada veya önlemede en uygun teknikleri göz önünde bulundurularak PV modül sisteminin tasarlanması gerektiğini ileri sürmüşlerdir (Chanchangi ve ark., 2020).

Güneş panelleri üzerindeki toz partiküllerinin temizleme verimliliğini değerlendirmek için yeni bir metodoloji geliştirmek amacıyla yürütülen başka bir çalış yürütülmüştür. Araştırmacılar çalışmalarında, Katar Doha'dan topladıkları toz partiküllerinin çapını ölçerek ortalama çaplarını $2.3 \mu\text{m}$ olarak belirlemişlerdir. Bir fırça-disk konfigürasyonu, tozlu bir cam alt tabakadan kayan polimerik bir uç olarak süpürme kuvvetini ölçmek için yapılmıştır. Süpürme kuvveti, çeşitli nem ortamında işlenmiş numuneler üzerinde uygulanan çeşitli yükler altında ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, kuru toz partiküllerinin temizleme etkinliğinin uygulanan yükten bağımsız olduğunu ve %90'ın üzerine çıktığını göstermiştir. Araştırmacılar su moleküllerinin adsorpsiyonu, temizleme etkinliği üzerinde belirgin etkiler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Nemli ortamda verimliliği artırmak için, uygulanan yükün artırılmasını sağlamışlardır. Araştırmacılar çalışmalarının sonucunda, uygulanan yük ne kadar yüksek olursa, süpürme kuvvetinin o kadar yüksek olacağını, temizleme verimliliğinin de buna bağlı olarak artacağını belirlemişlerdir (Chen ve ark., 2018).

Diğer bir çalışmada araştırmacılar, kurak bölgelerde güneş enerjisinin verimli üretiminin karşılaştığı temel zorluklardan biri olarak gördükleri demirli camda ışık geçirgenliği üzerindeki toz etkisi farklı sürelerde izleyerek değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar saha çalışmasında naylon fırçalar ile temizledikleri PV panellerin verimliliğini, fırçalanmayan paneller ile karşılaştırmışlar ve naylon fırçalarla temizliği yapılan panellerin cam yüzeyin optik özellikleri üzerinde önemli ve kalıcı bir etkisi olmadığını ancak temizlenmeyen panellere nazaran geçirgenliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Panellerin temizleme verimliliği, su ve hassas sileceklerle temizlenme kadar yüksek olmadığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, kirli panel cam yüzeylerinin fırçalamadan sonra bazı değişiklikler gösterdiğini, ancak bunun 20 yıllık temizliğe denk bir simülasyondan sonra camın optik özellikleri üzerinde kalıcı bir etkisi olmadığını belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda ise robotik sistemlerin geliştirilerek panel temizliğinin yapılabileceği ve daha etkili olabileceği görüşünü savunmuşlardır (Al Shehri ve ark., 2016).

PV panel temizliğine yönelik yürütülen bir çalışmada araştırmacılar, GPTR adını verdikleri çift motorlu ve paletli bir güneş paneli temizleme robotu tasarlayarak yatay düzlemde hareket ederken temizleme fırçası ise dikey ekseninde panel boyunu algılayarak temizleyebilen bir sistem geliştirmişlerdir (Akyazı ve ark., 2019).

PV panel tozlanma miktarının tespiti ve temizlenmesine yönelik yürütülen diğer bir çalışmada, elektrostatik etki altında hidrofobik bir yüzeyden püskürten çevresel toz partikülleri dikkate alınmışlar ve toz partiküllerinin

dinamiklerine yüksek hızlı kamera içeren bir analiz yapmışlardır. Araştırmacılar, püskürtülen toz partiküllerinin hızı, elektrostatik itme, partikül yapışması, partikül sürüklenmesi ve havadaki partiküllerin yük etkisi altındaki etkileşimleri ile ilişkili kuvvetler dahil olmak üzere kuvvet dengesi kullanılarak formüle etmişlerdir. Araştırmacılar daha sonra işlevselleştirdikleri silika partiküllerini, yüzeyde hidrofobik bir ıslanma durumuna ulaşmak için cam yüzeyinde biriktirmişlerdir. Hidrofobik plakanın yüzeyinde bulunan toz partikülleri üzerinde titreşim formunda elektrostatik etki üretilirken bir elektronik devre tasarlayıp, üretmişler ve uygulamasını sağlamışlardır. Çalışmalarında tespit ettikleri bulgular ile, yüzeyde biriken işlevselleştirilmiş silika partiküllerinin temas açısı $158^\circ \pm 2^\circ$ ve temas açısı histerezisi $2^\circ \pm 1^\circ$ olan hidrofobik ıslanma durumuna yol açtığını ortaya koymuşlardır. Plaka yüzeyinde üretilen elektrostatik itici kuvvet, toz partiküllerinin boyutlarının çoğunu itmeyi sağladığını; bununla birlikte, bazı küçük toz partikülleri elektrostatik etkiden sonra yüzeyde kalıntı olarak kalacağını tespit etmişlerdir (Yilbas ve ark., 2019).

Diğer bir çalışmada da Güneş paneli kirlenmesinden kaynaklanan enerji verimi kaybı, yüzlerce gigawatt ölçeğinde olduğundan ve hızla büyümeye devam ettiğinden giderek daha önemli hale geldiğini belirtmişlerdir. Güneş panellerinden gelen yüksek gerilimlerle toz parçacıklarının elektrostatik çekim ve yapışma gücünün (Fes), van der Waals ve su kılcal kuvvetlerinden 1 ila 2 büyüklükte daha büyük olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar, açık hava testi yaparak sistem voltajında kirlilik oranının neden olmasının yanı sıra, yapışma gücünün (Fes) kirlilik üzerindeki başka bir özelliği olarak yüksek voltaj üreten panellerin bakıma alındığı kapatma sürecindeki gözlemlerde, uzun süreli veya yavaş bozulmaya yol açtığını belirlemişlerdir. Fes bozulma süresi, iki faktöre bağlı olarak 1 ila 10 saatlik geniş bir zaman aralığında değişime uğradığını belirtmişlerdir. Bunlar; Voltajlar kapatılmadan önce hücrenin, parçacığın veya her ikisinin yüksek voltajla şarj edilip edilmediği ve voltaj kapatıldıktan sonra hücrenin toprağa nasıl bağlandığı (güç kaynağı elektroniği yoluyla bağlanmış, doğrudan toprağa bağlanmış veya elektriksel olarak yüzdürülen şekilde bağlanma) faktörleridir. Araştırmacılara göre Fes bozulması;

- Partikül ve hücre içindeki net elektrik yükü dağılımını etkiler,
- Güneş paneli camı dielektrik sabitlerinde, dipol polarizasyonunun termal bozulmasına neden olur,
- Parçacık ve panel camının elektrostatik etkileşimi ile yükün yeniden dağıtılması mümkün olur.

Araştırmacılar çalışmaları sonunda, uzun ömürlü Fes, güneş panelinin güneş battıktan sonra kirlenmesini etkileyebileceğini ve geceleri su yoğunlaşması ile birleştirildiğinde daha da büyük bir etkiye sahip olabileceğini ileri sürmüşlerdir (Jiang ve ark., 2020; Altıntaş, 2021).

Elektrostatik temizleme yöntemi PV 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 PV panelin elektrostatik temizleme yöntemi ile verimli bir şekilde temizlenebileceğini ortaya koymuştur (Gümüş ve Çubukçu, 2023)

4. Sonuç ve Öneriler

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verine göre; Şubat 2024 sonu itibarıyla ülkemizin kurulu gücü 107.582 MW a ulaşmıştır. Kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; %29,7'si hidrolik enerji, %23,3'ü doğal gaz, %20,3'ü kömür, %11,1'i rüzgâr, **%11,5'i güneş**, %1,6'sı jeotermal ve %2,5'i ise diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca Ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2024 yılı şubat ayı sonu itibarıyla 17.866'ya (Lisanssız santraller dâhil) yükselmiştir. Mevcut santrallerin 760 adedi hidroelektrik, 69 adedi kömür, 364 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 357 adedi doğal gaz, **15.780 adedi güneş**, 473 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir. Veriler güneş santrallerine olan yatırım ve yönelimin ne kadar yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ülkemizde en yüksek miktarda sayıya sahip olan PV santrallerinin verimini artırma için en önemli parametrelerden biri olan toz ve kir parametresinin etkilerinin en aza indirilmesi çok büyük önem arz etmektedir. PV panel temizlik maliyeti ve günümüz dünyasında hayat kaynağımız olan suyun tasarrufu açısından elektrostatik temizleme önerilmektedir. Bu nedenle büyük güçteki santrallerde su ve zaman kaybına ayrıca suyun bulunmadığı uzay ortamı vb. yerlerde elektrostatik temizleme yapılması önerilmektedir. Elektrostatik temizleme gelecekte önem kazanacak olup maliyet, zaman ve verim açısından ön planda olacaktır.

5. Kaynaklar

- Abbas, K.K., Al-Wattar, A.J. ve Kasım, N.K. (2010). New technique for treatment of the dust accumulation from pv solar panels surface. *Iraqi Journal of Physics*, 8 (12): 54-59.
- Altıntaş, M. (2021). Elektrostatik Yöntemle Güneş Panelinin Temizlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Al Shehri, A., Parrott, B., Carrasco, P., Al Saiari, H., ve Taie, I. (2016). Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for pv modules applications. *Solar Energy*, 135: 317-324.
- Bhol, R., Pradhan, A., Dash, R., ve Ali, S.M. (2015). Environmental effect assessment on performance of solar PV panel, *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), IEEE Int. Conf.*, 1-5.
- Chanchangi, Y.N., Ghosh, A., Sundaram, S., ve Mallick, T.K. (2020). Dust and PV performance in nigeria a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21: 1-14.
- Chen, E.Y.T., Ma, L., Yue, Y., Guo, B., ve Liang, H. (2018). Measurement of dust sweeping force for cleaning solar panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179: 247-253.
- Çubukçu, M. (2011). Türkiye'nin farklı konumlarında farklı topolojilerde fotovoltaik-rüzgâr-yakıt pili hibrid güç sistemlerinin modellenmesi karşılaştırmalı simülasyonu ve uygulamalı performans analizi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.
- Dorobantu, M.O., Popescu, Cl., ve Craciunescu, A. (2011). The effect of surface impurities on photovoltaic panels, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'11) Las Palmas de Gran Canaria, Spain.
- Ghazi, S., Sayigh, A., ve Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces—a review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33: 742-751.
- Gümüş H., ve Çubukçu M. (2023) Fotovoltaik Modüllerde Elektrostatik Temizleme Yöntemiyle Tozlanma Kayıplarının Azaltılması Üzerine Deneysel Bir Çalışmanın Değerlendirilmesi, *DEÜ FMD*, 25(73), 205-216.
- Gürbüz, D. (2018). Kir ve Tozlanmanın Fotovoltaik Sistem Verimi Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Irwanto, M., Irwan, Y.M., Safwati, I., Leow, W.Z., ve Gomesh, N. (2014). Analysis simulation of the photovoltaic output performance, Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO), IEEE 8th International Conf., 477-481.
- İçel, Y. (2012). Farklı çaplarda kanat modelleri ile güneş bacası enerji sisteminin elektrik üretim verimliliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

- Ju, F., ve Fu, X. (2011). Research on Impact of Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance, 2011 International Conference on Electrical Control Engineering, s. 3601–3606.
- Kaldellis, J.K., ve Kokala, A. (2010). Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal, *Energy*, 35, 4862–4869.
- Maghami, M.R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M.A., Rezadad, M.I., ve Hajjhorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59: 1307-1316.
- Mekhilef, S., Zaihidee, F.M., Seyedmahmoudian, M., ve Horan, B. (2016). Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1267–1278.
- Şenel, M.C. (2012). Rüzgâr türbinlerinde güç iletim mekanizmalarının tasarım esasları-dinamik davranış. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Varınca, K.B., ve Varank, G. (2005). Güneş kaynaklı farklı enerji üretim sistemlerinde çevresel etkilerin kıyaslanması ve çözüm önerileri, *Güneş Enerji Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, İçel.
- Varınca, K.B., ve Gönüllü, M.T. (2006). Türkiye'de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma, *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Haziran 21-23, 270-275.
- Wakim, F. (1981). Introduction of PV power generation to Kuwait, *Kuwait Institute for Scientific Researchers*, Kuwait City.

