

Otonom fotovoltaik panel yüzey temizleme robotu geliştirilmesi ve temizleme aralığının enerji verimliliği üzerine analizi

Development of autonomous photovoltaic panel surface cleaning robot and analyzing of cleaning interval on energy efficiency

Bilal KARAMAN^{1*} , Sezai TASKIN¹ 

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa, Türkiye.
bilal.karaman@cbu.edu.tr, sezai.taskin@cbu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 24.02.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 03.08.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 28.07.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.45014
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Ülkemizin yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olan en yüksek düzeyde yararlanma hedefi sonucu Güneş Enerji Santrali yatırımları her geçen gün artmaktadır. Fotovoltaik (Photovoltaic-PV) sistemlerde panel verimini etkileyen unsurlardan biri de panelin yüzey kirliliğidir. PV panellerin çevresel etkenlerle yüzey kirliliğinin artması kaçınılmazdır. Panellerin bulunduğu arazi yapıları, dizilim şekilleri, kirleticilerin yapısal/kimyasal özellikleri gibi pek çok parametre PV panel yüzeylerinin temizlenme ihtiyacını ve periyotlarını etkilemektedir. Bu çalışmada, PV panel dizilerinin yüzeylerindeki kir, toz vb. maddelerin temizlenmesi işlemini otonom olarak gerçekleştiren bir temizleme robotu geliştirilmiştir. Geliştirilen robotun özellikleri arasında; (i) yağmurlu havalarda gerekmesi halinde otonom çalışma moduna geçme, (ii) meteorolojik verilere göre temizleme kararı sayesinde saf su tasarrufu, (iii) toz sensörü verisine göre temizlik için karar verme, (iv) geliştirilen mobil uygulama üzerinden durum izleme ve kontrol gibi özellikler yer almaktadır. Geliştirilen robotun farklı çalışma periyotlarında temizleme işlemini gerçekleştirmesinin PV panel verimliliğine etkisi incelenmiştir. Böylece en verimli temizleme periyodunun hem panel verimi hem de robotun harcadığı saf su açısından analizi de gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güneş enerji santrali, PV panel enerji verimliliği, PV panel yüzey temizleme robotu.

Abstract

Solar Power Plant investments are increasing on a daily basis, as part of a strategy to maximize the use of Turkey's domestic and renewable energy resources. One of the factors affecting the efficiency of a photovoltaic (PV) panel is also surface pollution. It is inevitable to increase the surface pollution of PV panels with environmental factors. Many parameters such as the location of PV panels, fixing patterns, the structural/chemical properties of the pollutants affect the frequency of cleaning periods of the PV panels. In this study, a PV panel surface cleaning robot is developed. It performs autonomously cleaning of substances including dirt, dust on PV panel surfaces. Some features of the developed autonomous robot are; (i) switching to autonomous operating mode if it is needed on rainy days, (ii) pure water-saving thanks to the cleaning decision based on the meteorological data, (iii) determining the cleaning operation based on the dust sensor data, (iv) condition monitoring and control via the developed mobile application. Moreover, the cleaning interval on the PV panel efficiency was investigated. Thus, optimum cleaning intervals were determined in terms of both PV panel energy efficiency and pure water-consuming of the designed robot.

Keywords: Solar power plant, PV panel energy efficiency, PV panel surface cleaning robot.

1 Giriş

Güneş Enerji Santrali (GES) ana bileşenlerinden birisi Fotovoltaik (Photovoltaic-PV) panellerdir. PV paneller, güneş ışınlarını yapısındaki silikon hücreler sayesinde elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken donanımlardır. Yarı iletken malzemenin sahip olduğu özellikler nedeniyle günümüzde ticari olarak kullanılan monokristal PV panellerin verimi %22-27 aralığında iken polikristal PV panellerin verimi ise %15-22 civarındadır [1].

Güneş ışınımı ve hücre sıcaklığı bir PV modülün performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Bu faktörlere ek olarak bağlantı kayıpları, farklı akım-gerilim (I-V) karakteristiğindeki PV panellerin birbiri ile bağlantısı sonucu toplam çıkış gücünün sistemdeki her bir panelin toplam gücünden az olması, Doğru Akım (DA) ve Alternatif Akım (AA) iletim kayıpları, gölgeleme etkisi ve yüzey kirliliğinin neden olduğu kayıplar da PV panelin verimini etkilemektedir [2]. Ayrıca, sıcaklık, nem ve hava durumu gibi iklim koşulları da PV panel performansını etkileyen parametrelerdir [3].

Büyük ölçekli GES'ler genellikle yarı kurak verimsiz arazilere ya da çöl bölgelerine kurulabilmektedir. Ancak bu santrallerdeki PV paneller yüksek ortam sıcaklığı ile birlikte yüzey tozlanması/kirlenmesi sonucu ortaya çıkan verim azaltıcı faktörlere maruz kalabilmektedirler [4]. PV paneller, ortam koşullarının elverişli ve yüzeyinin temiz olması durumunda nominal güçlerini üretebilirler. PV panellerin verimli kullanılabilmesi için panel cam yüzeylerinin mümkün olduğunca temiz tutulması gerekmektedir. PV paneller, dış ortamda sabit olarak belli bir açıda konumlandırılmalarından dolayı cam yüzey üzerinde biriken kir, toz, kuş dışkısı, polen vb. gibi kirleticilerden olumsuz etkilenmektedirler. Bu durum, güneş ışınımının bir kısmının geri yansıtılmasına ve dolayısıyla panel veriminin düşmesine neden olur. Dünyanın çeşitli bölgelerinde yer alan GES'lerde yapılan araştırmalar sonucu PV panel yüzeylerindeki tozlanmadan kaynaklı verim azalmasının günlük en yüksek %1.2 seviyelerine ulaşabildiği ortaya konmuştur [5]-[9]. Ancak, Saidan ve diğ. çöl ortamındaki PV paneller üzerinde biriken toz ve kirlenmenin verim kaybı oranlarını günlük, haftalık ve aylık olarak sırasıyla %6.24, %11.8 ve %18.74 olarak hesaplamışlardır [10]. Paudyal ve diğ.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

tarafından yapılan çalışmada, dış ortama konumlandırılan PV deney düzeneği ile 5 aylık periyotla yapılan testler sonucunda doğal toz birikimine maruz kalan PV modülde, her gün temizlenen PV modüle kıyasla %29.76 oranında verim kaybı meydana geldiği gözlenmiştir [11]. Costa ve diğ. ise literatürde 2012-2015 yılları arasında pek çok ülkede yapılan PV sistemleri ile ilgili toz ve kirlenme sorunlarını ve etkilerini içeren çalışmaları incelemişlerdir [12]. GES'lerin kurulumu için yer seçiminde arazi kullanımı, topografya, ekonomik, sosyal ve çevresel pek çok etmen göz önünde bulundurulmaktadır [13]. GES'lerin bulunduğu coğrafyaya, çevresel koşullara ve kirletici etmenlere bağlı olarak PV sistemlerdeki verimlilik değişkenlik göstermektedir.

Günümüzde PV panellerin temizlenmesi için; fırça kullanılarak klasik yöntem ile temizleme, kompresör kullanılarak yüzeydeki tozun basınçlı hava ile uzaklaştırılması yöntemi ile temizleme, yağışa bağlı doğal temizlenme, nano silika parçacıklarından meydana getirilmiş inorganik-organik karışımı kendini temizleyen kaplama malzemesi kullanımı ve robotik temizleme sistemleri olmak üzere çeşitli yöntemler uygulanmaktadır [14],[15]. PV panellerin temizlenmesinde nispeten yeni sayılabilecek robotik sistemler sulu ve susuz temizleme şeklinde çalıştırılabilmektedir [16]. Fırça ile panel yüzeyine temas ederek PV panel yüzeyinde biriken kirleri kaldıran robot prototiplerinin [17],[18] yanı sıra vakum yöntemiyle PV yüzeyindeki tozları absorbe eden sistemler [19] de mevcuttur. Deb ve diğ. önerdikleri susuz otomatik temizleme sistemi ile çatı tipi GES'te bir ay boyunca gerçekleştirilen düzenli temizleme işlemi sonucunda %9.05'lik bir verim artışı gözlemlenmiştir [15].

Moharram ve diğ. 45 gün boyunca hiç temizleme yapılmayan çöl ortamındaki PV panel dizileri ile basınçsız su kullanılarak temizleme yapılan ve yüzey aktif madde ile temizleme yapılan testler gerçekleştirmişlerdir. Bu testler sonucunda basınçlı olmayan su kullanılarak 45 günlük temizlik sonrasında PV panellerin verimliliğinin %50 oranında azaldığı, temizlik için anyonik ve katyonik yüzey aktif maddeler karışımı kullanıldığında ise verim kaybı yaşanmadığı tespit edilmiştir [20]. Bu sonuçların da gösterdiği gibi PV panellerin temizlenmesi için sadece basınçsız su kullanmak verimli bir yöntem değildir. Bunun yerine basınçlı su kullanmak ya da PV panel yüzeyine fırça temasının sağlanması çok daha etkilidir.

Bu çalışmada, GES'lerdeki PV panel dizilerinin insan müdahalesi olmaksızın temizlenmesi ihtiyacını karşılayan ve otonom olarak çalışan robotik sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, panel yüzeylerine zarar vermeyen mikrofiber fırça yapısı, sulu ve susuz temizleme opsiyonları, otonom çalışabilme, temizleme periyodunun belirlenebilmesi, bir mobil uygulama üzerinden uzaktan yönetilebilme gibi özelliklere sahiptir. Literatürde yer alan çalışmalarda benzer yapıda robotlar olmakla birlikte bu çalışmada sunulan robotun PV panel temizleme sistemlerine katkısı temel olarak;

- (i) Otonom çalışma özelliğine sahip olması,
- (ii) Diğer diziler üzerinde yer alacak robotlar ile haberleşerek çalışma performansları ve durum izlemelerinin yapılabilmesi için gerekli altyapıya sahip olması,
- (iii) Temizleme kararını kirlilik seviye algılayıcısından gelen sinyale ve meteorolojik verilere göre karar vererek çalışma imkanı sunması olarak sıralanabilir.

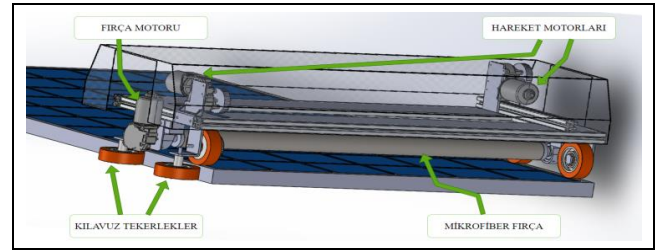
Çalışmanın ikinci bölümünde uygulamada kullanılan materyal ve yöntemler ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, gerçekleştirilen testler ve elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise genel değerlendirme ve sonuçlara yer verilmiştir.

2 Materyal ve yöntem

Çalışmada 270Wp gücündeki PV panellerden oluşan dizi göz önünde bulundurularak temizleme robotunun tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Çatı tipi GES'ler için geliştirilen robot, kolay taşınabilir bir yapıdadır ve PV panel dizileri üzerinde yatay olarak hareket edebilme kabiliyetine sahiptir.

2.1 Güneş paneli temizleme robotu prototipi

Tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilen robot 120x50x20 cm boyutlarında ve 20 kg ağırlığa sahiptir. Robotun PV panel dizisi üzerindeki sağ ve sol yöndeki hareketi 2 adet 120W gücündeki redüktörlü 55RPM hızındaki DA motoru ile tahrik edilen tekerlekler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Robotun tekerlekleri PV panellerin cam yüzeylerine baskı yapmadan kenar profilleri üzerinde hareket etmektedir. Robotun üst kısmında yer alan kılavuz tekerlekler sayesinde PV panellerin zemine belirli bir açı ile konumlandırılmalarından dolayı oluşabilecek kayma ve düşme riskleri ortadan kaldırılmıştır. Şekil 1'de robota ait mekanik tasarım, Şekil 2'de ise robota ait görsel verilmiştir.



Şekil 1. Temizleme robotu mekanik tasarımı.

Figure 1. Mechanical design of the cleaning robot.



(a)



(b)

Şekil 2. Robotun PV panel dizisi üzerindeki görünümü

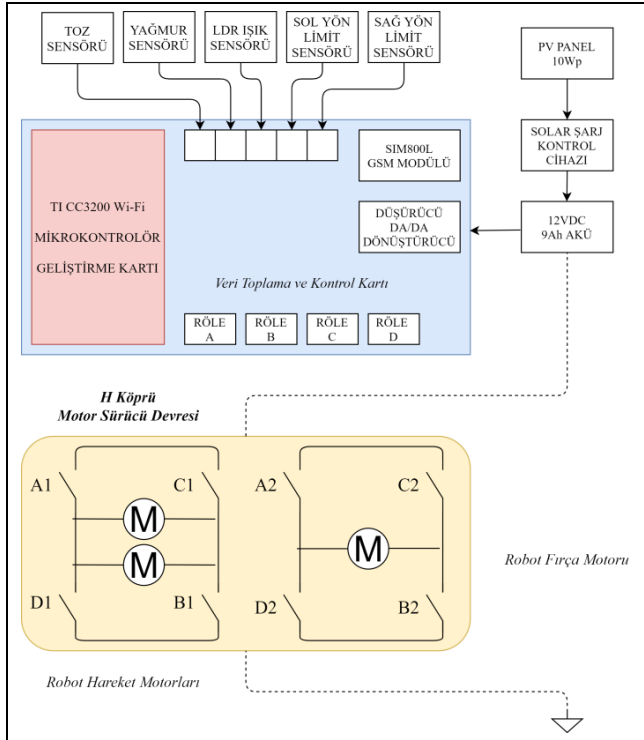
Figure 2. Picture of the robot on the PV panel array.

Robotun fırçası mikrofiber yapıda özel olarak üretilmiştir. Bu sayede PV panel yüzeylerinde herhangi bir çizik oluşturmada temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Fırçanın dönme hareketi ise 1 adet 120W gücünde 55RPM redüktörlü DA motor vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Fırçanın her seferinde robotun gidiş yönüne doğru süpürmesi sağlanarak toz vb. atıkların paneller arasındaki birleşme boşluklarından tahliye edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, robota monte edilen nozzle uçlu yapıdaki boru sayesinde dışarıdan de-iyonize saf su bağlantısı yapılarak sulu temizleme yapılması sağlanmaktadır.

2.2 Dış ortam veri toplama ve kontrol kartı

Tasarlanan dış ortam veri toplama ve kontrol kartı, robotun çalıştığı ortamda panel yüzeyi toz seviyesi, yağmur var/yok bilgisi, gece/gündüz durumu ve sıcaklık gibi verilerin toplanması, bu verilerin analizi için transferi, ve robot için otonom çalıştırma fonksiyonlarını yerine getirmektedir. Bu kart ile panellerin tozlanma seviyelerinin belirlenmesi, tozlanma seviyesi eşik değerini aştığında gece/gündüz fark etmeksizin yağmur yağışı olması durumunda robotun otonom çalışma moduna geçirilmesi ve yağış yok iken sensörden bilgi gelmesi durumunda da güneş ışınımının olmadığı gece saatlerinde robotun temizleme moduna geçirilmesi sağlanmaktadır.

Yağmur yağışı esnasında robotun çalıştırılması ile yağmur suyunun kireç barındırmaması ve böylece PV paneller üzerinde leke bırakmaması gibi avantajlarından yararlanır. Robot üzerine konumlandırılan sağ ve sol yön limit algılayıcıları sayesinde PV panel dizisi üzerindeki hareketin düzenli bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanır. Robot, temizleme işlemini tamamladığında PV panel dizisi başında yer alan bekleme istasyonuna gelerek park moduna geçmektedir. Şekil 3'te, geliştirilen temizleme robotunun elektronik donanım yapısı yer almaktadır.

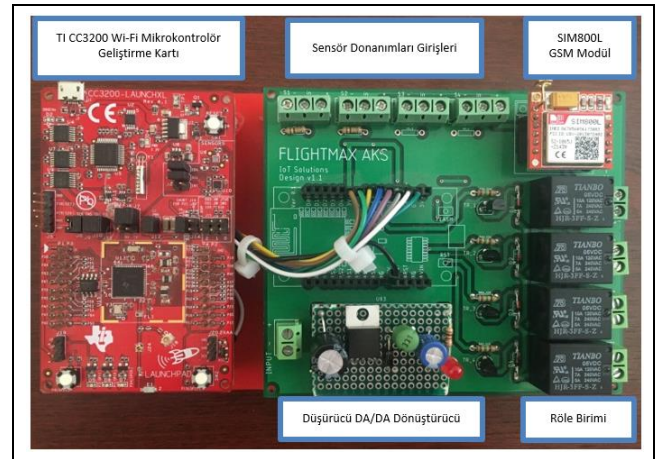


Şekil 3. Temizleme robotu elektronik donanımı.

Figure 3. The hardware of the cleaning robot.

Temizlik robotu, üzerinde yer alan 10 Wp gücündeki PV panel üzerinden bataryasını şarj etmektedir. Böylece, çalışması için dışarıdan ilave bir enerji beslemesine ya da güç hattına ihtiyaç duyulmamaktadır. Geliştirilen veri toplama ve kontrol kartı üzerinde SimpleLink™ Wi-Fi® CC3200 kablosuz mikrokontrolör geliştirme kartı kullanılmıştır. Texas Instruments firması tarafından düşük güç tüketimi gerektiren nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları için geliştirilen bu kart, yüksek performanslı 32-bit ARM Cortex-M4 serisi işlemciye ve Wi-Fi haberleşme yeteneğine sahiptir. 2.4 GHz frekans bandında çalışan bu modül, IEEE 802.11 b/g/n protokollerini desteklemektedir. Güvenli dosya sistemi, donanım kriptomotoru, WPA2 kişisel ve kurumsal güvenlik yapısı ve yazılım IP koruması gibi çeşitli güvenlik önlemlerini desteklemektedir. Dış ortam veri toplama ve kontrol kartı üzerinde yer alan röleler ile robotun kontrol panosu içerisinde bulunan 12 VDC besleme gerilimine sahip çift kontaklı röleler kontrol edilmektedir. Bu röleler ile robot üzerinde yer alan DA motorların her iki yönde de dönebilmesini sağlayan H köprü devresi oluşturulmuştur. Bu sayede robotun hareketini sağlayan DA motorları ile fırçayı döndüren motorun kontrolü sağlanmaktadır.

Kontrol kartı üzerinde yer alan sensör donanımları sayesinde robotun bulunduğu dış ortam koşulları gerçek zamanlı olarak ölçülmektedir. Aynı zamanda, operatörün sistemi bir mobil uygulama üzerinden uzaktan takip etmesi ve yönetmesi de sağlanmaktadır. Robotun mobil uygulama ile haberleşmesi Wi-Fi veya GSM modülleri üzerinden sağlanmaktadır. Robotun bulunduğu ortamda Wi-Fi ağı mevcut ise, robotun ortamdaki Wi-Fi ağına bağlanması sağlanarak Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protokolü üzerinden mobil uygulama ile veri alışverişi başlatılmaktadır. MQTT protokolü, internette yaygın olarak kullanılan makinalar arası (M2M) mesaj tabanlı bir protokoldür. Bu protokol, publish(yayın)-subscriber(abone) yapısında TCP/IP bağlantısı ile iletişim kurulmasını sağlamaktadır. Robotun bulunduğu ortamda Wi-Fi ağı bulunmaması durumunda ise kontrol kartında yer alan GSM modülü üzerinden mobil uygulama ile iletişim sağlanmaktadır. Bu sayede sıcaklık, yüzey tozlanma bilgisi, yağmur bilgisi gibi dış ortam koşulları SMS üzerinden mobil uygulamaya iletelebilmektedir. Aynı şekilde, operatör de mobil uygulama üzerinden SMS ile robotu uzaktan yönetebilmektedir. Şekil 4'te tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilen dış ortam veri toplama ve kontrol kartı yer almaktadır.

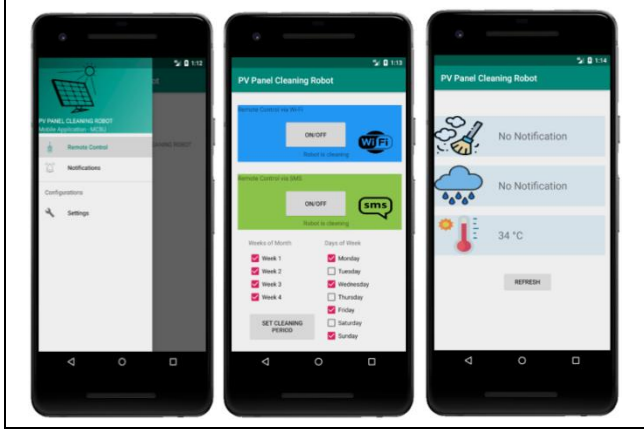


Şekil 4. Veri toplama ve kontrol kartı.

Figure 4. The data acquisition and control card.

2.3 Mobil uygulama

Robota uzaktan erişim sağlanabilmesi ve yönetilebilmesi amacıyla Android Studio ortamında mobil uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen mobil uygulama ile robotun bulunduğu ortam verileri anlık olarak izlenebilmektedir. Ayrıca, mobil uygulama üzerinden robotun çalışma periyodu planlanabilmektedir. Şekil 5'te geliştirilen mobil uygulamaya ait ekran görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5. Mobil uygulama.

Figure 5. Mobile application.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışma kapsamında farklı periyotlarda temizleme işlemi planlanmış ve bu durumun PV panel verimliliğine olan etkisinin belirlenebilmesi için kısa dönem veri izlemesi gerçekleştirilmiştir. Robotun çalışma testleri Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi çatı alanında yer alan 334.8 kWp (286 kWe) gücündeki GES'de gerçekleştirilmiştir. Bu santralde PV paneller 15 derecelik eğimle konumlandırılmıştır. Santralde, her iki panel için bir adet optimizer kullanılarak panel bazında izleme sağlanmıştır. Her bir optimizer bağlı olduğu panellerin günlük üretim değerlerini raporlayabilmektedir. Robot kullanılarak temizleme işleminin verime olan etkisinin analizi amacıyla yan yana olan PV panel dizilerinde testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da sırasıyla; temizlik yapılmayan, günlük ve haftalık temizlenen PV panel dizileri ile dizilerde yer alan optimizerlere ait kodlar yer almaktadır.



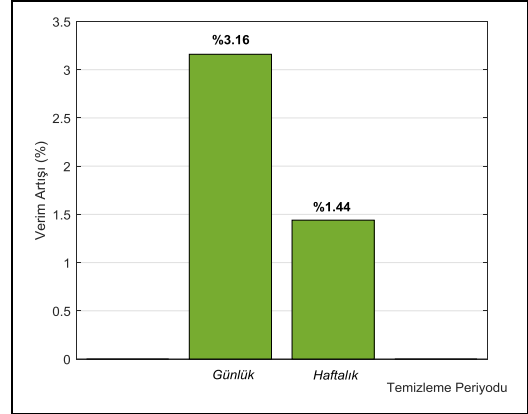
Şekil 6. Robot ile temizleme periyodu belirlenen PV dizileri.

Figure 6. PV arrays with robotic cleaning interval.

Test amacıyla kullanılan dizilerin her biri altı adet PV panelden oluşmakta ve aynı ortam koşullarında bulunmaktadır. Gerçekleştirilen testler, robotun de-iyonize saf su ile mikrofiber yapıdaki fırçasıyla panel yüzeylerini temizlemesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Robot ile yapılan ilk testte, yağış gözlenmeyen uzun bir sürenin ardından, Ağustos 2020'deki 1

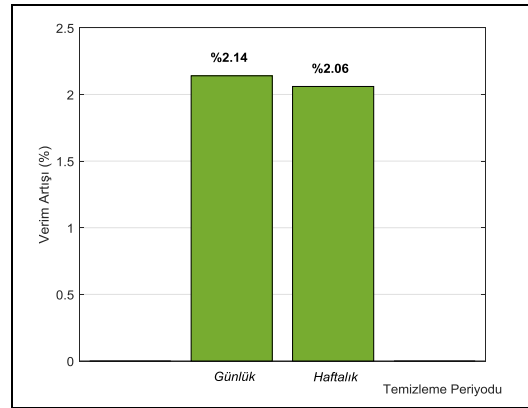
haftalık süreç sonunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde günlük temizlemenin %3.16, haftalık temizlemenin ise %1.44 oranında enerji verimliliğini etkilediği görülmektedir. İlk testten elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir.

Robot ile yapılan bir diğer test ise Ekim 2020'deki 23 günlük süreci kapsamaktadır. Yağmurun arka arkaya yağdığı 3 gün sonunda başlayan bu testler sonucunda ise panellerin yağmur suyu ile nispeten temizlenmesi sonucu günlük ve haftalık yıkama arasında belirgin bir fark olmayıp ortalama %2 oranında PV dizilerinde verimlilik artışı sağlandığı görülmektedir. İkinci testten elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. İlk dönem test sonuçları.

Figure 7. Test results of the first period.



Şekil 8. İkinci dönem test sonuçları.

Figure 8. Test results of the second period.

GES çevresinde herhangi bir kirletici etmen (örneğin demir, talaşlı üretim tozu olan endüstriyel tesis ya da saman tozu vb olan tarım arazisi) yer almaması nedeniyle PV panellerde kirlenme etkisinin çok az olduğu gözlenmiştir. Yine de gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen verim artışının %3.16 seviyelerinde olduğu gözlenmiştir. Özet olarak; güneş enerji santralinin bulunduğu bölgeye ve kirleticilerin türüne, panelin çatı tipi veya arazi tipi olmasına göre ve eğim açlarına bağlı olarak panel verimlilikleri farklılık gösterebilmektedir. GES'lerde temizlemenin verime etkisinin net olarak belirlenebilmesi için santralin bulunduğu sahadan uzun dönem veri alınması, uzun süre yağmurun olmadığı bir dönemde testlerin gerçekleştirilmesi daha tutarlı bir değer ortaya konmasını sağlayacaktır. Böylece robotik temizleme sistemlerinde optimum temizleme sıklığının ne olması gerektiği de belirlenebilecektir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, GES'ler için otonom olarak çalışan ve çalışma zamanını kontrol kartından gelen sinyale göre karar veren bir PV panel yüzey temizleme robotu geliştirilmiştir. Geliştirilen robotun veri toplama ve kontrol kartı; sıcaklık, tozlanma seviyesi ve yağmur gibi dış ortam verilerini toplayabilmekle birlikte mobil uygulama üzerinden durum izleme ve uzaktan yönetilmeye imkan sunmaktadır. Veri toplama ve kontrol kartında yer alan haberleşme modülü sayesinde meteorolojik verilere erişim sağlanarak yağmur yağma olasılığı olması durumunda tozlanma sensöründen yıkama gerekli bilgisi gelse dahi saf su tasarrufu için yağmur yağma önceliğini dikkate alarak yıkama planlaması yapılmaktadır.

PV panel yüzey temizliğinin günlük olarak planlanması durumunda panel verimine etkisi %3.16 olarak ölçülmüştür. Fakat, saf su maliyeti nedeniyle günlük temizleme yapılması uygulamada pratik bir yöntem değildir. Ancak, panellerin bulunduğu bölgedeki kirleticilerin panel yüzey kirliliğine etki durumlarına ve yüzey kirlilik seviyesi sensörünün belirlenen referans değerine bağlı olarak robot otonom çalışma moduna geçirilmektedir. Ölçüm alınan ikinci dönem testlerinde yağmur yağması sonucu panel yüzeylerinin doğal olarak temizlenmesi robot gereksinimi ihtiyacı olmadan gerçekleşmiş olup kirlilik düzeyi az olduğundan verimde bir önceki ölçüme göre daha az bir verimlilik artışı yakalanmıştır. Ölçüm süresinin yıllık periyot olarak analiz edilmesi daha sağlıklı bir verinin elde edilmesini sağlayacaktır.

Robot, konumlandırılacağı GES sisteminin çatı veya arazi tipi olmasına, panellerin dizilim şekillerine ve kullanıcı talep opsiyonlarına göre ilave maliyetler içermektedir. Ayrıca, temizleme işleminde kullanılan saf su satın alma maliyeti veya üretimi için gerekli altyapı yatırımı, temizleme fırçasının ve bataryanın belli periyotlarla değişimi ve gerekmesi durumunda GSM haberleşme için ödenecek aylık faturalar ile işletme ve bakım maliyetleri robot için amortisman süresini etkileyen değişkenlerdir.

Bu çalışmanın devamında, robota temizleme esnasında PV panel yüzeylerini termal kamera ile tarama özelliği kazandırılarak hücrelerdeki olası hatalar tespit edilebilir. Bu sayede optimizasyon bulunmayan PV dizilerinde yer alan ve üretim yapamayan panelin tespit edilerek tüm dizinin enerji üretimini etkilemesinin önüne geçilebilir. Otonom PV panel temizleme robotu, temizleme fonksiyonuna ilave olarak PV panel yüzeylerine uygulanan nano-film tabanlı solüsyonların halihazırda işletilmekte olan GES sahalarındaki panel yüzeylerine uygulanması işlemleri için de kullanılabilir.

5 Conclusions

In this study, a PV panel surface cleaning robot that can work autonomously for Solar Power Plants (SPP) is developed. Also, a data acquisition and control card is designed and tested for the robot. The data acquisition card is capable of environmental data collecting such as temperature, dust level, and rain-sensing. In addition, it enables condition monitoring and remote management of the robot via the mobile application. Thanks to the communication module on the control card, it provides access to meteorological data and takes into account the priority of rain in order to save pure water, even if the necessary information for cleaning is received from the dust sensor in the event of rainfall.

The cleaning performance of the robot for different time intervals is measured for analyzing energy efficiency. If the PV

panel surface cleaning is planned daily, its effect on the panel efficiency is measured as 3.16%. However, daily cleaning is not practical in practice due to the cost of pure water. The time interval of the cleaning depends on the existence of the pollutants. Analyzing the measurement period annually will provide more reliable data.

The robot includes additional costs depending on the structure of the GES system it will be located, the arrangement of the panels, and the user demand options. In addition, the cost of purchasing pure water used in the cleaning process or the infrastructure investment required for its production, the replacement of the cleaning brush and the battery at certain intervals, and the monthly invoices to be paid for GSM communication if necessary, and the operating and maintenance costs are the variables that affect the depreciation period for the robot.

In future work, possible errors in the cells can be detected by adding a thermal camera to scan the PV panel surfaces during the cleaning. In this way, it is possible to detect the non-producing panel in the PV array and prevent the entire array from affecting energy production. In addition, the robot can be used for nano-film covering to PV panel surfaces in SPPs.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Bilal KARAMAN kontrol kartının geliştirilmesi, mobil uygulamanın geliştirilmesi ve literatür taraması başlıklarında; Sezai TASKIN fikrin oluşması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 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.

8 Kaynaklar

- [1] Zaihidee FM, Mekhilef S, Seyedmahmoudian M, Horan B. "Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1267-1278, 2016.
- [2] Maghami MR, Hizam H, Gomes C, Radzi MA, Rezadad MI, Hajjighorbani S. "Power loss due to soiling on solar panel: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307-1316, 2016.
- [3] Mekhilef S, Saidur R, Kamalisarvestani M. "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2920-2925, 2012.
- [4] Sayyah A, Horenstein MN, Mazumder MK. "Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels". *Solar Energy*, 107, 576-604, 2014.
- [5] Rahman MM, Islam MA, Karim AZ, Ronee AH. "Effects of natural dust on the performance of PV panels in Bangladesh". *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 4(10), 26-32, 2012.
- [6] AlBusairi HA, Möller HJ. "Performance evaluation of CdTe PV modules under natural outdoor conditions in Kuwait". *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 06-10 September 2010.

- [7] Kalogirou SA, Agathokleous R, Panayiotou G. "On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance". *Energy*, 51, 439-446, 2013.
- [8] Sanusi Y. "The performance of amorphous silicon PV system under Harmattan dust conditions in a tropical area". *Pacific Journal of Science and Technology*, 13(1), 168-175, 2012.
- [9] Mohamed AO, Hasan A. "Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic solar modules in Sahara environment". *Journal of Basic and applied scientific Research*, 2(11), 11030-11036, 2012.
- [10] Saidan M, Albaali AG, Alasis E, Kaldellis JK. "Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment". *Renewable Energy*, 92, 499-505, 2016.
- [11] Paudyal BR, Shakya SR. "Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu". *Solar Energy*, 135, 103-110, 2016.
- [12] Costa SC, Diniz ASA, Kazmerski LL. "Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 33-61, 2016.
- [13] Uyan M. "Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 343-351, 2017.
- [14] Khadka N, Bista A, Adhikari B, Shrestha A, Bista D, Adhikary B. "Current practices of solar photovoltaic panel cleaning system and future prospects of machine learning implementation". *IEEE Access*, 8, 135948-135962, 2020.
- [15] Deb D, Brahmabhatt NL. "Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3306-3313, 2018.
- [16] Mondal AK, Bansal K. "A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels". *Advanced Robotics*, 29(8), 515-524, 2015.
- [17] Jaradat MA, Tauseef M, Altaf Y, Saab R, Adel H, Yousuf N, Zurigat YH. "A fully portable robot system for cleaning solar panels". *10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*, United Arab Emirates, 08-10 December 2015.
- [18] Aly SP, Gandhidasan P, Barth N, Ahzi S. "Novel dry cleaning machine for photovoltaic and solar panels". *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Marrakech-Ouarzazate, Morocco, 10-13 December 2015.
- [19] Cai S, Bao G, Ma X, Wu W, Bian GB, Rodrigues JJ, de Albuquerque VHC. "Parameters optimization of the dust absorbing structure for photovoltaic panel cleaning robot based on orthogonal experiment method". *Journal of Cleaner Production*, 217, 724-731, 2019.
- [20] Moharram KA, Abd-Elhady MS, Kandil HA, El-Sherif H. "Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels". *Energy Conversion and Management*, 68, 266-272, 2013.