GÜNEŞ PANELİ TEMİZLİĞİ İÇİN SİSTEM TASARIMI: YAĞMUR SUYU HASADI VE POP-UP TİPİ YAĞMURLAMA BAŞLIKLARI KULLANIMI

Mehmet Can BAŞKESEN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ PANELİ TEMİZLİĞİ İÇİN SİSTEM TASARIMI: YAĞMUR SUYU HASADI VE POP-UP TİPİ YAĞMURLAMA BAŞLIKLARI KULLANIMI

Mehmet Can BAŞKESEN
0009-0007-3561-6461

Doç. Dr. Onur TAŞKIN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ PANELİ TEMİZLİĞİ İÇİN SİSTEM TASARIMI: YAĞMUR SUYU HASADI VE POP-UP TİPİ YAĞMURLAMA BAŞLIKLARI KULLANIMI

Mehmet Can BAŞKESEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Onur TAŞKIN

Son yıllarda artan teknoloji sayesinde hemen her sektörde daha fazla enerjiye talep duyulması ve bazı jeopolitik gerilimler nedeniyle enerjinin maliyeti artış göstermiştir. Artan enerji maliyetleri de yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu alternatif kaynaklardan birisi olan güneş enerjisinin elektriksel gücünden yararlanmak için güneş panelleri kullanılmaktadır. Ancak, panellerin yüzeyinde zamanla oluşan toz ve kir güneş ışınlarının hücrelere ulaşmasını engellemekte ve panellerin veriminde düşüşlere neden olmaktadır. Bu da güneş panellerinin yüzeylerinde belirli aralıklarla temizlik ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu tez çalışmasında uygulanan temizleme yöntemi kapsamında yağmur suyu hasadı ve pop-up tipi yağmurlama başlıklarıyla panel yüzeyinin temizlenmesi ile atık suyun döngüsel kullanımı gerçekleştirilmiştir. Edirne ili, Uzunköprü ilçesi, Balabanköy Köyü'nde bulunan ve tarımsal alanların sulanması amacıyla kullanılan güneş enerjisi santralinde 4 farklı süre uygulanarak temizleme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre güneş enerjisi santralinin temizlenen dizisinde toplam enerji 2 633,95 kWh, kontrol grubunda ise 2 574,27 kWh olarak bulunmuştur. Geliştirilen temizleme yönteminin güneş enerjisi santralinin diğer tüm dizilerinde de kullanılabileceği ve artacak santral verimliliği sayesinde daha fazla arazinin sulanabilmesi sağlanabilecektir. Sonuç olarak sürdürülebilir ve düşük maliyetli sistemden oluşan yenilikçi bir temizleme yöntemi sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Verimlilik**,** tasarım, güneş enerjisi, yağmur suyu hasadı, yağmurlama başlıkları.

2024, vii+44 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

SYSTEM DESIGN FOR SOLAR PANEL CLEANING: RAINWATER HARVESTING AND USE OF POP-UP SPRINKLER

Mehmet Can BASKESEN

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystems Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Onur TASKIN

In recent years, the cost of energy has increased due to increased demand for energy in almost every sector thanks to increasing technology and some geopolitical tensions. Increasing energy costs have also led to increased interest in renewable energy sources. Solar panels are used to benefit from the electrical power of solar energy, which is one of these alternative sources. However, dust and dirt that accumulate on the surface of the panels over time prevent sunlight from reaching the cells and cause a decrease in the efficiency of the panels. In this case, the need for cleaning the surfaces of solar panels at regular intervals arises. Within the scope of the cleaning method applied in this thesis, cyclic use of wastewater was carried out by rainwater harvesting and cleaning the panel surface with pop-up type sprinkler heads. Cleaning experiments were carried out for 4 different periods at the solar power plant located in Edirne province, Uzunköprü district, Balabanköy Village and used to irrigate agricultural areas. According to the data obtained, the total energy in the cleaned array of the solar power plant was 2 633.95 kWh and 2 574.27 kWh in the control group. The developed cleaning method can also be used in all arrays of the solar power plant, and the increased plant efficiency will enable more land to be irrigated. As a result, an innovative cleaning method consisting of a sustainable and low-cost system is presented.

Key words: Efficiency, design, solar energy, rainwater harvesting, pop-up sprinkler.

2024, vii+44 pages.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinden bu çalışmanın tamamlanmasına kadar desteğini gördüğüm, gece gündüz demeden yoğun çalışma temposu içinde görev yapan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Onur TAŞKIN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince maddi ve manevi desteklerini hiçbir vakit esirgemeyen ve yanımda olan başta sevgili eşim Meteoroloji Mühendisi Kevser MERKÜR BAŞKESEN'e ve babamız Erat MERKÜR'e, güneş enerjisi santrali ile ilgili enerji ve güç verilerini takip etmemize yardımcı olan Aytuğ PAMİT'e, sistemin kurulumunda yardımcı olan Şaban YILMAZ'a, tesislerinde deneme yapılması imkânı sunan S.S. Balabanköy Sulama Kooperatifi'ne sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, bu yüksek lisans tezine verdikleri maddi destekten dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım (Proje No: FYL-2023-1474).

Mehmet Can BAŞKESEN
…/…/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....i
ABSTRACT.....ii
TEŞEKKÜR.....iii
İÇİNDEKİLER.....iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....vii
1. GİRİŞ.....1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....4
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....13
3.1. Materyal.....13
3.2. Yöntem.....16
3.2.1. Sistemin Tasarımı, Montajı ve Teknik Özellikleri..... 16
3.2.2. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi 21
3.2.3. Güç ve Enerji Verilerinin Elde Edilmesi..... 21
3.2.4. Yağmur Suyu Toplama Hesaplamaları 22
3.2.5. İklimsel Veriler..... 23
3.2.6. Verilerin Değerlendirilmesi..... 23
4. BULGULAR ve TARTIŞMA..... 24
4.1. İklimsel Veriler.....24
4.1.1. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk).....24
4.1.2. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk).....25
4.1.3. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk) ve Gün Batımında Temizleme (10 dk).....26
4.1.4. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk) ve Gün Batımında Temizleme (5 dk).....28
4.2. Güç ve Enerji Verilerinin Değerlendirilmesi.....29
4.2.1. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk).....29
4.2.2. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk).....31
4.2.3. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk) ve Gün Batımında Temizleme (10 dk).....33
4.2.4. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk) ve Gün Batımında Temizleme (5 dk).....34
4.3. Yağmur Suyu Toplama Verilerinin Analizi.....35
5. SONUÇ.....38
KAYNAKLAR.....40
ÖZGEÇMİŞ.....44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
A	Akım
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Cal	Kalori
I	Panele gelen güneş ışınımı şiddeti
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
kWe	Kilowatt enerji
kWp	Kilowatt peak
lt	Litre
m^2	Metre kare
m^3	Metre küp
ml	Mililitre
mm	Milimetre
MW	Megawatt
MgF_2	Magnezyum florür
N	Kuvvet
P_{GP}	Güneş panelinin üretebileceği enerji
Si_3N_4	Silisyum nitrür
SiO_2	Silisyum dioksit
TiO_2	Titanyum dioksit
t	Güneşlenme süresi
V	Volt
W	Watt
ZnO	Çinko oksit
ZrO_2	Zirkonyum dioksit
µm	Mikrometre
°	Derece
°C	Celcius santigrat
%	Yüzde
η	Güneş panelinin toplam verimi

Kısaltmalar	**Açıklama**
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AG	Alçak gerilim
BAE	Birleşik Arap Emirlikleri
DC	Doğru akım

DIN	Alman endüstriyel standardı
GCC	Körfez İşbirliği Konseyi
GPS	Küresel konumlama sistemi
ÇKS	Çiftçi Kayıt Sistemi
ILC 131 ETH	Programlanabilir mantık denetleyicisi
IR	Kızılötesi
MEMS	Mikro elektromekanik sistem
MENA	Orta Doğu Kuzey Afrika
MPPT	Maksimum güç noktası
PE	Polietilen boru
FV	Fotovoltaik
SAW	Yüzey akustik dalga
TL	Türk Lirası
TRAKYAKA	Trakya Kalkınma Ajansı
YSV	Yağmur suyu verimi
YTA	Yağmur toplama alanı
YYM	Yıllık yağış miktarı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Balabanköy Güneş Enerjisi Santrali... 13
Şekil 1.2. Balabanköy Güneş Enerji Santralindeki Bir Dizi 14
Şekil 1.3. Güneş Panelleri..... 15
Şekil 1.4. Evirici..... 16
Şekil 1.5. Sistem Tasarımı..... 17
Şekil 1.6. Su Oluğu..... 17
Şekil 1.7. Su İletim Hattı ……..... 18
Şekil 1.8. Pop-up Yağmurlama Başlığı..... 19
Şekil 1.9. Otomasyon Cihazı…… 20
Şekil 1.10. Depo, Filtre, Motor ……. 20
Şekil 3.1. Ana Ekran ……..……... 21
Şekil 3.2. Güç ve Enerji Verilerinin Elde Edilmesi …… 22
Şekil 4.1. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (09.07.2023 - 15.07.2023).... 24
Şekil 4.2. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (09.07.2023 - 15.07.2023)……. 25
Şekil 4.3. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (16.07.2023 - 22.07.2023). 26
Şekil 4.4. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (16.07.2023 - 22.07.2023)..... 26
Şekil 4.5. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (23.07.2023 - 29.07.2023).. 27
Şekil 4.6. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (23.07.2023 - 29.07.2023) …… 27
Şekil 4.7. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (30.07.2023 - 05.08.2023)... 28
Şekil 4.8. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (30.07.2023 - 05.08.2023) ……..……..... 29
Şekil 4.9. Enerji Kıyaslaması (09.07.2023 - 15.07.2023)..……..……..… 30
Şekil 4.10. Güç Kıyaslaması (09.07.2023 - 15.07.2023) ……... 31
Şekil 4.11. Enerji Kıyaslaması (16.07.2023 - 22.07.2023) …… 32
Şekil 4.12. Güç Kıyaslaması (16.07.2023 - 22.07.2023) ……... 32
Şekil 4.13. Enerji Kıyaslaması (23.07.2023 - 29.07.2023) ……..... 33
Şekil 4.14. Güç Kıyaslaması (23.07.2023 - 29.07.2023) ……..…. 34
Şekil 4.15. Enerji Kıyaslaması (30.07.2023 - 05.08.2023) …… 35
Şekil 4.16. Güç Kıyaslaması (30.07.2023 - 05.08.2023)…..…… 35
Şekil 4.17. Ortalama Yağış Grafiği (2020-2021-2022) …… 36

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, varoluşundan günümüze kadar hayati gereksinimlerini karşılamak için enerjiye ihtiyaç duymuştur. Son yıllarda artan nüfusla birlikte enerjiye olan talep de artarak devam etmiştir. İhtiyaç duyulan enerji kaynakları, kullanılışlarına göre yenilenebilir (tükenemez) ve yenilenemez (tükenebilir) enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır. Petrol, kömür, doğalgaz, uranyum ve toryum yenilenemez enerji kaynakları olarak sınıflandırılırken, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi, dalga ve gel-git enerjisi ise yenilenebilir enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır (İnan ve diğerleri, 2018).

Fosil yakıtların maliyetlerindeki dengesizlik, azalan rezervler, karbon emisyonunun artışı ile atmosferde meydana gelen sera gazı miktarının yükselişi sebebiyle meydana gelen iklimsel değişimlerin olumsuz etkileri ve son olarak ülkelerin birbirleri ile rekabetleri ve meydana gelen savaşlar sebebiyle ortaya çıkan enerji krizlerinin sonucu olarak, fosil yakıtlara alternatif olabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarına talep artmıştır. Enerji ihtiyacının güneş gibi doğal, yenilenebilir ve sınırsız bir enerji kaynağından elde edilmesi çevresel, sosyal ve ekonomik etkileri açısından faydalı bir durumdur. Üstelik enerji tüketimine kıyasla üretimi düşük olan, kendi kendine yetemeyen ve dışa bağımlı olan ülkeler için güneş enerjisi enerji talebini karşıma açısından ve ekonomik açıdan da iyi bir alternatif olmaktadır (Akyazı ve diğerleri, 2019).

Güneşin çekirdeğinde bulunan güneş enerjisi, füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışıma enerjisidir. Tükenmez ve temiz bir yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş, yaklaşık $3{,}9 \times 10^{26}$ W güç yaymaktadır. Güneşten gelen söz konusu enerjinin çok az miktarı Dünya'ya ulaşabilmektedir. Yaşadığımız atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye yaklaşık 1 367 W güç düşmektedir. Atmosfere gelen ışımanın çoğu X ışınlardan ve ultraviyole ışınlardan oluşmakta ve bunun bir kısmını soğururken bir kısmını ise geri yansıtmaktadır. Coğrafi konumu nedeniyle Türkiye, önemli derecede güneş enerjisi potansiyeline sahip olmasının dışında, ortalama yıllık toplam 2 741 saat güneşlenme süresine ve ortalama yıllık toplam 1 527,46 kWh/m^2 ışınım değerine sahiptir (YEKDEM, 2022).

Güneş enerjisi, ışınım olarak güneşten gelmekte olup FV güneş paneli kullanılması ile elektriğe dönüştürülmektedir (Park ve diğerleri, 2019). Yarı iletkenlerden üretilmekte olan güneş panellerinin sahip olduğu en küçük birimi olan hücrelerin bir araya gelmesi ile modüller meydana gelmektedir. Modüllerin bir araya gelmesi ile paneller oluşmakta ve panellerin bir araya gelmesiyle de diziler oluşmaktadır. Modüller hem seri hem de paralel bağlanabilmektedir ve bu da MW büyüklüğünde sistemleri meydana getirmektedir. Güneş paneli çeşitleri; kristal silisyum güneş panelleri, mono kristal silisyum güneş panelleri, yarı kristal silisyum güneş panelleri, ribbon silisyum güneş panelleri, polikristal silisyum güneş panelleri, ince film güneş panelleri ve amorf silisyum güneş paneller olarak sıralanmaktadır (Durgut, 2015).

Güneş panelleri ile büyük önem taşıyan elektrik enerjisine olan ihtiyaç her yerde kolaylıkla karşılanabilmektedir. Güneşlenme potansiyeli olan her alanda kolaylıkla kurulan bu sistemler kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Bu nedenle hem kırsal hem de merkezi bölgelerde olmak üzere her lokasyonda kullanılabilmektedir. Ancak, güneş panelleri hücrelerinin enerji üretim performansını çeşitli parametreler etkilemektedir. Bu etkenler; FV hücre yüzey malzemesinin ışınım özellikleri, güneş ışınımının spektral özellikleri, FV hücrenin kalınlığı, güneş ışınlarının FV hücre üzerine geliş açısı, FV hücrenin iç seri direncinden kaynaklanan kayıplar, ortamdaki havanın sıcaklığı, FV hücrenin eğim açısı ve FV hücrenin temizliği olarak sınıflandırılır (Erişgin ve diğerleri, 2022).

FV panellerin tozlanma, polen, kum, kuş pisliği gibi sebeplerle kirlenmesi sonucunda sistem verimliliğinde düşüşler gerçekleşmektedir. Altı ayı aşan bir süre boyunca temizlik yapılmaması durumunda mevcut güç çıkışında %50'lik bir düşüş meydana gelebileceği belirlenmiştir (Adinoyi ve diğerleri, 2013). Verim kaybına sebep olan toz ve kirliliğe çözüm getirebilecek çeşitli güneş paneli temizleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; yağmur, rüzgâr gibi doğal yollarla temizlenmesi (Ponder, 2020), fırça ile temizlemesi, yarı otomatik veya ful otomatik makinelerle temizlenmesi (Parrot ve diğerleri, 2018) ve elektrostatik endüksiyon ile temizlenmesidir (Panat ve Varanasi, 2022).

Ülkemizde güneş enerjisi santrallerine yönelik verilen teşviklerin de neticesinde kurulu gücümüz 2013 yılında 19 MW seviyesindeyken 2017'de 3 422 MW, 2020 yılında 6 668 MW ve son olarak 2022 yılında 9 426 MW'a ulaşmıştır (IRENA, 2022). Ancak, santrallerin verimlilik düzeyi farklı çevresel koşullardan dolayı değişebilmektedir. Ülkemizde artan ve artarak devam edecek güneş enerjisi yatırımlarının verimli çalışabilmeleri adına panel üzerinde oluşan toz ve kirlilik sorununa karşı yenilikçi çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu yüksek lisans tezi kapsamında yağmur suyu hasadı ve pop-up tipi yağmurlama başlıklarıyla panel yüzeyinin temizlenmesi ile atık suyun döngüsel kullanımı üzerine yenilikçi bir sistem oluşturulmuştur. Edirne ili, Uzunköprü ilçesi, Balabanköy Köyü'nde bulunan ve tarımsal alanların sulanması amacıyla kullanılan güneş enerjisi santralinin (GES) elektrik enerjisi üretim veriminin artırılması amaçlanmıştır. Ayrıca temizleme zorlukları bulunan paneller için çevreci ve sürdürülebilir bir yöntem geliştirilmesi, su ve enerji verimliliği analizleri yaparak sistem performansının ortaya çıkarılması, güneş enerjisi santralleri için kullanılabilir olduğunun gösterilmesi ve saha tecrübesi edinerek yerli üretim için bilgi katkısı sağlanması hedeflenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Abu-Naser (2017) güneş panelleri üzerindeki tozların yeterli temizlenmemesi sebebiyle büyük maddi kayıpların oluştuğunu belirtmiştir. Temizliğin maliyeti ve toz sebebiyle gerçekleşen enerji kaybını karşılaştırarak temizlik yapılması gerekliliğini vurgulamıştır. Optimum temizleme gün sayısı için bir formül oluşturmuştur. Günde 5 saat güneşlenen panellerin, 22 gün boyunca temizlenmesi durumunda, üretilen enerji ile temizlik masrafının karşılanabildiği hesaplanmıştır.

Manju ve diğerleri (2018) enerjinin Hindistan'ın köylerinde ve kentlerinde ana sorun kaynağı olduğunu belirterek yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi üzerinde durmuşlar ve güneş panellerinin önemini vurgulamışlardır. Genellikle tozlu havanın bulunduğu tropikal bir ülke olan Hindistan'da kullanılan güneş panellerinin yüzeyinde biriken tozların, bir ay kadar temizlenmediğinde yaklaşık %50 performans düşüklüğüne neden olduğunu belirtmişler ve yüzeydeki bu tozları temizlemek için robotik bir uygulama tasarlamışlardır. Fırçanın temizlemeye olan etkisini olumlu ancak doğası gereği yapışkan olan tozu temizleyemediğini bulmuşlardır.

Najeeb ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada düşük maliyetli, enerji tasarruflu, akıllı toz temizleme sistemi tasarlamışlardır. Temizleme sistemini, temizleme sisteminde kullanılan cihazları kontrol eden ve başarıyla test edilen Programlanabilir Mantık Denetleyicisi (ILC 131 ETH) kullanılarak tasarlamışlar ve otomasyonunu sağlamışlardır. Özellikle, yapmış oldukları güneş temizleme sistemini Birleşik Arap Emirlikleri (BAE) ve diğer Körfez İşbirliği Konseyi (GCC) ülkelerinde olan tozlu hava koşullarına sahip güneş panellerinin sistem verimliliğini artırmasını planlamışlardır. Yaklaşık 0,76 m² 'lik bir alanı temizlemek için tüketilen suyun yaklaşık 250 ml olduğu bulmuşlardır. Güneş paneli temizleme sistemi için toplam enerji tüketimini döngü başına 0,0197 kWh olarak bulmuşlardır. Aynı yük için temizlenmiş güneş paneli akımını 2,5 A ve temizlenmemiş panel akımını 0,3 A bulmuşlardır.

Parrott ve diğerleri (2018) çalışmalarında otomatik bir robotik temizleme sistemi kullanılması sonucu güneş panellerinin verimliliğini incelemişlerdir. Robotik temizleme sistemini alüminyum bir çekirdeğe monte edilmiş silikon kauçuk köpük kanatçıklar

kullanan yeni bir fırça türü ile tasarlamışlardır. Bu silikon kauçuk köpük fırçayı kullanan robotik sistemin, tozun güneş panellerinin güç çıkışı üzerindeki etkisini etkili bir şekilde en aza indirebildiğini ve haftalık temizlenen kontrollere kıyasla güç çıkışında bir artış sağladığını bulmuşlardır. Kurulan robotik sistem tarafından günlük olarak temizlenen panellerin performansı ile manuel olarak temizlenen panellerin performansını karşılaştırmışlardır. 1 hafta temizlenmeyen panelin performans farkı yaklaşık %1,5'e, 2 hafta temizlenmeyen panelin performans ise %3'ün üzerinde düşüşe neden olduğu belirlemişlerdir. Her 2 haftada bir temizlenen bir güneş enerjisi santralinin ortalama performans kaybının, robotik temizleme teknolojisi kullanılarak günlük olarak temizlenmesinden ortalama olarak yaklaşık %1,5 daha az etkili olacağını bulmuşlardır.

Chen ve diğerleri (2018) Doha'da güneş panellerindeki toz parçacıklarının temizleme etkinliğini değerlendirmişlerdir. Süpürme kuvvetini ölçmek için tozlu bir camın alt tabakası boyunca kayan bir polimerik uç olarak bir fırça-disk konfigürasyonu yapmışlardır. Bu süpürme kuvvetini çeşitli nem ortamında işlenen numunelerin üzerinde farklı yükler altında ölçmüşlerdir. Deneysel sonuçlar, kuru toz parçacıklarının temizleme verimliliğinin uygulanan yükten bağımsız olduğunu ve %90'ın üzerine çıktığını göstermiştir. Bununla birlikte, su moleküllerinin adsorpsiyonun temizleme verimliliği üzerinde belirgin etkiler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle, nemli ortamda verimi artırmak için uygulanan yükün artırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Uygulanan yükün artırılması ile süpürme kuvvetinin ve temizleme verimliliğinin yükseldiğini belirtmişlerdir. Yaklaşık 1 N kuvvet uygulanarak nemli ve kuru ortam için %90'ın üzerinde toz temizlenmesini sağlamışlardır.

Uditha (2019) çalışmasında güneş enerjisi santralinde drone kullanarak tozlanmış panellerin belirlenmesini ve temiz olanlardan ayrılmasını hedeflemiştir. Sonuç olarak, güneş enerjisi santralinin güç üretim çıktısını iyileştirmiş ve güneş enerjisi santralinin personeli tarafından yapılan işgücünü en aza indirmiştir.

Tiwari ve diğerleri (2019) Hindistan'ın Bhilai şehrinde, çatıda 1 kW'lık güneş paneli (kontrollü fırça) temizleme sistemi üzerinde çalışmışlar. Çalışmalarında, toz temizleme

sistemine yapılan yatırımın geri dönüşünü incelemek için temel bir maliyet-fayda analizi sunmuşlardır. Günlük ortalama %4'lük bir verim artışı elde etmişlerdir.

Ghodki ve diğerleri (2019) güneş paneli yüzeyindeki toz etkisini azaltmak için otomatik toz giderme sistemi (IR ve sprinkler tabanlı gömülü denetleyiciyle çalıştırılan bir robotik kol) tasarlamışlardır. Sistem bir motor tarafından çalıştırılmış ve robotik kolun silme hareketleriyle temizlik yaptırılmıştır. Sonuç olarak, yaz sezonunda 73 günlük temizlikten sonra FV modül verimliliğinde %13,63, sistemin enerji artışında %11,26 ve sistemin performans oranında %85,20 gibi ilham verici bir ortalama değer üretmişlerdir.

Chailoet ve Pengwang (2019) güneş panellerini temizlemek için modüler bir robot tasarlamış ve fizibilite çalışması gerçekleştirmişlerdir. Amaçları farklı uzunluklardaki güneş panelleri için evrensel bir modül sunmaktır. Güneş panelini su, spiral fırça ve lastik süpürge ile temizlenmesi üzerine olarak tasarlamışlardır. Modüler tasarım ile 1 metre ile 4 metre uzunluğundaki güneş panellerini için test edilip doğrulamışlardır. Robot ile temizlik yaptıktan sonra %3,4'lük bir verim artışı sağlamışlardır.

Lebbi ve diğerleri (2021) kurak ve yarı kurak iklimin olduğu bölgelerde, güneş panellerini hem aktif soğutma hem de kendi kendini temizleme tekniğini aynı anda birleştirerek yeni bir hibrit sistem sunmuş ve güneş panelinin elektrik performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu yeni hibrit sistem, FV modülü arka tarafından cebri hava sirkülasyonu ile aktif olarak soğuturken, ön tarafı ise akan su aracılığı ile temizlemiştir. Çalışma sıcaklığının ve küresel güneş radyasyonu yoğunluğunun FV modülü çıkış voltajı, elektrik akımı, elektrik gücü çıkışı ve elektrik verimliliği üzerindeki etkisini deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, elektrik verimliliği ile FV modülünün sıcaklığındaki artış arasında azalan bir doğrusal ilişki olduğunu göstermiştir. Ortalama sıcaklık düşüşünü 15°C, elektrik verimliliğinde ise yaklaşık %5,7'lik bir iyileşme elde etmişlerdir. Ortalama genel enerji verimliliği %85,3, ortalama ekserji verimliliğini ise %14,7 olarak bulmuşlardır.

Alagöz ve Apak (2020) güneş enerjisi paneli yüzeylerinin temizliği için yüzey akustik dalgaların (SAW) uygulanmasını araştırmışlardır. SAW teknolojileri, mikro-elektro-

mekanik sistemde (MEMS) hassas yüzey temizleme ve parçacık yönlendirme uygulamaları için yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. SAW'ler ile etkileşim halindeki toz parçacıklarının ayrılma fenomeni için teorik bir analiz sunmuşlardır. Yapılan bu analizler ile adezyon kuvvetlerini ve yerçekiminin temizleme işlemindeki etkilerini dikkate almış ve partikül ayırma işleminde yer alan mekanizmaları ortaya çıkarmışlardır. Bozulmuş FV güneş panelleri ile deneysel çalışmalar yapmışlar ve SAW'lerin güneş paneli yüzeyindeki temizleme etkileri göstermişlerdir. Panel terminal voltajı yaklaşık olarak 1,6 V olarak ölçmüş ve temizleme işleminden sonra terminal voltajını yaklaşık 2,6 V'a kadar yükseltmişlerdir.

Sugiartha ve diğerleri (2020) yarı otomatik bir silecek kontrol sistemi kullanılarak güneş paneli yüzeyi için temizleme mekanizmasının bir ön tasarımını yapmışlardır. Sileceği çalıştırmak için bir DC motor kullanmışlardır. Silecek ileri geri hareket ederken, güneş paneli yüzeyi üzerine bir miktar su püskürtmüştür. Test sonuçları, mekanizmanın 10, 20 ve 30 kez temizleme tekrarı sonucunda, yüzeyin ilk temiz durumuna kıyasla %57,0, %79,1 ve %86,7 temizlendiğini göstermişlerdir.

Sarkın ve diğerleri (2020) güneş panelleri camlarından yansıyan güneş ışınlarının azalmasına yönelik yansıma önleyici kaplamalarda SiO_2, MgF_2, TiO_2, Si_3N_4 ve ZrO_2 malzemelerinin yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Kendi kendini temizleme uygulamalarında süperhidrofobik yüzeylerin en öne çıkan yöntem olduğunu belirtilmiş ve kendi kendini temizleme uygulamalarında Al_2O_3, TiO_2 ve Si_3N_4 en uygun malzemeler olduğunu, çift ve üç katlı kaplamaların yüzey yapışması ve dayanıklılık açısından başarılı sonuçlar verdiği belirtmişlerdir. Çok katmanlı yansıma önleyici kaplamalarda, yansıma indeksi düşük ve yüksek olan malzemelerin uygulandığı çalışmalarda yansıma azaltılmış ve ışık geçirgenliğinin artırıldığı belirtmişlerdir. Kendi kendini temizleyen yüzeyler elde etmek için lamel yüzey kaplamalarda TiO_2 malzemesi kullanıldığı ve bu malzemenin alternatiflerinin araştırıldığını bir çalışma sunmuşlardır. Sonuç olarak SiO_2 için MgF_2 kullanılmış; TiO_2'ye alternatif olarak ZnO, ZrO_2 ve Si_3N_4'ü bulmuşlardır.

Li and diğerleri (2020) çalışmalarında gece ışınımlı soğutma kullanarak su hasadı için güneş panellerinin işlevselliğini gece saatlerine kadar genişletmeyi hedeflemişler. Bunun

için öncelikle güneş panelleri kullanarak gece su hasadı için uygun sıcaklık ve nem aralığını belirleyip, güneş panellerinden su hasadı potansiyelini araştırmışlardır. Ayrıca hem su üretim hızının hem de uygun sıcaklık ve nem aralığının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermeye çalışmışlardır. Dubai'de güneş panelleri için haftalık ortalama su üretiminin 261 ml/m²'ye ulaşabileceğini göstermişler ve bunun da güneş panellerinin tozdan arındırılması için yeterli olduğunu belirlemişlerdir.

Mahmood ve diğerleri (2020) güneş panellerinin verimini etkileyen bazı faktörler incelemişlerdir. Araştırmalarında monokristal bir güneş paneli kullanmışlardır. Bu hücrenin teorik verimi yaklaşık olarak (%16,28) ve havanın bulutlu olduğu ve yüzeyi yağmur suyuyla nemlendirildiğinde maksimum verimi %8,53 olarak hesaplamışlardır. Aynı koşullarda yüzeyi kuru iken en yüksek verimi %14,57, atmosfer temiz ve hücre yüzeyi tozla kaplı olduğunda ise en yüksek verimi %8,95 olarak belirtmişlerdir.

Nattharith ve Kosum (2022) güneş panellerinin temizlenmesi ve izlenmesi için mobil robot sistemi ele almışlardır. Temizlik görevini yerine getirecek olan sistem önceden belirlenmiş bir zamanda otomatik olarak çalıştırılmış, izleme ve temizlik görevlerini üstlenmek üzere kullanıcılar tarafından manuel olarak kontrol edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre mobil robot sistemin etkili bir şekilde çalışabileceğini göstermişlerdir. Ek olarak, önerilen sistemi kullanan güneş panelleri, toz biriktiren güneş panellerine kıyasla daha yüksek enerji çıkışı sağladığı ve güneş modüllerinin verimliliğinde bir artış sunduğu belirtilmiştir. Güneş panellerinin temizlenmesi için iş gücünde de bir azalma sağlamışlardır. Temizlenmemiş modülün güç çıkışı 246 W iken temizlenmiş güneş modülünün ortalama güç çıkışı 268 W bulunmuştur. 30 günlük bir süre boyunca temizlenmiş modülden, temizlenmemiş modüle kıyasla yaklaşık %8,8 daha fazla güç elde etmişlerdir.

Jaiganesh ve diğerleri (2022) basit temizleme mekanizmasıyla güneş panelinin verimliliğinin arttırılması üzerine çalışmışlardır. Manuel, vakumlu, elektrostatik vb. çeşitli temizleme tekniklerin olduğunu ve bu temizleme mekanizması ile panel veriminde yaklaşık %15-20 artış sağlanabildiğini belirtmişlerdir. Ancak, söz konusu tekniklerin bazı dezavantajlarının da olduğunu ifade etmişlerdir. Manuel temizlik ile daha fazla insan

gücünün gerektiği ve sürekli su veya sıvı kullanımında FV panelin zarar görme olasılığından bahsetmişlerdir. Vakumlu temizleme mekanizmasıyla ise panelde çiziklere neden olabileceğini belirtilmişlerdir. Paneli temizlemek için Arduino kullanarak otomatik temizleme geliştirmiş ve daha az maliyetli bir sistem sunarak güneş panelinin verimliliğini artırmışlardır.

Mithhu ve diğerleri (2021) literatürde bulunan ampirik kirlenme modelini, zamansal değişimin kirlenme ve güneşlenme üzerindeki etkilerini içerecek şekilde incelemişlerdir. Özellikle tarımsal fotovoltaik sistemler gibi erişilebilirlik sorunları olan güneş enerjisi santrallerini ilgilendirebilecek olan kirlenme kaybını tahmin etmeye çalışmışlardır. Ayrıca, temizlik gideri ile enerji gelirini kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, Asya ve MENA bölgelerinde, her 5-6 günde bir optimum temizlikten sonra bile kirlenme nedeniyle ortalama gelir kaybını %2,5 olarak bulmuşlardır. Bu kaybı ABD'de 12 günlük temizlik aralığı için %1,5 olarak tespit etmişlerdir. Bölgeye özgü temizlik maliyetleri göz önüne alındığında; Asya, MENA, Kuzey Amerika ve Avrupa için optimum şekilde temizlenmiş bir güneş enerjisi santralinin gelir kaybını %2-5 bulmuşlardır.

Swain ve diğerleri (2021) güneş panelini temizlemek için kendi kendine çalışan yeni bir güneş paneli temizleme mekanizması sisteminin tasarımını ve deneysel analizini sunmuşlardır. Temizleme sisteminin şarj edilebilir pillere sahip iki küçük güneş paneli ile çalıştığı ve temizlenecek olan güneş panelinden gelen güce ihtiyaç duymadığını belirtmişlerdir. Deneysel modeli temizleme fırçasını hareket ettiren özel sürücü birimleri tarafından akıllı bir şekilde kontrol edilen üç DC motora dayandırmışlardır. Sonuç olarak panelin verimliliğinde önemli bir artış olduğunu açıkça göstermişlerdir. Güneş panelinin verimliliğini 10 döngüden sonra %10,63'ten %13,20'ye çıkarmışlardır.

Kawamoto ve diğerleri (2021) hareket eden ve sabit dalgalar kullanan elektrodinamik temizleme yöntemiyle güneş panelini temizlemeyi amaçlamışlar. Bu yöntem ile insan gücü ve suya ihtiyaç duymamışlar. Temizleme performansını artırmak için panel yüzeyine hava akışının uygulanmasını sağlayan bir yardımcı mekanizma kurmuşlar ve yapmış oldukları pasif bir yarıktan giren doğal rüzgârın hızının burada yaklaşık dört

katına kadar çıktığı belirtmişlerdir. Hava akışı arttırdıklarında verimliliği de önemli ölçüde iyileştirebilmişlerdir.

Zhang ve diğerleri (2021) temizleme gereci olarak fırça kullanmış ve fırçanın temizleme kuvvetini hesaplamışlardır. Toz partikülünün fırça tellerine karşı normal kuvveti ve sapma açısını tespit etmişlerdir. Fırçanın, eksenel ve radyal yer değiştirmesine bağlı olduğu ve ayrıca temizleme kuvvetinin de bunlara bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ortalama bağıl hata, model ile deney arasındaki normal kuvvetin %9,2676 'sı kabul edilebilir bir değer olarak almışlardır. Sonuçlar, tel uzunluğunun 20 mm, tel çapının 0,3 mm ve eksenel yer değiştirmenin 13–15 mm olduğu fırça tellerinin güneş panelleri için en uygun temizleme etkisine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Abdallah ve diğerleri (2022) Filistin iklim koşullarında, güneş enerjisi üretimine kirliliğin etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmanın amacı uzun vadeli enerji sürdürülebilirliği ve güneş enerjisi kullanımı çabalarına yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmanın yapıldığı Tulkarm'da Akdeniz iklimine bağlı toz birikiminin etkisini incelemişlerdir. 1 Ocak ile 31 Aralık 2021 tarihleri arasında 85 kW'lık güneş enerjisi santralini kullanmışlardır. Çalışma sonucu olarak Ocak, Şubat, Kasım ve Aralık aylarında iki aylık temizlik dönemi, Mart ve Ekim aylarında aylık temizlik ve Nisan ve Mayıs aylarında ise iki haftalık temizlik olması sonucuna varmışlardır. Ayrıca, panellerin haziran, temmuz, ağustos ve eylül aylarında haftalık olarak temizlenmesi gerektiği sonucuna da varmışlardır.

Panat ve Varanasi (2022) güneş panellerinde toz birikmesinin güneş ışığının büyük bir bölümünü engellediği için önemli bir sorun olduğunu ifade etmişlerdir. Bu sebeple güneş panellerinin düzenli olarak büyük miktarlarda saf su kullanılarak temizlendiği ancak çöllerde temizlik için su tüketiminin önemli bir sürdürülebilirlik sorunu oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bunun üzerine elektrostatik indüksiyon kullanarak güneş panellerinden toz giderme için susuz bir yaklaşım sunmuşlardır. Ayrıca, geniş bir bağıl nem aralığında toz gidermeyi de göstererek, yaklaşımlarını geniş çapta uygulanabilir kılmışlardır. Son olarak, laboratuvar ölçeğinde bir prototip geliştirerek ve yaklaşımlarını kullanarak kayıp güç çıkışının %95'e kadar geri kazanıldığını göstermişlerdir.

Al Garni (2022) çalışmasını çöl ikliminin hakim olduğu Suudi Arabistan ’da yapmıştır. Bu çalışmada, güneş paneli performansını sürdürmek için kullanılabilecek önleyici ve onarıcı önlem tekniklerini vurgulamıştır. Suudi Arabistan'ın farklı bölgelerinde güneş enerjisi sistemlerinin performansı kirlilik altında değerlendirmiştir. Yerel ortama ve diğer faktörlere bağlı olarak, panel performansının %2 ile %50 arasında azaldığı ve tek bir kum fırtınası ile modül güç çıkışını %20 düştüğünü belirtmiştir. Dhahran'da, modülü dış ortam koşullarına maruz bırakmış ve 6 ay boyunca temizlenmemiştir. Sonuç olarak %50'den fazla bir güç düşüşüne neden olduğu bildirmiştir. Yüksek performanslı bir sistemi sürdürmek için panelleri ayda bir ya da daha kısa sürede temizlenmesini şiddetle tavsiye etmiştir. Toz birikimi ve temizleme maliyetlerinin Suudi Arabistan için önemli bir engel olmadığı sonucuna varmıştır.

Al-Jarrah ve diğerleri (2022) güneş enerjisi santrallerinde panel temizlemek ve verimliliğini artırmak için robotik tasarım sunmuşlardır. Tasarım modeli Solid Work kullanılarak çizmişler ve ardından bu tasarımın MATLAB programı aracılığıyla simülasyonu yapılmışlardır. Robot kolun hücreye çarpma kuvveti ve hücreyi temizlemek için gerekli olan hızı, hücreye zarar vermemek üzerinde durmuşlardır. Robotu kontrol etmek için özel bir simüle edilmiş kontrol yöntemi kullanmışlardır. Çalışma sonucu sadece maliyet düşürme açısından değil, aynı zamanda robot kolunun hızını kontrol ederek güneş paneline etki eden kuvveti azaltma açısından da faydalı olduğunu göstermişlerdir.

Olorunfemi ve diğerleri (2022) güneş paneli temizliği için akıllı sistemler kullanmanın önemini vurgulamışlardır. Otonom ve manuel teknolojiye kıyasla, kir koşullarını tespit etmek ve güneş panellerini temizlemek için akıllı sistemlerin etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Verimlilik, doğruluk, karmaşıklık, güvenilirlik, başlangıç ve işletme maliyeti dikkate alınarak güneş panellerinde kir birikimini ele alan akıllı sistemler üzerine araştırma yapmışlardır. Genel olarak, güneş panelinin gerçek zamanlı izlenmesi, temizlenmesi ve entegre akıllı sistemlerle çıkış gücünü iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Kullanıcıların güneş panelinin durumu hakkında gerçek zamanlı güncellemeler almasına ve uzak konumlardan eylemleri kontrol etmesine yardımcı olduğu belirtmişlerdir.

Almaki ve diğerleri (2022) güneş panellerinin bakım ve temizliği amacıyla kamera, GPS sensörü, alıcı-verici ve pompa konik tankı ile donatılmış otonom bir drone geliştirmeyi amaçlamışlardır. Lotus efektli suyu tutmak için bir 3D yazıcı kullanılarak bir pompa tankı tasarlamışlar ve drone üzerine yerleştirmişlerdir. Drone toz ve kir partiküllerini tespit edebilmiş ve lotus etkisinin kullanıldığı temizleme işlemi ile güneş panellerinin güç verimliliğinde yaklaşık %31'lik bir artış sağlandığı ifade etmişlerdir.

Myyas ve diğerleri (2022) güneş panel sistemlerin verimlilik düşüşünü önlemek için düzenli olarak yıkanması gerektiğinin üstünde durmuşlar ve modüller temizlenmeden bir ay sonra verimliliğin %50 düşebildiğini belirtmişlerdir. Araştırmalarında kendi kendini temizleyen bir mekanizma ile güneş panel verimliliğini artıran, güneş panel sıcaklığının yükselmesini önleyen yenilikçi bir akıllı cihaz fikrini göstermeyi amaçlamışlardır. Ürdün'de yapılan çalışmada, tozu periyodik olarak temizlemek için güneş paneli üzerindeki tozu algılayan ve modülü otomatik olarak temizleyen otomatik bir temizleyici sistem kurmuşlardır. Manuel temizleme, otomatik temizleme, manuel püskürtme suyu ve basınçlı hava gibi yöntemleri birbiri ile kıyaslamışlardır. Bu çalışmanın bulgularının güneş paneli verimliliğini artırarak ve enerji endüstrisinde karbonsuzlaştırma sağlayarak çevrenin korunmasına yardımcı olabileceği ifade edilmiştir. Üç dakikada için panel yüzeyine gelen tozun %95'inin temizlenebildiği belirtilmiştir.

Haidary ve Kaur (2022) güneş panellerin verimliliğinin toz, kuş pisliği gibi yabancı partiküllere bağlı olduğunu açıklamışlardır. Yüksek verimin ise ışınım, sıcaklık, toz partiküller, kalıntı partiküller ve kuş pisliği gibi çok sayıda faktöre bağlı olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek verim elde etmek için, güneş panellerinin temiz ve toz parçacıklarından arındırılmış olması gerektiğinin üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında panel yüzeyindeki engelleri algılayan ve tozu temizleyen bir temizlik robotu tasarımı sunmuşlardır. Bu amaç için Proteus yazılımı kullanılarak devre simülasyonu yapmışlar ve sonuçlarını doğrulamışlardır. Yüzeyi temizlenmiş bir güneş panelinin verimliliğini, kirle kaplanmış bir güneş paneline kıyasla yaklaşık %31,32 oranında artırmışlardır.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Araştırmanın materyali olarak Trakya Bölgesi'ndeki tarımsal amaçlı kooperatifler araştırılmış ve Edirne ili, Uzunköprü ilçesi, Balabanköy konumundaki güneş enerjisi santrali (GES) seçilmiştir. Balabanköy 41.0892 enlem ve 26.5482 boylamında yer almaktadır (Anonim, 2023).

Edirne Uzunköprü Sınırlı Sorumlu Balabanköy Tarımsal Kalkınma Kooperatifi tarafından "Güneşin Suya Dokunuşu" adı altında GES projesi hazırlanmış ve Trakya Kalkınma Ajansı (TRAKYAKA) tarafından kabul edilmiştir. TRAKYAKA'nın 2013-2014 Mali Destek Programları altında Küçük Ölçekli Altyapı programı kapsamında desteklenmiş ve 2016 yılında kurulumu tamamlanmıştır. "Güneşin Suya Dokunuşu" projesi ile üretim alanlarının sulanması için gerekli olan elektrik enerjisinin güneş enerjisinden karşılanmasıyla çiftçilerin karlılığının arttırılması ve verimliliklerinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Projenin bütçesi 523 808 TL olup 339 905 TL'si Trakya Kalkınma Ajansı tarafından desteklenmiştir. Güneş panellerinden elde edilen enerji ile pompajlı sulamadaki enerji ihtiyacı karşılanmaktadır.



Şekil 1.1. Balabanköy Güneş Enerjisi Santrali

GES, Edirne ili, Uzunköprü ilçesi, Balabanköy Mahallesi 10 Pafta 31 parsele inşa edilmiştir. Sistemin süneklilik düzeyi normal, taşıyıcı sistemi çerçevelerle oluşturulan modelin betonarme temele sabit mesnetle bağlanmıştır. Tüm taşıyıcılar soğukta şekillendirilmiş bükme C profillerden oluşturulmuştur. Düşey ve yatay taşıyıcılar CC100-2-10-40, güneş panellerinin vidalanacağı aşıklar CU40-2-10-40-7, sistem çaprazları CU40-2-10-40-7 profillerinden teşkil edilmiştir. Malzeme sınıfı olarak, yapısal çelik için ST-37 (S235JR) kullanılmıştır. Yapının taşıyıcı sistem analizinde SAP2000-V16 yazılımından yararlanılmıştır. Zati ağırlıklar, birim ağırlıklar kullanılarak SAP2000 tarafından otomatik olarak hesaplatılmıştır (Teknik Rapor, 2013).

Sınırlı Sorumlu Balabanköy Tarımsal Kalkınma Kooperatifi GES projesi 100 kWp /85 kWe kurulu gücünde olup polikristal 250 W panellerden (400 adet), 20 kW gücündeki 5 adet eviriciden ve alçak gerilim (AG) panodan oluşmaktadır. Santralin senelik üretim kapasitesi ortalama 147 MWh/yıl olarak modellenmiştir (Teknik Rapor, 2013).



Şekil 1.2. Balabanköy Güneş Enerji Santralindeki Bir Dizi

Paneller iki sıra halinde dikey monte edilmiş ve kış gündönümüne göre hesap yapıldığında, montaj sehpalarının birbirini gölgelendirmesini önlemek için minimum sıra mesafesinin 3 metre olması kararlaştırılmıştır. Nominal güç değeri 250 Wp olan güneş panellerinin güç toleransı pozitiftir.



Şekil 1.3. Güneş Panelleri

GES projesi kapsamında olan SOLAREDGE SE17K marka evirici kullanılmıştır. Maksimum doğru akım 22 950 kWp, maksimum giriş gerilimi 900 V DC, maksimum güç noktası takipçisi (MPPT) sayısı 2 adet, maksimum akım 2 x 23 A (46A), maksimum alternatif akım gücü 17 kW AC olmaktadır.

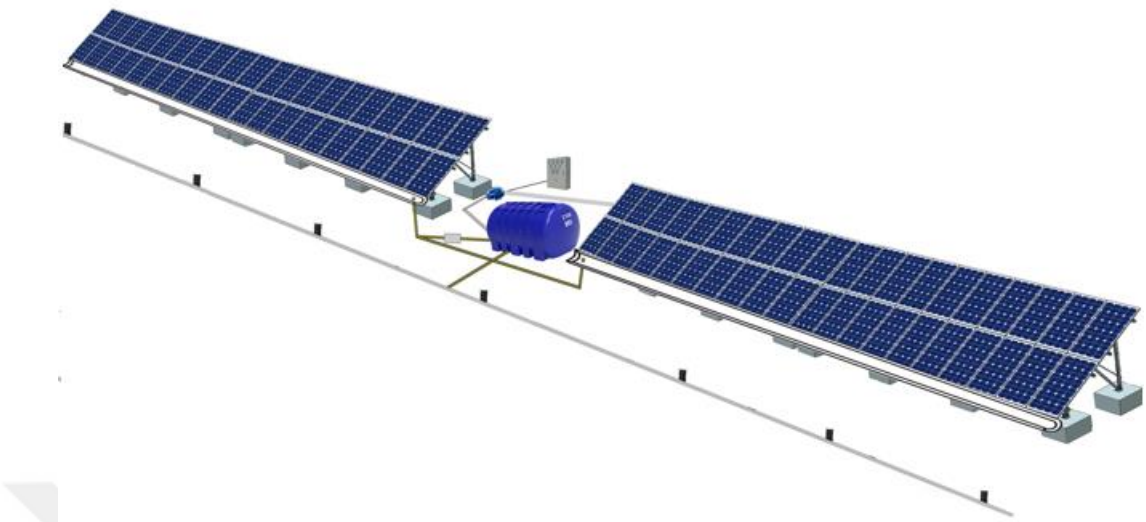


Şekil 1.4. Evirici

3.2. Yöntem

3.2.1. Sistemin Tasarımı, Montajı ve Teknik Özellikleri

Panellerin kirlenmesi sonucunda meydana gelen enerji kaybından dolayı söz konusu panellerin temizlenmesine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda da Şekil 1.5'te görülen sistem tasarımını çizmek için Photoshop cc 2021 programı kullanılmıştır. Tasarlanan bu sistem içerisinde kullanılan ekipman sayısı sekiz başlıkta sıralanmaktadır. Bu ekipmanlar; seksen adet güneş paneli, su oluğu, su iletim hattı, yağmurlama başlıkları, otomasyon cihazı, depo, filtre ve motor olarak sıralanmıştır.



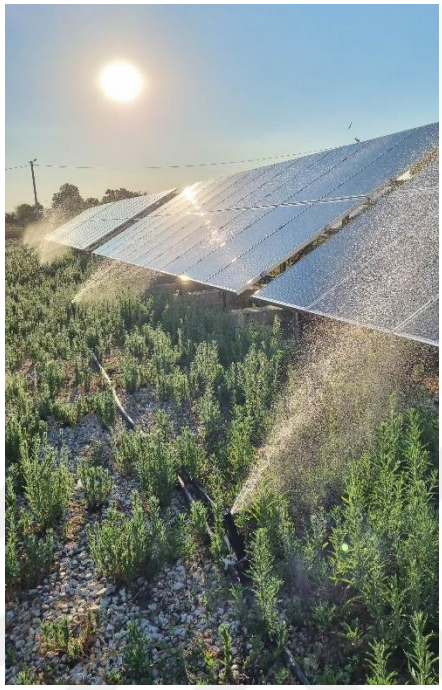
Şekil 1.5. Sistem Tasarımı

Şekil 1.6'da panellerin temizlendikten sonra sudan döngüsel olarak faydalanılması ve yağmur suyunun hasat edilmesi amacıyla kullanılan su oluğu gösterilmiştir. Su oluğu 45 metre uzunluğunda olup suyun depoya toplanmasını aracılık etmektedir.



Şekil 1.6. Su Oluğu

Şekil 1.7’de su iletim hattı gösterilmiştir. Bu kapsamda 45 metre uzunluğunda, 32 mm çaplı Polietilen boru (PE) kullanılmıştır.



Şekil 1.7. Su İletim Hattı

Pop-up başlıkların normal ıslatma alanı meme ya da ağız boyutuna bağlı olarak 4,8 m ile 12 m çaplı dairesel alanlar arasında değişmektedir. Bu başlıklar ile zarif, düzenli ve hızlı bir şekilde 25–60 mm kalınlığında bir su tabakası üniform dağılım göstererek püskürtülebilir. Güneş panellerini temizlemek için ıslatma alanı yarıçapı 7 metre olan Rainbird marka pop-up yağmurlama başlığı kullanılmıştır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Pop-up Yağmurlama Başlığı

Şekil 1.9'de gösterilen Hunter marka X-Core otomasyon cihazı ile dört farklı süre için programlama yapılmıştır. Sistem kesintilerini önlemek amacıyla panel temizlik işlemleri gün doğumu ve gün batımı saatleri olarak seçilmiştir (Salman ve diğerleri, 2021). Edirne ili Uzunköprü ilçesi için birinci deneme haftasında gün doğumu olan saat 6:45'e programlanıp 10 dakika süreyle panellerin temizlenmesi sağlanmıştır. İkinci hafta denemesinde gün doğumu olan saat 6:45'e programlanarak 5 dakika süreyle panellerin temizlenmesi sağlanmıştır. Üçüncü hafta denemelerinde gün doğumu olan saat 6:45'e ve gün batımı olan saat 20:45'e programlanarak günde iki kez onar dakika süreyle panellerin temizlenmesi sağlanmıştır. Dördüncü hafta ise gün doğumu olan saat 6:45'e ve gün batımı olan saat 20:45'e programlanarak günde iki kez beşer dakika süreyle panellerin temizlenmesi sağlanmıştır. Temizleme denemelerinde birinci hafta 9-15.07.2023, ikinci hafta 16-22.07.2023, üçüncü hafta 23-29.07.2023, dördüncü hafta 30.07.2023 - 05.08.2023 tarihlerinde yapılmıştır.



Şekil 1.9. Otomasyon Cihazı

Kullanılacak olan suyun depolanması için 1 tonluk su deposu kullanılmıştır. Sistemin çalışması için gücü 2,2 kW olan Einhell marka motor kullanılmış olup ayrıca bir adet de 120 mesh 1'' plastik elek filtre kullanılmıştır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Depo, Filtre ve Motor

3.2.2. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi

Güneş panellerinden üretilebilecek elektrik enerjisi (P_{GP}) için panele gelen güneş ışınımı şiddeti (I,) ile panelin yüzey alanı (A), güneşlenme süresi (h) ve güneş panelinin toplam veriminin (η) çarpımı sonucu elde edilir (Taşkın, 2018).

$$P_{GP} = I \times A \times t \times \eta \quad (1)$$

P_{GP}: Güneş panelinin üretebileceği enerji (kWh)
I: Panele gelen güneş ışınımı şiddeti (kW/m²)
A: Panelin yüzey alanı (m²),
t: Güneşlenme süresi (h),
η: Güneş panelinin toplam verimi

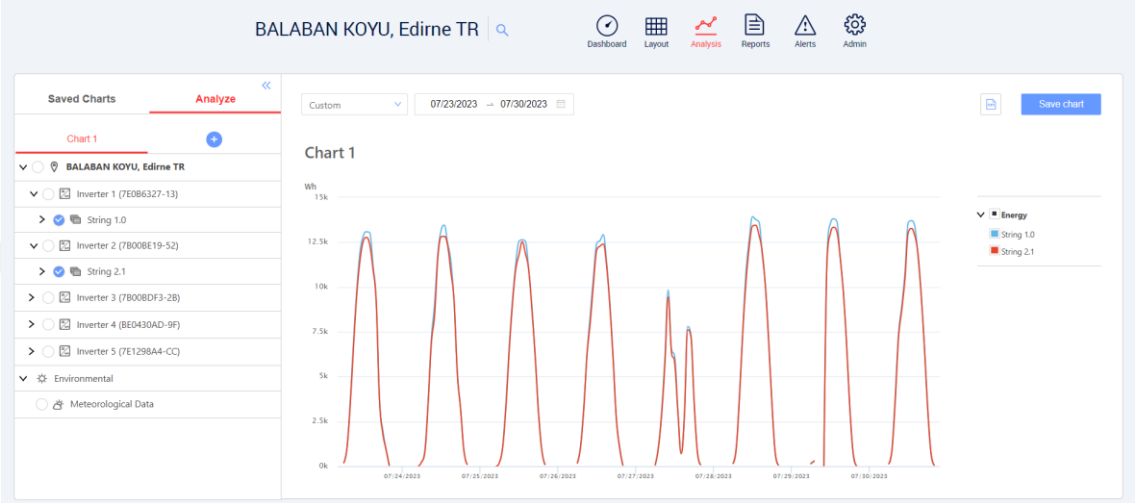
3.2.3. Güç ve Enerji Verilerinin Elde Edilmesi

GES'e ait güç ve enerji verilerinin değişimi web tabanlı sistem üzerinden takip edilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere sistemden üretilen elektrik enerjisi anlık olarak gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, adres bilgileri, tesis envanter bilgileri, tarih ve saat veriler de yer almaktadır.



Şekil 3.1. Ana Ekran

Web tabanlı sistem sayesinde her bir panelin gün, hafta, ay ve yıl boyunca ürettiği elektrik enerjisi ayrı ayrı incelenebilmektedir. Analiz kısmında ise beş farklı eviriciye ait güç ve enerji çıkışı takip edilebilmektedir (Şekil 3.2). Temizleme sisteminin kurulduğu birinci dizi ve kontrol grubu olarak kabul edilen ikinci dizinin temizleme yapılan tarihler aralığındaki güç ve enerji verileri kaydedilmiştir.



Şekil 3.2. Güç ve Enerji Verilerinin Elde Edilmesi

3.2.4. Yağmur Suyu Toplama Hesaplamaları

Yağmur suyu toplama yöntemine göre eğim doğrultusunda akışa geçen sular toplanır. Bu sistemi gıda güvenliği açısından pek önemi yoktur ancak su toplama tekniği, kolay ve ucuz olması nedeniyle avantajlıdır. Hemen hemen her türlü eğimde uygulanabilir. Yağmur suyundan yıkama ve temizlik amacıyla faydalanılabilir (Kantaroğlu, 2009).

Türkiye'de yağmur suyu depo (sarnıç) hacimlerinin hesaplanmasında Alman Endüstriyel Standartlarında (DIN) tarif edilen değerlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Çatı yüzeyinden toplanabilecek su miktarını hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Konyalı ve Çay, 2020).

$$YSV = YTA \times YYM \times 0{,}8 \times 0{,}9 \qquad (2)$$

YSV = Yağmur suyu verimi (m^3)

YTA = Yağmur toplama alanı (m^2)

YYM = Yıllık yağış miktarı (mm)

0,8 = Çatı katsayısı

0,9 = Filtre etkinlik katsayısı

3.2.5. İklimsel Veriler

Sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, güneşlenme şiddeti ve güneşlenme süresi Edirne Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden alınmış olup veriler Edirne ili Uzunköprü ilçesi istasyonuna ait veriler kullanılmıştır.

3.2.6. Verilerin Değerlendirilmesi

Deneme dizisi ve kontrol dizisinin enerji ve güç verilerinin karşılaştırılması ve grafiklerinin oluşturulması ile iklimsel verilerin değerlendirilmesinde Excel 2019 programı kullanılmıştır.

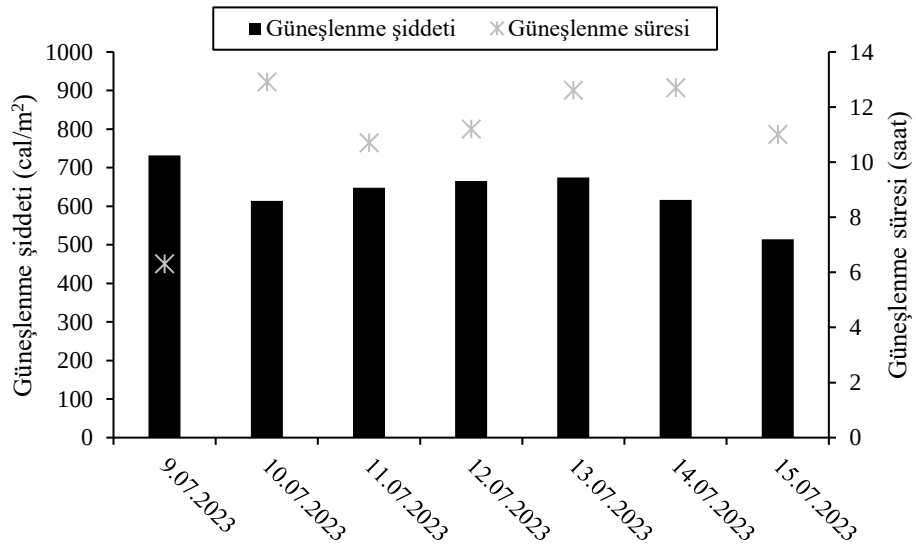
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, elde edilen verilerden çıkan farklı temizleme süresine bağlı sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

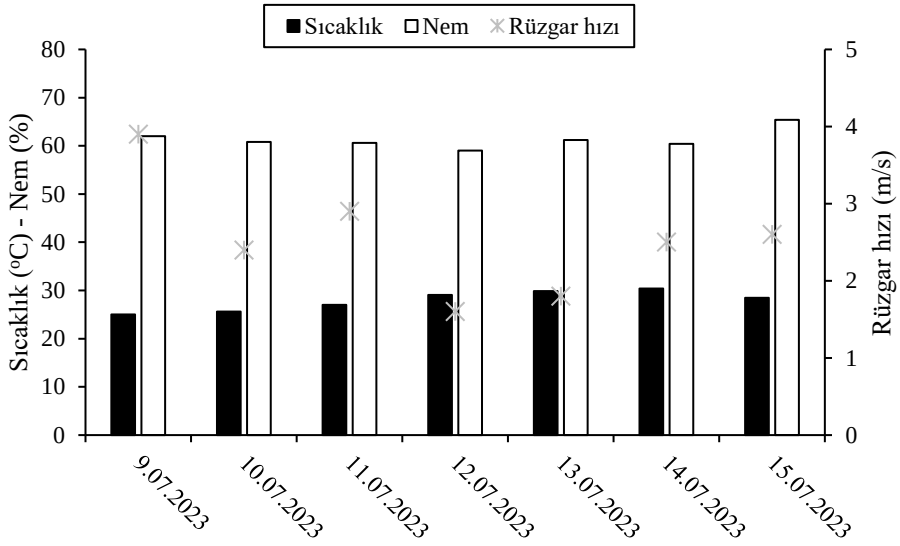
4.1. İklimsel Veriler

4.1.1. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk)

Gün doğumunda 10 dakikalık temizleme koşulları altında yapılan denemeler 09.07.2023 ve 15.07.2023 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneme günleri esnasında elde edilen iklimsel verilerin ortalamaları; sıcaklık 27,93 °C, nem %61,34, rüzgâr hızı 2,53 m/s, güneşlenme şiddeti 637,61 cal/m^2 ve güneşlenme süresi 11,06 saat olmuştur (Şekil 4.1 - Şekil 4.2). Şekil 4.1'de görüldüğü üzere 09.07.2023 tarihinde bulutlanma kaynaklı güneşlenme süresinde düşüş görülmüştür. Ayrıca 09.07.2023 tarihinde 3,9 m/s ile rüzgâr hızı diğer deneme günlerine göre yüksek ölçülmüştür (Şekil 4.2).



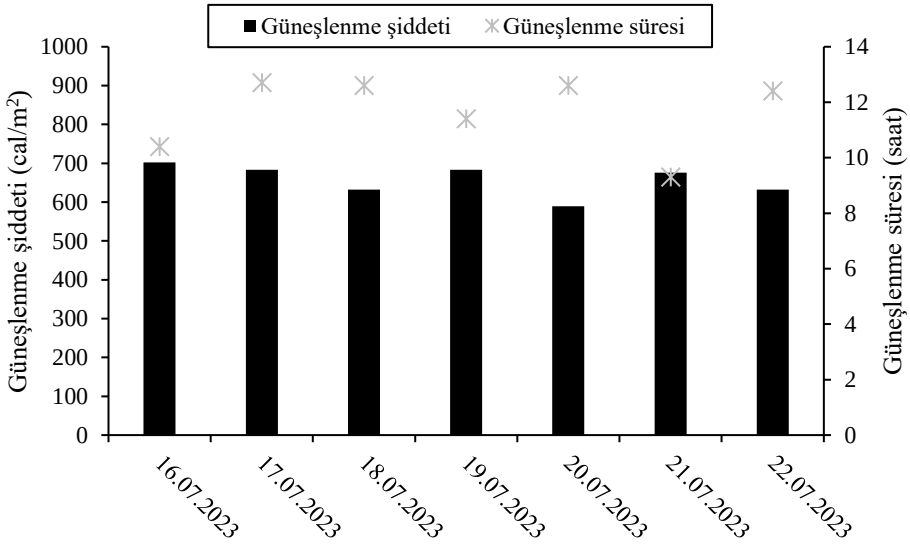
Şekil 4.1. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (09.07.2023 - 15.07.2023)



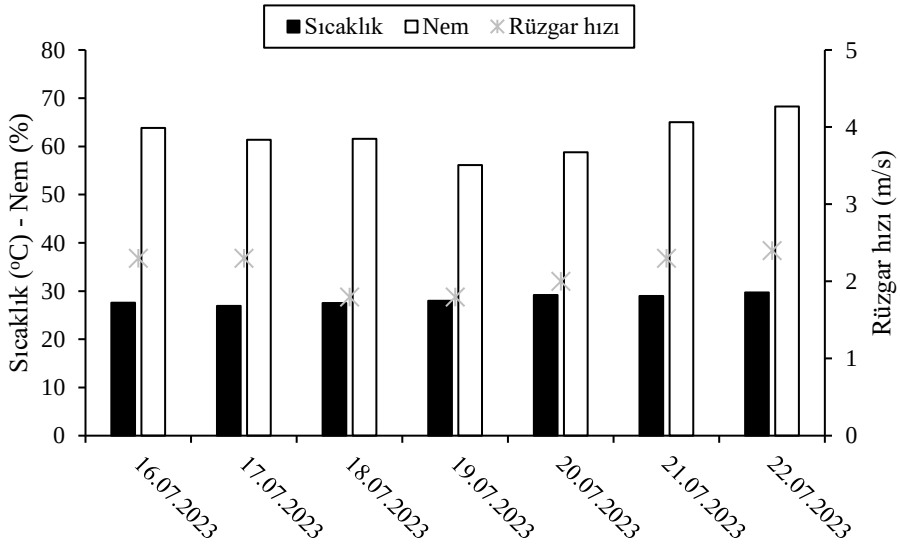
Şekil 4.2. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (09.07.2023 - 15.07.2023)

4.1.2. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk)

Gün doğumunda 5 dakikalık temizleme koşulları altında yapılan denemeler 16.07.2023 ve 22.07.2023 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneme günleri esnasında elde edilen iklimsel verilerin ortalamaları; sıcaklık 28,27 °C, nem %62,14, rüzgâr hızı 2,13 m/s, güneşlenme şiddeti 656,77 cal/m^2 ve güneşlenme süresi 11,63 saat olmuştur (Şekil 4.3 - Şekil 4.4). Şekil 4.3'de görüldüğü üzere güneşlenme süresi 1. haftadaki denemeye göre daha dalgalı seyretmiştir. Ayrıca Şekil 4.4'de görüldüğü üzere sıcaklık ve rüzgâr hızı yataya yakın seyrederken, nem değeri ise hafta ortasından itibaren yükselişe geçtiği belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (16.07.2023 - 22.07.2023)

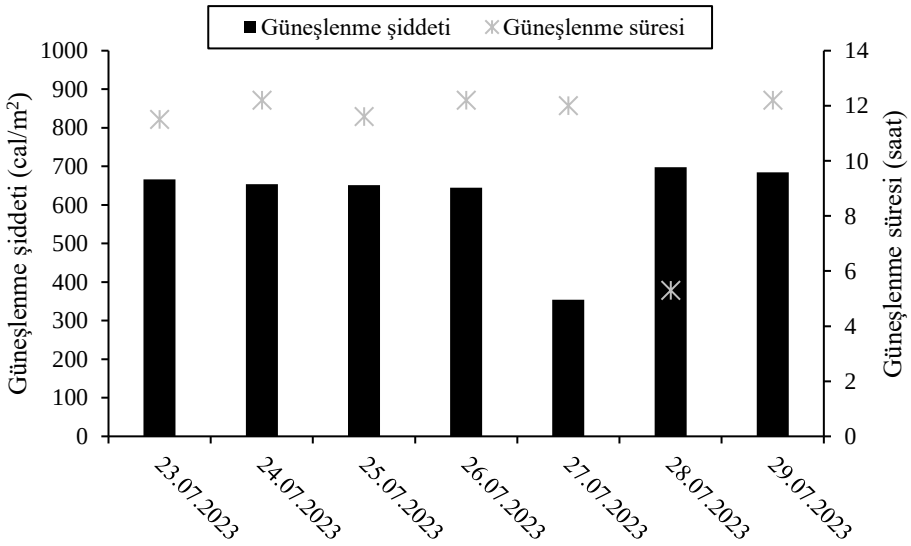


Şekil 4.4. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (16.07.2023 - 22.07.2023)

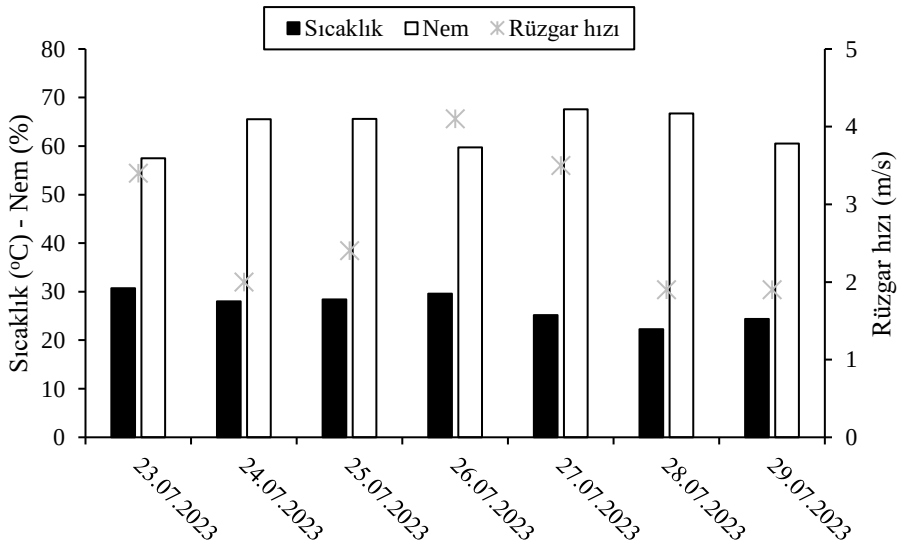
4.1.3. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk) ve Gün Batımında Temizleme (10 dk)

Gün doğumu ve gün batımında onar dakikalık temizleme koşulları altında yapılan denemeler 23.07.2023 ve 29.07.2023 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneme günleri esnasında elde edilen iklimsel verilerin ortalamaları; sıcaklık 26,94 °C, nem %63,3, rüzgâr hızı 2,74 m/s, güneşlenme şiddeti 621,89 cal/m^2 ve güneşlenme süresi 11 saat olmuştur (Şekil 4.5 - Şekil 4.6). Şekil 4.5'de görüldüğü üzere 27.07.2023 tarihinde

bulutlanma kaynaklı güneşlenme şiddeti 354,5 cal/m^2 düşmüştür ve bu değer deneme haftalarındaki en düşük değer olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 28.07.2023 günü söz konusu hava şartlarından dolayı güneşlenme süresinde de düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Bu deneme haftasında rüzgâr hızı dalgalı seyir etmiş ve en düşük ortalama sıcaklığın yaşandığı hafta olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.6).



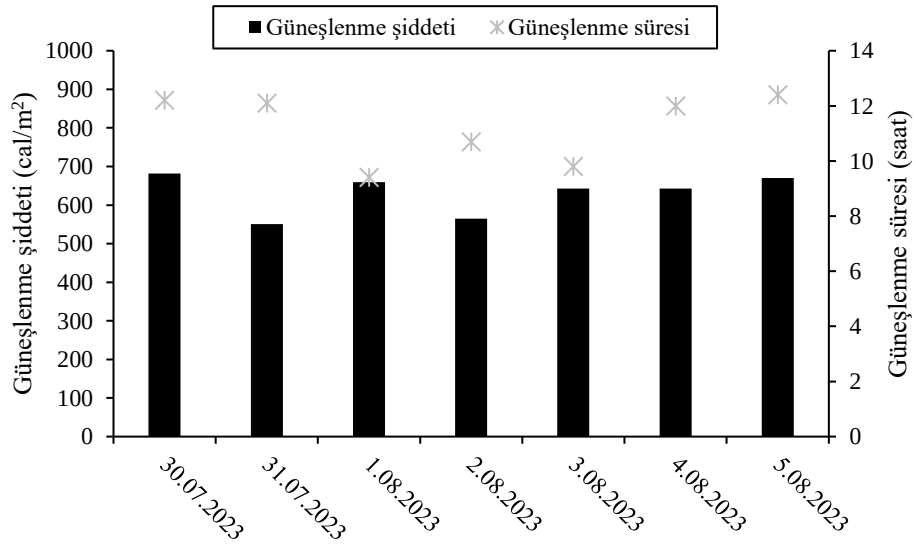
Şekil 4.5. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (23.07.2023 - 29.07.2023)



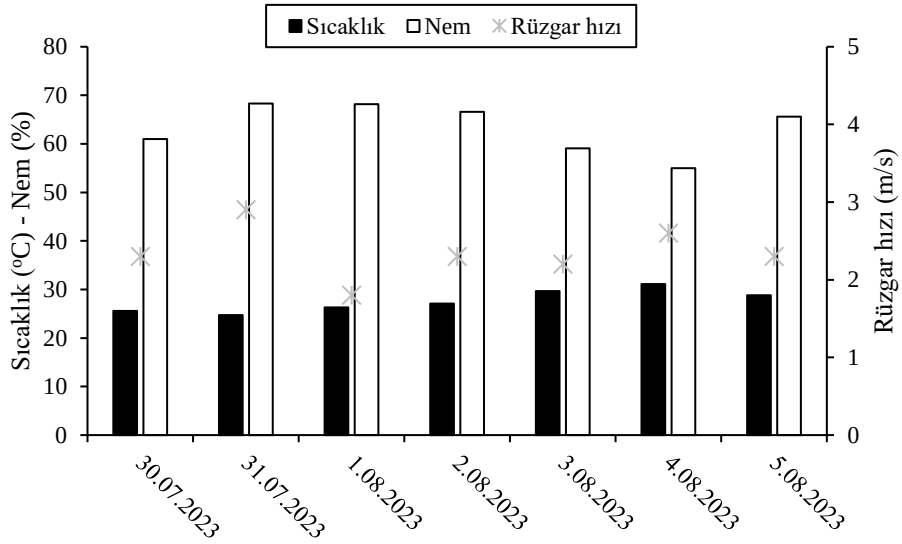
Şekil 4.6. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (23.07.2023 - 29.07.2023)

4.1.4. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk) ve Gün Batımında Temizleme (5 dk)

Gün doğumu ve gün batımında beşer dakikalık temizleme koşulları altında yapılan denemeler 30.07.2023 ve 05.08.2023 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneme günleri esnasında elde edilen iklimsel verilerin ortalamaları; sıcaklık 27,61 °C, nem %63,4, rüzgâr hızı 2,34 m/s, güneşlenme şiddeti 630,21 cal/m^2 ve güneşlenme süresi 11,23 saat olmuştur (Şekil 4.7 - Şekil 4.8). Bu deneme haftasında, güneşlenme şiddeti ve güneşlenme süresi dalgalı seyir etmiştir (Şekil 4.7). Şekil 4.8'de görüleceği üzere 31.07.2023 tarihinde %68,3 ile deneme haftalarındaki en yüksek nem değeri görülmüştür. Ayrıca rüzgâr hızı da dalgalı seyir etmiştir.



Şekil 4.7. Güneşlenme Şiddeti ve Güneşlenme Süresi (30.07.2023 - 05.08.2023)



Şekil 4.8. Sıcaklık, Nem ve Rüzgâr Hızı (30.07.2023 - 05.08.2023)

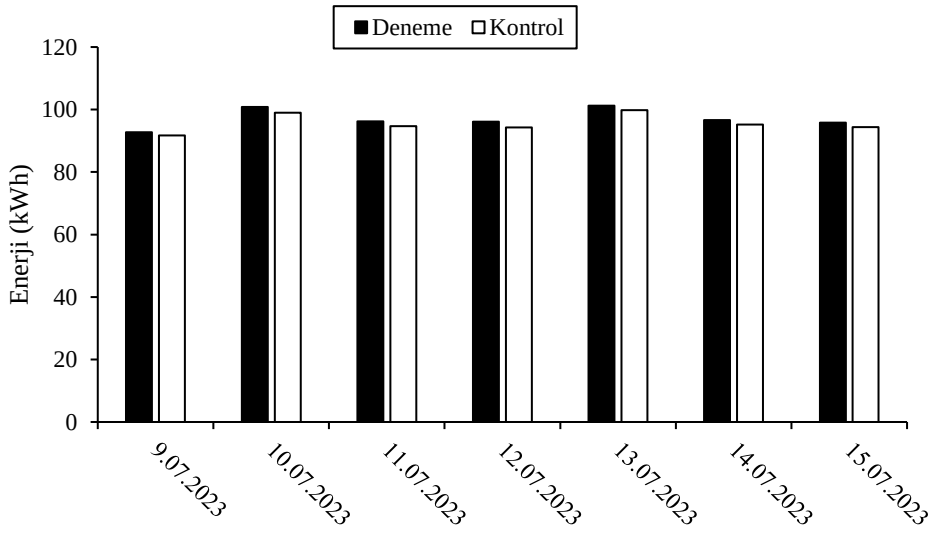
4.2. Güç ve Enerji Verilerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.9 - Şekil 4.17'de 9.07.2023 ve 5.08.2023 tarihleri arasındaki farklı temizleme sürelerine (10 dk, 5 dk, 2 x 10 dk ve 2 x 5 dk) ait güç ve enerji değişimleri verileri haftalık olarak sunulmuştur. Kontrol ve deneme dizisine ait enerji üretimi karşılaştırıldığında iklimsel verilerin önemli bir parametre oldukları tespit edilmiştir. Ölçümler esnasında en yüksek enerji üretimi 110,88 kWh ile 28.07.2023 günü, en yüksek güç üretimi ise 140,33 kW ile 7.09.2023 günü saat 12.00'de gerçekleşmiştir. Farklı temizleme sürelerine bağlı olarak deneme gerçekleştirilen dizinin ürettiği enerji miktarı, kontrol dizisi enerji üretiminden %1,13 ile %3,38 arasında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca güç verileri incelendiğinde ise kontrol ve deneme dizisine ait farklılıkların öğlen saatlerinde (12:00-13:00) daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

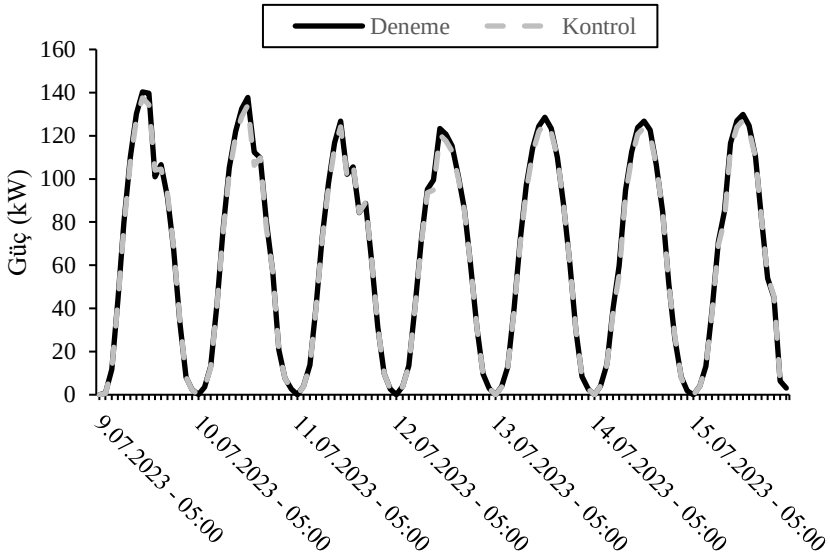
4.2.1. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk)

Gün doğumunda 10 dakikalık temizleme koşulları altında gerçekleştirilen ve 9.07.2023 - 15.07.2023 tarihleri arasında yapılan deneylerin deneme dizisinde kontrol dizisine göre sırasıyla %1,13, %1,84, %1,57, %1,96 %1,48, %1,50, %1,59 daha fazla enerji üretimi bulunmuştur. Ortalama olarak ise deneme dizisi kontrol dizisine göre %1,58 daha fazla enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Deneylerin yapıldığı günlerde en fazla enerji üretimi

101,25 kWh ile 13.07.2023 günü deneme dizisinde, en düşük üretim ise 9.07.2023 günü 91,70 kWh olarak kontrol dizisinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.9). Şekil 4.10 incelendiğinde ise bazı deneme günlerinde (9 - 12.07.2023) bulutlanmanın etkisi dalgalı bir güç eğrisi oluşmuştur. Deneyler boyunca en yüksek güç seviyesine 7.07.2023 günü saat 12:00'da deneme dizisinden 140,33 kW, kontrol dizisinde ise 137,56 kW ile ulaşılmıştır. Önceki çalışmalarda Tiwari ve diğerleri (2019) Hindistan'ın Bhilai şehrinde, çatıda üstünde bulunan 1 kW gücündeki sistemi fırça ile temizlemiş ve günlük ortalama %4'lük bir verim artışı elde etmişlerdir. Chailoet ve Pengwang (2019) güneş panellerini temizlemek için robot çalışması yapmışlar ve farklı uzunluklardaki (1 metre ile 4 metre) panellerde ile temizlik yapıldıktan sonra %3,4'lük bir verim artışı sağlandığını ifade etmişlerdir.



Şekil 4.9. Enerji Kıyaslaması (09.07.2023 - 15.07.2023)

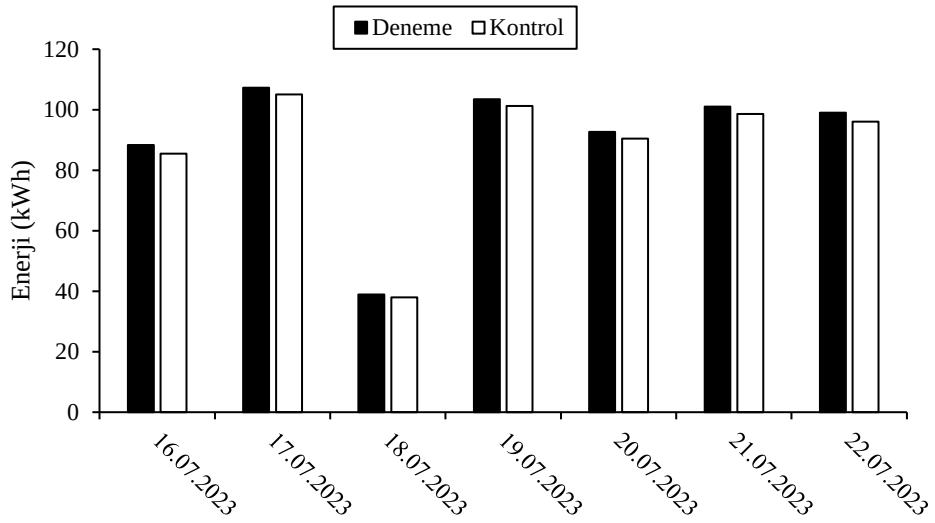


Şekil 4.10. Güç Kıyaslaması (09.07.2023 - 15.07.2023)

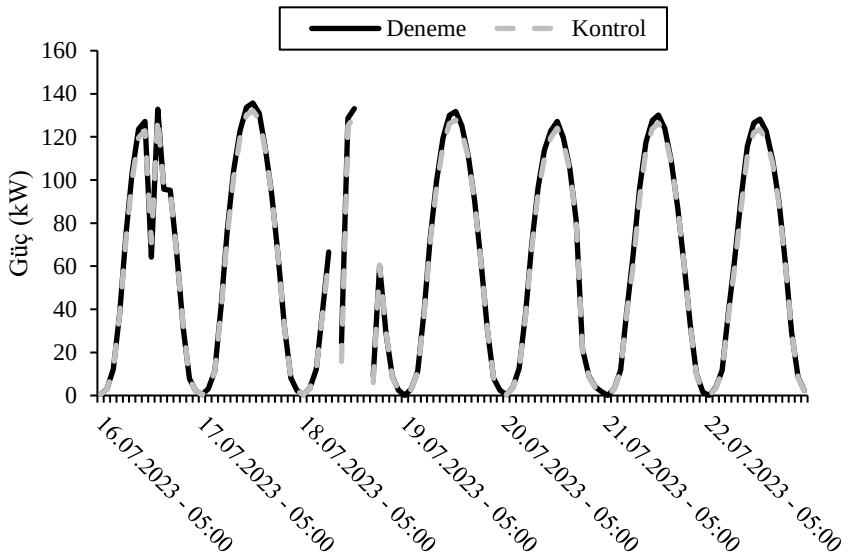
4.2.2. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk)

Gün doğumunda 5 dakikalık temizleme koşulları altında gerçekleştirilen ve 16.07.2023 - 22.07.2023 tarihleri arasında yapılan deneylerin deneme dizisinde kontrol dizisine göre sırasıyla %3,35, %2,16, %2,76, %2,19, %2,40, %2,44, %3,12 daha fazla enerji üretimi bulunmuştur. Ortalama olarak ise deneme dizisi kontrol dizisine göre %2,63 daha fazla enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Deneylerin yapıldığı günlerde en fazla üretim 107,26 kWh ile 17.07.2023 günü deneme dizisinde, en düşük üretim ise 18.07.2023 günü 37,91 kWh olarak kontrol dizisinde gerçekleşmiştir. Ayrıca 16.07.2023 ve 18.07.2023 tarihlerindeki olumsuz hava şartları ve veri kesintisi sebebiyle enerji üretimi diğer günlere kıyasla daha düşük gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.11). Şekil 4.12 incelendiğinde ise deneyler boyunca en yüksek güç seviyesine 17.07.2023 günü saat 13:00'da deneme dizisinden 135,73 kW, kontrol dizisinde ise 132,14 kW ile ulaşılmıştır. Ayrıca, 18.07.2023 tarihinde saat 10:00, 14:00 ve 15:00'te sistem kaynaklı veri kesintisi yaşanmıştır. Önceki çalışmalarda Swain ve diğerleri (2021) 40 W'lık güneş panelini temizlemek için otonom çalışan yeni bir temizleme sistemini analiz etmişler ve temizleme sistemi sayesinde güneş panelinin verimliliği 10 temizleme döngüsünden sonra %3,2 arttırabilmişlerdir. Park ve diğerleri (2019) geliştirdikleri güneş paneli temizleme robotu (30 cm uzunluk × 30 cm genişlik × 4 mm kalınlıkta altıgen ahşap şaseden) ile 164 W'lık

güneş panelinde denemeler yapmış ve güneş panelinin çıkış voltajında ve akımında sırasıyla %8,02 ve %18,78 artış sunmuşlardır.



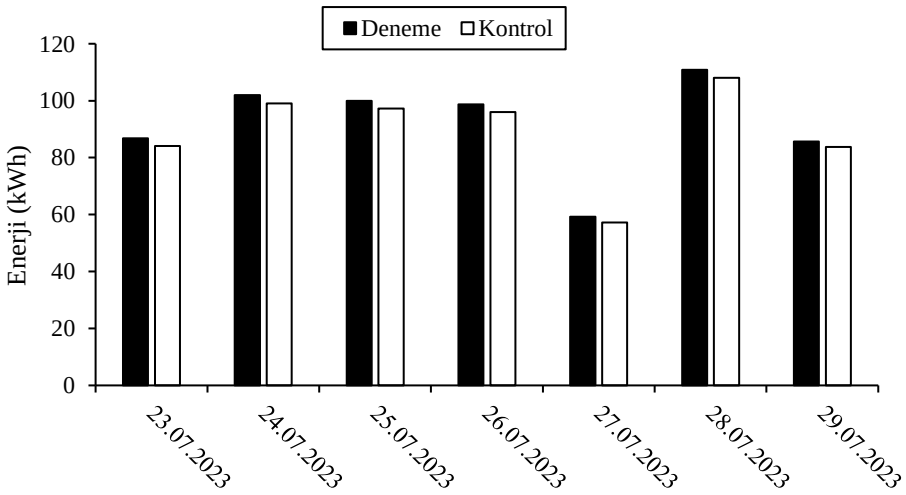
Şekil 4.11. Enerji Kıyaslaması (16.07.2023 - 22.07.2023)



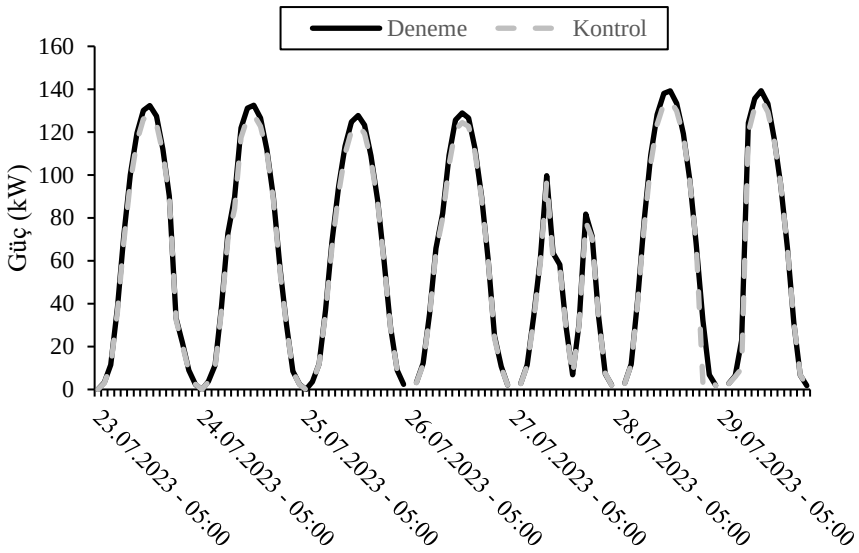
Şekil 4.12. Güç Kıyaslaması (16.07.2023 - 22.07.2023)

4.2.3. Gün Doğumunda Temizleme (10 dk) ve Gün Batımında Temizleme (10 dk)

Gün doğumu ve gün batımında onar dakikalık temizleme koşulları altında gerçekleştirilen ve 23.07.2023 - 29.07.2023 tarihleri arasında yapılan deneylerin deneme dizisinde kontrol dizisine göre sırasıyla %3,18, %3,04, %2,79, %2,79, %3,38, %2,64, %2,28 daha fazla enerji üretimi bulunmuştur. Ortalama olarak ise deneme dizisi kontrol dizisine göre %2,87 fazla enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Deneylerin yapıldığı günlerde en fazla üretim 110,88 kWh ile 28.07.2023 günü deneme dizisinde, en düşük üretim ise 27.07.2023 günü 57,27 kWh olarak kontrol dizisinde gerçekleşmiştir. Ayrıca 27.07.2023 tarihindeki bulutlanma sebebiyle enerji ve güç üretimi diğer günlere kıyasla daha düşük gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.13). Şekil 4.14 incelendiğinde ise deneyler boyunca en yüksek güç seviyesine 29.07.2023 günü saat 13:00'da deneme dizisinden 139,30 kW, kontrol dizisinde ise 135,18 kW ile ulaşılmıştır. Önceki çalışmalarda Parrott ve diğerleri (2018) çalışmasında bir fırça türü tasarlayarak otomatik bir robotik temizleme sistemi kullanmışlardır. Kurulan robotik sistem tarafından günlük olarak temizlenen panellerin performansı ile manuel olarak temizlenen panellerin performansından %1,5 daha verimli bulmuşlardır. Ghodki ve diğerleri (2019) ise 30 W'lık güneş paneli yüzeyindeki toz etkisini azaltmak için robotik kol tasarlamışlardır. Sistem bir motor tarafından çalıştırılmış ve robotik kolun silme hareketleriyle yapılan temizlik sonucunda yaz sezonunda 73 günlük temizlikten sonra sistemin enerji artışında %11,26 artış yaşandığını belirlemişlerdir.



Şekil 4.13. Enerji Kıyaslaması (23.07.2023 – 29.07.2023)

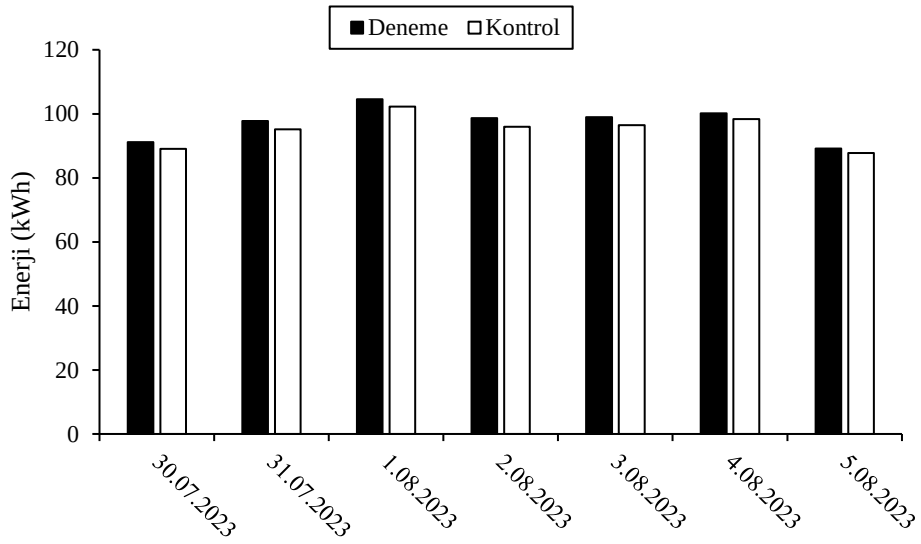


Şekil 4.14. Güç Kıyaslaması (23.07.2023 – 29.07.2023)

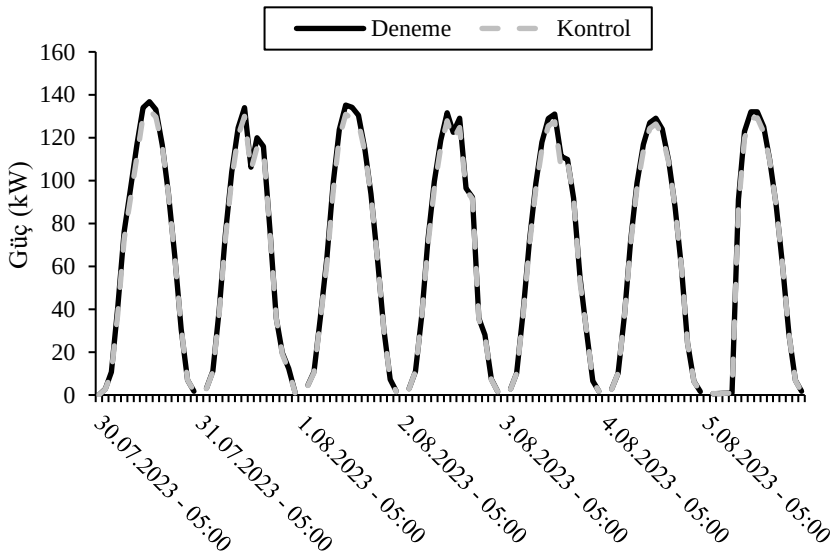
4.2.4. Gün Doğumunda Temizleme (5 dk) ve Gün Batımında Temizleme (5 dk)

Gün doğumu ve gün batımında beşer dakikalık temizleme koşulları altında gerçekleştirilen ve 30.07.2023 - 05.08.2023 tarihleri arasında yapılan deneylerin deneme dizisinde kontrol dizisine göre sırasıyla %2,33, %2,72, %2,33, %2,77, %2,57, %1,79, %1,58 daha fazla enerji üretimi bulunmuştur. Ortalama olarak ise deneme dizisi kontrol dizisine göre %2,30 fazla enerji üretimi gerçekleştirmiştir. Deneylerin yapıldığı günlerde en fazla üretim 104,59 kWh ile 01.08.2023 günü deneme dizisinde, en düşük üretim ise 5.08.2023 günü 87,77 kWh olarak kontrol dizisinde gerçekleşmiştir. 30.07.2023 tarihinden itibaren 01.08.2023 tarihine kadar enerji üretimde artış yaşanmış ve sonraki günlerde hava şartlarından dolayı dalgalı devam ettiği görülmüştür (Şekil 4.15). Şekil 4.16 incelendiğinde ise deneyler boyunca en yüksek güç seviyesine 30.07.2023 günü saat 13:00'da deneme dizisinden 136,78 kW, kontrol dizisinde ise 132,70 kW ile ulaşılmıştır. Önceki çalışmalarda Sugiartha ve diğerleri (2020) yarı otomatik bir silecek kontrol sistemi kullanılarak 120 W'lık güneş paneli yüzeyini su püskürterek temizlemişler ve sonuç olarak siliciyle 30 kez temizleme tekrarının sonucunda %1,77 oranında güç artışı olduğu açıklamışlardır. Nattharith ve Kosum (2022) ise güneş panellerinin temizlenmesi için mobil robot sistemi geliştirmiş ve temizlenmemiş modülün güç çıkışı 246 W iken

temizlenmiş güneş modülünün güç çıkışını 268 W bulmuşlardır. Aylık kıyaslamalarına göre %8,8 daha fazla güç elde etmişlerdir.



Şekil 4.15. Enerji Kıyaslaması (30.07.2023 – 05.08.2023)



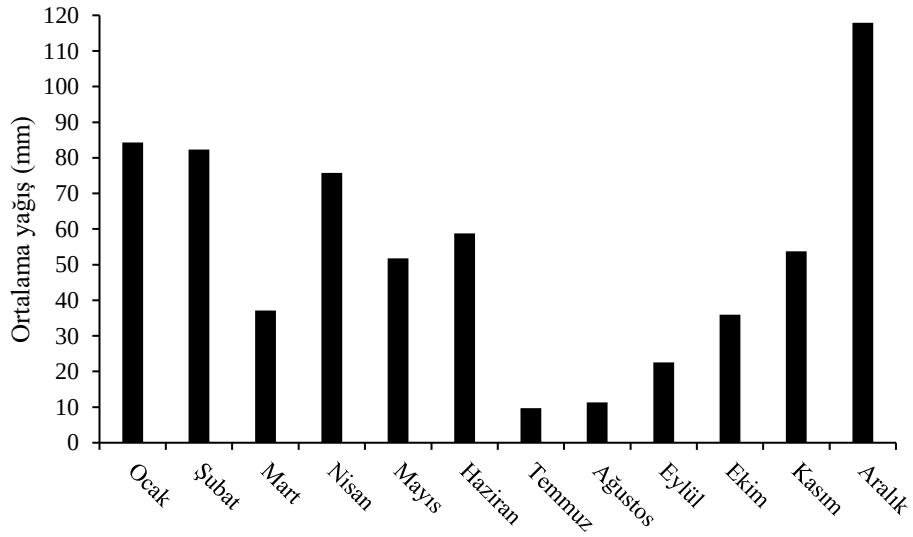
Şekil 4.16. Güç Kıyaslaması (30.07.2023 – 05.08.2023)

4.3. Yağmur Suyu Toplama Verilerinin Analizi

GES'lerde panel temizliği yapılırken panel yüzeyinde leke oluşmaması için herhangi bir kimyasal veya temizleyici kullanılmaması önerilmektedir. GES'lerde bulunan panellerin

yüzey ve eğimi ile yağmur suyunun sürdürülebilir olması su hasadına mümkün kılmaktadır. Ancak yağmur suyu hasadında yüzeye düşen yağışın tamamının depolanması mümkün değildir. Bu nedenle elde edilebilecek su miktarı çatı katsayısı (bu çalışmada FV yüzeyi için "cam'' sabiti kullanılmıştır), filtre etkinlik katsayısı, konuma ait yağış miktarları ve hasadın yapılacağı toplama alanı gibi parametrelere bağlıdır (Uysal ve Çeliktaş, 2023).

Son 3 yılın yağış verileri incelendiğinde en fazla yağış 2021 yılı Aralık ayında 222,6 mm ve en az yağış ise 2021 Temmuz 0 mm olmuştur. Son 3 yılın ortalamasına göre ise en fazla yağış Aralık ayında (117,87 mm) ve en az alan yağış alan ay ise Temmuz (9,67 mm) olmuştur (Şekil 4.17). Bölgenin yaz aylarında daha az yağış alması, enerji üretim potansiyelinin yüksek olması ve tozların sebep olduğu kirlilikten kaynaklanan GES temizliği ihtiyacının ortaya çıkması sebebiyle bir optimizasyona ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle denemeler Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17. Ortalama Yağış Grafiği (2020-2021-2022)

Deneyi yapılan kontrol dizisinin toplam yüzey alanı 133,6 m² olarak ölçülmüştür. Bunun neticesinde Ocak ayında 8,116 m³, Şubat ayında 7,924 m³, Mart ayında 3,573 m³, Nisan ayında 7,295 m³, Mayıs ayında 4,985 m³, Haziran ayında 5,659 m³, Temmuz ayında 0,930 m³, Ağustos ayında 1,090 m³, Eylül ayında 2,175 m³, Ekim ayında 3,458 m³, Kasım ayında 5,171 m³, Aralık ayında 11,344 m³ su hasadı yapılabileceği hesaplanmıştır.

Ayrıca panel temizliği için 10 dk'da 126 lt su kullanılmış ve bu suyun 104,58 litresi paneller altına yerleştirilen kanallar aracılığı ile tekrar toplanarak ve %83'ü geri kazanım sağlanmıştır. 5 dakikalık panel temizliğinde ise 64 lt su kullanılmış ve bu suyun 52,29 litresi paneller altına yerleştirilen kanallar aracılığı ile toplanmış ve yine %83'ü geri kazanım sağlanmıştır. Temizlik için kullanılan su depoya alınarak ve döngüsel kullanım için filtre üzerinden geçirilerek bir sonraki kullanıma hazırlanmıştır.

Uysal ve Çeliktaş (2023), gerçekleştirdikleri çalışmada güneş panellerin temizlenmesi için baz senaryonun yanında 3 farklı senaryo oluşturmuşlardır. Hesaplamalar yapılırken toplanan su miktarının mevcut MWp kapasitesi ve birim MWp başına m^3 olarak kullanılacak su miktarları farklı senaryolarla hesaplayarak oranlamışlardır. Baz senaryo firmanın su tüketimini Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi dosyası kapsamında sunmuş olduğu MWp başına tüketilecek su miktarı olan 3,86 m^3 olarak kabul edilmiş ve diğer senaryolar için seçilen 5 m^3, 7 m^3 ve 10 m^3 değerleri ise temizlik için kullanılan cihazların teknolojik durumu dikkate alınarak oluşturulmuştur. Baz senaryoda temizlik için gereken su miktarını karşılama oranı her gün temizlik yapmaları durumunda yaklaşık %76 oranında bulmuşlardır. Bu oran Senaryo 1'de %59, Senaryo 2'de %42 ve Senaryo 3'de %29'a düştüğünü bulmuşlardır. Şevik ve Aktaş (2022) ise 600 kW kurulu güce sahip GES tesisinde yaptıkları yağmur suyu hasadı çalışmasında, yakınındaki arazide yapılan tarımsal faaliyetin sulama ihtiyacının bir kısmının hasat edilebilir yağmur suyuyla karşılanabileceğini ve inceledikleri GES tesisinde önemli miktarda su toplama potansiyeli bulunduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında GES santralinin küçük bir bölümünde yaptıkları uygulama ile 118 m^3/yıl yağmur suyu hasadı gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca sistemin tüm GES'e uygulandığı durumda 1646 m^3/yıl su hasadına ulaşılabileceğini bildirmişlerdir.

5. SONUÇ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, öncelikle güneş enerjisi ve verimi olumsuz etkileyen toz ve kirlilik sorunu hakkında bilgiler verilmiştir. Edine ili, Uzunköprü ilçesi, Balabanköy Köyü'nde yer alan 100 kWp/85 kWe kurulu gücünde olup polikristal 250 W panellerden (400 adet), 20 kW gücündeki 5 adet eviriciden oluşan GES tesisinin bir dizisinde yenilikçi bir temizleme sistem dizayn edilmiştir. Sistem, programlanan sürelerde pop-up yağmurlama başlıkları aracılığı ile su püskürterek çalıştırılmıştır. Ayrıca yağmur suyu ve temizleme sonrası kullanılan suyun geri toplanması ve filtreden geçirilmesi ile döngüsel kullanımı sağlanmıştır.

Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen proje kapsamında dört aşamalı deneysel uygulama gerçekleştirilmiştir. 9-15.07.2023 tarihleri arasında gün doğumunda 10 dk temizleme, 16-22.07.2023 tarihleri arasında gün doğumunda 5 dk temizleme, 23-29.07.2023 tarihleri arasında gün doğumunda 10 dk ve gün batımında 10 dk temizleme, 30.07.2023 - 05.08.2023 tarihleri arasında gün doğumunda 5 dk ve gün batımında 5 dk temizleme yapılmıştır. Uygulamaların ve iklimsel koşulların GES dizisi üzerinde olan güç ve enerji etkisi incelenmiş ve kontrol grubu verileri ile karşılaştırılmıştır.

Üzerinde temizleme sistemi bulunan GES dizisi ile kontrol grubu GES dizisi deneysel uygulamalar sonrası karşılaştırıldığında, haftalık (23-29 Temmuz 2023) toplam enerjinin en yüksek oransal farkı %2,84 olarak bulunmuştur. Günlük oransal karşılaştırmada en yüksek fark %3,38 olarak 27.07.2023 günü gün doğumunda 10 dk ve gün batımında 10 dk temizleme koşullarında tespit edilmiştir. Tüm deneme süresi boyunca temizleme sistemi bulunan GES dizisinde 09.07.2023 tarihinde saat 12:00'de 140,33 kW güç çıkışı ölçülürken, kontrol grubu GES dizisinden aynı tarih ve saatte 137,56 kW güç çıkışı ölçülmüştür. Bu tarihte temizlenmiş olan GES dizisinde elde edilen güç, kontrol grubuna göre %2 daha fazla olduğu görülmüştür. Deneme yapılan 30 gün boyunca toplamda 8 mm yağış gerçekleştiği görülmüş olup bu süreçte 0,769 m^3 su hasadı yapılabileceği hesaplanmıştır. Temizleme esnasında dakikada 12,6 lt su kullanılmış ve dakikada 10,4 lt su hasat edilmiştir. Yapılan çalışma ile literatürdeki benzerleri karşılaştırıldığında enerji etkin ve su verimli bir temizleme işlemi gerçekleştirdiği görülmüştür.

Prototip olarak tasarlanan bu modelin endüstriyel olarak GES'lerde kullanılması ile santral verimlerinin artırılabileceği görülmüştür. Ayrıca, gerçekleştiren bu çalışmada suyun verimli kullanılması, kullanılan suyun yağmur suyu ile beraber depolanması ve elde edilen daha fazla enerji ile daha fazla arazinin sulanmasına imkân sağlanmış olacaktır. Diğer yandan, küçük ölçekli tarımsal GES uygulamalarında da üreticiler ellerindeki sulama boruları, pop-up yağmurlama başlıkları ve pompaları kullanarak düşük maliyetli bir temizleme sistemi kurmalarına örnek gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Anonim, (2023). Balaban, Uzunköprü. https://tr.wikipedia.org/wiki/Balaban,Uzunk%C3%B6pr%C3%BC (Erişim Tarihi : 20.03.2023).

Abdallah, R., Juaidi, A., Abdel-Fattah, S., Qadi, M., Shadid, M., Albatayneh, A., Çamur, H., Garcia-Cruz, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2022). The effects of soiling and frequency of optimal cleaning of PV panels in Palestine. *Energies*, *15*(12), 4232.

Abu-Naser, M. (2017). Solar panels cleaning frequency for maximum financial profit. *Open Journal of Energy Efficiency*, *6*(3), 80-86.

Adinoyi, M. J., & Said, S. A. (2013). Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*, *60*, 633-636.

Akyazi, Ö., Şahin, E., Özsoy, T., & Algül, M. (2019). A solar panel cleaning robot design and application. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, özel sayı, 343-348.

Alagoz, S., & Apak, Y. (2020). Removal of spoiling materials from solar panel surfaces by applying surface acoustic waves. *Journal of Cleaner Production*, *253*, 119992.

Al Garni, H. Z. (2022). The impact of soiling on PV module performance in Saudi Arabia. *Energies*, *15*(21), 8033.

Al-Jarrah, A. A., Al-Jarrah, R. A., Al-Momani, F. W., & Ababneh, M. (2022). Two-dimensional movement photovoltaic cleaning robot with speed control. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, *11*(3), 151-158.

Almalki, F. A., Albraikan, A. A., Soufiene, B. O., & Ali, O. (2022). Utilizing artificial intelligence and lotus effect in an emerging intelligent drone for persevering solar panel efficiency. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2022*, 7741535.

Chailoet, K., & Pengwang, E. (2019). Assembly of modular robot for cleaning various length of solar panels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *639*, 012014.

Chen, E. Y. T., Ma, L., Yue, Y., Guo, B., & Liang, H. (2018). Measurement of dust sweeping force for cleaning solar panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *179*, 247-253.

Durgut, T. (2015). Güneş panel sistemi için farklı bir metot geliştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.

Ghodki, M. K., Swarup, A., & Pal, Y. (2019). A new IR and sprinkler based embedded controller directed robotic arm for automatic cleaning of solar panel. *Journal of Engineering, Design and Technology*. *18*(4), 905-921.

Erişgin, D., Gürkan, K., & Özcan, H. (2022). Fotovoltaik panel temizliğinde yüzey akustik dalgaları kullanımının fotovoltaik panel performansına etkilerinin incelenmesi. *OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, *2*(2), 137-154.

Haidary, Z., & Kaur, S. (2022). Improvement of solar panel efficiency with automatic cleaning robot. In *Cognitive Informatics and Soft Computing* (pp. 93-104). Springer, Singapore.

IRENA, (2022). Renewable Capacity Statistics 2022. https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022 (Erişim Tarihi : 11.04.2022)

İnan, İ., Akbulut, İ., & Aslan, E. (2018). Enerji sorununun çözümünde yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi. *Türk Dünyası Araştırmaları, 120*(237), 11-40.

Jaiganesh, K., Reddy, K. B. S., Shobhitha, B. K. D., & Goud, B. D. (2022). Enhancing the efficiency of rooftop solar photovoltaic panel with simple cleaning mechanism. *Materials Today: Proceedings*, *51*, 411-415.

Kantaroğlu, Ö. (2009). Yağmur suyu hasadı plan ve hesaplama prensipleri. *IX. Ulusal* Tesisat Mühendisliği Kongresi, 6-9 Mayıs 2009, Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi, İzmir.

Kawamoto, H., Tanabe, J., & Kobayashi, Y. (2021). Airflow-assisted electrodynamic cleaning of sand deposited on solar panels. *Journal of Electrostatics*, *113*, 103618.

Konyalı, C., & Çay, R. D. (2020). Sürdürülebilir yağmur suyu yönetimi kapsamında yeşil altyapı sistemlerinin değerlendirilmesi: Edirne ili örneği. *Kent Akademisi*, *13*(4), 668-687.

Lebbi, M., Touafek, K., Benchatti, A., Boutina, L., Khelifa, A., Baissi, M. T., & Hassani, S. (2021). Energy performance improvement of a new hybrid PV/T Bi-fluid system using active cooling and self-cleaning: Experimental study. *Applied Thermal Engineering*, *182*, 116033.

Li, W., Dong, M., Fan, L., John, J. J., Chen, Z., & Fan, S. (2020). Nighttime radiative cooling for water harvesting from solar panels. *ACS Photonics*, *8*(1), 269-275.

Mahmood, Y. H., Atallah, F. S., & Youssef, A. F. (2020). Studying the weather condition affecting on solar panel efficiency. *Tikrit Journal of Pure Science*, *25*(3), 98-102.

Manju, B., Bari, A., & Pavan, C. M. (2018). Automatic solar panel cleaning system. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *4*(7), 26-31.

Mithhu, M. M. H., Rima, T. A., & Khan, M. R. (2021). Global analysis of optimal cleaning cycle and profit of soiling affected solar panels. *Applied Energy*, *285*, 116436.

Myyas, R. E. N., Al-Dabbasa, M., Tostado-Véliz, M., & Jurado, F. (2022). A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater. *Solar Energy*, *237*, 19-28.

Najeeb, N. S., Soori, P. K., & Kumar, T. R. (2018). A low-cost and energy-efficient smart dust cleaning technique for solar panel system. International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies, 29 Mayıs – 1 Haziran, 2018, Kajang, Malaysia.

Nattharith, P., & Kosum, T. (2022). Development of mobile robot system for monitoring and cleaning of solar panels. *GMSARN International Journal*, *16*, 302-306.

Olorunfemi, B. O., Ogbolumani, O. A., & Nwulu, N. (2022). Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement: a systematic review on smart systems. *Sustainability*, *14*(17), 10920.

Panat, S., & Varanasi, K. K. (2022). Electrostatic dust removal using adsorbed moisture–assisted charge induction for sustainable operation of solar panels. *Science Advances*, *8*(10), eabm0078.

Parrott, B., Zanini, P. C., Shehri, A., Kotsovos, K., & Gereige, I. (2018). Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush. *Solar Energy*, *171*, 526-533.

Park, H., Öztürk, A., Park, H., & Khan, M. U. (2019). Utilization of robotics for solar panel cleaning and maintenance. *Konya Journal of Engineering Sciences, 7*(4), 768-775.

Ponder, M. (2020). Solar panels: self-cleaning vs proactive cleaning. https://www.phocos.com/es/industry-insights-es/solar-panels-self-cleaning-vs-proactive-cleaning/. (Erişim Tarihi : 18.12.2020)

Salman, M. H., Abid, A. J., & Obed, A. A. (2021). Robotic dry cleaner for photovoltaic solar panels: an implemented design that evaluated in Iraq's weather. *Telecommunication Computing Electronics and Control*, *19*(6), 2050-2058.

Sarkın, A. S., Ekren, N., & Sağlam, Ş. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar Energy*, *199*, 63-73.

Sugiartha, N., Ardana, I. G. N., Sugina, I. M., Widiantara, I. B. G., Suparta, I. N., & Adi, I. K. (2020). Preliminary design and test of a water spray solar panel cleaning system. *Journal of Physics*, *1450*(1), 012108.

Swain, M. K., Mishra, M., Bansal, R. C., & Hasan, S. (2021). A self-powered solar panel automated cleaning system: design and testing analysis. *Electric Power Components and Systems*, *49*(3), 308-320.

Şevik, S., & Aktaş, A. (2022). Performance enhancing and improvement studies in a 600 kW solar photovoltaic (PV) power plant; manual and natural cleaning, rainwater

harvesting and the snow load removal on the PV arrays. *Renewable Energy, 181*, 490-503.

Teknik Rapor (2013). Balabanköy tarımsal kalkınma kooperatifi GES

Taşkın, O. (2018). Hibrit (güneş paneli/rüzgâr türbini) enerji sistemi destekli endüstriyel tip bir kurutucunun tasarımı ve performansı, *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Tiwari, S., Rani, P., & Patel, R. N. (2019). Examining the economic viability of a solar panel dust cleaning. IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, 20-22 February, 2019, Coimbatore, India.

Uditha, B. D. (2019). Identify dusts on solar panels using drone still images *Doctoral Dissertation*, University of Colombo School of Computing, Computer Science, Colombo.

Uysal, S., & Çeliktaş, M. S. (2023). Güneş enerjisi santrallerinde yağmur suyu hasadı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12*(2), 334-342.

Yekdem, (2022). Güneş. https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes#:~:text=G%C3%BCne%C5%9F%20enerjisi%2C%20g%C3%BCne%C5%9Fin%20%C3%A7ekirde%C4%9Finde%20yer,az%20bir%20miktar%C4%B1%20D%C3%BCnyaya%20ula%C5%9Fmaktad%C4%B1r. (Erişim Tarihi : 26.08.2022)

Zhang, J., Wang, S., Xin, Y., Hang, M., & Gao, D. (2021). The cleaning force of solar panel based on flexible beam. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Early Access.