

**TEKİRDAĞ KOŞULLARINDA POLİKRİSTAL VE  
MONOKRİSTAL TİP PV GÜNEŞ PANELLERİNİN  
VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRILMASI**

**İsmail ARSLAN  
Yüksek Lisans TEZİ  
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI  
Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU**

**2018**

**T.C**

**NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEKİRDAĞ KOŞULLARINDA POLİKRİSTAL VE MONOKRİSTAL  
TİP PV GÜNEŞ PANELLERİNİN VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRILMASI**

**İsmail ARSLAN**

**BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Danışman: Prof. Dr. BİROL KAYIŞOĞLU**

**TEKİRDAĞ-2018**

**Her Hakkı Saklıdır**

Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU danıŐmanlıĐında İsmail ARSLAN tarafından hazırlanan “Tekirdağ koşullarında Polikristal ve monokristal tip PV guneŐ panellerinin verimlilik karşılaştırılması” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri BaŐkanı :

*İmza :*

Üye :

*İmza :*

Üye :

*İmza :*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TEKİRDAĞ KOŞULLARINDA POLİKİKRİSTAL VE MONOKİKRİSTAL TİP PV GÜNEŞ PANELLERİNİN VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRILMASI

**İsmail ARSLAN**

Namık Kemal Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Dünyanın en önemli ve en büyük enerji kaynağı güneştir. Madde ve enerji akışları güneş enerjisi sayesinde olabilmektedir. Bununla beraber rüzgâr, deniz dalgası, okyanusta sıcaklık farkı ve biyokütle enerjileri, güneş enerjisini değişim geçirmiş biçimleridir ve günümüzde yine enerji elde etmek için kullanılır. Güneş enerjisi her şeyden önce bol ve tükenmeyen temiz bir enerji kaynağıdır. Yerel bölgesel uygulamalar için oldukça elverişlidir. Bu tez çalışması kapsamında; monokristal ve polikristal panellerin Tekirdağ şartlarında verimlilikleri incelenmiştir. Araştırma çerçevesinde; gelen ışınım miktarı, akım, gerilim, panelin ürettiği güç parametreleri üzerinden verimler karşılaştırılmış ve sonuca varılmıştır. Araştırmanın amacı; verim, maliyet analizi çerçevesinde Tekirdağ ve Batı Marmara bölgesi için en uygun panel tipini belirlemek ve böylece yatırımcılara bilimsel veri sunmaktır. Uygulamalı ve karşılaştırmalı deney düzeneği yardımıyla verim kayıpları ve gereksiz yatırımların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda her ne kadar gelen ışınımlara bağlı olarak verimler düşük olsa da, güneş tükenmeyen bir kaynaktır. Monokristal panelin teorik olarak % 15 ile % 18 oranında verimi varken, Tekirdağ iklimi şartlarında bu verim ortalama %15 olarak ölçülmüştür. Polikristal panelin teorik olarak verimleri %14 ile %16 iken Tekirdağ iklimi şartlarında bu verim %14,9 olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş, fotovoltaik, monokristal, polikristal

**2018, 30 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

### **MONOCRYSTAL AND POLYCRYSTAL SOLAR PANELS UNDER TEKİRDAĞ CONDITIONS INVESTIGATION OF EFFICIENCY**

**İsmail ARSLAN**

Namık Kemal University

Graduate School Of Natural and Applied Science

Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

The world's most important and largest energy source is the sun. Matter and energy flows can be due to solar energy. However, wind, sea wave, temperature difference in the ocean and biomass energies are the forms in which solar energy has undergone changes and are now used to generate energy again. Solar energy is a clean energy source that is abundant and inexhaustible before anything else. It is very convenient for local regional applications. Within the scope of this thesis; monocrystalline and polycrystalline panellars have been investigated in Tekirdag conditions. In the framework of the research; the amount of incoming radiation, current, voltage, and the power produced by the panel were compared and finally arrived. Purpose of the research; yield, cost analysis, to determine the most reasonable panel type for Tekirdağ and West Marmara region and thus to present scientific data to investors. With the help of applied and comparative experiment method, it is aimed to avoid yield losses and unnecessary investments. Although the yields are low depending on the radiation, the sun is an unexploited source. While the monocrystal panel theoretically yields between %15 and %18, this yield is measured as %15 on average in Tekirdag climate conditions. While the theoretical yield of the polycrystalline panel is between %14 and %16, this yield is measured as %14.9 in Tekirdag climate conditions.

**Key Words:** Solar, photovoltaic, monocrystal, polycrystal

**2018, 30 pages**

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÇİZELGE DİZİNİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Güneş ve yapısı.....	1
1.2. Dünyada güneş enerjisi.....	1
1.3. Türkiye’de güneş enerjisi .....	2
1.4. Güneş pilleri (PV).....	4
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>10</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>12</b>
3.1. Materyal.....	12
3.1.1. Deneylerin yürütüldüğü Tekirdağ iline ait iklim verileri .....	12
3.1.2. Denemede kullanılan PV panelleri .....	13
3.1.3. Ölçüm cihazı.....	14
3.2. Yöntem .....	15
3.2.1. PV dolum Faktörü (FF) saptanması .....	17
3.2.2. Panel veriminin saptanması .....	17
3.2.3. Kapalı devre akımının ölçülmesi (Ics) .....	18
3.2.4. Açık devre geriliminin ölçülmesi (Voc).....	19
3.2.5. I-V eğrilerinin oluşturulması .....	19
3.2.6. Panellerin Standart Test Koşullarına (STC) değerlendirilmesi .....	20
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>22</b>
4.1. Polikristal PV panelinden elde edilen ölçüm değerleri .....	22
4.2. Monokristal PV panelinden elde edilen ölçüm değerleri .....	23
4.3. Monokristal ve Polikristal Güneş Panellerinin STC ve Gerçek Ölçüm Koşullarında Değerlendirilmesi .....	24
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ</b> .....	<b>27</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>28</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>30</b>

## ÇİZELGE DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1. 1. Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı (EİE Genel Müdürlüğü).....	3
Çizelge 1. 2. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli (EİE Genel müdürlüğü) ...	3
Çizelge 3. 1. Tekirdağ iline ait iklim verileri (www.mgm.gov.tr) .....	12
Çizelge 3. 2. Tekirdağ ilinin radyasyon ve günlük güneşlenme süreleri (www.yegm.gov.tr) .	12
Çizelge 3. 3. Polikristal panelin üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgileri.....	13
Çizelge 3. 4. Monokristal panelin üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgileri.....	13
Çizelge 3. 5. Farklı eğim açılarında yapılan ölçüm sonuçları.....	15
Çizelge 4. 1. Polikristal PV panelinde ölçüm sonucu elde edilen değerler .....	22
Çizelge 4. 2. Monokristal PV panelinde ölçüm sonucu elde edilen değerler .....	23
Çizelge 4. 3. Monokristal ve polikristal güneş panellerine ait standart test koşullarına dönüştürülmüş maksimum güç ve tolerans değerleri .....	25

## ŞEKİL DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1. 1. Dünya güneş enerjisi haritası .....	1
Şekil 1. 2. Güneş enerjisinin Türkiye dağılımı .....	4
Şekil 1. 3. Güneş pilinin çalışma ilkesi .....	5
Şekil 1. 4. Solar hücrenin iç yapısı .....	6
Şekil 1. 5. Monokristal panel dış görünümü.....	7
Şekil 1. 6. Polikristal panel dış görünüşü .....	8
Şekil 1. 7. Polikristal panel dış görünüşü .....	9
Şekil 4. 1. Deneyde kullanılan polikristal (a) ve monokristal (b) panel düzeneği ön görünüş.	14
Şekil 4. 2. IV-400 ölçüm cihazının ölçüm esnasındaki bağlantı biçimi .....	14
Şekil 4. 3. Eğim açısı ayarlanırken kullanılan bir ekran görüntüsü.....	15
Şekil 4. 4. 20° panel eğim açısında yapılan ölçüm görüntüsü .....	16
Şekil 4. 5. Ölçüm sonucu elde edilen güç grafiği örneği.....	16
Şekil 4. 6. Maksimum güç, gerilim ve akım değerleri çıktısı.....	17
Şekil 4. 7. Kapalı devre akım ölçüm şeması .....	18
Şekil 4. 8. Açık devre gerilim ölçüm şeması.....	19
Şekil 4. 9. I-V eğrilerinin oluşturulması için bağlantı şeması .....	19
Şekil 4. 10. I-V eğrileri.....	20
Şekil 5. 1. Polikristal panel yüzeyine gelen ışınım miktarı ve üretilen maksimum güç değerleri arasındaki ilişki.....	23
Şekil 5. 2. Monokristal panel yüzeyine gelen ışınım miktarı ve üretilen maksimum güç değerleri arasındaki ilişki.....	24



## SİMGELER DİZİNİ

$FF$	: Dolum faktörü
$P_{max}$	: Yük altındaki maksimum güç (W)
$P_n$	: Nominal güç (W)
$V_{max}$	: Yük altında maksimum gerilim (V)
$I_{max}$	: Yük altında maksimum akım (A)
$V_{OC}$	: Boşta açık devre gerilimi (V)
$I_{SC}$	: Boşta kısa devre akımı (A)
$\eta$	: Panel verimi
$P_n$	: Standart test koşullarındaki (STC) nominal güç (W)
$A$	: Panelin yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$E_0$	: Standart test koşullarındaki (STC) güneş ışınım şiddeti (1000 W/m <sup>2</sup> )

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında, öncelikle güneş panellerinin tarihsel gelişimi, uygulamaları hakkında bilgi verilmiş ve yaygın olarak kullanılan güneş paneli türlerinden monokristal ve polikristal güneş panellerinin Tekirdağ ili koşullarında verimlilikleri incelenmiş ve yatırımcılara yol gösterici olması için en uygun güneş paneli belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan sayın danışmanım Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU'na, eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme ve sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda özellikle güneş panellerinin temin edilmesinde desteklerini esirgemeyen Bahar Yenilenebilir Enerji Sistemleri şirketine teşekkür ederim.

Ocak, 2018

İsmail ARSLAN

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Güneş ve yapısı

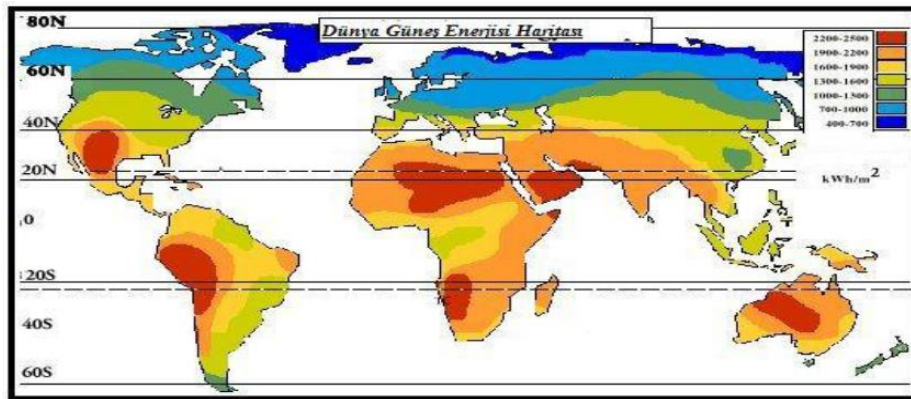
Dünya, güneş ve çevresindeki gezegenlerden oluşan güneş sistemi içerisinde yer alır. Güneş dünya için temel bir enerji kaynağıdır. Yüzey sıcaklığının yaklaşık olarak 6000 °C olduğu bilinmektedir.

Güneş, ısı ve ışık yayan sıcaklığı yüksek bir gaz külesidir. Dünyadan uzaklığı 150 milyon km olmasına rağmen, güneşin yaydığı ışınlar yeryüzüne 8 dakikada ulaşır.

Güneşin merkezinde meydana gelen çekirdeksel tepkimeler, hidrojen çekirdeklerinin kaynaşmasıyla meydana gelen tepkimelerdir. Bu tepkimeler sonucunda çok yüksek bir enerji oluşmaktadır. Füzyon adı verilen bu tepkimeler yüksek sıcaklıkta ve atom çekirdeği yardımı ile termonükleer reaksiyon adını almaktadır. Güneşte harcanan bu helyum miktarı harcanan hidrojen miktarından daha az olduğundan aradaki fark güneşten radyasyon (ışınım) enerjisi verir. (Erkul, 2010)

## 1.2. Dünyada güneş enerjisi

Kuzey Avrupa ülkeleri de dahil olmak üzere sanayide gelişmiş ülkeler güneş enerjisi konusunda oldukça yoğun çalışmalar yapmaktadır. Enerji planlamalarında önümüzdeki on yıl içerisinde enerji üretimlerinin tamamına yakını yenilenebilir enerji kaynakları üzerine kurmayı amaçlamaktadırlar. Çeşitli uluslararası kuruluşlar bu konuyla alakalı ortak olarak birçok çalışmayı yürütmektedirler. (IEA-Uluslararası Enerji Ajansı, COMPLES-Güneş Enerjisi İşbirliği Teşkilatı, WEC-Dünya Enerji Konseyi)



Şekil 1. 1. Dünya güneş enerjisi haritası (Erkul, 2010)

Dünyaya gelen güneş ışınım dağılımı eşit olmayıp zaman ve geliş açısı bakımından değişiklik göstermektedir. Haritadaki kırmızı kuşak 3000 saat/yıl, turuncu kuşak ise 2500 saat/yıl güneşlenme süresini ifade etmektedir. Dünyanın çapına eşit bir dairesel alan üzerine çarpan güneş gücü, 178 trilyon KW düzeyindedir. (Köse, 1986)

Ekvator çizgisini merkez alan 45° Kuzey/Güney bandındaki ışınım, iklim ve yeryüzü farklılıklarına göre değişim göstermektedir.

### **1.3. Türkiye’de güneş enerjisi**

Dünyanın en önemli ve en büyük enerji kaynağı güneştir. Madde ve enerji akışları güneş enerjisi sayesinde olabilmektedir. Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanılarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre; Türkiye’nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat, bu da günlük toplam 7,2 saate eşittir ve Ortalama günlük ışınım şiddeti 1311 kWh/m<sup>2</sup> bu da günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup> ye eşit olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. (EİE Genel Müdürlüğü)

Güneş enerjisi yerel ve bölgesel uygulamalar için oldukça elverişlidir. Kullanmak isteyen herkes için dışa bağımlılığı yoktur. Panel tesislerini kurmak için karmaşık bir teknolojiye de gerek yoktur. Bunun yanında güneş enerjisinin sürekli depolanamamasından kaynaklı dezavantajları da vardır. Birim yüzeye düşen güneş ışınımı az olduğu için büyük yüzeyler gerektirir. Kış aylarında ışınım yaza göre daha az ve geceleri olmadığı için tercih sebebi olmayabilir. Yeryüzüne her sene düşen güneş ışınım enerjisi, yeryüzünde şimdiye kadar belirlenmiş olan fosil yakıt haznelerinin yaklaşık 160 katı kadardır. Ayrıca yeryüzünde fosil ve hidroelektrik tesislerinin bir yılda üreteceğinden 15.000 kat kadar daha fazladır. Yani güneşten bulunması değil bu enerjiyi amaca uygun daha verimli nasıl kullanabildiğimiz önemlidir.(Boz, 2011)

**Çizelge 1. 1.** Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı (2016 Yılı)(EİE Genel Müdürlüğü)

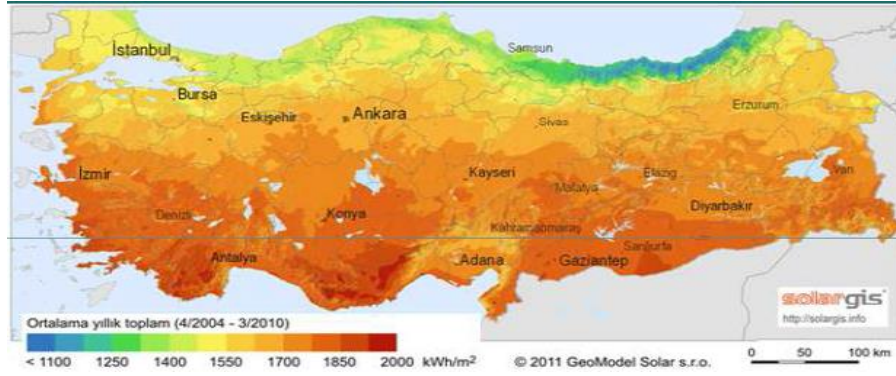
BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m <sup>2</sup> -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
AKDENİZ	1120	1971

Türkiye güneş haritasındaki ışınım dağılımı Güney'den Kuzey'e doğru doğal olarak (enlem derecesine göre) azalmaktadır. Işınım şiddeti de iklim ve yeryüzü şekline göre değişmektedir. Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesidir. Bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Hem enlem değeri büyük hemde rutubetli olmasından dolayı en az ışınım alan bölge Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesidir. Atmosferdeki fazla su buharı ve dönemsel görülen sis olayları ışınımın perdelenmesine neden olmaktadır. Marmara ve Kuzey Ege Bölgesi, Karadeniz'e göre biraz daha iyi durumdadır. Güney Ege, Batı Karadeniz ve Orta Anadolu Bölgeleri orta derecede ışınım almaktadır. Doğu Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgeleri ışınım değerleri iyi olan bölgelerimizdir. Güney Doğu Bölgesinin sağ en alt ucu ise ışınım değerleri en iyi olan bölgemizdir. Sert ve soğuk iklime sahip bu yer kışın en fazla ışınım alan yerdir. Rakım yüksektir. Havadaki su buharı, yağmur veya kar şeklinde yoğunlaşmakta ve atmosfer daha berrak olup ışınımın engellenmesi en az seviyededir. Şekil 1.2'de verilen haritada güneş ışınım değerlerine göre 4 kuşağa ayrılmış bölgelerimiz gösterilmiştir. (Boz, 2011)

**Çizelge 1. 2.** Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli (2016 yılı) (EİE Genel müdürlüğü)

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ (saat/ay)
	(kcal/cm <sup>2</sup> -ay)	(kWh/m <sup>2</sup> -ay)	
OCAK	4,45	51,75	103
ŞUBAT	5,44	63,27	115
MART	8,31	96,65	165
NİSAN	10,51	122,23	197
MAYIS	13,23	153,86	273

HAZİRAN	14,51	168,75	325
TEMMUZ	15,08	175,38	365
AĞUSTOS	13,62	158,40	343
EYLÜL	10,60	123,28	280
EKİM	7,73	89,90	214
KASIM	5,23	60,82	157
ARALIK	4,03	46,87	103
TOPLAM	112,74	1311	2640
<b>ORTALAMA</b>	<b>308 cal/cm2-gün</b>	<b>3,6kWh/m2-gün</b>	<b>7,2 saat/gün</b>



Şekil 1. 2. Güneş enerjisinin Türkiye dağılımı (Erkul, 2010)

#### 1.4. Güneş pilleri (PV)

Güneş pilleri üzerine düşen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken aygıtlardır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek bulmuştur. 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından katılda selenyum kristalleri üzerinde gösterilmiştir. 1914 yılında fotovoltaiik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmıştır. 1946 yılında Russell Ohl modern solar pil patentini almıştır. Gerçek anlamda güneş enerjisi %6 verimlilikle 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerinde gerçekleştirilmiştir. 1960 yıllarının başından itibaren çalışmalar hızlanmış ve bugün verimi laboratuvar şartlarında %40-45 değerine ulaşan fotovoltaiik düzenekler geliştirilmiştir.(Erkul, 2010)

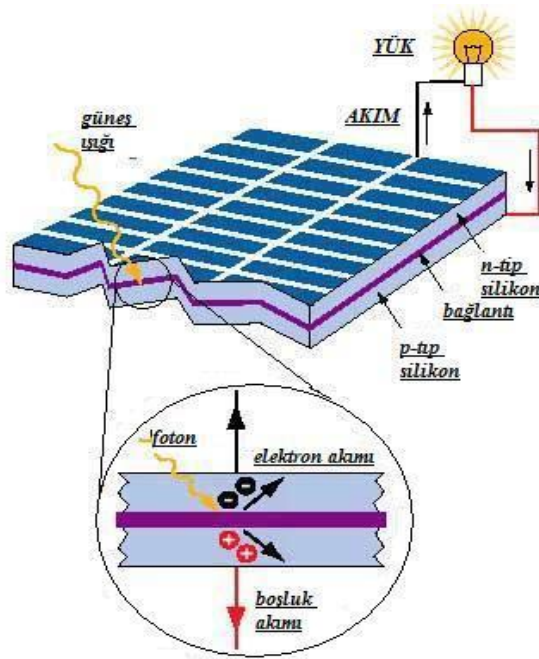
Güneş pillerinde güneş enerjisinin taşıyıcı ve yayıcıları olan tanecikli fotonlar, fotovoltaiik hücre üzerine düşünce elektrik enerjisine dönüştürürler.

Elektronik sayesinde önemli bir madde olan silisyum, güneş pilinin de en yaygın hammaddesidir. Teknolojik olarak tek kristalli, çok kristalli ve amorf yapılı üretilen güneş

pilleri ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve verimleri sırasıyla; %15-17,%12-14, %5-8 olarak verilebilir. (Küveli, 2005)

Fotoelektrik olayı; Güneş ışığı yarı iletken madde üzerine düştüğünde ışınımın enerjisi madde atomlarının en dış yörüngesindeki elektronları hareket ettirir. İletkenler üzerindeki elektrik akımı atomların bu gevşek elektronlarının hareketi sayesinde oluşur. Elektronlar taşıdıkları enerjilerini karşılaştıkları engeller (direnç-yük) üzerinde bırakarak iş yaparlar (Demirtaş, 2006).

Fotovoltaik cihazların yapımında en çok kullanılan yarı iletken malzemeler silisyum ve silisyum alaşımlarıdır. Fotovoltaik sistem iki katmanlı silisyum yapıdan oluşur. P tipi bir taban üzerinde ince bir N tipi malzeme bulunmaktadır. Işık bu iki malzemenin kontak noktasına düştüğünde, P tipi malzemenin N tipine göre daha pozitif olduğu 0,6 Voltluk bir gerilim meydana gelir. Şekil 1.3'te bir güneş pilinin çalışma ilkesi verilmiştir (Lynn, 2001).

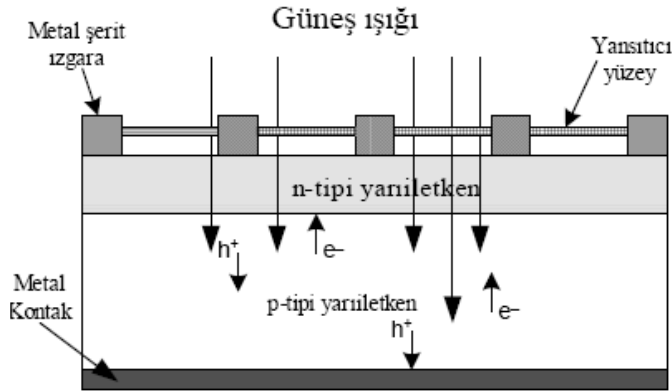


**Şekil 1. 3.** Güneş pilinin çalışma ilkesi (Erkul,2010)

Pilin ön (negatif) ve arka (pozitif) cepesinde, dış devre ile bağlantıyı sağlayan bakır kontaklar vardır. 150 mikron kalınlığındaki ışın soğurucu kaplama malzemesi pilin ön yüzeyinde bulunur.

Güneş pilini oluşturan levhaların üzerine elektrik düştüğü zaman, uçları arasında elektrik akımı oluşur. Bir dış devreye bağlanırlarsa devreden akım geçer. Güç talebine bağlı

olarak modüller birbirine seri veya paralel olarak bağlanarak birkaç watt'tan megawatt'lara ulaşabilecek sistemler oluşturulabilir.



Şekil 1. 4. Solar hücrenin iç yapısı (Erkul, 2010)

Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda değerlik elektronlarının bulunduğu enerji düzeyi ile bu elektronların bulunabileceği bir sonraki enerji düzeyi arasında bulunan enerji düzeyleri, elektronların bulunmasının yasak olduğu enerjilerdir. Değerlik elektronlarının bulunduğu enerji bandına 'değerlik bandı' ve yasak enerji aralığından sonra elektronların bulunabileceği ilk enerji düzeylerinden başlayan enerji bandına da 'iletkenlik bandı' adı verilir. Yasak enerji aralığının büyüklüğü maddenin yarı iletken ya da yalıtkan olarak sınıflandırılmasının ölçüsüdür. Güneş ışınımında enerji taşıma birimleri olarak tanımladığımız fotonların enerjisi, yasak enerji aralığına eşit ya da ondan büyük ise değerlik bandındaki bir elektrona enerjisini aktararak onu iletken bandına çıkarır. Yasak enerji bandı 2,5 eV (elektron volt) değerinden daha büyük ise madde yalıtkanlıdır. Güneş spektrumunda enerji 2,5 eV (dalga boyu 0,5  $\mu\text{m}$ ) değerinden daha büyük olan bölgedeki güneş ışınlarının tutarı çok az olduğundan bu tür malzeme de fotovoltaik çevrimde emici tabaka olarak kullanılmaya uygun değildir. Anlaşıldığı üzere kullanılan maddenin yarı iletken olmasının sebebi; güneş ışığını soğuran yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyumlu çalışabilen ve elektrik yüklerinin birbirinden uzaklaşmasına izin verebilecek kadar uzun bant genişliğine sahip olmasıdır.(Erkul, 2010)

Güneş pilleri farklı tiplerde olabilmektedir. Aşağıda uygulamada en yaygın kullanılan güneş pillerinin özellikleri kısaca açıklanmıştır.

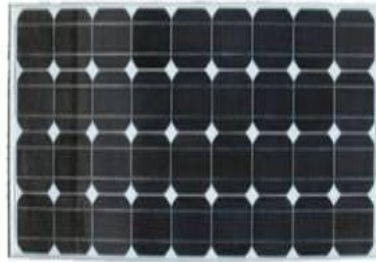


## Monokristal Güneş Pilleri

Monokristal silisyum güneş pili, solar panel yapımında sıkça kullanılmaktadır. Monokristal silisyum malzemesinin maliyeti oldukça yüksektir. Bu yüzden polikristalli güneş hücresi daha yoğun kullanılmaktadır. Silisyum maddesinin güneş pili yapımında yaygın olarak kullanılmasının pek çok sebebi vardır. Bunlar silisyumun elektriksel, optik ve yapısal özelliklerini uzun süre koruyabilmesinden dolayıdır.

Monokristalli silisyum teknolojisi oldukça pahalı ve zordur. Dünyada oksijenden sonra en çok silisyum elementi bulunur. Bu elementin ise kum ve kuvars biçimleri en yaygın olanlarıdır. Kum saflık yapısı çok az olduğu için tercih edilmez. Ama kuvars maddesinin yaklaşık %90'ı silisyumdan oluşur. Kuvars birçok işlemde geçirilerek %99 gibi bir saflıkta silika elde edilir. Daha sonra silika'dan da silisyum elde edilir. Bu aşamalardan sonra, silisyum saflaştırılarak yarı iletken özelliği taşıyan çok kristalli silisyum elde edilir. Çok kristalli silisyum elde etme aşamasına kadar olan süreçler oldukça maliyetlidir.

Yarı iletken özellikteki saf çok kristalli silisyum elde etmek için, çok kristalli silisyum tekrar eritilir ve büyütülür. Çekirdekler, çok düşük hızla ergimiş silisyum banyosuna çekilirler. Böylece tek kristalli tabakanın büyümesi sağlanır. Yaklaşık olarak 0,5 mm kalınlığında üretilirler. Pillerin üretiminde maleme kaybının olması bu pillerin bir dezavantajıdır. Renkleri koyu mavi olup yaklaşık olarak ağırlığı 10 gramdan azdır (Şekil 1.5).



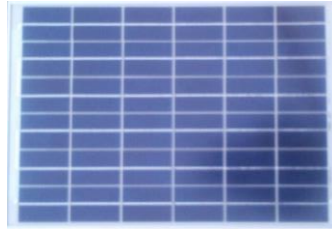
Şekil 1. 5. Monokristal panel dış görünümü

## Polikristal Güneş Pilleri

Elektriksel, optik ve yapısal özellikleri monokristal pillerle aynıdır. Damarların büyüklükleri kristallerin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasında süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcıların aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynar. Çok kristalli malzemenin elektriksel özelliklerinin, küçülen damar büyüklüğü ile orantılı bozulması; elde

edilebilecek verimliliğin monokristal ile karşılaştırıldığında küçük olmasına neden olur. Ancak çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha kolaydır ve maliyeti oldukça düşüktür. Maliyeti düşük olduğu için piyasada daha çok bulunur ve yatırımcılar tarafından daha çok tercih edilir.

Polikristal silisyum maddesi üretilmesinde dökme yöntemi kullanılmaktadır. Üretim aşamasında ilk olarak tek kristalli silisyumun elde edilmesinde yapılan işlemlerin bir çoğu aynen uygulanır. Erimiş yarı iletken silisyum, kalıplara dökülerek soğuması beklenir. Kalıplardan elde edilen bloklar kare şeklinde kesilir. Bu yöntemle üretilen malzemelerden elde edilen güneş pillerinin maliyeti düşük verimi daha azdır. Polikristal güneş panellerinin verimlilikleri %14 ile %16 aralığındadır. (Boz, 2011)



**Şekil 1. 6.** Polikristal panel dış görünüşü

### **Thin Film Güneş Panelleri**

Thin Film güneş pilleri yapımında, ışınları soğurma özelliği üstün olan malzemeler daha ince bir tabaka halinde kullanılır. Örneğin; Amorf Silisyum güneş pillerinin emilim katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0,7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile emilebilirken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu emebilmek için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılı güneş pillerinde daha az malzeme kullanılır ve montaj kolaylığı nedeniyle bir avantaj sağlar.(Erkul, 2010)

Thin Film teknolojisinin gelişmesiyle üretim maliyetlerinin düşmesi hedeflenmiştir. Düşük maliyetle üretilmelerine rağmen verimlerin %7 ila 14 arasında olduğu görülmüştür. Bu da yaygınlaşması önündeki en büyük engeldir. Pazar payının ancak %7'sini teşkil eder. Ancak laboratuvar şartlarında verim artışı üzerinde çalışılmaktadır. Öte yandan uzay ve uydu uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü atmosfer dışındaki verimleri %28 ila %30 arasındadır. (Boz, 2011)

Bu piller Amorf Silisyum (a-Si), Kadmiyum Tellür (CdTe), bakır indium-diselenoid (CuInSe<sub>2</sub>), olarak sayılabilir.



**Şekil 1. 7.** Polikristal panel dış görünüşü

### **Amorf Silisyum (a-Si) Güneş Pilleri**

Thin Film güneş pillerinde hidrojenli amorf silisyum ve polikristal silisyum maddeler kullanılır. Bu tip pillerin verimliliği genelde kristal silisyum pillerden daha düşüktür (%6-9 civarında). Buna karşılık kristal pillerine göre birçok üstünlükleri vardır. Üretimi basittir. Üretimi için yüksek sıcaklığa gerek yoktur (300°C'den az). Daha az madde kullanılarak üretilirler. Düşük sıcaklıkta üretimi olduğu için daha ucuz tabakalar (cam gibi) kullanılarak üretilir. Kolay biçimde birleştirilerek yüksek gerilim elde edilebilir.(Boz, 2011)

### **Kadmiyum Tellür (CdTe) Güneş Pilleri**

Kadmiyum tellür (CdTe) güneş ışınımı emme katsayısı yüksek ve ideal bant genişliğine sahiptir. Kadmiyum tellür ince film güneş pili teknolojisiyle gelecek vaad eden fotovoltaik malzeme çeşitlerinden birisidir. Kadmiyum tellür güneş hücresi verimi %15'ten fazladır ve bu hücreler ile yapılan güneş paneli modülleri ise %9'dan daha fazla verime sahiptir.(Küpeli, 2005)

Kadmiyum Tellür diğer ince film güneş pili teknolojilerine kıyasla daha kolay depolama ve daha geniş ölçekli üretime daha uygundur.

### **Bakır İndiyum Diselenoid (CuInSe<sub>2</sub>) Güneş Pilleri**

Periyodik tablonun 1. 3. ve 6. gruptan elementlerin üçüncünün ya da daha fazlasının bir araya gelmesiyle oluşan yarı iletkenlerdir. Bu yarı iletkenin soğurma katsayıları oldukça yüksektir. Bakır indiyum ve selenyum'dan yapılan üçlü bileşik yarı iletkenle başlayan bu grup (CIS) güneş pilleri olarak anılır. CdTe güneş pillerine en yakın rakip olarak gözükmektedir.

Bu ince film güneş pili teknolojisinin diğerlerinden üstünlükleri; optik emme kat sayısı yüksektir, iletkenliği ve öz direnci değiştirilebilir şeklinde sıralanabilir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Prasad ve Snow (2005). Farklı tipteki PV panellerinin verimlilik ve alan gereksinimlerini hesaplamışlardır. Yüksek performanslı panellerde verimlilik %17-18, alan gereksinimi 6-7 m<sup>2</sup>/kWp, mono kristal silisyum panellerde %12-15 ve 7-9 m<sup>2</sup>/kWp, poli kristal silisyum panellerde %11-14 ve 7-10 m<sup>2</sup>/kWp, ince film bakır indiyum selenoid panellerde %9-11 ve 9-11 m<sup>2</sup>/kWp, ince film kadmiyum panellerde %6-8 ve 12-17 m<sup>2</sup>/kWp, ince film Amorfsilisyum panellerde %5-7 ve 14-20 m<sup>2</sup>/kWp değerlerini vermişlerdir.

Moehlecke ve ark. (2013) çift yüzeyli PV modüllerinde verimliliği arttırmak için alt yüzeye alüminyum yansıtıcılar yerleştirmişlerdir. Araştırmacılar bu düzenlemenin PV güç çıkışını %29 oranında arttırdığını belirtmektedirler.

Mandal ve Panja (2016) küçük ölçekli şebekeye bağlı (on grid) bir PV modül sisteminin (PVS) performans ölçümlerini yapmışlardır. Araştırmacılar, 1 kWp kurulu güce sahip bu sistemde, farklı güneş ışınlarına bağlı olarak, verimliliğin %12.3 ile %18.4 arasında değiştiğini, ortalama 3-4 kWh/gün elektrik enerjisi üretimi olduğunu ve binalara böyle bir sistemin kurulmasının tüketicilerin elektrik enerjisi giderlerini azaltacağını belirtmişlerdir.

Kaddoura ve ark. (2016) PV modüllerinde eğim açısının panel yüzeyine düşen ışınım miktarını etkileyen en önemli faktör olduğunu belirtmektedirler. Araştırmacılar NASA'dan sağlanan verilerle MATLAB simülasyon programını kullanarak yaptıkları çalışmada, yılda 6 kez eğim açısını değiştirmenin PV yüzeyine gelen güneş ışınlarının %99.5'inden yararlanmayı sağladığını ifade etmektedirler.

Siddiqui ve ark. (2016) 5 farklı PV modülünü (Mono, Multi, a-Si, CdTe, CIGS) nem ve sıcaklığın kontrolü olduğu ortamda test ederek performanslarını saptamışlardır. Araştırmacılar Mono (C-Si) teknolojisinin maksimum güç ve verimlilik açısından diğerlerine göre en iyi performansı gösterdiğini belirtmişlerdir.

Koppelaar (2017) PV modüllerinin enerji geri ödeme süreleri ve net enerji oranlarını hesaplamıştır. Mono ve polislikon PV modellerinde enerji geri ödeme süreleri sırasıyla 3,9 ve 2,9 yıl olarak bulunmuştur.

Quansah ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada 5 farklı PV teknolojisini, şebekeye bağlı panel sisteminde performans testine tabii tutmuşlardır. Bakır indiyum disülfür ince flim teknolojisi (CIS) ile üretilen PV panelleri en düşük performansı gösterirken, Poli-kristal yapıya sahip (pc-Si) en iyi performansı göstermiştir. Bunu Amorf Silikon (a-Si) ve Heterojen bağlantılı ince film (HIT) teknolojisi izlemiştir.

Zaraket ve ark. (2017) PV modüllerinde hücre sıcaklığının performans, güç ve verimlilik üzerine etkilerini saptamışlardır. Araştırmacılar, hücre sıcaklığının bu üç özelliği etkileyen en önemli faktör olduğunu belirtmektedirler. Hücre sıcaklığı ile performans arasında ters bir ilişki bulunmuştur. Hücre sıcaklığı arttıkça PV panellerinin verimliliği azalmaktadır.

Bingöl ve Özkaya (2018) yaptıkları çalışmada PV modüllerini farklı şekilde bağlayarak gölgelenme etkisini araştırmışlardır. 6 adet PV modülü kullandıkları bu çalışmada MATLAB/Simulink programını kullanarak gölgelendirme simülasyonu yapmışlardır. Araştırmacılar, toplam çapraz bağlantının en iyi performansı sağladığını bildirmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Deneilerin yürütüldüğü Tekirdağ iline ait iklim verileri

Tekirdağ iline ait iklim verilerinin uzun yıllar ortalaması Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3. 1.** Tekirdağ iline ait iklim verileri (2016 yılı) (www.mgm.gov.tr)

Ortalama Sıcaklık (°C)	14,1
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	18,0
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	10,3
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	94,9
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	578,8

Tekirdağ ilinin güneş radyasyon ve günlük güneşlenme sürelerinin aylara göre dağılımı Çizelge 4.2’de verilmiştir. Tekirdağ ilinde ortalama güneşlenme radyasyonu 3,67 kWh/m<sup>2</sup>-gün, ortalama güneşlenme süresi 7,14 h/gün’dür. Bu iki değer de Türkiye ortalamasının biraz altındadır.

**Çizelge 3. 2.** Tekirdağ ilinin radyasyon ve günlük güneşlenme süreleri (2016 yılı) (www.yegm.gov.tr)

AYLAR	ORTALAMA RADYASYON (kWh/m <sup>2</sup> -gün)		ORTALAMA GÜNEŞLEME SÜRESİ (h/gün)	
	Türkiye	Tekirdağ	Türkiye	Tekirdağ
Ocak	1,79	1,50	4,11	3,69
Şubat	2,50	2,24	5,22	4,96
Mart	3,87	3,22	6,27	5,54
Nisan	4,93	4,46	7,45	7,26
Mayıs	6,14	5,61	9,10	9,05
Haziran	6,57	5,97	10,81	11,21
Temmuz	6,50	5,80	11,31	11,92
Ağustos	5,81	5,33	10,70	10,83
Eylül	4,81	4,14	9,23	8,32
Ekim	3,46	2,82	6,87	5,66
Kasım	2,14	1,69	5,15	4,15
Aralık	1,59	1,20	3,75	3,13
<b>ORTALAMA</b>	<b>4,18</b>	<b>3,67</b>	<b>7,49</b>	<b>7,14</b>

### 3.1.2. Denemede kullanılan PV panelleri

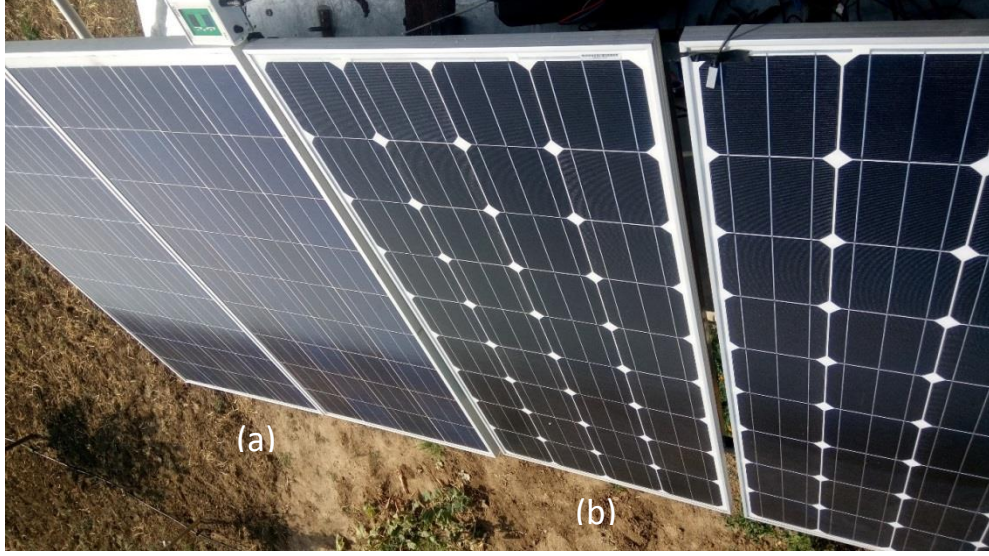
Araştırmada polikristal ve monokristal güneş panelleri kullanılmıştır. Bu panellere ait teknik özellikler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.

**Çizelge 3. 3.** Polikristal panelin üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgileri

Nominal Güç	150 W
Max. Voltaj ( $V_{mp}$ )	19 V
Max. Akım ( $I_{mp}$ )	7.85 A
Açık Devre Voltajı ( $V_{oc}$ )	23. V
Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )	8.95 A
Max. Sistem Voltajı	600 VDC
Verimlilik	% 15.3
Tolerans	$\pm$ %5
Hücre Sayısı	36 (4x9)
Konnektör Tipi	MC4
Ebat (Boy x En x Kalınlık)	1492x 676 x 35 mm.
Ağırlık	10.4 kg.

**Çizelge 3. 4.** Monokristal panelin üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgileri

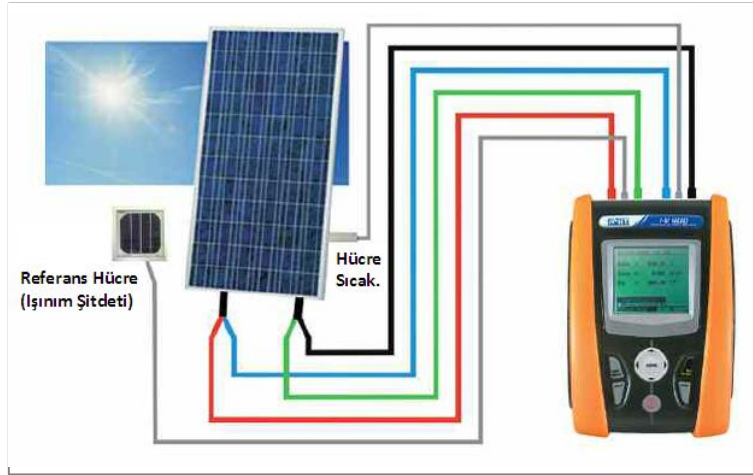
Nominal Güç	150 W
Max. Voltaj ( $V_{mp}$ )	18.32 V
Max. Akım ( $I_{mp}$ )	8.20 A
Açık Devre Voltajı ( $V_{oc}$ )	22.6 V
Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )	8.66 A
Max. Sistem Voltajı	600 V DC
Verimlilik	% 15,2
Tolerans	$\pm$ %5
Hücre Sayısı	36 (4x9)
Konnektör Tipi	MC4
Ebat (Boy x En x Kalınlık)	1480x 670 x 35 mm.
Ağırlık	11,5 kg.



Şekil 3. 1. Denede kullanılan polikristal (a) ve monokristal (b) panel düzeneği ön görünüş

### 3.1.3. Ölçüm cihazı

PV panellerinde performans ölçümlerini yapmak için IV-400 Fotovoltaik Panel Analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz IEC/ENG1010-1 standardında güvenlik sertifikasına sahiptir. Ölçümler IEC/EN608891 (I-V curve test) standardında yapılmaktadır. Bu cihazla 10 kW kurulu güce sahip panellere kadar ölçüm yapılabilmektedir. Cihazın ölçüm esnasındaki bağlantı şeması Şekil 4.2’de verilmiştir.

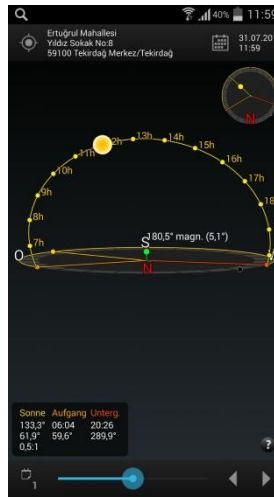


Şekil 3. 2. IV-400 ölçüm cihazının ölçüm esnasındaki bağlantı biçimi



### 3.2. Yöntem

Ölçümler, Tekirdağ İlinde güneş radyasyon yoğunluğunun en fazla olduğu temmuz ve ağustos aylarının farklı günlerinde ve güneş ışığının en etkili geldiği saatler (12.00-12.15) göz önünde bulundurularak, uygun eğim açısında yapılmıştır. Panel eğim açısı  $60^\circ$  ile  $0^\circ$  arasında ayarlanıp değiştirilerek, her  $10^\circ$  aralıkta ölçüm yapılarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler sonucunda en yüksek değerler  $20^\circ$  panel eğim açısında elde edildiğinden, iki panelin performans karşılaştırmaları paneller bu eğim açısına ayarlanarak yapılmıştır. Eğim açısı ayarlanırken kullanılan bir ekran görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. Her bir panel 16 ölçüm yapılarak değerlendirilmiştir. Ölçüm cihazı bilgisayara bağlandığında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen güç grafiğinin örneği Şekil 4.5'te ve ölçümlerden elde edilen maksimum güç, gerilim, akım değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



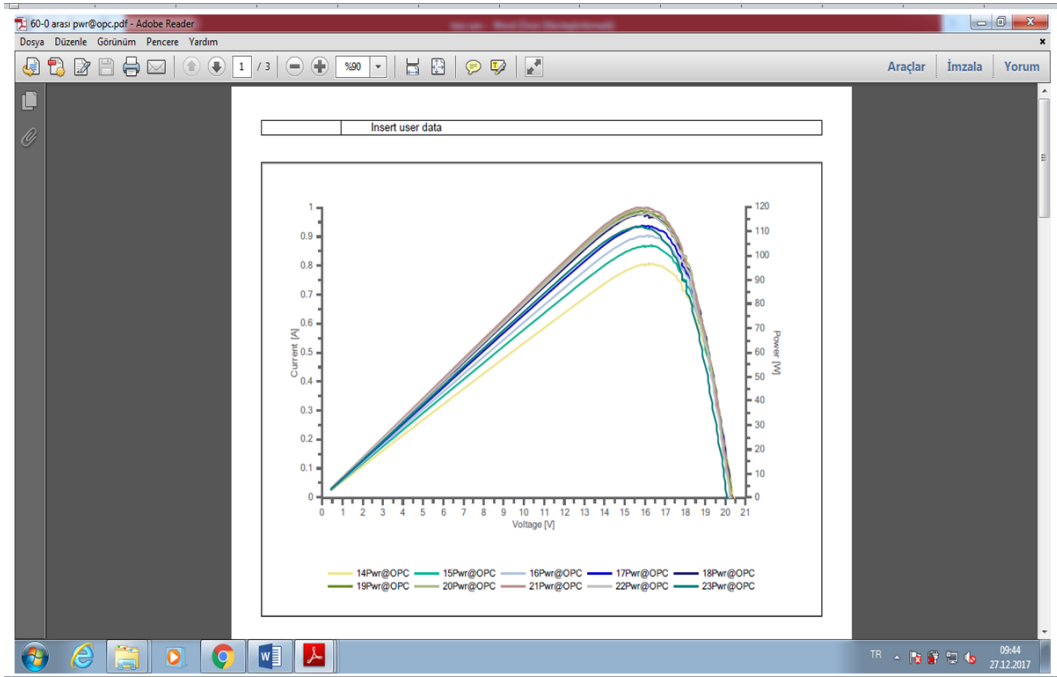
Şekil 3. 3. Eğim açısı ayarlanırken kullanılan bir ekran görüntüsü

Çizelge 3.5. Farklı eğim açılarında yapılan ölçüm sonuçları

Eğim açısı	Panel gelen ışınım (W/m)	Akım (A)	Gerilim (V)	Panelin ürettiği güç (W)	Panel Sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )	Dolum Faktörü (FF)
$0^\circ$	770	7,73	20,1	111,85	48,8	72
$10^\circ$	801	8,07	20,25	117,42	46,2	72
$20^\circ$	820	8,22	20,33	119,82	45,8	72
$30^\circ$	800	8,07	20,34	118,28	45	72
$40^\circ$	744	7,54	20,37	112,16	44,7	73
$50^\circ$	680	6,99	20,37	104,14	43,7	73
$60^\circ$	622	6,44	20,43	96,48	40,1	73



Şekil 3. 4. 20° panel eğim açısında yapılan ölçüm görüntüsü



Şekil 3. 5. Ölçüm sonucu elde edilen güç grafiği örneği

Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc Irradiance	Module Temp	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 14 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:07												
Not Ok (11.16%)												
14 Measures@OPC	96.58	20.43	16.22	5.95	6.44	622	40.1	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
14 Meas Arg@OPC	96.58	20.43	16.22	5.95	6.44	622	40.1	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
14 STC	166.74	22.06	17.28	9.65	10.38	1000	25.0	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
14 Nominal	150.00	22.55	19.04	7.88	8.49	1000	25.0	78	AUX	-0.0601	-0.34	2
Meas. 15 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:10												
Not Ok (11.85%)												
15 Measures@OPC	104.14	20.37	16.37	6.36	6.99	680	43.7	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
15 Meas Arg@OPC	104.14	20.37	16.37	6.36	6.99	680	43.7	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
15 STC	167.78	22.13	17.72	9.47	10.34	1000	25.0	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
15 Nominal	150.00	22.55	19.04	7.88	8.49	1000	25.0	78	AUX	-0.0601	-0.34	2
Meas. 16 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:11												
Not Ok (10.69%)												
16 Measures@OPC	108.13	20.37	16.15	6.70	7.31	714	43.5	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
16 Meas Arg@OPC	108.13	20.37	16.15	6.70	7.31	714	43.5	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
16 STC	166.04	22.06	17.50	9.49	10.29	1000	25.0	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
16 Nominal	150.00	22.55	19.04	7.88	8.49	1000	25.0	78	AUX	-0.0601	-0.34	2
Meas. 17 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:13												
Not Ok (11.03%)												
17 Measures@OPC	112.16	20.37	15.87	7.07	7.54	744	44.7	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
17 Meas Arg@OPC	112.16	20.37	15.87	7.07	7.54	744	44.7	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
17 STC	166.55	22.09	17.32	9.62	10.26	1000	25.0	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
17 Nominal	150.00	22.55	19.04	7.88	8.49	1000	25.0	78	AUX	-0.0601	-0.34	2
Meas. 18 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:18												
Not Ok (8.85%)												
18 Measures@OPC	117.27	20.35	16.01	7.33	7.97	787	43.3	72	AUX	-0.0601	-0.34	2
18 Meas Arg@OPC	117.27	20.35	16.01	7.33	7.97	787	43.3	72	AUX	-0.0601	-0.34	2
18 STC	163.28	21.93	17.37	9.40	10.20	1000	25.0	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
18 Nominal	150.00	22.55	19.04	7.88	8.49	1000	25.0	78	AUX	-0.0601	-0.34	2
Meas. 19 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:19												
Not Ok (9.13%)												
19 Measures@OPC	118.28	20.34	15.79	7.49	8.07	800	45.0	72	AUX	-0.0601	-0.34	2
19 Meas Arg@OPC	118.28	20.34	15.79	7.49	8.07	800	45.0	72	AUX	-0.0601	-0.34	2
19 STC	163.70	22.02	17.29	9.47	10.17	1000	25.0	73	AUX	-0.0601	-0.34	2
19 Nominal	150.00	22.55	19.04	7.88	8.49	1000	25.0	78	AUX	-0.0601	-0.34	2
Meas. 20 - PERLIGHT150 26.07.2017 12:20												
Not Ok (9.21%)												
20 Measures@OPC	119.15	20.31	15.87	7.51	8.13	807	45.3	72	AUX	-0.0601	-0.34	2
20 Meas Arg@OPC	119.15	20.31	15.87	7.51	8.13	807	45.3	72	AUX	-0.0601	-0.34	2

Şekil 3. 6. Maksimum güç, gerilim ve akım değerleri çıktısı

Cihazla yapılan ölçümler ile saptanan değerler aşağıdaki yöntemlerle hesaplanmaktadır.

### 3.2.1. PV dolun Faktörü (FF) saptanması

PV panelin dolun faktörü aşağıdaki bağıntı yardımıyla saptanmıştır (ASTM E948-09);

$$FF = \frac{P_{max}}{P_n} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (4.1)$$

Burada;

$FF$  : Dolun faktörü (boyutsuz)

$P_{max}$  : Yük altındaki maksimum güç (W)

$P_n$  : Nominal güç (W)

$V_{max}$  : Yük altında maksimum gerilim (V)

$I_{max}$  : Yük altında maksimum akım (A)

$V_{oc}$  : Boşta açık devre gerilimi (V)

$I_{sc}$  : Boşta kısa devre akımı (A)

### 3.2.2. Panel veriminin saptanması

Panel verimi aşağıdaki bağıntı ile saptanmıştır (ASTM E948-09);

$$\eta = 100 \times \frac{P_n}{A \cdot E_0} \quad (4.2)$$

Burada;

$\eta$  : Panel verimi (boyutsuz)

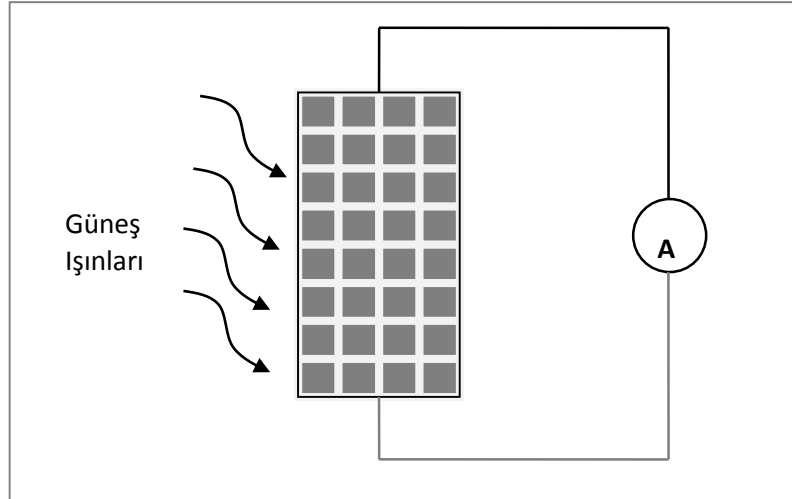
$P_n$  : Standart test koşullarındaki (STC) nominal güç (W)

$A$  : Panelin yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$E_0$  : Standart test koşullarındaki (STC) güneş ışınım şiddeti (1000 W/m<sup>2</sup>)

### 3.2.3. Kapalı devre akımının ölçülmesi (I<sub>cs</sub>)

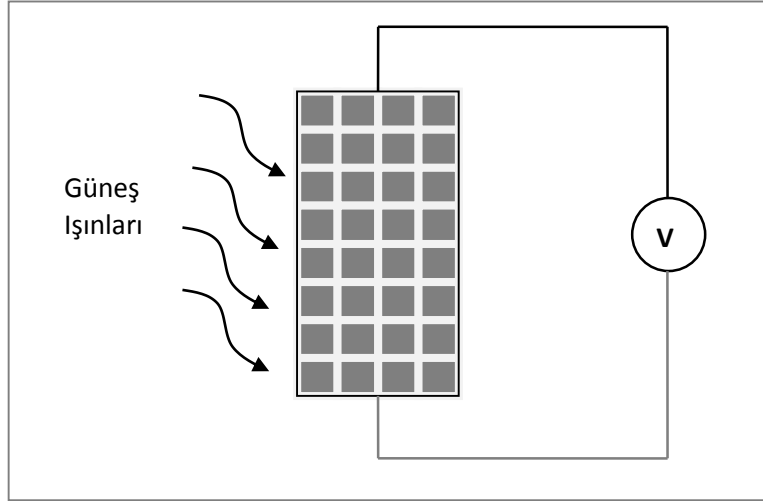
Modül üzerine herhangi bir güç kaynağı bağlı olmadan ölçülen akım değeridir. Bu esnada kapalı devre gerilimi  $V_{oc}=0$  olmaktadır. IV-400 ölçüm cihazında bulunan ampermetre ile ölçülmektedir.



Şekil 3. 7. Kapalı devre akım ölçüm şeması

### 3.2.4. Açık devre geriliminin ölçülmesi ( $V_{oc}$ )

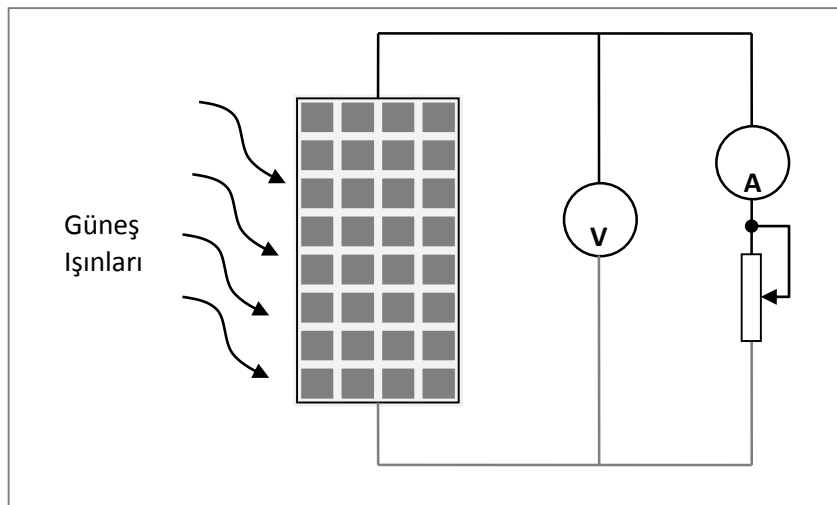
Voltmetre ile ölçülen gerilimdir. Ölçüm sırasında  $I_{sc}=0$  olur. IV-400 cihazında bulunan voltmetre ile ölçülmektedir.



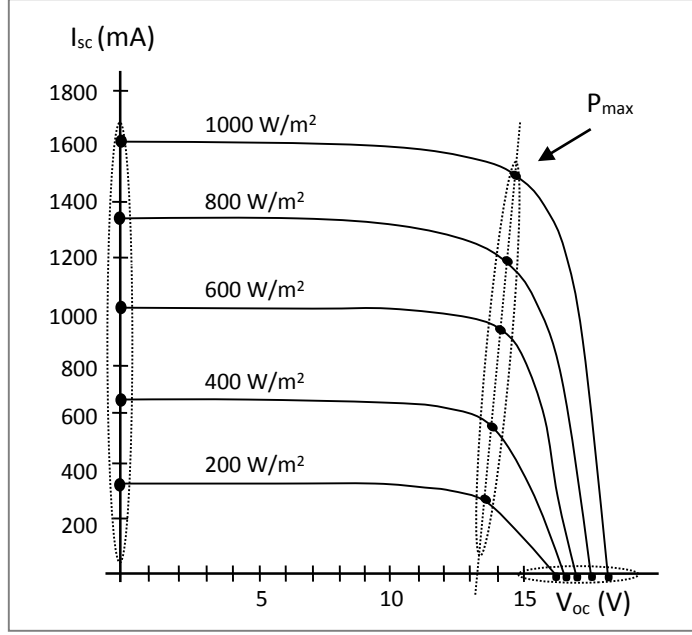
Şekil 3. 8. Açık devre gerilim ölçüm şeması

### 3.2.5. I-V eğrilerinin oluşturulması

PV paneli farklı yükler altındayken oluşturulan eğrilerdir. Bu amaçla ölçüm sisteminde Voltmetre, akımölçer ve potansiyometre olmalıdır. IV-400 ölçüm cihazı ile bu ölçüm yapılmaktadır.



Şekil 3. 9. I-V eğrilerinin oluşturulması için bağlantı şeması



Şekil 3. 10. I-V eğrileri

### 3.2.6. Panellerin Standart Test Koşullarına (STC) değerlendirilmesi

Standart Test Koşulları (STC) panel üreticileri tarafından laboratuvar koşullarında yapılan performans testleri sonucunda elde edilen değerlerdir. STC; akım-gerilim eğrilerinin ölçümlerinin, hücre veya panele dikey  $1000 \text{ W/m}^2$  ışınım şiddeti değerinde  $25^\circ\text{C}$  solar hücre sıcaklığı derecesinde ve AM 1,5 güneş spektrumunda yapılmasıdır. Panellerin tanıtım kataloglarında ve üzerlerinde bulunan etiketlerinde üretici firmalar tarafından verilen karakteristik bilgiler, IV-400 ölçüm cihazına girilerek, ölçülen değerlerin STC koşullarına verilen tolerans değerlerine ( $\pm \%5$ ) uygunluğu test edilebilmektedir. Bu işlem aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir (Lynn K, 2001);

$$I_{sc}(STC) = \frac{I_{sc}\left(\frac{1000}{E}\right)}{[1 + \alpha(T_m - 25)]} \quad (4.3)$$

Burada;

$I_{sc}(STC)$  : Standart test koşullarına dönüştürülen kısa devre akımı (A)

$E$  : Ölçüm koşullarındaki ışınım şiddeti ( $\text{W/m}^2$ )

$T_m$  : Ölçüm koşullarında hücre sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )

$\alpha$  : Akım sıcaklık düzeltme katsayısı ( $\%/K$ )

$I_{sc}$  : Boşta kısa devre akımı (A)

$$V_{oc}(STC) = \frac{V_{oc}}{[1 + \beta(T_m - 25)][1 + \delta(\ln E - \ln 1000)]} \quad (4.4)$$

Burada;

$V_{oc}(STC)$  : Standart test koşullarına dönüştürülen açık devre gerilimi (V)

$E$  : Ölçüm koşullarındaki ışınım şiddeti ( $W/m^2$ )

$T_m$  : Ölçüm koşullarında hücre sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

$\beta$  : Gerilim sıcaklık düzeltme katsayısı (%/K)

$\delta$  : Gerilim ışınım düzeltme katsayısı (%/K)

$V_{oc}$  : Boşta açık devre gerilimi (V)

Yukarıdaki bağıntılardan cihazın STC koşullarına dönüştürülmüş maksimum güç değeri hesaplanmaktadır;

$$P_{max}(STC) = I_{sc}(STC) \cdot V_{oc}(STC) \quad (4.5)$$

Burada;

$P_{max}(STC)$  : Standart test koşullarına dönüştürülen maksimum güç (W)

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Polikristal PV panelinden elde edilen ölçüm değerleri

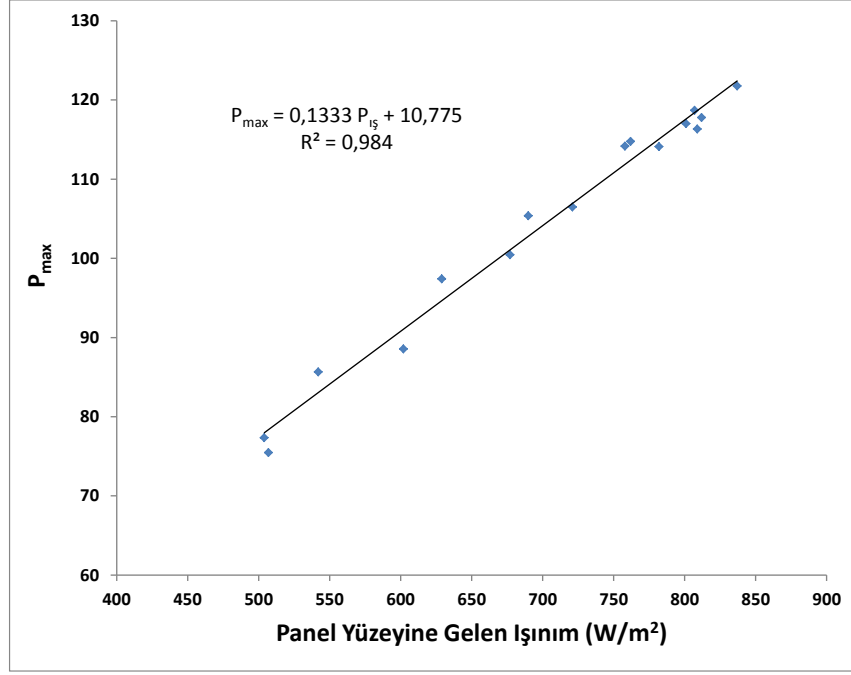
Polikristal PV panelinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen performans değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ölçümler sırasında ortalama 702,5 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımı, 104,45 W/m<sup>2</sup> maksimum güç, %14,9 panel verimi elde edilmiştir.

**Çizelge 4. 1.** Polikristal PV panelinde ölçüm sonucu elde edilen değerler

Ölçüm Sayısı	Panel yüzeyine gelen ışınım (W/m <sup>2</sup> )	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	P <sub>max</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Hücre sıcaklığı (°C)	Dolum Faktörü	Panel verimi (%)
1	504	4,47	17,3	77,33	36,5	75	15,3
2	507	4,61	16,37	75,47	40,3	75	14,9
3	542	5,21	16,44	85,65	43,6	74	15,8
4	602	5,53	16,01	88,54	44,3	74	14,7
5	629	5,95	16,37	97,40	45,2	73	15,5
6	677	6,22	16,15	100,45	43,1	73	14,8
7	690	6,58	16,01	105,35	44,8	73	15,3
8	721	6,68	15,94	106,48	44,3	74	14,8
9	758	7,13	16,01	114,15	46,6	72	15,1
10	762	7,3	15,72	114,76	46,1	72	15,1
11	782	7,29	15,65	114,09	47,2	72	14,6
12	801	7,41	15,79	117,00	50,3	71	14,6
13	807	7,55	15,72	118,69	48,1	72	14,7
14	809	7,5	15,51	116,33	51,4	71	14,4
15	812	7,42	15,87	117,76	48,3	72	14,5
16	837	7,78	15,65	121,76	48,3	73	14,5
<b>ORT</b>	<b>702,5</b>	<b>6,54</b>	<b>16,03</b>	<b>104,45</b>	<b>45,52</b>	<b>72,88</b>	<b>14,9</b>

Polikristal panelin yüzeyine gelen ışınım miktarı ile ürettiği maksimum güç arasındaki ilişki Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu iki değer arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır ( $R^2=0,984$ ).





**Şekil 4. 1.** Polikristal panel yüzeyine gelen ışınım miktarı ve üretilen maksimum güç değerleri arasındaki ilişki

#### 4.2. Monokristal PV panelinden elde edilen ölçüm değerleri

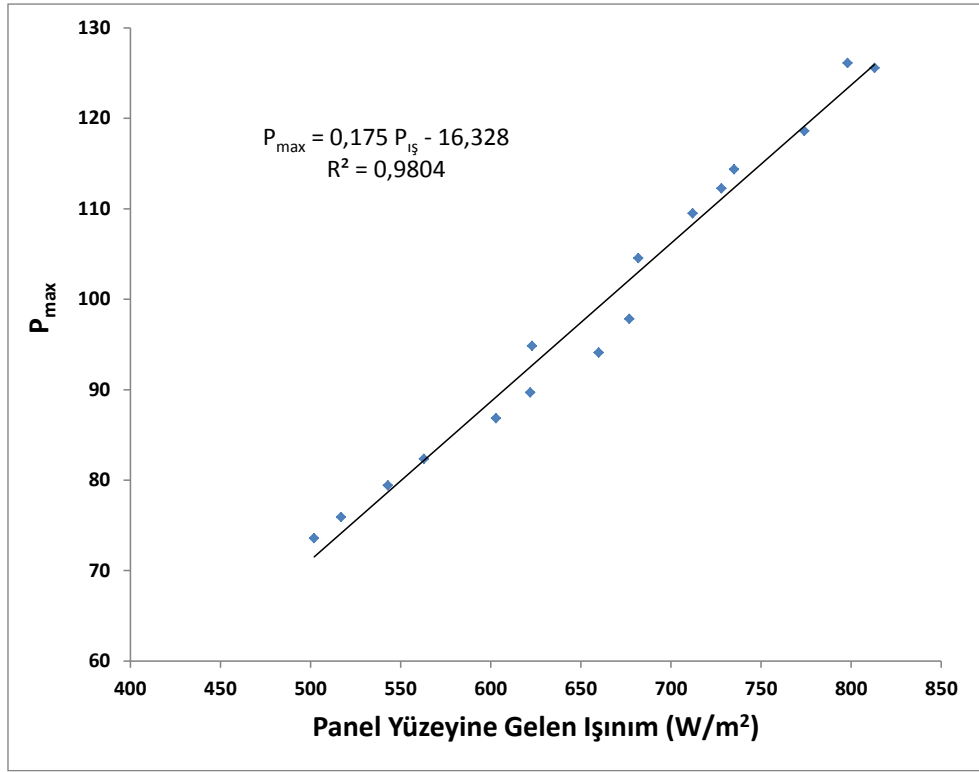
Monokristal PV panelinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen performans değerleri Çizelge 5.2' de verilmiştir. Ölçümler sırasında ortalama 659,5 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımı, 99,09 W/m<sup>2</sup> maksimum güç, %15 panel verimi elde edilmiştir.

**Çizelge 4. 2.** Monokristal PV panelinde ölçüm sonucu elde edilen değerler

Ölçüm Sayısı	Panel yüzeyine gelen ışınım (W/m <sup>2</sup> )	I <sub>max</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	P <sub>max</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Hücre sıcaklığı (°C)	Dolum Faktörü	Panel verimi (%)
1	502	4,38	16,8	73,58	35,3	74	14,7
2	517	4,5	16,87	75,92	34,8	74	14,7
3	543	4,77	16,65	79,42	35,4	74	14,6
4	563	5,01	16,44	82,36	35,2	74	14,6
5	603	5,26	16,51	86,84	36,2	73	14,4
6	622	5,41	16,58	89,7	36,5	73	14,4
7	623	5,95	15,94	94,84	44,9	74	15,2
8	660	5,96	15,79	94,11	37,6	72	14,3
9	677	6,11	16,01	97,82	34,8	72	14,4
10	682	6,53	16,01	104,55	44,6	74	15,3
11	712	6,75	16,22	109,49	43,8	73	15,4
12	728	6,95	16,15	112,24	42,2	74	15,4

13	735	7,08	16,15	114,34	42,4	74	15,6
14	774	7,44	15,94	118,59	44,4	73	15,3
15	798	7,67	16,44	126,09	40,7	73	15,8
16	813	7,67	16,37	125,56	41,7	73	15,4
<b>ORT</b>	<b>659,5</b>	<b>6,09</b>	<b>16,30</b>	<b>99,09</b>	<b>39,40</b>	<b>73,37</b>	<b>15,0</b>

Monokristal panelin yüzeyine gelen ışınım miktarı ile ürettiği maksimum güç arasındaki ilişki Şekil 5.2' de verilmiştir. Bu iki değer arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır ( $R^2=0,980$ ).



Şekil 4. 2. Monokristal panel yüzeyine gelen ışınım miktarı ve üretilen maksimum güç değerleri arasındaki ilişki

#### 4.3. Monokristal ve Polikristal Güneş Panellerinin STC ve Gerçek Ölçüm Koşullarında Değerlendirilmesi

Monokristal ve polikristal panellerin üretici firmalar tarafından verilen katalog bilgileri ölçüm cihazı IV-400'e girilerek standart test koşullarında panellerin üretmeleri gereken maksimum güç değerleri ve bu değerler sonucu oluşan sapma miktarları ile etiket değerlerine uygunlukları Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

**Çizelge 4. 3.** Monokristal ve polikristal güneş panellerine ait standart test koşullarına dönüştürülmüş maksimum güç ve tolerans değerleri

Ölçüm Sayısı	POLİKRİSTAL			MONOKRİSTAL		
	$P_{max}(STC)$ (W)	% Sapma	Durumu	$P_{max}(STC)$ (W)	% Sapma	Durumu
1	172,5	15,0	Pozitif tolerans dışı	174,5	16,4	Pozitif tolerans dışı
2	173,2	15,5	Pozitif tolerans dışı	173,4	15,6	Pozitif tolerans dışı
3	170,8	13,9	Pozitif tolerans dışı	171,2	14,1	Pozitif tolerans dışı
4	168,3	12,2	Pozitif tolerans dışı	171,6	14,4	Pozitif tolerans dışı
5	167,8	11,8	Pozitif tolerans dışı	172,4	15,0	Pozitif tolerans dışı
6	164,3	9,5	Pozitif tolerans dışı	170,7	13,8	Pozitif tolerans dışı
7	168,0	12,0	Pozitif tolerans dışı	172,1	14,7	Pozitif tolerans dışı
8	166,1	10,7	Pozitif tolerans dışı	168,2	12,2	Pozitif tolerans dışı
9	165,6	10,4	Pozitif tolerans dışı	151,5	1,0	<b>Tolerans aralığında</b>
10	164,7	9,8	Pozitif tolerans dışı	151,7	1,2	<b>Tolerans aralığında</b>
11	163,2	8,8	Pozitif tolerans dışı	149,4	-0,4	<b>Tolerans aralığında</b>
12	163,3	8,9	Pozitif tolerans dışı	149,0	-0,7	<b>Tolerans aralığında</b>
13	162,8	8,6	Pozitif tolerans dışı	154,1	2,8	<b>Tolerans aralığında</b>
14	162,2	8,1	Pozitif tolerans dışı	154,6	3,1	<b>Tolerans aralığında</b>
15	165,3	10,2	Pozitif tolerans dışı	154,6	3,1	<b>Tolerans aralığında</b>
16	165,0	10,0	Pozitif tolerans dışı	155,0	3,3	<b>Tolerans aralığında</b>

Polikristal güneş panelinden elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgilerdeki ( $\pm$  %5)'lik tolerans değerlerine uygun olmadığı tespit edilmiştir. Panel maksimum güç üretimi arttıkça tolerans değer aralığından uzaklaşmaktadır.

Monokristal güneş panelinden elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde üretici firma tarafından verilen karakteristik bilgilerdeki ( $\pm$  %5)'lik tolerans değerlerine %50 oranında

yaklaşıldığı tespit edilmiştir. Panelin ürettiği maksimum güç arttıkça tolerans değer aralığından uzaklaşmaktadır.

İki panel tipi kıyaslandığında ise polikristal panel üreticilerinin karakteristik bilgileri kataloglarında verirken standart test koşullarındaki bilgilerin çok iyi analiz edilmediği ve hatalı olduğu tespit edilmiştir. Standart test koşullarında yapılan ölçümler iyileştirilmeli ve  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\delta$  değerleri tekrar analiz edilmelidir. İki panel tipi içinde üretilen maksimum güç miktarı arttıkça verilen tolerans değerlerinin dışına çıktığı tespit edilmiştir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Fotovoltaik hücrelerin, farklı ışınım şiddetleri ve çalışma şartları altındaki akım, gerilim, ürettikleri maksimum güç değerlerinin ölçümü sistem performansını yansıtması açısından çok önemlidir. Çünkü fotovoltaik cihazların akım, gerilim ve güç çıktıları ışınım şiddeti, çalışma sıcaklığı ve iklimsel diğer parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin yanında panelin düzenli bakımının yapılması, temizlenmesi, uygun şekilde yönlendirilmesi ve uygun eğim açısının ayarlanması, gölgelenme gibi faktörler de göz önüne alınmalıdır.

Sonuç olarak Tekirdağ İli şartlarında aynı özellikte (150 W gücünde) monokristal ve polikristal olmak üzere iki tip panelin verimliliğinin incelenip yorumlanması imkanı bulunmuştur. Farklı teknolojilere dayalı panellerin fiyatları farklı olduğu gibi STC (Standart Test Koşulları) şartlarındaki verimleri de farklıdır. Gerçek ortamda yapılan ölçümler sonucu çıkan değerleri de elbette farklı çıkmıştır.

Verim, maliyet analizi çerçevesinde Tekirdağ ili ve Batı Marmara için optimum verimli panel tipi belirlenmiştir. Araştırma çerçevesinde, panele gelen ışınım miktarı, akım, gerilim, panelin ürettiği maksimum güç parametreleri üzerinden verimler karşılaştırılmış ve sonuca varılmıştır.

Gerçekleştirilen sistemde yapılan ölçümler sonucunda monokristal ve polikristal panellerin ürettikleri gerilim ve güç değerleri birbirine yakındır. Monokristal panelin teorik olarak %15 ile %18 oranında verimi varken, Tekirdağ iklimi şartlarında bu verim ortalama %15 olarak elde edilmiştir. Polikristal panelin teorik olarak verimleri %14 ile %16 oranında iken Tekirdağ İklimi koşullarında ortalama %14,9 olarak elde edilmiştir. Her iki panelin STC ve gerçek ölçüm şartlarında maksimum güç üretimleri arasındaki sapma oranı kıyaslandığında monokristal panelde ölçümlerin %50'si tolerans değer aralığı içinde kalmıştır. Polikristal panelde tüm ölçümler belirlenen tolerans değerlerinin dışındadır. Bu üretici firmalar tarafından verilen STC koşullarındaki değerlerin uygun olmamasından kaynaklanabilir. Panellerin ürettikleri maksimum güç miktarları azaldıkça tolerans değerlerine yaklaşılmaktadır.

Deney esnasında yaz mevsimi yaşandığı için Tekirdağ ili sınırlarında sıcaklık 30°C ile 36°C arasında değişim göstermiştir. Ülkemiz şartları ve Tekirdağ ili güneş ışınım miktarları düşünüldüğünde polikristal panel kullanımının yüksek verimi açısından uygun olacağı söylenebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Beyaođlu, F (2011). Balıkesir ilinde çift eksenli güneş takip sistemi ile sabit eksenli PV sistemin verimlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Bingöl O, Özkaya B (2018). Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions. *Solar Energy* 160: 336–343.
- Boz O (2011). Günümüzün alternatif enerji kaynağı güneş pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Çetinkaya H (2001). Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Demirtaş, M (2006). Bilgisayar kontrollü güneş takip mekanizması tasarımı ve uygulaması, *Politeknik Dergisi*, 9 (4): 247-253.
- Diken Ö (2000). Fotovoltaik Ünite Tasarımı, Elektrik Enerjisi Üretimi ve Maliyet analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erkul A (2010). Monokristal, Polikristal ve Amorf-Silisyum güneş panellerinin verimliliğinin incelenmesi ve aydınlatma sistemi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaddoura TO, Ramli MAM, Al-Turki YA (2016). On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65:626–634.
- Kadiođlu S, Telliöđlu Z (1996). Enerji Kaynaklarının Kullanımı ve Çevreye Etkileri. TMMOB Türkiye Enerji Sempozyumu, 55-67.
- Koppelaar RHEM (2017). Solar-PV energy payback and net energy: Meta-assessment of study quality, reproducibility, and results harmonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72: 1241–1255.
- Köse S (1986). Yarıiletken güneş pilleri ve verimlilikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Küpeli A Ö (2005). Güneş pilleri ve verimleri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Lynn K (2001). Test method for photovoltaic module ratings. Florida Solar Energy Center, 16 p, Florida, USA.
- Mandala R, Panjab S (2016). Design and feasibility studies of a small scale Grid Connected Solar PV Power Plant. *Energy Procedia* 90: 191 – 199.
- Moehlecke A, Febras FS, Zanesco I (2013). Electrical performance analysis of PV modules with bifacial silicon solar cells and white diffuse reflector. *Solar Energy* 96 : 253–262.

- Prasad DK, Snow M (2005). *Designing With Solar Power. A Source Book for Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*, Australia, Images Publishing.
- Quansah DA, Adaramola MS, Appiah GK, Edwin IA (2017). Performance analysis of different grid-connected solar photovoltaic (PV) system technologies with combined capacity of 20 kW located in humid tropical climate. *International Journal of Hydrogen Energy* 42: 4626-4635.
- Siddiqui R, Kumar R, Kumar JG, Gowri G, Morampudi M, Rajput P, Lata S, Agariya S, Dubey B, Nanda G, Sahan RS (2016). Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor Performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability. *Energy* 107: 550-561.
- Zaraket J, Aillerie M, Salame C (2017). Capacitance evolution of PV solar modules under thermal stress. *Energy Procedia* 119: 702-708.

## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Tekirdağ'da doğdu. İlkokulu Tekirdağ Fevzi Çakmak İlkokulunda, Ortaokulu Tekirdağ 50. Yıl İlköğretim okulunda tamamladı. 2006 yılında Tekirdağ Anadolu Meslek Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Öğretmenliği bölümünden mezun oldu. 2013 yılında Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılında Diyarbakır Bismil İlçesi Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'ne Elektrik/Elektronik Teknolojileri Öğretmeni atanarak göreve başladı. 2016 yılında Tekirdağ Çerkezköy İlçesi Kızılpınar Belediyesi Çok Programlı Anadolu Lisesi'ne tayin oldu ve halen görevine bu okulda devam etmektedir.