

**FOTOVOLTAİK PANELLERDE  
GÖLGE VE TOZ ETKİSİNİN ANALİZİ**

**ANALYSIS OF DUST AND SHADOW EFFECT  
ON PHOTOVOLTAIC MODULES**

**GÖZDE GENÇ**

**PROF. DR. AYNUR ERAY**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

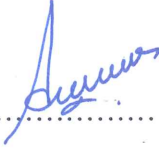
2018

**GÖZDE GENÇ**'in hazırladığı “**Fotovoltaik Panellerde Gölge ve Toz Etkisinin Analizi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüseyin SARI  
Başkan



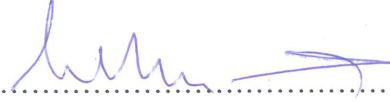
Prof. Dr. Aynur ERAY  
Danışman



Prof. Dr. Semra İDE  
Üye



Doç. Dr. Şule ERGÜN  
Üye



Doç. Dr. Akın BACIOĞLU  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin / raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. <sup>(1)</sup>
- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... Ay ertelenmiştir. <sup>(2)</sup>
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. <sup>(3)</sup>

26/09/2018

(İmza)   
Gözde Beng

Öğrencinin Adı SOYADI

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir\*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

\* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eslere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11/09/2018



GÖZDE GENÇ

## ÖZET

### FOTOVOLTAİK PANELLERDE GÖLGE VE TOZ ETKİSİNİN ANALİZİ

**Gözde GENÇ**

**Yüksek Lisans, Temiz ve Tükenmez Enerjiler**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aynur ERAY**

**Eylül 2018, 103 sayfa**

Bu tez çalışmasında, 5 Watt gücündeki mini fotovoltaik (FV) panellerde tozlanma ve gölgelenme etkisi, dış ortam saha deneyleri ve iç ortam laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Dış ortam saha deneylerinde, Hacettepe Üniversitesi Güneş Evi bahçesinde 6°-50° aralığında 5 farklı eğim açısında yerleştirilen mini FV paneller, özdeş konumda, elle temizlenmiş ve temizlenmemiş olarak iki gruba ayrılmıştır. Havanın açık ve güneşli olduğu günlerde öğle saatlerinde her bir panel için kısa devre akımı, sıcaklık ve ışınım değerleri ölçülerek ve kısa devre akım değerleri 1000 W/m<sup>2</sup> ve 25°C standart test koşullarına göre normalize edilerek, günlük tozlanma ve birikimli tozlanma etkisi incelenmiştir. Günlük tozlanma etkisinde, temizlenmiş panellerin kısa devre akım değerinin temizlenmemiş panellerdekinden fazla olduğu görülmüş ve buradan elle yapılan temizliğin yüzeydeki tozları temizleyerek panel performansını arttırdığı sonucuna varılmıştır. Birikimli tozlanmada, eğim açısı arttıkça tozlanma kaybının azaldığı görülmüştür. Elle temizlemenin yanı sıra, yağmur nedeniyle oluşabilecek doğal temizlemenin de etkisi incelenmiştir. Yağış ile tozlanma kaybının azalması, yağmurun temizleme etkisini göstermesine karşın, bazı yağışlı günlerde tozlanma kaybında meydana gelen artışın yağışın tozu temizlemek yerine toz birikimine neden olması ile açıklanmıştır.

İç ortam laboratuvar deneylerinde, yapay tozlanma ve yapay gölgeleme deneyleri yapılmıştır. Yapay tozlanma için, toz haline getirilmiş kırmızı kil, sarı silt toprak ile siltli kum örnekleri

kullanılmıştır. Farklı miktarlarda tozlar panel üzerine homojen olarak serpiştirilerek, FV panellerin aydınlatma altında akım-gerilim (I-V) karakteristikleri incelenmiştir. Toz yoğunluğu arttıkça üç farklı tozlanma malzemesi için de gücün azaldığı gözlenmiştir. Deneyler 6°-40° eğim açısı aralığı için gerçekleştirilmiş ve eğim açısı arttıkça panel üzerindeki toz miktarının azaldığı ve artan toz yoğunluğu ile normalize güç değerinin azaldığı gözlenmiştir. Kırmızı kil toprağın su ile karıştırılması sonucu oluşan karışım, panel üzerine püskürtülmüş ve aynı miktardaki kırmızı kil toprağa göre daha fazla güç elde edildiği görülmüştür. Laboratuvar koşullarında gölgelenme etkisinin incelenmesi için karton, pelür ve yağlı kağıt ile homojen gölgelenme ve farklı doğrultularda kısmi gölgelemeler yapılarak panellerin aydınlatma altında I-V karakteristikleri incelenmiştir. Geçirgenliği daha yüksek olan yağlı kağıt ile yapılan gölgelenme koşullarında, karton ve pelür kağıda oranla daha fazla güç değerleri elde edilmiştir. Homojen gölgeleme koşulunda, artan gölgelenme oranı ile I-V, P-V eğrilerinin lineer olarak kaymasına karşın, kısmi gölgelemede köprüleme diyotu içermeyen panel davranışı incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** fotovoltaiik sistem, tozlanma kaybı, gölgelenme, kısmi gölgelenme, homojen gölgelenme, yapay tozlanma

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF DUST AND SHADOW EFFECT ON PHOTOVOLTAIC MODULES**

**Gözde GENÇ**

**Master of Science, Clean Renewable Energy**

**Supervisor: Prof. Dr. Aynur ERAY**

**September 2018, 103 Pages**

In the present study, the effect of dust deposition and shade on 5 Watt mini photovoltaic (PV) panels was analyzed through outdoor fieldwork and indoor laboratory experiments. For the outdoor field tests, two groups of mini PV panels were set up at five different angles within a range of 6°–50° in the Hacettepe University Solar House garden, with one group being manually cleaned and the left for dust to accumulate. The effects of daily dust deposition and accumulated dust deposition were analyzed by measuring the short circuit current, the temperature and radiation values for each panel at noon on clear and sunny days, normalizing the short circuit current values to 1000 W/m<sup>2</sup> and 25°C standard test conditions. It was observed that the short circuit current value of the cleaned panels was higher than the uncleaned panels under the effect of the daily dust deposition, and that after cleaning the dust from the surface, panel performance improved. It was also observed that the level of dust deposition reduced as the angle of tilt was increased. In addition to manual cleaning, the effect of natural cleaning through such means as rainfall was also analyzed. Increase occurring in dust deposition on some rainy days shows that rainfall may cause the accumulation of dust instead of cleaning the dust. In the indoor laboratory experiments, artificial dust deposition and artificial shading experiments were carried out using powdered red clay, yellow silty soil and silty sand samples as artificial dust depositions. The current-voltage (I-V) characteristics of the PV panels under illumination were analyzed by scattering various amounts of dust onto the panels in a homogeneous manner, and it was observed that the obtained power decreased as the density of

the three different dust deposition materials increased. Experiments were conducted for the 6°–40° tilt angle range, and it was observed that as the tilt angle increased, the amount of dust on the panel decreased, and that the normalized power value decreased with increased dust density. Red clay soil was mixed with water and sprayed onto the panel, and it was found that more power was obtained than with the same amount of red clay soil but without water. In order to analyze the effect of shade under laboratory conditions, the I-V characteristics of the panels under illumination were analyzed by creating homogenous shading and partial shading in different directions using cardboard, tissue paper and waxed paper. Under the shaded conditions simulated using waxed paper, which has high permeability, higher power values were obtained than with cardboard and tissue paper. Although the I-V, P-V curves linearly shift as the shading rate increases under homogenous shading conditions, the panel behavior without bridging diode at partial shading is analyzed.

**Key words:** photovoltaic system, soiling loss, shading, partial shading, homogenous shading, artificial dust deposition



## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleşmesinde bilgi ve önerilerinin yanı sıra ilgi ve hoşgörüsünü benden hiç esirgemeyen tez danışmanı Sayın Hocam Prof. Dr. Aynur ERAY'a,

Çalışmam boyunca, başta deney düzeneğinin kurulumu ve veri alımı çalışmaları olmak üzere etkin bilgi ve yardımları ile bana destek olan Sayın Hocam Sermet ERAY'a,

tez çalışmam boyunca bana tanıdıkları zaman ve çalışma ortamından dolayı şirketim Ortana Elektronik Yazılım Taahhüt San ve Tic. A.Ş.'ye, tüm iş arkadaşlarıma ve manevi desteğinden dolayı müdürüm Sayın Özcan TEZCAN'a,

mekanik aksamın yapımı sırasında, emeği geçen Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Mekanik Atölye alışanı Uygur TOMBULOĞLU'na,

yapay tozlanma deneyleri için gereken malzemeler konusunda bilgi ve tecrübelerini aktaran Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Adil BİNAL'a ve malzemelerin hazırlanışı sırasında emeği geçen Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı alışanı Ahmet BAY'a,

teknik ve manevi destek olan arkadaşlarım Alaaddin CİNDARİK, Taha Alperen KEŞKÜŞ, Selin CANTÜRK ve Erdem ORUÇ'a,

Çalışmam boyunca teknik bilgi ve birikimleri ile bana destek olan Türker ÖZTÜRK'e, tecrübeleri ve fikirleri ile desteğini her zaman yanında hissettiğim sevgili ablam Deniz ÖZTÜRK'e,

kendilerinden aldığım tüm zaman ve gösteremediğim ilgiye rağmen gösterdikleri maddi ve manevi destek, anlayış, sabır ve sevgileri için değerli annem, babam, ağabeyim, Aslı, teyzem ve biricik yeğenlerim Doruk ve Ece'ye,

teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER .....	8
2.1. Fotovoltaik Sistemlerde Performans .....	8
2.2. Fotovoltaik Sistemlerde Tozlanma Olayı ve Etkileri .....	9
2.3. Fotovoltaik Sistemlerde Gölgeleme Olayı ve Etkileri .....	15
3. DENEYSEL KESİM.....	17
3.1. Dış Ortam Saha Deneyleri.....	17
3.1.1. Dış Ortam Saha Deneyleri İçin Deneysel Düzenek .....	17
3.1.2. Dış Ortam Saha Deneyleri için Deney Yöntemi .....	21
3.1.2.1. Akım, Sıcaklık ve Işınmı Verilerinin Alınması .....	21
3.1.2.2. Fotovoltaik Paneller Üzerine Düşen Güneş Işınmının Belirlenmesi .....	22
3.1.2.3. Günlük Tozlanma ve Birikimli Tozlanma Kaybının Hesabı.....	23
3.2. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri .....	24
3.2.1. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri için Deneysel Düzenek .....	24
3.2.2. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri için Deney Yöntemi.....	25
3.2.2.1. Yapay Tozlanma .....	25
3.2.2.2. Yapay Gölgeleme .....	30
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
4.1. Dış Ortam Saha Deneyleri İçin Deneysel Bulgular ve Tartışma.....	37
4.1.1. Eğim Açısının Etkisi .....	37
4.1.2. Günlük Tozlanma Etkisi.....	49
4.1.3. Birikimli Tozlanma Etkisi .....	51
4.2. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri İçin Deneysel Bulgular ve Tartışma .....	55
4.2.1. Yapay Tozlanma Deneylerine Ait Bulgular .....	55

4.2.2. Yapay Gölge Deneylerine Ait Bulgular .....	63
4.2.2.1. Kısmi Gölgeleme Bulguları .....	63
4.2.2.2. Homojen Gölgeleme Bulguları .....	73
5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI VE ÖNERİLER.....	77
6. KAYNAKLAR.....	81
EKLER DİZİNİ.....	89
EK1: FV Panellerin Elektriksel Karakterizasyonu.....	89
EK2: Güneş Açıları .....	94
EK3: FV Paneller İçin Optimum Eğim Açısının Kuramsal Olarak Belirlenmesi.....	96
EK4: 25.07.2018 Tarihli Toz Taşınım Haritası.....	101
ÖZGEÇMİŞ .....	103

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1:</b> Toz örneklerine ait işlem öncesi ve işlem sonrası görüntüleri ve hesaplanan yoğunlukları .....	27
<b>Çizelge 3.2:</b> Düşey ve yatay gölgeleme için tanımlanan durumlar .....	31
<b>Çizelge 3.3:</b> Kapalı göze sayısının değiştirilmesi için tanımlanan durumlar .....	32
<b>Çizelge 3.4:</b> Yaprak ile oluşturulan gölge durumları.....	33
<b>Çizelge 3.5:</b> Panelin tamamı veya bir kısmının üzerine kapatılan pelür, yağlı kağıtlar ve yapraklarla oluşturulan gölgeleme için tanımlanan durumlar ve ışınım değerleri.....	36
<b>Çizelge 4.1:</b> Günlük temizlemenin eğim açısına göre değerlendirilmesi .....	50

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1: Taşıyıcı sistem .....	17
Şekil 3.2: Panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanları .....	17
Şekil 3.3: Panel montaj elemanları .....	18
Şekil 3.4: Uygun açılarda bükülmüş panel montaj elemanları .....	18
Şekil 3.5: Panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanlarının yerleştirilmesi .....	18
Şekil 3.6: Bükülen panel montaj elemanlarının panellere montajı .....	19
Şekil 3.7: Bağlantı kutusunun görünümü .....	19
Şekil 3.8: Bağlantı kutusunun taşıyıcı sistem üzerine montajı .....	20
Şekil 3.9: Kablolama işleminin ardından bağlantı kutusunun görünümü.....	20
Şekil 3.10: Panel kablolama işlemi sonrası taşıyıcı sistemin görünümü .....	21
Şekil 3.11: Fotovoltaik paneller üzerine düşen güneş ışınımının belirlenmesi [86].....	23
Şekil 3.12: İç ortam deney düzeneği.....	24
Şekil 3.13: Toprak ve kum malzemelerin toz hale getirilmesi sırasında .....	25
Şekil 3.14: Kum örneğin fırında kurutulması işlemi .....	26
Şekil 3.15: Farklı miktarlarda serpiştirilen farklı cins tozların gösterimi .....	28
Şekil 3.16: Toprak su karışımının panel üzerine püskürtülmesi.....	29
Şekil 3.17: Farklı yönler için oluşturulan gölgelerin tanımlanması.....	30
Şekil 3.18: Paneldeki a) Kablo gölgesi [87] b) Kablo gölgesi benzetimi .....	34
Şekil 3.19: Panel üzerinde oluşabilecek baca gölgesi [88].....	34
Şekil 3.20: Panel üzerinde oluşturulan baca gölgesi.....	35
Şekil 3.21: Farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan gölgelenme durumları için pıranometre ile ışınım ölçümü.....	36
Şekil 4.1: Mart ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi.....	38
Şekil 4.2: Mart ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	38
Şekil 4.3: Nisan ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	39
Şekil 4.4: Nisan ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	39
Şekil 4.5: Mayıs ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	40
Şekil 4.6: Mayıs ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	40
Şekil 4.7: Temmuz ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	41
Şekil 4.8: Temmuz ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	41
Şekil 4.9: Ağustos ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	42
Şekil 4.10: Ağustos ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	42

<b>Şekil 4.11:</b> Eylül ayı için teorik ışıınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	43
<b>Şekil 4.12:</b> Eylül ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	43
<b>Şekil 4.13:</b> Ekim ayı için teorik ışıınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	44
<b>Şekil 4.14:</b> Ekim ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	44
<b>Şekil 4.15:</b> Temmuz 2018 için teorik ışıınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi .....	45
<b>Şekil 4.16:</b> Temmuz 2018 için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi .....	45
<b>Şekil 4.17:</b> Beytepe için Güneşyol çizeneği [89].....	46
<b>Şekil 4.18:</b> Teorik ışıınım değerlerinin eğim açısına göre değişiminin günlere göre dağılımı.	47
<b>Şekil 4.19:</b> Ölçülen ışıınım değerlerinin eğim açısına göre değişiminin günlere göre dağılımı .....	47
<b>Şekil 4.20:</b> Ölçülen akım değerlerinin eğim açısına göre değişiminin günlere göre dağılımı.	48
<b>Şekil 4.21:</b> Panelin eğim açısı 6° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi .....	51
<b>Şekil 4.22:</b> Panelin eğim açısı 15° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi .....	52
<b>Şekil 4.23:</b> Panelin eğim açısı 30° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi .....	52
<b>Şekil 4.24:</b> Panelin eğim açısı 40° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi .....	53
<b>Şekil 4.25:</b> Panelin eğim açısı 50° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi .....	53
<b>Şekil 4.26:</b> Temmuz 2018 verilerine göre eğim açısı ile tozlanma kaybının değişimi.....	54
<b>Şekil 4.27:</b> Eğim açısı 6° iken farklı M gram tozlara ait I-V eğrileri .....	56
<b>Şekil 4.28:</b> Eğim açısı 6° iken farklı M gram tozlara ait P-V eğrileri .....	56
<b>Şekil 4.29:</b> Eğim açısı 6° iken farklı M/3 gram tozlara ait I-V eğrileri .....	57
<b>Şekil 4.30:</b> Eğim açısı 6° iken farklı M/3 gram tozlara ait P-V eğrileri .....	57
<b>Şekil 4.31:</b> Eğim açısı 6° iken farklı M/12 gram tozlara ait I-V eğrileri .....	58
<b>Şekil 4.32:</b> Eğim açısı 6° iken farklı M/12 gram tozlara ait P-V eğrileri .....	58
<b>Şekil 4.33:</b> Eğim açısı 6° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi.....	59
<b>Şekil 4.34:</b> Eğim açısı 10° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi.....	60
<b>Şekil 4.35:</b> Eğim açısı 20° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi.....	60
<b>Şekil 4.36:</b> Eğim açısı 25° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi.....	61
<b>Şekil 4.37:</b> Eğim açısı 40° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi.....	61
<b>Şekil 4.38:</b> Toprak su karışımının farklı miktar ve durumlarında alınan I-V eğrileri .....	62
<b>Şekil 4.39:</b> Toprak su karışımının farklı miktar ve durumlarında alınan P-V eğrileri.....	62
<b>Şekil 4.40:</b> Düşey yönde oluşturulan gölgelere ait I-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karışılaştırılması .....	63
<b>Şekil 4.41:</b> Düşey yönde oluşturulan gölgelere ait P-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karışılaştırılması .....	64
<b>Şekil 4.42:</b> Yatay yönde oluşturulan gölgelere ait I-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karışılaştırılması .....	64

<b>Şekil 4.43:</b> Yatay yönde oluşturulan gölgelere ait P-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması .....	65
<b>Şekil 4.44:</b> Köşegen doğrultusunda oluşturulan gölgelere ait I-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması .....	65
<b>Şekil 4.45:</b> Köşegen doğrultusunda oluşturulan gölgelere ait P-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması .....	66
<b>Şekil 4.46:</b> Farklı yönlerdeki gölgelenmeler için gölgeli alan yüzdesinin maksimum güç ile değişimi .....	66
<b>Şekil 4.47:</b> Yatay gölgelemede farklı gölgeleme durumlarının I-V eğrileri.....	67
<b>Şekil 4.48:</b> Düşey gölgelemede farklı gölgeleme durumlarının I-V eğrileri .....	68
<b>Şekil 4.49:</b> Düşey gölgeleme için karton ve pelür kağıtlar ile yapılan gölgelerin I-V eğrileri	68
<b>Şekil 4.50:</b> Gölgelemenin panel üzerinde dağıtıldığı durumlar için I-V eğrileri.....	69
<b>Şekil 4.51:</b> Gölgelemenin panel üzerinde dağıtıldığı durumlar için P-V eğrileri.....	70
<b>Şekil 4.52:</b> Yapraklar ile yapılan düşey gölgeleme için I-V eğrileri .....	71
<b>Şekil 4.53:</b> Yapraklar ile yapılan yatay gölgeleme için I-V eğrileri .....	71
<b>Şekil 4.54:</b> Kuru yaprak ile yapılan gölge sonucu I-V eğrisi.....	72
<b>Şekil 4.55:</b> Kablo gölgesi benzetimi için I-V eğrisi.....	72
<b>Şekil 4.56:</b> Baca gölgesi benzetimi için I-V eğrisi .....	73
<b>Şekil 4.57:</b> Pelür kağıt sayısının değişimi ile oluşan I-V eğrileri .....	74
<b>Şekil 4.58:</b> Pelür kağıt sayısının değişimi ile oluşan P-V eğrileri .....	74
<b>Şekil 4.59:</b> Yağlı kağıt sayısının değişimi ile oluşan I-V eğrileri.....	75
<b>Şekil 4.60:</b> Yağlı kağıt sayısının değişimi ile oluşan P-V eğrileri.....	75
<b>Şekil 4.61:</b> Pelür kağıt ve yağlı kağıt sayısı ile ışınımın değişimi .....	76

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

I	Akım (A)
$I_{kd}$	Kısa devre akımı (A)
V	Gerilim (V)
$V_{ad}$	Açık devre gerilimi (V)
G	Işınım ( $W/m^2$ )
P	Güç (W)
$\beta$	Eğim açısı ( $^{\circ}$ )
GTF	Günlük tozlanma faktörü
TK	Tozlanma kaybı
$\rho$	Toz yoğunluğu ( $g/cm^3$ )

### Kısaltmalar

IRENA	International Renewable Energy Agency
FV	Fotovoltaik
STK	Standart Test Koşulları



# 1. GİRİŞ

Fosil yakıtların sınırlı kaynakları nedeniyle, günümüzde enerji ile ilgili olarak kaynakların verimli ve etkin kullanımını, kirlenici salınımların çevresel etkilerinin incelenmesi gibi farklı çözüm arayışları güncelliğini korumuş [1] ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır [2][3].

Rüzgar, biyokütle, jeotermal gibi birçok farklı yenilenebilir enerji türü olmasına karşın, güneş enerjisinin, hem gelişmekte olan hem de gelişmiş ülkelere temiz ve yenilenebilir enerji sağlamada önemli rol oynaması beklenmektedir [4]. Güneş enerjisinin dünyada geldiği yerin anlaşılabilmesi için, International Renewable Energy Agency (IRENA) verileri incelendiğinde, dünyada, 2008 yılında 15165 MW olan güneş enerjisi kapasitesinin, 2017 yılında 390625 MW'a çıktığı görülmektedir [5]. IRENA'nın 2017 yılı verilerine göre, güneş enerjisi kurulu gücüne göre ülke sıralaması, sırasıyla, Çin (130645,8 MW), Japonya (49040 MW), Amerika (43031 MW), Almanya (42396 MW), İtalya (19698,1 MW), Hindistan (17872,8 MW), İngiltere (12760 MW), Fransa (8195 MW), İspanya (7278 MW), Avustralya (5934,6 MW) olarak sıralanmaktadır. Türkiye, 3421,7 MW ile 13. sırada yer almaktadır [6].

Ülkemiz, güneş enerjisi bakımından uygun bir coğrafi konuma sahiptir. Türkiye'de güneş enerjisi ilk kez, 2014 yılında kurulu güç pastası içindeki yerini alabilmiştir. Türkiye'de yaklaşık 50 MW lisanssız güneş santrali olduğu bilinmektedir [7]. TEİAŞ'ın son yılları içeren raporundaki istatistikleri incelendiğinde, güneş enerjisi için kurulu güç 2014 yılında 40,2 MW iken, 2015 yılında 248,9 MW'a, 2016 yılında 832,5 MW'a ulaşmıştır [8] ve 2017 yılı için 3421,7 MW kurulu güç ile Avrasya'da ilk sırada olduğu görülmektedir [6].

Güneş enerjisi teknolojileri; üretimde kullanılan malzeme, uygulanan metot ve teknolojik yapı olarak çeşitlilik içerse de, ısıl güneş teknolojileri ve fotovoltaik teknolojileri olarak gruplandırılmaktadır. Isıl güneş teknolojilerinde, güneş enerjisinden ısı elde edilerek, ısı hem doğrudan hem de elektrik üretimi için kullanılabilir. Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirip güneş enerjisinden elektrik üretimi amacıyla kullanılan fotovoltaik güneş teknolojilerindeki fotovoltaik hücrelerin üretildiği malzemeler arasında kristal silisyum, galyum arsenit, amorf silisyum, kadmiyum tellürid gibi inorganik malzemeler ve organik malzemeler bulunmaktadır [7].

Fotovoltaik sistemlerin verimliliği sıcaklık artışı ve ışınımdaki azalmanın yanı sıra, kablo kayıpları ve evirici kayıpları nedenleriyle azalmaktadır [9]. Bu parametrelere ek olarak panel

üzerinde biriken tozlanma, kuş pislikleri, su lekeleri ve gölgelenme de sistem verimini düşürebilir [10][11][12].

Panelde biriken tozun, panelin yerleştiği yüzeyin yatayla yaptığı açı olan panelin eğim açısı ile değişimini ve panelde oluşan gölgelenmenin verimde yaratacağı etkiyi araştırmak amacıyla literatürde yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır [10-40]. Bu çalışmaların kısa özeti aşağıda verilmiştir:

- Ndiaye ve arkadaşlarının (2013) Senegal Dakar Üniversitesi'nde yaptıkları çalışmada, tek kristal silisyum ve polikristal silisyumdan oluşan paneller üzerindeki toz etkisi karşılaştırılmıştır. Paneller 1 sene boyunca temizlenmeden, AM 1,5 koşulları altında I-V ve P-V eğrileri oluşturularak performans parametreleri ölçülmüştür. Araştırma sonuçlarına göre, paneller toz ile kaplıyken tek kristal panel için maksimum çıkış gücünün polikristal panele göre daha az olduğu görülmüştür [10].
- Jiang ve arkadaşları (2011) ise hızlandırılmış tozlanma için, bir test odası içine toz püskürterek panel üzerinde toz birikmesi sağlanmış ve ölçümler alınmıştır. Deneyde tek kristal, polikristal ve amorf silisyum kullanılmış ve polikristal panelin üzeri cam dışında bir malzemeye kaplanmıştır. Çalışma sonucunda kullanılan malzemenin üzerine daha fazla toz çektiği gözlenmiştir [13].
- Gholami ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, temizlenmiş panellere ait akım değerinin temizlenmemiş panellere göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır [14].
- Xu ve arkadaşlarının (2017) yaptıkları çalışmada ise toz ile optimum eğim açısının değişimi incelenmiştir. Enerji yoğunluğunun, eğim açısı artışı ile optimum açıya kadar arttığı, optimum açıdan sonra azaldığı belirtilmiştir [15].
- Said ve arkadaşlarının (2014) yaptıkları çalışmada, 8 farklı eğim açısında yerleştirilen 2 farklı panel için I-V eğrileri çizilmiş ve çıkış gücüne olan etkileri karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, eğim açısı arttığında toz yoğunluğu azalmaktadır [11].
- Qasem ve arkadaşlarının (2011) yaptıkları çalışmada ise eğim açısının tozlanmaya etkisinin yanı sıra, panellerin yerleşiminin etkisi de araştırılmıştır. Panellerin dikey veya yatay yerleştirilmesinin verime ve gölgelenme üzerine etkisi gözlenmiştir. Araştırmada, ince film panellerde dikey konumlandırma ile silikon panellere göre gölgelenmeden daha az etkilendikleri sonucuna varılmıştır [12].
- Powers ve arkadaşları (2010) ise yaptıkları çalışmada farklı eğim açıları için panel üzerinde kar varken, yıllık enerji kayıplarını belirlemişlerdir. Düzenekte, polikristal silisyumdan oluşan paneller dikey olarak 3 farklı eğim açısında yerleştirilmiş ve 1000

W/m<sup>2</sup> altında ölçümler yapılmıştır. Araştırma sonucuna göre, eğim açısı arttıkça aylık enerji kaybının azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca en fazla enerji kaybının ocak ayında olduğu sonucuna varılmıştır [16].

- Micheli ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, uzun kuru bir mevsim veya tozlu bir dönem sonrası meydana gelen yağışın, diğer dönemlerdeki yağışa göre panel üzerindeki kirlilik oranını arttırdığı sonucuna varmışlardır. Kirlilik oranının, yağmurlu kış ayları için kuru yaz aylarından fazla olduğu belirtilmiştir [17].
- Abdeen ve arkadaşlarının (2017) çalışmasında ise artan eğim açısı ile birlikte gücün azaldığı belirtilmiştir [18]. Benzer şekilde Mohammed ve arkadaşları, temizlenmiş panellere ait gücün, temizlenmemiş panellere göre daha fazla olduğu sonucuna varmıştır [19]
- Jose Cano'nun, 2011 yılında yaptığı çalışmada, eğim açısı yataylaştıkça kirlenme etkisinin arttığını ve artan eğim açısı ile birlikte tozlanma kaybının azaldığını belirtmiştir. Aynı çalışmada, eğim açısının mevsimsel değişimlerden etkilendiği, toz birikmesini engelleyen yağmur ve rüzgar olmadığında ışıma değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Cano, yaptığı bu çalışmada, tozlanma kaybı ifadesini tanımlamış ve yağmur ile tozlanma kaybının azaldığı sonucuna varmıştır [20]. Benzer şekilde, Virkar (2017), eğim açısı arttıkça tozlanma kaybının azaldığını gözlemiştir [21].
- Akif Karanfil'in Bilecik'te yaptığı çalışmada, eğim açısı arttıkça panel gücünün azaldığı belirtilmiştir [22].
- Alonso-García ve arkadaşları (2006), gölgeleme etkisi üzerine bir modelleme yapmışlardır. 18 gözeden oluşan bir panel için gölgede kalan göze sayısı değiştirilerek her biri için I-V eğrileri çizilmiştir. Gölgede kalan göze sayısı fazla olduğunda eğrinin idealden uzaklaştığı gözlenmiştir. Ayrıca, hücre üzerinde gölgelenme oranının artmasının gölge altındaki hücre sayısındaki artışın I-V eğrisinde daha yüksek deformasyonlara sebep olduğu belirtilmiştir [23].
- Ramaprabha ve arkadaşlarının (2009) yaptıkları çalışmada, panellerdeki gölgeleme oranı arttıkça, gölgeli hücreler tarafından dağıtılan gücün de arttığı sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışmada, ayrıca, düzgün olmayan aydınlatmada önemli bir güç kaybının olduğu belirtilmiştir [24].
- Dezso ve Yahia'nın 2009 yılında yaptıkları çalışmada ise, gölgelenmiş bir güneş panelinin I-V ve P-V eğrileri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Bunun için iki gölgeli gözenin aynı dizide olduğu ve farklı dizilerde olduğu iki durum incelenmiştir.

Aynı dizideki iki göze gölge altında olduğunda, gölgeli hücrelerin, dizideki tüm gözeler gölge altındaymış gibi bir etki yaratmasına neden olduğu ve panelin çıkış akımını azalttığı gözlenmiştir. Ancak, paralel bağlı köprüleme (bypass) diyotu sayesinde gücün arttığı belirtilmiştir. İkinci durumda ise, her bir dizide birer göze gölge altında bırakılmıştır. Gölge altındaki gözeler, çıkış gücü aynı miktarda azalacağından paralel bağlı köprüleme diyotlarının etki etmediği görülmüştür. Bu iki durum için güç, sırasıyla, %50 ve %70 azalmıştır. Buradan, maksimum güç üretiminin, panelin gölgelenmemiş göze oranıyla orantılı olmayabileceği sonucuna varılmıştır [25].

- Mobellegh ve Jiang'ın yaptığı çalışmada (2014) ise farklı ışınım altında I-V eğrileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, gölgelenmiş panelin I-V eğrisi çizilmiş ve ideal I-V eğrisinden farkı yorumlanmıştır [26].
- Singh, 2011 yılında farklı gölgeleme modelleri altında MATLAB'da modelleme yaparak sonuçları PSPICE programında karşılaştırmıştır. Ayrıca, gölge etkisinden dolayı güneş gözelerinin ters yönde çalışmasını engellemek için köprüleme diyot kullanarak modelleme yapılmıştır. Modelleme sonucunda, köprüleme diyot kullanımının dolum faktöründe artışı sağladığı gözlenmiştir [27].
- Chaw'ın 2015 yılında yaptığı çalışmada, farklı yönelimlerle yaratılmış gölgeleme etkisi için I-V eğrileri çizilmiştir ve yönetime bağlı olarak bozulmalar olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca, 9x9 sayı matrisi ile yapılan Su-Do-Ku bulmacasından yararlanılarak oluşturulan SuDoKu modeli kullanılmıştır. Bu modele göre, gölgeli alanlar panelin üzerinde farklı bölgelere dağıtılarak değişim incelenmiştir. Modelin kullanılmasında amaç, farklı konfigürasyonlar ile verimin artırılmasıdır. Ancak kullanımı, yüksek maliyet ve modelin yalnızca 9x9 matris ölçeğinde kullanılması nedeniyle sınırlı olmaktadır [28].
- Rani ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, benzer şekilde, Su-Do-Ku modeli kullanılarak farklı ışınım altında kısmi gölgeleme etkisi incelenmiş ve farklı modeller için karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma sonucunda, Su-Do-Ku modeli ile gölgelemenin dizi üzerindeki etkisinin dağıtıldığı, bir sıradaki baskın gölgelendirmeyi azalttığı ve P-V gücünün arttığı belirtilmiştir [29].
- Rao ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları benzer çalışmada Su-Do-Ku modeli incelenmiştir. Çalışma sonucunda, bu model ile gücün arttığı gözlenmiş, daha büyük diziler için alt diziler oluşturularak bu modelin uygulanabileceği belirtilmiştir [30].

- Dezso ve Yahia'nın yaptıkları çalışmada, seri bağlı iki gözenin farklı ışınımlar altındaki P-V eğrileri köprüleme diyotu varlığında ve köprüleme diyotu bulunmadığı durum için çizilmiştir. Her iki durumda da, paneller gölge altındayken güç eğrisi, gölgesiz duruma göre azalmıştır. Panelde köprüleme diyotu varken, P-V eğrisinde bir ya da birden fazla maksimum olduğu gözlenirken, köprüleme diyot yokken tek bir maksimum bulunmaktadır [25]. Benzer şekilde, Seyedmahmoudian'ın 2013 yılında yaptığı çalışmada, köprüleme diyotu olan ve olmayan paneller için maksimum güç noktalarının farklı olacağı sonucuna varılmıştır [31].
- Priyanka'nın 2011 yılında yaptığı çalışmada ise, köprüleme diyot kullanımı ile çıkış gücünün köprüleme diyotların kullanılmadığı duruma göre daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Priyanka, ayrıca, köprüleme diyotlu paneller için P-V eğrisinde ikincil piklerin oluşabileceğini, köprüleme diyotu olmayan paneller için I-V eğrisindeki bozulmaların fazla olduğunu belirtmiştir. Bu durum, köprüleme diyot içeren paneller için ters gerilimin sınırlanması sonucu kabul edilebilir bir çıkış gücü seviyesine ulaşılması ile açıklanmıştır. Köprüleme diyotu olmadığında, panel içerisindeki bir dizide gölge oluşturulması neredeyse tüm sütunun etkisiz kalmasına ve gücün azalmasına neden olmaktadır [27].
- Kocaeli Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada parçalı gölgelemede köprüleme diyot etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre, I-V ve P-V eğrilerine bakılarak köprüleme diyotun olmadığı durumda, güçteki azalmanın çok fazla olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, artan gölge ile güçteki azalmanın devam ettiği belirtilmiştir [32].
- Ahmad ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmada ise köprüleme diyotu etkisi incelenmiş ve P-V eğrisinde köprüleme diyotların aktivasyon noktaları açıklanmıştır [33].
- Malathy'nin yaptığı çalışmada, kısmi gölgeleme etkisi ve köprüleme diyotu konfigürasyonları ele alınmıştır. Çizilen P-V eğrisinde, paralel bağlı gözelerde dört tepe noktası gözlenirken seri bağlı gözeler için tek tepe noktası gözlenmiştir [34].
- Hızlandırılmış tozlanma etkisinin incelenmesi için Burton ve King yaptıkları çalışmada, aerosol sprey tekniği kullanarak yapay kir uygulanması için bir teknik ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada, hazırlanan farklı yoğunluktaki karışımların değişimine bakılmıştır. Çalışma sonucunda, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> açısından zengin toprağın geçirgenlikte daha büyük düşüşe neden olduğu gözlenmiştir [35].

- Rajasekar'ın 2015 yılında yaptığı çalışmada ise, yapay oda kullanılarak tozun odaya girişi için püskürtme tabancası kullanılmıştır. Kullanılan tozlar belirli kütlelerde ayarlanmıştır. Temiz panele ait I-V eğrisi çizilerek panel üzerinde tozlanma sağlanmıştır. Tozlanmanın homojen olduğuna karar verildikten sonra tozlanmış panel için I-V eğrisi çıkartılmış, panelin yansıtıcılığı incelenmiş ve temizlenmiş ve tozlanmış gözeler için kuantum verimliliği incelenmiştir. Çalışma sonucunda, tozlu gözeler için kuantum verimliliği daha düşük çıkmıştır [36].
- John ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışmada, toz birikmesini gerçekleştirmek için hava geçirmez bir oda inşa edilmiş ve toz örnekleri püskürtme tabancası kullanılarak panel üzerinde homojen olarak biriktirilmiştir. Hindistan'ın farklı bölgelerinden tozlar seçilmiş, hangi tozun daha fazla kayba sebep olduğu araştırılmış ve bu tozların kısa devre akımlarındaki kayba etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda toz yoğunluğundaki artış ile kısa devre akımındaki kaybın arttığı ve kuantum verimliliği eğrisinin azaldığı gözlenmiştir [37].
- Bhaduri ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı benzer bir çalışmada, kirlilik deneylerinin laboratuvar koşullarında gerçekleştirilebilmesi için çeşitli yerlerden toz örnekleri temin etmişlerdir. Bu toz örnekleri kullanılarak panel yüzeyine kontrollü bir şekilde çökeltilerek kirlilik kaybının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çökeltme işlemi için cam püskürtme tabancası ve temizleme işlemi için deiyonize su ve izopropil alkol kullanılmıştır. Cam örnekler, toz birikimi öncesinde ve sonrasında ölçülmüş ve bu değerler ile birlikte bir yoğunluk tanımı yapılmıştır. Kısa devre akımındaki kayıp için de bir tanımlama yapılmış ve toz yoğunluğuna karşılık kısa devre akımlarındaki kaybın eğrisi elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, kuantum verimlilikleri eğrileri çizilmiştir. Çalışma sonucunda, tozun %13 oranında bir düzensizlik ile biriktirebildiği sonucuna varılmıştır [38].
- John ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışma sonucunda yayınlanan bir diğer makalede, farklı tozlar ve farklı toz yoğunluğu miktarları için I-V eğrileri çizilmiştir. Buradan, toz yoğunluğundaki artış ile kirlenme kaybının arttığı gözlenmiştir. Farklı bölgelerden alınan toz örneklerinin kuantum verimlilik eğrileri çizilmiş ve karşılaştırılmıştır [39].
- Kaldellis ve arkadaşlarının (2011) yaptıkları çalışmada paneller üzerine 3 farklı malzeme biriktirilerek malzemelerin verime etkisi incelenmiştir. Kırmızı kum, kireç taşı

ve kül kullanılmış ve araştırmada, verimlerin sırasıyla kırmızı kum, kireç taşı ve kül olmak üzere arttığı sonucuna varılmıştır [40].

Literatürde yapılan bu çalışmalardan, FV sistemlerin kurulumu sırasında, panel performansına panel üzerine düşen gölge ve panel üzerinde biriken tozun etki edebileceği görölmektedir. Ülkemizde kurulan ya da kurulacak sistemlerde toz ve gölge etkisine dikkat çekebilmek, olası etkilerinin tartışıldığı bir kaynak oluşturmak amacıyla yapılan bu tez çalışmasında, fotovoltaik panellerin performansı üzerinde toz ve gölge etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, çalışmalar,

- Dış ortam saha koşullarında Beytepe Güneş Evi bahçesine kurulan bir test sistemi ile 5 farklı eğim açısındaki 5 Watt'lık mini FV paneller için, panellerdeki doğal tozlanmanın, elle temizlemenin ve yağmurun etkisinin araştırılması
- İç ortam laboratuvar koşullarında 5 farklı eğim açısı için toz haline getirilmiş kırmızı kil, sarı silt toprak ile siltli kum örnekleri kullanılarak yapay tozlanma deneylerinin gerçekteştirilmesi
- İç ortam laboratuvar koşullarında karton, pelür ve yağlı kağıt ile homojen gölgeleme ve farklı doğrultularda kısmi gölgelemeler yapılarak gölgelemenin mini FV panellerin performansındaki etkisi incelenmesi.

olarak 3 ana başlık altında yürütölmüştür.

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

Bu kesimde, tez kapsamında yapılan çalışmaların daha iyi anlaşılabilmesi için gerekli olan temel kavram ve bilgilere yer verilmiştir. Bu amaçla önce FV sistemlerde performansın belirlenmesi, performansı etkileyen parametreler açıklanmış, daha sonra tozlanma ve gölgelenme üzerinde durulmuştur.

### 2.1. Fotovoltaik Sistemlerde Performans

Fotovoltaik sistemler, yüksek verim ile maksimum güç elde etmek amacıyla tasarlanan sistemlerdir. FV panellerin sorunsuz şekilde çalışması için panel üreticilerinin belirlediği garanti süresi genellikle ortalama 25 yıldır [41]. Buna rağmen, panel gücünün geçen zamanla birlikte doğrusal olarak azaldığı belirtilmiştir [41].

Panellerin performansı, Ek1.1'de verilen I-V ve P-V eğrileri ile değerlendirilebilmektedir. Bir I-V eğrisinde 4 önemli parametre bulunmaktadır: Kısa devre akımı ( $I_{kd}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{ad}$ ), verim ( $\eta$ ) ve dolum faktörü (DF). Bu parametreler ile ilgili bilgiler Ek1.1'de verilmektedir.

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan fotovoltaik panellerden maksimum güç elde edilebilmesi için yatay düzlemde bir eğim açısı oluşturacak şekilde yerleştirilmekte ve güneş ışınlarının dik açı ile düşmesi hedeflenmektedir. Panellerin üzerine düşen ışınım seviyesi, panellerin yerleştirildiği yerin enlem ve boylamına bağlı olmaktadır [22].

Bir fotovoltaik panelin performansı birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerden bazıları panelin kendi yapısı ile ilgiliyken diğerleri panellerin kurulduğu konum ve çevre ile ilgilidir. Performansı etkileyen faktörlere malzeme bozulması, güneş ışınımı, panel sıcaklığı, parazitik dirençler, gölge, kirlenme ve eğim açısı gibi faktörler örnek verilebilir [42].

Fotovoltaik sistemlerin kurulumları genellikle optimum verim için tasarlanmaktadır. Optimum veya maksimum verimi belirleyen faktörleri, Mani ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmada, değiştirilebilen ve değiştirilemeyen faktörler olarak tanımlamışlardır. Bu faktörler arasında,

- Malzeme seçimi (tek kristal, polikristal, amorf),
- Tozdan bağımsız kaplama, cam geçirgenliği, malzeme sıcaklık tepkisi gibi fotovoltaik panelin gerektirdiği faktörler



- Eğim açısı, panel yönelimleri, ışınımına maruz kalan alan gibi ışınımı etkileyen tasarım faktörleri
- Rüzgar hareketleri, rüzgardan korunma temizleme/bakım, yerel kirlilik, toz cinsi (kimyasal, biyolojik, elektrostatik; büyüklük, ağırlık, şekil gibi), yağış, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörler

bulunmaktadır [9]. Bu çalışmada, fotovoltaik sistemler üzerinde toz ve gölge etkisi incelenmiştir. Panel üzerinde biriken toz, panel üzerine gelen ışınımın azalmasına yol açarak geçirgenliği azaltmakta ve kısa devre akımını etkilemektedir [43]. Bu sebeple, yapılan çalışmada, toz etkisi, kısa devre akımındaki değişim ile incelenmiştir. Panelin herhangi bir bölümü ya da tamamı gölge altında olduğunda ise panelin gücünün azalması sonucu I-V ve P-V eğrileri, gölgesiz duruma göre değişiklik göstermektedir [23]. Bu çalışmada, gölge etkisi, I-V ve P-V eğrilerindeki değişim ile incelenmiştir.

## **2.2. Fotovoltaik Sistemlerde Tozlanma Olayı ve Etkileri**

Çapı 500  $\mu\text{m}$ 'den küçük katı parçacıklar "toz" olarak tanımlanmaktadır [44] [45]. Çevremizde, insan ya da hayvanlar nedeniyle oluşabilen tozlar, rüzgar aracılığıyla atmosfere taşınabilmektedir [46]. Atmosferde bulunan toz ise rüzgar [46] ve yağış [45] gibi nedenlerle panel üzerine yerleşebilir [47].

Toz, fotovoltaik panel tarafından üretilen enerjiyi önemli ölçüde azaltan çevresel bir faktördür [9]. Fotovoltaik panel üzerinde toz veya diğer kirleticilerin birikmesi sonucu oluşan tozlanma, panel üzerinde ince bir tabaka oluşmasına yol açar ve panel üzerine düşen ışınımı azaltır [40]. Işınımdaki azalma, cam üzerinde biriken tozun panel tarafından alınan güneş ışığını soğurup dağıtması sonucu olmaktadır [48][49][50].

Toz parçacığının üzerine geldiğinde gelen ışık, yansıtılır, iletilir ve soğurulur [51][52]. Geçirgenlik kavramı, tozun panel performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, geçirgenlik değeri azaldıkça panel performansının azaldığı belirtilmiştir [48][50][53][54]. Panel performansının azalmasının nedeni, panel üzerindeki tozun, güneş ışınımının göze içerisine ulaşmasına engel olmasıdır. Geçirgenliği etkileyen faktörler ise tozun yoğunluğu ve biçimidir.

Geçirgenliğin toz ile ilişkisini açıklamak için pek çok çalışma yapılmıştır. 2006 yılında, Elminir ve arkadaşlarının Mısır'da yaptıkları çalışmada, panelin eğim açısı, toz birikiminin en fazla olduğu açı ( $0^\circ$ ) ve en az olduğu açı ( $90^\circ$ ) arasında değiştirilmiş ve geçirgenlikteki azalma

incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, toz yoğunluğunun 4,48-15,84g/m<sup>2</sup> aralığında değişmesi durumunda, bu yoğunluklara karşılık gelen geçirgenlikteki azalmanın %12.38-52.54 aralığında değiştiği görülmüştür. Buradan, eğim açısının azalması ile toz birikimindeki artıştan dolayı geçirgenliğin azaldığı sonucuna varılmıştır [49]. Bunun dışında, Qasem ve arkadaşlarının, 2014 yılında, yaptıkları çalışmada, farklı teknolojilerin etkisi karşılaştırılmıştır. Geçirgenlikteki en fazla azalma, a-Si teknolojisine göre üretilen panellerde, 4,25mg/cm<sup>2</sup> toz yoğunluğunda, %33 olarak görülmüştür. c-Si ve CIGS teknolojilerine göre üretilen paneller için, geçirgenlik azalması ise aynı toz yoğunluğunda, sırasıyla %28,6 ve %28,5 olarak belirlenmiştir [48]. Ghazi ve arkadaşlarının (2013) İngiltere’de yaptıkları çalışmada ise, eğim açısının yatayda 0°-90° aralığındaki değişimi için 3 ay boyunca tozun geçirgenlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üç haftalık deney sonucu geçirgenlikteki azalma %5 olarak belirlenmiştir [55]. Hegazy ve arkadaşlarının (2001) Mısır’da yaptıkları çalışmada, farklı eğim açılarındaki cam örnekler 1 aylık deney süresi boyunca temizlenmemiş ve geçirgenlik ölçümü yapılmıştır. Çalışma sonucunda, toz arttıkça geçirgenliğin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, artan eğim açısı ile birlikte geçirgenlikteki azalmanın daha az olduğu belirlenmiştir [54]. Benzer olarak, Mastekbayeva ve Kumar’ın (2000) yaptıkları çalışmada, 30 günlük periyotta, 15° eğim açısındaki cam üzerindeki doğal toz birikiminin 272 g/m<sup>2</sup> olduğu ve camın geçirgenliğinin %87,9’dan %75,8’e düştüğü belirlenmiştir [56]. Sayıgh ve arkadaşlarının, benzer şekilde yaptıkları çalışmada, Kuwait’e yerleştirilen eğimli cam plakanın üzerindeki toz birikiminin, 38 gün sonunda 0° ile 60° arasında değişen eğim açıları için, geçirgenlikteki azalmanın %64’ten %17’ye düştüğü görülmüştür [57].

Fotovoltaik paneller üzerinde biriken tozun olumsuz etkisi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, güneş panelleri üzerindeki toz etkisi, biriken tozun azaltılması ve temizleme mekanizmaları ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [9-14, 19, 20].

Bir göze üzerine toz geldiğinde, kirli panel için yansıma ve geçirgenlik toz yoğunluğuna bağlı olarak değişir ve panelin kısa devre akımını etkiler. Benzer şekilde, ışığın gelme açısı 0° olduğunda, temizlenmiş panel için kayıp azken, kirli bir panel, tozdan dolayı soğurma ve yansıma kayıpları yaşamaktadır [43].

Panellerin üzerinde biriken toz, sistem verimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna örnek olarak, dünyanın en tozsuz bölgelerinden biri olan İngiltere’de, panellerin 1 ay temizlenmemesi sonucu, toz etkisinin güneş ışınımını %5-6 azalttığı belirlenmiştir. Toz birikmesi, Sudan’da ise, İngiltere’ye oranla 9 kat daha fazla olmuştur [55]. Mazumder’e göre, Arizona’da her ay 4 kat toz birikmektedir ve toz birikimi Orta Doğu, Avusturalya ve Hindistan’da daha fazladır [58].

Toz birikmesi, bazı çevresel ve hava koşullarının bir fonksiyonu olarak bilinmektedir. Kirlilik, rüzgar gibi sebeplerle toz kalkabilir ve atmosfere dağılabilir. Tozun çökmesi çevresel özellikler, hava koşulları, tozun kimyasal özellikleri, boyutu, şekli ve ağırlığı gibi sebeplere dayanmaktadır. Bunların dışında, yüzey kalitesi, eğim açısı, nem, rüzgar hızı gibi sebepler de toz yerleşimini etkilemektedir [9][40].

Toz birikiminin performans üzerine etkisini belirleyen faktörler aşağıda özetle açıklanmıştır

- ***FV sistemin kurulduğu saha özellikleri:*** Çöl bölgelerindeki toz miktarının, sık yağışlı bölgelere göre daha şiddetli olduğu belirlenmiştir [59]. Sarver ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma sonucunda, tozlu ve rüzgarlı bölgelerde kısa süreli toza maruz kalınmasının, ılıman ve tropikal iklim bölgelerinde aylarca toza maruz kalınmasının performansı aynı derecede azaltacağı belirlenmiştir [45].

- ***FV panellerin eğim açısı:*** Paneller üzerinde toz birikmesinin önemli etkilerinden olan eğim açısı arttıkça panel üzerinde biriken toz azalır [11][49][60]. Yapılan çalışmalarda, daha yüksek açılarda eğime sahip panellerin, yüzey üzerinde daha az toz birikmesi ile daha az geçirgenlik düşüşüne neden oldukları görülmüştür [44]. Bunun nedeni, eğim açısı yüksek olduğunda tozun panel üzerinden kaymasıdır [59].

- ***Rüzgar:*** Atmosferde bulunan tozlar, panel yüzeyine gelmeden önce havada asılı kalmaktadır [59]. Tozu, atmosfere gönderen en baskın faktör ise rüzgardır [61]. Rüzgarın tozu taşıyabilmesi, toz büyüklüğüne ve rüzgar hızına bağlıdır [62][63]. Rüzgar panel üzerindeki tozları süpürebilmesinin yanında, havada askıda kalarak panel üzerine daha az ışınım düşmesine neden olabilir. Atmosferde asılı kalan toz, panel üzerine yerleşerek yüzeyi kaplayabilir ve verimi azaltabilir [47]. Özetle, rüzgar, yüksek hızda olduğunda panel üzerindeki tozu süpürebilirken [64], düşük hızdaki rüzgar panel yüzeyinde toz parçacıkları biriktirebilir [65].

- ***Nem:*** Nem, özellikle eğimli bir panel için tabanda yüzeye toz yapıştığında kalıcı kirlenme meydana gelmesine yol açar. Toz birikmesi, alt hücrelerde kısmi gölgeler oluşturabilir ve kaplamaya zarar verebilir [42]. Yüksek nem, panel yüzeyinde daha fazla toz birikmesine sebep olabilmektedir [9].

- ***Yağış:*** Yağış, panel performansını iki şekilde etkileyebilir [66]. Sık ve yoğun şekilde yağın yağmur, üzerindeki toz tanelerini temizleyebildiğinden iyi bir temizleme maddesi olabilmektedir. Ancak, hafif yağın yağmur, havadaki toz taneciklerinin atmosferden

panel üzerine düşmesine neden olarak panel üzerinde toz tabakası oluşturabilir [45]. Panel yüzeyine gelen toz çözünebilir ve çözünmeyen bileşiklerden oluşabilir [45]. Panel üzerine yağmur geldiğinde, çözünür parçacıklar çözünerek panel üzerinde ince tabaka oluşturacaktır. Bu çözelti, kurduğunda çözünmeyen parçacıkları da katılaştıracaktır [59]. Buradan yağış ile panelin temizlenemeyebileceği sonucuna varılabilmektedir. Bu sebeple de performans düşecektir.

- **Sıcaklık:** Yağmurun az olduğu ve çok nemli bölgelerde, toz, panel üzerinde ince bir tabaka yaratacak şekilde yapışabilir. Belirli bir zaman geçtikten sonra iyice yapışacağı için tozu panel üzerinden almak zor olacaktır [67]. Lorenzo ve arkadaşları, panel üzerindeki toz tabakasının sıcaklık artışına sebep olabileceğini ve bunun da panel performansını zamanla düşüreceğini ileri sürmüşlerdir [68].

- **Cam Karakteristiği:** Panelin ön yüzey malzemesi toz birikimi açısından önemlidir. Garg ve arkadaşlarının Hindistan'da yaptıkları çalışma sonucunda, plastiğin cama göre daha fazla toz topladığı belirlenmiştir [69]. Benzer şekilde, Nahar ve Gupta, cam üzerinde daha az toz biriktiği sonucuna varmışlardır [70].

- **Kaplama:** Yüzey üzerine tozun yerleşmesini önlemek için kullanılan bir yöntemdir [45]. Piliouguine ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma sonucunda, kaplamalı panellerin kir kaybının bir yılda %2,5, kaplamasız paneller için bu değer %3,3 olduğu belirtilmiştir [71].

- **Temizleme:** Amerika, İspanya, Almanya, Orta Doğu, Avusturalya ve Hindistan dahil olmak üzere dünyanın birçok yerinde büyük ölçeğe sahip güneş enerjisi santralleri kurulmuştur. Kurulan tesisler, kuru ve rüzgarlı havaların olduğu çöl bölgeleri gibi yüksek güneş ışınımının olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Kurak bölgeler ve çöl bölgelerinde toz fırtınaları sebebiyle havada mikropartiküller kalabilir. Bu nedenle, kurulum yapılan alanların planlanması veya temizleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bir çöl bölgesindeki kum fırtınası bir saat içerisinde güneş paneli üzerinde kalın bir toz katmanı oluşturabilir ve verimin %70-80 oranında azalmasına yol açabilir. Panellerin düzenli olarak temizlenmemesi durumunda paneller kullanılmaz duruma gelebilir [72]. Buna ek olarak, doğal temizliğin, kuş pisliği ve kimyasalların birikimini yok etmek için etkili olamaması nedeniyle, insan müdahalesi ile yüzeyin yıkanması, silinmesi gibi işlemler yapılabilmektedir [59]. Mohamed ve arkadaşlarının Sahara'da yaptıkları çalışmada, Şubat-Mayıs ayları arasında haftalık periyotlarda temizlik yapılarak, performans kaybı

%2-2,5 arasında tutulduğunu belirtmişlerdir [19]. Literatürde, tozu temizlemek için kullanılan suya kimyasal ya da deterjan eklenerek yapılan karışık suyun, saf musluk suyundan ve yağmur suyundan daha iyi temizlik yaptığı sonucuna varılmıştır [50]. Pavan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise fırça kullanılarak yapılan temizlemedeki sistem gücünün fırça kullanmadan yapılan temizlikten daha yüksek olduğu belirtilmiştir [73]. Tozdan kaynaklı azalan panel performansı, manuel, doğal ve otomatik olarak yapılan temizleme ile maksimum kapasitesine geri kazandırılabilir [66]. Panellerin temizlendiği durum ve kirli olduğu durumdaki güç değişimi için yapılan çalışma [19] sonuçlarına göre temizlenmiş panel için güç değerinin temizlenmemiş panele göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bir başka çalışmada [14], temiz ve kirli gözlemlere ait I-V eğrileri çizilmiştir ve çalışma sonucunda temiz panelin akım değerinin kirli panele göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

- **Mevsimsel etki:** Tozdan kaynaklı panel performansının azalması mevsime göre farklılık gösterdiğiyle ilgili literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır. Kalogirou ve arkadaşlarının (2013) Kıbrıs'ta yaptıkları çalışma sonucunda, panellerin güçlerinin kış aylarında maksimum olduğu, ilkbahar ve sonbaharda azaldığı ve yaz aylarında çok düştüğü belirlenmiştir. Buradan, daha az yağışlı mevsimler için toz birikiminin fazla olduğu sonucuna varılmıştır [60]. Benzer olarak, El-Nashar'ın Abu Dhabi'de yaptığı çalışmada, camların geçirgenliğindeki düşüşün en fazla yaz aylarında olduğu görülmüştür [74]. Yerel iklim koşulları, panel üzerinde toz birikmesi için temel faktörlerdendir [59]. Koppen-Geiger sınıflandırmasına göre, bölge kuru ve nemli mevsim olmak üzere ikiye ayrılmıştır [75]. Nisan'dan Ekim'e kadar olan süre kuru mevsim, Kasım'dan Mart'a kadar olan süre ıslak mevsim olarak belirlenmiş ve kuru mevsim, ıslak mevsimden uzun sürdüğü için toz miktarı fazla olduğu görülmüştür. Sistem uzun süre bu ortamda olursa, toz birikimi devam eder ve sistem performansı etkilenebilir [59].

- **Tozun cinsi ve boyutu:** Toz cinsinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada [40], bölgede karşılaşılabilecek üç farklı kirletici kullanılmış ve çalışma sonucunda, kirletici türüne bağlı olarak panel verimlerinin değiştiği gözlenmiştir.

- **Toz yoğunluğu ( $g/m^2$ ):** Farklı toz yoğunlukları için yapılan çalışmada [39] toz yoğunluğundaki artış ile kirlenme kaybının arttığı ve I-V eğrilerinin azaldığı görülmüştür. Bir başka çalışmada ise [36], toz yoğunluğuna karşılık kısa devre akımındaki kayba karşılık çizilen eğride, toz yoğunluğu arttıkça kaybın arttığı sonucuna varılmıştır.

Yakın zamanda literatürde saha çalışmalarına alternatif olarak hızlandırılmış tozlanma tartışılmaya başlanmıştır [35] [76] [77]. Bu çalışmalarda amaç, paneller üzerindeki kirlenmeyi kontrollü laboratuvar deneyleri ile sağlayarak, saha koşullarında toz birikimi için gereken süreyi azaltmaktır. Hızlandırılmış tozlanmada, ayrıca, toz için farklı malzemeler ve temizleme yöntemleri kullanılarak bunların etkileri araştırılabilmektedir [39]. Bunlara ek olarak, doğal tozlanma konuma bağlı olduğundan, dünyanın farklı yerleri için bu bölgelerdeki topraklar da farklı olacağından genelleme yapılamamaktadır. Bu sebeple, hızlandırılmış tozlanma ile tozların yapay olarak geliştirilmesine ve hızlandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [78]. Ancak, bu tozlanma, sahadaki hava, eğim açısı gibi faktörlerden etkilendiği için gerçek toz yoğunluğunu vermemektedir.

Yapay tozlanma ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar arasında, Burton ve King'in yaptıkları çalışmada, doğal kirlilik birikiminin zaman aldığı ve bölgelere özgü olduğu, dolayısıyla farklı coğrafi bölgeler için tekrarlanabilir sonuçlar sağlamadığını belirtmiştir. Farklı toprak renkleri ile yapılan çalışma sonucunda, kırmızı renkli toprakların, sarı renkli topraklara göre ışık iletimi için daha zararlı olduğu görülmüştür [35]. Rajasekar'ın yaptığı çalışmada ise doğal kirlilikten elde edilen sonuçların, dünya genelinde tozların değişen fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı genelleştirilemeyeceği ve toz biriktirme modelini geliştirmek/hızlandırmak için gereklilik olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, mono-Si ve poli-Si gözeler için farklı toz yoğunluklarında kısa devre akımındaki kayıplar ölçülmüştür. 144 cm<sup>2</sup>'lik poli-Si paneldeki kısa devre akımındaki kayıp, 0,60 g/m<sup>2</sup> toz yoğunluğunda %2 iken, 1,55 g/m<sup>2</sup> toz yoğunluğu için %8,24'e çıkmıştır. Benzer şekilde, 233 cm<sup>2</sup> mono-Si panel için 0,180 g/m<sup>2</sup> toz yoğunluğundaki kısa devre akımında kayıp %1,4 iken, 1,8 g/m<sup>2</sup> toz yoğunluğu için bu değer %8,2'ye çıkmıştır [36].

Yapay tozlanma etkisinin incelenmesinde, bir diğer önemli nokta, toz olarak kullanılacak malzemenin seçimidir. Yapay tozlanma deneylerinde kullanılacak malzemenin seçimi için, TS 1500 standardına [79] göre, aşağıdaki kavramların tanımlanması gerekmektedir:

- **Kil:** Zeminin eşdeğer 2 µm'den küçük bölümüdür [79].
- **Silt:** Zeminin boyutları 75 µm – 2 µm arasında kalan bölümüdür [79].
- **Kum:** Zeminin boyutları 2 mm – 75 µm arasında kalan bölümüdür. Kendi içerisinde kaba kum (2 mm – 0,6 mm), orta kum (0,6 mm – 0,2 mm) ve ince kum (0,2 mm – 75 µm) olarak sınıflandırılmaktadır [79].

- **Çakıl:** Zeminin boyutları 60 mm – 2 mm arasında kalan bölümüdür. Kendi içerisinde kaba çakıl (60 mm – 20 mm), orta çakıl (20 mm – 6 mm) ve ince çakıl (6 mm – 2 mm) olarak sınıflandırılmaktadır [79].

### 2.3. Fotovoltaik Sistemlerde Gölgeleme Olayı ve Etkileri

Gölge, toz birikimi dışında panel performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Ağaç, bulut, bina, yapraklar, baca vb. panel üzerinde gölge oluşturabilmektedir [80]. Bu da panelin performansının düşmesine neden olmaktadır.

Gölgeleme etkisi, panel üzerinde bazı engeller sebebiyle sistem genelinin aynı miktarda ışınımına maruz kalmamasıyla oluşmaktadır. Bu durumda, daha düşük seviyedeki ışınımına maruz kalan hücreler, güç üretmek yerine, sistem gücünü azaltmaktadır [81].

Gölgeleme, kısmi gölgeleme ve homojen gölgeleme olmak üzere iki başlık altında incelenebilmektedir. Sathyanarayana ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları çalışmada, kısmi ve homojen gölgeleme etkisi incelenmiştir. Kısmi gölgeleme için panelin üzeri, yaprak, kablo ve bina etkisi yaratacak şekilde gölge oluşturulmuş, homojen gölgeleme için farklı miktarlarda kağıtlar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, homojen gölgelemede, gölgesiz duruma göre kısa devre akımı ve güç lineer olarak azalmıştır. Kısmi gölgeleme için, kablo gölgesi en az etkiye sahip iken, bina modeli en fazla etkiyi göstermiştir [80].

Parçalı gölgeleme, fotovoltaik panel veya panelin belirli bir kısmına bulut, bina veya ağaç gibi engellerin gelerek güneş ışığını kesmesi ile ortaya çıkmaktadır [82][83]. Gölge altındaki gözenin sıcaklık ve ışınımı değiştiğinden güç azalmaktadır. Bu durumda, gölge, panelin gözelerden üretilen akımlarının uyumsuzlukları ile sonuçlanmaktadır. Gölge göze, gölgelenmemiş gözeler göre daha az akım üretmektedir ancak paneldeki gözeler seri bağlandığından tüm gözelerden aynı akım geçmelidir. Bu durum uyumsuzluklara yol açmaktadır. Tek göze üzerindeki kısmi gölgeleme, tüm gözeler gölgelenmiş gibi tüm panelin gücünü önemli ölçüde azaltabilir [42].

Bir göze gölge altında olduğunda, gölge gözenin akımı azalmaktadır. Bu sebeple, sistemin toplam akımı gölge göze üzerinden geçmekte ve bu durum çıkış gücünün azalmasına sebep olmaktadır. Gölge altındaki göze için kullanılan köprüleme diyotu kullanılarak, akımın gölge gözenin etrafından geçmesi sağlanmaktadır [58]. Kısmi gölgeleme için köprüleme diyotu etkisi incelenirken, panelde köprüleme diyotu varlığı I-V ve P-V eğrilerinde değişikliğe neden olmaktadır. Panelde köprüleme diyotu varsa, P-V eğrisinde, kısmi gölgeleme altında birden

fazla maksimum nokta görülürken, köprüleme diyotu yokken güç değeri gölgesiz duruma göre çok azalarak kendini belli etmektedir [25][26][27][32].

Kısmi gölgelemede, gölgeli panellerin yerleri ve gölgenin şekli nedeniyle oluşan uyumsuzluklar gücü azaltmaktadır. Yapılan çalışmalarda [28][29][30] Su-Do-Ku modeli ortaya atılmış ve panellerin fiziksel konumu bu modele göre ayarlanmıştır. Bu modelde, gölge altındaki gözelerin dağıtılarak bir sıradaki baskın gölgelemenin azaltılması hedeflenmektedir [30]. Chaw'ın 2012 yılında yaptığı çalışma sonucunda, gölge altındaki bölgelerin alan aynı kalacak şekilde değiştirilmesi ile maksimum gücün değiştirilebildiği belirtilmişti [28]. Rani ve arkadaşlarının (2013) yaptıkları benzer çalışmada, aynı gölgeleme altında Su-Do-Ku düzenlemesinin uygulanmasının 4 farklı durum için güç iyileştirme çalışmaları yapılmış; bu durumlar için sırasıyla %26,1, %20,5, %6,6 ve %3,6 güç artışı sağlanmıştır [29]. Srinivasa ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları çalışmada ise, Su-Do-Ku modeli için yeni bir yöntem önerilmiş ve bu iki model karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, önerilen model ile güç artışı sağlandığı gözlenmiştir [30].



### 3. DENEYSEL KESİM

Bu tez çalışması, fotovoltaik panellerde toz ve gölge etkisinin incelenmesi amacıyla planlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Hacettepe Üniversitesi YETAM Güneş Evi bahçesine [84] kurulan deney düzeneği ile dış ortam saha deneyleri ve Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü F8 laboratuvarında iç ortam laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Dış Ortam Saha Deneyleri

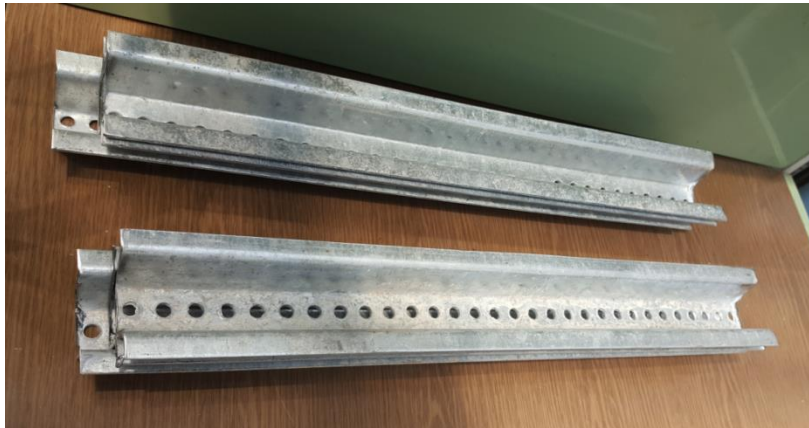
##### 3.1.1. Dış Ortam Saha Deneyleri İçin Deneysel Düzenek

Deney düzeneğinin kurulumu sırasında Şekil 3.1’de verilen taşıyıcı sistemler kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Taşıyıcı sistem

Taşıyıcı sistemleri panellere bağlayan panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanları (Şekil 3.2), Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Mekanik Atölye’sinde belirlenen ölçülerde kesilmiştir.



Şekil 3.2: Panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanları

Panelleri panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanlarına bağlayacak panel montaj elemanları, 2 cm kalınlığında alüminyum şeritlerden oluşmaktadır (Şekil 3.3). Bu parçaların panele bağlantısını

sağlayacak şekilde belirlenen uygun vida delikleri Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Mekanik Atölye’de açılmış ve daha önce belirlenen açılara uygun olarak büküm işlemi yapılmıştır (Şekil 3.4).



**Şekil 3.3:** Panel montaj elemanları



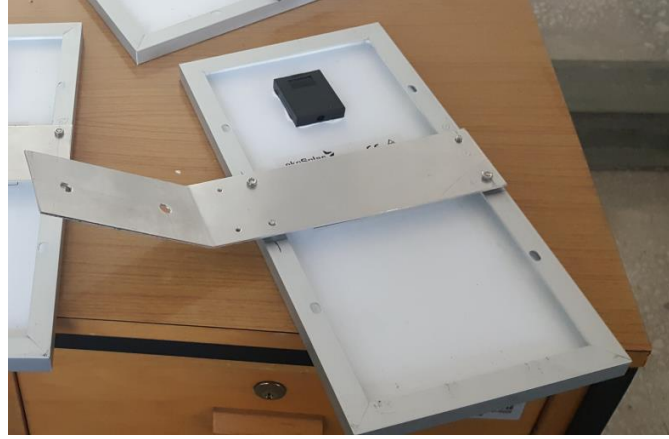
**Şekil 3.4:** Uygun açılarda bükülmüş panel montaj elemanları

Taşıyıcı sistemler, Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü YETAM Güneş Evi bahçesine yerleştirilmiştir. Panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanlarından 3 metre uzunluğunda olan parçalar taşıyıcı sistemlerin alt ve üst kısımlarına paralel şekilde vida ile sabitlenmiştir. 5 adet 60 cm uzunluğundaki panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanları taşıyıcı sistemin üst bölümüne dik olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Üst bölüme yerleştirilen panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanları panellerin montajında kullanılmıştır.



**Şekil 3.5:** Panel-taşıyıcı sistem bağlantı elemanlarının yerleştirilmesi

Panel-montaj elemanlarının montajı için panellerin arka kısmına belirlenen ölçülerde delikler açılmış ve belirlenen açılarda bükülmüş panel montaj elemanları paneller ile eşleştirilmiştir. Eşleştirilen panel ve panel montaj elemanları bağlantısı vida ile yapılmış ve somunlarla sabitleştirilmiştir (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6:** Bükülen panel montaj elemanlarının panellere montajı

Panellerin kablo bağlantılarının yapılması için, 1 adet suya dayanıklı kutu, uygun direnç ve kablolar temin edilmiştir. Bağlantı kutusu içerisine dirençlerin yerleştirilmesi için kullanılacak, 2mm kalınlığındaki alüminyum plakadan uygun ölçülerde Mekanik Atölye’de kesilmiş ve uçlarından 90<sup>0</sup> kıvrılmıştır. Bu parça üzerinde daha önce belirlenen ölçülerde delikler ve parçanın kıvrılan kısımları üzerine bağlantı kutusuna montajını sağlayacak vida delikleri açılmıştır. Kutu içerisinde kullanılacak bananaların alt kısımları lehim ile kaplanmış ve alüminyum parça üzerine monte edilmiştir. Daha sonra, alüminyum levha üzerindeki deliklere bananaların yardımıyla dirençlerin montajı yapılmıştır.

Bağlantı kutusu üzerine, panellere bağlanan kabloların kutuya montajı sırasında kullanılması amacıyla rakor delikleri açılmıştır.

Bağlantı kutusunun kablaj işlemi öncesi son hali Şekil 3.7 ile verilmektedir.



**Şekil 3.7:** Bağlantı kutusunun görünümü

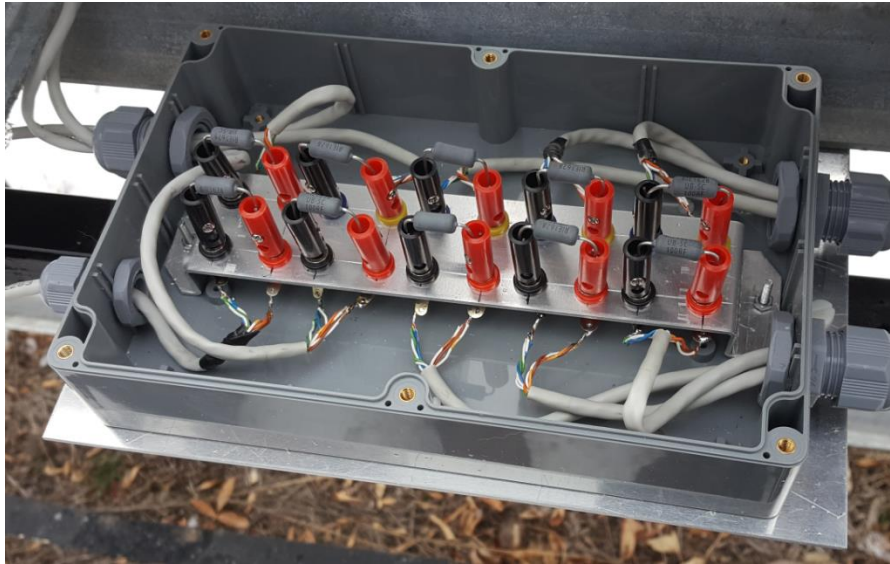
Taşıyıcı sistem-bağlantı kutusu montaj elemanı, bağlantı kutusunun taşıyıcı sisteme montajı sırasında kullanılması için alüminyum levhadan oluşturulmuş ve bağlantı kutusuna montajı

plastik vidalar ile yapılmıştır. Taşıyıcı sistem üzerinde açılan delikler ile bağlantı kutusunun taşıyıcı sistem üzerine montajı tamamlanmıştır (Şekil 3.8).



**Şekil 3.8:** Bağlantı kutusunun taşıyıcı sistem üzerine montajı

Bağlantı kutusunun kablağı için ilk olarak bağlantı kutusu taşıyıcı sistem üzerine plastik vidalar ile sabitlenmiştir. Panel kablolarının tümü uygun rakorlarla bağlantı kutusu içerisine yerleştirilmiştir. Kablolar daha önceden belirlenen uçlara göre bananalar üzerine lehimlenmiştir. Lehim işlemi tamamlanan alüminyum parça bağlantı kutusu içerisine sabitlenmiştir (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9:** Kablolama işleminin ardından bağlantı kutusunun görünümü

Paneller ve bağlantı kutusu arasındaki kablağı işlemi için, paneller ile bağlantı kutusu arasındaki kablo boyları hesaplanmış, hesaplanan uzunluklarda kablolar kesilmiştir. Kesilen kabloların uçları açılarak (+) ve (-) uçlar belirlenmiş ve burularak birbirlerine lehimlenmiştir. Lehimlenen

kablo uçları, panellerin (+) ve (-) uçlarına bağlanmıştır. Kablolama işlemi biten paneller taşıyıcı sistem üzerine vida ve somun kullanılarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10:** Panel kablolama işlemi sonrası taşıyıcı sistemin görünümü

Düzenegin çalışıp çalışmadığının kontrolü panellere ait gerilim değerleri okunarak yapılmıştır. Taşıyıcı sistem üzerindeki vidalar sabitlenerek sıkıştırılmıştır. Panel açıları kontrol edilmiş ve aynı eğim açısında olması gereken paneller üzerinde ayarlamalar yapılmıştır.

### **3.1.2. Dış Ortam Saha Deneyleeri için Deney Yöntemi**

#### **3.1.2.1. Akım, Sıcaklık ve Işınım Verilerinin Alınması**

Kurulan deney düzeneğinde, 6°, 15°, 30°, 40° ve 50° açılarında kurulan paneller için her ölçüm öncesi elle temizlenen ön sıradaki paneller sırasıyla T1, T2, T3, T4 ve T5 olarak isimlendirilirken arka sıradaki elle temizlenmeyen paneller K1, K2, K3, K4 ve K5 olarak isimlendirilmiştir.

Verilerin alınması işlemi sırasında, piranometre Güneş Evi bahçesine kurularak Genidaq programı ile güneş ışınım verilerinin otomatik olarak kaydedilmesi sağlanmıştır. Panel sıcaklıkları termal kamera yardımıyla belirlenmiştir.

Veri alınan güne ve bir önceki haftaya ait hava durumu veri tablosunda belirtilmiştir. Ayrıca yağış verileri, FreeMeteo ile Beytepe koordinatları girilerek hesaplanmıştır [85].

Güneşli ve açık günlerde, bağlantı kutusu açılarak multimetre ile her bir panele ait kısa akım değerleri okunmuştur. Akım değerlerinin okunduğu saatler not edilmiştir. Not alınan bu saatler ile piranometre ile alınan ışınım verilerini içeren tablo içerisinde bu saatlere karşılık gelen ışınım değerleri belirlenmiştir.

T1, ..., T5 ve K1, ..., K5 panellerine ait akım değerleri okunduktan sonra, T1, ..., T5 panelleri kolonya ile temizlenerek tüm panellere ait akım değerleri tekrar okunmuştur. Temizleme işlemi sonrası panel isimlendirmesi T1', T2', ..., T5' ve K1', K2', ..., K5' olarak yapılmıştır. Işınım değerleri belirlenmiştir.

Panellerin isimlendirilmesi aşağıda özetlenmektedir.

**K:** Sadece yağmurun temizlediği paneller

**T:** Ölçümler arasında yalnızca yağmurun temizlediği paneller

**T':** Ölçümler arası hem yağmurun temizlediği hem de mekanik olarak temizlenen paneller

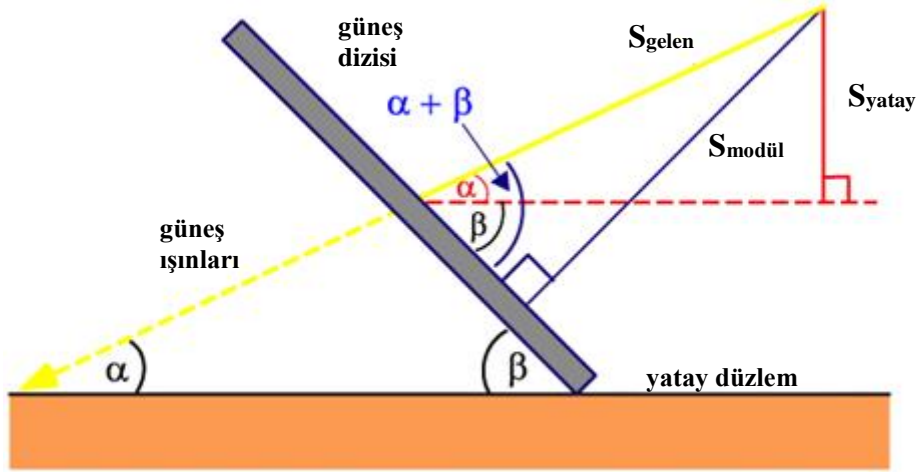
24.03.2017-18.10.2017 tarihleri arasında her ay için açık ve güneşli havalarda öğle saatinde sıcaklık, akım, ışınım ölçümleri yapılmıştır. 03.07.2018 - 30.07.2018 tarih aralığında ise ölçümlerin tekrarları yapılmıştır.

Ölçümler farklı gün ve hava koşullarında gerçekleştirildiği için ölçüm alınan her bir gün ışınım ve sıcaklık değerleri farklı olacaktır. Bu sebeple, ölçülen akım ve gerilim değerlerinin standart test koşullarına ( $1000 \text{ W/m}^2$  ve  $25^\circ\text{C}$ ) göre normalize edilmesi gerekmektedir. Yapılan normalizasyonda amaç, ölçülen değerleri sıcaklık ve ışıınımdan bağımsız hale getirmek ve normalize edilmiş değerleri karşılaştırarak tozlanma etkisini yorumlayabilmektir. Akım ve gerilim için yapılan normalizasyon işlemi Ek1.3'te açıklanmaktadır.

### **3.1.2.2. Fotovoltaik Paneller Üzerine Düşen Güneş Işınıının Belirlenmesi**

Panellerin montaj işlemi yukarıda belirtilen açılara göre yapıldığı için, panel yüzeyine gelen ışınım piranometreye gelen ışıınımdan farklı olmaktadır.

Panele gelen ışıınımi bulmak için piranometrenin okuduğu ışıınıım değerleri, Şekil 3.11'de verilen çizime göre formülize edilmiştir. Burada, güneşten gelen ışıınıım ( $S_{\text{gelen}}$ ), yatay düzlemle  $\alpha$  açısı yapmakta ve panelin eğim açısı  $\beta$  olarak verilmektedir.



**Şekil 3.11:** Fotovoltaik paneller üzerine düşen güneş ışınımının belirlenmesi [86]

Güneşten gelen ışınımdan ( $S_{gelen}$ ) yola çıkılarak,  $\beta$  eğim açısına sahip panel için eğimli yüzeydeki ışınım değerini bulmak için,

$$\sin\alpha = \frac{S_{yatay}}{S_{gelen}}$$

$$S_{yatay} = S_{gelen} \sin\alpha$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \frac{S_{modül}}{S_{gelen}}$$

$$S_{modül} = S_{gelen} \sin(\alpha + \beta) \quad (\text{Eş. 3.1})$$

Burada,

$\alpha$ , ve  $\beta$ , Ek2’de, sırasıyla yükseklik açısı ve panelin eğim açısı olarak tanımlanmıştır.

Yapılan tez çalışmasında, panel üzerine gelen ışınım değerleri Eş. 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

### 3.1.2.3. Günlük Tozlanma ve Birikimli Tozlanma Kaybının Hesabı

Günlük tozlanmada eğim etkisini incelemek amacıyla, her ölçüm için temizleme öncesi (T) ve temizleme sonrası (T’) avometre ile okunan kısa devre akım ( $I_{kd}$ ) değerleri kullanılarak, günlük tozlanma faktörü,

$$\text{Günlük tozlanma faktörü (GTF)} = \frac{|I_{kd,temizlenmiş} - I_{kd,tozlu}|}{I_{kd,temizlenmiş}} \times 100 \quad (\text{Eş. 3.2})$$

olarak tanımlanmıştır.

Birikimli tozlanma etkisinin incelenmesi için ise tozlanma kaybı ifadesi,

$$\text{Tozlanma kaybı (TK)} = \frac{|I_{kd,temizlenmiş} - I_{kd,tozlu}|}{I_{kd,temizlenmiş}} \quad (\text{Eş. 3.3})$$

eşitliği ile tanımlanmıştır. Tozlanma kaybı hesaplanırken, Eş. 3.3 kullanılmış ve Ek1.3'te açıklanan, normalize edilmiş akım değerleri kullanılmıştır.

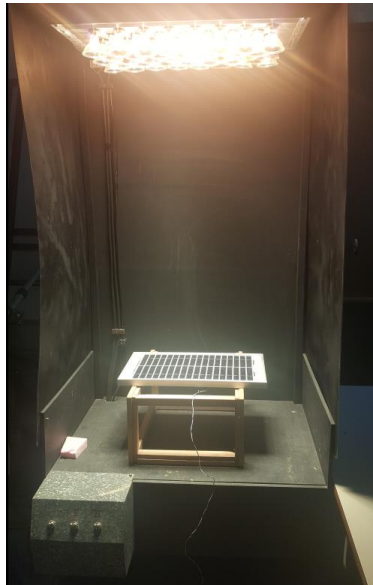
Yapılan çalışmada, toz ile kirlenmiş panellerin temiz panellere göre ne kadar kirlendiğinin bir ölçüsü tozlanma kaybı olarak tanımlanmıştır. Tozlanma kaybı, veri alınan ilk gün (24.03.2017) her bir eğim açısı için kısa devre akımları  $I_{kd,temizlenmiş}$  ve her bir veri günü temizleme öncesi tozlu panellere ait akım değerleri  $I_{kd,tozlu}$  olacak şekilde Eş. 3.3. kullanılarak hesaplanmıştır. Akım değerlerinin, Ek1.3'te açıklandığı gibi, normalize edilmiş akım değerleri kullanılmıştır.

Tozlanma kaybı incelenirken, veri alınan tarihler arası yağış miktarları belirlenerek, yağmurun paneller üzerindeki temizleme etkisi karşılaştırılmıştır.

## 3.2. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri

### 3.2.1. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri için Deneysel Düzenek

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen iç ortam deneylerinde panel, simülatör kullanılarak ışınımaya maruz bırakılmıştır. Işınım altındaki panel için, yapay tozlanma ve gölge deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, kurulan düzenek ile akım ve gerilim değerleri için değişimler okunmuştur. Ölçülen değerler ile I-V ve P-V eğrileri çizilerek farklı durumlar için yapay tozlanma ve gölge etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.12: İç ortam deney düzeneği



### 3.2.2. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri için Deney Yöntemi

#### 3.2.2.1. Yapay Tozlanma

Yapay tozlanma deneylerinde, panel üzerine farklı malzemelerden farklı miktarlarda tozlar serpiştirilerek homojen tozlanma yaratılması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, yapay tozlanma deneylerinde kırmızı kil, sarı silt toprak ile siltli kum olmak üzere 2 farklı çeşit toprak ve 1 çeşit kum temin edilmiştir. Toprak ve kum örnekleri, Ankara'nın farklı bölgelerinden alınmıştır: kırmızı kil toprak Batıkent/Yenimahalle, sarı silt toprak Çukurambar/Çankaya ve siltli kum Ostim'deki bir inşaat alanı. Kolay ulaşılabilir kum ve topraklar seçilmesindeki amaç, Ankara'nın belirtilen bölgelerinde kurulabilecek bir FV sistemde oluşabilecek doğal tozlanmanın incelenmesidir. Ayrıca, yapay tozlanma deneylerinde, farklı malzemeler kullanarak her bir malzemenin davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

Alınan toprak ve kum örnekleri, öncelikle Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda öğütülmüş daha sonra elek açıklığı 75 µm olan elek ile eleme işlemi yapılmıştır. Elde edilen malzemeler, eleme makinesi ile 2 dakika süresince eleme işlemine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.13).



**a)**  
**b)**  
**Şekil 3.13:** Toprak ve kum malzemelerin toz hale getirilmesi sırasında  
**a) Öğütme b) Eleme İşlemlerinin Yapılışı**

Toprak örneklerden farklı olarak, kum örneğinin, öğütme işleminden önce, Şekil 3.14'de gösterilen fırında, 16 saat boyunca 105 °C'deki kurutulması sağlanmıştır.



**Şekil 3.14:** Kum örneğin fırında kurutulması işlemi







Tüm örneklerin, öğütme ve eleme işlemi ile tanecik boyutunun  $2 \mu\text{m}$  olması sağlanmıştır. Elde edilen malzemeler,  $0,01$  gram hassasiyete sahip hassas terazi ile tartılarak deneyde kullanılacak miktarlarda örnekler hazırlanmıştır.

Deney sırasında malzemelerin birbirlerinden farkının yorumlanabilmesi için her bir malzemenin yoğunluğu, hacmi ve ağırlığı bilinen bir kap yardımıyla belirlenmiştir. Toz örneklerine ait işlem öncesi ve işlem sonrası görüntüleri ve hesaplanan yoğunluklar Çizelge 3.1 ile verilmiştir.










Toz için kullanılacak örneklerin hazırlanmasının ardından, 5 farklı eğim açısının ( $6^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  ve  $40^\circ$ ) oluşturulabilmesi için gereken eğimleri verecek tahta parçaları, panellerin altına yerleştirilmiştir.

Toz miktarının panelin üretebileceği güce ve performansına etkisinin incelenebilmesi için farklı miktarlardaki örnekler panel üzerinde toz olarak biriktirilmiştir. Çizelge 3.1’de belirtilen örneklerden, ilk olarak,  $M=5$  gram miktarında hazırlanan kırmızı kil toprak, panel üzerine homojen olarak serpiştirilmiştir. Her bir eğim açısı için akım ve gerilim değerleri okunmuştur. İşlemler  $M/3$  g ve  $M/12$  g için tekrarlanmıştır. Benzer şekilde, sırasıyla sarı siltli toprak ve siltli kum örnekleri için panellerin üzeri  $M$  g,  $M/3$  g ve  $M/12$  g tozla kaplanarak her bir eğim açısı için işlemler tekrarlanmıştır. Bu işlemlere ait bazı gösterimler Şekil 3.15 ile verilmektedir.  $M$ ,  $M/3$  ve  $M/12$  g toz için panel üzerinde biriken toz miktarı sırasıyla,  $11,2 \text{ mg/cm}^2$ ,  $3,76 \text{ mg/cm}^2$ ,  $0,94 \text{ mg/cm}^2$  olmaktadır.



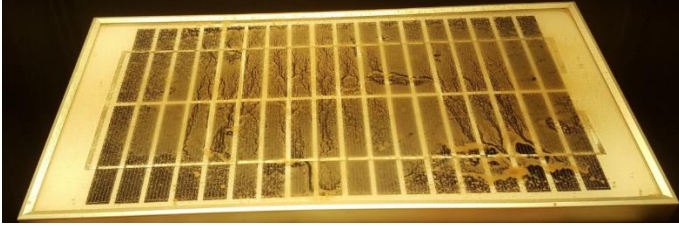

**Çizelge 3.1:** Toz örneklerine ait işlem öncesi ve işlem sonrası görüntüleri ve hesaplanan yoğunlukları

Örnek Adı	İşlemler Öncesi Örneğin Görünümü	İşlemler Sonrası Örneğin Görünümü	Örneğin Hesaplanan Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Kırmızı Kil Toprak</b>			0,92 g/cm <sup>3</sup>
<b>Sarı Silt Toprak</b>			0,88 g/cm <sup>3</sup>
<b>Siltli Kum</b>			0,99 g/cm <sup>3</sup>

Bu işlemlerin ardından, yağın yağmurun tozlu yağabileceği ve panel üzerinde kirletici etkisi olabileceği düşüncesiyle M/3 g kırmızı kil toprak su ile karıştırılmış ve panel üzerine püskürtülmüştür (Şekil 3.16). Topraklı su panelin üzerindeyken 10° eğim açısında akım ve gerilim değerleri okunmuştur. Panelin üzeri kurduktan sonra yeniden ölçüm alınmıştır. Daha sonra, kırmızı kil toprak miktarı 2 katına çıkarılarak yeni bir karışım oluşturulmuş ve panelin üzerine püskürtülerek işlemler tekrarlanmıştır.

	M g	M/3 g	M/12 g
<b>Kırmızı kil toprak</b>			
<b>Sarı silt toprak</b>			
<b>Siltli kum</b>			

**Şekil 3.15:** Farklı miktarlarda serpiştirilen farklı cins tozların gösterimi

	M/3 g karışım	2M/3 g karışım
Islak halde		
Kuru halde		


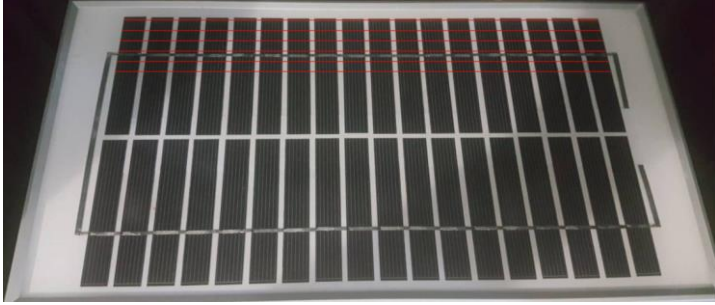
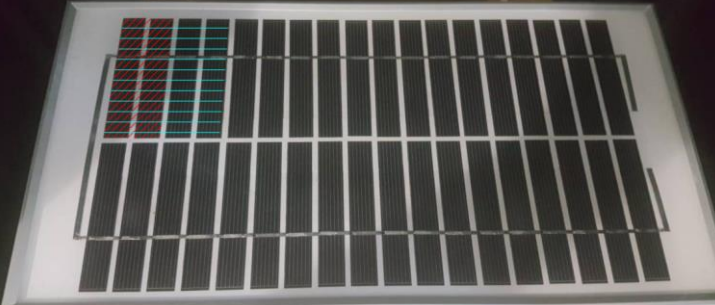
**Şekil 3.16:** Toprak su karışımının panel üzerine püskürtülmesi

### 3.2.2.2. Yapay Gölgeleme

Yapılan iç ortam laboratuvar deneylerinde, gölge etkisi, panelin tamamının aynı tür malzeme ile kapatılması ile oluşturulan *homojen gölgeleme* ve panelin belirli bir kısmının aynı veya farklı malzemelerle kapatıldığı *kısmi gölgeleme* olmak üzere iki durumda incelenmiştir.

Gölgenin incelenmesi için öncelikle veri alınan gün için panel üzerinde gölge yokken ışınım altında akım ve gerilim değerleri okunmuş daha sonra farklı gölgeleme koşullarında akım ve gerilim değerleri ölçülerek, I-V ve P-V karakteristikleri elde edilmiştir.

Panel üzerinde düşey ve yatay yönler ile köşegen doğrultusu için karton kullanılarak gölgeler oluşturulmuştur. Gölgeleme işlemi için, tüm panel alanının sırasıyla %5, 11, 16, 22, 33, 44 ve 50'sine karşılık gelecek şekilde düşey, yatay ve köşegen doğrultusunda gözeler karton ile kapatılmıştır. Belirtilen alanlara karşılık kapatılan göze sayıları Şekil 3.17'de belirtilmiştir. Karşılaştırılma yapılabilmesi için oluşturulan gölge alanlarının aynı olmasına dikkat edilmiştir.

<b>Düşey yönde gölge</b>		Sırasıyla 2, 4, 6, 8, 12, 16 ve 18 göze düşey yönde kapatılarak akım ve gerilim değerleri okunmuştur.
<b>Yatay yönde gölge</b>		2, 4, 6, 8, 12, 16 ve 18 göze alanına karşılık gelen alanlar kapatılarak her biri için akım ve gerilim değerleri okunmuştur.
<b>Köşegen doğrultusunda gölge</b>		Sırasıyla 2, 4, 6, 8, 12, 16 ve 18 göze köşegen doğrultusunda kapatılarak akım ve gerilim değerleri okunmuştur.

Şekil 3.17: Farklı yönler için oluşturulan gölgelerin tanımlanması

Karton ile yapılan parçalı gölgelemenin ardından, farklı gözeleri farklı oranda kapatacak boyutlarda kesilen karton, pelür kağıt ve yağlı kağıtlar ile simülatör altında gölgelenme deneyleri yapılmıştır. Burada amaç, farklı geçirgenliklere sahip kağıtlar kullanılarak, panel üzerine aynı ışınım gelmediği durumda gölge etkisinin incelenmesidir. Bunun için öncelikle, veri alınan gün, panel üzerinde gölge yokken akım ve gerilim değerleri ölçülerek, I-V ve P-V eğrileri oluşturulmuştur. Daha sonra, yatay ve dikey gölgeleme etkisi için 4 gözenin alanına karşılık gelen alanları verecek şekilde panel üzerinde farklı konumlara karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt yerleştirilecek şekilde çeşitli durumlar tanımlanmıştır (Çizelge 3.2). Düşey ve yatay gölgelemede tanımlanan 1. Durum, 2. Durum ve 3. Durum için akım ve gerilim değerleri okunarak I-V eğrileri oluşturulmuştur.

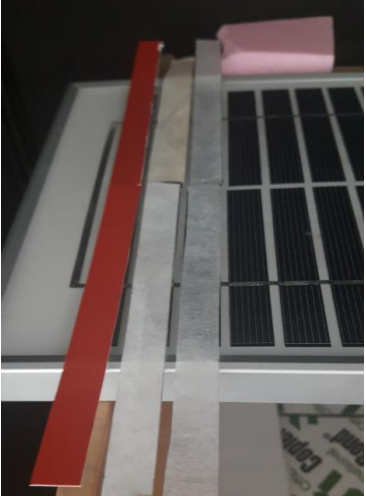




**Çizelge 3.2:** Düşey ve yatay gölgeleme için tanımlanan durumlar

<b>Düşey gölgeleme</b>	1. durum	Karton-Pelür kağıt-Pelür kağıt –Pelür kağıt
	2. durum	Karton-Pelür kağıt-Pelür kağıt-Yağlı kağıt
	3. durum	Pelür kağıt-Pelür kağıt -Yağlı kağıt-Yağlı kağıt
<b>Yatay gölgeleme</b>	1. durum	Karton-Pelür kağıt-Pelür kağıt-Pelür kağıt
	2. durum	Karton-Pelür kağıt-Pelür kağıt-Yağlı kağıt
	3. durum	Pelür kağıt-Pelür kağıt-Yağlı kağıt-Yağlı kağıt
<b>Düşey gölgeleme</b>		1 karton-1 Pelür kağıt-2 Pelür kağıt-3 Pelür kağıt

Literatürde Su-Do-Ku modeli kullanılarak gölgeli göze sayısının aynı kalarak gölge altındaki gözelerin değiştirilmesi yönteminin incelenmesi için, kapalı göze sayısı değiştirilmiştir. Göze sayısının değişiminin incelenebilmesi için, 2 gözenin karton, 2 gözenin pelür kağıt ve 2 gözenin yağlı kağıt ile kapatılması planlanmıştır. Kapatılan göze sayısı 6 olacak şekilde panel üzerinde farklı bölgelerde gölge oluşturulmuştur. Oluşturulan gölgelere ait tanımlamalar Çizelge 3.3 ile verilmiştir.








Panel üzerine yaprak düştüğünde oluşan gölgenin incelenmesi için gerçek yaprak ve gerçek yaprak boyutlarında kesilmiş pelür kağıttan yapraklar ile panel üzerinde yatay ve düşey yönde gölgeler oluşturulmuştur (Çizelge 3.4). Yaprak ile yapılan gölgelemede, rüzgar esmesi sonucu kuru yaprağın panel üzerinde gölge yaratabileceği düşüncesi ile kuru yaprak ile gölgeleme yapılmıştır.

**Çizelge 3.3:** Kapalı göze sayısının değiştirilmesi için tanımlanan durumlar

<b>1. durum</b>		Düsey yönde 2 göze karton, 2 göze pelür kağıt ve 2 göze yağlı kağıt ile gölge oluşturulmuştur. Bu durumda, üst sıra ve alt sıra, 1 göze karton, 1 göze pelür kağıt ve 1 göze yağlı kağıt ile kapatılmıştır.
<b>2. durum</b>		Üst sırada 2 göze karton, 2 göze pelür kağıt ile kapatılmış, alt sırada 2 göze yağlı kağıt ile gölge oluşturulmuştur.
<b>3. durum</b>		Üst sırada 1 göze karton, 1 göze pelür kağıt, 1 göze yağlı kağıt, alt sırada 1 göze karton, 1 göze pelür kağıt, 1 göze yağlı kağıt ile kapatılarak gölge oluşturulmuştur.
<b>4. durum</b>		Üst sırada 2 göze karton, 2 göze pelür kağıt, 1 göze yağlı kağıt, alt sırada 1 göze yağlı kağıt ile kapatılarak gölge oluşturulmuştur.
<b>5. durum</b>		3. durum için tamamı kapatılan gözelerin yarısı kapatılmış, malzemelerin diğer yarısı karşı sıraya eklenerek gölge oluşturulmuştur.



**Çizelge 3.4:** Yaprak ile oluşturulan gölge durumları

<b>Gerçek yaprak ile düşey gölgeleme</b>		Gerçek yaprak kullanılarak düşey yönde 2 adet yaprak ile oluşturulan gölge
<b>1 adet pelür kağıttan yaprak ile düşey gölgeleme</b>		Düşey yönde pelür kağıt ile oluşturulan gölge
<b>2 adet pelür kağıttan yaprak ile düşey gölgeleme</b>		Düşey yönde üst üste 2 adet pelür kağıt ile oluşturulan gölge
<b>Gerçek yaprak ile yatay gölgeleme</b>		Gerçek yaprak kullanılarak yatay yönde 2 adet yaprak ile oluşturulan gölge
<b>1 adet pelür kağıttan yaprak ile yatay gölgeleme</b>		Yatay yönde pelür kağıt ile oluşturulan gölge
<b>2 adet pelür kağıttan yaprak ile yatay gölgeleme</b>		Yatay yönde üst üste 2 adet pelür kağıt ile oluşturulan gölge
<b>Kuru yaprak kullanılarak yapılan gölge</b>		3 adet kuru yaprak kullanılarak oluşturulan gölge

Panel üzerine bir elektrik ya da telefon hattı direğinin ya da kablosunun gölge yapabileceği durumu düşünülerek kartondan kesilen bir parça ile kablo gölgesi benzetimi yapılmıştır (Şekil 3.18).



a)



b)

**Şekil 3.18:** Paneldeki a) Kablo gölgesi [87] b) Kablo gölgesi benzetimi

Panel üzerine bir bacanın gölgesinin düşebileceği (Şekil 3.19) durumunun incelenmesi için, karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt kullanılarak iki durum için baca gölgesi benzetimi yapılmıştır (Şekil 3.20). Bu benzetimde, bacanın panel üzerinde gölge oluşturduğu tüm alanda aynı miktarda gölge yaratmayacağı için karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin gölge alanları, Şekil 3.20’de iki durum olarak açıklanmaktadır.



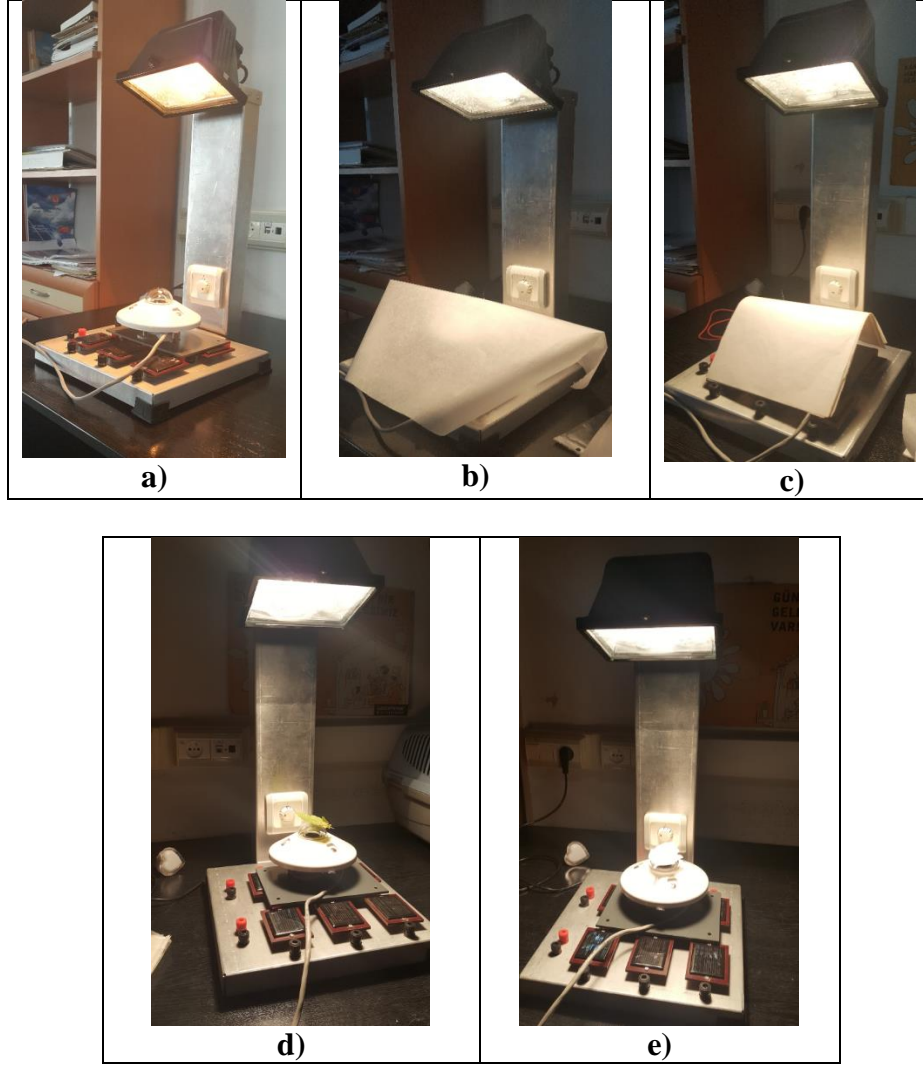
**Şekil 3.19:** Panel üzerinde oluşabilecek baca gölgesi [88]

1. durum		Karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt ile oluşturulan baca gölgesi benzetimi
2. durum		1. durumdaki alan ile aynı alan gölgede olacak şekilde, karton ve pelür kağıt alanı azaltılarak, yağlı kağıt alanı arttırılarak oluşturulan 2. durum için baca gölgesi benzetimi

**Şekil 3.20:** Panel üzerinde oluşturulan baca gölgesi

Parçalı gölgelemenin ardından, homojen gölgeleme etkisi için panelin üzeri farklı sayılarda pelür kağıt ve yağlı kağıt ile tamamen kapatılarak akım gerilim ölçümleri yapılmıştır.

Gölge deneylerinde kullanılan malzemelerin ışınım etkisi, Şekil 3.21’de verilen Güneş Evi’ndeki bir düzenek yardımıyla, Kipp-Zonen marka piranometre ile, hiçbir malzeme yokken (Şekil 3.21-a) ışınım değeri okunmuş, daha sonra piranometre üzerinde sırasıyla 1-2 adet yağlı kağıt (Şekil 3.21-b), 1 - 5 adet pelür kağıt (Şekil 3.21-c), ağaçlardan toplanmış yapraklar (Şekil 3.21-d) ve pelür kağıt ile yapılmış yapraklar (Şekil 3.21-e) varken ölçülmüş ve farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan gölgelenme durumları için ışınımdaki değişim Çizelge 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.21: Farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan gölgelenme durumları için piranometre ile ışınım ölçümü

Çizelge 3.5: Panelin tamamı veya bir kısmının üzerine kapatılan pelür, yağlı kağıtlar ve yapraklarla oluşturulan gölgeleme için tanımlanan durumlar ve ışınım değerleri

Gölgelenmede kullanılan malzeme	Malzeme sayısı	G (W/m <sup>2</sup> )
Pelür kağıt	1 adet pelür kağıt	692
	2 adet pelür kağıt	483
	3 adet pelür kağıt	352
	4 adet pelür kağıt	267
	5 adet pelür kağıt	213
Yağlı kağıt	1 adet yağlı kağıt	880
	2 adet yağlı kağıt	754
Ağaçtan alınan yaprak	1 adet	453
	1 adet	462
Kağıt ile yapılan yaprak	1 adet	463
	2 adet	345

## 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Fotovoltaik panellerde toz ve gölge etkisinin incelenmesi için yapılan bu tez çalışmasının bulguları iki ana başlık altında sunulmuştur.

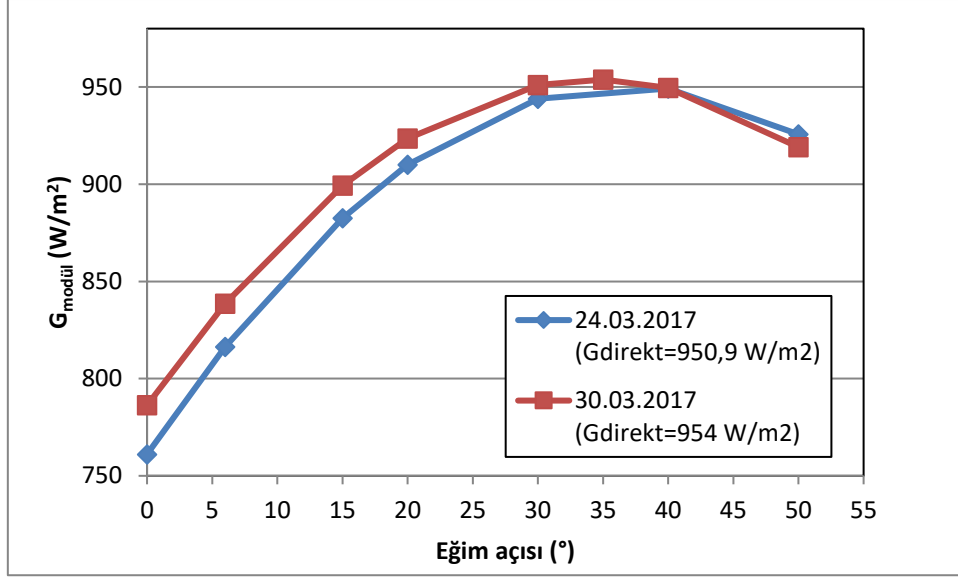
### 4.1. Dış Ortam Saha Deneyleri İçin Deneysel Bulgular ve Tartışma

Dış ortam saha deneyleri için, Hacettepe Üniversitesi Güneş Evi bahçesine kurulan test düzeneğinde, 6°-50° aralığında 5 farklı eğim açısındaki panellerden ilk sırasındaki modüller manuel olarak temizlenirken, ikinci sıradaki paneller temizlenmemiştir. İlk ölçümler Mart-Eylül ayları arasında 8 ay boyunca, ikinci ölçümler ise Temmuz ayında alınmıştır. Öğle saatlerinde havanın açık ve güneşli olduğu günlerde, modüllerin kısa devre akımları ve ışınım değerleri ölçülmüştür. Eğimli yüzeye gelen ışınım için Eş. 3.1. kullanılarak hesaplanan ışınım değerleri ile Ek 3’de açıklanan teorik ışınım değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Işınım değerleri incelendiğinde, optimum eğim açısının mevsime göre değiştiği gözlenmiştir. Her bir eğim açısı için temizlenmiş ve kirli panellerin kısa devre akımı değerleri, 1000 W/m<sup>2</sup> ve 25°C standart test koşullarına göre normalize edilmiş ve bu değerler kullanılarak günlük tozlanma ve birikimli tozlanma etkisi incelenmiştir.

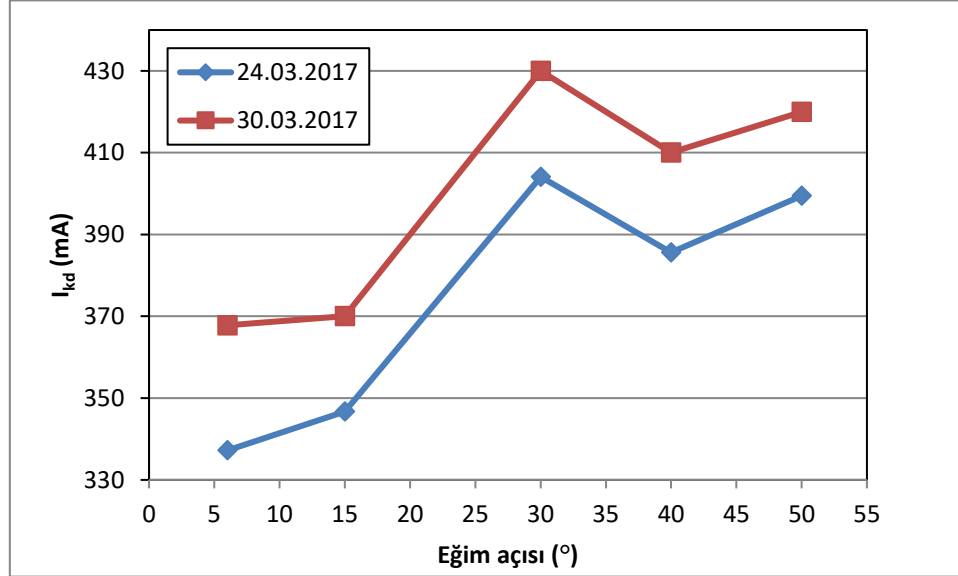
#### 4.1.1. Eğim Açısının Etkisi

Eğim açısının etkisini incelemek için öncelikle, Ek 3’de açıklanan PV Light House programında Solar Spectrum Calculator kullanılarak, veri alınan her gün için tüm eğim açılara ait ışınım değerleri hesaplanmış ve Çizelge Ek3.1’de verilmiştir. Bu teorik ışınım değerleri ile her bir ay için eğim açısına bağlı olarak panel üzerine gelen ışınımın değişimini gösteren grafikler çizilmiştir. Bu grafiklere ek olarak, veri alınan her bir gün için, aylık olarak, ölçüm öncesi temizlenmiş T’ panellerinin normalize edilmiş kısa devre akım değerlerinin eğim ile değişimini gösteren grafikler de çizilmiştir (Şekil 4.1 – Şekil 4.14).

Mart ayında ölçüm yapılan iki gün için (24 Mart 2017, 30 Mart 2017) çizilen grafik incelendiğinde, Mart ayı için panel eğim açısının optimum değerinin 35° olduğu görülmektedir. Teorik ışınım değerleri ve ölçülen kısa devre akım değerlerine ait grafikler birbirleri ile uyumludur (Şekil 4.1-Şekil 4.2).



**Şekil 4.1:** Mart ayı için teorik ışınlam değerlerinin eğim açısı ile değişimi

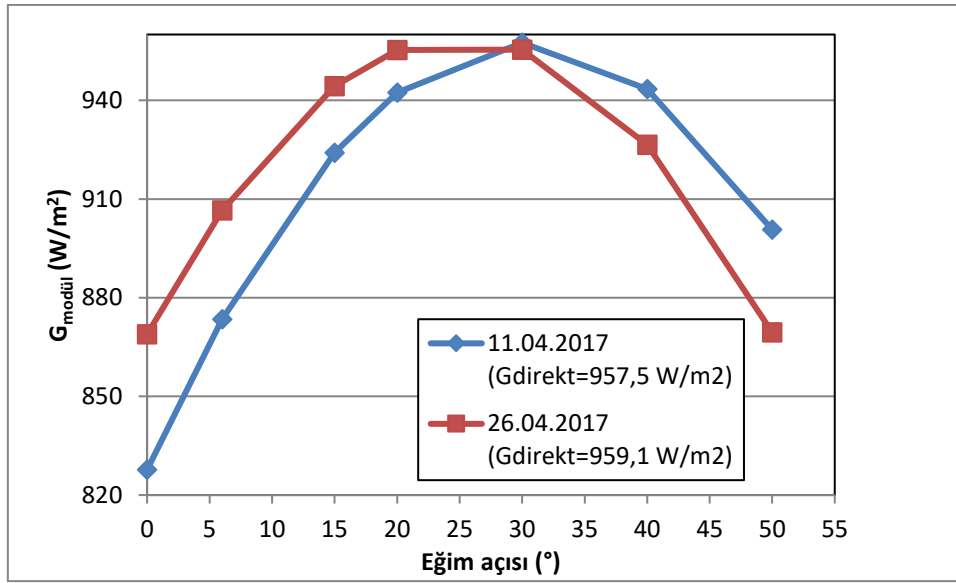


**Şekil 4.2:** Mart ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi

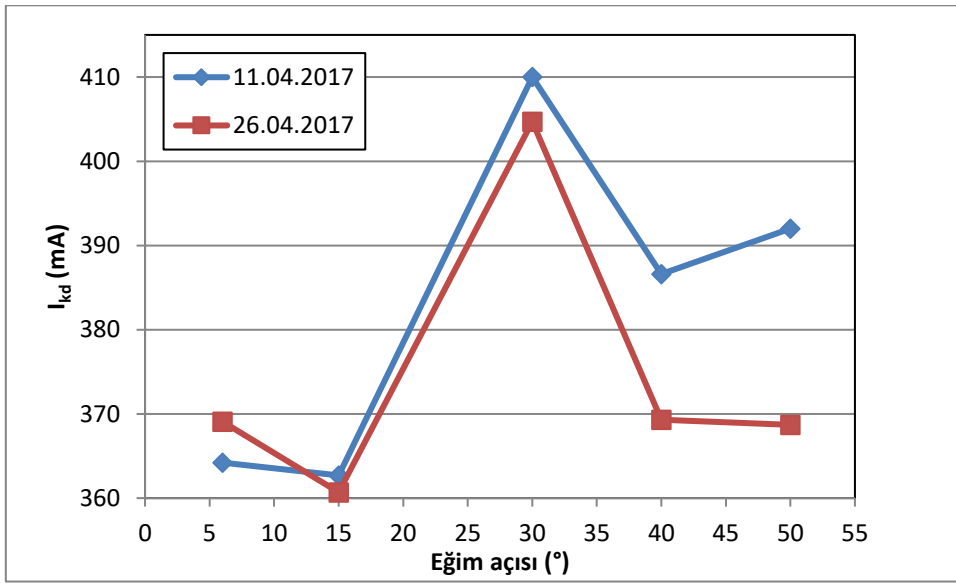
Benzer incelemeler diğer aylar için yapıldığında, Şekil 4.3- Şekil 4.14'de verilen grafiklerden optimum açı değerinin

- Nisan, Mayıs, Temmuz ayları için, sırasıyla 30°, 20°, 15° olduğu,
- Ağustos ayında Temmuz ayına benzer şekilde 25-30° aralığında değiştiği,
- Eylül ayında artmaya başlayarak 35°'ye çıktığı,
- Ekim ayında artışını sürdürerek Ekim sonu itibarıyla 50°'ye çıktığı ve optimum eğim açısının en yüksek olduğu ayın Ekim ayı olduğu.

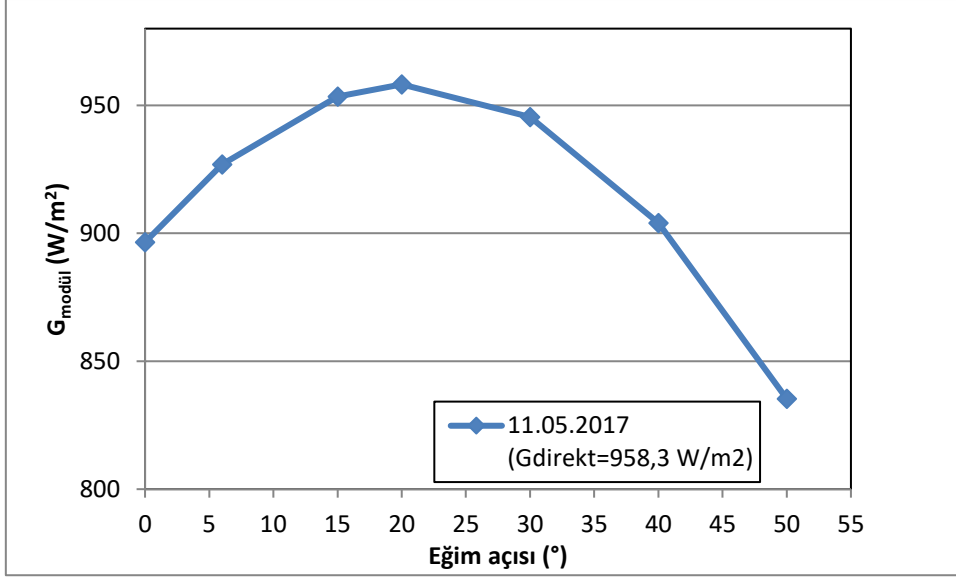
görülmektedir.



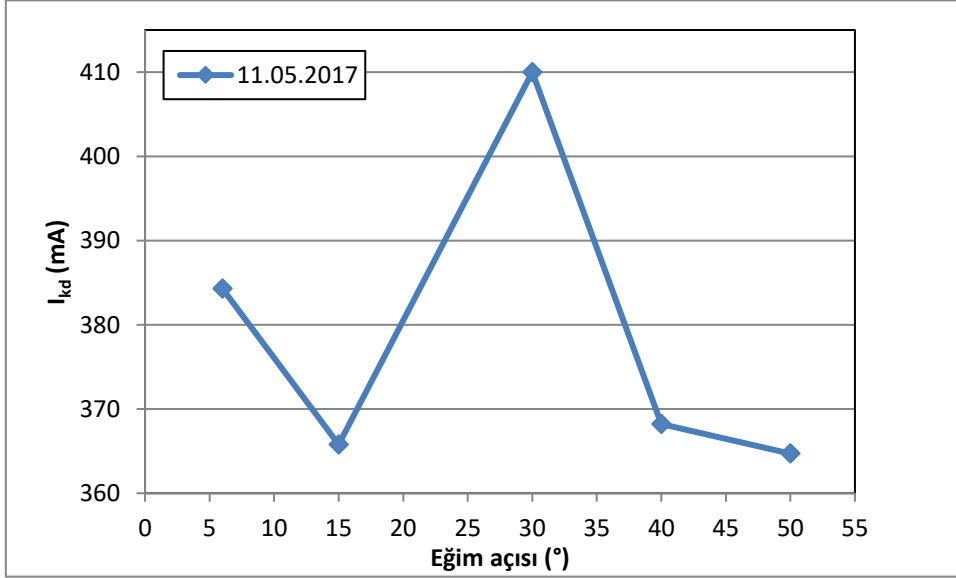
Şekil 4.3: Nisan ayı için teorik ışınlam değerlerinin eğim açısı ile değişimi



Şekil 4.4: Nisan ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi

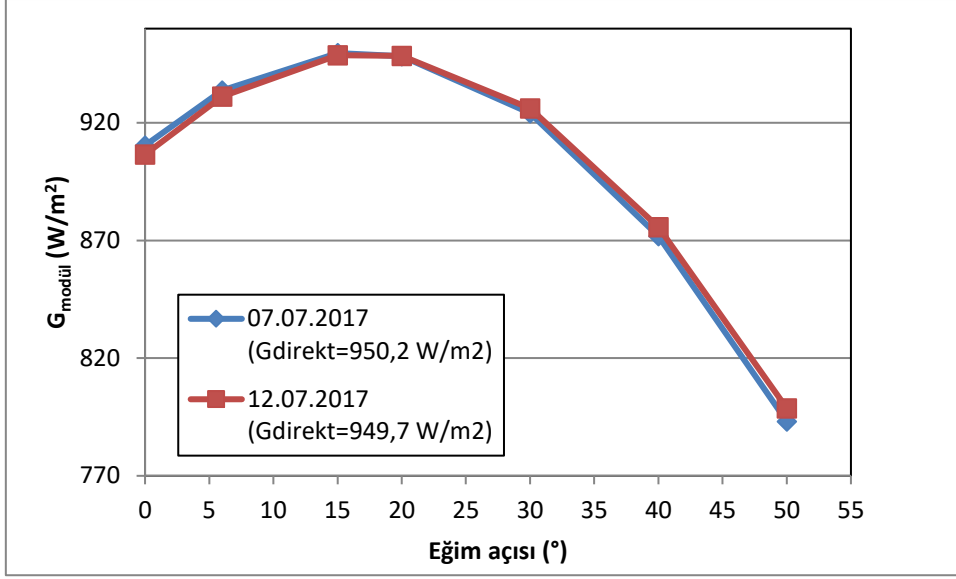


Şekil 4.5: Mayıs ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi

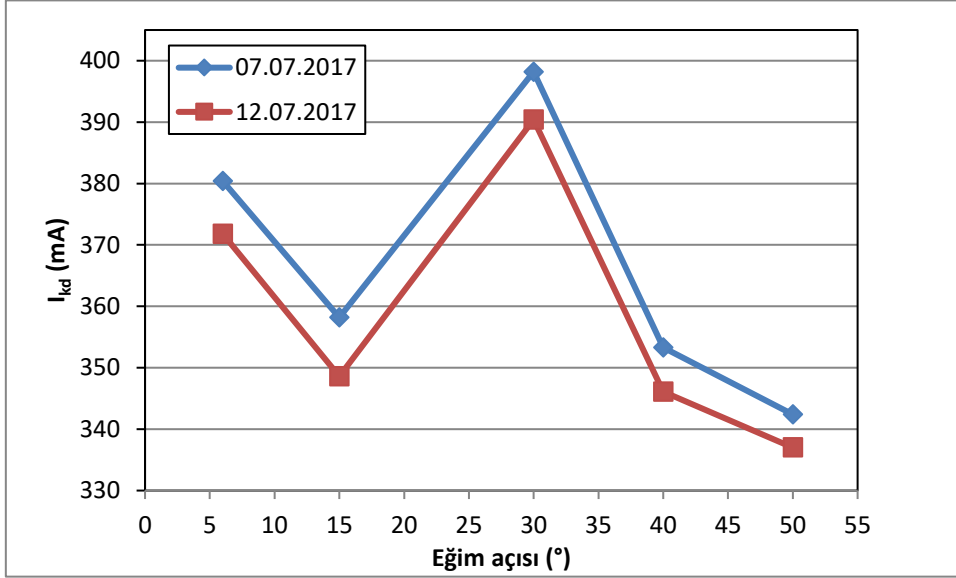


Şekil 4.6: Mayıs ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi

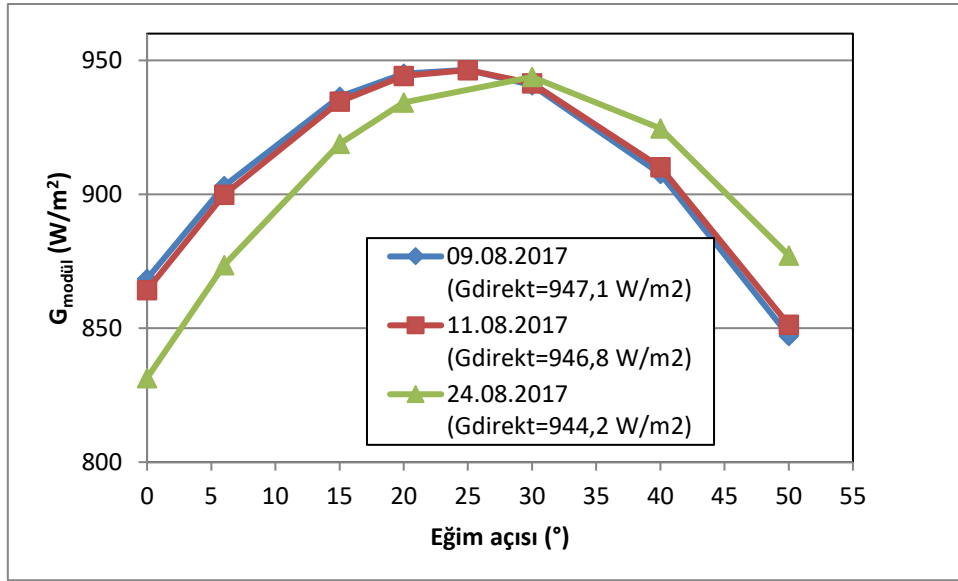




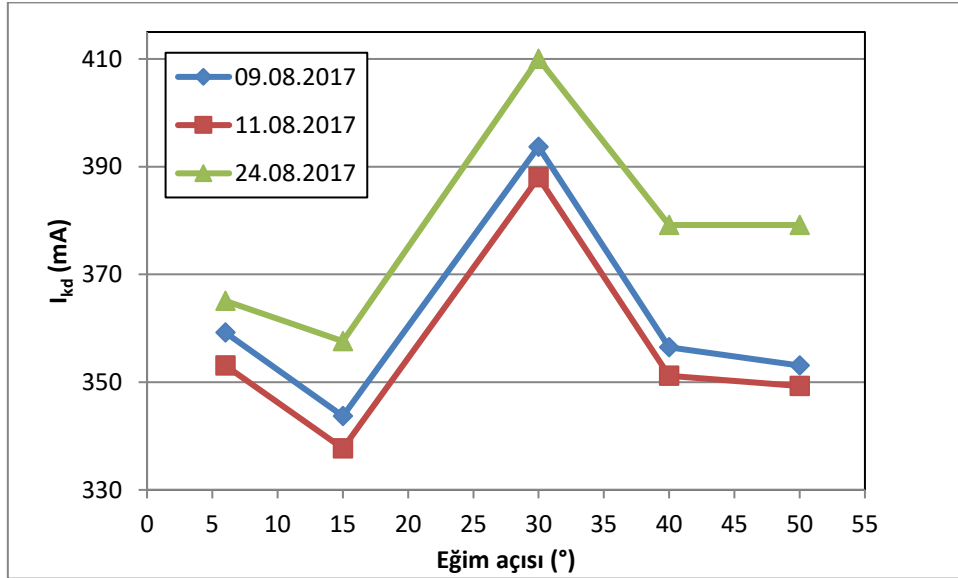
Şekil 4.7: Temmuz ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi



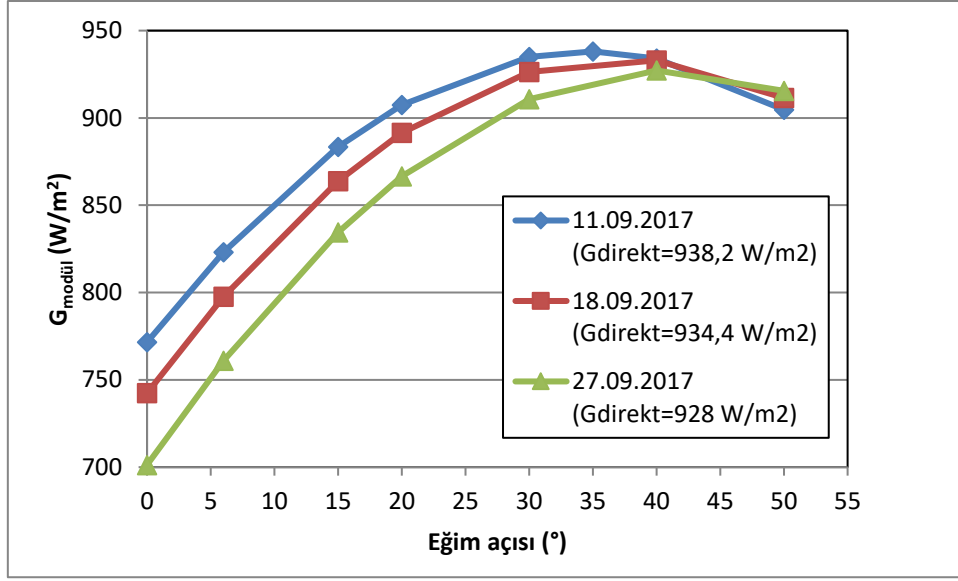
Şekil 4.8: Temmuz ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi



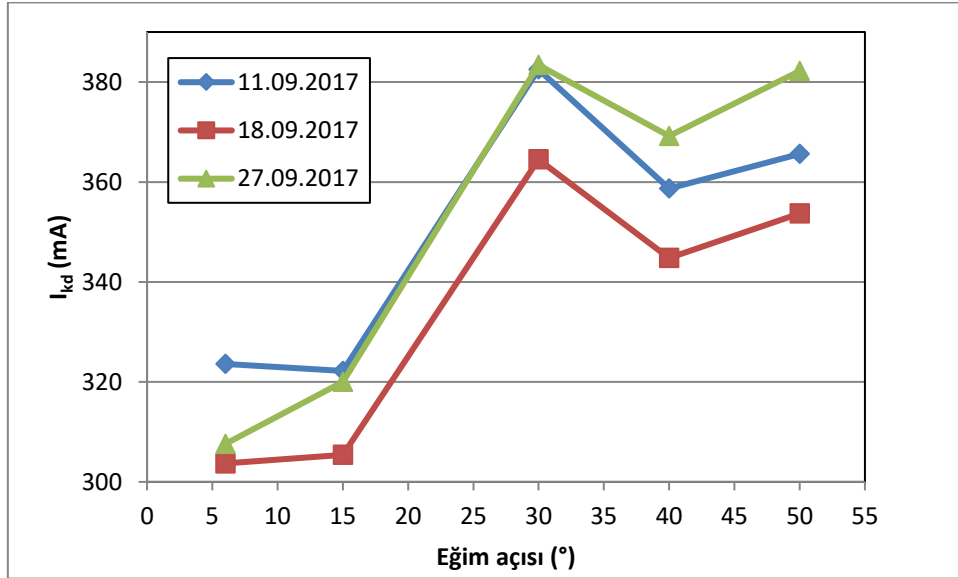
Şekil 4.9: Ağustos ayı için teorik ışınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi



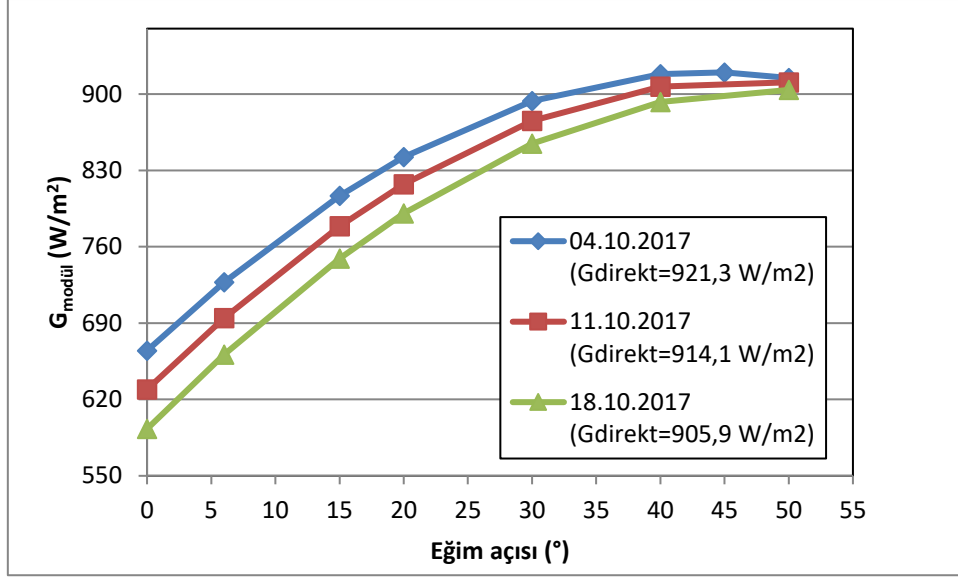
Şekil 4.10: Ağustos ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi



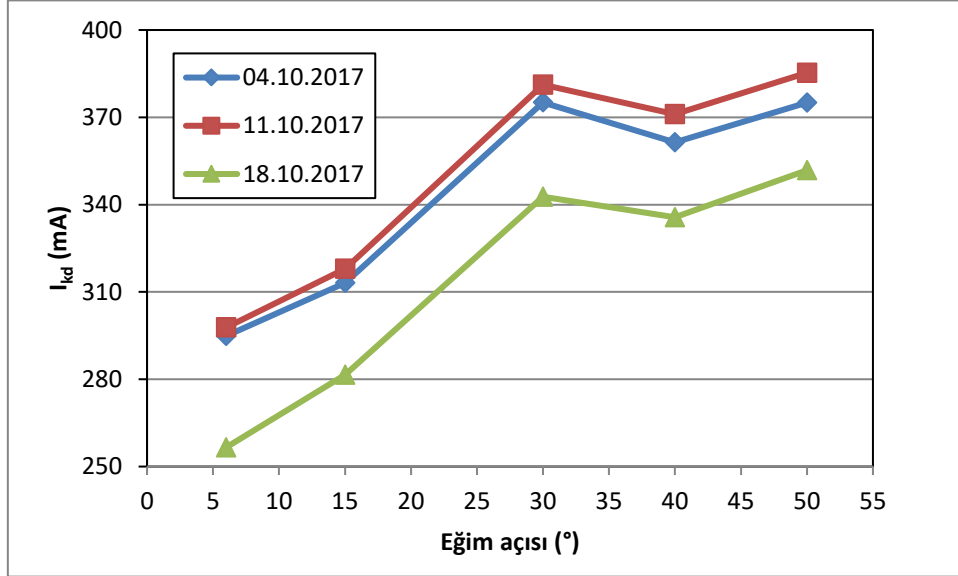
Şekil 4.11: Eylül ayı için teorik ışınlım değerlerinin eğim açısı ile değişimi



Şekil 4.12: Eylül ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi

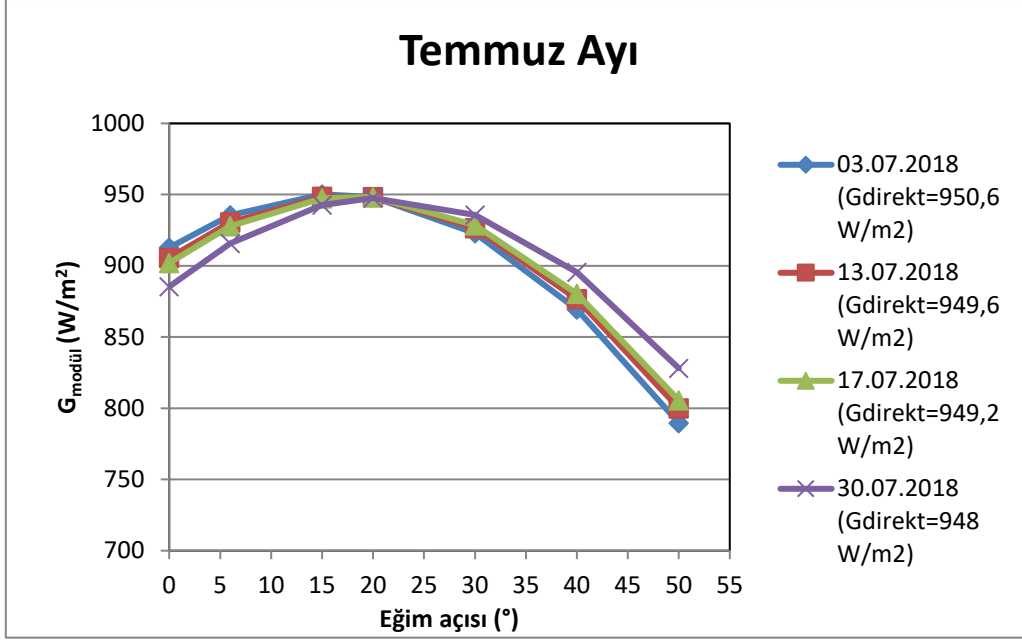


Şekil 4.13: Ekim ayı için teorik ışıınım değerlerinin eğim açısı ile değişimi

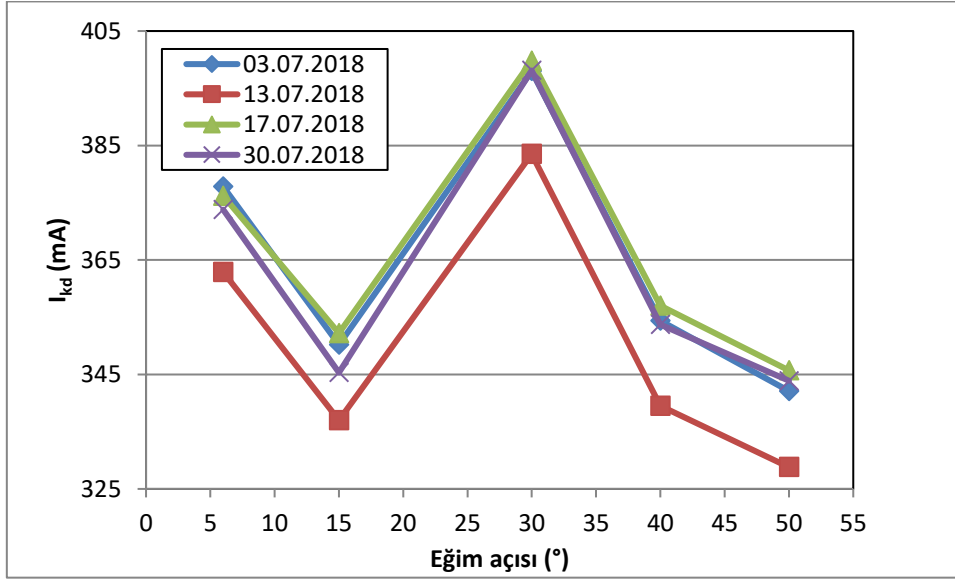


Şekil 4.14: Ekim ayı için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi

Temmuz 2018’de ölçümlerin tekrarlanmasına ait teorik değerler Çizelge Ek3.1’de verilmektedir. Ölçüm sonuçları ile teorik değerler karşılaştırıldığında, optimum açı değerinin  $15^0$ - $20^0$  aralığında değiştiği görülmektedir (Şekil 4.15-Şekil 4.16).

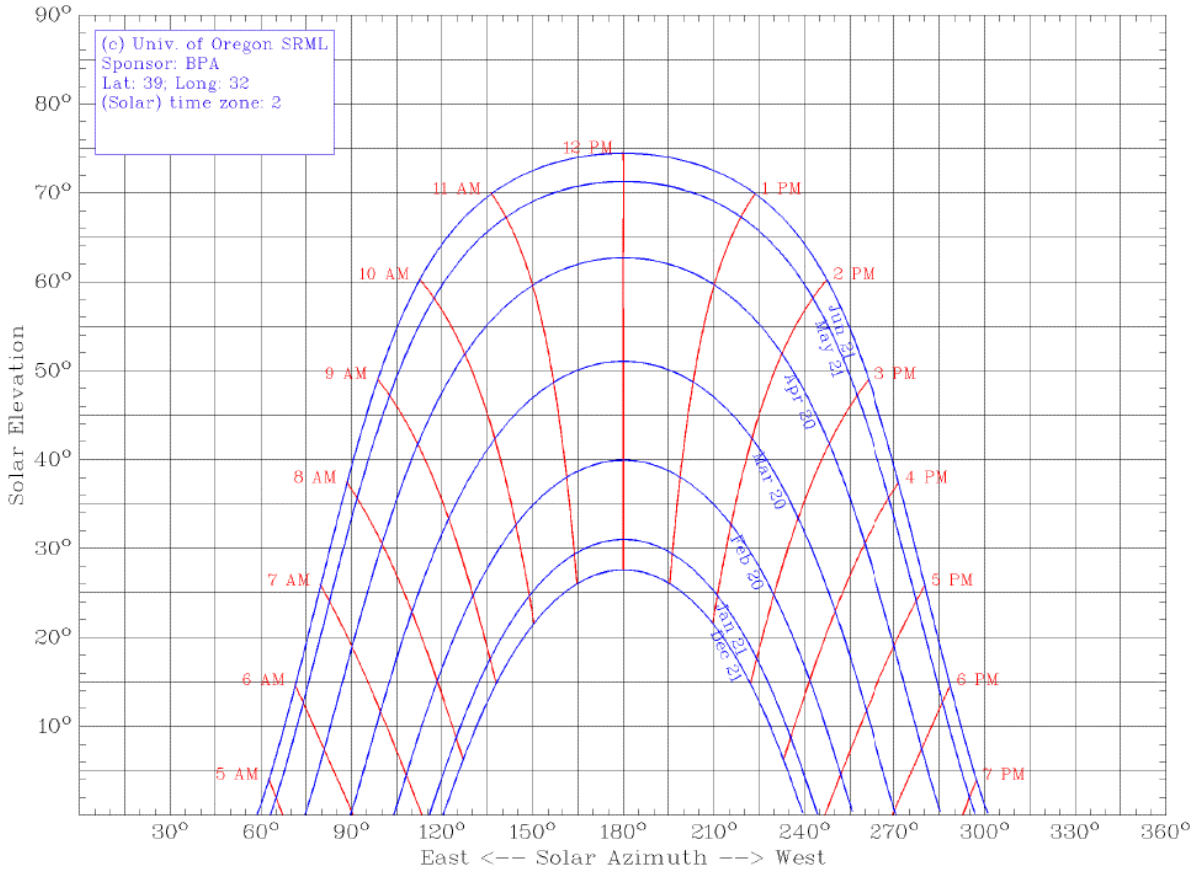


**Şekil 4.15:** Temmuz 2018 için teorik ışınlam değerlerinin eğim açısı ile değişimi



**Şekil 4.16:** Temmuz 2018 için ölçülen kısa devre akımı değerlerinin panelin eğim açısı ile değişimi

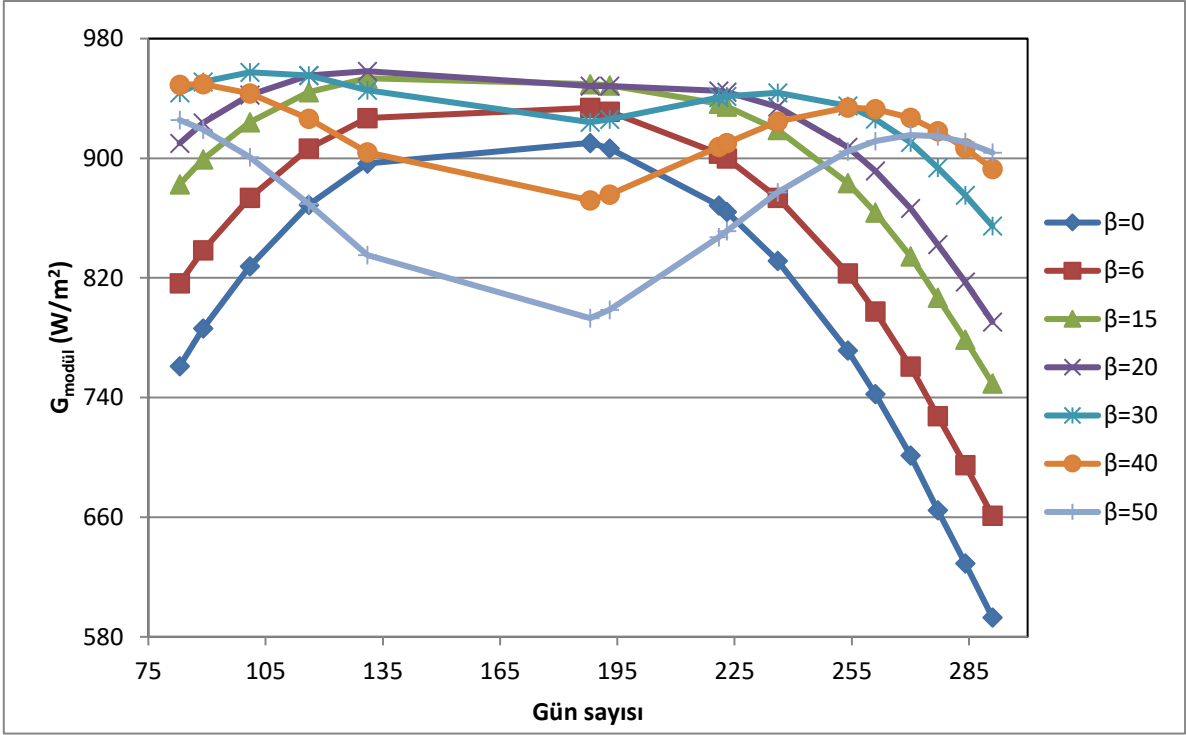
Şekil 4.17’de, Oregon Üniversitesinin geliştirdiği Sun Path [89] yazılımı kullanılarak Beytepe Güneş Evi için oluşturulan güneş-yol çizeneği (sun path diagram) verilmiştir. Bu eğri incelendiğinde, güneşin gelme açısının en yüksek olduğu Mayıs-Haziran aylarında ışınlamın en yüksek olması beklenir. Bu durum, yukarıda verilen ışınlam değerleriyle uyumaktadır.



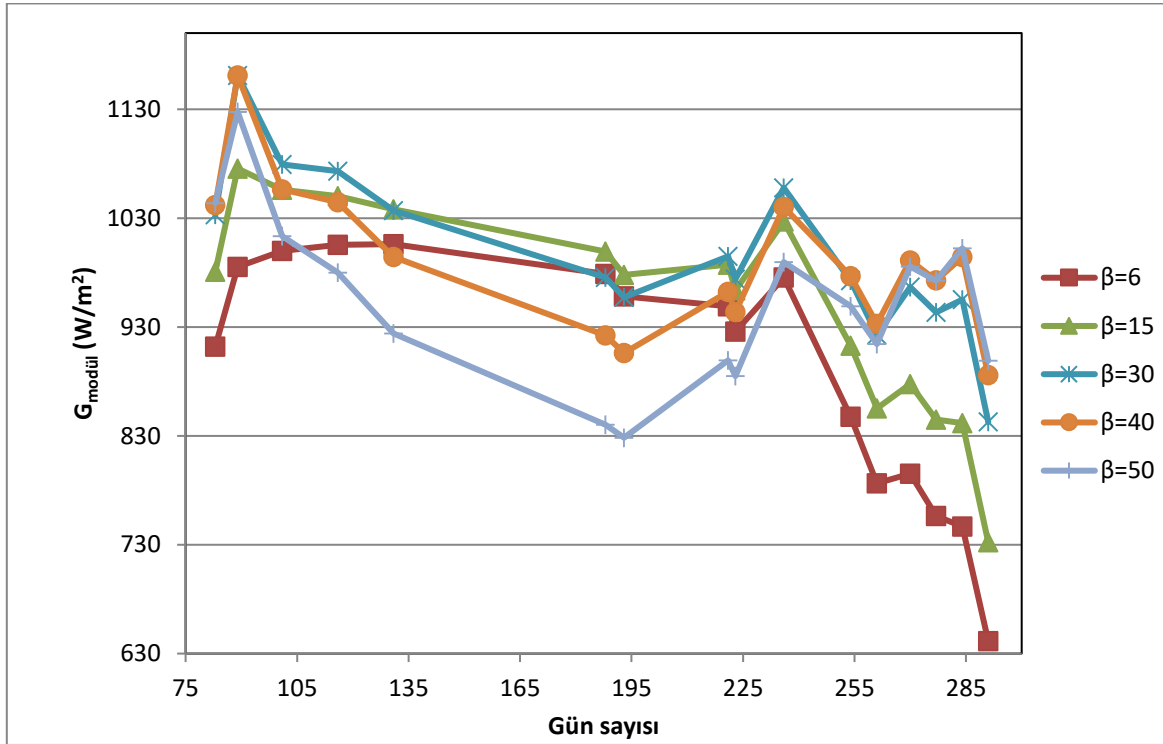
**Şekil 4.17:** Beytepe için Güneşyol çizeneği [89]

Ölçü alınan tüm günler için panel üzerine gelen teorik ışınım değerleri (Çizelge Ek3.1) için ve piranometreden okunan ışınım değerleri ve ölçülen kısa devre akım değerleri, sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de çizilmiştir. Teorik ışınım değerleri ile ölçülen ışınım değerlerinin eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir. Temmuz ayında, panel eğim açısı  $40-50^\circ$  olduğunda, ışınım değerinde düşüş olduğu grafiklerden okunmaktadır. Bu durum, temmuz ayı için panelin optimum eğim açısının  $15-20^\circ$  aralığında değişmesi ile açıklanabilir. Optimum eğim açısı için ışınım değeri maksimum olmaktadır.

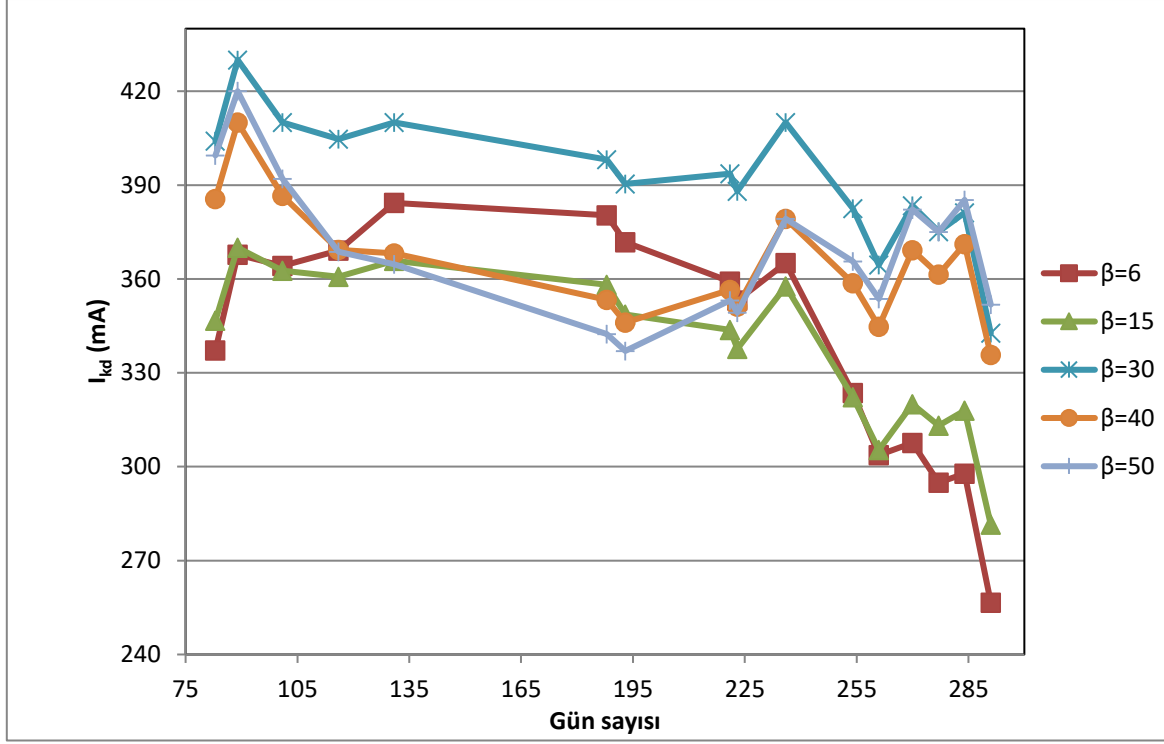
Panel üzerine düşen ışınım ve kısa devre akımı orantılı olduğundan (Eş. Ek1.1), veri alınan tarihler için kısa devre akım değerlerinin ve ölçülen ışınım değerlerinin değişim benzer çıkmıştır (Şekil 4.19, Şekil 4.20).



Şekil 4.18: Teorik ışınlam değerlerinin eğim açısına göre değişiminin günlere göre dağılımı



Şekil 4.19: Ölçülen ışınlam değerlerinin eğim açısına göre değişiminin günlere göre dağılımı



**Şekil 4.20:** Ölçülen akım değerlerinin eğim açısına göre değişiminin günlere göre dağılımı

Yukarıda bulguları verilen ifadelerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Teorik ışınım değerleri incelendiğinde, her bir ay için, panel üzerine gelen ışınım değerinin içerisinde bulunan gün ve mevsime göre optimum eğim açısına kadar arttığı, optimum eğim açısından sonra azaldığı gözlenmiştir. Benzer olarak, 2017 yılında, Xu'nun yaptığı çalışmada, enerji yoğunluğunun, eğim açısı artışı ile optimum açığa kadar arttığı, optimum açıdan sonra azaldığını belirtmiştir [15]. Bu sonuç, çizilen eğriler ile uyumludur. Ancak, Şekil 4.3 ve Şekil 4.5 incelendiğinde, optimum açıdan sonra kısa devre akımı azalmış ve daha sonra tekrar artmıştır. Bu artışın nedeninin homojen olmayan tozlanmanın olabileceği düşünülmektedir.
- Optimum eğim açısı yıl içinde mevsime göre değişmektedir (Şekil 4.1 – Şekil 4.14). Optimum eğim açısında ışınım değeri maksimum olmaktadır. Ayrıca, ışınım ile kısa devre akımı orantılı olduğundan, ölçülen kısa devre akımları için eğime karşı çizilen eğri grafikleri benzer sonuçlar vermiştir. Optimum açı değerlerinin PVLIGHT House programında hesaplanan değerlerle (Çizelge Ek3.1) uyumlu olduğu görülmüştür. Tozun panel performansına etkisinin mevsime göre değişmesi ile ilgili literatür çalışmaları [60][74] Bölüm 2.2'de açıklanmıştır.



#### 4.1.2. Günlük Tozlanma Etkisi

Dış sahada ölçüm yapılan tüm günler için, her bir eğim açısı için tozlu ve temizlenmiş panellerin kısa devre akımlarından Eş. 3.2 ile hesaplanan, günlük tozlanmanın, Çizelge 4.1 ile verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, temizleme sonrasında kısa devre akımlarının arttığı gözlenmiştir. Bazı eğim açılarındaki akım değerleri artmak yerine az da olsa azalmıştır. Bu azalma, 2018 verileriyle tekrar incelenmiştir.

Aynı tarihte eğim açıları karşılaştırıldığında, optimum eğim açısında, günlük tozlanma faktörünün minimum olması beklenir. Çizelge 4.1 incelendiğinde, aylara göre değişen optimum eğim açısı için günlük tozlanma faktörünün çok küçük olduğu görülmektedir. Örneğin Nisan ayında optimum eğim açısı  $30^\circ$  olduğundan, Çizelge 4.1'te 11.04.2017'de günlük temizleme faktörü sıfırdır. Ağustos ayında optimum eğim açısı da  $30^\circ$  olduğundan, aynı durum 24.08.2017 tarihi için de geçerlidir.

Panellerin elle temizlenmesi sonucu, temizlenmiş panellere ve temizlenmemiş panellere ait akım değerleri karşılaştırıldığında temizlenmiş panellere ait akım değerlerinin temizlenmemiş panellere göre daha fazla çıktığı görülmektedir. Günlük tozlanma etkisinin optimum açı ile ilişkisi incelendiğinde, optimum açı değerinde günlük tozlanmanın minimum olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, optimum açı değerinde, panel üzerine gelen ışınımın maksimum olması Benzer olarak, Mohammed ve arkadaşlarının (2012), yaptıkları çalışmaya göre, temizlenmiş panellere ait gücün, temizlenmemiş panellere göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır [19]. Bu durum, Çizelge 4.1'te büyük oranda sağlanırken, bazı akım değerlerinin temizleme sonrası azaldığı gözlenmiştir.

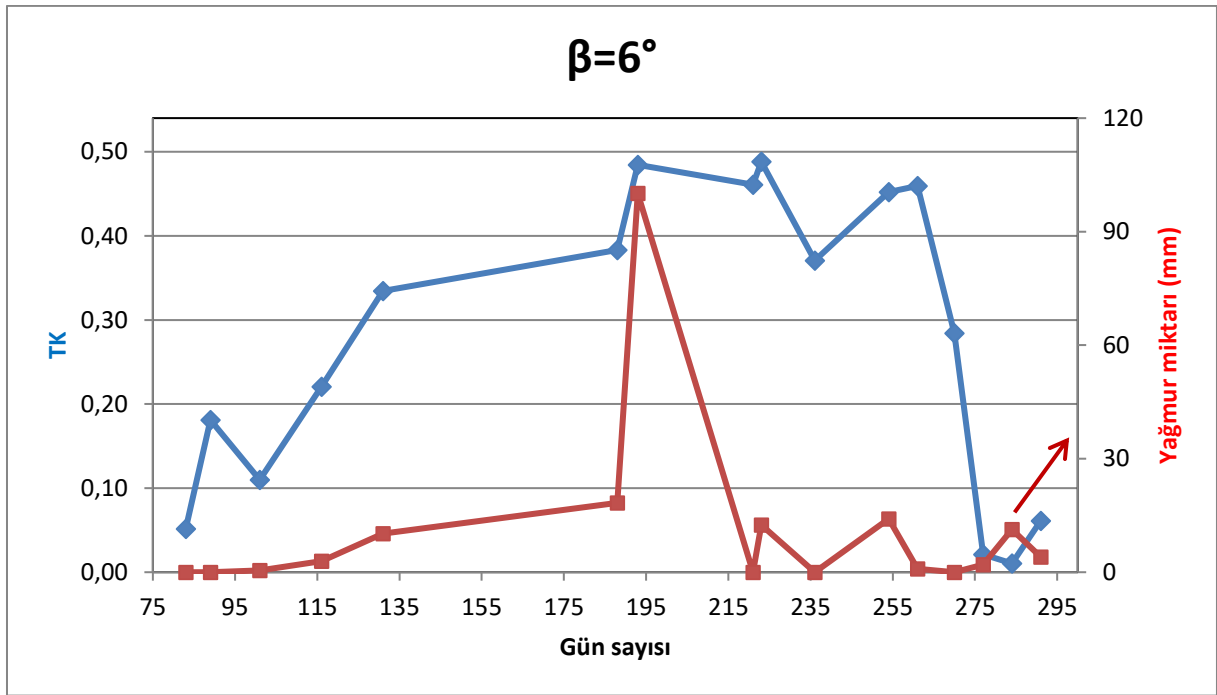
**Çizelge 4.1:** Günlük temizlemenin eğim açısına göre değerlendirilmesi

Tarih	Gün sayısı	$\beta=6^\circ$			$\beta=15^\circ$			$\beta=30^\circ$			$\beta=40^\circ$			$\beta=50^\circ$		
		I <sub>kd,tozlu</sub> (mA)	I <sub>kd,temiz</sub> (mA)	Günlük tozlanma (%)	I <sub>kd,tozlu</sub> (mA)	I <sub>kd,temiz</sub> (mA)	Günlük tozlanma (%)	I <sub>kd,tozlu</sub> (mA)	I <sub>kd,temiz</sub> (mA)	Günlük tozlanma (%)	I <sub>kd,tozlu</sub> (mA)	I <sub>kd,temiz</sub> (mA)	Günlük tozlanma (%)	I <sub>kd,tozlu</sub> (mA)	I <sub>kd,temiz</sub> (mA)	Günlük tozlanma (%)
24.03.2017	83	336,5	337,2	<b>0,21</b>	344	346,7	<b>0,78</b>	403,5	404,1	<b>0,15</b>	386,5	385,6	<b>0,23</b>	399,8	399,5	<b>0,08</b>
30.03.2017	89	343,3	367,8	<b>6,66</b>	347,1	370	<b>6,19</b>	410	430	<b>4,65</b>	389	410	<b>5,12</b>	400	420	<b>4,76</b>
11.04.2017	101	359,6	364,2	<b>1,26</b>	358,4	362,7	<b>1,19</b>	410	410	<b>0,00</b>	384,6	386,6	<b>0,52</b>	390,5	392	<b>0,38</b>
26.04.2017	116	364,5	369,1	<b>1,25</b>	355,3	360,7	<b>1,50</b>	402,6	404,7	<b>0,52</b>	368	369,3	<b>0,35</b>	367,9	368,7	<b>0,22</b>
11.05.2017	131	375,4	384,3	<b>2,32</b>	358,2	365,8	<b>2,08</b>	404,5	410	<b>1,34</b>	364	368,2	<b>1,14</b>	359	364,7	<b>1,56</b>
07.07.2017	188	366,4	380,4	<b>3,68</b>	344,7	358,2	<b>3,77</b>	383,6	398,2	<b>3,67</b>	341,5	353,3	<b>3,34</b>	332,3	342,4	<b>2,95</b>
12.07.2017	193	368,7	371,8	<b>0,83</b>	344,5	348,6	<b>1,18</b>	387,3	390,4	<b>0,79</b>	344,7	346,1	<b>0,40</b>	333,5	337	<b>1,04</b>
09.08.2017	221	353,4	359,2	<b>1,61</b>	337,1	343,7	<b>1,92</b>	387,8	393,7	<b>1,50</b>	352,6	356,5	<b>1,09</b>	349,2	353,1	<b>1,10</b>
11.08.2017	223	354,1	353,1	<b>0,28</b>	337,3	337,7	<b>0,12</b>	388,3	388	<b>0,08</b>	352,1	351,2	<b>0,26</b>	349,1	349,3	<b>0,06</b>
24.08.2017	236	361,2	365,1	<b>1,07</b>	362,1	357,6	<b>1,26</b>	410	410	<b>0,00</b>	381,2	379,2	<b>0,53</b>	380,8	379,2	<b>0,42</b>
11.09.2017	254	317,4	323,6	<b>1,92</b>	317,2	322,2	<b>1,55</b>	378,2	382,5	<b>1,12</b>	355,8	358,7	<b>0,81</b>	362,7	365,6	<b>0,79</b>
18.09.2017	261	297,8	303,7	<b>1,94</b>	300	305,4	<b>1,77</b>	359,4	364,5	<b>1,40</b>	341,4	344,8	<b>0,99</b>	350,6	353,7	<b>0,88</b>
27.09.2017	270	299,1	307,6	<b>2,76</b>	318,4	320	<b>0,50</b>	384,2	383,4	<b>0,21</b>	370	369,2	<b>0,22</b>	382,4	382,2	<b>0,05</b>
04.10.2017	277	291,2	294,9	<b>1,25</b>	310,6	313,1	<b>0,80</b>	374	375,1	<b>0,29</b>	362,2	361,4	<b>0,22</b>	375,5	375	<b>0,13</b>
11.10.2017	284	292,9	297,8	<b>1,65</b>	312,6	318	<b>1,70</b>	378,8	381,2	<b>0,63</b>	371,2	371,1	<b>0,03</b>	387,3	385,3	<b>0,52</b>
18.10.2017	291	252,5	256,6	<b>1,60</b>	277	281,5	<b>1,60</b>	337,8	342,7	<b>1,43</b>	334,2	335,7	<b>0,45</b>	352,2	351,8	<b>0,11</b>

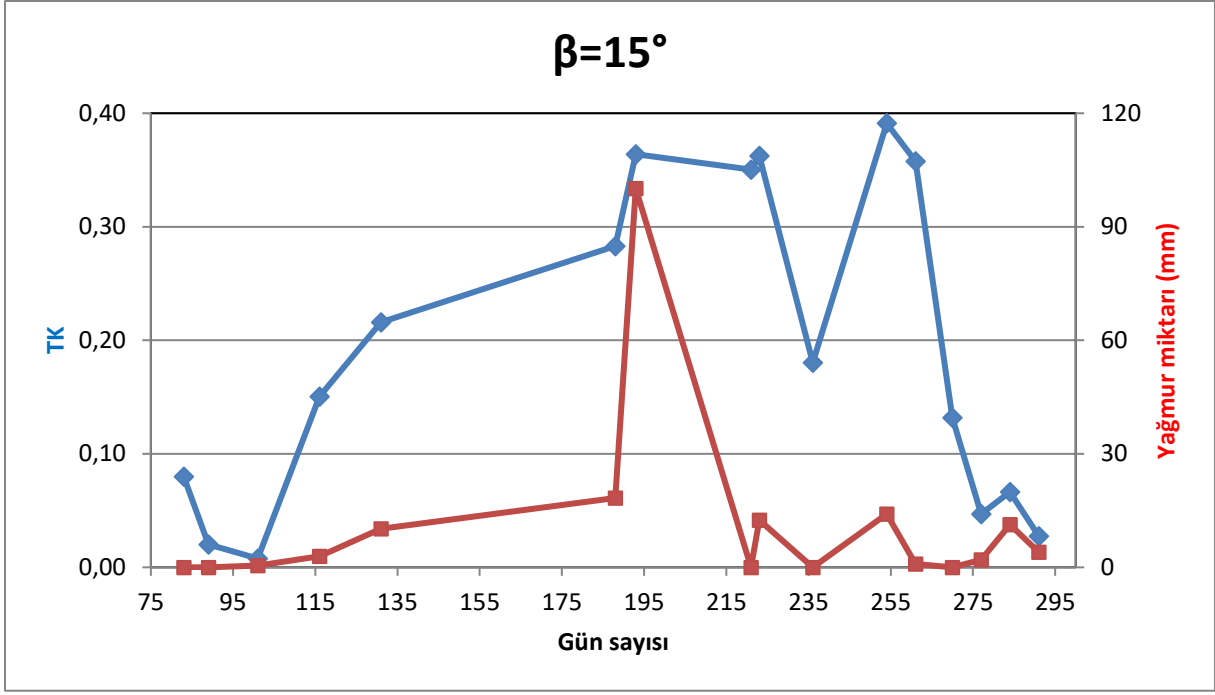
### 4.1.3. Birikimli Tozlanma Etkisi

Ölçüm alınan her gün ve her bir eğim açısı için Eş. 3.3 kullanılarak hesaplanan tozlanma kayıpları ve deney yapılan zaman aralığı içindeki yağış miktarı belirlenerek birikimli tozlanma etkisi incelenmiştir.

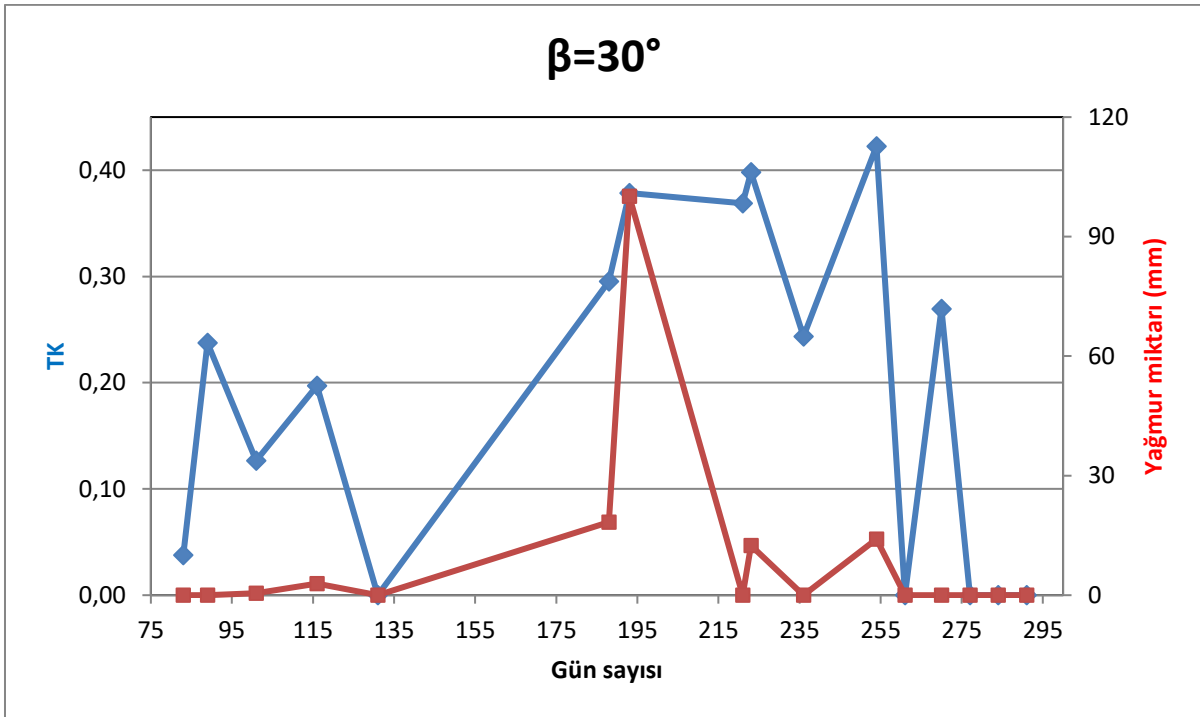
Yağış olduğu durumlarda, tozlanma kaybı azalmakta, yağış yokken panel üzerindeki toz birikmesi arttığından tozlanma kaybı artmaktadır. Yağış ile birlikte tozlanma kaybındaki azalmanın en fazla olduğu açı değerinin  $6^0$  olduğu görülmektedir (Şekil 4.21-Şekil 4.25).



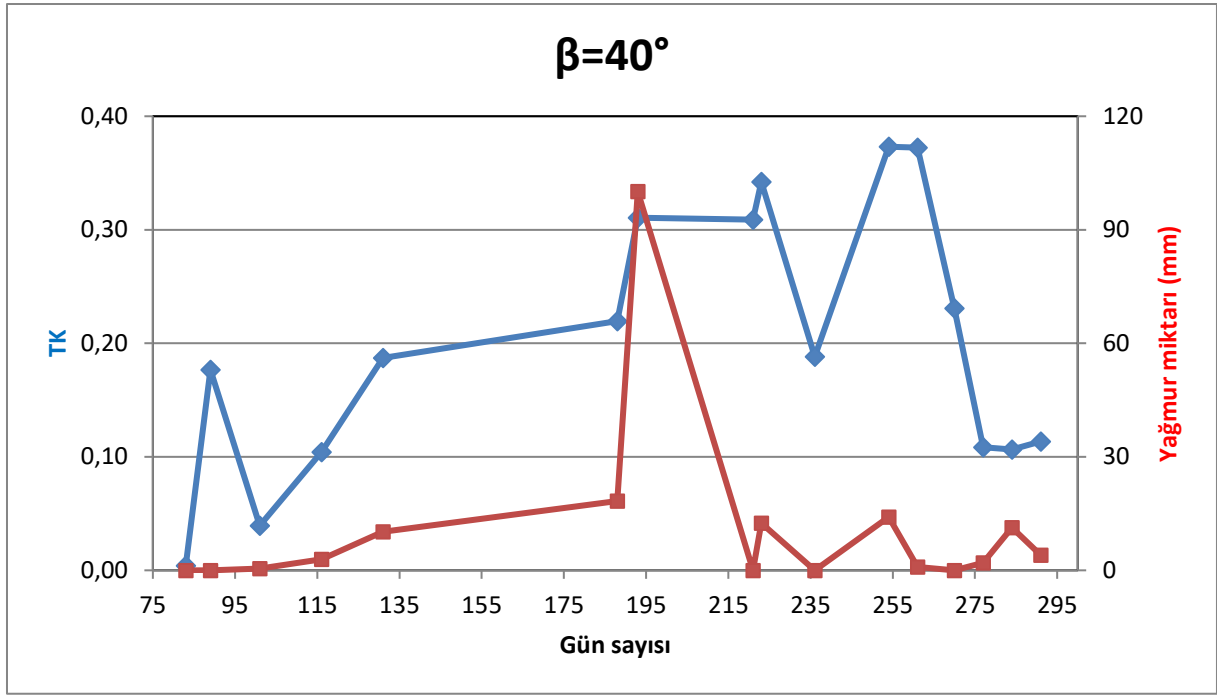
Şekil 4.21: Panelin eğim açısı  $6^0$  olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi



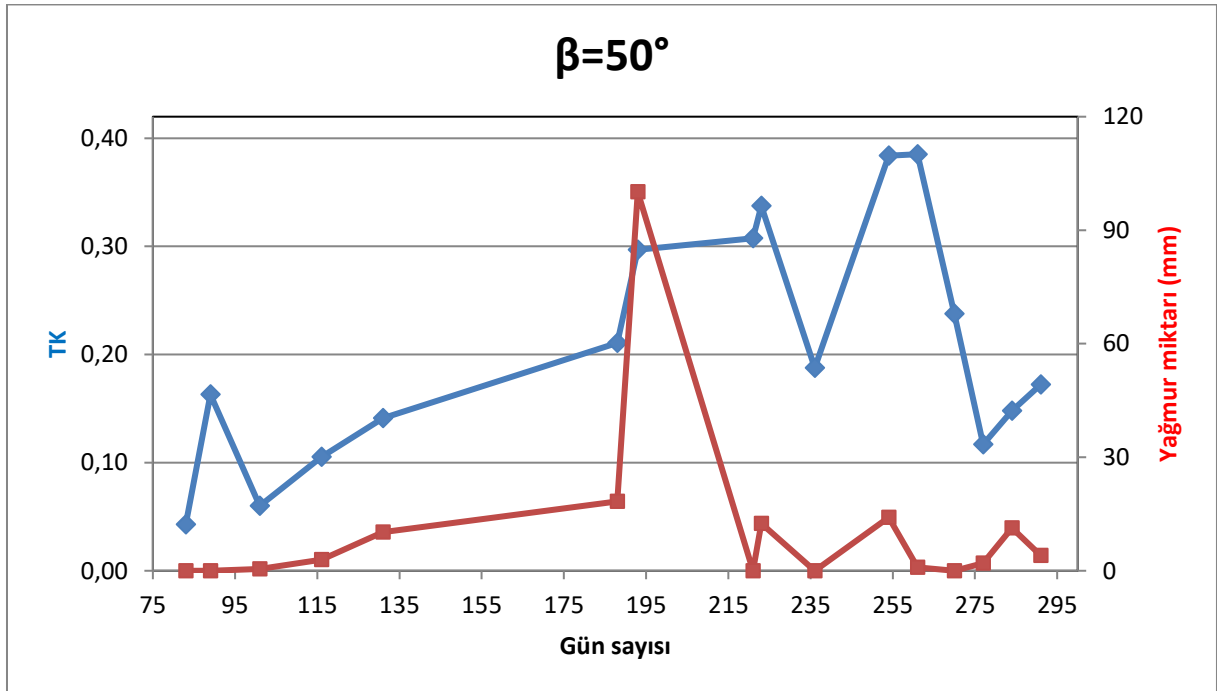
**Şekil 4.22:** Panelin eğim açısı  $15^\circ$  olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi



**Şekil 4.23:** Panelin eğim açısı  $30^\circ$  olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi

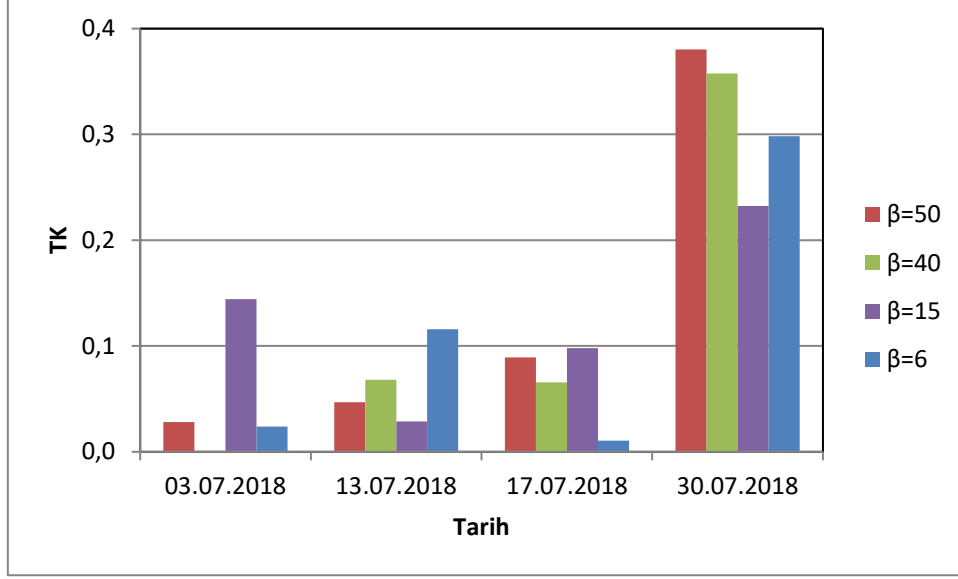


Şekil 4.24: Panelin eğim açısı 40° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi



Şekil 4.25: Panelin eğim açısı 50° olduğunda yağmurun tozlanma kaybına etkisi

Temmuz 2018’de veriler tekrarlanarak tozlanma kayıpları yeniden hesaplanmıştır. 2018 yılı Temmuz ayı yağışlı geçtiğinden tozlanma kaybındaki değişim incelendiğinde, 15° için tozlanma kaybı yağıştan en çok etkilenen açı olmuştur (Şekil 4.26).



**Şekil 4.26:** Temmuz 2018 verilerine göre eğim açısı ile tozlanma kaybının değişimi

Yağışın tozlanma kaybı ile değişimi incelendiğinde, yağış ile birlikte tozlanma kaybında azalma görülmektedir. Bunun yanında, Mart, Nisan ve Mayıs aylarında yağışa rağmen bazı tarihler için tozlanma kaybında artış görülmüştür. Buna benzer olarak, Micheli ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (2016), uzun kuru bir mevsim veya tozlu bir dönem sonrası meydana gelen yağışın, diğer dönemlerdeki yağışa göre panel üzerindeki kirlilik oranını arttırdığı sonucuna varmıştır. Kirlilik oranının, yağmurlu kış ayları için kuru yaz aylarından fazla olduğu belirtilmiştir [17]. Benzer şekilde, çalışma sırasında tozlanma kaybında artış görülmesinin sebebinin, rüzgarın veya yağın yağmurun türünden dolayı paneller üzerindeki toz birikmesi olduğu düşünülmektedir. Temmuz ayından sonra yağın yağmur ile tozlanma kaybı azalmış; yağmurun olmadığı aralıklar için paneller üzerinde biriken toz nedeniyle tozlanma kaybı artmıştır. Ekim ayının sonlarında ise yağışa rağmen tozlanma kaybının artışı, panel üzerinde gözle görülebilen çok miktarda toz birikmesidir.

2018 yılı Temmuz ayında verilerin tekrarlanması ile bu durum Meteorolojideki toz taşınım verileriyle araştırılmıştır. Ek4'te verilen toz taşınım grafiği incelendiğinde, 24.07.2018 tarihindeki çok miktarda yağış sonucu, Ankara'da orta seviyede toz taşınımı olduğu görülmektedir. Bu toz taşınımının, paneller üzerinde toz birikmesine ve kirlilik oranında artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Buradan, yağışın temizleme etkisinin yanında, kirletici etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca, rüzgar da toz taşınımı için önemli bir faktördür. Çok rüzgarlı günlerde panel üzerinde toz birikmesi artabilmektedir. Bu durum Bölüm 2.2'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

## 4.2. İç Ortam Laboratuvar Deneyleri İçin Deneysel Bulgular ve Tartışma

### 4.2.1. Yapay Tozlanma Deneylerine Ait Bulgular

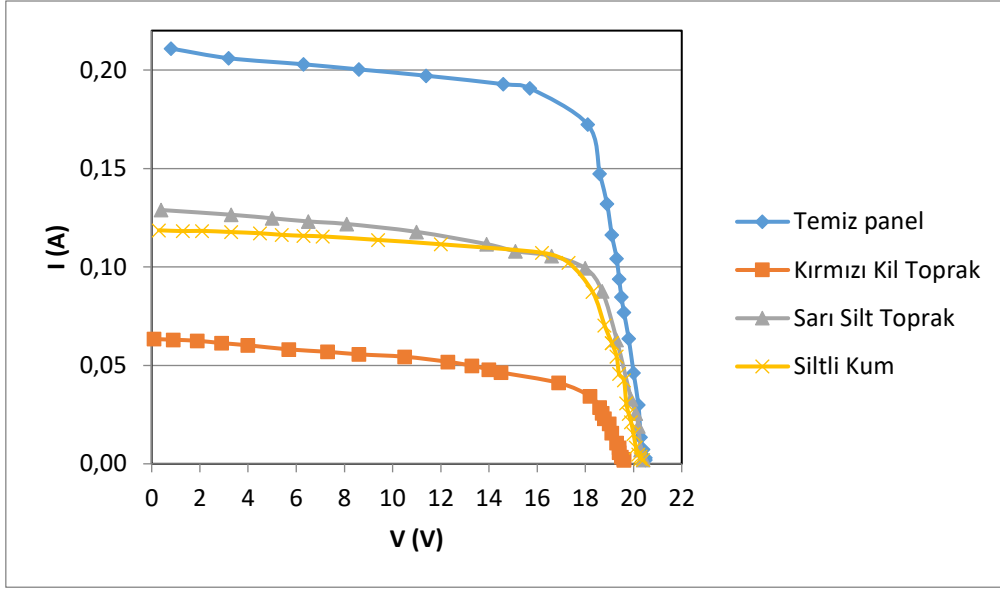
Bu tez çalışmasında, yapay tozlanma deneylerinde, 5 farklı eğim açısı için 3 farklı malzemeden oluşturulan tozlar panel üzerine farklı miktarlarda serpiştirilerek I-V ve P-V eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 4.27-Şekil 4.32).

Her biri M=5 gram miktarında hazırlanan 3 farklı toz malzemesi ile 6° eğim açısı için yapılan deney sonuçlarından elde edilen I-V grafiği Şekil 4.27’de, P-V grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir. I-V eğrilerindeki paralel kayma, 5 gram tozlanma ile homojen gölgelenme etkisi olduğunu göstermektedir. Toz çeşitlerinin karşılaştırılması yapıldığında, en düşük kısa devre akımı ve en düşük güç değeri kırmızı kil toprak örnekte görülürken sarı silt toprak ve siltli kuma ait eğrilerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

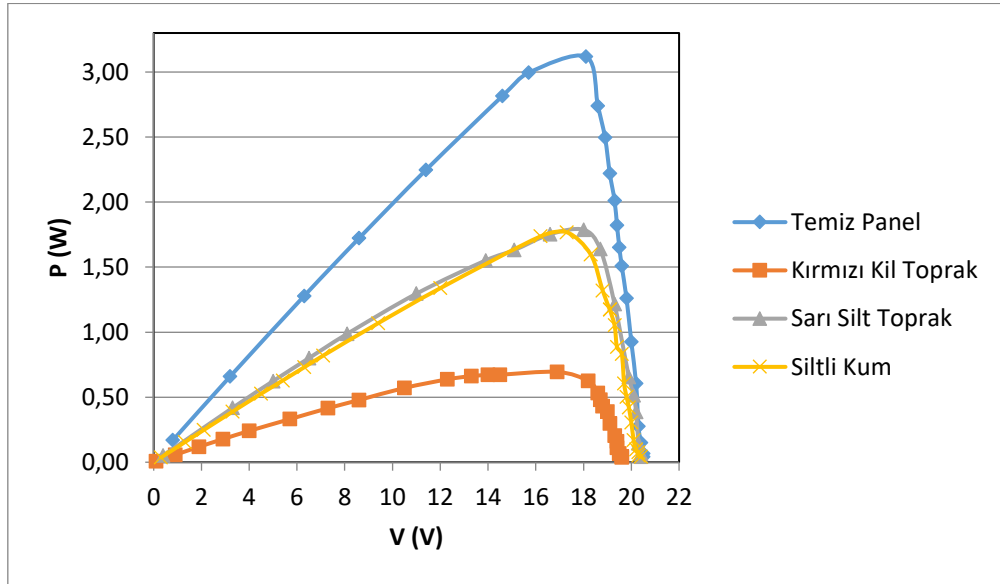
Toz miktarı M/3 ve M/12 olarak azaltılarak aynı deney tekrarlandığında, M/3 gram için, tüm eğim açılarında, kısa devre akımı ve güç değerleri M grama göre daha fazla ve I-V eğrileri temiz duruma daha yakın çıkmıştır. Burada, siltli kumun akım ve güç değerlerinin en az olduğu görülmüştür (Şekil 4.29-Şekil 4.30). M/12 gram için ise, 3 farklı tozun karşılaştırması yapıldığında, tozlar arasındaki değerlerin çok farklı olmadığı görülmektedir (Şekil 4.31-Şekil 4.32).

Tüm eğim açıları için eğrilerin benzer davranış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak eğim açısı arttıkça, toz yapısından kaynaklı olarak, yüzeydeki toz kayma eğilimi gösterebilir ve toz yoğunluğu değişebilir. Toz yoğunluğu arttıkça I-V eğrilerinin, temiz panele ait I-V eğrisinden uzaklaştığı sonucu varılmıştır. John ve arkadaşlarının (2016) farklı toz yoğunlukları ile yaptıkları çalışmada, toz yoğunluğunun artmasının kirlenmeyi arttırdığı ve I-V eğrisinin idealden uzaklaştığı belirtilmiştir [39].

Rajasekar’ın 2015 yılında yaptığı çalışmada ise, toz yoğunluğuna karşılık kısa devre akımındaki kayba karşılık çizilen egride, toz yoğunluğu arttıkça kaybın arttığı sonucuna varılmıştır [36]. Buradan, toz yoğunluğu arttıkça panel üzerindeki kirlenmenin arttığı, bu kirlenmenin geçirgenliği azaltarak kısa devre akımında azalmaya sebep olduğu söylenebilir.

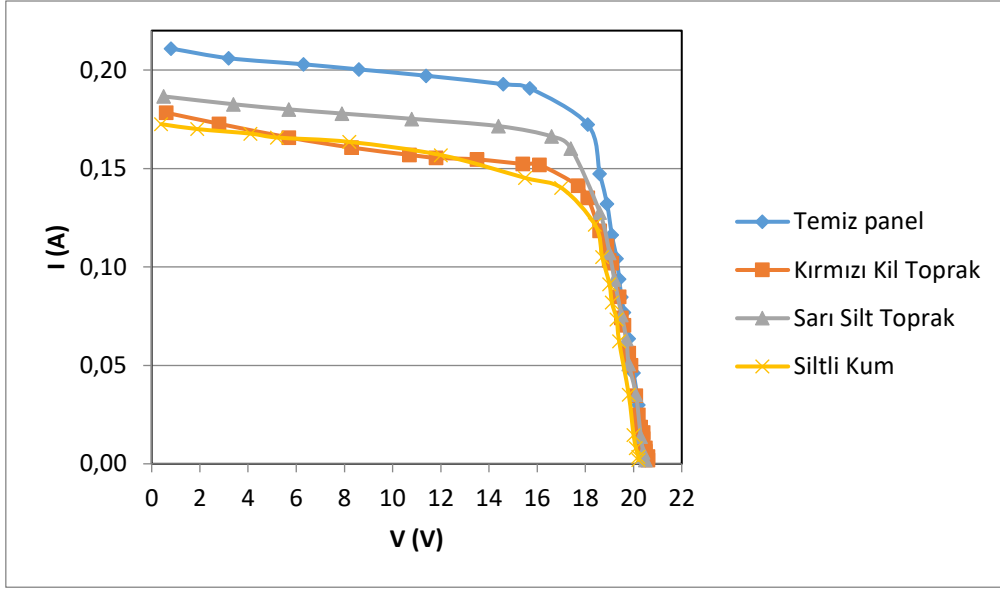


Şekil 4.27: Eğim açısı  $6^\circ$  iken farklı M gram tozlara ait I-V eğrileri

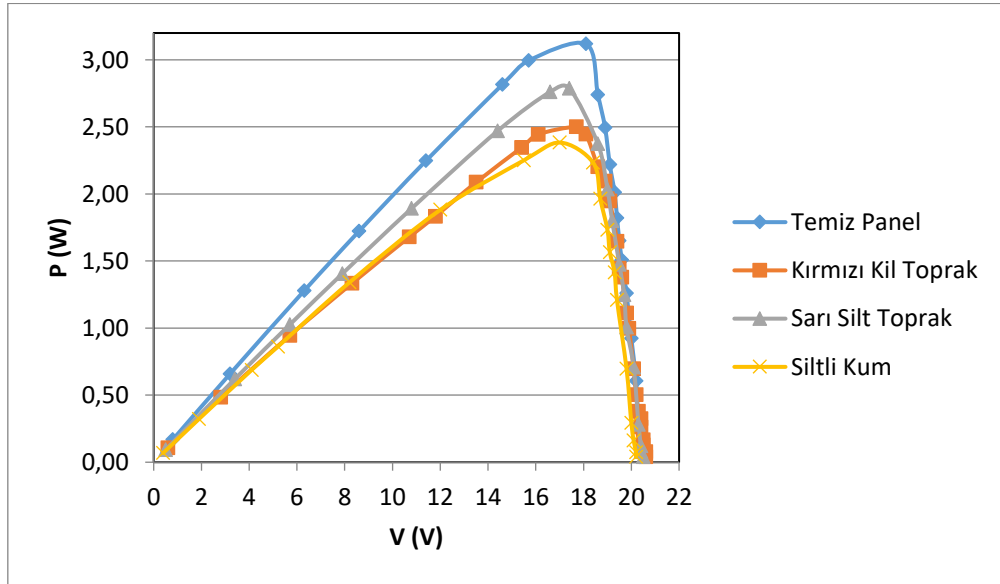


Şekil 4.28: Eğim açısı  $6^\circ$  iken farklı M gram tozlara ait P-V eğrileri

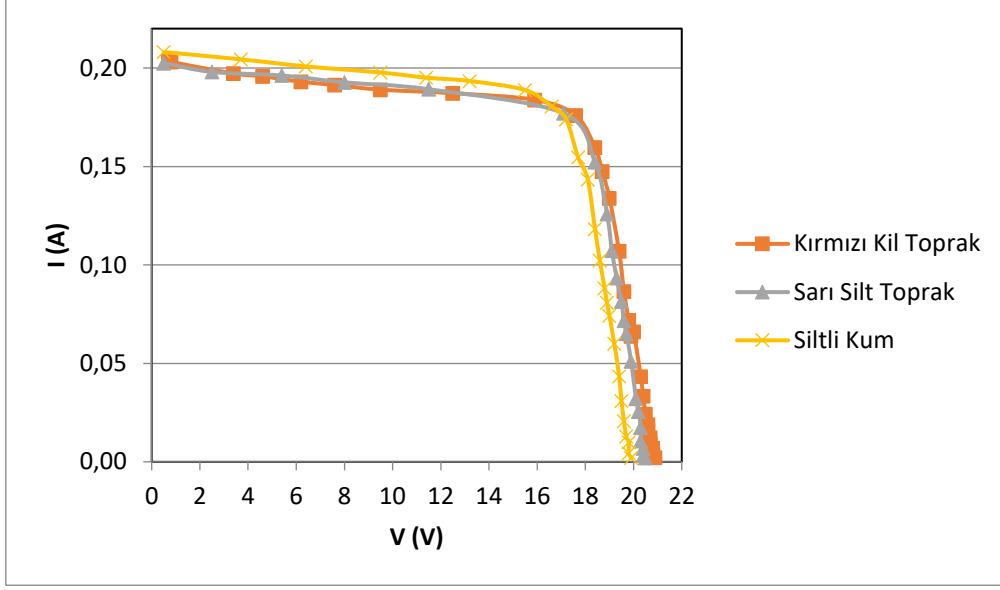




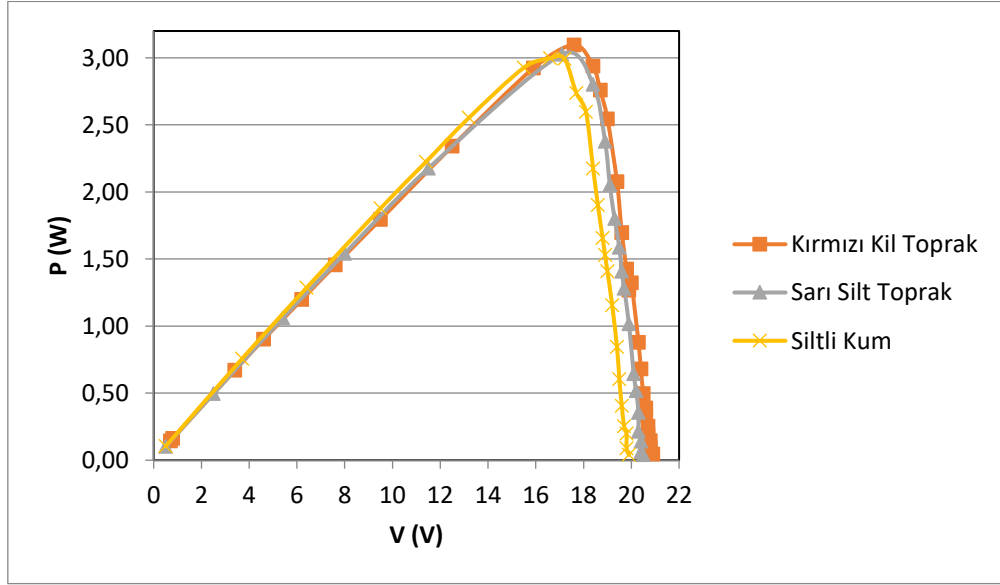
Şekil 4.29: Eğim açısı  $6^\circ$  iken farklı M/3 gram tozlara ait I-V eğrileri



Şekil 4.30: Eğim açısı  $6^\circ$  iken farklı M/3 gram tozlara ait P-V eğrileri



Şekil 4.31: Eğim açısı 6° iken farklı M/12 gram tozlara ait I-V eğrileri



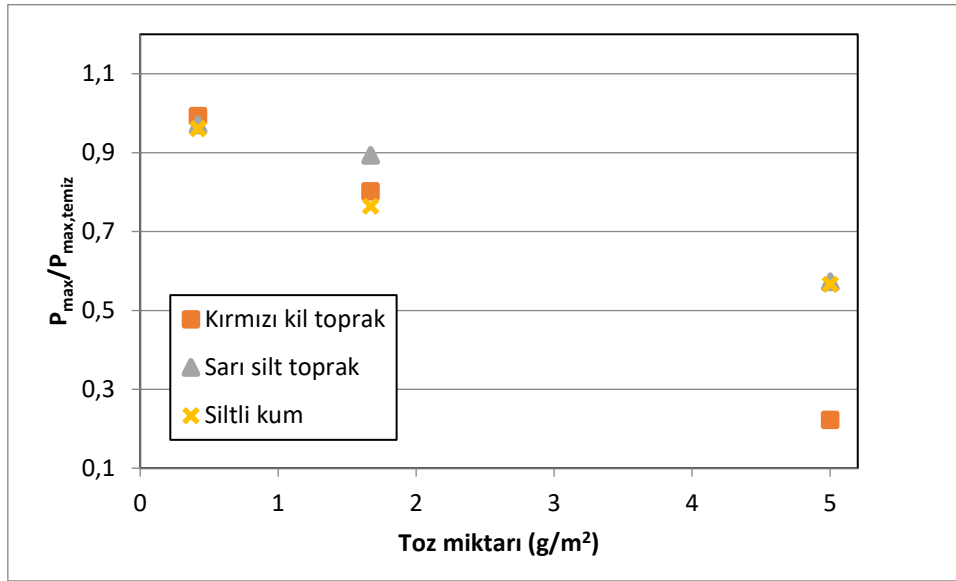
Şekil 4.32: Eğim açısı 6° iken farklı M/12 gram tozlara ait P-V eğrileri

M gram toz için kısa devre akımına göre tozlar sıralandığında, azdan fazlaya doğru, kırmızı kil toprak, siltli kum ve sarı silt toprak olduğu görülmektedir. Standarda göre [79] yapılan sınıflandırmada, silt ve kum örnekler tane boyutu olarak birbirine yakın olduğu için eğrilerin birbirine yakın çıkması anlamlıdır. Tozların yoğunlukları incelendiğinde ise, kırmızı kil toprağın yoğunluğu, sarı siltli topraktan fazla olduğu için panel üzerinde daha fazla alan kaplamaktadır. Deney sırasında panel üzerine M gram toz serpiştirildiğinde görülen (Şekil 3.15) bu durum sebebiyle, kırmızı kil toprağın gücü diğer örneklere daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeninin, toprak ve kum çeşitlerinin tane boyutları ya da malzeme yapısı ile ilgili olduğu

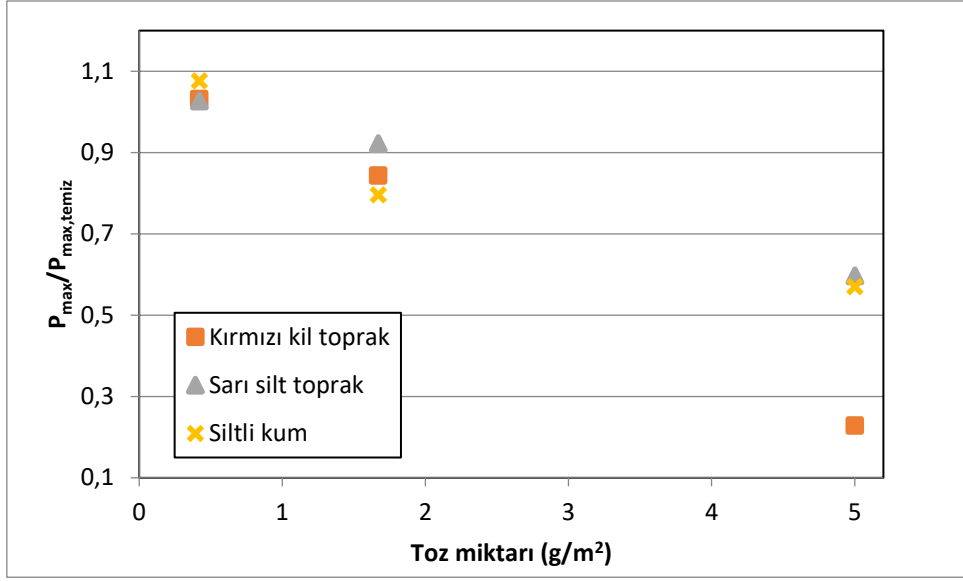
düşünülmektedir. Ayrıca, Burton ve King'in yaptıkları farklı toprak renkleri ile yapılan çalışma sonucunda, kırmızı renkli toprakların, sarı renkli topraklara göre ışık iletimi için daha zararlı olduğu görülmüştür [35]. Kazem ve arkadaşlarının (2013) yaptıkları çalışmada ise, 5 farklı kirletici madde için gerilimdeki azalması incelenmiş ve gerilimdeki düşmenin en fazladan en aza olacak şekilde sırasıyla kül, kırmızı kum, kalsiyum karbonat, silika ve kum olduğu görülmüştür [90]. Daha iri taneli tozlar, daha yüksek yapışma kuvvetine sahip olacağından, panel üzerinde cam ve toz arasında daha geniş bir temas alanı oluşturacaktır. Buradan, iri taneli tozların geçirgenliği azalttığı sonucuna varılabilir.

M/12 gram toz için çizilen eğriler incelendiğinde, bu miktarda bir toz için toz çeşitliliğinin önemi olmadığı görülmektedir, çizilen eğriler 3 farklı toz için birbirine yakın çıkmıştır.

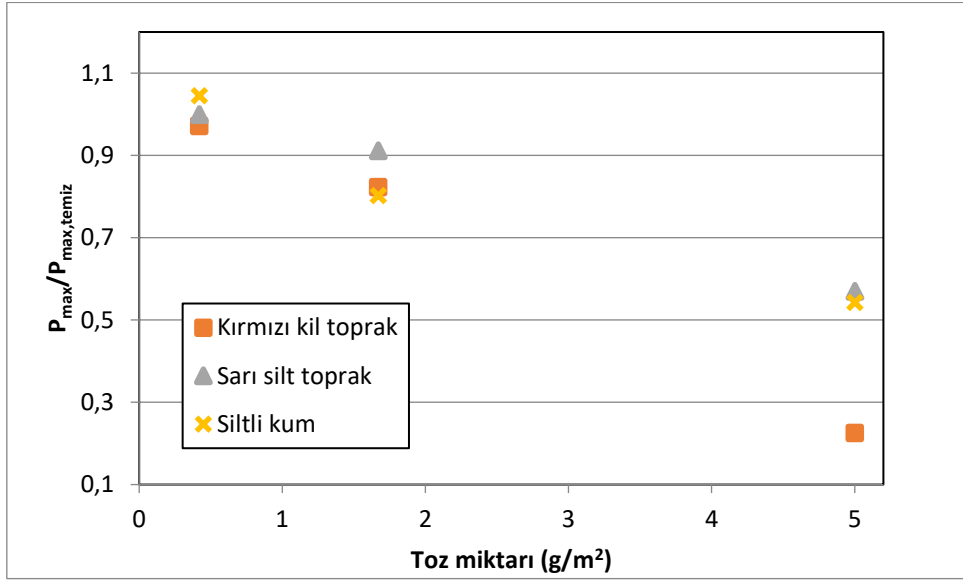
I-V ve P-V eğrilerinden, örneklerin her biri için tüm eğim açılarında maksimum güç değerleri belirlenmiş ve bu değerlerin temiz panellere ait maksimum güç değerlerine oranı hesaplanmıştır. Bu orana karşılık toz miktarlarının değişimi, eğim açısının 6°'den 40°'ye değiştirildiği 5 açı değeri için Şekil 4.33-Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



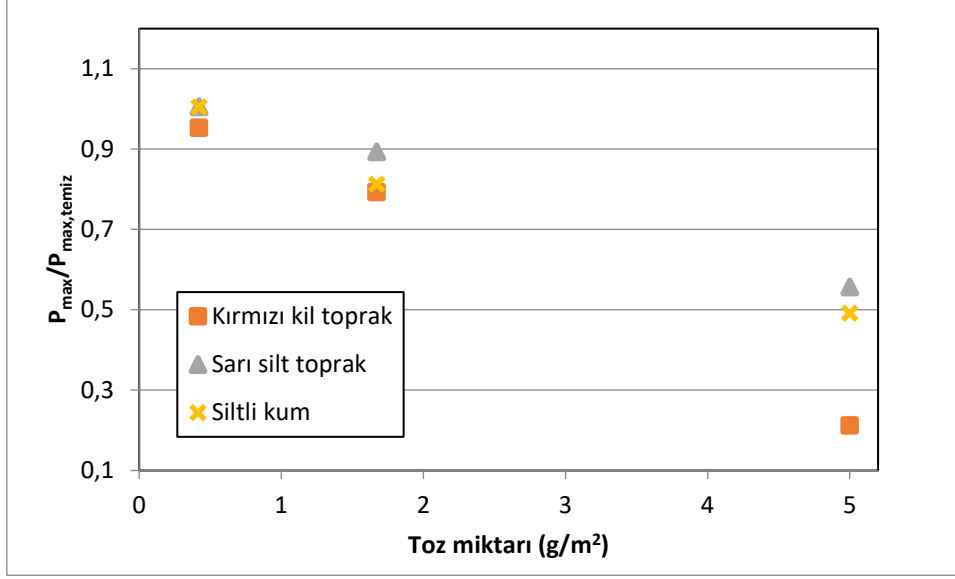
Şekil 4.33: Eğim açısı 6° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi



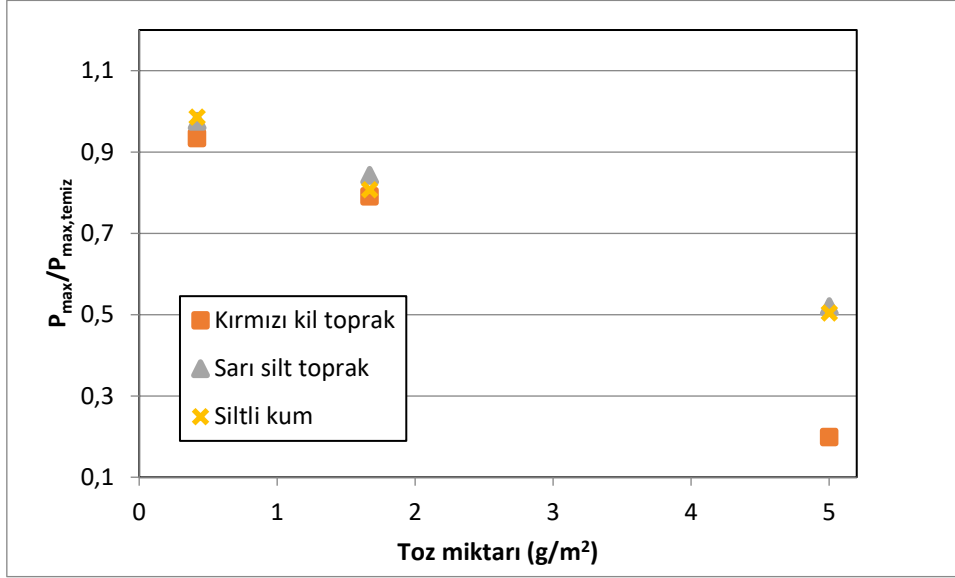
Şekil 4.34: Eğim açısı 10° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi



Şekil 4.35: Eğim açısı 20° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi



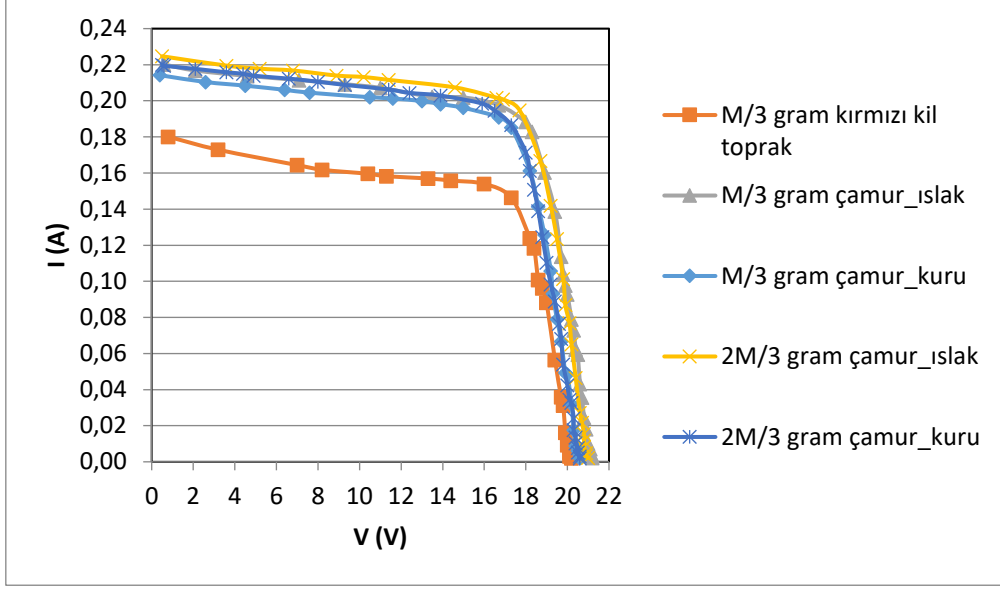
Şekil 4.36: Eğim açısı 25° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi



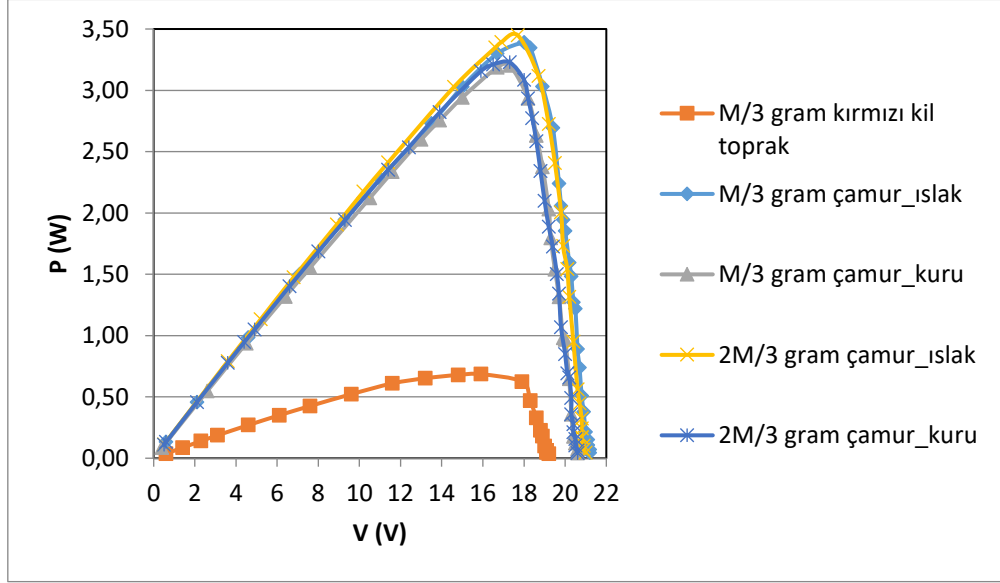
Şekil 4.37: Eğim açısı 40° iken normalize gücün toz miktarlarına bağlı değişimi

Toz miktarına göre maksimum güç değişimi incelendiğinde, tüm eğim açıları için, artan toz miktarı ile güç değerinin azaldığı görülmektedir. Toz yoğunluğu ile ilgili yapılan çalışmalarda [36][39], artan toz yoğunluğu ile kirlenmenin arttığı ve verimin düştüğü açıklanmıştır. Bu durum, deneysel sonuçlarla uyumaktadır.

Tozlanma sonrası yağmur etkisinin incelenebilmesi için kırmızı kil topraktan alınan uygun miktarda örnekler su ile karıştırılarak, Şekil 3.16'da verildiği gibi, panel üzerine püskürtülmüştür. Kırmızı kil toprak örnek ve su ile oluşturulan karışımdan yapılan toz ile çizilen I-V ve P-V eğrileri Şekil 4.38-Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.38: Toprak su karışımının farklı miktar ve durumlarında alınan I-V eğrileri



Şekil 4.39: Toprak su karışımının farklı miktar ve durumlarında alınan P-V eğrileri

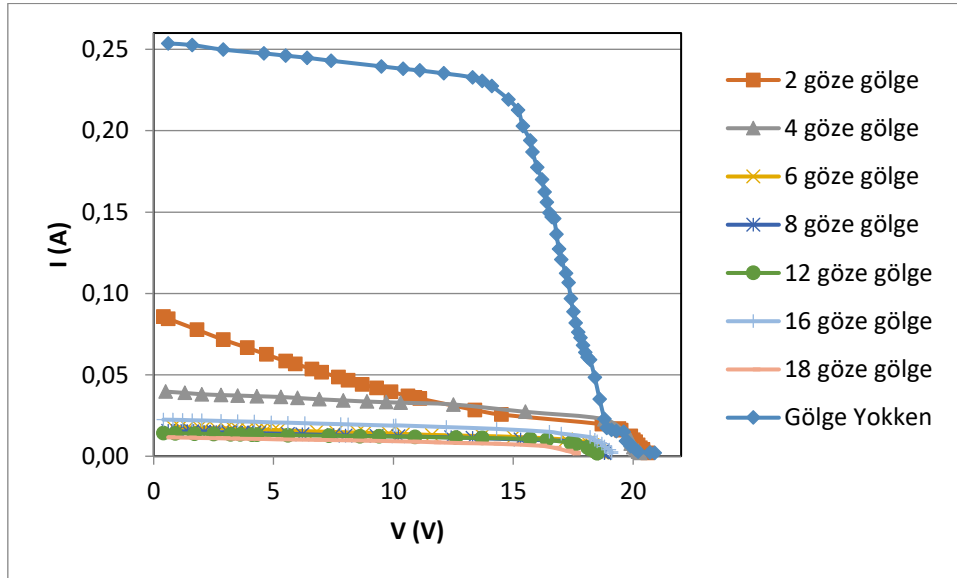
M/3 gram kırmızı kil toprak ile oluşturulan çamur örneğin ıslak hali ve kuru hali karşılaştırıldığında, ıslak halinin güç değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, kuru haldeki çamur örneğin yüzeye yapışarak kirliliği artırması ile açıklanabilir. 2M/3 gram kırmızı kil toprak ile oluşturulan örnekte de durum benzerdir. Toprak yoğunluğunun artırılmasıyla çizilen eğriler incelendiğinde, M/3 gram örnekle hazırlanan çamur ile 2M/3 gram örnekle hazırlanan çamur eğrileri birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Çamur oluşturulmadan, yani su kullanılmadan kil toprak ile yapılan örneğe ait akım verisi ise hepsinden az çıkmıştır.

Buradan, yağmurun olmadığı kuru bölgelerde tozlanmanın daha etkili olacağı ve panel gücünün daha az olacağı sonucuna varılabilir.

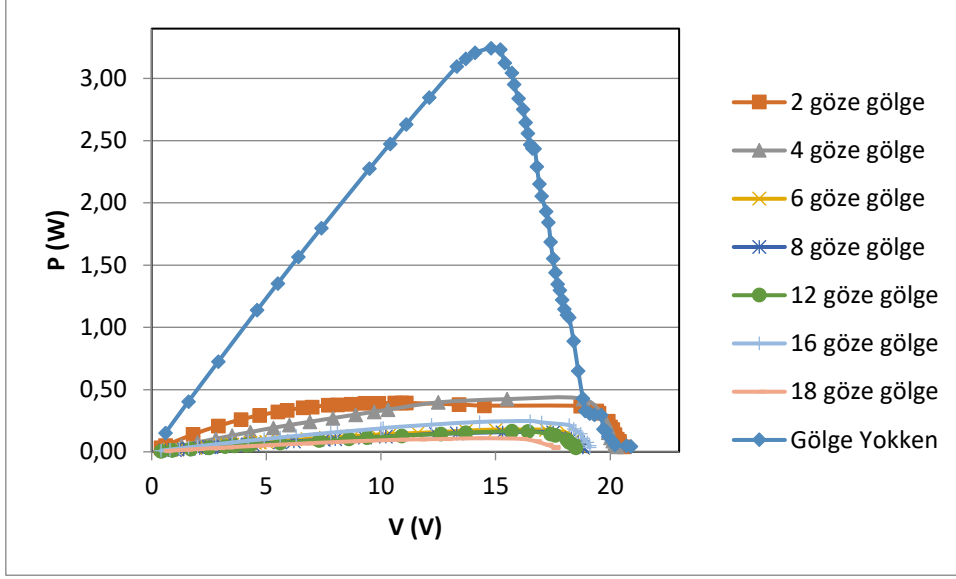
## 4.2.2. Yapay Gölge Deneylerine Ait Bulgular

### 4.2.2.1. Kısmi Gölgeleme Bulguları

Bu kesimde ilk olarak, panel üzerindeki gözelerin, karton kullanılarak Şekil 3.17’de açıklandığı gibi kapatılmasıyla oluşturulan düşey ve yatay yönlerde ve köşegen doğrultusunda kısmi gölgelenme deneylerine yer verilmiştir. Düşey gölgelenme sonucunda elde edilen I-V grafiği Şekil 4.40’da P-V grafiği Şekil 4.41’de verilmiştir. I-V eğrisi incelendiğinde, karton ile kapatılan göze sayısının artışıyla kısa devre akımının azaldığı görülmektedir. Gerilimdeki değişimin sebebinin ise ölçümler arasında sıcaklıktaki artış olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, P-V eğrisinde de, gölge altındaki göze sayısının artmasıyla bozulmalar görülmektedir.

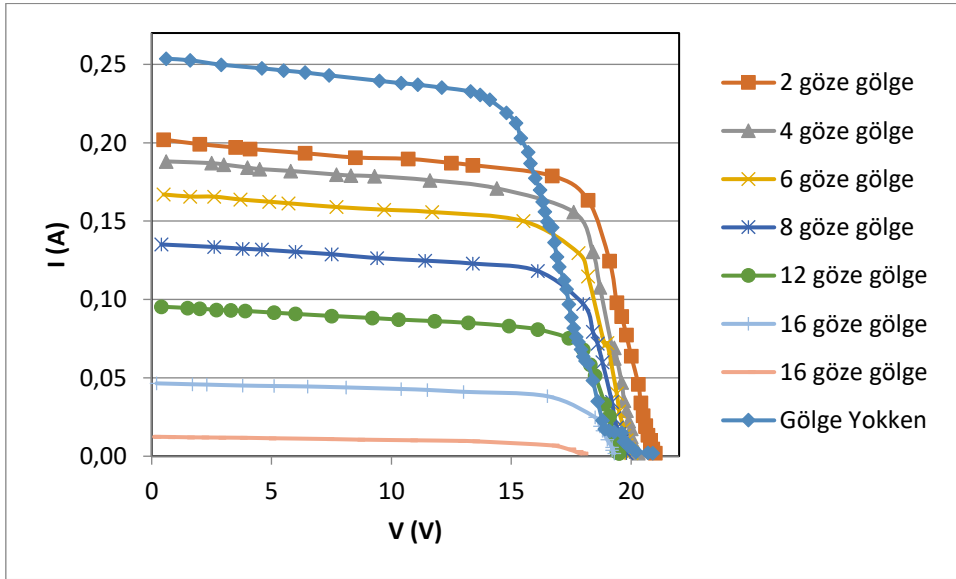


Şekil 4.40: Düşey yönde oluşturulan gölgelere ait I-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması



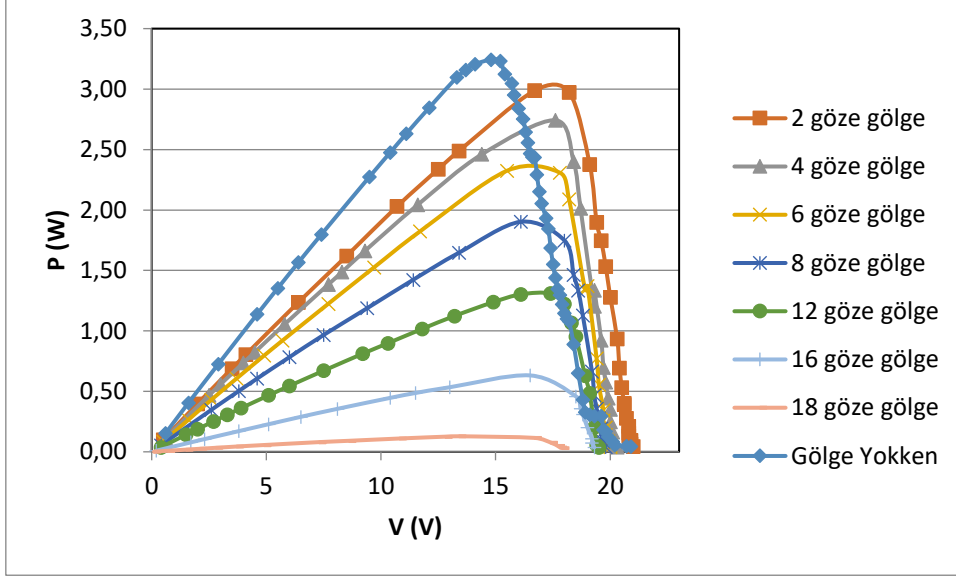
**Şekil 4.41:** Düşey yönde oluşturulan gölgelere ait P-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması

Şekil 3.17’de açıklandığı şekilde, karton kullanılarak yatay yönde oluşturulan gölgelenmeye ait olan I-V grafiği (Şekil 4.42) incelendiğinde, karton ile kapatılan göze sayısının artışıyla kısa devre akımı azalmıştır. Düşey gölgelenmede olduğu gibi yatay gölgelenmede de, gerilim değişiminin sebebi sıcaklık artışıdır. Yatay gölgelenmede, düşey gölgelenmeden farklı olarak, I-V eğrisindeki değişim daha orantılı olmuştur. Kısa devre akımındaki bu azalma, düşey gölgelenmeye göre daha azdır. P-V eğrisinde de, benzer şekilde, gölgeli göze sayısının artmasıyla bozulmalar görülmektedir (Şekil 4.43).



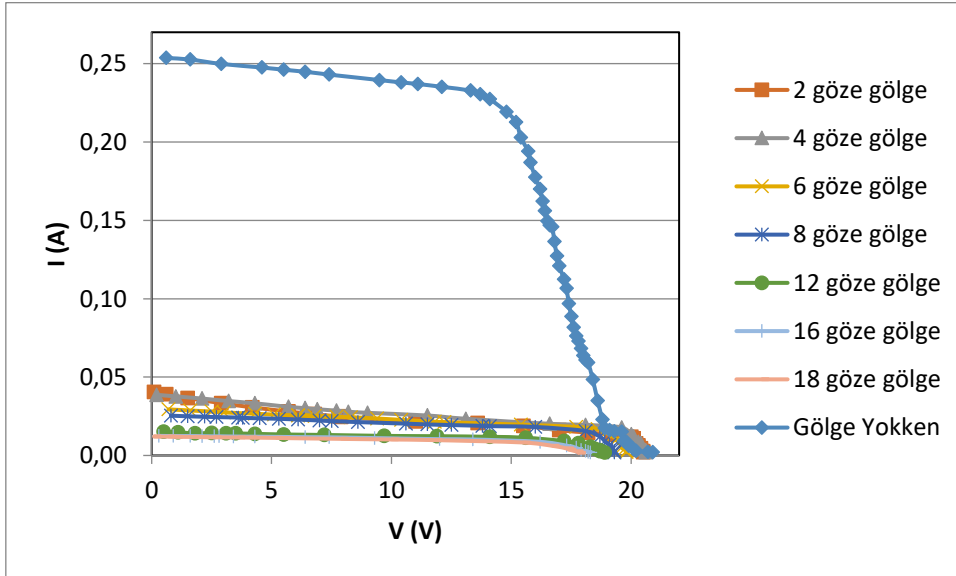
**Şekil 4.42:** Yatay yönde oluşturulan gölgelere ait I-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması



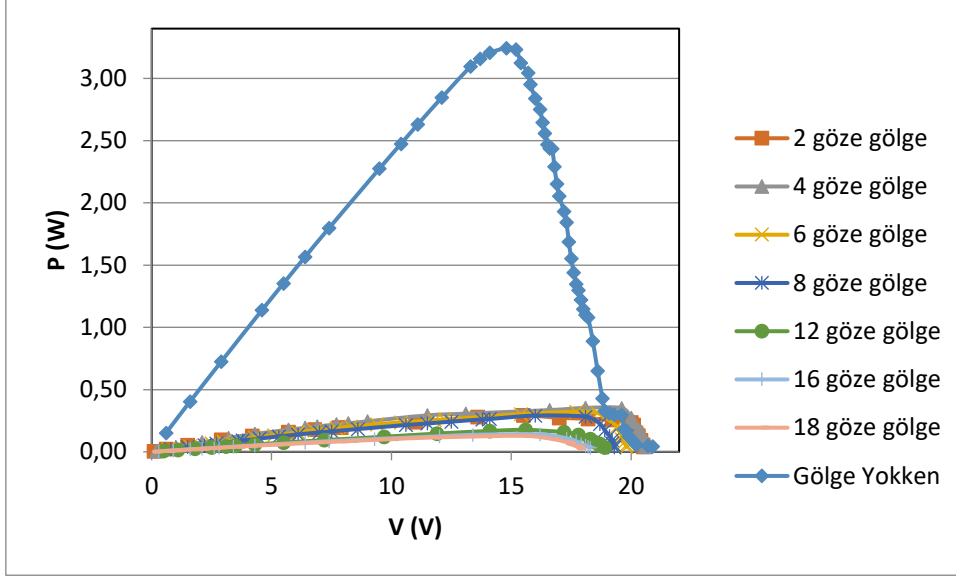


**Şekil 4.43:** Yatay yönde oluşturulan gölgelere ait P-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması

Köşegen doğrultusunda gölgeleme etkisinin incelenmesi için Şekil 3.17’de belirtildiği gibi panel üzerinde farklı sayılarda göze sayısı kapatılarak gölge oluşturulmuştur. Yapılan deney sonucunda, artan gölgeleme ile kısa devre akımı ve panel gücünün, düşey ve yatay yönde oluşturulan gölgelemeler de olduğu gibi, azaldığı görülmüştür (Şekil 4.44, Şekil 4.45).

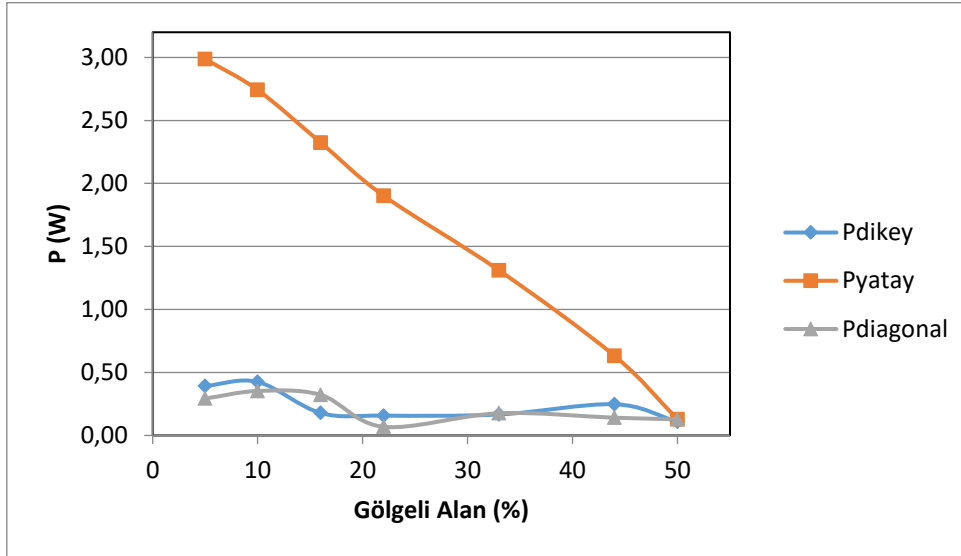


**Şekil 4.44:** Köşegen doğrultusunda oluşturulan gölgelere ait I-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması



**Şekil 4.45:** Köşegen doğrultusunda oluşturulan gölgelere ait P-V eğrilerinin gölgesiz durum ile karşılaştırılması

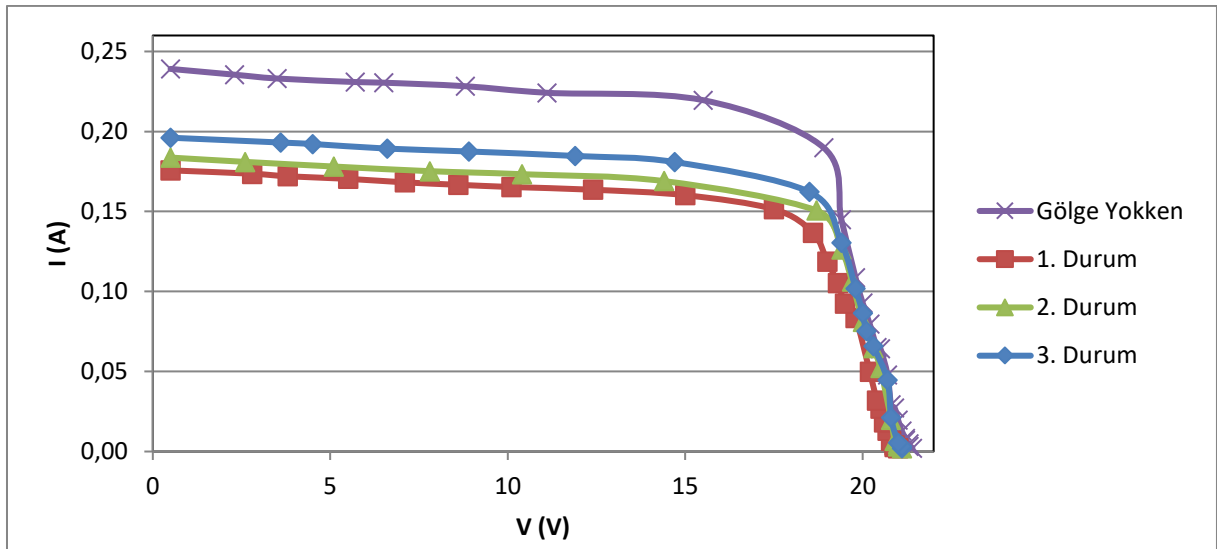
Üç farklı gölgelenme yöntemi için, maksimum gücün gölgelenmiş alan yüzdesine göre değişimi Şekil 4.46'da verilmiştir. Yatay gölgelenme için güç değerinin gölgeli alan yüzdesi arttıkça azaldığı net olarak görülmektedir. Düşey yönde ve köşegen doğrultusunda yapılan gölgelenmelerde değişim azdır.



**Şekil 4.46:** Farklı yönlerdeki gölgelenmeler için gölgeli alan yüzdesinin maksimum güç ile değişimi

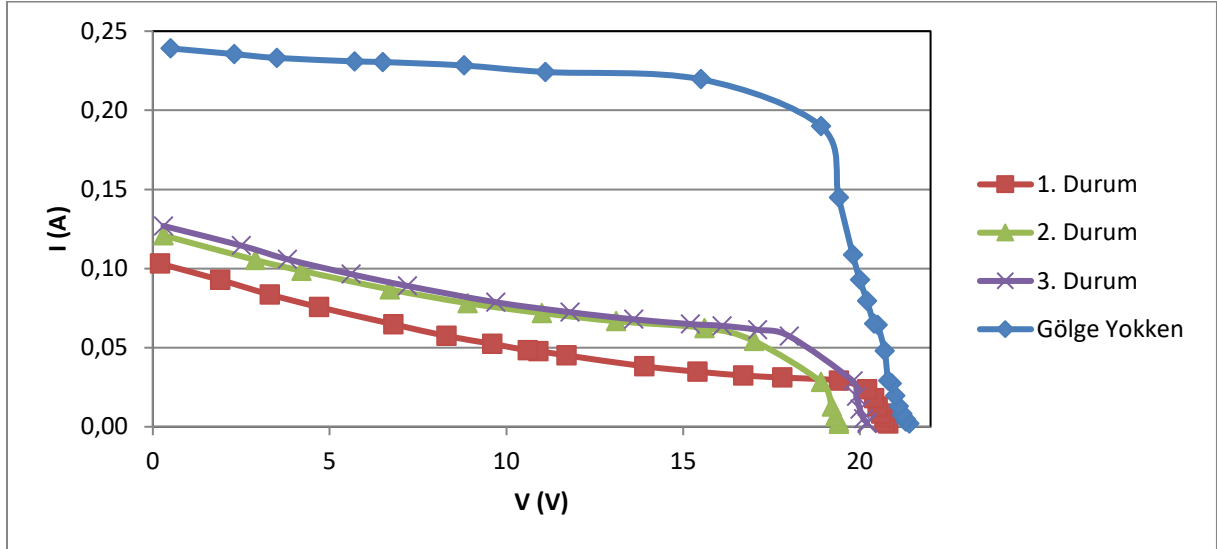
Priyanka'nın 2011 yılında yaptığı çalışmada, köprüleme diyotu kullanımı ile çıkış gücünün köprüleme diyotu kullanılmadığı duruma göre daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Priyanka, ayrıca, köprüleme diyotlu paneller için P-V eğrisinde ikincil piklerin oluşabileceğini, köprüleme diyot olmayan paneller için I-V eğrisindeki bozulmaların fazla olduğunu belirtmiştir. Bu durum, köprüleme diyotu içeren paneller için ters gerilimin sınırlanması sonucu kabul edilebilir bir çıkış gücü seviyesine ulaşılması ile açıklanmıştır. Köprüleme diyotu olmadığında, panel içerisindeki bir dizide gölge oluşturulması neredeyse tüm sütunun etkisiz kalmasına ve gücün azalmasına neden olmaktadır [27]. Benzer şekilde, Seyedmahmoudian'ın 2013 yılında yaptığı çalışmada ise, köprüleme diyotlu ve köprüleme diyotu olmayan paneller için maksimum güç noktalarının farklı olacağı sonucuna varılmıştır [31]. Bu tez çalışmasında, kullanılan panelde köprüleme diyotu bulunmadığı göz önüne alındığında elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur. Türkiye Kocaeli Üniversitesi'nde köprüleme diyotu kullanılmadan yapılan bir çalışmada [32] parçalı gölgeleme sonucu çizilen I-V ve P-V eğrileri, bu çalışmada düşey yönde ve köşegen doğrultusunda gölgeleme için elde edilen sonuçlara benzerdir.

Karton ile yapılan gölgelemenin ardından, Çizelge 3.2'de tanımlanan durumlarla, 4 gözenin alanını kapatacak şekilde karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt ile gölgelemeler yaratılmıştır. Yatay gölgeleme için, Çizelge 3.2'de tanımlanan 3 durumun I-V grafikleri, panel üzerinde gölge olmayan durum ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.47). Gölgelemiş durumlar arasında, akım değerinin en yüksek olduğu durum, 3. durumdur. 3. durumda, simülatörden gelen ışınımı en fazla kesen karton kullanılmazken, 2. durumda ise 1. durumdan farklı olarak yağlı kağıt kullanılması akım değerlerinin fazla olmasına neden olmuştur.



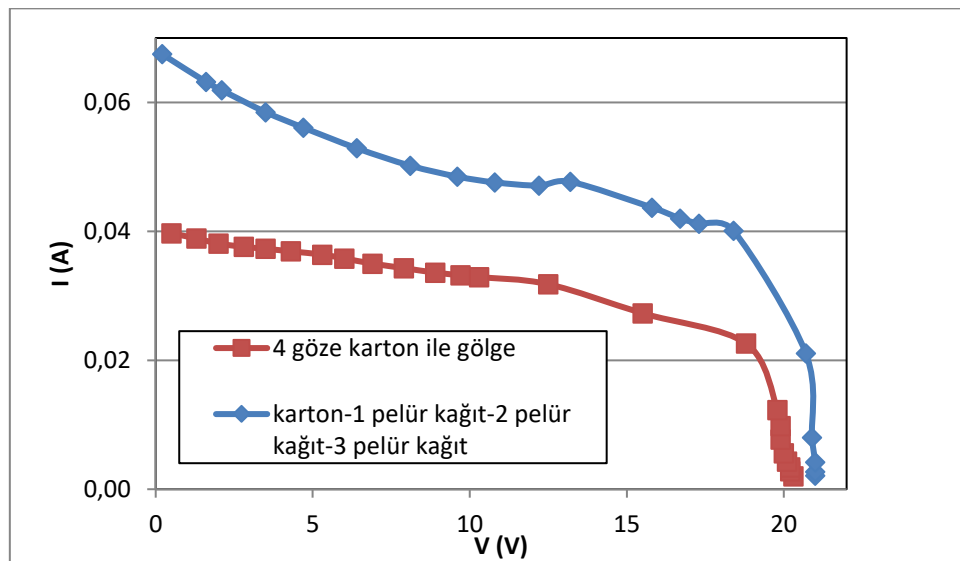
Şekil 4.47: Yatay gölgelemede farklı gölgeleme durumlarının I-V eğrileri

Düşey gölgeleme için oluşturulan I-V grafiği (Şekil 4.48) incelendiğinde, karton ve pelür kağıt ile tanımlanan durumdaki (1. Durum) akım değeri, diğer durumlara göre oldukça farklıdır. Buradan, düşey gölgelemede karton kullanmanın etkisi görülürken, pelür kağıt ve yağlı kağıt arasındaki farkın az olduğu görülmektedir.



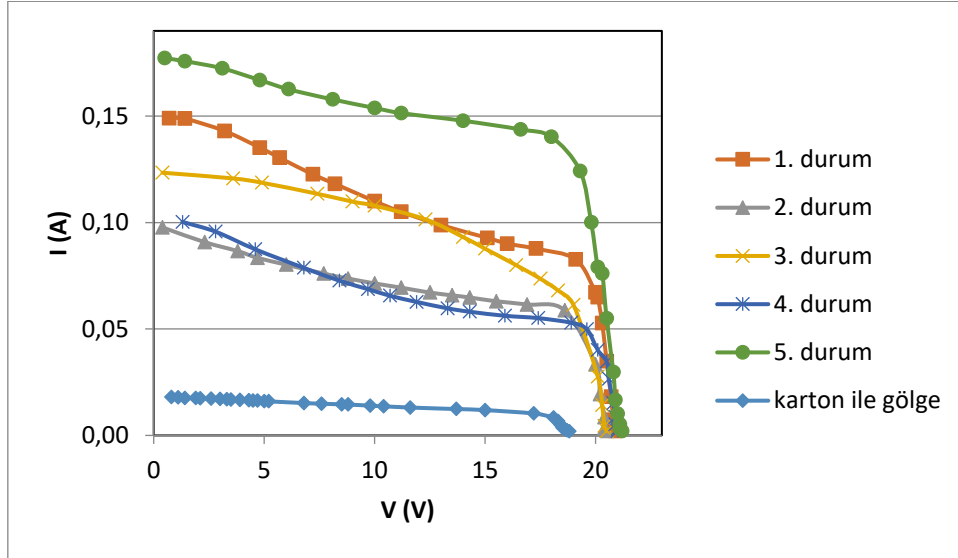
Şekil 4.48: Düşey gölgelemede farklı gölgeleme durumlarının I-V eğrileri

Kapalı göze sayısı sabit tutulup, pelür kağıt sayısı artırılarak düşey yönde yapılan gölgeleme ile 4 gözün de karton ile gölge altında olduğu durum Şekil 4.49'da karşılaştırılmıştır. Gölgeleme için sadece kartonun kullanıldığı durumda, pelür kağıtların kullanıldığı duruma göre, beklenildiği gibi, daha az akım değeri gözlenmiştir.

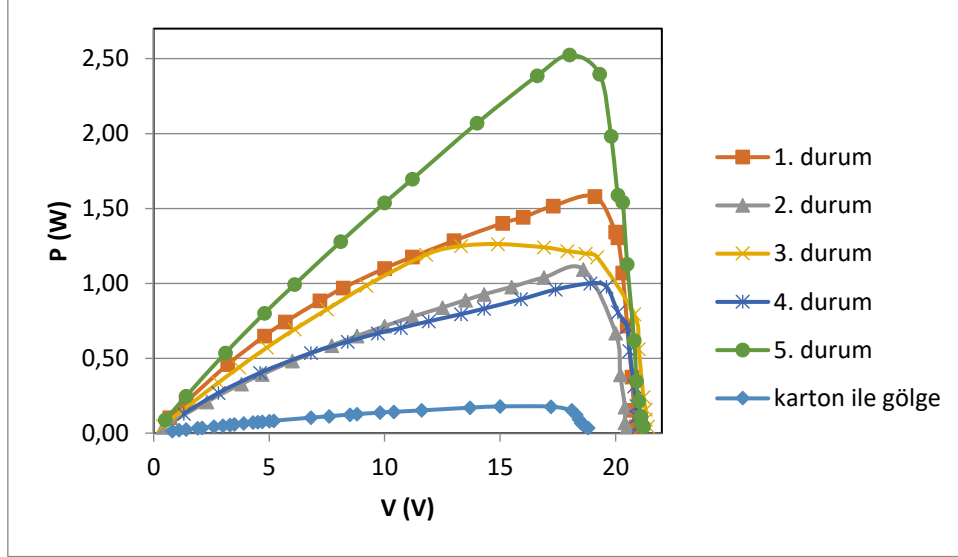


Şekil 4.49: Düşey gölgeleme için karton ve pelür kağıtlar ile yapılan gölgelerin I-V eğrileri

Kısmi gölgelemede, panel üzerinde aynı alanın farklı konumlarda kapatılarak oluşturulan gölge etkisi 5 farklı durum için incelenmiştir. Panel üzerinde 6 göze alanına karşılık gelen gözenin karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt ile Çizelge 3.3'te tanımlanan durumlara göre kapatılması ve gölge oluşturulması sonucu çizilen I-V ve P-V grafikleri Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de çizilmiştir. I-V eğrileri incelendiğinde, akım değerinin en yüksek olduğu durumun, gözelerin yarısının kapalı olduğu 5. durum olduğu görülmektedir. Maksimum güç noktaları değerlendirildiğinde, her iki sırada da eşit miktarda karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt olduğu 1. durum ve 3. durum eğrilerinin benzer çıktığı gözlenmiştir. Ancak 1. durum için maksimum güç daha fazladır. Bu sırayı üst sırada 4 gözünün kapalı olduğu durum izlerken, gücün en düşük olduğu durum alt sırada sadece 1 yağlı kağıdın olduğu 4. durumdur. 6 gözünün de karton ile kapatılması durumundaki güç değeri, bu bölümde anlatılan karton, pelür kağıt ve yağlı kağıt ile tanımlanan durumların hepsinden daha az çıkmıştır.



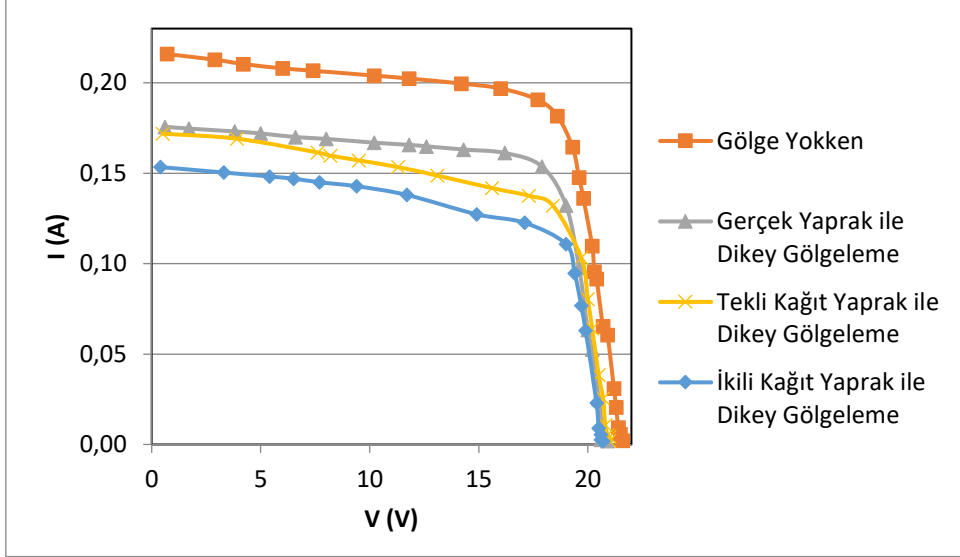
**Şekil 4.50:** Gölgelemenin panel üzerinde dağıtıldığı durumlar için I-V eğrileri



Şekil 4.51: Gölgelemenin panel üzerinde dağıtıldığı durumlar için P-V eğrileri

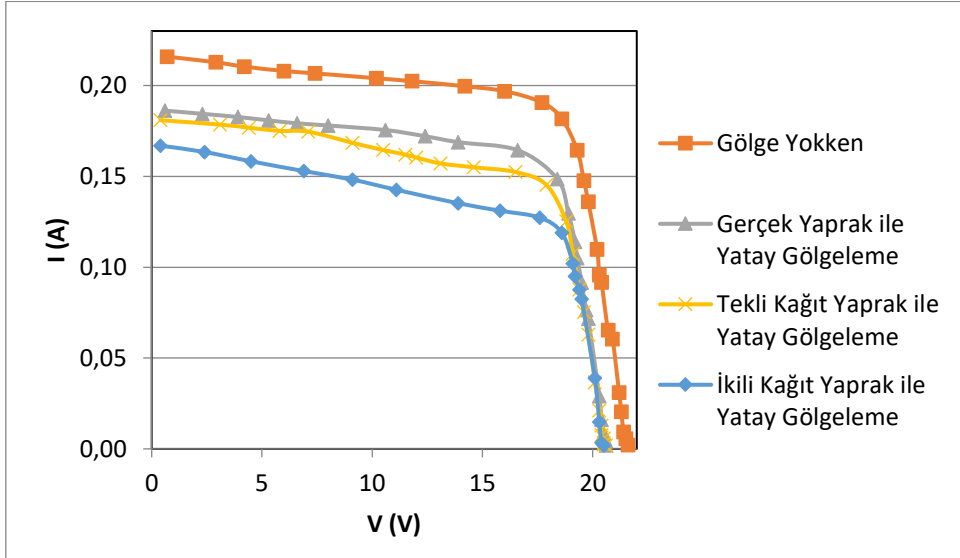
Literatürde, Su-Do-Ku modeli ile farklı ışınımlar altındaki gölge etkisi incelenerek, gölgelemenin dizi üzerinde dağıtılarak P-V gücünün arttığı belirtilmiştir [29]. Benzer olarak, Rao ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışmada Su-Do-Ku modeli incelenmiş ve çalışma sonucunda, bu model ile gücün arttığı gözlenmiş, daha büyük diziler için alt diziler oluşturularak bu modelin uygulanabileceği belirtilmiştir [30]. Yapılan bu tez çalışmasında ise, tanımlanan durumlar için çizilen P-V eğrileri incelendiğinde, gölgeli göze miktarının panel üzerinde alt ve üst sıralarda eşit dağıtıldığı durumda, panelin daha yüksek güç verdiği sonucuna varılmıştır.

Yaprakların paneller üzerinde yaratacağı gölgelenme etkisini incelemek amacıyla, Çizelge 3.4'te belirtildiği şekilde, gerçek yaprak ve pelür kağıtlarından oluşturulmuş yaprak desenleri kullanılarak yapılan düşey gölgelenme deneyleri sonucunda elde edilen I-V grafikleri Şekil 4.52'de verilmiştir. Gerçek yaprak ile yapılan gölgelemedeki akım değeri pelür kağıt ile yapılan gölgelemedeki akım değerinden daha fazla iken, tekli pelür kağıt ile yapılan gölgelemedeki akım değeri ise iki adet pelür kağıt ile yapılan gölgelemedeki akım değerinden fazladır.



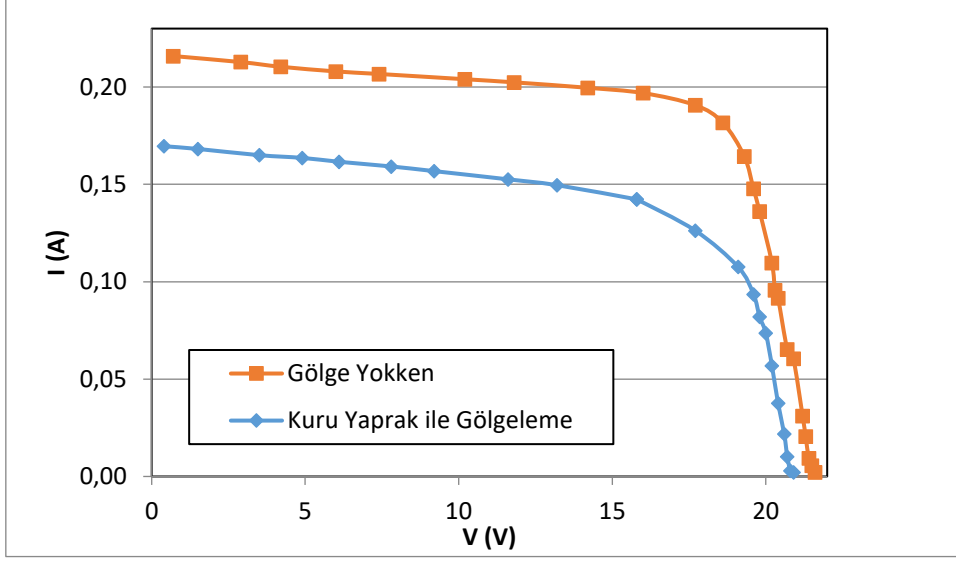
Şekil 4.52: Yapraklar ile yapılan düşey gölgeleme için I-V eğrileri

Yapraklar ile yatayda yapılan gölgeleme deneyleri, düşey gölgeleme ile benzer sonuçları vermiştir (Şekil 4.53).



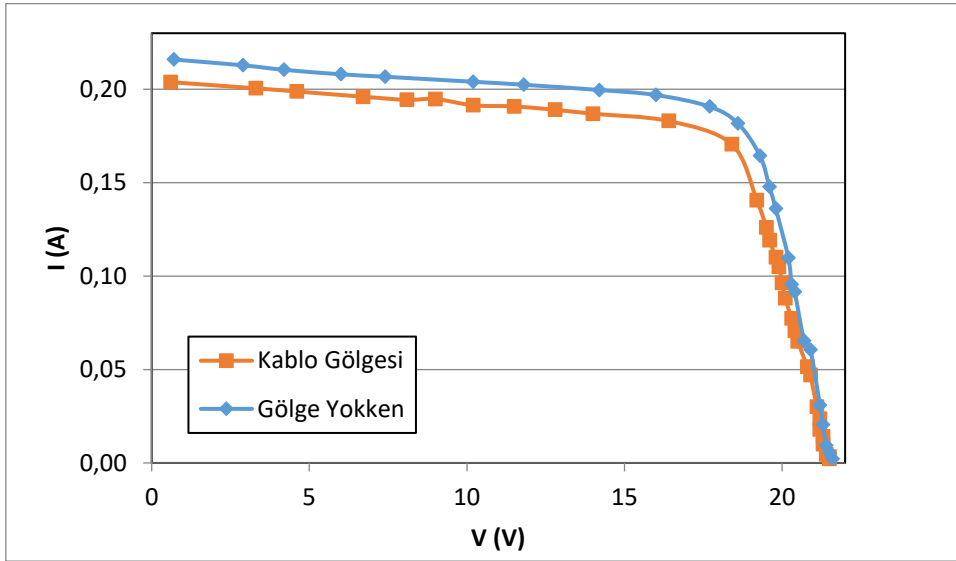
Şekil 4.53: Yapraklar ile yapılan yatay gölgeleme için I-V eğrileri

Kuru yapraklar ile yapılan gölgeleme durumdaki I-V eğriler incelendiğinde (Şekil 4.54), kuru yaprak ile yapılan gölgelemedeki akım ve güç değerinin gölge olmadığı duruma göre azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.54: Kuru yaprak ile yapılan gölge sonucu I-V eğrisi

Panel üzerine kablo gölgesi düşmesi durumunu incelemek amacıyla, Şekil3.18-b'de verildiği gibi oluşturulan gölgeye ait I-V grafiği Şekil 4.55'de verilmektedir. Karton ile yapılan kablo benzetimi gücü azaltsa da fark çok fazla çıkmamıştır.

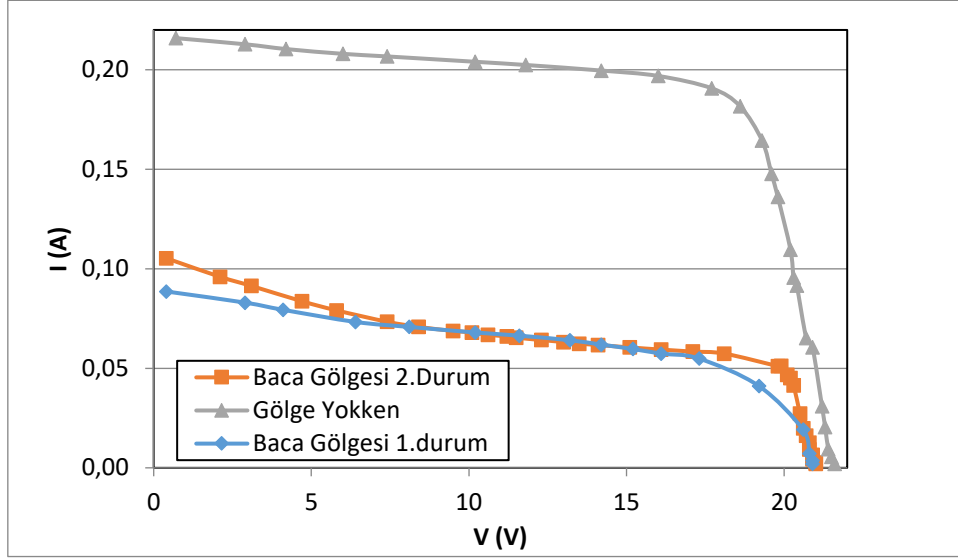


Şekil 4.55: Kablo gölgesi benzetimi için I-V eğrisi

Panel üzerine çevredeki bir bacanın gölge yapacağı durumun incelenmesi için Şekil 3.20'de belirtilen şekilde yapılan gölgeleme deneylerinde, baca gölgesi benzetiminin gölge olmayan duruma göre gücü çok düşürdüğü gözlenmiştir (Şekil 4.56). Baca gölgesi benzetimlerinin 1. durumu ve 2. durumu karşılaştırıldığında ise 2. durumdaki güç değeri 1. duruma göre daha fazla



çıkmiştir. Bunun nedeni, 2. durumdaki karton miktarının 1. duruma göre daha az oluşu gücün daha fazla olmasıdır. Ancak eğriler benzer şekilde ilerlemiş yalnızca maksimum güç noktaları farklı çıkmıştır.



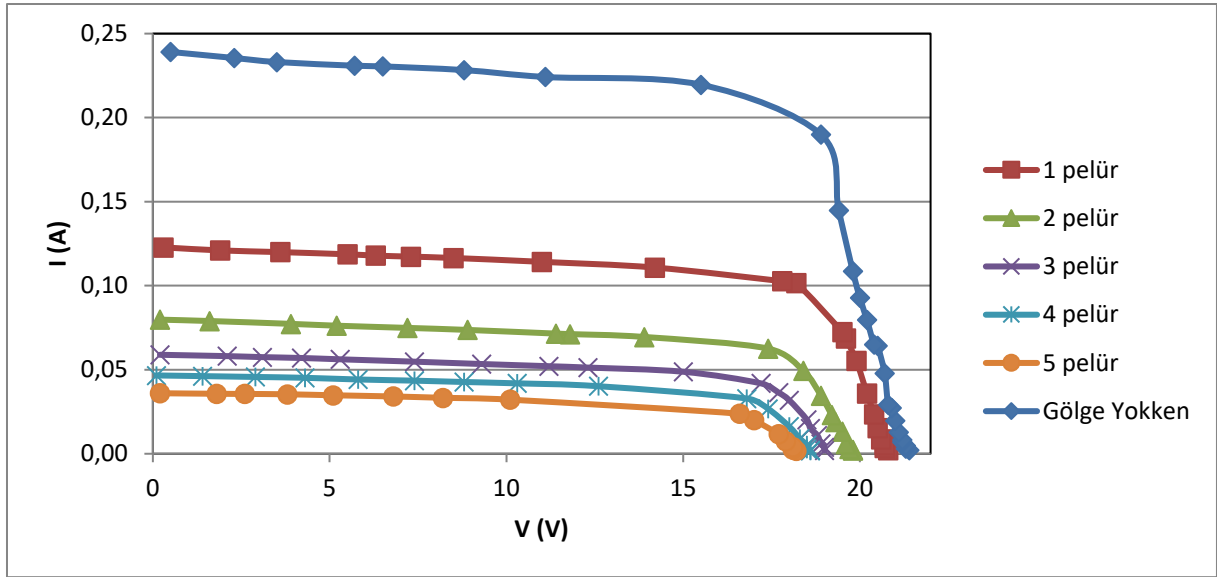
Şekil 4.56: Baca gölgesi benzetimi için I-V eğrisi

Kısmi gölgeleme etkisi incelendiğinde, güçteki azalma, en azdan en fazlaya doğru, sırasıyla, kablo benzetimi, yaprak gölgesi ve baca gölgesi benzetimi şeklinde olmaktadır. Sathyanarayana ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları çalışma sonucunda, yaprak, kablo ve bina etkisi yaratacak şekilde oluşturulan gölgelerde, kablo gölgesi en az etkiye sahip iken, bina modelinin en fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür [80].

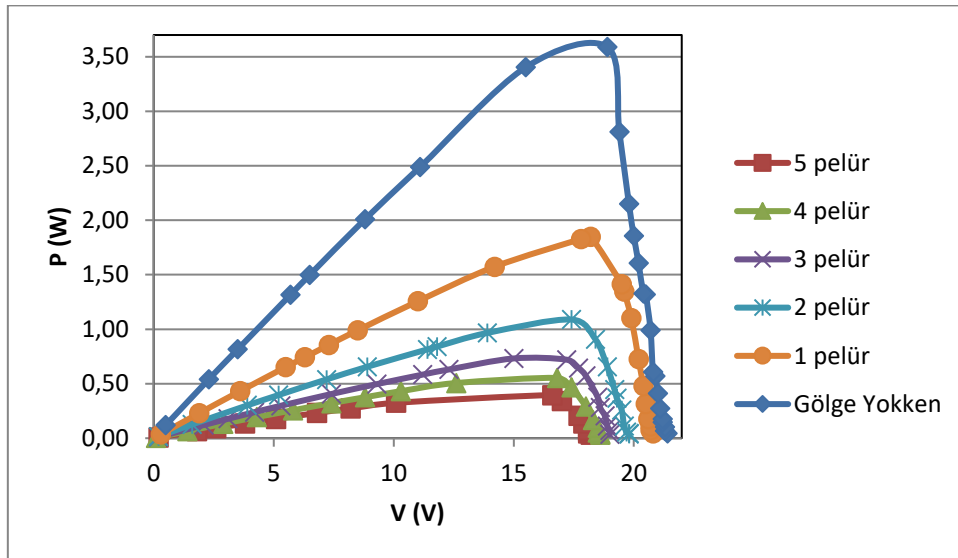
#### 4.2.2.2. Homojen Gölgeleme Bulguları

Kısmi gölgeleme için yapılan deneyler sonrası, farklı sayılarda pelür kağıt ve yağlı kağıt kullanılarak homojen gölgeleme deneyleri yapılmıştır.

Panelin tamamı öncelikle 1 adet pelür kağıt ile kapatılarak panel üzerinde homojen gölge oluşturulmuştur. Daha sonra, panel üzerindeki pelür kağıt sayısı arttırılmıştır. Farklı pelür kağıt sayısı kullanılarak oluşturulan gölgelere ait I-V eğrileri Şekil 4.57, P-V eğrileri Şekil 4.58 ile verilmektedir. Çizilen eğriler incelendiğinde, pelür kağıt sayısı artışı ile birlikte I-V ve P-V eğrilerinin azaldığı görülmektedir. Gerilim değerlerindeki azalmanın sebebi ise deney sırasında panelin sıcaklığının değişmesidir.

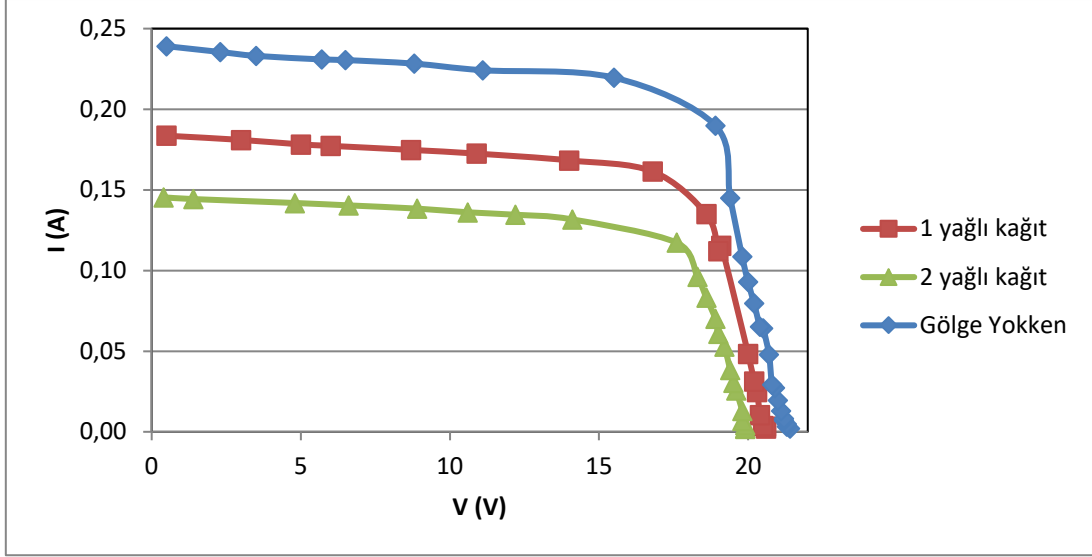


Şekil 4.57: Pelür kağıt sayısının değişimi ile oluşan I-V eğrileri

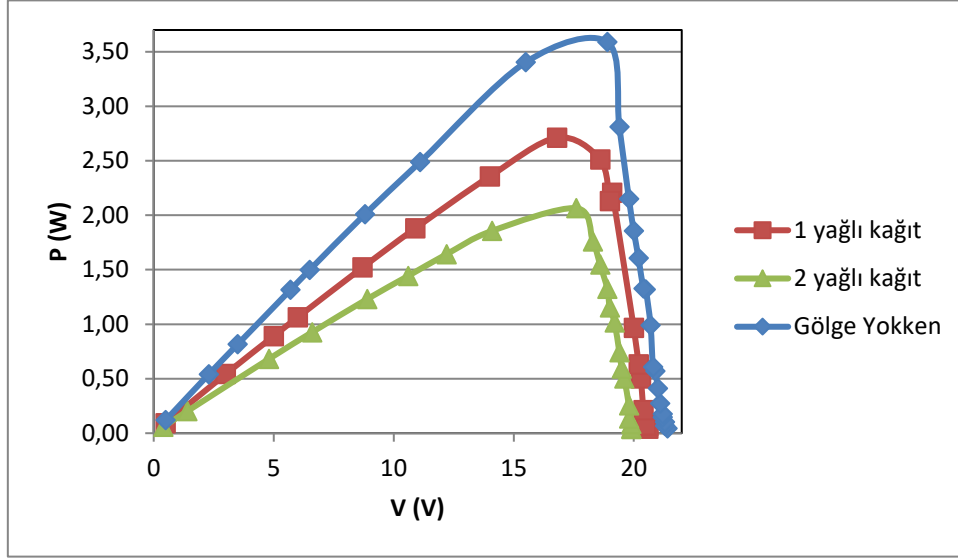


Şekil 4.58: Pelür kağıt sayısının değişimi ile oluşan P-V eğrileri

Yağlı kağıt sayısının artırılması ile yapılan homojen gölgeleme sonucu oluşan I-V eğrisi Şekil 4.59, P-V eğrisi Şekil 4.60 ile verilmektedir. Çizilen eğriler incelendiğinde, pelür kağıtta olduğu gibi, yağlı kağıt sayısı artışı ile birlikte I-V ve P-V eğrileri azalmaktadır.



Şekil 4.59: Yağlı kağıt sayısının değişimi ile oluşan I-V eğrileri

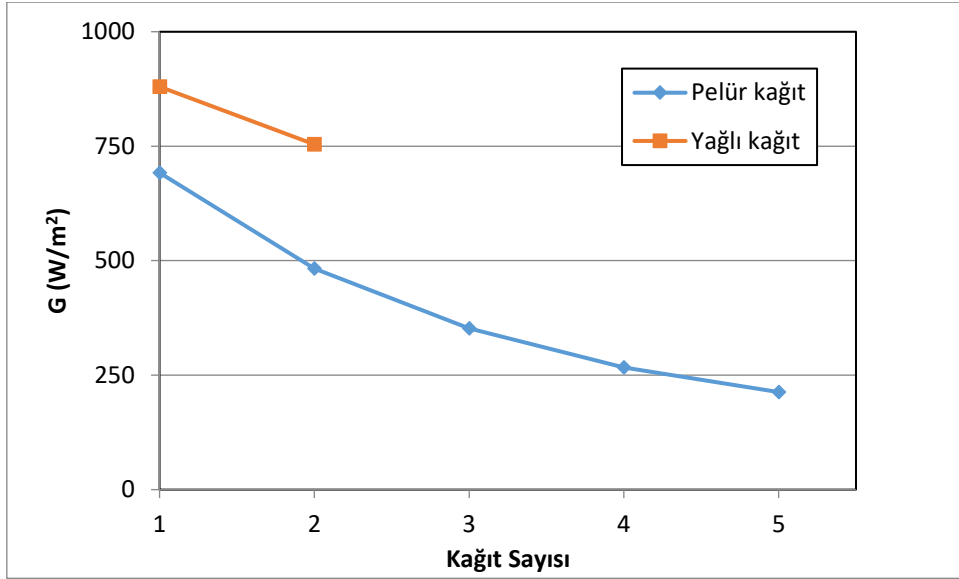


Şekil 4.60: Yağlı kağıt sayısının değişimi ile oluşan P-V eğrileri

Yağlı kağıt ile pelür kağıt ile yapılan gölgelemelerdeki güç değerleri karşılaştırıldığında ise, yağlı kağıt için güç değerlerinin pelür kağıttan fazla olduğu görülmektedir. Buradan, yağlı kağıdın geçirgenliğinin daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

Kullanılan kağıt çeşitlerinin ışınımı nasıl etkilediğinin incelenmesi için Çizelge 3.5'teki veriler kullanılarak kağıt sayısının ışınım karşılık eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 4.61). Çizilen eğri incelendiğinde, artan kağıt sayısının daha fazla gölgeye sebep olduğu ve ışınımı azalttığı görülmektedir. Yağlı kağıt ve pelür kağıt için azalış eğrileri benzer özellik gösterirken ışınım

değerindeki azalma, pelür kağıt ile oluşturulan gölge için yağlı kağıt ile oluşturulan gölgeden daha fazladır.



**Şekil 4.61:** Pelür kağıt ve yağlı kağıt sayısı ile ışıının değışimi

Benzer şekilde, ağaçtan alınan yaprak ve pelür kağıttan oluşturulan yapraklar için ışıının değeri incelendiğinde (Çizelge 3.5), pelür kağıttan yapılan 2 adet yaprağın ışıının değeri gerçek yaprak için ışıının değerinden daha az olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI VE ÖNERİLER

Fotovoltaik panellerde gölge ve toz etkisinin incelenmesi amacıyla yürütülen bu tez çalışması, dış ortam saha deneyleri ve iç ortam laboratuvar deneyleri olmak üzere iki ana başlıkta incelenmiştir. Dış ortam saha deneylerinde, kurulan düzenek ile eğim açısı, elle temizleme ve yağışın paneller üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İç ortam laboratuvar deneylerinde ise hızlandırılmış tozlanma deneyleri ile eğim açısı, toz yoğunluğu ve cinsinin etkisi incelenmiştir. Laboratuvarda gerçekleştirilen gölge deneyleri ile kısmi ve homojen gölgeleme ile panellerin davranışı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Optimum eğim açısı mevsime göre değişmektedir. Optimum eğim açısının, Mart, Nisan, Mayıs aylarında sırasıyla, 35° 30° ve 20° ve Temmuz, Ağustos ve Eylül ayları için sırasıyla, 15°, 30° ve 35° olduğu görülmüştür. Ekim ayının ise optimum eğim açısının en yüksek olduğu ay (50°) olduğu belirlenmiştir.
- Günlük tozlanma etkisinde, temizlenmiş panellerin akımının temizlenmemiş panellere göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Elle temizlik ile yüzeydeki tozların temizlenmesi sonucu panel performansları artmaktadır.
- Yağış ile birlikte tozlanma kaybının azaldığı gözlenmiştir. Bazı yağışlı günlerde ise yağışa rağmen tozlanma kaybında artış görülmüştür. Yağışın panelleri temizlemesi beklenirken yağış cinsi nedeniyle paneller üzerinde kirlenici etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Yazın yağın yağmurun panel yüzeyindeki tozu temizlemek yerine, atmosferdeki tozu alarak panel üzerinde birikmesine neden olabileceği görülmüştür.
- Daha az yağışlı mevsimlerin, daha fazla yağış alan mevsimlere göre daha fazla toz birikimi gösterdiği söylenebilir.
- Kış aylarında sonbahardan daha fazla yağış olması, iki mevsim sonunda toz yoğunluğu ve geçirgenlik sonuçlarının farkına neden olmuştur.
- Panellerin I-V eğrileri çıkartılırken sıcaklık ve ışınımın önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Paneller uzun süre sahada ışınımına maruz kalıp sıcaklıkları arttığında, I-V eğrilerinin beklendiği gibi çıkmadığı gözlenmiştir.
- Karton ile yapılan kısmi gölgelemede yatayda yapılan gölgelemenin, düşey yöndeki ve köşegen doğrultusundaki gölgelemeye göre gücü daha az düşürdüğü gözlenmiştir.
- Kısmi gölgelemedeki gölgeli alan yüzdesine karşılık maksimum güç değerleri için çizilen eğrilerdeki güç değerleri, gölgeli alanın artmasıyla, düşey yöndeki ve köşegen

doğrultusundaki gölgeler için bir yere kadar azalıp daha sonra artarken, yatay gölgelendirme için sürekli olarak azaldığı görülmüştür.

- Kısmi gölgelemede karton ile yapılan gölgelemenin ardından, pelür kağıt ve yağlı kağıt kullanılarak gölge etkisinin incelenmesi tanımlanan 3 durum için de yatay ve düşey gölgeleme için çizilen eğrilerde, geçirgenliği daha yüksek olan yağlı kağıdın içinde bulunduğu durumlar için güç değerinin, geçirgenliği düşük olan kartonun bulunduğu durumlara göre fazla çıktığı görülmüştür.
- Literatürde yer alan Su-Do-Ku modelinin bir benzetimi olarak yapılan kısmi gölgeleme etkisinde, gölgelemenin panel üzerinde eşit dağıtılması durumunda maksimum güç elde edileceği sonucuna varılmıştır.
- Gerçek yapraklar ve pelür kağıtlar ile yapılan kısmi gölgelemede, hem yatay hem de düşey gölgeleme için, gerçek yaprağın geçirgenliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, pıranometre ile yapılan deneylerde yaprakların geçirgenliklerinin ölçülmesiyle desteklenmiştir. Kuru yapraklar ile yapılan kısmi gölgeleme etkisinde ise, gücün gölge olmayan duruma göre azaldığı belirlenmiştir.
- Kablo gölgesi benzetimi ile yapılan gölgelemede, gölgesiz duruma göre gücün azaldığı görülmüştür. Panel üzerinde gölge yokken maksimum güç değeri, 3,38 W iken, kablo gölgesi benzetimi sonucu maksimum gücün 3,14 W'a düştüğü belirlenmiştir. Buradan, panel üzerinde kablo gölgesinin gücü yaklaşık %7 azalttığı sonucuna varılmıştır.
- Baca gölgesi benzetimi ile yapılan gölgelemede, panelden elde edilen gücün, gölgesiz duruma göre çok azaldığı görülmüştür. Gölgesiz durum için maksimum güç 3,38 W iken, baca gölgesi benzetiminde 1. durum ve 2. durum için güç değerleri, sırasıyla, 0,95 W ve 1.04 W'a düşmüştür. Buradan, kaybın yaklaşık %70-75 aralığında olduğu söylenebilir.
- Pelür kağıt ve yağlı kağıt sayıları artırılarak yapılan homojen gölgelemede, kağıt sayısı arttıkça gölgesiz durumdaki I-V ve P-V eğrilerinin lineer olarak azaldığı görülmüştür. Yağlı kağıt ve pelür kağıt için yapılan gölgeleme karşılaştırıldığında ise yağlı kağıdın geçirgenliğinin daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum, pıranometre ile yapılan deneylerde kağıtların geçirgenliklerinin ölçülmesi ile desteklenmiştir.
- Pıranometre üzerinde herhangi bir kağıt yokken 1142 W/m<sup>2</sup> okunan ışıınım değeri, 1 adet pelür kağıt varken, 692 W/m<sup>2</sup>'ye, pıranometre boş iken 1028 W/m<sup>2</sup> okunan ışıınım değeri ise 1 adet yağlı kağıt varken 625 W/m<sup>2</sup>'ye düşmüştür. Buradan, yağlı kağıdın geçirgenliğinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, gerçek yaprak ve pelür kağıttan yapılan yaprağın geçirgenlikleri incelenmiş ve gerçek yaprakların

ışınım değerleri, 453-462 W/m<sup>2</sup> aralığında iken, 2 kat pelür kağıdın ışıınım değerinin 345 W/m<sup>2</sup> olduğu görülmüştür.

- Hızlandırılmış tozlanmada laboratuvar deneyleri için akım ve gerilim değerleri öncelikle temiz paneller için ölçülmüş ve daha sonra panellerin üzeri farklı tozlarla kaplanarak ölçümler tekrarlanmıştır. Kullanılan tozların yoğunlukları kırmızı kil toprak, sarı siltli toprak ve siltli kum için sırasıyla, 0,92, 0,88 ve 0,99 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.
- Yapay tozlanmadaki tüm toz çeşitleri, belirtilen miktarlar için benzer özellik göstermektedir.
- Toz yoğunluğunun en fazla olduğu eğim açısı 6°'dir ve bu açığı 10°, 20°, 25° ve 40° izlemektedir. Bu durum, eğim açısının artmasıyla, panel üzerindeki tozların, yer çekimi etkisiyle yüzeyden kayarak yüzeydeki toz miktarını azaltmasıyla açıklanmıştır.
- M/12 gram toz ve 6° eğim açısı için kırmızı kil toprak, sarı silt toprak ve siltli kum için normalize güç değerleri, sırasıyla, 3,09 W, 3,02 W, 2,99 W iken; M gram toz için bu değerler, sırasıyla, 0,69 W, 1,78 W, 1,76 W olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlardan, toz yoğunluğu arttıkça, normalize güç değerinin azaldığı gözlenmiştir.
- Kırmızı kil toprak ve su ile yapılan karışımın panel üzerine püskürtülmesi ile yapılan deneyler sonucunda, çöl bölgesi gibi kuru bir bölgedeki tozlanmanın, yağış alan bir bölgedeki tozlanmadan daha fazla olacağı ve çöl bölgesindeki sistemin gücündeki azalmanın daha belirgin olacağı görülmüştür.

Bu sonuçlar ışığında aşağıda sıralanan önerilerde bulunulabilir:

- Optimum açının bulunması sırasında hesaplama programı ile her bir ay için bu açı teorik olarak belirlenebilirken, deneysel olarak açılarının aralıkları fazla olduğu için tam görülememiştir. Bu durumun, panel yerleşimleri yapılırken göz önüne alınması,
- Birikimli tozlanmada yağmur etkisini incelenebilmesi için, veriler alınırken yağmur miktarının ölçülmesi, yağmur cinsinin kaydedilmesi ve rüzgar miktarının belirtilmesi göz önüne alınarak bir çalışma yapılması,
- Yapılan çalışmada akım değerleri, öğlen saati hava güneşli ve açıkken alınmıştır. Bu durum her zaman ölçüm alınamamasına neden olmuştur. Bu sebeple, otomatik veri alma sistemi kullanılması,
- Tez çalışmasında, saha ölçümlerinde paneller üzerine biriken toz miktarı ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Panellere ek olarak cam eklenerek cam üzerine biriken toz miktarının ölçülmesi ve camların geçirgenliklerinin karşılaştırılması,

- Temizleme işlemi için farklı temizleme yöntemleri kullanılarak bu yöntemlerin etkisinin incelenmesi,
- Panellerin I-V eğrilerinin çıkarılması sırasında fazla ışıma maruz kalındığında I-V eğrilerinin bozulması ile ilgili paneller üzerindeki sıcaklık etkisinin araştırılması,
- Farklı malzemeden üretilmiş paneller kullanılarak gölge etkisinin incelenmesi,
- Su-Do-Ku modelinin daha iyi incelenebilmesi için 9x9 karesi oluşturulabilecek bir panel kullanılması,
- Paneller üzerine tozun homojen püskürtülmesi için bir deney düzeneği ya da araç kullanılması,
- Yapay tozlanma deneylerinde kullanılan malzemelerin analizlerinin yapılması ve bu malzemelerin tozlanmaya etkisinin araştırılması.



## 6. KAYNAKLAR

- [1] Catelani, M., Ciani L., Cristaldi L., Faifer M., Lazzaroni M., Rossi M., Characterization of photovoltaic panels: The effect of dust, *2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition*, **2012**.
- [2] Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F., Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 39, 748-764, **2014**.
- [3] Aykal F.D., Gümüş B., Özbudak Akça Y.B., Sürdürülebilirlik kapsamında yenilenebilir ve etkin enerji kullanımının yapılarda uygulanması, *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (Diyarbakır)*, **2009**.
- [4] Sandell M., *The effect of snowfall on the power output of photovoltaic solar panels in Halifax*, Dalhousie University, **2012**.
- [5] International Renewable Energy Agency, *Renewable Capacity Statistics*, **2018**.
- [6] <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/index.html?topic=4&subTopic=18> (Ağustos, **2018**).
- [7] Kılıç, F.Ç., Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 671, 28-40, **2015**.
- [8] <https://www.teias.gov.tr/tr/i-kurulu-guc> (Ağustos, **2018**).
- [9] Mani M., Pillai R., Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3124-3131, **2010**.
- [10] Ndiaye A., Kébé C. M. F., Ndiaye P.A., Charki A., Kobi A., Sambou V., Impact of dust on the photovoltaic (pv) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal, *International Journal of Physical Sciences*, 8(21), 1166-1173, **2013**.
- [11] Said Syed A.M., Walwil Husam M., Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance, *Solar Energy*, 107, 328–337, **2014**.
- [12] Qasem H., Betts T.R., Gottschalg R., Effect of shading caused by dust on cadmium telluride photovoltaic modules, centre for renewable energy systems technology (CREST), Department of Electronic and Electrical Engineering, 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, **2011**.
- [13] Jiang H., Lu L., Sun K., Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmospheric Environment*, 45, 4299-4304, **2011**.

- [14] Gholami A., Khazaei I., Eslami S., Zandi M., Akrami E., Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance. *Solar Energy*, 159, 346–352, **2018**.
- [15] Xu R., Ni K., Hu Y., Si J., Wen H., Yu D., Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. *Energy Conversion and Management*, 148, 100–109, **2017**.
- [16] Powers L., Newmiller J., Townsend T., Measuring and modeling the effect of snow on photovoltaic system performance, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, **2010**.
- [17] Micheli L., Muller M., Kurtz S., Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance, *Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE 43rd, 1724-1729, **2016**.
- [18] Abdeen E., Orabi M., Hasaneen E., Optimum tilt angle for photovoltaic system in desert environment, *Solar Energy*, 155, 267–280, **2017**.
- [19] Mohamed A.O., 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**.
- [20] Cano J., *Photovoltaic Modules: Effect of tilt angle on soiling*, Master Thesis, Arizona State University, **2011**.
- [21] Virkar S., *Seasonal and tilt angle dependence of soiling loss factor and development of artificial soil deposition chamber replicating natural dew cycle*, Master Thesis, Arizona State University, **2017**.
- [22] Karafil A., Ozbay H., Kesler M., Parmaksiz H., Calculation of optimum fixed tilt angle of PV panels depending on solar angles and comparison of the results with experimental study conducted in summer in Bilecik, Turkey, *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, **2015**.
- [23] Alonso-García M.C., Ruiz J.M., Hermann W., Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays, *Renewable Energy*, 31, 1986-1993, **2006**.
- [24] Ramaprabha R., Mathur .B.L., Impact of partial shading on solar pv module containing series connected cells, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol 2, No. 7, **2009**.
- [25] Dezso S., Yahia B., On the impact of partial shading on pv output power, *International Conference on Renewable Energy Sources, At Corfu*, **2008**.

- [26] Moballegh S., Jiang J., Modeling, prediction, and experimental validations of power peaks of pv arrays under partial shading conditions, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 1, **2014**.
- [27] Sing P., *Modeling of photovoltaic arrays under shading patterns with reconfigurable switching and bypass diodes*, Master Thesis, The University of Toledo, **2011**.
- [28] Chaw C., *An approach to reduce the effect of partial shading on photovoltaic modules*, Master of Applied Science in the Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies, The University of British Columbia, **2015**.
- [29] Rani B., Ilango G., Nagamani C., Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol 4, No 3, **2013**.
- [30] Rao P., Dinesh P., Ilango G., Nagamani C., Optimal Su-Do-Ku based interconnection scheme for increased power output from PV array under partial shading conditions, *Energy*, 9(2): 199–210, **2015**.
- [31] Seyedmahmoudian M., Mekhilef S., Rahmani R., Yusof R., Renani E, Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems, *Energies*, 6, 128-144, **2013**.
- [32] Ünlü M., Çamur S., Arifoğlu B., Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde parçalı gölgelenme durum analizi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, [http://www.emo.org.tr/ekler/bf14b8fc9312719\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/bf14b8fc9312719_ek.pdf) (**Ağustos, 2018**).
- [33] Ahmad R., Murtaza A., Sher H., Shami U., Olalekan S., An analytical approach to study partial shading effects on PV array supported by literature, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 721–732, **2017**.
- [34] Malathy S., Ramaprabha R., *Reconfiguration strategies to extract maximum power from photovoltaic array under partially shaded conditions*, Accepted 23 June **2017**.
- [35] Burton P., King B., Artificial soiling of photovoltaic module surfaces using traceable soil components, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Sandia National Laboratories, **2013**.
- [36] Rajasekar V., *Indoor soiling method and outdoor statistical risk analysis of photovoltaic power plants*, Master Thesis, Arizona State University, **2015**.
- [37] John J., Warade S., Kumar A., Kottantharayil A., Evaluation and prediction of soiling loss on PV modules with artificially deposited dust, *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, Indian Institute of Technology Bombay*, Mumbai, India, **2015**.

- [38] Bhaduri S., Warade S., John J., Kavaipatti B., Kottantharayil A., Artificial dust deposition using water as carrier solvent for investigation of soiling losses in photovoltaic modules, *IEEE*, **2016**.
- [39] John J., Warade S., Tamizhmani G., Kottantharayil A., Study of soiling loss on photovoltaic modules with artificially deposited dust of different gravimetric densities and compositions collected from different locations in India, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 6, No. 1, **2016**.
- [40] Kaldellis J.K., Kapsali M., Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements, *Energy*, 36, 5154-5161, **2011**.
- [41] Boztepe M., Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, [http://www.emo.org.tr/ekler/65eb10e64749410\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/65eb10e64749410_ek.pdf) (Ağustos, **2018**).
- [42] Vidyanandan K. V., An overview of factors affecting the performance of solar PV systems, *Energy Scan*, 27, 2-8, India, **2017**.
- [43] Boppana S., *Outdoor soiling loss characterization and statistical risk analysis of photovoltaic power plants*, Thesis for the degree Master of Science, Arizona State University, **2015**.
- [44] Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M., Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2920– 292, **2012**.
- [45] Sarver, T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.L., A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22(0): 698-733, **2013**.
- [46] Calvert, J.G., Glossary of atmospheric chemistry terms (Recommendations 1990), *Pure and applied chemistry*, 62(11), 2167-2219, **1990**.
- [47] Goossens D., Van Kerschaefer E., Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance, *Solar Energy*, 66 (4):277-89, **1999**.
- [48] Qasem, H., Betts T.R., Müllejans H., AlBusairi H., Dust-induced shading on photovoltaic modules, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22:218-226, **2014**.

- [49] Elminir H.K., Ghitas A.E., Hamid R.H., El-Hussainy F., Beheary M.M., Abdel-Moneim K.M., Effect of dust on the transparent cover of solar collectors, *Energy Conversion and Management*, 47, 2192-3203, **2006**.
- [50] Appels, R., et al., Effect of soiling on photovoltaic modules, *Solar Energy*, 96(0), 283-291, **2013**.
- [51] Li A., *Optical Properties of Dust (a book chapter in "Small Bodies in Planetary Sciences" (Lecture Notes in Physics))*, 758, **2008**.
- [52] Redmond, H.E., Dial K.D., Thompson J.E., Light scattering and absorption by wind blown dust: Theory, measurement, and recent data, *Aeolian Research*, 2(1), 5-26, **2010**.
- [53] Al-Hasan, A.Y., Ghoneim A.A., A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface, *International Journal of Sustainable Energy*, 24(4), 187-197, **2005**.
- [54] Hegazy, A.A., Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors, *Renewable Energy*, 22(4), 525-540, **2001**.
- [55] Ghazi S., Ip K., Sayigh A., Preliminary study of environmental solid particles on solar flat surfaces in the UK, *Energy Procedia*, 42, 765-774, **2013**.
- [56] Mastekbayeva G.A., Kumar S., Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate, *Solar Energy*, 68, 2, 135-141, **2000**.
- [57] Sayigh A., Al-Jandal S., Ahmed H., Dust effect on solar flat surfaces devices in Kuwait, *In: Proceedings of the workshop on the physics of non-conventional energy sources and materials science for energy*, 2-20, **1985**.
- [58] Mazumder M., Sharma R., Biris A., Zhang J., Calle C., Zahn M., Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices, *Particulate Science and Technology*, 25 (1), 5-20, **2007**.
- [59] Tanesab J.A., *The effect of dust on the performance of solar photovoltaic module: case studies in Nusa Tenggara Timur, Indonesia and Perth, Western Australia*, Doctor of Philosophy of Murdoch University, **2018**.
- [60] Kalogirou S.A., Agathokleous R., Panayiotou G., On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance. *Energy*, 51(0), 439-446, **2013**.
- [61] Mahowald, N., et al., The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Research*, 15, 53-71, **2014**.

- [62] Csavina J., et al., Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates, *Science of The Total Environment*, 487, 82-90, **2014**.
- [63] Lu H., Shao Y., Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications, *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 233-249, **2001**.
- [64] Cuddihy E.F., Theoretical considerations of soil retention, *Solar Energy Materials*, 3, 21-33, **1980**.
- [65] Goossens D., Offer Z.Y., Zangvil A., Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors, *Solar Energy*, 50, 75-84, **1993**.
- [66] Sayyah, A., Horenstein M.N., Mazumder M.K, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, *Solar Energy*, 107, 576-604, **2014**.
- [67] Haeberlin H., Graf J., Gradual reduction of PV generator yield due to pollution, *2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, **1998**.
- [68] Lorenzo E., Moretón R., Luque I., Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(6), 666-670, **2014**.
- [69] Garg, H.P., Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors, *Solar Energy*, 15(4), 299-302, **1974**.
- [70] Nahar N.M., Gupta J.P., Effect of dust on transmittance of glazing materials for solar collectors under arid zone conditions of India, *Solar & Wind Technology*, 7(2), 237-243, **1990**.
- [71] Piliouline, M., et al., Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates. *Applied Energy*, 112, 626-634, **2013**.
- [72] Ghazi S., Sayigh A., Ip K., Dust effect on flat surfaces-A review paper, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 742-751, **2014**.
- [73] Massi Pavan A., Mellit A., De Pieri D., The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants, *Solar Energy*, 85(5), 1128-1136, **2011**.
- [74] El-Nashar A.M., Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant. *Desalination*, 239(1-3), 66-81, **2009**.

- [75] Peel M.C., Finlayson B.L, McMahon T.A., Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Science*, 11(5), 1633-1644, **2007**.
- [76] Kaldellis J. K., Kokala A., Quantifying the decrease of the photovoltaic panels energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal, *Energy*, Vol. 35, No. 12, 4862–4869, **2010**.
- [77] Brown K., Narum T., Jing N., Soiling test methods and their use in predicting performance of photovoltaic modules in soiling environments, *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, **2012**.
- [78] Boppana S., Rajasekar V., TamizhMani G., Working towards the development of a standardized artificial soiling method, *IEEE 42nd Photovoltaic Specialists Conference*, **2015**.
- [79] Türk Standardı, TS 1500. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Aralık **2000**.
- [80] Sathyanarayana P., Rajkiran B., Lakshmi Sagar P.S., Kumar G., Effect of shading on the performance of solar pv panel, *Energy and Power*, 5, 1-4, **2015**.
- [81] Veerapen S., Wen H., Shadowing effect on the power output of a photovoltaic panel, *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference*, **2016**.
- [82] Patel H., Agarwal V., Maximum power point tracking scheme for pv systems operating under partially shaded conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 4, 1689-1698, **2008**.
- [83] Gao L., Dougal R. A., Liu S., Iotova A. P., Parallel-connected solar PV system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 5, 1548-1556, **2009**.
- [84] [http://www.yetam.hacettepe.edu.tr/gunes\\_evi.shtml](http://www.yetam.hacettepe.edu.tr/gunes_evi.shtml) (Ağustos, **2018**).
- [85] <https://tr.freemeteo.com/havadurumu/beytepe/current-weather/location/?gid=321186&station=5375&language=turkish&country=turkey> (Ağustos, **2018**).
- [86] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface> (Ağustos, **2018**).
- [87] <https://www.enerjibes.com/gunes-panelleri-ve-golge-analizi/> (Ağustos, **2018**).

- [88] <http://files.sma.de/dl/7418/GlobalPeak-TI-en-12.pdf> (Ağustos, 2018).
- [89] <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html> (Haziran, 2018).
- [90] Kazem et al., Effect of dust deposition on the performance of multi-crystalline photovoltaics modules based on experimental measurements, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 3, No. 4, 2013.
- [91] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/short-circuit-current> (Ağustos, 2018).
- [92] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor> (Ağustos, 2018).
- [93] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature> (Ağustos, 2018).
- [94] Hamrouni N., Jraidi M., A. Cherif, Solar radition and ambient temperature effects on the performances of a PV pumping system, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, No. 1, 95 – 106, 2008.
- [95] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-light-intensity> (Ağustos, 2018).
- [96] Anderson A.J., *Photovoltaic Translation Equations: A New Approach Final Subcontract Report*, National Renewable Energy Laboratory, 1996.
- [97] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/elevation-angle> (Ağustos, 2018).
- [98] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle> (Ağustos, 2018).
- [99] Naga Viswatej K., Madhava Rao T., Srikonda R., Analyzing Sun Angles of Solar Time Dial for Design of Building Envelope Components for the Region of Andhra Pradesh, India, *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2017.
- [100] <https://www2.pvlighthouse.com.au/calculators/solar%20spectrum%20calculator/solar%20spectrum%20calculator.aspx> (Haziran, 2018).
- [101] <https://www.mgm.gov.tr/tahmin/toz-tasinimi.aspx?s=t> (Ağustos, 2018).

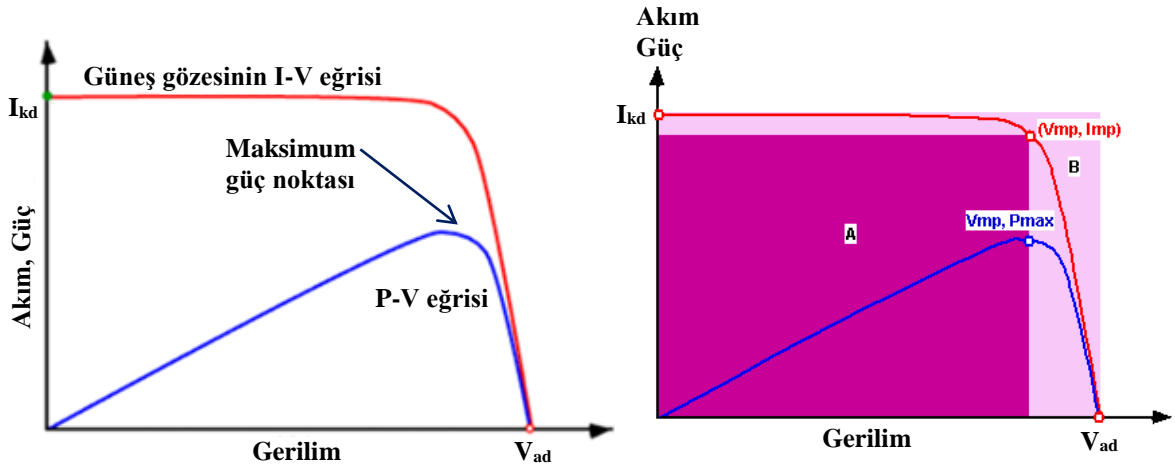


## EKLER DİZİNİ

### EK1: FV Panellerin Elektriksel Karakterizasyonu

#### 1. I-V ve P-V Eğrileri

Bir fotovoltaik panelin ışık altındaki I-V eğrisi Şekil Ek1.1. ile verilmektedir.



Şekil Ek1.1: Bir FV panelin I-V ve P-V eğrisi [91] [92]

I-V ve P-V eğrileri yardımıyla panel davranışlarının yorumlanabilmesi için aşağıdaki parametrelerin tanımlanması gerekmektedir:

**Kısa devre akımı ( $I_{kd}$ ):** Panelin uçları arasındaki potansiyel farkı sıfır olduğundaki akım değeridir.

**Açık devre gerilimi ( $V_{ad}$ ):** Panelden akım geçmediğinde elde edilen gerilim değeridir.

**Maksimum güç ( $P_{max}$ ):** Panel tarafından üretilen en yüksek güç değeridir.

**Verim ( $\eta$ ):** Panelden elde edilen enerjinin, Güneşten gelen enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır.

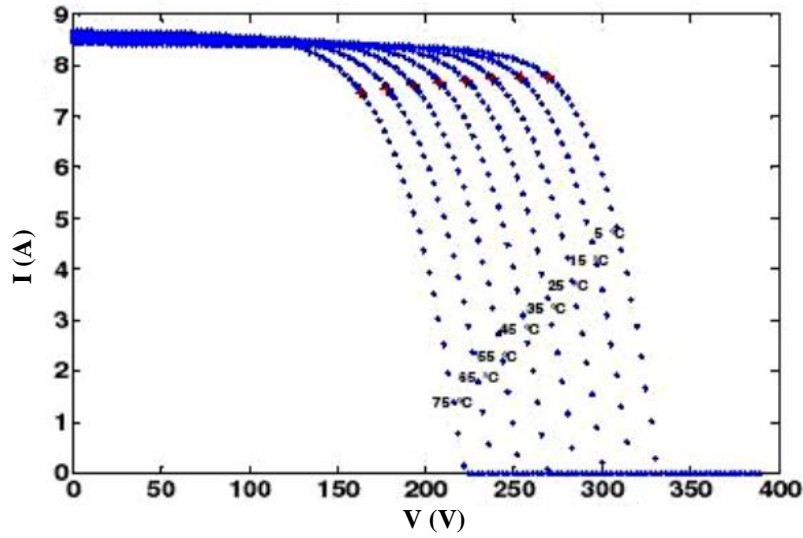
**Dolum faktörü (DF):** Panelden elde edilebilen maksimum gücün, panelin ürettiği güce oranı olarak (Şekil Ek1.1) aşağıdaki formül ile verilmektedir.

$$Dolum\ Faktörü = \frac{Alan\ (A)}{Alan\ (B)} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{ad}I_{kd}}$$

## 2. Farklı Işık Şiddeti ve Sıcaklıkla FV Panellerin Performans Değişimi

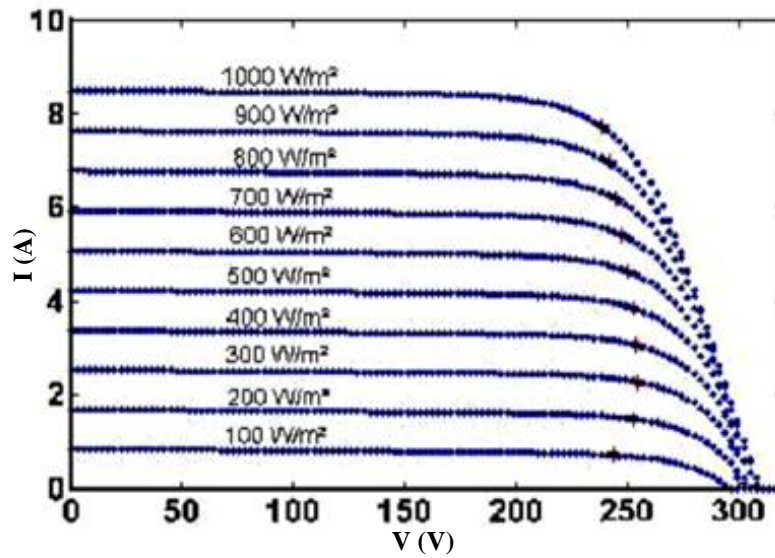
FV panellere ait performans değerlendirmesi I-V eğrileri ile yapılabilmektedir. Bu bölümde, panellerin performansını etkileyen faktörler arasında sıcaklık ve ışınım etkisi incelenmiştir.

Bir FV panelde sıcaklığın değişimi doğrudan açık devre gerilimini etkilemektedir [93]. Sıcaklık arttıkça gerilim değeri azalırken, akım değeri sıcaklık artışından çok etkilenmemektedir (Şekil Ek1.2).



Şekil Ek1.2: Sıcaklık değişiminin I-V eğrisine etkisi [94]

Panel üzerine gelen ışınımdaki değişim ise kısa devre akımının değişmesine neden olmaktadır [95]. Panel üzerine gelen ışınımın artması, akımı arttırmakta iken gerilim değişimindeki değişim azdır (Şekil Ek1.3).



Şekil Ek1.3: Işınım değişiminin I-V eğrisine etkisi [94]

### 3. FV Panellerin Akım ve Gerilim Değerlerinin Normalize Edilmesi

Farklı günlerde alınan veriler farklı hava koşullarına neden olacağından, panel üzerine gelen ışınım ve panel sıcaklıkları farklı olacaktır. Alınan verilerin kıyaslanabilmesi için hepsinin benzer koşullarda olması beklenmektedir. Bu sebeple, ölçülen akım ve gerilim değerlerini, sıcaklık ve ışınımdan bağımsız hale getirebilmek için akım ve gerilim normalizasyonu yapılmalıdır. Bu bölümde, tez çalışmasında yapılacak olan akım ve gerilim normalizasyonu formüllerin çıkarımına yer verilmiştir.

#### Akım Normalizasyonu

$T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarında okunan kısa devre akımları,  $I_{kd,1}$  ve  $I_{kd,2}$  olmak üzere, kısa devre akımının sıcaklıkla değişim katsayısı olarak tanımlanan  $\alpha$  sabiti  $A/^\circ C$  olarak,

$$\alpha = \frac{I_{kd,2} - I_{kd,1}}{T_2 - T_1}$$

$\%/^\circ C$  olarak,

$$\alpha = \frac{I_{kd,2} - I_{kd,1}}{I_{kd,2}(T_2 - T_1)}$$

bağıntıları ile verilmektedir [95]. Bu tanımlar kullanılarak,  $I_{kd,2}$  akımını için,

$$I_{kd,2} = \frac{I_{kd,1}}{1 + \alpha T_1 - \alpha T_2}$$

eşitliği elde edilmektedir. Bu eşitliğe ışınım etkisinin eklenmesi ile,

$$I_{kd,2} = \frac{I_{kd,1}}{[1 + \alpha(T_1 - T_2)] \frac{E_1}{E_2}}$$

elde edilir.

Bu çalışmada, sahada alınan ölçümler standart test koşullarına (STK) ( $1000 \text{ W/m}^2$  ve  $25^\circ C$ ) çevrileceğinden, 1 indisi saha test koşulları, 2 indisi STK için kullanılarak dönüşüm eşitliği,

$$I_{kd}(STK) = \frac{I_{ölçülen}}{[1 + \alpha(T_{ölçülen} - T_{STC})] \frac{E_{ölçülen}}{E_{STC}}}$$

$$I_{kd}(STK) = \frac{I_{ölçülen}}{[1 + \alpha(T_{ölçülen} - 25)] \frac{E_{ölçülen}}{1000}}$$

$$I_{kd}(STK) = \frac{I_{ölçülen}}{[1 + \alpha(T_{ölçülen} - 25)] E_{ölçülen}} \times 1000 \quad (\text{Eş.Ek1.1})$$

elde edilmiştir.

Burada,  $I_{ölçülen}$ , ölçülen akım değerleri;  $\alpha$ , yüzde olarak kısa devre akımının sıcaklıkla değişim katsayısı ( $\alpha=0,04$  ( $1/^\circ\text{C}$ ));  $T_{ölçülen}$ , ölçülen sıcaklık değerleri;  $E_{ölçülen}$ , panellerin ışıyım değerleri;  $25^\circ\text{C}$  ve  $1000 \text{ W/m}^2$  ise standart test koşullarını ifade etmektedir [96].

### Gerilim Normalizasyonu

Açık devre geriliminin sıcaklıkla değişim katsayısı olarak tanımlanan  $\beta$  sabiti  $\text{V}/^\circ\text{C}$  olarak,

$$\beta = \frac{V_{ad,2} - V_{ad,1}}{T_2 - T_1}$$

$\%/^\circ\text{C}$  olarak,

$$\beta = \frac{V_{ad,2} - V_{ad,1}}{V_{ad,2}(T_2 - T_1)}$$

bağıntıları ile verilmektedir [95]. Bu tanımlar kullanılarak,  $V_{ad,2}$  gerilimi için,

$$V_{ad,2} = \frac{V_{ad,1}}{1 + \beta(T_1 - T_2)}$$

eşitliği elde edilmektedir. Bu eşitliğe ışıyım etkisinin eklenmesi ile elde edilen,

$$V_{ad,2} = \frac{V_{ad,1}}{[1 + \beta(T_1 - T_2)][1 + \delta \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \right)]}$$

bağıntısında, küçük ışıyım değişimleri için,  $E_1/E_2 \approx 1$ ;  $\ln(1) = 0$  ve  $[1 + \delta \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \right)] \approx 1$  yaklaşımları ile,

$$V_{ad,2} = \frac{V_{ad,1}}{[1 + \beta(T_1 - T_2)]}$$

eşitliği elde edilir. Dönüşüm eşitliği, 1 indisi saha test koşulları, 2 indisi STK için kullanılarak,

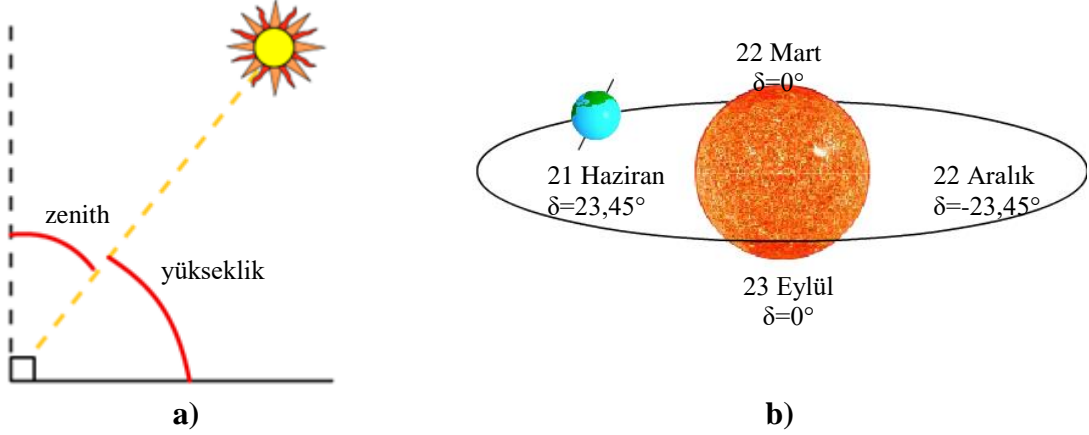
$$V(STK) = \frac{V_{ölçülen}}{[1 + \beta(T_{ölçülen} - 25)]} \quad (\text{Eş. Ek1.2})$$

şeklinde ifade edilir.

Burada,  $V_{ölçülen}$  ölçülen gerilim değerleri;  $\beta$ , yüzde olarak Açık devre geriliminin sıcaklıkla değişim katsayısı ( $\beta=-0,45$  ( $1/^\circ\text{C}$ ));  $T_{ölçülen}$  ölçülen sıcaklık değerleri;  $25^\circ\text{C}$  ise standart test koşullarını vermektedir. Bu formülde ışınım etkisi ihmal edilmektedir [96].

## EK2: Güneş Açıları

Yapılan çalışmada, paneller farklı eğim açılarında yerleştirildiği için, panel üzerine gelen ışınım gelen ışınımından farklı olmaktadır. Bu sebeple eğimli bir yüzeye gelen ışınım değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama, Eş. 3.1'e göre yapılmıştır. Bu bölümde, bu hesabın yapılışı için gerekli olan bilgiler açıklanmıştır.



Şekil Ek2.1: Güneş açılarından a) zenith ve yükseklik [97] b) deklinasyon açılarının [98] gösterimi

- **Enlem açısı ( $\phi$ ):** Ekvatora göre nesnenin veya yüzeyin konumudur. Kuzeyden ekvatora doğru pozitif, güneyden ekvatora doğru negatif değer almaktadır ( $-90^0 \leq \phi \leq +90^0$ ) [99].
- **Deklinasyon açısı ( $\delta$ ):** Güneş ışınlarının ekvatorun düzlemine göre pozisyonudur. Dünyanın kendi eksenini ve yörünge düzlemi ile  $23,45^0$ 'lik açı yapmasından kaynaklanmaktadır ( $-23,45^0 \leq \delta \leq 23,45^0$ ). Kuzey için pozitifdir [99]. Eş. Ek2.1. ile verilmektedir [98].

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{Eş. Ek2.1})$$

Burada, n; 1 Ocak gününden itibaren gün sayısına karşılık gelmektedir.

- **Eğim açısı ( $\beta$ ):** Yüzey düzlemi ile yatay arasındaki açıdır ( $0^0 \leq \beta \leq +180^0$ ) [99].
- **Yüzey azimuth açısı ( $\gamma$ ):** Yüzey dikeyinin yerel meridyenden gelen sapmasıdır ( $-180^0 \leq \gamma \leq +180^0$ ) [99].
- **Zenith açısı ( $z$ ):** Dünya yüzeyine dik gelen açı ile güneş arasındaki açıdır [99].
- **Yükseklik açısı ( $\alpha$ ):** Güneş ışınımı ile yatay düzlem arasındaki açıdır [99]. Yükseklik açısı,

$$\alpha = 90 - \phi + \delta \quad (\text{Eş. Ek2.2})$$

eşitliği ile verilmektedir [86]. Burada,  $\theta$ ; bulunulan bölgenin enlemi,  $\delta$ ; deklinasyon açısı olarak tanımlanmaktadır.

### EK3: FV Paneller İçin Optimum Eğim Açısının Kuramsal Olarak Belirlenmesi

Ölçülen ışınım değerlerinin teorik ışınım değerleri ile uyumlu olup olmadığının bir kontrolü için PV Light House programındaki Solar Spectrum Calculator kullanılarak teorik ışınım değerleri belirlenmiştir. Kullanılan programın arayüzü Şekil Ek3.1'de görülmektedir. Programda Beytepe Güneş Evi enlem ve boylam değerleri girilerek, dış ortamda saha deneylerinin yapıldığı günler için, her bir eğim açısında teorik ışınım değerleri hesaplanmış ve Çizelge Ek3.1'de verilmiştir. Bu çizelgede,  $G_{direkt}$ , güneşten gelen ışınım değeri iken,  $G_{panel}$ , eğimli yüzeye gelen ışınım değeri olarak tanımlanmıştır.

**INPUTS**

<b>Date and sidereal time:</b>		<b>Extraterrestrial spectrum:</b>	
Year	2018	Incident spectrum	AM0
Month	3	Earth-Sun factor	1,006
Day	24		
Hour	12	<b>Atmospheric inputs:</b>	
Minute	0	Transmission model	SPCTRAL2 [Bir86]
Second	0	Atmospheric pressure	1013,25 mb
		Turbidity at 500 nm	0,084
		Precipitable water vapour	1,4164 cm
		Ozone	0,3438 atm-cm
		Albedo	0,1

**Module location:**

Latitude	39	°
Longitude	32	°

**Module orientation:**

Tilt angle	0	°
Azimuth angle	180	°

**OUTPUTS**

**Insolation**

Solar position	Power density (W/m <sup>2</sup> )		Photon current (mA/cm <sup>2</sup> )	
	perpendicular	module	perpendicular	module
Air mass	1,25			
Zenith angle	36,84°			
Azimuth angle	177,60°			
Incident angle	36,84°			
Direct	950,9	761,1	66,57	53,28
Diffuse	99,4	93,8	4,76	4,30
Global	1050,3	854,9	71,33	57,58

*Integrated over the wavelength range 280-4000 nm*

Şekil Ek3.1: Solar Spectrum Calculator programının arayüzü [100]



**Çizelge Ek3.1: Solar Spectrum Calculator programı kullanılarak Beytepe Güneş Evi için bulunan teorik ışınım değerleri**

	<b>Eğim açısı (°)</b>	<b>Zenith açısı (°)</b>	<b>Azimuth açısı (°)</b>	<b>Geliş açısı (°)</b>	<b>G<sub>direkt</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>G<sub>panel</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>24.03.2017</b>	<b>0</b>	36,84	177,6	36,84	950,9	761,1
	<b>6</b>	36,84	177,6	30,84	950,9	816,4
	<b>15</b>	36,84	177,6	21,86	950,9	882,6
	<b>20</b>	36,84	177,6	16,87	950,9	910
	<b>30</b>	36,84	177,6	6,96	950,9	943,9
	<b>40</b>	36,84	177,6	3,49	950,9	949,2
	<b>50</b>	36,84	177,6	13,26	950,9	925,6
<b>30.03.2017</b>	<b>0</b>	34,49	178,26	34,49	954	786,3
	<b>6</b>	34,49	178,26	28,49	954	838,5
	<b>15</b>	34,49	178,26	19,5	954	899,3
	<b>20</b>	34,49	178,26	14,51	954	923,6
	<b>30</b>	34,49	178,26	4,58	954	951
	<b>35</b>	34,49	178,26	1,12	954	953,8
	<b>40</b>	34,49	178,26	5,61	954	949,5
	<b>50</b>	34,49	178,26	15,55	954	919,1
<b>11.04.2017</b>	<b>0</b>	30,18	179,63	30,18	957,5	827,7
	<b>6</b>	30,18	179,63	24,18	957,5	873,5
	<b>15</b>	30,18	179,63	15,18	957,5	924,1
	<b>20</b>	30,18	179,63	10,18	957,5	942,4
	<b>30</b>	30,18	179,63	0,26	957,5	957,5
	<b>40</b>	30,18	179,63	9,83	957,5	943,4
	<b>50</b>	30,18	179,63	19,82	957,5	900,7
<b>26.04.2017</b>	<b>0</b>	25,05	181,37	25,05	959,1	868,9
	<b>6</b>	25,05	181,37	19,05	959,1	906,6
	<b>15</b>	25,05	181,37	10,06	959,1	944,3
	<b>20</b>	25,05	181,37	5,07	959,1	955,3
	<b>30</b>	25,05	181,37	4,99	959,1	955,4
	<b>40</b>	25,05	181,37	14,97	959,1	926,5
	<b>50</b>	25,05	181,37	24,97	959,1	869,5
<b>11.05.2017</b>	<b>0</b>	20,67	182,46	20,67	958,3	896,6
	<b>6</b>	20,67	182,46	14,68	958,3	927
	<b>15</b>	20,67	182,46	5,72	958,3	953,5
	<b>20</b>	20,67	182,46	1,09	958,3	958,2
	<b>30</b>	20,67	182,46	9,38	958,3	945,5
	<b>40</b>	20,67	182,46	19,36	958,3	904,1
	<b>50</b>	20,67	182,46	29,35	958,3	835,3

**Çizelge Ek3.1:** Solar Spectrum Calculator programı kullanılarak Beytepe Güneş Evi için bulunan teorik ışınım değerleri (devam ediyor)

	<b>Eğim açısı (°)</b>	<b>Zenith açısı (°)</b>	<b>Azimuth açısı (°)</b>	<b>Geliş açısı (°)</b>	<b>G<sub>direkt</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>G<sub>panel</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>7.07.2017</b>	0	16,65	175,84	16,65	950,2	910,3
	6	16,65	175,84	10,67	950,2	933,7
	15	16,65	175,84	2,0	950,2	949,6
	20	16,65	175,84	3,6	950,2	948,3
	30	16,65	175,84	13,45	950,2	924,1
	40	16,65	175,84	23,42	950,2	871,9
	50	16,65	175,84	33,41	950,2	793,1
<b>12.07.2017</b>	0	17,33	175,46	17,33	949,7	906,6
	6	17,33	175,46	11,35	949,7	931,1
	15	17,33	175,46	2,65	949,7	948,7
	20	17,33	175,46	3,04	949,7	948,4
	30	17,33	175,46	12,8	949,7	926,1
	40	17,33	175,46	22,76	949,7	875,7
	50	17,33	175,46	32,75	949,7	798,7
<b>9.08.2017</b>	0	23,51	176,75	23,51	947,1	868,4
	6	23,51	176,75	17,53	947,1	903,1
	15	23,51	176,75	8,58	947,1	936,5
	20	23,51	176,75	3,71	947,1	945,1
	25	23,51	176,75	2,0	947,1	946,5
	30	23,51	176,75	6,65	947,1	940,7
	40	23,51	176,75	16,57	947,1	907,7
	50	23,51	176,75	26,55	947,1	847,2
<b>11.08.2017</b>	0	24,1	177,01	24,1	946,8	864,2
	6	24,1	177,01	18,11	946,8	899,9
	15	24,1	177,01	9,16	946,8	934,7
	20	24,1	177,01	4,25	946,8	944,2
	25	24,1	177,01	1,53	946,8	946,4
	30	24,1	177,01	6,05	946,8	941,5
	40	24,1	177,01	15,97	946,8	910,2
	50	24,1	177,01	25,95	946,8	851,3
<b>24.08.2017</b>	0	28,3	178,9	28,3	944,2	831,4
	6	28,3	178,9	22,3	944,2	873,6
	15	28,3	178,9	13,3	944,2	918,9
	20	28,3	178,9	8,31	944,2	934,3
	30	28,3	178,9	1,78	944,2	943,8
	40	28,3	178,9	11,72	944,2	924,6
	50	28,3	178,9	21,71	944,2	877,2

**Çizelge Ek3.1:** Solar Spectrum Calculator programı kullanılarak Beytepe Güneş Evi için bulunan teorik ışınım değerleri (devam ediyor)

	<b>Eğim açısı (°)</b>	<b>Zenith açısı (°)</b>	<b>Azimuth açısı (°)</b>	<b>Geliş açısı (°)</b>	<b>G<sub>direkt</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>G<sub>panel</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>11.09.2017</b>	<b>0</b>	34,67	181,53	34,67	938,2	771,6
	<b>6</b>	34,67	181,53	28,68	938,2	823,1
	<b>15</b>	34,67	181,53	19,68	938,2	883,4
	<b>20</b>	34,67	181,53	14,69	938,2	907,5
	<b>30</b>	34,67	181,53	4,74	938,2	935
	<b>35</b>	34,67	181,53	0,93	938,2	938,1
	<b>40</b>	34,67	181,53	5,41	938,2	934
	<b>50</b>	34,67	181,53	15,36	938,2	904,7
<b>18.09.2017</b>	<b>0</b>	37,38	182,46	37,38	934,4	742,4
	<b>6</b>	37,38	182,46	31,39	934,4	797,6
	<b>15</b>	37,38	182,46	22,4	934,4	863,8
	<b>20</b>	37,38	182,46	17,42	934,4	891,5
	<b>30</b>	37,38	182,46	7,51	934,4	926,3
	<b>40</b>	37,38	182,46	3,04	934,4	933
	<b>50</b>	37,38	182,46	12,73	934,4	911,4
	<b>27.09.2017</b>	<b>0</b>	40,91	183,49	40,91	928
<b>6</b>		40,91	183,49	34,92	928	760,9
<b>15</b>		40,91	183,49	25,95	928	834,5
<b>20</b>		40,91	183,49	20,98	928	866,5
<b>30</b>		40,91	183,49	11,09	928	910,7
<b>40</b>		40,91	183,49	2,44	928	927,2
<b>50</b>		40,91	183,49	9,42	928	915,5
<b>4.10.2017</b>		<b>0</b>	43,82	184,15	43,82	921,3
	<b>6</b>	43,82	184,15	37,84	921,3	727,6
	<b>15</b>	43,82	184,15	28,87	921,3	806,8
	<b>20</b>	43,82	184,15	23,91	921,3	842,3
	<b>30</b>	43,82	184,15	14,04	921,3	893,8
	<b>40</b>	43,82	184,15	4,72	921,3	918,2
	<b>45</b>	43,82	184,15	3,13	921,3	919,9
	<b>50</b>	43,82	184,15	6,88	921,3	914,7
<b>11.10.2017</b>	<b>0</b>	46,51	184,6	46,51	914,1	629,2
	<b>6</b>	46,51	184,6	40,53	914,1	694,8
	<b>15</b>	46,51	184,6	31,57	914,1	778,8
	<b>20</b>	46,51	184,6	26,61	914,1	817,3
	<b>30</b>	46,51	184,6	16,74	914,1	875,4
	<b>40</b>	46,51	184,6	7,23	914,1	906,8
	<b>50</b>	46,51	184,6	4,9	914,1	910,8

**Çizelge Ek3.1:** Solar Spectrum Calculator programı kullanılarak Beytepe Güneş Evi için bulunan teorik ışınım değerleri (devam ediyor)

	<b>Eğim açısı (°)</b>	<b>Zenith açısı (°)</b>	<b>Azimuth açısı (°)</b>	<b>Geliş açısı (°)</b>	<b>G<sub>direkt</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>G<sub>panel</sub> (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>18.10.2017</b>	<b>0</b>	49,11	184,89	49,11	905,9	593
	<b>6</b>	49,11	184,89	43,13	905,9	661,1
	<b>15</b>	49,11	184,89	34,18	905,9	749,4
	<b>20</b>	49,11	184,89	29,22	905,9	790,6
	<b>30</b>	49,11	184,89	19,35	905,9	854,7
	<b>40</b>	49,11	184,89	9,73	905,9	892,8
	<b>50</b>	49,11	184,89	3,82	905,9	903,8
<b>3.07.2018</b>	<b>0</b>	16,22	176,28	16,22	950,6	912,8
	<b>6</b>	16,22	176,28	10,24	950,6	935,4
	<b>15</b>	16,22	176,28	1,58	950,6	950,2
	<b>20</b>	16,22	176,28	3,95	950,6	948,3
	<b>30</b>	16,22	176,28	13,85	950,6	922,9
	<b>40</b>	16,22	176,28	23,83	950,6	869,5
	<b>50</b>	16,22	176,28	33,83	950,6	789,7
<b>13.07.2018</b>	<b>0</b>	17,48	175,41	17,48	949,6	905,7
	<b>6</b>	17,48	175,41	11,51	949,6	930,5
	<b>15</b>	17,48	175,41	2,79	949,6	948,5
	<b>20</b>	17,48	175,41	2,92	949,6	948,4
	<b>30</b>	17,48	175,41	12,65	949,6	926,6
	<b>40</b>	17,48	175,41	22,61	949,6	876,6
	<b>50</b>	17,48	175,41	32,6	949,6	800
<b>17.07.2018</b>	<b>0</b>	18,16	175,29	18,16	949,2	902
	<b>6</b>	18,16	175,29	12,19	949,2	927,9
	<b>15</b>	18,16	175,29	3,43	949,2	947,5
	<b>20</b>	18,16	175,29	2,4	949,2	948,4
	<b>30</b>	18,16	175,29	11,99	949,2	928,5
	<b>40</b>	18,16	175,29	21,95	949,2	880,4
	<b>50</b>	18,16	175,29	31,93	949,2	805,6
<b>30.07.2018</b>	<b>0</b>	20,96	175,76	20,96	948	885,3
	<b>6</b>	20,96	175,76	14,98	948	915,8
	<b>15</b>	20,96	175,76	6,1	948	942,7
	<b>20</b>	20,96	175,76	1,77	948	947,6
	<b>30</b>	20,96	175,76	9,22	948	935,8
	<b>40</b>	20,96	175,76	19,15	948	895,6
	<b>50</b>	20,96	175,76	29,13	948	828,1

#### EK4: 25.07.2018 Tarihli Toz Taşınım Haritası

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından her gün için toz taşınım tahmini yapılmaktadır [101]. Yağmur ve rüzgar ile panel üzerinde toz birikimi olabileceği Bölüm 2.2’de detaylı açıklanmıştır. Temmuz 2018 yağışlı bir ay olduğu için, Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yapılan toz taşınım grafikleri takip edilmiştir.

Toz taşınım grafiğinde, sırasıyla 0-50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  toz taşınımı iyi, 51-100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  toz taşınımı orta, 101-260  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  toz taşınımı hassas, 261-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  toz taşınımı sağlıklı, 401-520  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  toz taşınımı kötü ve 522  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ’ten fazla toz taşınımı tehlikeli olarak sınıflandırılmaktadır.

Temmuz 2018 verileri alımı sırasında, tahminlerde, toz taşınım yoğunluğu 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ’ten fazla olan tek gün için grafik Şekil Ek4.1 verilmektedir.



Şekil Ek4.1: 25 Temmuz 2018 toz taşınım grafiği [101]



# SOILING EFFECT OF MINI PV MODULES FOR DIFFERENT TILT ANGLES

G. GENÇ<sup>1</sup>, A. ERAY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe University, Renewable Energy Research Center-YETAM, Beytepe, Ankara-TURKEY

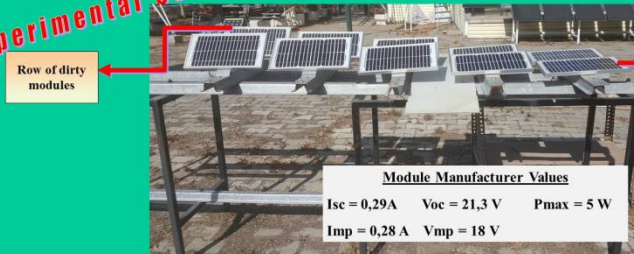
<sup>2</sup> Hacettepe University, Faculty of Eng. Dept. of Physics Eng., Beytepe, Ankara-TURKEY



## Aim and Scope

- To investigate of tilt angle on the dust accumulation for PV modules
- To investigate of rain effect on PV modules

## Experimental Setup



### Module Manufacturer Values

Isc = 0,29A    Voc = 21,3 V    Pmax = 5 W  
 Imp = 0,28 A    Vmp = 18 V

PV soiling test system has been constructed at Solar House Garden in Hacettepe University, in order to investigate the effect of tilt angle on the dust accumulation. In the system, ten mini PV modules, which had the same name plate and rating, have been mounted in two rows on an open rack system, for five different tilt angles ranging 6° to 50°. Before every measurement, the first row has been cleaned regularly which labeled as "cleaned modules" whereas second row which is never cleaned manually and labeled as "soiled modules".

Since the short circuit current ( $I_{sc}$ ) of the PV module is proportional to the incident irradiance, and due to that PV module becomes soiled the solar radiation reaching the module decreases, the effect of soiling can be determined by comparing the  $I_{sc}$  data of the soiled and cleaned modules. All measurements have been done under clear sky and at noon and after the measurement of irradiance, temperature and the ISC data of modules, each  $I_{sc}$  values were translated to 1000W/m<sup>2</sup> and 25°C.

➤ In order to compare PV module performance and to eliminate the effect of temperature and radiation, it is necessary to translate the measured data using following equation (IEC Standards):

$$I_{sc}(STC) = \frac{I_{measured}}{1 + \alpha(T_{measured} - 25)} \times 1000$$

➤ In order to determine the effect of soiling,  $I_{sc}$  datas of soiled and cleaned modules are compared. To do this, soiling loss can be defined as follow:

$$Soiling\ Loss = \frac{I_{sc, cleaned} - I_{sc, soiled}}{I_{sc, cleaned}}$$

## References

- [1] Syed A.M. Said, Husam M. Wadwil. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance. Solar Energy 107 (2014) 328-337.
- [2] Shikhar Anwar Siddiqui, Ahal Kumar Singh, Mior Maarof Mior Mokhtar, Mohammed A. Bou-Rabee. Influence of dirt accumulation on performance of PV panels. Energy Procedia, Volume 50 (2014) 50-56.
- [3] Cano Jose Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling. Arizona State University, August, 2011.
- [4] A. J. Anderson. Photovoltaic Translation Equations: A New Approach Final Subcontract Report, National Renewable Energy Laboratory, January 1996
- [5] Leonardo Micheli, Matthew Miller, Sarah Kurtz. Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, 2016.
- [6] Baodong Xu, Kai Ni, Yihua He, Jikai Si, Haiqiang Wen, Dongsheng Yu. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. Energy Conversion and Management 148 (2017) 100-109.

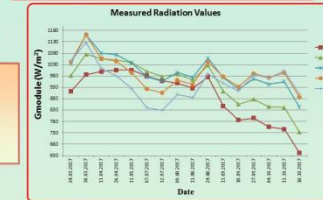
## Results

### ➤ Effect of Tilt Angle



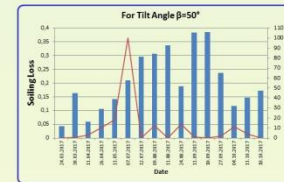
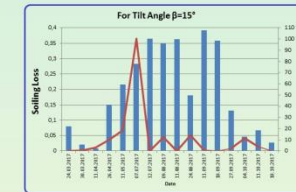
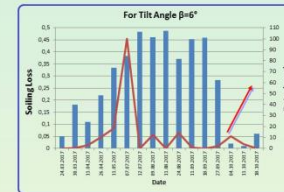
### PV Light House Interface

INPUTS		Extraterrestrial spectrum:	
Date and sidereal time:	Year: 2018, Hour: 12, Month: 3, Minute: 0, Day: 28, Second: 0	Incident spectrum:	AM0
Module location:	Latitude: 39, Longitude: 32	Earth-Sun factor:	1,006
Module orientation:	Tilt angle: 0, Azimuth angle: 180	Atmospheric inputs:	
		Transmission model:	SPECTRAL3 (BIPOL)
		Atmospheric pressure:	1013,25 mb
		Humidity at 300 mm:	0,004
		Precipitable water vapour:	1,4168 cm
		Ozone:	0,3438 atm-cm
		Aerosols:	0,1



- Optimum tilt angle value changes with the season.
- Maximum value of radiation has been observed at the optimum tilt angle.

### ➤ Effect of Rain



- For rainy days, there is a decrease in soiling loss.
- In the absence of rain, there is an increase in soiling loss.
- In spite of the rain, the increase of the soiling loss can be explain by dusty rain.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Gözde GENÇ

Doğum yeri: Ankara

Medeni hali: Bekar

E – post: [gencgozdee@gmail.com](mailto:gencgozdee@gmail.com)

Adresi: İnönü Mahallesi, 1710. Cadde, 59 Nolu Site, No:7 Batıkent, Yenimahalle/ANKARA

### Eğitim

Lise: Esenevler Anadolu Lisesi (2005-2009)

Lisans: Hacettepe Üniversitesi (2009-2014)

### Yabancı Dil ve Düzeyi:

İngilizce, çok iyi

(YDS: 80,00 (04.09.2016); TOEFL IBT: 73 (28.02.2015))

Almanca, başlangıç düzeyi

### İş Deneyimi:

Kalite Güvence Mühendisi-Ortana Elektronik Yazılım Taahhüt San. ve Tic. A.Ş. (Aralık 2016-...)

Kalite Mühendisi-MZD Savunma ve Mekatronik Sistemleri Ltd. Şti.

(Ocak 2016-Kasım 2016)

**Deneyim Alanları:** Yenilenebilir enerji, ince film teknolojisi

**Tezden Üretilmiş Projeler ve bütçeleri : -**

**Tezden Üretilmiş Yayınlar : -**

**Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar:**

Soiling Effect of Mini PV Modules For Different Tilt Angles, PVCON 2018, 4-6 July 2018, METU, Ankara



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
Temiz Tükenmez Enerjiler ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 26/09/2018

Tez Başlığı / Konusu: Fotovoltaik Panellerde Gölge ve Toz Etkisinin Analizi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 81 sayfalık kısmına ilişkin, 26/09/2018 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: GÖZDE GENÇ  
Öğrenci No: N14126973  
Anabilim Dalı: TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER  
Programı:  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

26.09.2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Aynur ERAY

(Unvan, Ad Soyad, İmza)