

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANA BİLİM DALI



ŞEBEKEYE BAĞLI BİR FOTOVOLTAİK TESİSİN  
TERMODİNAMİK, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Doktora Tezi

Seyed Hamed POUR RAHMATI KHALEJAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Vedat KESKİN

SAMSUN  
2022

## TEZ KABUL VE ONAYI

Seyed Hamed POUR RAHMATI KHALEJAN tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Vedat KESKİN danışmanlığında hazırlanan “Şebekeye Bağlı Bir Fotovoltaik Tesisinin Termodinamik, Enerji ve Ekserji Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 14.3.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Recep TAPRAMAZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Vedat KESKİN Samsun Üniversitesi Pilotaj Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Onur ŞAHİN Sinop Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Gökhan KAŞTAŞ Samsun Üniversitesi Uçak Bakım ve Onarım Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Prof. Dr. Gürkan ALP KAĞAN GÜRDİL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Tarım Makineleri Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY  
... / ... / ...  
Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet  (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır

04/ 04/ 2022

Syed Hamed

POUR RAHMATI KHALEJAN

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı:** Şebekeye Bağlı Bir Fotovoltaik Tesisinin Termodinamik, Enerji ve Ekserji Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 31.03.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 5

Tek kaynak oranı : % 3 çıkmıştır.

04/ 04/ 2022

Dr. Öğr. Üyesi Vedat KESKİN

## ÖZET

### ŞEBEKEYE BAĞLI BİR FOTOVOLTAİK TESİSİN TERMODİNAMİK, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Seyed Hamed POUR RAHMATI KHALEJAN  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Fizik Ana Bilim Dalı  
Doktora, Şubat/2022  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Vedat KESKİN

Bu çalışmada, şebekeye bağlı bir fotovoltaik (FV) güç santralının enerji verimliliği ve ekserji analizi, yani üretilen faydalı enerji 12 aylık veriler üzerinden Güneş ekserji modelleri karşılaştırılarak yapılmıştır. Hesaplamalar ve değerlendirmeler bilinen ekserji modelleri olan Petela, Spanner ve Parrott tarafından önerilen Güneş ekserji modelleri için üretilen Güneş ekserjisi- gelen Güneş radyasyon enerjisi oranının ortalaması hesaplanmış ve fotovoltaik ekserji verimliliği analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamaların sonuçları, Petela ve Spanner'ın modeline bağlı olarak Samsun bölgesi için ortalama Güneş ekserjisi- gelen Güneş radyasyon enerjisi oranının 0.93 olduğunu göstermektedir. Parrott modeli için oran 0.99 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, enerji verimliliğinin %6,33 ile %9,12 aralığında olduğunu doğrulamaktadır. Parrott'un modeline ilişkin FV ekserji verimliliğinin 12 ayda %4.97 ile %7.30 arasında değiştiği görülürken, Petela ve Spanner'ın modelinde %5.33'ten %7.82'ye değişmektedir. Ayrıca, özel bir durum olan bu şebekenin bağlı olduğu trafo binasının yarattığı gölgelenmenin neden olduğu etkiler üzerinden ekserji verimi ve termal ekserji üzerindeki etkileri 12 ay boyunca araştırılmıştır. Ek olarak, FV güç sistemlerinin termal ekserji ve ekserji verimi Güneş hücre sıcaklığından olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bir yıl boyunca ortalama %3,11 olan gölgeleme oranı, termal ekserjide yaklaşık %23,32 artışa ve bir yıl içinde güç dönüşüm verimliliğinde yaklaşık %4,88 ve ekserji verimliliğinde yaklaşık %13,72 oranında kayba neden olduğu hesaplanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Enerji verimliliği, Elektriksel ekserji, Gölgeleme etkisi, Termal ekserji, PV ekserji verimliliği, Güneş ekserji modelleri, FV dizisi.

## ABSTRACT

### THERMODYNAMIC, ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

Seyed Hamed POUR RAHMATI KHALEJAN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Physics

Ph.D., February/2022

Supervisor: Assist.Prof.Dr. Vedat KESKİN

In this study, energy efficiency and the analysis of exergy of a grid-connected photovoltaic (PV) power plant was calculated and discussed by comparing solar exergy models on the data collected from a PV plant for 12 months. Calculations were carried out using solar exergy models proposed by Petela, Spanner and Parrott, the average solar exergy production vs. incoming solar radiation energy ratio were calculated, and the PV exergy efficiency was analysed. The results indicate that the average solar exergy production vs. incoming solar radiation energy ratio calculated using Petela and Spanner Models for the Samsun region was 0.93. The ratio for Parrott's model was calculated to be 0.99. The results confirm that the energy efficiency is in the range of 6.33 and 9.12%. While PV exergy efficiency related to Parrott's model is seen to vary between 4.97% and 7.30% during 12 months, in Petela's and Spanner's model it changes from 5.33% to 7.82%. In addition, as a special case for the PV plant under investigation, the effects of shading caused transformer building on this grid-connected were investigated on the exergy efficiency and thermal exergy for 12 months. In addition, thermal exergy and exergy efficiency of PV power systems were negatively affected by the solar cell temperature. It has been calculated that the average shading ratio of 3.11% over a year causes an increase of approximately 23.32% in thermal exergy and a loss of 4.88% in power conversion efficiency and approximately 13.72% in exergy efficiency in a year.

**Keywords:** Energy efficiency, Electrical exergy, Shading effect, Thermal exergy, PV exergy efficiency, Solar exergy models, PV array.

# İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI .....	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
TABLolar DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı .....	1
1.2. Literatür Taraması .....	2
1.2.1. Güneş Ekserjisi .....	2
1.2.2. Gölgeleme Etkisi .....	3
1.2.3. Termal Ekserji .....	4
1.2.4. Enerji ve Ekserji Verimliliği .....	4
<b>2. KURUMSAL TEMELLER .....</b>	<b>7</b>
2.1. Güneş ve Güneş Enerji Potansiyeli .....	7
2.1.1. Dünyada Güneş Enerji Potansiyeli .....	9
2.1.2. Türkiye’de Güneş Enerji Haritası .....	10
2.2. Güneş FV Sistemleri .....	10
2.3. Güneş Hücreleri .....	11
2.3.1. Monokristal Silisyum FV Hücreleri .....	14
2.3.2. Polikristal Silisyum FV Güneş Hücresi .....	15
2.3.3. İnce Film Silisyum FV Güneş Hücresi .....	16
2.4. FV Sisteminin Elemanları .....	16
2.4.1. FV Güç Sistem Elemanlarının Yapıları ve Görevleri .....	17
2.4.2. Hibrit Sistemi .....	20
2.5. FV Sistemlerini Etkileyen Çevre Faktörleri .....	20
2.6. FV Sistemlerinin Optimizasyonu .....	23
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>24</b>
3.1. Materyal .....	24
3.2. Yöntem .....	25
3.3. Termodinamik Kanunları .....	27
3.4. FV dönüşümün termodinamiği .....	29
3.4.1. Güneş Radyasyonunun Enerjisi ve Ekserjisi .....	30
3.4.2. FV Ekserji .....	34
3.1. FV Enerji ve Ekserji Verimliliği .....	35
3.1.1. FV Enerji Verimliliği .....	35

3.1.2. FV Ekserji Verimliliği .....	35
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>38</b>
4.1. Çevresel Parametrelerinin Ölçümü.....	39
4.1.1. Güneş Radyasyonu .....	39
4.1.2. Rüzgâr Hızı .....	40
4.1.3. Ortam Sıcaklığı .....	41
4.1.4. Nem Oranı .....	41
4.2. Farklı Güneş Ekserji Yöntemler' ile, FV Sistemin Ekserji Ölçümü .....	41
4.3. Güneş Radyasyonuna Bağlı Olarak Güneş Ekserji Modellerin Değişimi.....	42
4.3.1. Farklı Aylar İçin Güneş ve Elektriksel Ekserji Değerlerinin Değişimi ....	43
4.3.2. Farklı Aylar İçin Enerji ve Ekserji Verimliklerinin Değişimi .....	44
4.4. Farklı Gölgeleme Oranlarında FV Sisteminin Ekserji Ölçümü .....	46
4.4.1. Hücre Sıcaklığı Ölçümleri .....	46
4.4.2. Elektrik Ekserji Ölçümü .....	47
4.4.3. Termal Ekserji Ölçümü.....	49
4.4.1. Enerji ve Ekserji Verimliklerinin Ölçümü.....	50
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	<b>58</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b><i>A</i></b>	: Yüzey ( $m^2$ )
<b><i>AM</i></b>	: Hava kütlesi
<b><i>amb</i></b>	: Ortam
<b><i>DC</i></b>	: Doğru Akım
<b><i>Es</i></b>	: Güneş Enerjisi (W)
<b><i>Ex</i></b>	: Ekserji (W)
<b><i>FF</i></b>	: Form faktörü
<b><i>FV</i></b>	: Fotovoltaik
<b><i>h</i></b>	: Planck sabiti ( $6.625 \times 10^{-34}$ Js)
<b><i>hc</i></b>	: Konvektif ısı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ )
<b><i>Im</i></b>	: Maksimum çıkış akım (A)
<b><i>Is</i></b>	: Güneş ışınlamı ( $W/m^2$ )
<b><i>Isc</i></b>	: Kısa devre akımı (A)
<b><i>P</i></b>	: Güç (W)
<b><i>Parr</i></b>	: Parrott
<b><i>Pet</i></b>	: Petela
<b><i>Q</i></b>	: Isı (J)
<b><i>RD</i></b>	: Dünya yarı çap (m)
<b><i>Rs</i></b>	: Güneş yarı çap (m)
<b><i>Sgen</i></b>	: Entropi üretimi
<b><i>Sh-Array</i></b>	: Gölgeden etkilenen dizi
<b><i>Span</i></b>	: Spanner
<b><i>T</i></b>	: Sıcaklık ( $^0K$ )
<b><i>USh-Array</i></b>	: Gölgeden etkilenmeyen dizi
<b><i>v</i></b>	: Rüzgar hızı (m/s)
<b><i>V</i></b>	: Voltaj (V)
<b><i>Vm</i></b>	: Maksimum güçte gerilim (V)
<b><i>Voc</i></b>	: Açık devre Voltajı (V)
<b><i>W</i></b>	: İş (J)
<b><math>\Phi</math></b>	: Güneş potansiyel
<b><math>\sigma</math></b>	: Stefan's Boltzmann sabiti ( $W/m^2K^4$ )

- $\Psi$**  : Ekserji verimliliği  
 **$\eta$**  : enerji verimliliği (%)  
 **$\lambda$**  : Dalga boyutu (m)  
 **$\nu$**  : Dalga boyutu frekansı (Hertz, Hz)



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Güneşin içyapısı.....	9
Şekil 2.2. Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyel Atlası .....	10
Şekil 2.3. FV hücrelerinin çalışmasının gösterimi .....	13
Şekil 2.4. Basit bir çalışan Güneş hücresinin şeması.....	14
Şekil 2.5. Monokristal silisyum hücrenin görünüşü.....	15
Şekil 2.6. Polikristal silisyum paneli.....	15
Şekil 2.7. İnce film silisyum hücresi.....	16
Şekil 2.8. Özel amaçlı FV güç üretim sisteminin elemanları.....	17
Şekil 2.9. Şebekeye bağlı FV güç üretim sisteminin elemanları .....	17
Şekil 2.10. Bir FV güç sisteminde panellerin seri ve paralel bağlanması örneği.....	18
Şekil 3.1. Samsun bölgesinde kurulu olan FV santrali .....	24
Şekil 3.2. Panellerde oluşan gölgeli alanın aylara ve günlere bağlı olarak değişimleri .....	26
Şekil 3.3. Şekil 3.3. Bir FV sisteminde enerji alış-verişini gösteren döngüsel makine.. .....	30
Şekil 3.4. Parrot ekserji denkleminin esas aldığı Güneş-Dünya konisi.....	33
Şekil 4.1. Bir yıl boyunca Güneş radyasyonunun yoğunluğu.....	40
Şekil 4.2. Bir yıl boyunca FV santralının kurulu olduğu bölgede rüzgâr hızı .....	40
Şekil 4.3. Bir yıl boyunca FV santralının kurulu olduğu bölgede nem oranı .....	41
Şekil 4.4. Farklı aylar için Güneş radyasyonunun Güneş ekserji modelleri üzerindeki etkisi .....	43
Şekil 4.5. Bir yıllık elektriksel ekserji ve Güneş ekserji modelleri.....	43
Şekil 4.6. 12 ay boyunca Spanner, Petela ve Parrott'un modeliyle ilgili enerji ve ekserji verimlerinin değişimi .....	45
Şekil 4.7 Yıl boyunca Spanner, Petela ve Parrott'un modeliyle ilgili ekserji verimlerinin değişimi ve karşılaştırılması.....	45
Şekil 4.8. USh-Array ve Sh-Array hücre sıcaklıklarının ortam sıcaklığında değişimi .....	47
Şekil 4.9. USh-Array ve gölgelenmeden etkilenen Sh-Array'in bir yıl boyunca elektrik ekserji değişimi .....	48

Şekil 4.10. USh-Array ve gölgelenmeden etkilenen Sh-Array'in termal ekserji değişimi.....	50
Şekil 4.11. Sh-Array ve USh-Array koşulları için enerji ve ekserji verimliliğinin değişimi.....	51
Şekil 4.12. Sh-Array ve USh-Array'in bir yıl boyunca kayıp enerji ve ekserji verimlilik oranı.....	52



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. FV malzemelerinin enerji bant aralığı .....	12
Tablo 2.2. FV güç sistemlerinde enerji kayıplarına neden olan faktörler.....	22
Tablo 3.1. Santrale ait Modüllerin elektriksel değerleri .....	25
Tablo 3.2. Santrale ait modüllerin özellikleri.....	25
Tablo 4.1. Meteoroloji verileri ve anlık güç değerleri.....	39
Tablo 4.2. Farklı aylar için Güneş radyasyonunun Güneş ekserji modelleri üzerindeki etkisi. ....	42
Tablo 4.3. FV sistemi farklı aylar için enerji ve ekserji verimlerinin değişimi .....	44
Tablo 4.4. USh-Array ve Sh-Array dizilerin hücre sıcaklıklarının bir yıl boyunca farklı gölgeleme oranlarıyla değişimi .....	46
Tablo 4.5. USh-Array ve Sh-Array'in elektrik ekserji değerleri .....	48
Tablo 4.6. USh-Array ve Sh-Array'in thermal ekserji değişimi. ....	49
Tablo 4.7. Sh-Array ve USh-Array koşulları için enerji ve ekserji verimleri.....	50

# 1. GİRİŞ

Dünyamızda kullanılan enerjinin büyük kısmı kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan fosil kaynaklı enerjinin siyasi, ekonomik ve çevresel sorunları, yenilenebilir enerji kaynakların kullanılmasını son yıllarda daha popüler hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji, kendini hızla yenileyen tükenmeyen ve temiz olan enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Kullanılabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarından ve önde gelen birisi Güneşten alınan ışık enerjisidir. Bu ışık, fotovoltaik (FV) Güneş pilleri yoluyla temiz elektriğe dönüştürülebilir. Dünyamızın birincil yenilenebilir enerji kaynağı olan Güneşe dayalı yenilenebilir enerji kaynakları en umut verici, temiz ve sınırsız olarak tanınmaktadır (Şahin et al, 2007). Elektrik üretimi için FV sistemlerin kullanımı 20. yüzyılın son çeyreğinde yani yetmişli yıllarında başlamıştır ve şu anda dünya çapında tesisi ve kullanımı hızla artmaktadır. Buna paralel olarak rüzgâr enerji sistemleri de artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Aslında birçok kuruluş bu sistemler yanında enerji depolama gibi tamamlayıcı donanımların birlikte kullanımı ile gelecekte ihtiyaç duydukları enerjiyi kendileri üretecekler ve enerji teminini oldukça ucuza getireceklerdir.

## 1.1. Tezin Amacı

Fotovoltaik (FV) Güneş güç sistemlerinin tasarımı, kurulumu ve optimum verimli çalışması için kurulduğu bölgenin Güneşten maksimum düzeyde elde edilebilecek enerji potansiyelinin (maksimum Güneş ekserjisinin) kurulduğu yerde aylara bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca gölgeleme, tozlanma, nem oranı gibi çevresel faktörler dikkate alınarak Güneşlenme ve termal ısı kayıplarının araştırılması sistemin verimli çalışması için önemlidir. Bu tez çalışmasında ilk olarak Petela, Spanner ve Parrott'un Güneş ekserji yöntemlerini ayrı ayrı kullanarak Samsun bölgesi için Güneş ekserjisi hesaplanmış ve üç yöntem birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bunun ardından kullanılan Güneş ekserji modelleri kullanılarak Samsun hava koşullarında şebekeye bağlı bir Güneş enerjisi santralının enerji ve ekserji verimliliği 12 ay için hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. En son olarak üretilen enerji ve ekserji verimliliği açısından radyasyon ekserjisi üzerindeki gölgeleme etkisi analiz edilmiştir. Radyasyon ekserjisi ve FV performans analizi gerçek meteoroloji olayları, çevre koşulları ve parametreler (rüzgâr hızı, hücre sıcaklığı, ortalama gölgeleme oranı, ortalama Güneşlenme süresi, ortam sıcaklığı, FV alanı...) kullanılarak yapılmıştır.

## 1.2. Literatür Taraması

Bu bölümde, Güneş radyasyon ekserjisi, FV Güneş güç sistemlerin performansını etkileyen en önemli çevresel faktörlerden tam ve kısmi gölgelenme etkisi, sistemlerinin performans analizinde önemli olan termal ekserji ve son olarak FV enerji ve ekserji verimliliği üzerine geçmiş tarihlerde yapılan çalışmalarla ilgili literatür taraması yapılmıştır.

### 1.2.1. Güneş Ekserjisi

Güneş enerji sistemlerinin verim değerlendirmesinde çok önemli olan Güneş radyasyon ekserjisi ile ilgili teorik olarak birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar Petela (1964), Spanner (1964), Parrott (1978), Jeter (1981), Wurfel (2002), Zamfirescu and Dincer (2009), Alta et al. (2010), Hepbaşlı and Alsuhaibani (2014), Arslanoğlu (2016), Jamil and Bellos (2019), Khorasanizadeh and Sepehrnia (2020) tarafından makale halinde bilimsel dergilerde yayınlanmıştır.

Petela (1964), Güneş'ten yayılan ve Dünya'nın yüzeyine ulaşan radyasyonu dikkate alarak bu radyasyonun ekserjisini hesaplamak için bir formül türetmiştir. Bu formülde radyasyona maruz her iki yüzeyin sıcaklıkları temelinde bir ilişki önerdi. Petela ile aynı yıl, Spanner (1964) Güneş ekserjisinin ilgili güç sisteminin iş potansiyeline eşit olacağını öne sürdü. Daha sonra Parrott (1978), Güneşten gelen radyasyon için Dünyanın Güneş etrafındaki yörüngesindeki Güneş-Dünya arasında oluşan koninin tepe açısının yarısını ekleyerek Petela'nın önerdiği Güneş ekserji modelini geliştirdi. Jeter (1981) Spanner'ın çalışmasını farklı bir bakış açısıyla yani Carnot ısı motoru modelini Güneş radyasyonu ekserjisine uygulamıştır. Wurfel (2002) farklı Güneş panelleri üzerinde Güneş enerjisi dönüşümündeki termodinamik sınırlamaları tartışmış ve termal kayıpların azaltılmasıyla verimliliğin artırılacağı sonucuna varmıştır. Zamfirescu and Dincer (2009), çift kademeli bir termodinamik döngü ile iş üretmek amacıyla yeryüzüne ulaşan Güneş radyasyon ekserjisini incelemek için bir termodinamik model önermişler. Alta (2010), Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerindeki 152 meteoroloji istasyonunun Güneş radyasyon verilerini kullanarak aylık ortalama Güneş radyasyonu ekserjisini haritalandırmıştır. Bu çalışmada, bölgesel Güneş ışınımı ve hava sıcaklığı verilerini kullanarak Güneş ekserjisini ve Güneş ekserji/enerji oranının ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hepbaşlı and Alsuhaibani (2014), Güneş enerjisi ile ilgili uygulamalarda kullanılan Petela, Spanner ve Jeter'in Güneş ekserji modellerini incelemiş, Suudi Arabistan ve

Türkiye'nin bazı bölgeleri için Güneş ekserji değerlerini hesaplamışlardır ve bulunan değerlerin birbirlerine yakın olduğunu gözlemişlerdir. Arslanoğlu (2016), Türkiye'nin farklı illeri için günlük Güneş radyasyonu ekserjisinin tahmin etmek için üç farklı deneysel ve istatistiksel test yöntemi geliştirmiştir. Jamil and Bellos (2019) Hindistan'ın farklı şehirlerinde Güneş radyasyonu ekserji potansiyelinin deneysel olarak modellerini geliştirdiler. Bu çalışmada, doğrudan ve dağınık Güneş radyasyonunun ekserji verilerini Petela'nın Güneş ekserji modelini kullanılarak hesaplanmıştır. Khorasanizadeh and Sepehrnia (2020), İran'daki sekiz şehrin Güneş ve metroloji verilerini kullanarak, deneysel modelleri kullanarak Güneş ekserji potansiyelini incelemişlerdir.

İncelenen literatür çalışmalarından da görüldüğü gibi Petela (1964), Spanner (1964) ve Jeter (1981) gibi araştırmacıların tüm teorilerin sonuçlarının küçük farklar dışında birbirine yakın olduğu ve her birisinin duruma ve yere bağlı olarak doğru kabul edilebileceği sonucuna varmışlardır. Bunun yanı sıra, termodinamik sistemlerin ekserji verimliliğinin mühendislik hesaplamalarının çoğu, Petela ve Spanner'ın Güneş ekserji modellerine dayanmaktadır.

### **1.2.2. Gölgeleme Etkisi**

Son yıllarda gölgelemenin FV performansı üzerindeki etkisini incelemek için birçok enerji ve ekserji analizi yapılmıştır; Alonso et al. (2006), FV diziler üzerindeki gölgeleme etkilerinin simülasyonunu yapmışlardır. Çalışmalarında, gölgeleme alanı, dizinin uzunluğu ve gölgelenen hücre sayısının etkisi analiz edilmiştir. Martinez-Moreno et al. (2010), FV panellerindeki gölgeleme kayıplarını azaltmak için matematiksel bir model önermişlerdir. Alsayid et al. (2013), Matlab programını kullanarak farklı gölgeleme koşullarında FV panellerin durumlarının simülasyonunu yapmışlardır. Parlak (2014), kısmen gölgeli koşullar altında çalışan bir FV dizi sistemi için yeni bir maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi önermiştir. Khaing et al. (2014), kısmi gölgelemenin dört farklı Güneş FV panellerinin (polikristal, amorf, CdTe ve CIGS ince film) üzerinde etkilerini araştırmışlardır. Sathyanarayana et al. (2015), tam ve kısmi gölgelemenin FV panelinin performansı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Vijayalekshmy et al. (2016), kısmi gölgeleme kayıplarını azaltmak için FV modüllerinin toplam çapraz bağlantılı ara bağlantısı için yeni bir zikzak yapan panel dizisi şeması önermişler. Bayrak and Oztop (2017), FV panellerdeki gölgeleme oranı ve konumu gibi farklı parametreleri araştırmak için bir deney düzeneği

tasarlamışlardır. Gölgelemenin, FV sisteminin enerji ve ekserji verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve en önemli etkinin yatay gölgeleme durumunda meydana geldiği sonucuna varmışlardır. Madhanmohan et al. (2020), kısmi gölgeleme koşulları altında maksimum performans elde etmek için Çapraz Olarak Dağıtılmış Toplam Çapraz Bağlanmış (D-TCT) olarak bilinen yeni bir FV modül konfigürasyon modeli önermiştir. Bayrak and Oztop (2020), statik ve dinamik gölgelemenin FV panellerin termodinamik ve elektriksel performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Tarabsheh et al. (2021), iki adet tek kutuplu çift atışlı (SPDT) anahtar uygulayarak kısmen gölgeli FV panellerin verimliliğini araştırmışlardır.

### **1.2.3. Termal Ekserji**

Güneş radyasyonundan elektrik üretimi sırasında FV panel yüzeyinden ısı kaybı olarak ifade edilebilecek olan termal ekserji, FV panel sistemlerinin performans analizi olan ekserji ve ekserji verimliliğinin araştırılmasında anahtar parametrelerden biridir. Bir FV panel sisteminin termal ekserjisi, konvektif ısı transfer katsayısı, rüzgâr hızı, hücre sıcaklığı ve ortam sıcaklığı gibi çevresel parametrelere bağlıdır.

FV panel performansı üzerindeki termal etkilerin araştırılması birkaç araştırmacı tarafından yapılmıştır. Lakovidis et al. (2014), hava girdabı yoğunluğu ortalama ısı transfer katsayıları üzerindeki etkisini belirlemek için rüzgâr tüneli deneyleri yapmışlardır. Vassel and Iakovidis (2017), rüzgâr yönünün FV panel sistem performansı üzerindeki etkisini analiz etmişler ve FV panel dizisi sıralarının düzenlenmesi, hava girdabı yoğunluğunu önemli ölçüde etkileyebileceğinin sonucuna varmışlardır. Wu et al. (2017, 2018), bir FV panelindeki sıcaklık dağılımını araştırmak için rüzgâr tüneli deneyleri ve akışkanlar dinamiği simülasyonları gerçekleştirmişler ve bu çalışmanın sonuçları Ghabuzyan et al. (2020) tarafından kullanılmıştır. Dhimish (2020), yenilenebilir enerji modeli için performans oranı (Performance Ratio, PR) yöntemini kullanarak İngiltere'de üç bölgeye dağıtılan toplam 8000 adet FV panelinin performans oranını (PR) analiz etmiştir. Ghabuzyan et al. (2021), FV dizi performansı üzerindeki termal etkileri araştırmışlardır. Çalışmalarında, FV panel sisteminin elektrik çıktısı üzerindeki ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir.

### **1.2.4. Enerji ve Ekserji Verimliliği**

FV ve FV-T güç sistemlerinin enerji ve ekserji analizi (termodinamik analiz) birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır: Sahin et al. (2007), Joshi et al. (2009), Sarhaddi et al. (2010), Agrawal and Tiwari (2011), Akyuz et al. (2012), Yazdananahi et al. (2015), Sopian et al. (2019), Bayrak and Oztop. (2019) ve Maleki et al. (2020).

Sahin et al. (2007), Petela, Spanner ve Parrott tarafından oluşturulan ekserji modellerinden hareketle kendilerinin türettikleri ekserji modelini uygulayarak, Güneş FV hücrelerinin termodinamik özelliklerini incelemişler ve hesaplamalarında ekserji kayıplarını ve verimliliklerini değerlendirmişlerdir. Joshi et al. (2009) Güneş enerjisi sistemler için termodinamik teorilere dayalı bir metod, FV-T, (Fotovoltaik-Termal), oluşturmuşlar ve çalışmalarında, Hindistan'daki Yeni Delhi şehri için FV ve FV-T sistemlerinin termodinamik modellerini kullanarak ekserji ve performans analizi yapmışlardır. Sarhaddi et al. (2010) bir Güneş FV-T hava kolektörünün termal ve elektriksel parametrelerini hesaplamak için bir bilgisayar simülasyon programı geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, açık devre voltajı, kısa devre akımı, maksimum voltaj ve maksimum akım gibi bir FV-T hava kolektörünün elektriksel parametrelerini tahmin eden bir elektrik modeli önermişlerdir. Agrawal and Tiwari (2011), mikro kanallı ve tek kanallı FV-T modüllerin yıllık termal ve ekserji kazancı ve ekserji verimliliğini incelediler. Çalışmalarında, Hindistan'ın Bangalore, Jodhpur ve Yeni Delhi şehirlerinin farklı iklim koşullarında analiz edilip, karşılaştırılmıştır. Akyuz et al. (2012) Güneşten alınabilecek maksimum ekserji miktarını belirlemek için yeni bir bilgisayar hesaplama algoritması önermişlerdir. Çalışmalarında, sistemin ekserji verimliliğini formüle etmek için Türkiye'de Kurulu bir FV sisteminden elde edilen deneysel verileri kullanmışlar. Yazdanpanahi et al. (2015), bir boyutlu sabit termal model ve dört parametrelilik akım-voltaj modeli kullanarak ekserji kayıpları açısından ekserji verimliliğini analiz ederek bir FV-T hava kolektörünün termal ve elektrik performansı için bir denklem elde ettiler. Sopian et al. (2019), iki soğutma tekniği kullanarak Bangi, Malezya'da dış ortam koşullarında FV-T sistemlerinin elektriksel ve ekserji verimliliğini artırmak için deneysel ve hesaplamalı çalışmalar yaptılar. Çalışmaları sonucunda nano-sıvılarla soğutmanın ve Nano-PCM tabanlı nano-sıvı soğutmanın, su bazlı soğutma yöntemine göre daha verimli olduğunu bildirmişlerdir. Bayrak and Oztop (2019), Elazığ, Türkiye iklim koşullarında FV panellere farklı geometri parametreleri (uzunluk, diziler) uygulayarak enerji ve ekserji analizi gerçekleştirmişler. FV panellerde sıcaklığın homojen olarak dağılmadığı sonucuna

varmışlardır. Maleki et al. (2020), akışkanlar dinamiği yontemiyle Guneř işiniminin, soğutma suyunun akış hızı ve ortam sıcaklığının etkilerini FV hucreslerinin performans uzerine araştırdılar. alışmalarında, soğutmanın yuiksek ortam sıcaklıklarında daha verimli olduğu gozlemlediler. Ayrıca, suyun akış hızının artmasının yuiksek akış hızlarında etkisi olduğu belirlediler.



## 2. KURUMSAL TEMELLER

Türkiye’de son yıllarda rüzgâr ve Güneş enerji tesisi sayısı ve kapasitesi büyük oranda artmış, Güneş enerji sistemleri konusunda ciddi çalışmalar yapılmıştır. Güneş enerjisi çevre sorunlarına çözüm olabilecek temiz ve sınırsız enerji kaynaklarının başında gelmektedir, zira enerjide dışa büyük oranda bağımlı olan Türkiye’nin ihtiyacını karşılamanın en akılcı yolu yenilenebilir enerji kaynakları ve özellikle Güneş enerjisidir. Dolayısıyla Güneş enerji sistemleri hakkında bilimsel çalışmalar yapılması, maksimum ekserji yöntemlerinin belirlenmesi gerekli görünmektedir.

### 2.1. Güneş ve Güneş Enerji Potansiyeli

Güneş, Dünya için birincil enerji kaynağıdır. Güneşin çekirdek sıcaklığı yaklaşık 15,7 MK ve yüzey sıcaklığı 5800 K olarak hesaplanmıştır. Bu sıcaklığın ve dolayısıyla enerjinin kaynağı Güneşin çekirdeğinde süregelen füzyon reaksiyonudur, Şekil 2.1. Bu sıcaklıklarda Güneş radyasyonu Güneşten her yöne yaklaşık  $3,845 \times 10^{26}$  W güçte ışık, ısı ve yüksek enerjili radyasyon yayar. Dünya'ya ulaşan çoğunluğu ısı ve ışıktan oluşan radyasyon, paralel foton akışları olarak düşünülebilir.

Max Planck’ın siyah cisim ışıması teorisinden türetilen birim yüzey alandan yayılan sıcaklığa bağlı güç ifadesi alınarak Dünya yüzeyinde birim yüzey alana düşen Güneş radyasyon gücü bulunabilir.

$$P(T) = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

İfadede  $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>, Stefan-Boltzman sabiti ve T Kelvin biriminde sıcaklıktır. Güneşin korona sıcaklığı Güneşin durgun ve aktif dönemlerine bağlı olarak 5800 K ile 6300 K arasında değişmektedir. Dolayısıyla Güneşin birim yüzeyinden yayılan güç durgun zamanlarda  $P_A(5800) = 6.4169 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup> ile aktif zamanlarda  $P_A(6300) = 8.9334.4169 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Güneşin yarıçapı  $R_s = 6.9634 \times 10^8$  m yüzey alanı  $A_s = 4\pi R_s^2 = 6.0933 \times 10^{18}$  m<sup>2</sup> olacaktır. Buna göre Güneşin uzaya yaydığı toplam radyasyon gücü durgun ve aktif zamanlara bağlı olarak  $P_s(T) = A_s P_A(T)$  ifadesinden  $P_s(5800) = 3.9100 \times 10^{27}$  W ile  $P_s(6300) = 4.4434 \times 10^{27}$  W arasında değişmektedir. Uzaya yayılan astronomik ölçüdeki bu güçten Dünyanın birim yüzeyine ulaşan güç Güneş-Dünya arası yarıçaplı kürenin yüzey alanı ile Güneşin yüzey alanı oranından bulunabilir;

$$P_D(T_a) = \frac{R_S^2}{R_{S-D}^2} \sigma T_S^4 = 2.1666 \times 10^{-5} \times \sigma T_S^4 \quad (2.2)$$

Güneş-Dünya arası ortalama uzaklık (ortalama yörünge yarıçapı)  $R_{S-D} = 1.4960 \times 10^{11}$  m alınarak Dünyanın birim yüzey alanına ulaşan Güneş gücü, Güneşin durgun ve aktif zamanlarında  $P_D(5800) = 1390$  W/m<sup>2</sup> ile  $P_D(6300) = 1935$  W/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Uzun yıllar ortalaması olarak ölçülen güç 1367 W/m<sup>2</sup> olarak kabul edilmektedir. Bu güçlerden Dünyanın sıcaklığı da Denklem 1'den  $T \approx 395$  K ile  $T \approx 430$  K arasında ya da 2 oC ile 157 oC arasında değişmektedir. Bulunan değerler Dünyadaki çeşitli etkiler göz önünde bulundurularak ölçülen değerlere oldukça yakındır. Ayrıca, Dünyanın Güneşten aldığı toplam güç, Güneşe bakan tarafının bir disk görünümünde olduğu kabulü ile Güneşin durgun ve aktif zamanlarına bağlı olarak  $P_{D-T} = 1.7725 \times 10^{17}$  W ile  $P_{D-T} = 2.4674 \times 10^{17}$  W (~177 000 TW (~247 000 TW) ile arasındadır ki bu değer astronomik ölçülerdedir. Dünyanın toplam güç üretiminin son yıllarda yaklaşık 20 TW olduğu kabulü ile Dünyaya ulaşan toplam Güneş gücü Dünya güç üretiminin 10 000 katı civarındadır.

Global Güneş radyasyonu terimi, ışın radyasyonun toplamı olan, yeryüzüne ulaşan toplam Güneş radyasyonu için kullanılır. Doğrudan radyasyon olarak da bilinen ışın radyasyonu, dağılmadan veya atmosferik gazlar ve parçacıklarla etkileşime girmeden yeryüzüne ulaşır. Doğrudan radyasyon, belirli bir yere ulaşan yönlü radyasyondur; bu nedenle yansıma veya kırılma yoluyla dağılabilir. Dağılan radyasyon, atmosferik gazlar ve partiküller ile etkileşime girdikten sonra her yöne saçılır veya yeniden yayılır. Bulut kapsama alanı, toz parçacıkları ve kirletici gazların varlığı, ulaşan radyasyonu azaltır ve dağınmış radyasyonu artırır. Dünya atmosferinin hemen üzerinde, Güneşten gelen radyasyon gücü yaklaşık 1390 W/m<sup>2</sup> ile 1935 W/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Uzun yıllar ortalaması Güneş gücü  $P = 1367$  W/m<sup>2</sup> olarak kabul edilmektedir. Ancak atmosfere girdikten sonra saçılma ve dağılma nedeniyle bu değer azalmaktadır. Bu saçılmanın etkisi n indisi ile belirtilen hava kütlesi, (Air Mass, AMn) olarak tanımlanmaktadır. AM0 atmosfer dışı hava kütlesi değeridir. Dünya yüzeyine ulaşan Güneş radyasyonunun yoğunluğunu gösteren hava kütlesi ölçüsü yaklaşık ifade olan Denklem 2.3 ile tanımlanmaktadır.

$$AMn = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

Burada  $\theta$  zenite göre, yani Dünya yüzeyindeki herhangi bir noktadaki yarıçap

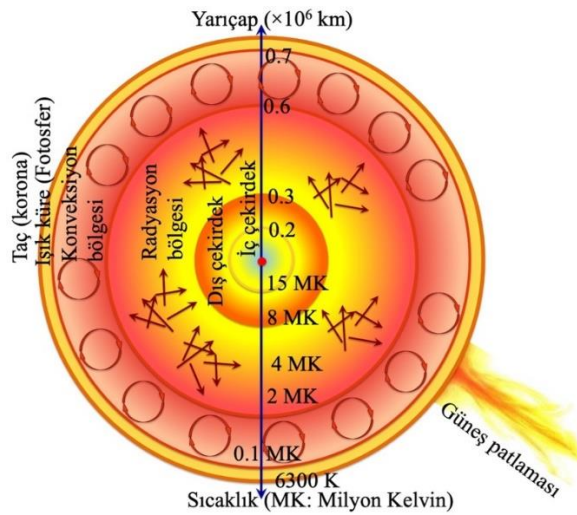
doğrultusuna göre Güneş radyasyonunun geliş açısıdır ( $\theta=0^\circ$  için  $AM_0=1$ , Güneş tam tepedeyken,  $\theta=48^\circ$  için  $AM_{1.5}$ ,  $\theta=60^\circ$  için  $AM_{2.0}$  olmaktadır). Hava kütle numarası, Dünya yüzeyinde her zaman bire eşit veya bir'den büyüktür. (Dünya yüzeyine ulaşan güç, örneğin  $1367 \text{ W/m}^2$  değerinin  $AM_n$  değerine bölünmesi ile bulunur,  $P_n = 1367/AM_n$ ).

Güneş radyasyonu, çalışmanın amacına göre farklı dalga boyu aralığına sahip elektromanyetik dalgalar ve farklı enerji miktarlarına sahip foton gazı, yani ikili yapısı (dalgaların ve parçacıkların doğası) olarak kabul edilebilir.

Bu nedenle, Güneş ışığının spektral bileşimi, verimli Güneş pillerinin tasarımında önemli bir husustur. Güneş radyasyonu dünya atmosferine ulaştığında, çoğunluğu uzaya geri döner, yeşil bitkiler bir kısmını fotosentez için emer, su kütlelerinin buharlaşmasına yardımcı olur ve bu da yağışla sonuçlanır, geri kalan Güneş radyasyonu maddeyle etkileşimi yoluyla kullanılabilir enerji haline gelir.

### 2.1.1. Dünyada Güneş Enerji Potansiyeli

Gezeganimiz Güneşten yaklaşık  $177000 \text{ TW}$  ile  $247000 \text{ TW}$  arasında güç almaktadır. Bir saniye içerisinde dünyaya gelen Güneş gücü değeri, Türkiye'nin yıllık enerji üretiminin 2020 yılı için  $100 \text{ GW}$  olduğundan Güneşten Türkiye'nin yüzey alanına düşen gücün  $16500$  ile  $231000$  katı arasında değişir. Hava kütlesi dikkate alındığında Güneş radyasyonu dünya yüzeyine  $1000 \text{ W/m}^2$  'lik bir değer ile ulaşmaktadır (Varınca ve Gönüllü, 2006).



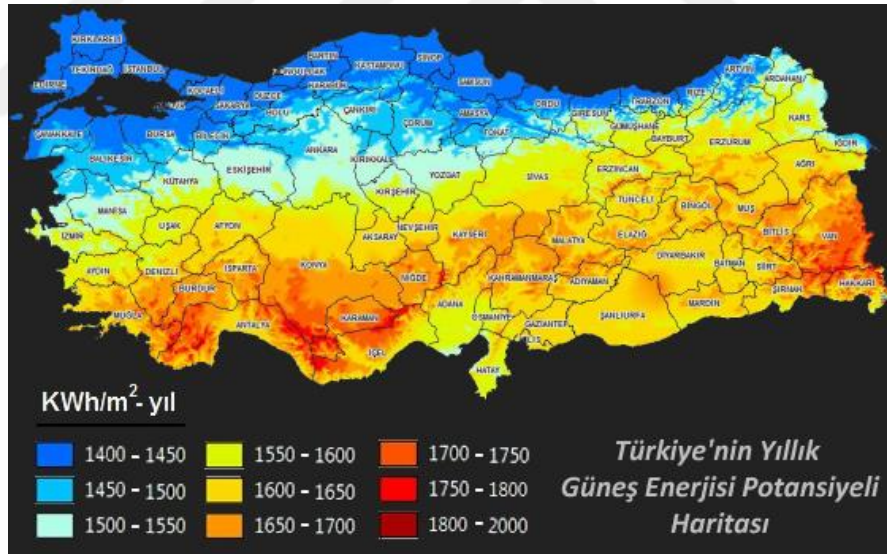
Şekil 2.1 Güneşin iç yapısı.

### 2.1.2. Türkiye’de Güneş Enerji Haritası

Türkiye coğrafi olarak konumu, 36° ile 42° kuzey enlemleri ile 26° ile 45° doğu boylamları arasında yer almaktadır. Meteoroloji genel müdürlüğünün sonuçlarına göre Türkiye için yıllık ortalama Güneş radyasyonu 1300 kWh/m<sup>2</sup> ve ortalama yıllık Güneşlenme süresi ise 2482 saattir (103 gün). Şekil 2.2 Türkiye'nin Güneş alan bölgelerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi en fazla Güneş alan bölgeler Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesidir. Karadeniz ve Marmara bölgeleri en az Güneş alan bölgeleridir.

### 2.2. Güneş FV Sistemleri

Fotovoltaik (FV) kelimesi iki kısma ayrılabilir; sırasıyla foto ve voltaik, ışık ve voltaj anlamına geliyor. FV, Güneş ışığından kaynaklanan elektrik voltajını ifade eder. Güneş kolektörleri, Güneş ışınımını emer ve onu elektrik gibi diğer enerji biçimlerine dönüştürür. Çeşitli FV güç sistemleri Güneş enerjisi kolektörleri olarak kabul edilebilir.



Şekil 2.2. Türkiye'nin Güneş Enerji haritası (Anonim, 2019)

Fotovoltaik Güneş güç pil teknolojisi, dünyadaki tüm insanlar için sınırsız ve ücretsiz olan Güneş ışınımını elektrik ve ısı enerjisine dönüştürmesi için hızla gelişen teknolojilerden biridir (Hepbasli, 2008). Güneşten elde edilen enerji kurutma, muhafaza, aydınlatma ve ısı gibi çeşitli alanlarda değerlendirilmektedir.

Güneş radyasyonu, çalışmanın amacına göre farklı dalga boyu aralığına sahip

elektromanyetik dalgalar ve farklı enerji miktarlarına sahip foton olarak kabul edilebilir

18. yüzyılda Güneş enerjisini elektriğe dönüştürmek için çeşitli araştırma ve çalışmalar yapılmıştır; 1839'da Alexander Becquerel'in ve ayrıca Fransız bilim adamı Charles Greeley Abbott'un Güneş enerjisiyle çalışan buhar makinesini geliştirmişlerdir (Williams, 1960). Kullandıkları teknik Güneş gücünü küçük bir bölgede toplama iken, bu tarihten sonra su ısıtmak için Güneş kolektörleri, büyük ölçekte güç üretimi için oluklu Güneş güç sistemleri ile Yoğunlaştırıcı Güneş Güç sistemleri olarak adlandırılan ve heliostat tabanlı CSP sistemleri yaygınlaşmıştır. Daha sonra yarı iletkenlerin bulunmasıyla bunlara fotovoltaiik (FV) Güneş güç sistemleri eklenmiştir.

### 2.3. Güneş Hücreleri

FV piller ya da Güneş hücreleri yarı iletken maddelerin elektrik özelliklerinden yararlanarak Güneş radyasyonunu elektrik enerjisine dönüştüren aygıttır. Üzereine Güneşin ışığı düştüğü zaman ışığın enerjisini FV etki yoluyla doğrudan elektriğe dönüştürdüğü için kullanımı kolay ve her ölçekte yapılabilen bir dönüştürücüdür. Çıktıdan belirli bir voltaj altında akım, yani elektrik güç verir.

Gelen ışık demeti içinde frekansları  $\nu$  ve enerjisi  $E = h\nu$  olan fotonlardan oluşmaktadır. İfadede  $h = 6.6256 \times 10^{-34}$  J s olan evrensel Planck sabitidir. Bu ifade dalgaboyu cinsinden,

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4)$$

olarak yazılır.  $c$  ışık hızıdır. Sadece bir elektron-boşluk çifti oluşturmak için yeterli enerjiye sahip fotonlar, yani yarı iletken bant aralığından ( $E_G$ ) daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar valans banttaki bir elektrona enerjisini aktararak enerji aralığını geçirir ve iletim bandına geçirir. Bu nedenle, Güneş radyasyonunun spektral bileşimi, verimli Güneş hücrelerin tasarımında önemli bir husustur. Valans banttan iletim bandına elektronun (negatif yük taşıyıcı) uyarılması sonunda valans bantta bir deşik (pozitif yük taşıyıcı, hole) bırakır ve bu olay elektron-deşik çifti üretimi olarak bilinir. Değerlik ve iletim bantlarının konumuna göre yarıiletkenler, doğrudan ve dolaylı bant aralığı olmak üzere iki türe ayrılır. Doğrudan bant aralığı durumunda, iletim ve değerlik bantlarının minimum ve maksimum enerji seviyeleri tam olarak aynı eksendedir, bu nedenle iletim bandına uyarım için sadece fotonların absorpsiyonu

gerekir. Tablo 2.1, FV güç üretiminde kullanılan önemli yarı iletkenlerin enerji bant aralığını vermektedir.

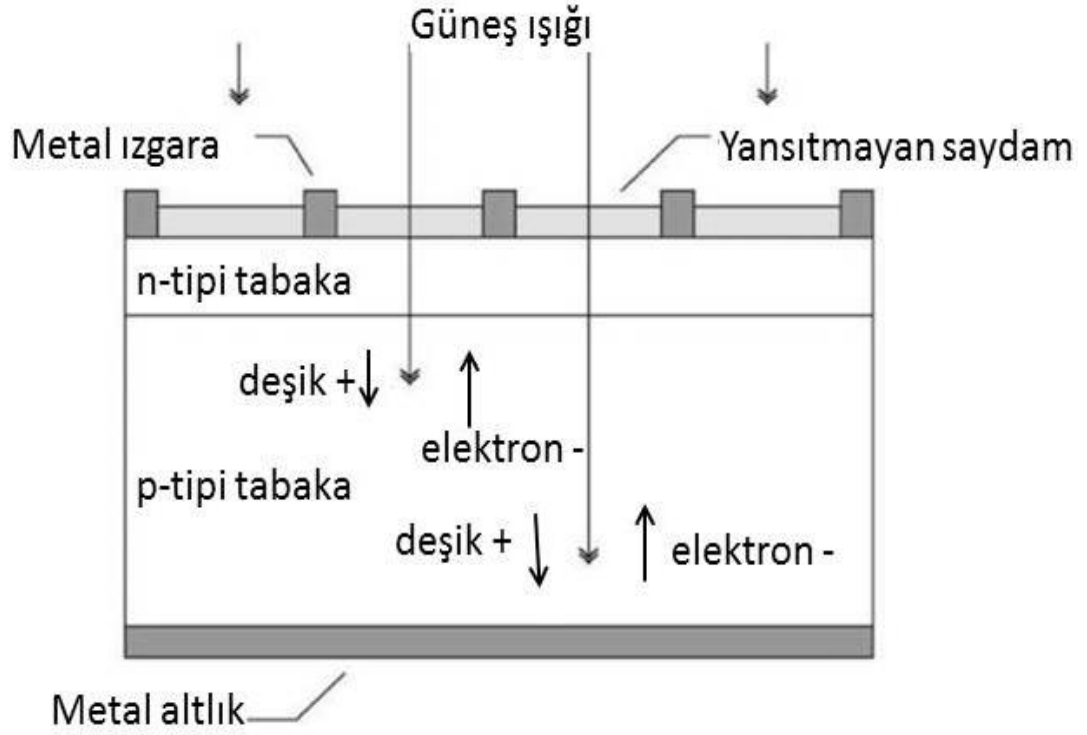
Tablo 2.1. FV malzemelerinin enerji bant aralığı

Numara	FV Malzeme	Enerji Bant Aralığı
1	IndiumArsenide (InAs)	0,36
2	Germanium (Ge)	0,66
3	Silicon (Si)	1,12
4	CIGS (CuInGaSe <sub>2</sub> )	1,2
5	Gallium Arsenide (GaAs)	1,42
6	Cadmium Telluride (CdTe)	1,45
7	Cadmium Sulfide (CdS)	2,42

Başlangıçta saf olan yarı iletken maddeler eser miktarda p-tipi ve n-tipi safsızlar ile katkılandırıldıktan sonra bir p-n oluşturulur. Yani FV hücreleri, tıpkı bir yarı iletken diyot gibi p-n ekleminden oluşmaktadır. FV hücrelerde mikrometre ölçeğinde ince p-tipi yarı iletken ve biraz daha kalınca p-tipi yarı iletken altta, yüzey alanı olabildiğince geniş yüzey oluşturacak biçimde imal edilir.

P-tipi yarıiletkenler çoğunlukta deşiklere ve azınlıkta elektronlara sahiptir ve n-tipi yarıiletkenlerde ise durum tersinedir. Güneş radyasyonu FV hücrenin n tipi, p tipi ve uzay yükü bölgesinde elektron-delik çiftleri üretir. Bu yük taşıyıcılar, yük taşıyıcıların yoğunluk farkı ve bağlantının elektrik alanı nedeniyle yayıma ve sürüklenme kuvvetine maruzdurlar. Çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcıları, sırasıyla üretilme ve sürüklenme kuvvetleri nedeniyle bağlantı boyunca hareket eder ve akımın oluşmasına yol açar. Uzay yükü bölgesinde üretilen elektron ve boşluk, maksimum sürüklenme kuvvetine maruz kalır ve anında sırasıyla n-tipi ve p tipi bölgelere hareket eder. Sürüklenme kuvveti, n-tipi ve p-tipi bölgelerin en uzak kısmında üretilen azınlık yük taşıyıcıları üzerinde ihmal edilebilir ve bu nedenle bu yük taşıyıcıları rastgele hareket eder ve rastgele hareket sırasında bağlantının diğer tarafına geçmek için sürüklenme kuvvetine maruzdurlar ve çoğunluk yük taşıyıcısı ile yeniden birleşirler. Denge sırasında (yani, FV hücre aydınlatılmadığında), elektron ve deşik üretilme ve sürüklenme akımları eşit ve zıt yöndedir ve net akımı sıfır yapar. Aydınlatılmış durumdayken, sürüklenme akımı üretilme akımından fazladır. Böylece, sırasıyla n-tipi ve p-tipi bölgelerde elektron ve delik konsantrasyonları artar. Sonuçta, dış devrede





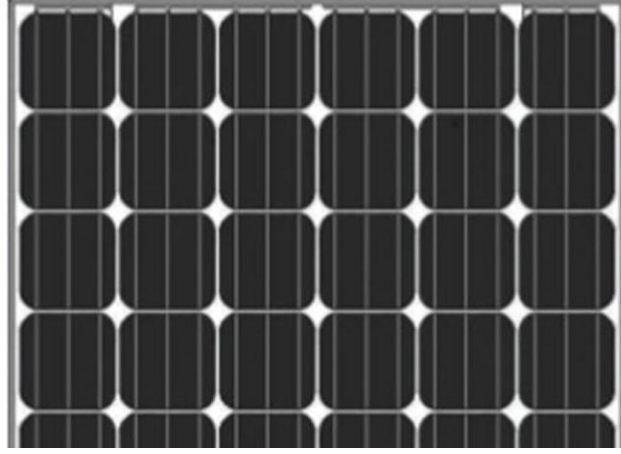
Şekil 2.4. Basit bir çalışan Güneş hücresinin şeması

Güneş radyasyonu Güneş hücresinin üst tarafına gelir. Metal bir şebeke, cihazın elektrik kontaklarından birini oluşturur ve ışığın şebeke çizgileri arasındaki yarı iletken üzerine düşmesine ve böylece emilmesine ve elektrik enerjisine dönüştürülmesine izin verir. Şebeke çizgileri arasındaki yansıtma önleyici saydam katman, yarı iletken tarafına iletilen ışık miktarını geçirirken minimum yansıtma yapar. Güneş hücresinin altındaki metal bir tabaka pozitif elektrotu oluşturur.

Ticari olarak FV hücrelerinin 3 temel yapısı vardır: Monokristal polikristal ve ince film silisyum hücreler. Bu hücrelerin kısa tanımları aşağıda verilmiştir.

### 2.3.1. Monokristal Silisyum FV Hücreleri

Monokristal silisyum FV hücre (Şekil 2.5) yaklaşık %15 (kısmen düşük) verimliliğine rağmen Güneş enerji panelleri için en etkili ve yaygın olarak kullanılan ticari FV hücredir. Güç üretimi ya da verimi, aynı maddeden yapılmış olmasına ve aynı yüzey alanına sahip olmasına ve aynı hava koşullarında bulunmasına rağmen, ince film hücresinin dört katıdır. Ayrıca 25 – 30 yıl arasında daha uzun bir ömre sahiptir ancak maliyet açısından görece olarak pahalıdır (Goodrich et al. 2012).



Şekil 2.5. Monokristal silisyum panel görünüşü

### 2.3.2. Polikristal Silisyum FV Güneş Hücresi

Polikristal silisyum FV Güneş enerji panelleri (Şekil 2.6), p-Si veya polisilisyum, multikristal gibi başka isimlerle de tanımlanır. Monokristal ile karşılaştırıldığında üretimi daha ucuzdur, enerji verimi % 13 mertebesindedir, kullanım ömrü 20-25 yıldır ve monokristal FV panellere göre biraz daha azdır. Bu yüzden daha fazla güç üretimi için daha fazla alan gerektirir. Polikristal silisyum hücre, m<sup>2</sup>'lik bir alan ve 1000 W/m<sup>2</sup> Güneş radyasyonu için 130 W/m<sup>2</sup> elektrik gücü üretir. Monokristal FV panellerde bu değer 150 W/m<sup>2</sup> civarındadır. Aradaki 20 W/m<sup>2</sup> fark küçük görünse de, büyük ölçekli panel sistemlerinde uzun yıllar düşünüldüğünde, aynı panel alanı dikkate alındığında bu fark oldukça fazla olacaktır.

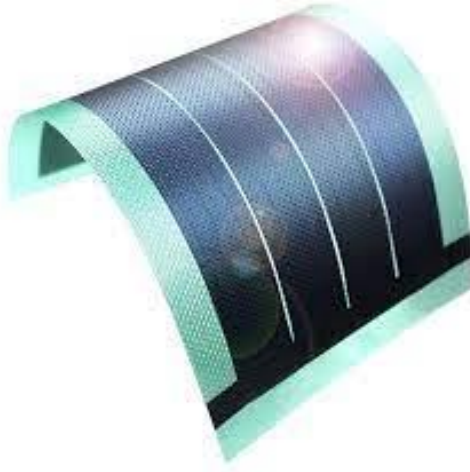


Şekil 2.6. Polikristal silisyum paneli

### 2.3.3. İnce Film Silisyum FV Güneş Hücresi

İnce film silisyum hücresi, (Şekil 2.7), kristal özellikli olmayan amorf yarı iletkenlerden yapılmaktadır. En çok kullanılan ince film silisyum FV hücrelerinin son nesli olarak kabul edilmektedir. Üretim teknolojisi daha basit, üretimi için daha az ve ucuz malzeme gerektirir. İnce film Güneş güç hücreleri, kristal hücrelerle karşılaştırıldığında üretimi daha ucuzdur ancak verimi neredeyse kristal FV hücrelerin veriminin yarısı kadar, yaklaşık %7 civarında düşüktür. Ancak ince film hücreler düşük Güneş radyasyonlarda bile oldukça iyi çalışabilir. Buna ek olarak ince film Güneş enerji panelleri esnek (flexible) yapılabilmekte ve uygulandığı yüzeylerin düz olması gerekmez.

Silisyum yanında esnek ince film Güneş panelleri ucuzluğu ve üretim kolaylığı nedeniyle CIGS ( $\text{CuInGaSe}_2$  veya  $\text{CuInGaS}_2$ ) ve CdTe alaşım yarı iletkenlerden yarı iletkenlerden de üretilmektedir. Ancak CdTe yarı iletkenlerde Cd elementi zehirleyici olduğundan meskun mahallerden uzakta, çöl ve benzeri arazilerde kullanımı uygundur.

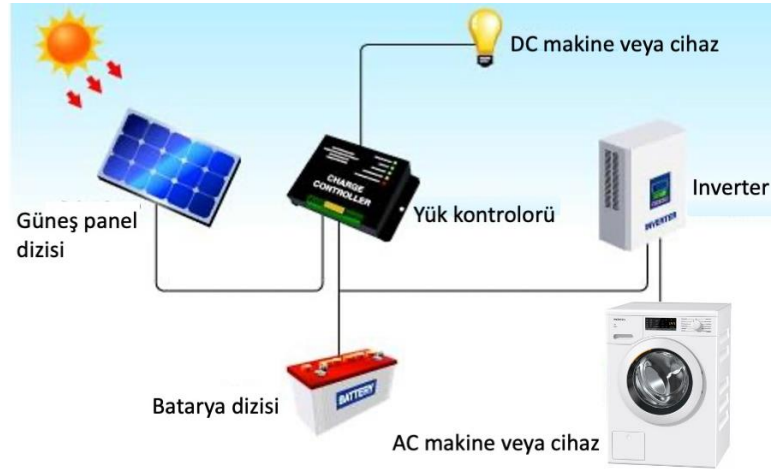


Şekil 2.7. İnce film silisyum hücresinin görünümü

### 2.4. FV Sisteminin Elemanları

FV sistemini oluşturmak için, sistemin yapısına veya tasarımına bağlı olarak bir dizi eleman birbirine bağlanır. Bağımsız bir konutun ve küçük atölyenin veya ofisin ihtiyacı için FV panel dizisi, şarj kontrolörü, evirici (inverter) ve elektrik depolama için batarya dizisinden oluşan Güneş güç düzeneği genellikle yeterlidir. Şekil 2.8 ev

veya küçük işletmelere uygun bir FV güç sisteminin temel elemanlarını vermektedir.



Şekil 2.8. Özel amaçlı FV güç üretim sisteminin elemanları

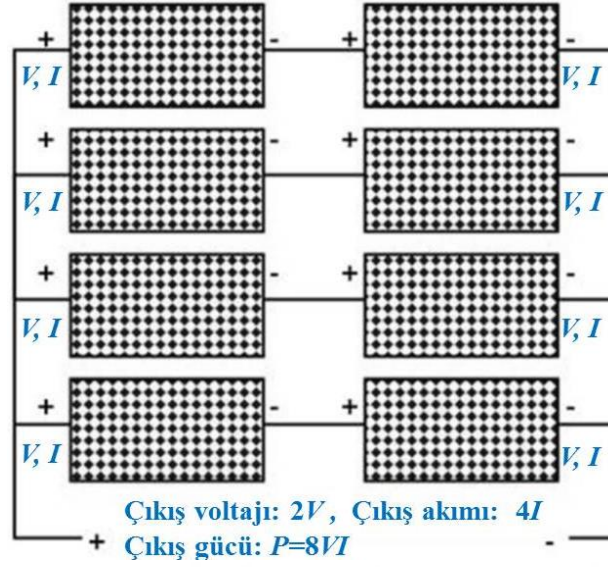
Ticari amaçlı ya da şebekeye bağlı FV sistemleri için bunlara ilaveten transformatörler, çift yönlü sayaçlar vb. gibi elemanlar gerektirecektir. Şekil 2.9 da Şebekeye bağlı FV güç sisteminin elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Şebekeye bağlı FV güç üretim sisteminin elemanları

#### 2.4.1. FV Güç Sistem Elemanlarının Yapıları ve Görevleri

Şekil 2.8, lisans gerektirmeyen küçük boyutlu özel ve şebekeye bağlı olmayan (off-grit) kullanıma uygun bir FV enerji sisteminin temel yapısını, şemasını ve sistemde bulunması gerekli asgari elemanları göstermektedir. Şekil 2.9'da ise büyük boyutlu olup lisans gerektiren ticari amaçlı olup şebekeye bağlı (on-grit) FV güç sisteminin elemanlarını göstermektedir. Bu sistemlerde bulunan temel elemanların yapıları ve fonksiyonları aşağıda kısaca ele alınmıştır.



Şekil 2.10. Bir FV güç sisteminde panellerin seri ve paralel bağlanması örneği

FV Güneş panelinin yapıları ve türleri Kesim 2.3 ve Kesim 2.4'te kısaca açıklanmıştır. Bir FV güç sisteminde monokristal, polikristal veya ince film teknolojisi ile Silisyum, CIGS, CdTe veya diğer bilinen yarı iletken maddelerden yapılmış olabilir. Uygulamada önemli olan panelin ışık duyarlılığı, verimi, voltaj ve akım çıktı sınırlarıdır. FV sistemleri genellikle 12 voltun katlarında çalıştırılır (Guda ve Aliyu, 2015). Tek bir panelin voltaj ve akım, yani güç çıkış sınırları yetersizdir, dolayısıyla gücünü artırılması için yeteri kadar panelin seri bağlanarak voltajını artırılır ve bu seri başlı gruplar paralel bağlanarak akım artırılır. Bu yolla belirli bir sınır güce kadar FV panel dizileri oluşturulur.

Yük kontrolörü seri ve paralel bağlı FV panellerin ürettikleri gücün kontrolü, aşırı yüklenme, bataryaların aşırı dolması, Güneşin olmadığı zamanlarda geri akımın önlenmesi, şimşek çakması sırasında ani voltaj yükselmesini dengelemek gibi panel güvenliği için gerekli işlemleri yapan aygıttır. Bu işlemler için yük kontrolörü iki farklı teknoloji kullanılır. Bu teknolojiler puls genişliği modülasyonu (Puls Width Modulation, PWM) ve maksimum güç noktası izleme (Maximum Power Point Tracking, MPPT) olarak isimlendirilir.

PWM teknolojisine dayalı kontrolör, paneller doğrudan batarya dizisini şarj ederken panellerin çıkış voltajını bataryaların voltajına düşürür. Bataryalar doldukça voltajları yükselecektir ve buna paralel olarak panellerin çıkış voltajı da yükselir. Yani yük kontrolörü panel dizisinin çıkış voltajı ile bataryaların voltajını birbirine uydurarak herhangi bir arızanın oluşmasını engeller.

MPPT teknolojisi panel dizisinin maksimum voltajını, ( $V_{mp}$ ), ölçerek voltajı sürekli batarya voltajına uyarlar. Panel çıkış voltajını bataryalara uydurmak üzere düşürdüğü için akım artacaktır, yani panellerin ürettiği güç sürekli sabit olarak bataryalara aktarılacaktır. MPPT kullanan kontrolörler çok sayıda panelin bulunduğu dizilerde kullanıma uygundur ve tercih edilen teknolojidir.

FV panellerin çıkış voltajı ve güç sabit olmadığından ve kararlı ve sürdürülebilir bir işlem için gerek DC aygıtlar için ve gerekse evirici (inverter) girişi için voltajın sabit olması gereklidir. Bu amaçla bulutlanma gibi durumlarda geçici üretim kaybını telafi etmek amacıyla yeterli kapasitede akülerden oluşan batarya dizisinin sistemde bulunma gereği vardır. Ancak bu bataryaların sürekli şarj ve deşarj için dayanıklı olması gerekmektedir.

FV panel çıkışı isteğe bağlı bir değerde olan DC voltajdır. Eğer DC voltaj gerektiren bir cihaz ya da makine ise doğrudan beslenebilir. Eğer 220 V<sub>AC</sub> ve 50 Hz değerlerde AC şebeke voltajı istenirse, ya da evlerde kullanılan buzdolabı, çamaşır veya bulaşık makinesi, televizyon gibi aygıtları beslemek için gerekiyorsa panel çıkışı en azından tek fazlı (monofaz) DC voltajın bu değerlerde AC voltaja dönüştürülmesi gerekir. Ayrıca panel sistemi şebekeye bağlı (on-grit) ise üç fazlı (trifaz) voltaja dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüştürme işlemi evirici (inverter) olarak bilinen cihaz gerekmektedir. Eviriciler bir DC voltajı AC voltaja dönüştüren elektrik ve elektronik cihazdır. Eviriciler yeterli güçteki DC voltajı standart şebeke voltaj ve frekans değerleri olan monofaz ya da trifaz 220 V<sub>AC</sub> ve 50 Hz elektriğe dönüştüren, ayrıca AC voltajın fazını da şebeke elektriği fazına uydurulması gerekir.

FV güç sisteminin şebekeye bağlı (on-grit) olması durumunda, yüksek gerilim hatlarına bağlanması gerekir. Bunun için evirici çıkışının voltaj değerinin yüksek gerilim hatlarına bağlanmaya uygun olması, bunun için de yüksek güçte yüksek gerilim transformatörüne gerek vardır. Bu transformatörler yüksek gerilim hatlarında kullanılan standart transformatörlerdir.

Şebekeye bağlı FV sistemin gündüz vakti Güneş varken şebekeye aktardığı elektrik enerjisi ile gece vakti sistemin ya da sisteme bağlı cihaz ve makinelerin ihtiyacı olan ve şebekeden sağlanan elektrik enerjisini ölçmek için iki yönlü elektrik sayacı gerekmektedir. Bu sayaç yardımı ile alınan ve verilen elektrik enerjisi periyodik olarak, örneğin her ay şebeke yönetimi ve FV sistem işletmecisi mahsuplaşır.

FV panellerin montajı tesis maliyeti, kolaylığı ve minimum yatırımla maksimum verim alma düşüncesiyle genellikle sabit açılı, yani Dünyanın deklinasyonuna (eğimine) dayanarak yatayla 23° olacak biçimde uygulanır. Bu bir tercihtir ve optimum *ekserji* için yeniden düşünülmesi gereklidir.

FV sistemin enerji üretimini maksimum yapmak için, Güneşten gelen doğrudan radyasyonu da maksimum yapmak gerekli görülebilir. Bunun için FV panellerin sabit açılı olması yerine maliyeti dikkate alınarak bir ya da iki eksenli Güneş izleyici (Solar tracer) gerekebilir. Güneş izleyici sistem günün her anında panelleri sürekli Güneşe tam bakacak biçimde yönlendirir. Böylece Güneş radyasyonunun yüzeye açılı gelmesi sonucunda radyasyonun bir kısmının yansiyarak üretime katkı yapmaması engellenebilir. *Ekserjiyi* doğrudan ilgilendirmesi nedeniyle Güneş izleyici sistemin kurulum maliyeti ile üretilen elektriğin bir kısmının bu sistemde harcanması gerektiğinden doğru strateji ve hesaplama gereklidir.

#### **2.4.2. Hibrit Sistemi**

FV sistemleri ile başka enerji kaynakları (dizel veya gaz jeneratörleri, rüzgâr türbinleri ve hidroelektrik santraller) kullanılarak oluşturulan enerji sistemlerine hibrit (melez) FV sistemleri denilmektedir. Diğer enerji üretim tekniklerinin amacı, olumsuz hava koşullarında FV sistemin çalışmaması durumunda elektrik üretiminin belirli oranda sürdürülmesini sağlamaktır. Hibrit sistemler çoğunlukla FV panellerle rüzgâr türbininden/türbinlerinden oluşturulur. Bu iki teknolojinin aynı arazide bulunma gereği de yoktur. FV paneller bol güneş alan düz bir arazide olabilirken rüzgâr türbinleri bol rüzgâr alan yüksek tepelerde olabilir ve bu iki sistemin entegrasyonu sile birlikte çalışmaları sağlanabilir.

#### **2.5. FV Sistemlerini Etkileyen Çevre Faktörleri**

FV panel sisteminde enerji dönüştürme esnasında farklı optik, termal ve elektriksel kayıplar yaşanabilir. Kayıplarda etken olan olgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- **Optik kayıp:** FV panel Güneşe göre eğimi nedeniyle gelen radyasyonun bir kısmının panel yüzeyinden yansımaları içerir. Bu kayıp büyük ölçüde Güneş izleyicilerin kullanılmasıyla önlenir ve ayrıntılı *ekserji* hesaplamasını gerektirmektedir.

- **Radyasyon uyumsuzluğu kaybı:** FV panelin yapıldığı yarı iletken malzeme tarafından absorbe edilmeyen dalga boyu veya fotonlardan kaynaklanan enerji kaybını içerir. Bu kaybı önlemek için Güneş radyasyonunun şiddetli olduğu mor ötesi ve görünür bölgeye duyarlı yarı iletken kuşanmak gereklidir. Silisyum bu bakımdan oldukça iyidir.
- **Isı kaybı:** Yarı iletkenlerin özelliklerinden birisi, artan sıcaklığın FV panelin veriminin düşmesidir. Isı kaybı, sürekli Güneşe maruz olan panellerin sıcaklığının radyasyon ve konveksiyon yoluyla panellerin her tarafına yayılması ve sonuç olarak verimin düşmesi, üretilen enerjinin kaybına yol açmasıdır. Bu kayıp, eğer panelin ısınması bir biçimde engellenebilirse önlenilecek bir kayıptır ve *ekserji* ile yakından ilgilidir. Tekniklerden birisi fotovoltaik termal (FV-T) aygıtlar kullanılarak termal enerji kaybının kısmen azaltılması olabilir. Ayrıca panelleri gölet gibi dalgasız su birikintileri üzerine sermek ya da panellerin altındaki toprakta bol su içeren bitkiler yetiştirerek serinlik oluşturmak yapılabilecek diğer önlemlere örnektir.
- **Direnç kaybı:** Yarı iletkenler metaller gibi iyi iletken değildirler ve hiç de az olmayan dirençleri vardır. Üretilen FV akım bu dirençli yarı iletkende akarken doğal olarak ısıtır. Direnç kaybı işte bu seri dirençlerden kaynaklanan elektrik enerjisi kaybını içerir.
- **Dolum Faktörü kaybı:** Lineer olmayan I-V karakteristiklerinden kaynaklanan enerji kaybını içerir. Sırasıyla açık devre voltajı ve kısa devre akımından daha düşük voltaj ve akımda çalışan FV paneller bu enerji kaybını yaşar.
- **Tersinmezlik:** İşlem sırasında tek yönlü olan entropiden kaynaklanan enerji kaybına tersinmezlik kaybı denilmektedir.

Yansıma, kirlilik, gölgeleme vb. bir dizi parametreler FV sistemlerin performansını olumsuz etkileyen diğer önemli faktörlerdir, (Zhou et al, 2017). Çevresel faktörlerden etkilenen FV panellerin çalışma sıcaklığı artacak, gelen radyasyon tozlanma ve yansıma nedeniyle yarı iletkene ulaşamayacak, panellerin önündeki ağaç, bina gibi nesnelere nedeniyle zaman zaman oluşan gölgelenme gibi etkenler verimliliği düşürmektedir ve bunlar bütünüyle ekserjiyi ilgilendirmektedirler (Bayrak et al, 2017). FV panellerde enerji kayıplarına neden olan ve önde gelen etkenler ve ekserji hesaplamasının parametreleri Tablo 2.2’de yüzdelik olarak gösterilmektedir.

Tablo 2.2'ye baktığımız zaman, kayba sebep olan faktörler içerisinde en büyük oranın %7 ile gölgelemede olduğu açıktır. FV panellerin çalışmasını etkileyecek çeşitli çevresel faktörlerin neden olduğu gölgeleme etkisi, kurulum sırasında dikkate alınması gereken temel bir faktördür. Bilindiği gibi FV Modüllerinin gölgeli hücreleri, etkilenmeyen hücreler tarafından, üretilen elektrik gücünü emer, bu da FV sistemlerinin ısınmasına ve ısı kaybına neden olur. Bu nedenle, FV sistem performansını iyileştirmek için bu kayıpları araştırmak ve önleyici tedbirler almak *ekserji* kapsamındadır ve gereklidir.

Yukarıdaki bölümde bahsedildiği gibi gölgeleme etkisi, FV panellerin çalışmasının enerji kayıplarına neden olan temel faktörler biri olarak tanınmaktadır. Bulutlar, bitişik binalar, kuleler, ağaçlar, telefon ve elektrik direkleri, FV üzerine tamamen veya kısmen gölgeleme etkisine sebep olmaktadır. FV sistemlerde gölgeleme etki üzerine birçok teorik ve deneysel araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, gölgelemenin FV sistem performansları üzerinde ciddi enerji kaybı etkisi olduğu kabul edilmiş ve gölgeleme etkisini en azaltmak için farklı yöntemler araştırılmış ve tavsiye edilmiştir. FV paneller üzerindeki gölgeleme etkileri, FV modüllerin yüzeyinde sıcak noktaların oluşması nedeniyle hücre sıcaklığını artırmakta ve FV sistemlerinin ısınmasına ve ısı kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle, FV sistem performansını iyileştirmek için bu kayıpları araştırmak önemlidir.

Tablo 2.2. FV güç sistemlerinde enerji kayıplarına neden olan faktörler

Enerji kaybına sebep olan faktörler	Kayıp oranı (%)
Gölge	%7
Sıcaklık	%4,6
Evirici	%3
Yansımaya	%2,5
Kirlilik	%2
Işınım	%1,5
AC/DC Kablolama	%1,5
Spektrum	%1
Yanlış Montaj	%0,7

## 2.6. FV Sistemlerinin Optimizasyonu

FV güç sistemlerinin kurulumu ve optimizasyonu için, kurulu olan bölgenin Güneş radyasyonu ve enerji potansiyeli aylara bağlı olarak belirlenmelidir. Böylece kurulum yapılacak bölgenin güneşlenme bilgilerinin, diğer iklim şartlarının ve farklı çevresel parametrelerini dikkate alarak, FV güç sistemlerinden olabildiğince yararlanmak mümkündür. Maksimum kullanılacak Güneş enerjisi, Güneş radyasyonunun *ekserjisi* olarak tanımlanmaktadır. Güneş radyasyonu *ekserjisi*, bölgesel Güneş radyasyonunun özellikleri göz önünde bulundurularak üretilebilecek mümkün olan maksimum iş çıktısını verecek olan nitel ve nicel verilerini içerir (Hepbasli, 2008).

Yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak FV sistemlerinin performans analizi iki temel adımda tartışılacaktır: FV santralının tasarlandığı alanın maksimum kullanılacak Güneş enerjisi (Güneş *ekserjisi*) ve ardından çevresel faktörleri göz önüne alarak FV sisteminin buna ilişkin maksimum enerji (*ekserji*) verimliliğinin analizi ve değerlendirilmesi.

Güneşten elektrik üretimi sırasında FV panel yüzeyinden ısı kaybı olarak ifade edilebilecek olan termal *ekserji*, FV sistemlerinin performans analizi olan *enerji* ve *ekserji* verimliliğinin araştırılmasında anahtar parametrelerden biridir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

FV güç sistemlerinin kurulum öncesi bölgenin maksimum Güneşten elde edilebilecek enerji potansiyeli (Güneş ekserji) aylara bağlı olarak araştırılması gerekmektedir, ayrıca kurulu bölgenin gölgelenme gibi çevresel faktörler dikkate alınarak termal ısı kayıplarının araştırılması sistem performansı için önemlidir.

Bu araştırmada ilk olarak Petela, Spanner ve Parrott'un Güneş ekserji yöntemlerini ayrı ayrı kullanarak Samsun bölgesi için Güneş ekserjisi hesaplanıp ve karşılaştırıldı. Ayrıca elde edilen Güneş ekserji modelleri kullanarak, Samsun bölgesinde gerçek çevresel parametreler koşulları göz önüne alarak, şebekeye bağlı bir Güneş enerjisi santralının, enerji ve ekserji verimliliği 12 ay için hesaplanıp ve karşılaştırıldı. En son olarak enerji ve ekserji verimliliği açısından yanlış bina edilen trafo binasından kaynaklanan gölgeleme etkisi termal ekserji üzerine analiz edilmiştir.

Şebekeye bağlı FV santrali maksimum 114 kW güç kapasiteye sahiptir ve 10000 m<sup>2</sup> alan üzerine kurulmuştur. FV santrali, her biri maksimum 260 W güce sahip 440 poli-kristal panelden oluşmakta ve Güneşten üretilen elektrik, 30 kW'lık 4 evirici tarafından kontrol edilmektedir. FV güç santralının koordinatları 41.27° E enlem, 36.17° N ve yükseklik 287 m'dir. Kurulu olan santralin uydu görüntüsü, şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Samsun bölgesinde kurulu olan FV santrali

Bu santrale ait modüllerin elektriksel değerleri Tablo 3.1 ve özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Santrale ait Modüllerin elektriksel değerleri

MODÜL ELEKTRİKSEL DEĞERLERİ	
Panel maksimum gücü, $P_{max}$	260 Wp
Güç toleransı	0 - 6Wp
Nominal güç voltajı, $V_{mp}$	30.3 V
Nominal güç akımı, $I_{mp}$	8.59 A
Açık devre voltajı, $V_{oc}$	37.7 V
Kısa devre akımı, $I_{sc}$	9.09 A
Hücre çalışma sıcaklık aralığı	-40 - 85°C

Tablo 3.2. Çalışma yapılan santrale ait modüllerin özellikleri

MODÜL TİPİ	Poli-kristalin 260 Wp FV Modül
Toplam modül sayısı	440 adet
Modül boyutları (L×W×H)	1650mm×990mm×40mm
Kütle	18.5 kg
Drenaj delik sayısı	24
Kablo	2 adet solar kablo
Plug-in bağlantısı	MC4
Hücre çalışma sıcaklık aralığı	-40 - 85°C

### 3.2. Yöntem

FV güç santralinin ölçümleri Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampusu Teknopark'ta bulunan FV santralde alınmış ve analizler Samsun'un coğrafi ve hava koşulları altında yapılmıştır. Veriler Haziran 2019 ile Mayıs 2020 tarihleri arasında 12 ay sürede açık ve bulutsuz günlerde toplanmıştır.

Trafo binasından kaynaklanan gölgeleme etkisi mevsimlere ve günün farklı saatlerine bağlı olarak Güneşin gelme açısının değişmesi nedeniyle sürekli değişiklik göstermektedir. Şekil 3.2, aylara ve günlere bağlı olarak panellerde oluşan gölgeleme alanını göstermektedir.



a)



b)



c)

Şekil 3.2 (a-c). Panellerde oluşan gölgeli alanın aylara ve günlere bağlı olarak değişimleri. (a) 30 Haziran 05:40'ta çekilen görüntü, (b) 30 Haziran 06:25'te çekilen görüntü, (c) 30 Eylül 07:20'de çekilen görüntü

Kontrollü deneyi gerçekleştirmek için her birisi 120 panelden oluşan iki FV panel dizisi seçildi. İki evirici tarafından kontrol edilen bir dizi gölgelemeden etkilenirken diğeri etkilenmemektedir. Güneş panelleri, farklı mevsimlerde Güneş ışığından en üst düzeyde yararlanmak ve kurulum maliyetlerini azaltmak için  $23^\circ$  eğim açısı ile güneşe bakan çelik ayaklar üzerine monte edilmiştir. Gölgelemeden etkilenen dizi Shaded-Array (Sh-Array) olarak adlandırılırken, etkilenmeyen diğere Unshaded-Array (Ush-Array) adı verilmiştir. Her ay için gölgeli alan ölçümleri açık havada gün doğumu ile başlamış, yerel saatte panellerde gölge kaybolana kadar devam etmiştir. Ölçümler 15 dakika aralıklarla alınmıştır.

FV santralinin enerjisi, Güneş enerjisi ve ekserji analizi aşağıdaki adımlar uygulanarak yapılmıştır:

- Eviriciden anlık çıkış elektriksel güç üretimi ( $P$ ) verileri alınmıştır.
- FV yüzeyinde meydana gelen toplam Güneş radyasyonu ( $I_s$ ) Kipp ve Zonen Piranometresi ile ölçülmüştür.
- Rüzgâr hızı ( $v$ ) Wellhise HT-380 dijital anemometre ile ölçülmüştür.
- Ortam sıcaklığı ( $T_a$ ) ve hücre sıcaklığı ( $T_{cell}$ ) verileri T tipi termočift kullanılarak ölçülmüştür.
- Her ay için elde edilen veriler kullanılarak, Petela, Spanner ve Parrott'un modeli ile Güneş *ekserjisi* ve FV sistem *ekserjisi* verimliliği analiz edilmiştir.
- Petela, Spanner ve Parrott'un modeline ilişkin elde edilen sonuçlar, Güneş *ekserjisi* ve FV *ekserjisi* verim analizi için karşılaştırılmıştır.

### 3.3. Termodinamik Kanunları

Termodinamik sistem, kendi içinde bütünlük oluşturan, başka termodinamik sistemlerle enerji alış-verişi yapan yalıtılmış bir sistem olarak tanımlanır. Güneş, Dünya, buzdolabı veya yaşadığınız oda birer termodinamik sistem örneğidir.

Termodinamik ve ısı ve kütle transferi, ısı halindeki enerjinin bir sistem ve çevresi ile ısı aktarımını, birbirleri üzerindeki etkilerini inceleyen bilim dalı olarak tanınmaktadır. Enerji dönüşüm süreçlerini anlamak için iki termodinamik kavramı vardır: Fenomenolojik ve istatistiksel metot. Fenomenolojik analiz metodu makroskopik enerji aktarımı süreçlerine dayanırken, istatistiksel analiz metodu maddenin parçacık yapısını esas alan mikro ölçekteki yapıyı esas alır. Termodinamik teorisi ve hatta uygulamaları esasta üç Termodinamik Kanununa dayanır. Bunlara öncü olarak Sıfırıncı Kanun olarak da adlandırılan termal denge kanunu eklenebilmektedir. Bu kanunlar, hatırlama için kısaca aşağıda özetlenmiştir:

Termodinamiğin sıfırıncı kanunu (termal denge kanunu) olarak ayrıca tanımlanırken aslında bu kanun birinci kanunda da ifade edilmektedir.

Birinci kanun bir termodinamik sistemin enerjisi sabit olduğunu ve bu sistemin başka bir termodinamik sistemle ısı temas yaparsa yüksek enerjili sistemin ısı enerjisini düşük enerjili sisteme sıcaklık yoluyla aktaracağını ve bir süre sonra termal dengeye geleceğini ve temas ettikleri sürece yeni bir termodinamik sistem oluşturacağını söyler. Bununla birlikte Birinci kanun enerjinin yoktan var edilemeyeceğini ve var olan bir enerjinin de yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden bir başka biçime dönüştürüleceğini ve bu dönüşümün hiç bir zaman %100

olamayacağını söyler.

Termodinamiğin ikinci kanunu, bir termodinamik sistemin entropisinin zamanla sürekli artarak maksimum değerde denge haline geleceğini ve entropinin müdahale olmaksızın asla negatif olmayacağını söyler.

Termodinamiğin üçüncü kanunu mutlak sıfır derece sıcaklığa inmek için sonsuz sayıda işlem döngüsünün gerektiğini, bunun da mümkün olmayacağı için mutlak sıfır derece sıcaklığa (0 K) inilemeyeceğini belirtir.

Enerji dengesi denklemi, termodinamik süreci çözmek ve anlamak için enerji korunumu yasası

$$E_{in} = \Delta E + E_{çıkık} \quad (3.1)$$

olarak basitçe tanımlanır. Denklem (2.3) bir sistem için giriş enerjinin ( $E_{in}$ ) her zaman sistem tarafından kazanılan enerjinin ( $\Delta E$ ) ve çıkış enerjisi ( $E_{çıkık}$ ) toplamına eşit olacağını belirtir.

Termodinamiğin ikinci kanunu, entropi ve *ekserji* verimliliği açısından sistem analizinin yönlü ve niteliksel yaklaşımıyla ilgilenir. Sistemin *ekserji* dengesi, giriş *ekserji*, *ekserji* kaybı, çıkış *ekserjisi* ve tersinmezliğin toplamına eşit olacağını belirtir:

$$Ex_{gir} = Ex_{çıkık} + Ex_{kayıp} + E_{tersinmezlik} \quad (3.2)$$

Bir ısı değiştirici sistemin *ekserji* dengesi denklemi, ısı kaynağından gelen giriş *ekserjisi* ( $Ex_{gir}$ ), ısı alıcı tarafından kaybedilen ekserji ( $Ex_{kayıp}$ ), çıkış ekserjisi ( $Ex_{çıkık}$ ) ve *tersinmezlikten* kaynaklanan *ekserji* kaybının toplamına eşit olduğunu belirtir.

Tersinmezlikten kaynaklanan *ekserji* kaybı, sistem veya süreç içindeki geri alınamaz ekserji kaybıdır ve ayrıca iç *ekserji* kaybı olarak da bilinir. Gouy-Stodola yasası, tersinmezlikten kaynaklanan *ekserji* kaybı entropi üretimine ( $S_{gen}$ ) ve çevre sıcaklığına ( $T_a$ ) bağlı olduğunu belirtir,

$$E_{tersinmezlik} = T_E S_{gen} \quad (3.3)$$

İşlem sırasındaki entropi tersinmez bir sistem için her zaman pozitif, tersinir bir sistem için sıfır olacaktır. Doğada herhangi bir sistemde veya süreçte negatif entropi oluşumu

mümkün değildir. Üretilen toplam entropi, sistem ( $\Delta S_{sistem}$ ) ve çevre ( $\Delta S_{çevre}$ ) tarafından üretilen entropinin toplamına eşittir, Denklem 3.4,

$$S_{gen} = \Delta S_{sistem} + \Delta S_{çevre} \quad (3.4)$$

Güneş FV enerji dönüşümünün termodinamik analizi için fotovoltaiik, (FV), ve fotovoltaiik-termal, (FV-T), süreçleri anlamak ve FV hücresinin kayıplarını, performansını ve üst limit verimliliklerini değerlendirmek gerekmektedir. FV ve FV-T sistemlerin enerji ve *ekserji* dönüşüm verimleri termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları kullanılarak belirlenebilir.

Yenilenebilir enerji sistemlerinden FV sistemlerin uygulanabilir olması için başta ekonomik ve çevresel etkileri bir bütün halinde dikkate alarak tasarım, optimizasyon ve performans analiz yapılması gerekmektedir. Bu kabul üzerine Hepbaşlı (2008) tarafından yürütülen çalışmada çevresel koşulları dikkate alan *ekserji* analizinin enerji analizine göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bir başka ifade ile, mühendislik tasarımı ve hesaplamaları her çevre şartları için aynı olmamalıdır, farklı coğrafyalar, farklı iklim koşulları, farklı topolojiler için tasarımlar ve enerji-*ekserji* hesaplamaları arasında farklılıklar olmalıdır.

### 3.4. FV dönüşümün termodinamiği

FV sistemlerin performans analizleri çevresel faktörleri dikkate alarak termodinamik yasalarına göre yapılabilir. Güneş radyasyonunu FV ve FV-T dönüşüm süreçleri yoluyla sırasıyla termal enerji ve elektrik enerjisi gibi faydalı enerji biçimlerine dönüştürür. FV-T dönüşüm durumunda Güneş radyasyonunun absorplanması atomların ve dolayısıyla yarı iletken örgünün titreşim yoluyla kinetik enerjisini artırır, bu da ısı oluşumuna yol açar. Öte yanda FV enerji dönüşümü sırasında akıma katkıda bulunan atomların yük kaybı ya da kazancı yoluyla potansiyel enerjilerini artırır. Güneş radyasyonunun FV-T yoluyla dönüşüm süreci veya enerji değişimi, absorplayıcı yarı iletken malzemenin enerji bant yapısına bağlıdır. Bu yarı iletkende enerji dönüşüm süreci termodinamik kanunlarına göre gerçekleşir. Fenomenoloji ve istatistiksel kavram Güneş radyasyonu ile enerji alışverişini değerlendirmek için uygulanabilir. Fenomenolojik termodinamik analizi, bir ortamdan diğer ortama geçen ve enerji alışverişini yapan Güneş radyasyonunun elektromanyetik dalga özelliğini dikkate alırken, istatistiksel termodinamik atomlar arasında fotonların emisyon ve absorpsiyon yoluyla gerçekleşen enerji alışverişini dikkate alır.

FV sistemlerin ekserji verimliliği analizi iki temel adımda tartışılmaktadır: FV enerji tesisinin tasarlandığı alanın maksimum kullanılabilir Güneş enerjisi (daha açık ifade ile Güneş ekserjisi) ve ardından çevresel faktörleri göz önüne alarak FV sistemin bu tesisteki ekserji verimliliğinin incelenmesi.

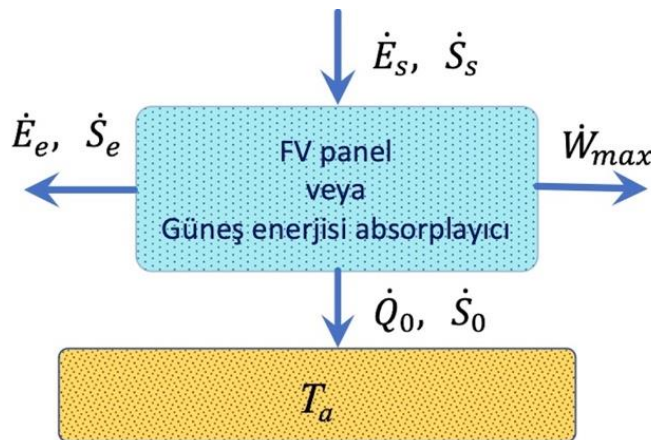
### 3.4.1. Güneş Radyasyonunun Enerjisi ve Ekserjisi

Güneş radyasyonu birim yüzeye düşen güç olarak, SI birim sisteminde  $W/m^2$  biriminde piranometre kullanılarak ölçülür. FV panelinin yüzeyinde alınan enerji, termodinamiğin birinci kanununda kullanılabilirken Güneş radyasyonunun *ekserjisi* giriş *ekserjisi* olarak denge analizi için gereklidir. Belirlenmiş bir çevre koşulunda Güneş radyasyonunu kullanılabileceği veya yararlı bir enerji biçimine dönüştürülebileceği maksimum sınır Güneş radyasyon *ekserjisi* olarak bilinir.

$W/m^2$  birimlerinde ifade edilen Güneş radyasyonu ( $I_s$ ), yüzey birimine ( $A$ ) gelen Güneş radyasyonu enerjisidir. Birim zamanda panel tarafından alınan Güneş enerjisi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_s = I_s \times A \quad (3.5)$$

Dünya üzerindeki Güneş radyasyonu *ekserjisini* belirlemek için Şekil 3.3'de gösterilen döngüsel bir makine varsayılabilir. Makine, birim zamanda gelen Güneş enerjisinden,  $\dot{E}_s$ , elde edilebilecek birim zamandaki maksimum işi,  $\dot{W}_{max}$ , çıkarır ve ortam (ambiyans) sıcaklığındaki,  $T_a$ , ortama  $\dot{Q}_0$  olarak tanımlanan ısı enerjisini verir. Makine bunun yanında  $\dot{E}_e$  olarak tanımlanan emisyon enerjisini çevreye yayar. Enerji ile birlikte birim zamandaki entropi de,  $\dot{S}_s, \dot{S}_0, \dot{S}_e$ , enerji ile birlikte aktarılmaktadır.



Şekil 3.3. Bir FV sisteminde enerji alış-verişini gösteren döngüsel makine.

Bir FV panel sisteminin ya da benzer bir enerji dönüşüm sisteminin üreteceği maksimum iş,  $W_{max} = E_{ex}$ , Güneşten alınan  $E_s$  enerjisinden üretilen *ekserjidir*. Bu tanım oldukça geneldir ve Güneş *ekserjisi* için bilinen üç ifadenin tümünü elde etmenin kaynağını oluşturur. Tanımdaki enerjiler ve entropiler birim zamanda (ilgili sembolün üzerinde bir nokta ile gösterilir) ve birim alanı başınadır. Bu nedenle denge denklemleri belirli enerji ve entropi akışlarını içermektedir.

Döngüsel makineden radyasyon yayılımı olmadığı zaman bu durumda enerji dengesi ve entropi dengesi Denklem (3.6) ve (3.7) ile ifade edilebilir:

$$\dot{E}_s - \dot{E}x_s - \dot{Q}_0 = 0 \quad (3.6)$$

$$\dot{S}_s - \left( \frac{\dot{Q}_0}{T_a} \right) = 0 \quad (3.7)$$

Denklem (3.7) kullanılarak Denklem (3.6) yeniden düzenlenebilir:

$$\dot{E}x_s = \dot{E}_s - \dot{S}_s T_a \quad (3.8)$$

Güneş enerjisinin Güneşin yüzey sıcaklığında ısı ile aktarıldığı düşünülürse,

$$\dot{S}_s = \left( \frac{\dot{E}_s}{T_s} \right) \quad (3.9)$$

ifadesi yazılabileceğinden yukarıdaki denklem kullanılarak, Parrot *ekserji* akışı ifadesi elde edilir,

$$\dot{E}x_s = \dot{E}_s \left[ 1 - \left( \frac{T_a}{T_s} \right) \right]. \quad (3.10)$$

Güneş radyasyonunun kaynağı olarak göz önüne alınırsa, iki tür radyasyon tarafından taşınan entropi farkı dikkate alınır.

Bir siyah cisimden, (Güneş de bir siyah cisim olarak kabul edilir), radyasyonun enerji taşıdığı bilinmektedir. Siyah cismin enerji ve entropi akışı, sırayla denklem 3.11 ve 3.12 ile göstermektedir. Denklem (3.11) gerçekte Kelvin birimindeki  $T$  sıcaklığındaki bir siyah cismin birim yüzey alanından yayılan güç ifadesidir ve Stefan-Boltzman denklemi olarak bilinir. İfadedeki sabit olan  $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  Stefan-Boltzman sabitidir.

$$\dot{E} = \sigma T_s^4 \quad (3.11)$$

$$\dot{S} = \frac{4}{3} \sigma T_s^3 \quad (3.12)$$

Enerji kaynağı siyah cisim olursa, Denklem (3.11) ve (3.12)'de verilen enerji akışı ve entropi akışı denklemlerini, Denklem (3.8)'de kullanarak, Güneş *ekserjisi* elde edilir,

$$\dot{E}x_s = \dot{E}_s \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) \right] \quad (3.13)$$

Denklem (3.5)'den  $\dot{E}_s$  değeri alınarak Denklem (3.13)'te yerine konulursa birim zamandaki Spanner *ekserji* denklemi elde edilir, (Spanner, 1964),

$$\dot{E}x_{span} = \dot{E}_s \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) \right] = I_s A \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) \right] \quad (3.14)$$

Birim zamandaki ve birim yüzey alanından yayılan Güneş *ekserji* ifadesinin Güneşin birim yüzey alanından birim zamanda yayılan enerjiye, yani güce oranı Spanner oranı olarak tanımlanabilir,

$$\Phi_{span} = \frac{\dot{E}x_{span}}{\dot{E}_s} = 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right). \quad (3.15)$$

Döngüsel makinenin radyasyon yayması durumunda enerji dengesinin ve entropi dengesinin denklem Denklem (3.16) ve (3.17) verilen biçimde yazılması gerekir,

$$\dot{E}_s - \dot{E}x_s - \dot{Q}_0 - \dot{E}_e = 0 \quad (3.16)$$

$$\dot{S}_s - \left( \frac{\dot{Q}_0}{T_a} \right) - \dot{S}_e = 0 \quad (3.17)$$

Denklem (3.16) ifadesi Denklem (3.17) ile birleştirilirse Denklem (3.18) elde edilir,

$$\dot{E}x_s = (\dot{E}_s - \dot{S}_s T_a) - (\dot{E}_e - \dot{S}_e T_a) \quad (3.18)$$

Eğer döngüsel makine siyah cisim kabul edilir ve radyasyon yayarsa,

$$(\dot{E}_e - \dot{S}_e T_a) = -\frac{1}{3} \sigma T_a^4 \quad (3.19)$$

denklemini yazılabilir.

Güneş enerjisi  $T_s$  sıcaklığında bir siyah cisim radyasyon akışı olarak göz önüne alınırsa, Denklem (3.11), (3.12) ve (3.18) Denklem (3.18)'de yerine yazılırsa Denklem

(3.18)'de verilen *ekserji* ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\dot{E}x_S = \dot{E}_S \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (3.20)$$

Bu denklem Petela (1964) tarafından önerilen *ekserji* denklemdir. Denklem (3.5)'te verilen enerji ifadesi  $\dot{E}_S$  bu denklemde yerine yazılırsa,

$$\dot{E}x_{pet} = A I_S \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (3.21)$$

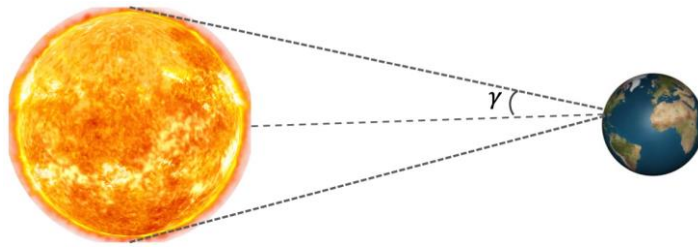
denklemini elde edilir.

Güneş radyasyonunun *ekserjisinin* Güneş radyasyonunun enerjisine oranı (Güneş radyasyonunun iş dönüşüm verimliliği) ifadesi elde edilir,

$$\Phi_{pet} = \frac{\dot{E}x_{pet}}{\dot{E}_S} = 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \quad (3.22)$$

Parrott (1978), Güneşten gelen radyasyonun Güneş diski koninin tabanı ve Dünya yüzeyindeki birim yüzey alanının da koninin tepesi olmak üzere, bu koninin yarım açısını, Şekil (3.2), göz önüne alarak Petela'nın Güneş ekserji denkleminin modifiye biçimini elde etmiştir,

$$\dot{E}x_{parr} = A I_S \left( 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) (1 - \cos \gamma)^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right) \quad (3.23)$$



Şekil 3.4. Parrot ekserji denkleminin esas aldığı Güneş-Dünya konisi.

Burada  $\gamma$ , Güneş diskinin oluşturduğu koninin yarım açısıdır. Hesaplanan  $\gamma$  açısının Temmuz ayındaki değeri 0,00460 ile Ocak ayındaki 0,00470 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu sınır değerler, dünyanın Güneşe olan Temmuz ayındaki minimum ve Ocak ayındaki maksimum uzaklıklarına karşılık gelir. Parrott modelinin, Denklem (3.23), kullanıldığı bu çalışmalarda  $\gamma \approx 0.005^0$  olarak alınmıştır ve katkısı çok küçük de olsa bazı durumlarda dikkate alınması gerekebilmektedir, (Parrott,1978).

Güneş radyasyonunun iş dönüşüm verimliliğini, Parrott'un Denklem (3.23)'de verilen Güneş *ekserji* ifadesinde Denklem (3.5) denklemini kullanarak elde edilebilir,

$$\Phi_{Parr} = \frac{\dot{E}x_{parr}}{\dot{E}_s} = 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) (1 - \cos \gamma)^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \quad (3.24)$$

Bazı araştırmacılar, Petela (1964), Spanner (1964) ve Parrott (1978) tarafından önerilen Güneş radyasyonu *ekserjisinin* hesaplanması teorilerini inceledikten sonra, tüm teorilerin varsayımlarına göre doğru olduğu sonucuna varmışlardır. Petela tarafından verilen Denklem (3.20) ve (3.21), Güneş radyasyonunun *ekserjisini* hesaplanmasında en çok kabul edilen ve önerilen denklemdir.

Güneş radyasyonu *ekserjisi*, bölgesel Güneş radyasyonunun özelliklerini dikkate almakla beraber radyasyonun nitel ve nicel verilerini içerir ve üretilebilecek mümkün olan maksimum iş çıktısını belli eder.

### 3.4.2. FV Ekserji

Bir FV sisteminin birim zamandaki *ekserjisi* ( $\dot{E}x_{pv}$ ), birim zamanda sistem tarafından üretilen elektrik *ekserjisi* ( $\dot{E}x_{elek}$ ) ile birim zamandaki ısı kaybı olarak termal *ekserji* ( $\dot{E}x_{termal}$ ) arasındaki farka eşittir,

$$\dot{E}x_{pv} = \dot{E}x_{elek} - \dot{E}x_{termal} \quad (3.25)$$

Bir FV sisteminin elektriksel *ekserjisi* şu şekilde verilir,

$$\dot{E}x_{elek} = I_m V_m \quad (3.26)$$

FV yüzeyinden çevreye olan ısı kaybı, termal kayıp *ekserji* olarak ifade edilebilir,

$$\dot{E}x_{termal} = h_{ca} A (T_{cell} - T_a) \left[ 1 - \left( \frac{T_a}{T_{cell}} \right) \right] \quad (3.27)$$

Burada  $T_{cell}$  Hücre sıcaklığını göstermektedir ve  $h_{ca}$  ısı transfer katsayısıdır ve

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8v \quad (3.28)$$

ifadesi ile tanımlanır. İfadede  $v$  rüzgâr hızıdır.

Denklem (3.26) ve (3.27) birlikte kullanılarak FV *ekserjisi* Denklem (3.29)'da verilen ifade ile tanımlanır,

$$\dot{E}x_{pv} = I_m V_m - \left[ 1 - \left( \frac{T_a}{T_{cell}} \right) \right] h_{ca} A (T_{cell} - T_a) \quad (3.29)$$

### 3.1. FV Enerji ve Ekserji Verimliliği

Bir FV sisteminin verimlilik analizi, enerji, entropi ve ekserji dengesini içeren termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına dayalı olarak yapılabilir.

#### 3.1.1. FV Enerji Verimliliği

Bir FV sistemin maksimum elektriksel çıkış gücü şu şekilde verilir,

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (3.30)$$

İfadede  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  ve  $FF$  sırasıyla FV panelin açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve doldurma faktörü (Fill Factor) olarak tanımlanır.

Doldurma faktörü aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır,

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3.31)$$

burada  $I_m$ ,  $V_m$  sırasıyla FV panelin maksimum akımını ve maksimum voltajını göstermektedir.

Enerji verimliliği ise aşağıdaki denklemle ifade edilir,

$$\eta_{pv} = \frac{V_m I_m}{I_s A} \quad (3.32)$$

Denklem (3.32)'da görüldüğü gibi, enerji verimliliğinin hesaplanması, Güneş radyasyonundan FV panelin ürettiği elektrik enerjisine ve modülün yüzey alanına bağlıdır. Enerji verimliliği hesaplanmasında ortam sıcaklığı, hücre sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi diğer çevresel parametreler dikkate alınmamıştır. Bu verimlilik ifadesi gerçekte laboratuvar şartlarında yapılan değerlendirmelere benzemektedir ve gerçek alan uygulamalarında verim çevre faktörlerinin etkisi ile düşmektedir ve *ekserji* bu gerçek verimi belirlemeye yöneliktir.

#### 3.1.2. FV Ekserji Verimliliği

FV elektrik üretim santrallerinin enerji analizinde sadece sistem tarafından üretilen elektrik enerjisi hesaplanır veya eviriciden okunan akım ve voltajla bulunur. Ancak diğer çevresel parametreler dikkate alınarak yapılan *ekserji* analizi PV enerji santral sistemlerinin optimizasyonu ve performansı hakkında daha gerçekçi bilgiler verir.

Herhangi bir sistemin *ekserji* verimliliği ( $\Phi$ ), çıkış *ekserjisinin* ( $Ex_{out}$ ) giriş *ekserjisine* ( $Ex_{in}$ ) oranı olarak ifade edilebilir;

$$\Phi = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} \quad (3.33)$$

FV sistemleri *ekserji* verimliliği hesaplamak için giriş *ekserji* ve çıkış *ekserji* sırasıyla Güneş *ekserjisi* ve FV panel sisteminin *ekserjisi* olarak bilinmektedir. *Ekserji* verimliliğini hesaplamak için Güneş radyasyon *ekserjisi* ve FV *ekserjisi* Kesim (3.5)'de incelenmiştir.

Denklem (3.33) 'de FV *ekserjisi*, Denklem (3.29) ve farklı giriş *ekserjisine* sahip Güneş *ekserji* modelleri olan Denklem (3.14), (3.21) ve (3.23) dikkate alınarak, bir FV panel sisteminin *ekserji* verimliliği her model için ayrı ayrı hesaplanabilir.

Petela'nın modeliyle ilgili FV panel sisteminin *ekserji* oranı, ya da verimi aşağıdaki ifade ile verilebilir,

$$\Phi_{pet} = \frac{I_m V_m - \left(1 - \left(\frac{T_a}{T_{cell}}\right)\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_a)}{A I_s \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4\right]} \quad (3.34)$$

Aynı şekilde Spanner ve Parrott Güneş *ekserji* denklemlerini kullanılarak FV panel sisteminin *ekserji* verimlilikleri aşağıdaki ifadelerle tanımlanabilir,

$$\Phi_{span} = \frac{I_m V_m - \left(1 - \left(\frac{T_a}{T_{cell}}\right)\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_a)}{A I_s \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)\right]} \quad (3.35)$$

$$\Phi_{par} = \frac{I_m V_m - \left(1 - \left(\frac{T_a}{T_{cell}}\right)\right) h_{ca} A (T_{cell} - T_a)}{A I_s \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right) (1 - \cos \sigma)^{\frac{1}{4}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4\right)} \quad (3.36)$$

Bu çalışmada gerçek çevre koşullarında şebekeye bağlı bir FV enerji üretim santralının bulunduğu bölge için Petela, Spanner ve Parrott tarafından önerilen Güneş radyasyonu *ekserjisi* 12 ay boyunca alınan ölçümler üzerinden hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca FV enerji üretim santralinde elektrik *ekserjisi*, termal *ekserji* ve enerji verimliliği gölgeli ve gölgesiz diziler için hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak çok yaygın olan Petela *ekserji* modelinden faydalanarak

FV g¼c üretim santralinde ekserji verimliliği iki panel dizisi için hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, Samsun ilinde şebekeye bağlı bir FV güç santralının kurulduğu bölgede Güneş potansiyeli hesaplanmış ve FV panellerin çalışmasını etkileyecek olan çevresel faktörlerden olan gölgeleme etkisine bağlı olarak FV sistemin ürettiği gücün ekserjisi ve kayıp termal ekserjisi ile FV panel yakınına yanlış konumlandırılmış trafo binasından kaynaklanan gölgelemenin etkisini analiz etmek amacıyla yapılmıştır. Bu trafo binası her ne kadar yanlış konumlandırılmışsa da, mevsimlere ve günün farklı saatlerine göre paneller üzerinde yaptığı gölgelemenin FV panel sisteminin gölgelenmeden kaynaklı ekserji analizini yapmaya fırsat vermesi bakımından bir şans olarak değerlendirilmiştir. Zira gölgeleme kısmidir ve gölgelenen panel alanı ile gölgelenmeyen alanların üretimini kıyaslamaya imkân sağlamıştır.

Fotovoltaik Güneş enerji santralının kurulduğu bölgenin rüzgâr hızı, Güneşlenme süresi, Güneş radyasyon gücü ve ortam sıcaklığı 2019-2020 yılı verileri Samsun Meteoroloji 10. Bölge Müdürlüğünden alınmıştır. Veriler 2019 Haziran ve 2020 Mayıs ayları arasında 12 ay için ve her ay için beş günlük değerlerin ortalamasıdır ve çevre ve hava koşulları dikkate alınarak daha gerçekçi bir analiz oluşturabilmek için açık ve Güneşli günlerde alınmıştır. Bu değerler Tablo 4.1' de gösterilmiştir.

Alınan meteoroloji verileri kullanılarak Samsun bölgesi için Petela, Spanner ve Parrott yaklaşımlarına göre Güneş radyasyonunun *ekserjisi*, Güneş radyasyonu *ekserjisinin* Güneş radyasyonu enerjisine oranı (Güneş potansiyeli) hesaplanıp ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca FV güç santralinde bulunan enerji-*ekserji* verimliliklerinin analizi yapıp ve elektrik *ekserji*, termal *ekserji*, enerji ve *ekserji* verimliliği hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Son olarak, aynı FV güç santralinde yanlış konumlandırılmış bir trafo binasının neden olduğu gölgelemenin santralin termal *ekserji* ve performans üzerindeki etkisi alınan ölçümler üzerinden 12 ay boyunca değerlendirilmiştir.

Son olarak, aynı FV güç santralinde yanlış konumlandırılmış bir trafo binasının neden olduğu gölgelemenin etkisi, santralin termal ekserji ve performans üzerinde 12 ay boyunca incelenmiştir.

Tablo 4.1. Meteoroloji verileri ve anlık güç değerleri

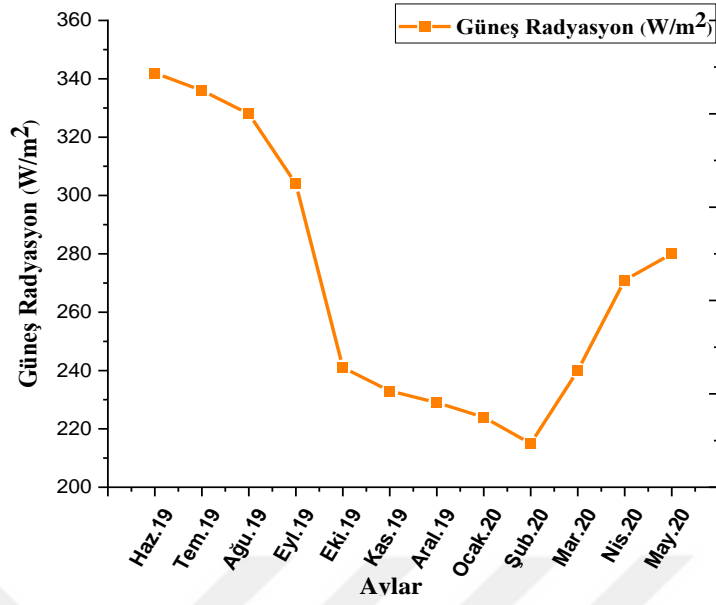
Zaman (Ay)	Güneş ışınımı (w/m <sup>2</sup> )	Rüzgâr Hızı (m/s)	Ortam Sıcaklığı (°K)	Nem (%)	Anlık güç (w)
Haziran.19	342,04	2,90	294,48	79	6116
Temmuz.19	336,10	3,12	296,36	78	5333
Ağustos.19	328,07	3,22	297,72	77	4984
Eylül.19	304,02	2,61	292,81	79	4531
Ekim.19	241,21	2,61	289,51	80	3366
Kasım.19	233,14	2,89	285,63	77	3042
Aralık.19	229,06	3,18	282,74	76	2918
Ocak.20	224,41	3,47	281,12	76	2822
Şubat.20	215,65	3,20	281,47	76	2669
Mart.20	240,36	3,16	282,87	78	3232
Nisan.20	271,13	2,61	285,23	80	4148
Mayıs.20	280,07	2,32	288,64	81	4309

#### 4.1. Çevresel Parametrelerinin Ölçümü

FV sistemin ekserji değerlendirmesinde kurulan bölgenin coğrafi ve iklim şartlarının etkili olduğu ve tesisin kurulmasından önce yapılacak teorik ekserji değerlendirmesinde mutlaka dikkate alınması gereği açıktır. Aksi halde FV enerji tesisinin verimi istenilen ölçüde olmayacaktır. Küçük katkılar ya da kayıplar FV panellerin ekonomik kullanım ömürleri ve sistemin büyüklüğü göz önüne alındığında bir hayli büyük olacaktır.

##### 4.1.1. Güneş Radyasyonu

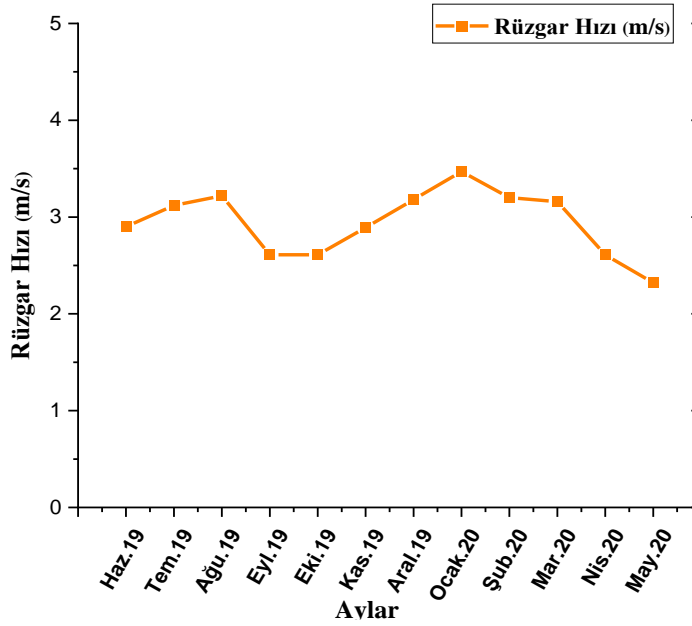
Şekil 4.1 bir yıl boyunca FV panel sisteminin kurulu bulunduğu alanda birim yüzey alana gelen Güneş radyasyonunun gücünün değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi gelen Güneş radyasyonunun yıl boyunca 215 W/m<sup>2</sup> ile 342 W/m<sup>2</sup> arasında değiştiği bulunmuştur. Güneş radyasyonunun maksimum değeri ölçümün alındığı 2019 ve 2020 yıllarının Haziran ayında ve minimum değeri Şubat ayındadır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi gelen Güneş radyasyonunun yılda 215 W/m<sup>2</sup> ile 342 W/m<sup>2</sup> arasında değiştiği bulunmuştur. Güneş radyasyonunun maksimum değeri Haziran 2019'da ve minimum değeri Şubat 2020'dedir.



Şekil 4.1. Bir yıl boyunca Güneş radyasyonunun yoğunluğu

#### 4.1.2. Rüzgâr Hızı

Rüzgâr hızı, bir FV modülünün termal ekserjisini ve ısı kaybını analiz etmek için diğer bir etkili parametredir. FV panel sisteminin kurulduğu yerde rüzgâr hızları Şekil 4.2 gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Bir yıl boyunca FV santralının kurulu olduğu bölgede rüzgâr hızı

Ölçülen ortalama hızı bir yıl boyunca 2,42 m/s ile 3,47 m/s arasında değişmektedir.

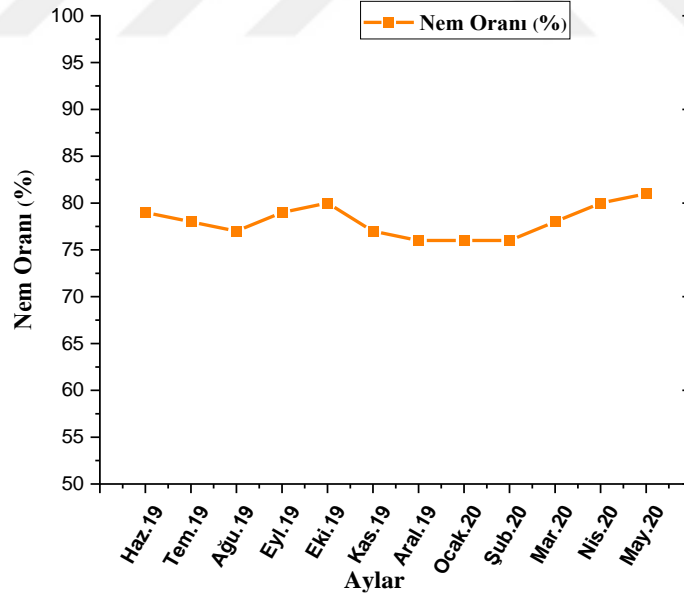
#### 4.1.3. Ortam Sıcaklığı

FV sistemlerin ekserji analizinde ortam sıcaklığının, dolayısıyla FV hücrelerin sıcaklığının panellerin verimlerini önemli ölçüde etkilemektedir. İlerleyen kesimlerde ortam sıcaklığının FV sisteminin verim üzerindeki ve dolayısıyla ekserji üzerindeki etkisi daha detaylı ele alınacaktır.

#### 4.1.4. Nem Oranı

Daha gerçekçi bir analiz oluşturabilmek için FV santralının kurulu olduğu bölgenin aylara bağlı olarak nem oranı alınmıştır.

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, Güneş FV santralının Kurulu olduğu bölgede ortalama nem oranı bir yıl boyunca %76 ile %81 arasında değişmektedir. Maksimum nem oranı Mayıs 2020 ayı için görünmektedir. Aralık, Ocak ve Şubat ayları için nem oranı bölge için eşit olup ve %76 olarak değere sahiptir.



Şekil 4.3. Bir yıl boyunca FV santralının kurulu olduğu bölgede nem oranı

## 4.2. Farklı Güneş Ekserji Yöntemler’ ile, FV Sistemin Ekserji Ölçümü

Spanner, Petela ve Parrott’un Güneş ekserji yaklaşımlarını kullanarak, enerji/ekserji verimliliklerinin analizi ve hesaplamaları yapıp ve ayrıca FV güç

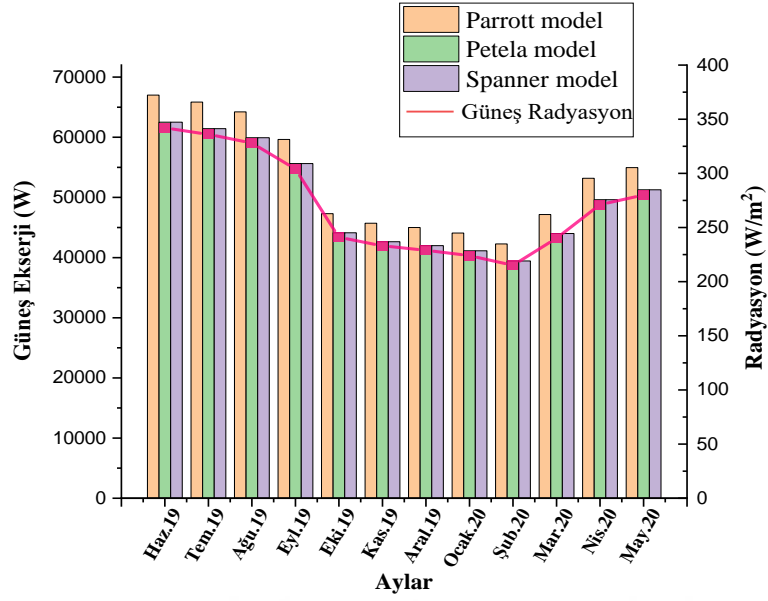
santralinde elektrik ekserji, termal ekserji, enerji ve ekserji verimliliği hesaplanıp ve karşılaştırılmıştır.

### 4.3. Güneş Radyasyonuna Bağlı Olarak Güneş Ekserji Modellerin Değişimi

. Güneş radyasyonuna bağlı *ekserji* modellerinin değişimleri tablo 4.2'de ve grafikleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Gösterildiği gibi Spanner'ın modeli için Güneş *ekserjisi*, Petela'nın modeliyle çok yakındır ve eşit kabul edilebilir. Bunun durum ortam sıcaklığının Güneşin sıcaklığına göre çok düşük olması ve bu Spanner'ın ve Petela'nın Güneş *ekserji* modellerine (Denklem 3.20 ve Denklem 3.21) yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Parrott'un modelinin Güneş ekserjisinin her ay için Spanner ve Petela'nın modelinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Parrott'un modelinde Haziran 2019 ayı içinde 67016 W olan Güneş ekserjisi Şubat 2020'de 42279 W düşerken, Spanner ve Petela'nın modelinde aynı aylar için 62519 W'den 41125 W'a değişiyor. Bu sonuçlardan görüldüğü gibi, Güneş radyasyonunun artması FV dizisinin Güneş ekserjisini arttırmaktadır ve giriş ekserjisi doğrudan Güneş radyasyonuna bağlıdır.

Tablo 4.2. Farklı aylar için Güneş radyasyonunun Güneş ekserji modelleri üzerindeki etkisi.

Zaman (Ay)	Güneş ekserji	Güneş ekserji	Güneş ekserji
	Petela $Ex_{pet}$ (W)	Spanner $Ex_{span}$ (W)	Parrott $Ex_{parr}$ (W)
Haziran.19	62519	62519	67016
Temmuz.19	61430	61430	65849
Ağustos.19	59921	59921	64231
Eylül.19	55630	55630	59632
Ekim.19	44127	44127	47301
Kasım.19	42648	42648	45716
Aralık.19	41989	41989	45009
Ocak.20	41125	41125	44084
Şubat.20	39442	39442	42279
Mart.20	43993	43993	47157
Nisan.20	49620	49620	53190
Mayıs.20	51277	51277	54965

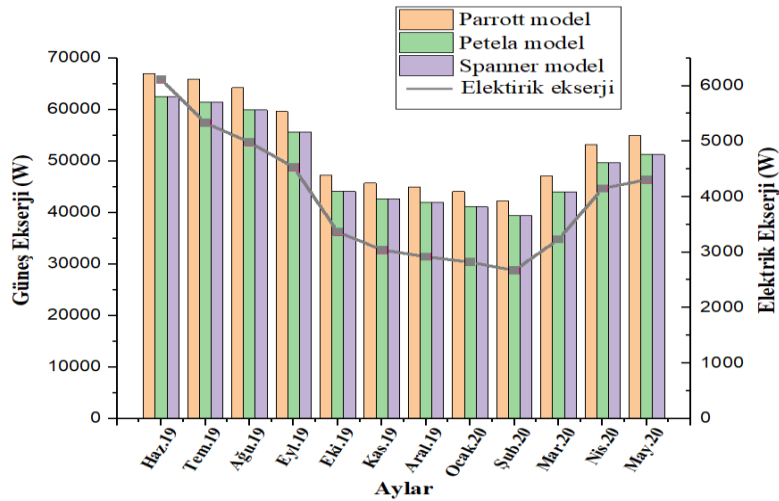


Şekil 4.4. Farklı aylar için Güneş radyasyonunun Güneş ekserji modelleri üzerindeki etkisi

Samsun bölgesi için Petela ve Spanner'ın yaklaşımına bağlı olarak Güneş radyasyonu ekserjisinin Güneş radyasyonu enerjisine oranı (Güneş potansiyeli) 0.93 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Alta et al. (2010) ve Arslanoğlu et al. (2016) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumludur. Parrott'un modeline bağlı olarak Güneş radyasyonu ekserjisinin Güneş radyasyonu enerjisine oranı 0.99'a ulaşmıştır. Parrott'un modelindeki ortalama Güneş radyasyonu ekserjisi, her ay için Spanner ve Petela'nın modelinden yaklaşık %6 daha yüksek bulunmuştur.

#### 4.3.1. Farklı Aylar İçin Güneş ve Elektriksel Ekserji Değerlerinin Değişimi

FV dizisinin farklı aylar için Güneş ekserjisi ve elektriksel ekserji değerlerinin değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Bir yıllık elektriksel ekserji ve Güneş ekserji modelleri

### 4.3.2. Farklı Aylar İçin Enerji ve Ekserji Verimliklerinin Değişimi

Farklı aylar için enerji ve Güneş ekserjisine bağlı ekserji verimlerinin değişimi Tablo 4.3 gösterilmektedir. Gösterilen sonuçların değerlerinden, Güneş ekserji modellerine ilişkin ekserji verimliliğinin ( $\psi$ ), enerji verimliklerinin ( $\eta_{pce}$ ) daha düşük olduğu açıktır. FV güç sisteminin kurulduğu bölgenin çevresel faktörlerinin çıkış gücü üretimini büyük ölçüde etkilediği ancak Güneşten gelen radyasyonun yoğunluğunun sistemin ekserji çıkışını doğrudan artırmadığı görülmektedir. Analiz edilen FV güç sisteminin enerji ve ekserji verimliliği değerleri Bayrak et al. (2017) tarafından yayınlanan değerleriyle uyumludur. Enerji verimliliği ( $\eta_{pce}$ ) değeri Haziran 2019'da %9,12'den Şubat 2020'de %6,33'e değişiyor ve ekserji tüm modeller için %4,97 ile %7,82 arasında değişmektedir.

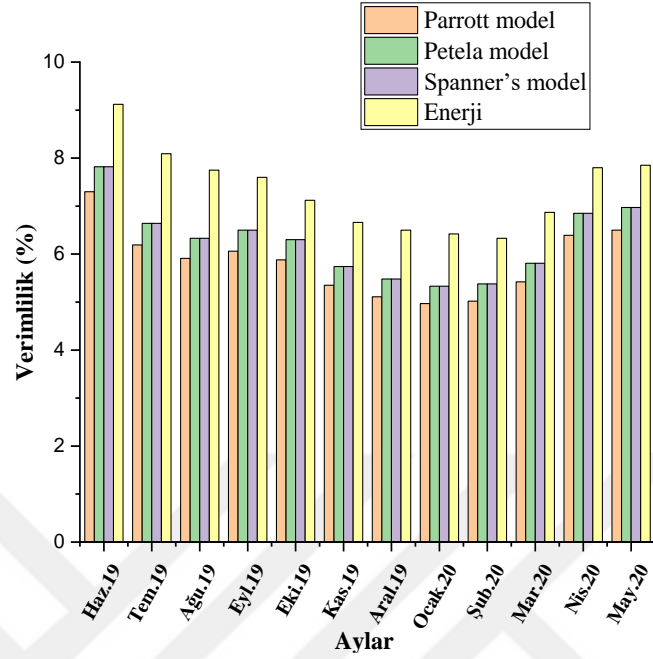
Tablo 4.3. FV sistemi farklı aylar için enerji ve ekserji verimlerinin değişimi

Zaman (Ay)	$\eta_{pce}$ (%)	$\Psi_{pet}$ (%)	$\Psi_{span}$ (%)	$\Psi_{parr}$ (%)
Haziran.19	9,12	7,82	7,82	7,30
Temmuz.19	8,09	6,64	6,64	6,19
Ağustos.19	7,75	6,33	6,33	5,91
Eylül.19	7,60	6,50	6,50	6,06
Ekim.19	7,12	6,30	6,30	5,88
Kasım.19	6,66	5,74	5,74	5,35
Aralık.19	6,50	5,48	5,48	5,11
Ocak.20	6,42	5,33	5,33	4,97
Şubat.20	6,33	5,38	5,38	5,02
Mart.20	6,87	5,81	5,81	5,42
Nisan.20	7,80	6,85	6,85	6,39
Mayıs.20	7,85	6,97	6,97	6,50

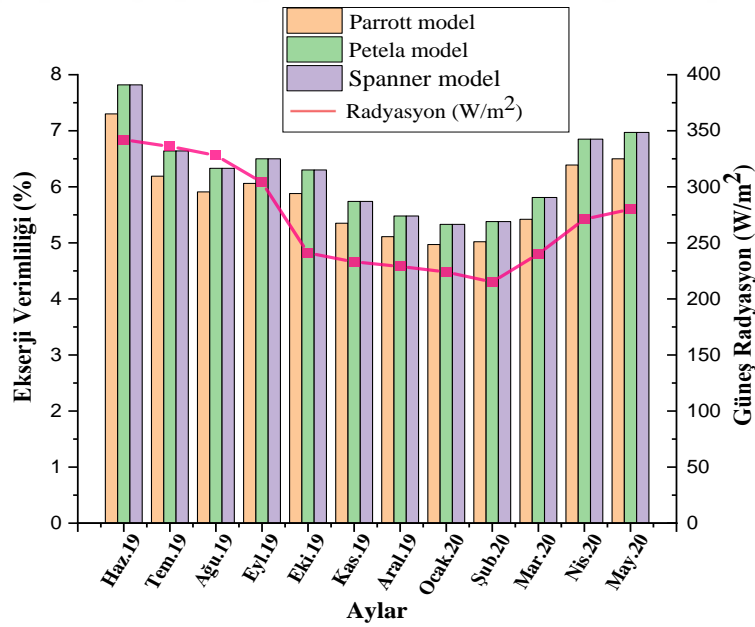
Tablo 4.3'te gösterildiği gibi, Spanner ve Petela'nın yaklaşımına ilişkin ekserji verimliliği, her ay için Parrott'un modelinden daha yüksektir. Daha iyi anlatmak için bir yıl boyunca Spanner, Petela ve Parrott'un modeliyle ilgili enerji ve ekserji verimlerinin değişimi ve karşılaştırmaları, şekil 4.6 ve 4.7' gösterilmiştir.

Spanner ve Petela'nın modeline göre ekserji verimliliği Haziran 2019'da yaklaşık %7,82'den Ocak 2020'de %5,33'a, Parrott'un solar ekserji modelinde ise aynı aylar için %7,30'dan %4,97'e değişmektedir. Güneş ekserji modelleriyle ilgili, Parrott modeli

için giriş ekserjisindeki %6 artışı, ekserji verimliliğinde %6 azalmaya neden olmuştur. Parrott'un modelini



Şekil 4.6. 12 ay boyunca Spanner, Petela ve Parrott'un modeliyle ilgili enerji ve ekserji verimlerinin değişimi



Şekil 4.7. Yıl boyunca Spanner, Petela ve Parrott'un modeliyle ilgili ekserji verimlerinin değişimi ve karşılaştırılması

kullanan ekserji verimliliği, her ay için Spanner ve Petela'nın modelinden yaklaşık %6 daha azdır.

#### 4.4. Farklı Gölgeleme Oranlarında FV Sisteminin Ekserji Ölçümü

FV güç santralının kurulu olduğu bölgede çevresel parametreleri dikkate alarak, trafo binasından kaynaklanan gölgeleme etkisinin enerji ve ekserji üzerine 12 ay boyunca izlenmiş ve hesaplanmıştır. Ush-Array ve farklı gölgeleme oranlarına sahip Sh-Array dizisinin hücre sıcaklığı, elektriksel ekserji, termal ekserji, enerji ve ekserji verimliliğinin değişimi analiz edilmiştir.

##### 4.4.1. Hücre Sıcaklığı Ölçümleri

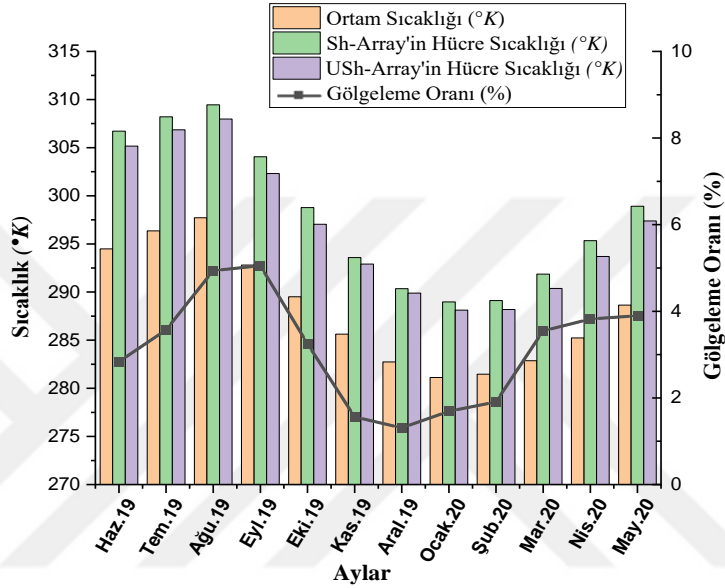
FV sistemlerin ekserji analizinde ortam sıcaklığının ve hücre sıcaklığının etkisinin önemli olduğu bilinmektedir. FV hücrelerin sıcaklığının artması panel sistemlerinde gözardı edilemeyecek termal kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada USh-Array ve Sh-Array hücre sıcaklıklarının dış ortam sıcaklığında karşılaştırılması Tablo 4.4 ve grafiği Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Tablo 4.4. USh-Array ve Sh-Array dizilerin hücre sıcaklıklarının bir yıl boyunca farklı gölgeleme oranlarıyla değişimi

Months	USh-Array	Sh-Array	
	T <sub>cell</sub> (°K)	T <sub>cell</sub> (°K)	Gölgeleme Oranı (%)
Haziran.19	305,16	306,72	2,84
Temmuz.19	306,86	308,20	3,57
Ağustos.19	307,97	309,45	4,94
Eylül.19	302,31	304,06	5,05
Ekim.19	297,04	298,78	3,25
Kasım.19	292,91	293,58	1,56
Aralık.19	289,89	290,35	1,31
Ocak.20	288,12	288,97	1,69
Şubat.20	288,18	289,11	1,91
Mart.20	290,37	291,86	3,55
Nisan.20	293,69	295,34	3,82
Mayıs.20	297,39	298,91	3,90

Tablo 4.4'te görüldüğü gibi gölgelemeden etkilenen dizinin hücre sıcaklıkları gölgelemeden etkilenmeyen dizisinden daha yüksektir. Bunun nedeni, gölgeleme alanlarında oluşan sıcak nokta ve bölgelerin oluşumudur.

Tablo 4.4'te görüldüğü gibi gölgelemeden etkilenen dizinin hücre sıcaklıkları gölgelemeden etkilenmeyen dizisinden daha yüksektir. Bunun nedeni, gölgeleme alanlarında oluşan sıcak nokta ve bölgelerin oluşumudur.



Şekil 4.8. USh-Array ve Sh-Array hücre sıcaklıklarının ortam sıcaklığında

Ağustos 2019'da USh-Array için en yüksek hücre sıcaklığı 307,96 K ve Sh-Array için 309,45 K'dir. Şubat 2020'de USh-Array için en düşük hücre sıcaklığı 288,12 K ve Sh-Array için 288,97 K'dir.

#### 4.4.2. Elektrik Ekserji Ölçümü

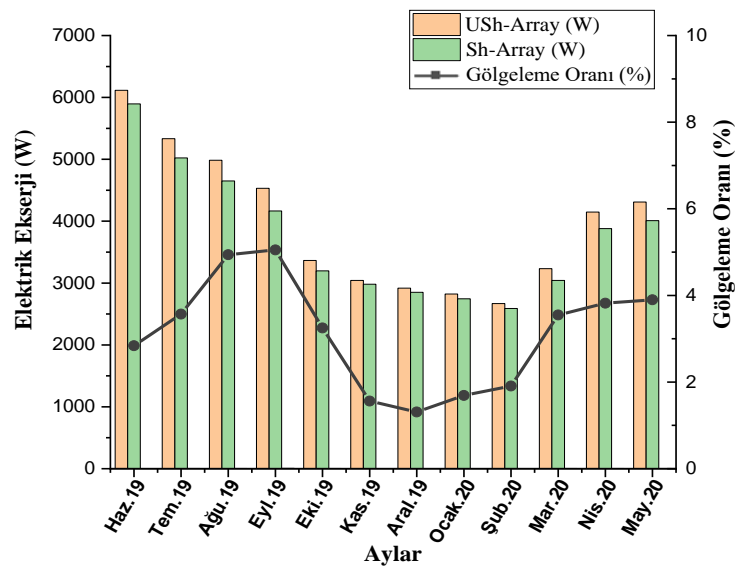
Elektrik ekserjisi, bir sistemden üretilebilecek maksimum elektrik olarak tanımlanmaktadır. Gölgelemeden etkilenmeyen USh-Array ve farklı gölgeleme koşullarına sahip Sh-Array'in elektrik ekserji (maksimum elektrik güç) bir yıl içindeki değişimi Tablo 4.5 ve grafiği Şekil 4.9'de gösterilmektedir.

Tablo 4.5'de görüldüğü gibi, tipik olarak gölgelemeden etkilenen dizinin elektriksel ekserjisi gölgelemeden etkilenmeyen diziden daha düşüktür. FV sistemindeki artan gölgeleme oranı nedeniyle, elektrik ekserjisinin kayıp oranı Haziran'dan Eylül'e kadar artmıştır. Eylül ayından Kasım ayına kadar elektriksel ekserji kaybı azalmıştır. Aralık 2020'den Haziran 2020'ye kadar gölgeleme oranı arttıkça kayıp elektrik ekserjisi oranı

tekrar artmıştır. Haziran 2019'da USh-Array için en yüksek elektriksel ekserji 6116 W ve Sh-Array için 5895 W'dir. Ayrıca Şubat 2020'de USh-Array için en düşük elektriksel ekserji 2669 W ve Sh-Array için 2588 W olarak ölçülmüştür. Sonuçları daha iyi karşılaştırmak için bu sonuçlar Şekil 4.9'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. USh-Array ve Sh-Array'in bir yıl boyunca elektrik ekserji değerleri

Months	USh-Array		Sh-Array	
	Exelec (W)	Exelec (W)	Gölgeleme (%)	Oranı
Haziran.19	6116	5895	2,84	
Temmuz.19	5333	5022	3,57	
Ağustos.19	4984	4650	4,94	
Eylül.19	4531	4165	5,05	
Ekim.19	3366	3196	3,25	
Kasım.19	3042	2981	1,56	
Aralık.19	2918	2850	1,31	
Ocak.20	2822	2746	1,69	
Şubat.20	2669	2589	1,91	
Mart.20	3232	3042	3,55	
Nisan.20	4148	3880	3,82	
Mayıs.20	4309	4009	3,90	



Şekil 4.9. USh-Array ve gölgelemenmeden etkilenen Sh-Array'in bir yıl boyunca elektrik ekserji değişimi

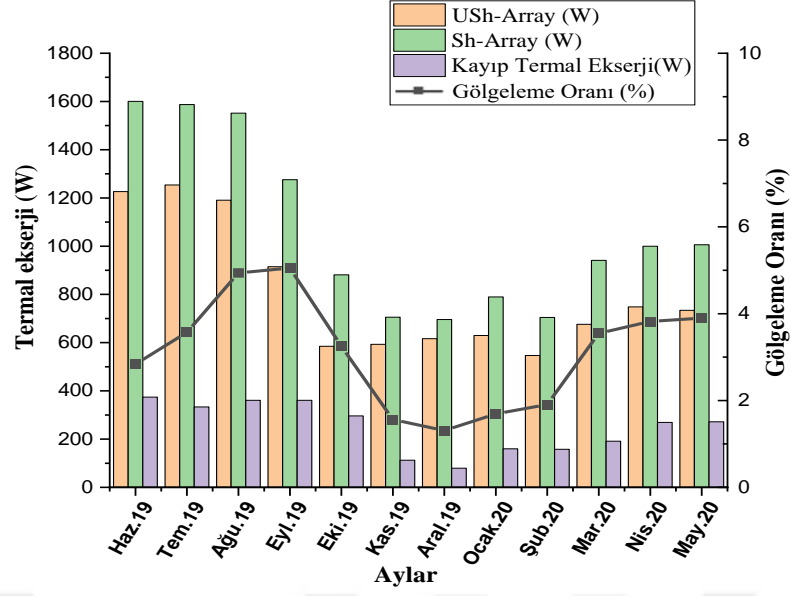
#### 4.4.3. Termal Ekserji Ölçümü

FV yüzeyinden çevreye olan ısı kaybı, termal ekserji olarak ifade edilebilir. Gölgelemeden etkilenmeyen USh-Array ve farklı gölgeleme koşullarına sahip Sh-Array'in 12 ay boyunca termal ekserji değişimi Tablo 4.6 ve grafiği Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

Tablo 4.6 ve şekil 4.10'a baktığımız zaman, termal ekserji gölgeleme oranına bağlı olarak değişmemektedir. Ek olarak, gölgelemeden etkilenen dizinin termal ekserjisi gölgelemeden etkilenmeyen diziden daha yüksektir. USh-Array için en yüksek termal ekserji Temmuz 2019'da 1253 W ve Sh-Array için Haziran 2019'da 1600 W'dir. Ayrıca, USh-Array için en düşük termal ekserji Şubat 2020'de 546 W ve Sh-Array için Şubat 2020'de 704 W'tır. Sonuç olarak, iki diziyi karşılaştırdığımız zaman maksimum termal ekserji kaybı Haziran 2019'da 374 W ve Şubat 2020'de minimum termal ekserji kaybı 158 W'dir. Ortalama %3,11 gölgeleme oranı, bir yıl boyunca termal ekserjide %23,32 artışa neden olmuştur.

Tablo 4.6. USh-Array ve Sh-Array'in termal ekserji değişimi

Months	USh-Array	Sh-Array	Gölgeleme Oranı (%)
	$E_{x_{thermal}}$ (W)	$E_{x_{thermal}}$ (W)	
Haziran.19	1226	5895	2,84
Temmuz.19	1253	5022	3,57
Ağustos.19	1190	4650	4,94
Eylül.19	915	4165	5,05
Ekim.19	585	3196	3,25
Kasım.19	593	2981	1,56
Aralık.19	616	2850	1,31
Ocak.20	630	2746	1,69
Şubat.20	546	2589	1,91
Mart.20	676	3042	3,55
Nisan.20	748	3880	3,82
Mayıs.20	734	4009	3,90



Şekil 4.10. USh-Array ve gölgelemeden etkilenen Sh-Array'in termal ekserji değişimi

#### 4.4.1. Enerji ve Ekserji Verimliklerinin Ölçümü

FV sisteminin farklı oranlarla gölgeden etkilenen Sh-Array ve gölgeden etkilenmeyen USh-Array koşulları için enerji ve ekserji verimliklerinin oranı ve kayıp verimlilik oranı grafikleri, farklı aylar için Tablo 4.7' de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Sh-Array ve USh-Array koşulları için enerji ve ekserji verimleri

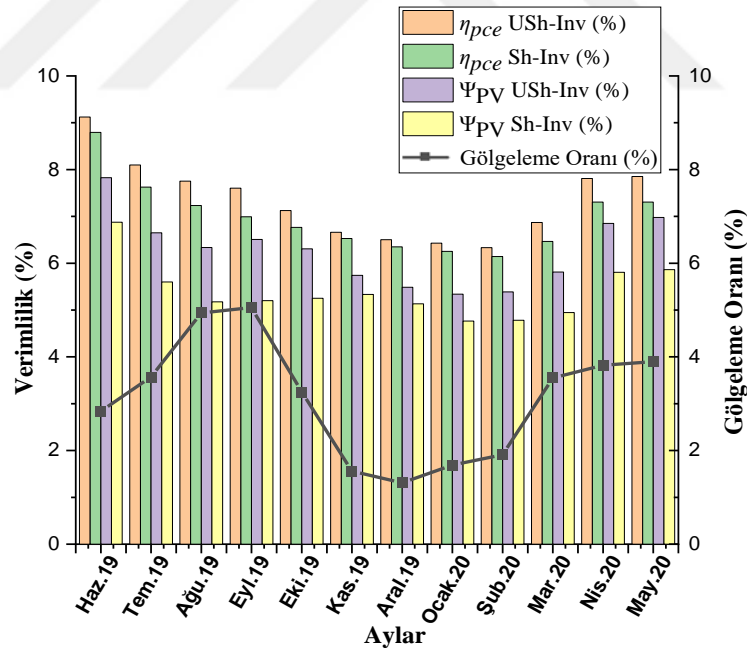
Months	USh-Array		Sh-Array		Shading Ratio (%)
	$\eta_{pce}$ (%)	$\Psi_{PV}$ (%)	$\eta_{pce}$ (%)	$\Psi_{PV}$ (%)	
Haziran.19	9,12	7,82	8,79	6,87	2,84
Temmuz.19	8,09	6,64	7,62	5,59	3,57
Ağustos.19	7,75	6,33	7,23	5,17	4,94
Eylül.19	7,60	6,50	6,99	5,20	5,05
Ekim.19	7,12	6,30	6,76	5,25	3,25
Kasım.19	6,66	5,74	6,52	5,33	1,56
Aralık.19	6,50	5,48	6,34	5,13	1,31
Ocak.20	6,42	5,33	6,25	4,76	1,69
Şubat.20	6,33	5,38	6,14	4,78	1,91
Mart.20	6,87	5,81	6,46	4,94	3,55
Nisan.20	7,80	6,85	7,30	5,80	3,82
Mayıs.20	7,85	6,97	7,34	5,86	3,90

Tablo 4.7'de görüldüğü gibi, gölgelemeden etkilenen Sh-Array dizisindeki enerji verimliliği ve ekserji verimliliği, gölgelemeden etkilenmeyen USh-Array dizisinden daha düşüktür. Ayrıca ekserji verimliliği, tüm koşullar için enerji verimliliğinden daha düşüktür.

Haziran 2019'da USh-Array dizi için en yüksek enerji verimliliği değeri %9,12 ve Sh-Array için %8,79'dur. Şubat ayında en düşük değer USh-Array için %6,33 ve Sh-Array için %6,14 hesaplanmıştır.

Gölgelemeden etkilenmeyen USh-Array için ekserji verimliliği değeri Haziran 2019'da %7,82 ile Şubat 2020'de %5,38 arasında değişirken, Sh-Array için ekserji verimliliği değeri Haziran 2019'da %6,87 ile Ocak 2020'de %4,76 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, Kumar et al. (2020) tarafından rapor edilen sonuçlarla iyi bir uyum içindedir.

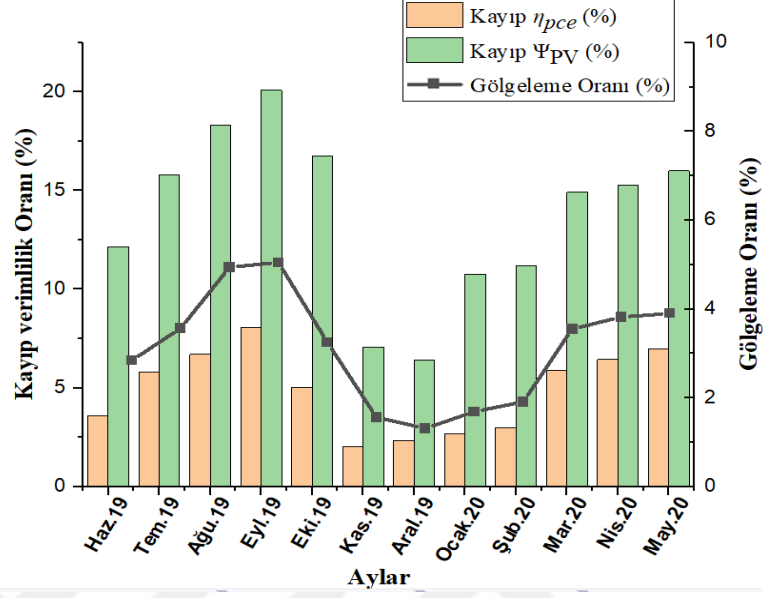
Sonuçları daha iyi karşılaştırmak için bu sonuçlar Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Ayrıca, FV sistemlerin Sh-Array ve USh-Array koşulları için kayıp verimlilik oranı grafikleri farklı aylar için Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Sh-Array ve USh-Array koşulları için enerji ve ekserji verimliliğinin değişimi

Şekil 4.12, kayıp enerji verimliliği ile kayıp ekserji verimliliğinin gölgeleme oranına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. En yüksek kayıp enerji verimlilik oranı Eylül 2019'da %8,07 ve en düşük kayıp güç dönüşüm verimlilik oranı Kasım 2019'da %2,01'dir. Sonuç olarak, maksimum kayıp ekserji verimliliği Eylül 2019'da

%20,08 ve minimum kayıp ekserji verimlilik oranı 7,08'dir. Bir yıl boyunca ortalama gölgeleme oranında %3,11, bir yıl boyunca güç dönüşümünde %4,88 ve ekserji verimliliğinde %13,72 kayıplara neden olmuştur.



Şekil 4.12. Sh-Array ve USh-Array'in kayıp enerji ve ekserji verimlilik oranı

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını kullanılarak, Türkiye'de şebekeye bağlı bir FV güç santralının Güneş ekserjisi, enerji ve ekserji verimliliği 12 ay boyunca analiz edilmiştir.

İlk olarak Parrott, Spanner ve Petela'nın Güneş ekserji yaklaşımlarını kullanarak, santralin kurulu olduğu bölgeye ait Güneş ekserjisi ve Güneş potansiyeli hesaplanıp ve karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımlarla ilgili ekserji verimliliği analiz edilmiştir ve karşılaştırılmıştır.

Ayrıca bu FV santralının elektrik üretimi üzerine yanlış konumlandırılmış bir trafo binasının gölgelenmesinin yarattığı termal ekserji olgusu, bir yıl boyunca enerji ve ekserji verimliliği üzerinde analiz edilmiş ve tartışılmıştır.

Bu çalışmanın ana sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi çevresel faktörler, FV santral sistemlerinin performansı üzerinde etkili parametrelerdir.
- Güneş ekserjisi doğrudan güneş radyasyonuna bağlıdır.
- Samsun bölgesi için ortalama güneş ekserjisi-güneş radyasyon enerjisi oranı (güneş potansiyeli) %93 olarak bulunmuştur ve bu Petela ve Spanner'ın yaklaşımıyla ilgilidir. Parrott modeli için bu oran Samsun bölgesi için %99 oranına kadar ulaşmaktadır.
- Parrott'un Güneş ekserji yaklaşımını kullanarak FV ekserji verimliliği, yılın 12 ayı boyunca %4,97 ile %7,30 arasında değiştiği gözlenmiştir. Petela ve Spanner'ın Güneş ekserji modelinde ise bu oran %5,33'dan %7,82'a değişmektedir.
- Parrott'un ekserji verimliliği modeli, her ay için Spanner ve Petela'nın modelinden yaklaşık %6 daha azdır.
- FV sistemlerinde oluşan hücrelerin sıcaklığı, üzerine düşen gölgeli alanın oranına bağlı olarak değişir. Kısmi gölgelemenin neden olduğu ters akımın modül üzerinde yüksek sıcaklığa neden olduğu sonucuna varılmıştır.
- Gölgeleme oranı arttıkça FV santralin çıkış elektrik gücü azalır.
- Gölgeleme oranı arttıkça termal ekserji artar.
- Çıkış ekserji değeri doğrudan güneş radyasyonu yoğunluğuna bağlı değildir.

- FV güç sisteminin ekserji verimliliği, FV hücre sıcaklığından ters yönde etkilenir.
- Çevresel parametreler (rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı, hücre sıcaklığı vb) FV güç sisteminin ekserji verimliliği üzerinde kayda değer bir etkiye sahiptir.
- Ekserji verimliliği, tüm koşullar için enerji verimliliğinden daha düşüktür, çünkü ekserji verimliliğinde çevresel parametreler dikkate alınarak daha gerçekçi sonuçlar verir.
- Bir yıl boyunca yaklaşık %3,11'lik gölgeleme oranı termal ekserjide yaklaşık %23,32 oranında bir artışa, enerji verimliliğinde %4,88 oranında bir kayba ve ekserji verimliliğinde yaklaşık %13,72 oranında bir kayba neden olmaktadır.

Sonuçlar göz önüne alındığında, FV sistemlerini kurmadan önce, kurulu olan bölge için çevresel parametrelerin dikkatlice analiz edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Kurulu olan bölgenin güneş potansiyelini iyice anlamamız, ayrıca enerji analizinin yanında ekserji analizinin de önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Yanlış konumlandırılmış bir trafo binasının neden olduğu gölgelemenin panellerin çalışmasını önemli ölçüde etkileyeceği sonucuna varılabilir. Ayrıca gölgeleme nedeniyle panellerde oluşan hücrelerin sıcaklığı, güneş enerjisi modülüne zarar verme riskini artırmaktadır. Bir öneri olarak, FV santralinde gölgeleme etkilerinden ve termal kayıplardan kaçınmak için trafo binasının doğru yerde yapılması önemlidir.

Burada belirlenen ve dikkate alınan termal etkilere ek olarak, FV sistemlerin kurulu olduğu bölgelerdeki havanın nem oranı, tozlanma, belki rüzgar yöne ve şiddeti gibi etkiler her üç modelde sıcaklık kapsamında dikkate alınmış iken, daha gerçekçi bir yaklaşım olarak bu etkileri ayrı ayrı parametrelerle denklemlerde belirtilebilir. Bu yolla oluşturulan model özel ve orijinal olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Agrawal, S., and Tiwari, G. N. (2011). Energy and exergy analysis of hybrid micro-channel photovoltaic thermal module. *Solar Energy*, 85(2), 356-370.
- Akyuz, E., Coskun, C., Oktay, Z., and Dincer, I. (2012). A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency. *Energy*, 44(1), 1059-1066.
- Alonso-García, M. C., Ruiz, J. M., and Herrmann, W. (2006). Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays. *Renewable Energy*, 31(12), 1986-1993.
- Alsaidy, B., Alsadi, S., Jallad, J., and Dreidy, M. (2013). Partial shading of PV system simulation with experimental results. *Smart Grid and Renewable Energy*, 11(4), 429-435.
- Alta, D., Ertekin, C., and Evrendilek, F. (2010). Quantifying spatio-temporal dynamics of solar radiation exergy over Turkey. *Renewable Energy*, 35(12), 2821-2828.
- Anonim. (2019). Enerji Atlası. <https://www.enerjiatlas.com/ulkelere-gore-gunesenerjisi.html>. (Erişim Tarihi: 08.1.2021)
- Arslanoglu, N. (2016). Empirical modeling of solar radiation exergy for Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1033-1040.
- Bayrak, F., and Oztop, H. F. (2020). Effects of static and dynamic shading on thermodynamic and electrical performance for photovoltaic panels. *Applied Thermal Engineering*, 169, 114900.
- Bayrak, F., Ertürk, G., and Oztop, H. F. (2017). Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 164, 58-69.
- Bayrak, F., Oztop, H. F., and Selimefendigil, F. (2019). Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. *Solar Energy*, 188, 484-494.
- Dhimish, M. (2020). Thermal impact on the performance ratio of photovoltaic systems: A case study of 8000 photovoltaic installations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100693.
- Dincer, I., and Rosen, M. A. (2005). Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(2), 169-189.
- Ghabuzyan, L., Kuo, J. and C. Baldus-Jeursen (2020, Kasım). “Quantifying the Effects of Convective Heat Transfer on Photovoltaic Performance and Optimal Tilt Angle“. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers.
- Ghabuzyan, L., Pan, K., Fatahi, A., Kuo, J., and Baldus-Jeursen, C. (2021). Thermal Effects on Photovoltaic Array Performance: Experimentation, Modeling, and Simulation. *Applied Sciences*, 11(4), 1460.
- Goodrich, A., James, T., and Woodhouse, M. (2012). Residential, commercial, and utility-scale photovoltaic (PV) system prices in the United States: current drivers and cost-reduction opportunities (No. NREL/TP-6A20-53347). *National Renewable Energy Lab.(NREL)*, Golden, CO (United States).
- Hepbasli, A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 593-661.
- Hepbasli, A., and Alsuhaibani, Z. (2014). Estimating and comparing the exergetic solar radiation values of various climate regions for solar energy utilization. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(7), 764-773.

- Iakovidis, F., and Ting, D. S. K. (2014, Kasim). "Effect of Free Stream Turbulence on Air Cooling of a Surrogate PV Panel". In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Quebec, Canada.
- Jamil, B., and Bellos, E. (2019). Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1-16.
- Jeter, S. M. (1981). Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation. *Solar Energy*, 26(3), 231-236.
- Joshi, A. S., Dincer, I., and Reddy, B. V. (2009). Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83(8), 1139-1149.
- Khaing, H. H., Liang, Y. J., Htay, N. N. M., and Fan, J. (2014). Characteristics of different solar PV modules under partial shading. *Eng International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 8, 1328-1332.
- Khorasanizadeh, H., and Sepehrnia, M. (2020). Solar exergy evaluation and empirical model establishment; case study: Iran. *Heliyon*, 6(12), e05638.
- Kumar, N. M., Subramaniam, U., Mathew, M., Ajitha, A., and Almakhles, D. J. (2020). Exergy analysis of thin-film solar PV module in ground-mount, floating and submerged installation methods. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100686.
- Madhanmohan, V. P., Nandakumar, M., and Saleem, A. (2020). Enhanced performance of partially shaded photovoltaic arrays using diagonally dispersed total cross tied configuration. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-19.
- Maleki, A., Ngo, P. T. T., and Shahrestani, M. I. (2020). Energy and exergy analysis of a PV module cooled by an active cooling approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(6), 2475-2485.
- Martínez-Moreno, F., Muñoz, J., and Lorenzo, E. (2010). Experimental model to estimate shading losses on PV arrays. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(12), 2298-2303.
- Parlak, K. S. (2014). FPGA based new MPPT (maximum power point tracking) method for PV (photovoltaic) array system operating partially shaded conditions. *Energy*, 68, 399-410.
- Parrott, J. E. (1978). Theoretical upper limit to the conversion efficiency of solar energy. *Solar Energy*, 21(3), 227-229.
- Petela, R. (1964). Exergy of heat radiation. *Journal of Heat Transfer*, 86(2), 187-192
- Sahin, A. D., Dincer, I., and Rosen, M. A. (2007). Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(2-3), 153-159.
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A.M.I.N. and Adeli, M.M., 2010. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy*, 87(7), 2328-2339.
- Sathyanarayana, P., Ballal, R., Sagar, P. L., and Kumar, G. (2015). Effect of shading on the performance of solar PV panel. *Energy and Power*, 5(1A), 1-4.
- Sopian, K., Alwaeli, A. H., Al-Shamani, A. N., and Elbreki, A. M. (2019). Thermodynamic analysis of new concepts for enhancing cooling of PV panels for grid-connected PV systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(1), 147-157.
- Spanner, D. C. (1964). Introduction to thermodynamics. *Introduction to Thermodynamics*, 1(2), 71-3392.

- Tarabsheh, A. A., Akmal, M., and Ghazal, M. (2021). Improving the Efficiency of Partially Shaded Photovoltaic Modules without Bypass Diodes. *Electronics*, 10(9), 1046.
- Varınca, K. B., ve Gönüllü, M. T. (2006, Haziran). “Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi”. *Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerji Kongresi*, Esoğu, Eskişehir.
- Vasel, A., and Iakovidis, F. (2017). The effect of wind direction on the performance of solar PV plants. *Energy Conversion and Management*, 153, 455-461.
- Vijayalekshmy, S., Bindu, G. R., and Iyer, S. R. (2016). A novel Zig-Zag scheme for power enhancement of partially shaded solar arrays. *Solar Energy*, 135, 92-102.
- Williams, R. (1960). Becquerel photovoltaic effect in binary compounds. *The Journal of Chemical Physics*, 32(5), 1505-1514.
- Wu, S. Y., Wu, Y. Y., Xiao, L., and Yang, Z. (2018). Experimental study of natural convection heat transfer from a nonuniformly heated flat plate simulating PV panel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(1).
- Wu, Y. Y., Wu, S. Y., and Xiao, L. (2017). Numerical study on convection heat transfer from inclined PV panel under windy environment. *Solar Energy*, 149, 1-12.
- Würfel, P. (2002). Thermodynamic limitations to solar energy conversion. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 18-26.
- Yazdanpanahi, J., Sarhaddi, F., and Adeli, M. M. (2015). Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses. *Solar Energy*, 118, 197-208.
- Zamfirescu, C., and Dincer, I. (2009). How much exergy one can obtain from incident solar radiation?. *Journal of Applied Physics*, 105(4), 044911.
- Zhou, J. C., Zhang, Z., Liu, H. J., and Yi, Q. (2017). Temperature distribution and back sheet role of polycrystalline silicon photovoltaic modules. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1296-1303.

## ÖZ GEÇMİŞ

Seyyed Hamed Pour Rahmati, 2011 lisansını Fizik Bölümünden Tabriz Payame nouri Üniversitesi'nden bitirdikten sonra, Tabriz Üniversitesi Fizik Fakültesi'nden 2015 yılında yüksek lisans programından mezun oldu. 2015 yılında OMÜ LEE Fizik Anabilim Dalı Doktora programına girdi. Mezuniyetinden bu yana Ar-ge olarak görev yapan Hamed Pour Rahmati, iyi derecede İngilizce ve farsça bilmektedir.

### İletişim Bilgileri

Öğrenci no :15210108

ORCID ID : 0000-0002-6735-7253

### Yayınlar:

1. Keskin, V., Khalejan, S.H.P.R., Çıkla, R. (2021). Investigation of the shading effect on the performance of a grid-connected PV plant in Samsun/Turkey. *Politeknik Dergisi*, pp.1-1.
2. Khalejan S.H.P.R., Keskin, V., Fojlaley, V. (2021). Ex vivo investigation of the thermal and structural effects of plasma needle on teeth. *World Journal of Environmental Biosciences*, 143-147.
3. Khalejan S.H.P.R., Keskin, V., Fojlaley, V. (2021). Effects of the atmospheric non-thermal plasma jet on the nutrient factors and microorganism of raw milk. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*, 8(3), 4744-4747.

### Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. İstanbul Uluslararası Buluş Fuarı ISIF'20. Reducing the emission of pollutants diesel vehicles, Gümüş madalya, 2020.