

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN BİR  
GERÇEK SAHA PERFORMANS ÖLÇÜM  
PLATFORMUNUN TASARIMI, KURULUMU VE TESTLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Kerem TURHAN**

**Anabilim Dalı : Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı : Enerji Bilim ve Teknoloji**

**HAZİRAN 2011**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN BİR  
GERÇEK SAHA PERFORMANS ÖLÇÜM  
PLATFORMUNUN TASARIMI, KURULUMU VE TESTLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kerem Turhan**

**(301081017)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Mayıs 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Altuğ Şişman (İTÜ)**

**Eş Danışman : Yrd. Doç. Dr. Fatih Öztürk (İTÜ)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Özgür Üstün (İTÜ)**

**HAZİRAN 2011**



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nde "Yeni Enerji Teknolojileri Araştırma Grubu-NETRG" içerisinde, Prof. Dr. Altuğ Şişman'ın danışmanlığında yapılmıştır. Tezin temel amacı, fotovoltaik modüller için bir gerçek saha test platformunun tasarlanması, kurulması ve seçilen örnek bir fotovoltaik modül grubu üzerinde ölçümlere yapılmasıdır.

Tez süresince her aşamada maddi manevi desteğini ve yardımını esirgemeyen, başta değerli tez danışmanım sayın Prof. Dr. Altuğ Şişman'a ve diğer hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmasını olanaklı kılan İTÜ BAP proje desteği içinde İTÜ'ye teşekkür ederim.

Haziran 2011

Kerem Turhan

(Kimya-Biyoloji Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|  |          |
|--|----------|
| ÖNSÖZ.....   | v        |
| İÇİNDEKİLER .....  | vii      |
| KISALTMALAR .....  | ix       |
| SEMBOLLER.....   | xi       |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....   | xiii     |
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | xv       |
| ÖZET.....  | xix      |
| SUMMARY .....  | xxi      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi ..... | 1        |
| 1.2 Tezin Amacı .....  | 2        |
| 1.3 Literatür Özeti .....  | 3        |
| 1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Sonuçlar .....                   | 5        |
| <b>2. TEMEL BİLGİLER .....</b>                                       | <b>7</b> |
| 2.1 Fotovoltaik Sistemlere Giriş ve Kısa Tarihçeleri.....            | 7        |
| 2.2 Güneş Işınımıyla İlgili Temel Bilgiler .....                     | 8        |
| 2.2.1 Işınım Güç Yoğunluğu .....                                     | 8        |
| 2.2.2 Ters kare yasası .....   | 9        |
| 2.2.3 Günlük toplam ışınım.....                                      | 9        |
| 2.2.4 Atmosfer dışı ışınım:.....                                     | 10       |
| 2.2.5 Işınım spektrumu: .....  | 10       |
| 2.2.6 Atmosferik etkiler: .....                                      | 11       |
| 2.2.7 Direkt ışınım: .....   | 11       |
| 2.2.8 Difüzif ışınım: .....  | 11       |
| 2.2.9 Air-mass kavramı .....   | 12       |
| 2.2.10 Güneşin pik yaptığı zamanlar.....                             | 13       |
| 2.2.11 Güneş ışınım ölçümü .....                                     | 13       |
| 2.2.12 Pironometre .....   | 13       |
| 2.2.13 Güneş deklinasyonu: .....                                     | 14       |
| 2.2.14 Kosinüs düzeltmesi: .....                                     | 15       |
| 2.3 GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası).....                    | 16       |
| 2.4 Fotovoltaik Modüllerle İlgili Temel Bilgiler .....               | 18       |
| 2.4.1 Metaller yarı iletkenler ve yalıtkanlar .....                  | 18       |
| 2.4.2 Fotovoltaik pillerin yapısı ve çalışma prensipleri .....       | 19       |
| 2.4.3 Fotovoltaik modüllerin yapıları .....                          | 20       |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.4.4 Fotovoltaik modül hücre tipleri.....  | 21        |
| 2.4.5 Fotovoltaik modül dizileri.....   | 24        |
| 2.5 Fotovoltaik Pillerin Avantaj ve Dezavantajları.....   | 26        |
| 2.6 Fotovoltaik Modüllerin Temel Karakteristikleri.....   | 27        |
| 2.7 Fotovoltaik Modüllerin Performansları.....  | 28        |
| 2.7.1 Fill factor (FF) doluluk oranı.....   | 28        |
| 2.7.2 Verim.....  | 29        |
| 2.7.3 Işınım şiddeti verim ilişkisi.....  | 29        |
| 2.7.4 Sıcaklık katsayıları.....   | 29        |
| 2.7.5 Farklı ışınım güç yoğunluğundaki fotovoltaik modüllerin güç çıkışları.....                        | 31        |
| 2.8 Eviriciler.....   | 32        |
| 2.8.1 Eviricilerin genel tanıtımı.....  | 32        |
| 2.8.2 Evirici özellikleri, uygulamaları teknik parametreler.....  | 33        |
| 2.8.3 Evirici verimi.....   | 34        |
| 2.8.4 Evirici teknolojileri.....  | 35        |
| <b>3. TEST PLATFORMUNUN BİLEŞENLERİ VE TASARIMI.....</b>  | <b>38</b> |
| 3.1 Fotovoltaik Sistem Test Platformu Deney Şeması.....   | 38        |
| 3.2 Fotovoltaik Sistem Test İstasyonu Konstrüksiyon Tanıtımı.....                                       | 39        |
| 3.3 Veri Toplama Sisteminin Özellikleri:.....   | 41        |
| 3.4 Fotovoltaik Modül Gerçek Saha Test İstasyonu Ekipman Teknik Verileri.....                           | 45        |
| 3.4.1 KANEKA K-60 60Wp a-si ince film.....  | 45        |
| 3.4.2 Dış ortam hava sıcaklık sensörü:.....   | 47        |
| 3.4.3 Fotovoltaik modül sıcaklık sensörü:.....  | 48        |
| 3.4.4 Işınım güç yoğunluğu sensörü:.....  | 49        |
| 3.5 Modül Veriminin Belirlenme Yöntemi.....   | 50        |
| 3.6 Toplanan Verilerin İşlenmesinde Kullanılan İstatistiksel Yöntemler.....                             | 50        |
| 3.7 Sistemdeki Ölçüm Belirsizliklerinin Kaynakları.....   | 51        |
| 3.8 Hesaplamalardaki Kabullerden Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar.....                                     | 51        |
| <b>4. TEST PLATFORMUNDA KURULU GÜNEŞ PİLLERİNİN<br/>PERFORMANS ÖLÇÜMÜ VE DEĞERLENDİRMESİ.....</b>       | <b>52</b> |
| 4.1 KANEKA K-60 Güneş Pillerinin Gerçek Saha Test Performans Sonuçları.....                             | 52        |
| 4.1.1 Modül gücü ile relatif modül sıcaklığı arasındaki ilişki.....                                     | 52        |
| 4.1.2 Modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki.....  | 55        |
| 4.1.3 Modül verimi ile relatif modül sıcaklığı arasındaki ilişki.....                                   | 58        |
| 4.1.4 Modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki.....                                      | 61        |
| 4.1.5 Modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki.....                                   | 64        |
| 4.1.6 Modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki ilişki.....   | 67        |
| 4.2 Havanın Taşınım Katsayısının Hesaplanması.....  | 70        |
| 4.3 KANEKA K-60 Güneş Pillerinin Üretim Değerleri.....  | 72        |
| 4.4 KANEKA K-60 Fotovoltaik Modülün Standard İşletim Koşullarındaki<br>Ölçülen Teknik Parametreler..... | 77        |
| <b>5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI.....</b>  | <b>79</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>   | <b>81</b> |



## **KISALTMALAR**

|                |   |
|----------------|---|
| <b>Si</b>      | : Silikon   |
| <b>a-Si</b>    | : Amorf Silikon                                       |
| <b>3j a-Si</b> | : 3 Katmanlı Amorf Silikon                            |
| <b>c-Si</b>    | : Mono Kristal  |
| <b>CIS</b>     | : Copper Indium Deselenide (Bakır İndyum Diselenayt)  |
| <b>GEPA</b>    | : Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası                   |
| <b>GTO</b>     | : Gate Turn Off                                       |
| <b>IGBT</b>    | : Insulated Gate Bipolar Transistors                  |
| <b>MOSFET</b>  | : Metal Oxide Semi-Conductor Field Effect Transistors |
| <b>PWM</b>     | : Pulse Width Modulation                              |
| <b>p-Si</b>    | : Poli Kristal  |



## SEMBOLLER

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>A</b>                         | : Toplam Modül Yüzey Alanı                          |
| <b>A.M.</b>                      | : Air-Mass  |
| <b>a</b>                         | : En Uygun Panel Açısı                              |
| <b>C<sub>n</sub></b>             | : Sıcaklığa Bağlı Verim Katsayısı                   |
| <b>C<sub>p</sub></b>             | : Sıcaklığa Bağlı Güç Katsayısı                     |
| <b>D</b>                         | : Deklinasyon                                       |
| <b>E<sub>g</sub></b>             | : Enerji Bariyeri                                   |
| <b>E<sub>s</sub><sup>d</sup></b> | : Toplam Günlük Işınım                              |
| <b>FF</b>                        | : Fill Factor (Doluluk Oranı)                       |
| <b>h</b>                         | : Havanın Taşınım Katsayısı                         |
| <b>I</b>                         | : Akım  |
| <b>I<sub>SC</sub></b>            | : Kısa Devre Akımı                                  |
| <b>J<sub>S</sub></b>             | : Işınım Güç Yoğunluğu                              |
| <b>P<sub>M</sub></b>             | : Modül Gücü  |
| <b>P<sub>M0</sub></b>            | : Sistemden Alınabilecek Maksimum Modül Gücü        |
| <b>P<sub>INV</sub></b>           | : Evirici Çıkış Gücü                                |
| <b>P<sub>IN</sub></b>            | : Toplam Sisteme Gelen Güç                          |
| <b>P<sub>LOCAL</sub></b>         | : Lokal Atmosferik Basınç                           |
| <b>p-Si</b>                      | : Poli Kristal                                      |
| <b>θ</b>                         | : Zenith Açısı                                      |
| <b>T<sub>h</sub></b>             | : Hava Sıcaklığı                                    |
| <b>T<sub>m</sub></b>             | : Modül Sıcaklığı                                   |
| <b>T<sub>0</sub></b>             | : Standart İşletim Koşulları Olan 25 <sup>0</sup> C |
| <b>t<sub>d</sub></b>             | : Toplam Gün Süresi                                 |
| <b>t</b>                         | : Zaman   |
| <b>V<sub>M</sub></b>             | : Modül Gerilimi                                    |
| <b>V<sub>OC</sub></b>            | : Açık Devre Gerilimi                               |
| <b>η<sub>M</sub></b>             | : Modül Verimi                                      |
| <b>η<sub>M0</sub></b>            | : Sistemden Alınabilecek Maksimum Modül Verimi      |
| <b>η<sub>inv</sub></b>           | : Evirici Verimi                                    |
| <b>ϕ</b>                         | : Panelin Bulunduğu Bölgenin Enlemi                 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| <b>Çizelge 2.1</b> : Genel olarak güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları.....                    | 26           |
| <b>Çizelge 2.2</b> : İnce film güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları.....                       | 26           |
| <b>Çizelge 2.3</b> : Mono ve poli kristal güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları.....            | 27           |
| <b>Çizelge 2.4</b> : Evirici (inverter) genel parametreleri. ....                                    | 34           |
| <b>Çizelge 3.1</b> : Kaneka K-60 a-si ince film modülün teknik verileri.....                         | 46           |
| <b>Çizelge 3.2</b> : Fronius hava sıcaklık sensörü teknik verileri .....                             | 47           |
| <b>Çizelge 3.3</b> : Fronius modül sıcaklık sensörü teknik verileri .....                            | 48           |
| <b>Çizelge 3.4</b> : Fronius ışınım güç yoğunluğu teknik verileri .....                              | 49           |
| <b>Çizelge 4.1</b> : Standard işletim koşulunda fotovoltaik modüllerin performans verileri.<br>..... | 77           |



## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1 : Işınım güç yoğunluğu.....  | 8  |
| Şekil 2.2 : Işınım ters kare yasası .....  | 9  |
| Şekil 2.3 : Işınım güç yoğunluğu ve günlük toplam ışınım.....  | 9  |
| Şekil 2.4 : Işınım spektrumu.....  | 10 |
| Şekil 2.5 : Atmosferik etkilerin gösterimi .....   | 11 |
| Şekil 2.6 : Güneş ışınlarının geliş açıları .....  | 13 |
| Şekil 2.7 : Eppley Laboratuar'ındaki pironometre ve bir peroliometre.....  | 14 |
| Şekil 2.8 : Güneş deklinasyonu .....   | 15 |
| Şekil 2.9 : Kosinüs düzeltmeli pironometre .....   | 15 |
| Şekil 2.10 : Türkiye toplam güneş enerjisi değerleri ve güneşlenme süreleri .....  | 16 |
| Şekil 2.11 : Türkiye güneş enerjisi potansiyeli ve ışınım güç yoğunluğu değerleri<br>renk skalasıyla harita üzerindeki gösterimi ..... | 17 |
| Şekil 2.12 : Metal, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji bariyerleri .....   | 18 |
| Şekil 2.13 : Silikon'un valans elektronları ve oktet kuralına bağ yapısı gösterimi ...   | 18 |
| Şekil 2.14 : n tipi ve p tipi katkılama.....   | 19 |
| Şekil 2.15 : Güneş pili yapısı ve bileşenleri .....  | 20 |
| Şekil 2.16 : Mono-kristal hücre ve yapımında kullanılan silisyum külçeleri.....  | 21 |
| Şekil 2.17 : Poli-kristal hücre yapısı.....  | 21 |
| Şekil 2.18 : Amorf-silikon hücre yapısı.....   | 22 |
| Şekil 2.19 : Galyum arsenür hücre yapısı.....  | 22 |
| Şekil 2.20 : Esnek ince film hücre .....   | 23 |
| Şekil 2.21 : Bakır indiyum diselenit hücreli modül.....  | 23 |
| Şekil 2.22 : Kadmiyum telorayt fotovoltaik modül .....   | 24 |
| Şekil 2.23 : Farklı şekilde bağlanmış modüllerin akım ve voltaj değerleri .....  | 25 |
| Şekil 2.24 : Farklı modüllerin farklı bağlantı koşullarında gerilim-akım grafikleri...   | 25 |
| Şekil 2.25 : Güneş pillerinin akım gerilim karakteristikleri .....   | 27 |
| Şekil 2.26 : Modüllerin farklı yüzey sıcaklıklarda akım-gerilim değişimleri.....   | 27 |
| Şekil 2.27 : Modülün farklı ışınım güç yoğunluğundaki akım-gerilim değişimleri..   | 28 |
| Şekil 2.28 : Güneş pillerinin üretim güçlerinin sıcaklıkla değişimi .....  | 28 |
| Şekil 2.29 : Modül doluluk oranı hesaplaması grafiksel gösterimi .....   | 28 |
| Şekil 2.30 : Farklı güneşlenme şiddetlerinde modüllerin verim değişimleri.....   | 29 |
| Şekil 2.31 : Farklı ortam sıcaklıklarında modül performans değişimleri .....   | 30 |
| Şekil 2.32 : Farklı ışınım güç yoğunluklarında modül performans değerleri.....   | 31 |
| Şekil 2.33 : Farklı ışınım güç yoğunluklarında modül performans değerleri.....   | 32 |
| Şekil 2.34 : SMA evirici .....   | 32 |
| Şekil 2.35 : Farklı tipteki eviricilerin gerilim ve akımlarının zamanla değişimleri...   | 35 |
| Şekil 2.36 : Fronius IG serisi eviricilerin anma gücü - verim ilişkisi.....  | 36 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 3.1</b> : Fotovoltaik modül test platformu deneye şeması.....  | 38 |
| <b>Şekil 3.2</b> : İTÜ’de kurulu olan güneş pili test istasyon konstrüksiyon yapısı .....   | 39 |
| <b>Şekil 3.3</b> : AutoCad’te çizilmiş olan sistemin plan görünümü ve boyutları .....   | 40 |
| <b>Şekil 3.4</b> : AutoCad’te çizilmiş olan sistemin arka görünümü ve boyutları .....   | 40 |
| <b>Şekil 3.5</b> : AutoCad’te çizilmiş olan sistemin yan görünümü ve boyutları .....  | 41 |
| <b>Şekil 3.6</b> : Fronius veri toplama programının açılış ekranı.....  | 41 |
| <b>Şekil 3.7</b> : Fronius ara yüzünde görülmüş minimum-maksimum değerleri .....  | 42 |
| <b>Şekil 3.8</b> : Fronius ara yüzünde kayıt edilmiş akım, gerilim ve güç değerleri .....   | 43 |
| <b>Şekil 3.9</b> : Fronius ara yüzünde çubuk diyagramlı aylık üretim tabloları.....   | 43 |
| <b>Şekil 3.10</b> : Kaneka K-60 amorf silikon ince film fotovoltaik modül .....   | 45 |
| <b>Şekil 3.11</b> : Kaneka K-60 ince film fotovoltaik modülün boyutları .....   | 45 |
| <b>Şekil 3.12</b> : Fronius hava sıcaklık sensörü.....  | 47 |
| <b>Şekil 3.13</b> : Fronius modül sıcaklık sensörü .....  | 48 |
| <b>Şekil 3.14</b> : Fronius ışınım güç yoğunluğu sensörü.....   | 49 |
| <b>Şekil 4.1</b> : 1000 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.....  | 53 |
| <b>Şekil 4.2</b> : 800 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.....   | 53 |
| <b>Şekil 4.3</b> : 600 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.....   | 54 |
| <b>Şekil 4.4</b> : 1000 W/m <sup>2</sup> , 800 W/m <sup>2</sup> ve 600 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafikleri.....  | 54 |
| <b>Şekil 4.5</b> : 15 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 56 |
| <b>Şekil 4.6</b> : 25 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 56 |
| <b>Şekil 4.7</b> : 35 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 57 |
| <b>Şekil 4.8</b> : 45 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 57 |
| <b>Şekil 4.9</b> : 15 <sup>0</sup> C, 25 <sup>0</sup> C, 35 <sup>0</sup> C ve 45 <sup>0</sup> C farklı modül sıcaklıklarında ışınım güç yoğunluğu ile modül gücü değişim grafikleri.....  | 58 |
| <b>Şekil 4.10</b> : Işınım güç yoğunluğu 1000 W/m <sup>2</sup> , iken modül verimi ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.....   | 59 |
| <b>Şekil 4.11</b> : Işınım güç yoğunluğu 800 W/m <sup>2</sup> , iken modül verimi ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.....  | 59 |
| <b>Şekil 4.12</b> : Işınım güç yoğunluğu 600 W/m <sup>2</sup> , iken modül verimi ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.....  | 60 |
| <b>Şekil 4.13</b> : 1000 W/m <sup>2</sup> , 800 W/m <sup>2</sup> ve 600 W/m <sup>2</sup> , ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül verimi relatif modül sıcaklığı değişim grafikleri..... | 60 |
| <b>Şekil 4.14</b> : 15 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu grafiği.....   | 62 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Şekil 4.15</b> : 25 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu grafiği.....  | 62 |
| <b>Şekil 4.16</b> : 35 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu grafiği.....  | 63 |
| <b>Şekil 4.17</b> : 45 <sup>0</sup> C sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu grafiği.....  | 63 |
| <b>Şekil 4.18</b> : 15 <sup>0</sup> C, 25 <sup>0</sup> C, 35 <sup>0</sup> C ve 45 <sup>0</sup> C modül sıcaklıklarında ışınım güç yoğunluğu ile modül verimi değişim grafi.....  | 64 |
| <b>Şekil 4.19</b> : 20 <sup>0</sup> C sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 65 |
| <b>Şekil 4.20</b> : 25 <sup>0</sup> C sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 65 |
| <b>Şekil 4.21</b> : 30 <sup>0</sup> C sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 66 |
| <b>Şekil 4.22</b> : 35 <sup>0</sup> C sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.....  | 66 |
| <b>Şekil 4.23</b> : 20 <sup>0</sup> C, 25 <sup>0</sup> C, 30 <sup>0</sup> C, 35 <sup>0</sup> C hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişimi grafikleri.....  | 67 |
| <b>Şekil 4.24</b> : 1000 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.....  | 68 |
| <b>Şekil 4.25</b> : 800 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.....   | 68 |
| <b>Şekil 4.26</b> : 600 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.....   | 69 |
| <b>Şekil 4.27</b> : 400 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.....   | 69 |
| <b>Şekil 4.28</b> : 200 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.....   | 70 |
| <b>Şekil 4.29</b> : 1000 W/m <sup>2</sup> , 800 W/m <sup>2</sup> , 600 W/m <sup>2</sup> , 400 W/m <sup>2</sup> ve 200 W/m <sup>2</sup> ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği..... | 70 |
| <b>Şekil 4.30</b> : İstanbul ili toplam güneş enerjisi değerleri.....  | 73 |
| <b>Şekil 4.31</b> : 7 Nisan 31 Ekim 2010 tarihleri arasında 300Wp kurulu güce sahip sistemin günlük enerji üretim değerleri.....   | 73 |
| <b>Şekil 4.32</b> : 7 Nisan 31 Ekim 2010 tarihleri arasında 300Wp kurulu güce sahip sistemin aylık enerji üretim değerleri.....  | 74 |
| <b>Şekil 4.33</b> : 7 Nisan 31 Ekim 2010 tarihleri arasında 300Wp kurulu güce sahip sistemin ay bazında sürekli güç bileşeni değerleri.....  | 77 |



## **FOTOVOLTAİK MODÜLLER İÇİN BİR GERÇEK SAHA PERFORMANS ÖLÇÜM PLATFORMUNUN TASARIMI, KURULUMU VE TESTLERİ**

### **ÖZET**

Günümüz dünyasında enerji ihtiyacı her geçen yıl artış göstermekteyken, enerji üretiminin %80'nin karşılandığı fosil yakıtların ömürleri ise gün geçtikçe azalmaktadır. Bu durum alternatif enerji kaynakları içinden, yenilenebilir enerji kaynaklarını artan enerji talebinin karşılanmasında öne çıkarmaktadır. Yenilenebilir enerji, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki güneş ışığı, rüzgâr, akan su, biyolojik süreçler ve jeotermal gibi varolan enerji akışından elde edilen ve insa ömrüne kıyasla çok kısa sürede kendini yenileyebilen bir enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının hem üretimleri sırasında çevreye zarar vermiyor olmaları, hem de üretimleri sırasındaki yakıt giderlerinin olmayışı bu enerji kaynaklarının en önemli avantajlarından. Yenilenebilir enerji teknolojileri üzerine özellikle son 50 yıllık süreçte çok önemli yatırımlar yapılmış ve bu enerji kaynaklarının üretim verimlerinde günümüze geldikçe ciddi verim artışları sağlanmıştır. Ayrıca günümüzde farklı enerji depolama teknolojilerindeki sağlanan gelişmeler sonucu yenilenebilir enerji kaynaklarına olan emre amadelik problemleri minimize edilmiş ve bu enerji kaynaklarına olan güven daha da artmıştır.

Bu tez çalışmasında, güneş pili modüllerinin gerçek saha ortamında performanslarının çıkartılması hedeflenmiştir. Projenin esası farklı tip ve güçlerdeki fotovoltaik modüllerin gerçek saha ortamında test edilebilecekleri test platformunun tasarlanıp, kurulması ve örnek bir modül üzerinde test çalışmasının yapılarak sistemin doğrulanmasıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde güneş çok önemli bir yere sahip olduğundan bu teknolojinin üzerine yurt içinde ve dışında birçok yatırım yapılmaktadır. Ülkemizde üretilen veya ülkemize ithal edilen ürünlerin bazılarında etiket değerleriyle gerçek sahadaki performans değerleri arasında önemli farklılıklar görülebilmektedir. Fotovoltaik modül test istasyonu ile platform üzerine takılan ürünlerin gerçek saha koşullarındaki performans değerleri ortaya konulabilecektir.



## **DESIGNING, IMPLEMENTING AND DATA LOGGING A REAL SITE PHOTOVOLTAIC TEST PLATFORM FOR DIFFERENT TYPES OF PHOTOVOLTAIC MODULES**

### **SUMMARY**

While the world energy demand increasing annually, existing fossil fuels which provides 80 percent of world energy output, are decreasing day by day. This situation increase the importance of the other alternative energy sources. In this alternative energy sources, renewable energy resources become very popular nowadays. Renewable energy is an energy which comes from natural resources such as sunlight, wind, rain, tides, and geothermal heat, which are renewable (naturally replenished). The main advantages of the renewable energy sources are can be count as environmental friendly and to obtain those sources free of charge from the nature. In last 50 years scientists who are studying on energy technologies, are generally concentrated on renewable energy technologies. With these applied research projects, the production facilities of the renewable energy are developing. The energy production efficiencies are increasing. On the other hand, the new energy storage technologies are developing as well. These two interrelated cases encourage the energy companies to invest in renewable energy technologies.

In this study, photovoltaic modules performance characterization have been made at real site. The aim of this project is designing, implementing and data logging a real site photovoltaic test platform for different types of photovoltaic modules.

Solar energy has got a very important place inside of the renewable energy sources. Because of that reason domestic and foreign energy organizations are investing on solar energy technologies. However, some of the imported or domestic manufactured photovoltaic modules' technical data sheet values and real site performances have significant differences. With this basic test platform enables each system to test properly which leads end user and importers to protect themselves from the results of technical and economical hazards.



## 1. GİRİŞ

### 1.1 Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi

Enerji ihtiyacı gelişen dünyamızda her yıl % 4-5 oranında artış göstermektedir. Buna karşılık günümüz enerji kaynakları içinde ihtiyacın büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. Günümüz enerji tüketim verileri ve gelecekteki tüketim artışları baz alınarak yapılan iyimser yönlü projeksiyonlarda dahi, çokta uzak olmayan bir gelecekte fosil yakıtlar içinde öncelikli olarak petrolün, petrolü takip eden süreçte kömür ve doğal gazın da büyük ölçüde tükeneceği öngörülmektedir.

Bu fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanımı yoğun bir hava kirliliğine neden olup dünya ortalama sıcaklığının son bin yılın en yüksek seviyelerine ulaşmasına neden olmaktadır. Bunlar sonucu milyonlarca dolarlık zararlar yaratan sel, fırtına ve doğal afetler ciddi oranda artış göstermiştir.

Çevreye salınan bu zehirli gazlar atmosferde birikmektedir. Fotosentez, çürüme gibi tabii dönüşümler bu birikmeye engel olsa da fosil yakıt tüketiminin artışı bu gazların kısa süreli birikmesine neden olmaktadır.

Öte yandan yenilenebilir enerji kaynaklarının günümüzde kullanımının artmasıyla enerji ihtiyacının bir kısmı bu kaynaklardan karşılanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sağladığı en önemli avantaj, enerji üretimi sırasında çevreye herhangi bir zarar verilmemesi ve temiz bir şekilde enerjinin üretilmesidir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en önemlileri rüzgar ve güneş enerjisi olarak kabul edilmektedir. Bu enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi için yapılması gereken en önemli yatırım kurulum maliyetleridir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından yapılan enerji üretim süreçleri içinde işletim giderleri diğer fosil yakıtların kullanıldığı enerji üretim süreçlerindeki işletim giderlerine göre çok daha azdır. Çünkü enerji kaynağı için ekstra olarak bir ödeme yapılmamaktadır. Bu da işletim giderlerinde önemli bir kazanç sağlamaktadır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynaklarının sağladığı bir diğer önemli avantaj olarak enerji kaynağının bedava olması kabul edilir.

Yapılan çalışma yenilenebilir enerji kaynakları içinden güneş enerjisi teknolojileri üzerinedir. Çalışmada fotovoltaik modüller için bir gerçek saha performans ölçüm platformunun tasarımı, kurulumu ve testleri yapılmıştır. Bu yapılan testlerle sistem üzerine takılmış olan güneş pillerinin performans değerleri gerçek saha koşullarında değerlendirilmektedir.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, gerçek saha koşullarında test için seçilen fotovoltaik modüllerin performanslarının ve karakteristiklerinin belirlenmesidir. Böyle bir durumun problem olarak seçilip incelenmesinin nedeni ise ürünlerin etiket değerleriyle saha koşullarında üretim değerlerinin gerek çevresel koşullardan gerekse yapılan kabul koşullarından veya ürünlerin kalitelerinden dolayı farklılıklar göstermesidir.

Fotovoltaik modüller için bir gerçek saha test platformu oluşturma ihtiyacını daha derin olarak inceliyecek olursak; fotovoltaik modül üreticileri, ürünlerini tüm fotovoltaik modüller için geçerli olan ve standard koşul olarak kabul edilen  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım güç yoğunluğu altında ve  $25^\circ\text{C}$  modül yüzey sıcaklığı altında yapılan etiket performans değerlerine göre belirlemektedirler. Fakat bu koşul gerçek işletim koşullarında hiçbir zaman yakalanabilecek bir değer olmamaktadır. Tez içerisinde yapılan testlerin sonuçlarıyla da görüleceği üzere gerçek saha işletim koşullarında yaklaşık  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül yüzey sıcaklıklarının  $25^\circ\text{C}$ 'den çok daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu süreçten yola çıkarak gerçek işletim koşullarında üreticinin ürettiği veya satıcının satın aldığı ürünü gerçek saha koşullarında performans testlerine tabi tutarak sistemlerin daha gerçekçi bir performans etiket değerleri çıkarılmış olacaktır.

Bu tezle ulaşılmak istenen hedefler aşağıda belirtilmiştir:

- Üretilen veya ithal edilen fotovoltaik panellerin etiket performans değerleriyle gerçek uygulama sırasındaki üretim değerleri farklı olabilmektedir. Bunların değerlendirmesinde yardımcı olacak bir test platformu tasarımı, sonucunda kurulumu ve yapılacak ölçümlerle sistem üzerine kurulacak modüllerin gerçek performans değerlerinin saptanması hedeflenmektedir.



- Ayrıca farklı tipteki fotovoltaik modüller de bu test platformu üzerine aynı anda takılarak her birinin aynı koşullar altındaki gerçek üretim değerleri ortaya çıkacak ve performans değerlerinin birbirleriyle karşılaştırması kolayca yapılabilecektir.
- Bu tez sonucunda hedeflenen bir diğer kazanımda bu test platformuyla İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nü, ithal edilen ve üretilen fotovoltaik modüllerin test edilip değerlendirildiği yetkili kurum pozisyonuna getirmektir.
- Bu tezin hedefleri içinde bir diğer amaçta uzakdoğu'dan gelen fotovoltaik modüllerin bazılarında etikette sunulan değerlerle gerçekteki değerler farkının ortaya konulmasıdır. Bu da ülke kaynaklarının kötü kullanımına, ithal eden sanayi ya da ticari kuruluşun ekonomik zarar görmesine ve güven kaybına, bunlarla birlikte kullanıcının ekonomik ve teknik zarar görmesine ve teknolojiye olan güven kaybına yol açtığından bunların önüne geçebilmek için basit tasarlanmış bir test platformu oluşturulması düşünülmüştür.

### 1.3 Literatür Özeti

Fotovoltaik modüller üzerine kısa ve uzun dönemli yapılmış gerçek saha testlerini içeren, sıcaklığın fotovoltaik modüller üzerindeki etkilerini inceleyen, aynı dış ortam koşullarında farklı fotovoltaik modüllerin gerçek saha performanslarının testlerini içeren yayınlanmış yakın zamanlı makaleler vardır. Bu tez çalışması sırasında yapılan literatür taramasında incelenen makale ve çalışmaların özetine bu bölümde değinilmiştir.

Jung Hun ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, Güney Kore'deki Fotovoltaik Modül Demo Saha Test Merkezinde 2002 yılında kurulmuş yapılmış olan, takiben performans testlerine başlanan 3kW'lık şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin, gerçek saha koşullarındaki performansı, modüllerin kayıp faktörleri, sistemin teknik verilerine göre önceden projeksiyonu yapılmış olan performans değerleriyle gerçek koşulların karşılaştırılması incelenmektedir [1].

A.J. Carr ve diğerleri yaptıkları çalışmada; beş farklı çeşit fotovoltaik modülün; c-Si (mono kristal), p-Si (poli-kristal), a-Si (amorfsilikon), 3J a-Si (3 katmanlı amorfsilikon), CIS (bakır indiyum diselenid) yan yana ve aynı platform üzerine

yerleştirildikleri gerçek saha test istasyonunda; modüllerin I-V karakteristikleri, yıllık ve aylık performans oranları ve maksimum güçteki değerleri incelenmiş ve bu değerler üreticilerin verdiği performans değerleriyle karşılaştırılmıştır [2].

Takashi Minemoto ve ekibi tarafından yapılan çalışmada mono-poli kristal fotovoltaik modüllerle ince film fotovoltaik modüllerin gerçek saha koşullarındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. Bu incelemede, mono-poli kristal fotovoltaik modüllerin performansları en çok sıcaklıktan etkilenirken, ince film fotovoltaik modüllerin performansları hem sıcaklık hem de ışınım güç yoğunluğu değerlerinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca mono-poli kristal fotovoltaik modüllerde çıkış güç değerlerinin sıcaklıkla negatif yönde etkilenip, standard işletim koşullarına göre azalma gerçekleştiği gözlemlenmiştir. İnce film fotovoltaik modüllerde ise bu süreç başlangıçta tersi yönde işlese de sıcaklığın daha çok arttığı koşullarda güç değerlerinde azalma gözlemlenmiştir [3].

E.E. Van Dayk ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada fotovoltaik modüllerin uzun dönemli performans değerleri ve bu modüller yaşlandırma işlemlerine tabii tutulurkenki performans değerleri incelenmiştir. Düz plaka halinde konumlanmış fotovoltaik modül dizileri 15 ay teste tabii tutulurken, yoğunlaştırıcıli fotovoltaik modül dizileri 13 ay test edilmişlerdir. İklimsel koşullarının değişip kış koşullarına geçildiği zamanda modül potansiyel güçlerinde %18'e varan azalma gerçekleştiği gözlemlenmiş, yoğunlaştırıcıli fotovoltaik modüllerin gerçek saha koşullarındaki değerleri fabrika değerlerine göre çok daha düşük çıkmış ve takip sistemi entegre olan düz plaka fotovoltaik modüller, yoğunlaştırıcıli fotovoltaik modül sistemlerinden çok daha yüksek performans sağladıkları gözlemlenmiştir [4].

Shunichi ve diğerleri yaptıkları çalışmada modül sıcaklığı ve ışınım güç yoğunluğu değerlerinin a-si (amorfsilikon) fotovoltaik modüller üzerindeki performans etkileri gözlemlenmiştir. Modül sıcaklığındaki artış modül performans değerlerinde düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir [5].

#### **1.4 Tezde Yapılanlar ve Elde Edilen Sonuçlar**

Özellikleri incelenip seçilerek belirlenmiş olan 5 adet Kaneka 60W a-si güneş pili, Fronius IG-15 evirici, modül yüzey sıcaklık sensörü, dış hava sıcaklık sıcaklık sensörü, ışı nım güç yoğunluğu sensörü, kontrol kartı, veri takip sistemi programı ve ayarlanabilir demir taşıyıcı konstrüksiyondan oluşan fotovoltaik modül test istasyonu düzeneği İTÜ Enerji Enstitüsü çatısına kurulmuştur.

Test istasyonunda kullanılacak sistemlerin belirlenmesinde önce evirici seçiminden başlanmış olup o ürünün çalışma pencere aralığına uygun fotovoltaik modül sayısı ve modelleri belirlenmiştir. Seçilen eviricinin yan ekipmanları olan sensörler ve veri takip sistemleri belirlenip eş zamanlı olarak, bu süreçte farklı boyutlarda ayarlanabilir olan taşıyıcı konstrüksiyonun tasarımı tamamlanmış ve Nisan 2010 tarihinde test istasyonu devreye alınmıştır. Nisan ayından Ekim ayına kadar güneş pillerinin üretim değerleri, bu süreçteki dış ortam ve modül yüzey sıcaklıkları ve ışı nım güç yoğunluğu verileri toplanmıştır. Fronius'un seçilmiş olan evirici modeli için hazırlanmış olan verim-güç grafiği üzerinden eviricinin farklı güçlerdeki verim değerleri belirlenmiştir. Bu değerlere göre güneş pillerinin farklı sıcaklık ve ışı nım güç yoğunluğu koşullarındaki verimlerine ulaşılmıştır. Bu değerlerden de yararlanarak güneş pillerinin gerçek saha koşullarındaki performans değerlendirmeleri bu tez çalışmasında incelenmiştir. Deneydeki ölçüm belirsizlikleri, yapılan kabuller ve bunlar kaynaklı oluşan hatalardan ileride ki bölümlerde bahsedilmiştir. Düzeneğin geliştirilmesi açısından test istasyonuna ileride pironometre ve sistemin farklı konumlarına yerleştirilecek olan daha yüksek hassaslıkta ölçüm kabiliyetine sahip sıcaklık sensörleriyle sistem de oluşabilecek hatalar daha azaltılacak ve bu elde edilen verilere göre oluşturulacak sonuç değerlendirmeleri daha kesin olacaktır.



## 2. TEMEL BİLGİLER

### 2.1 Fotovoltaik Sistemlere Giriş ve Kısa Tarihçeleri

Fotovoltaik Piller, güneşten yüzeylerine gelen elektromanyetik ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken yapılardır. Fotovoltaik teknolojisi 160 yıllık bir teknolojidir. Fransız Fizikçi Edmont Becquerel, güneş ışığı altında, bir çift elektrodu iletken sıvıya batırmasıyla elektronların yayılmasındaki artışı gözlemlemiştir. Bu deneyle birlikte Becquerel Fotovoltaik etkiyi, 1839 yılında keşfetmiştir. 1873 yılında İngiliz Mühendis Willboughby Smith selenyum'un ışık duyarlılığını keşfetmiştir [6] (Selenyum güneş ışığına maruz kaldığı takdirde çok iyi bir iletken haline dönüşmektedir). 1883 yılında verimi %1 kadar olan ilk fotovoltaik hücre, Amerikan bilim adamı Charles Fritts tarafından selenyum tabaka kullanılarak saydam altın filminden üretilmiştir. Bundan yaklaşık 50 yıl sonra Bell laboratuvarlarında Fuller, Chapin ve Pearson verimi % 6 olan enerji kaynağı olarak pratikte kullanılabilir ilk fotovoltaik hücreyi üretmişlerdir [7]. Fotovoltaik teknolojisi 1950'lerde Amerika'da kırsal yerlerde iletişim ve haberleşme alanlarında kullanılmıştır. Şebekenin olmadığı yerlerde fotovoltaik enerji bir alternatif olmuştur. 1970'lerde olan petrol kriziyle Amerikan hükümeti bu teknoloji üzerine yaptığı büyük yatırımlarla, teknolojinin olumlu yönde gelişmesinde büyük katkıda bulunmuştur. Üretim değerleri, 1960'larda 1000\$/Watt, civarlarındayken 1976 yılında 50\$/Watt'lara inmiş, günümüzde 3\$/Watt civarlarındadır [6]. Günümüzde dünyada 8000MW'lık kurulu fotovoltaik güç santralleri bulunurken yatırımlar hız kesmeden devam etmektedir. Bu da üretim maliyetlerinin düşmesini önemli yönde tetiklemektedir. Güneş pillerinin farklı uygulama alanları aşağıda belirtilmiştir [8].

Güneş pillerin farklı uygulama alanları

#### A. Uzay uygulamaları

- Uydularda kullanılmaktadır.

## B. Taşınabilir uygulamalar

- Çeşitli Araçlarda uygulanmaktadır.
- Geçici Aydınlatma veya İşaret Uygulamalarında kullanılmaktadır.
- Küçük Elektronik Cihazlarda kullanılmaktadır. (Hesap Makinesi, Radyo veya GPS )
- Acil Durum Güç Kaynaklarında (Şebeke olmayan yerlerde uygulanır.)

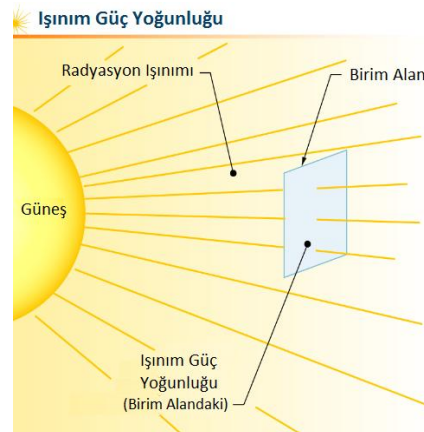
## C. Şebeke erişiminin olmadığı koşullardaki uygulamalar

- Şebekenin olmadığı meskenlerde uygulanmaktadır.
- Otoban aydınlatmaları, işaretleri veya reklam panolarında kullanılmaktadır.
- Haberleşmede kullanılmaktadır.(Radyo, Telefon kulelerinde)
- Uzaktan gözlem yapılan yerlerde kullanılmaktadır. (Sismik - Meteorolojik)
- Su pompalarında kullanılmaktadır.

## 2.2 Güneş Işınımıyla İlgili Temel Bilgiler

### 2.2.1 Işınım Güç Yoğunluğu

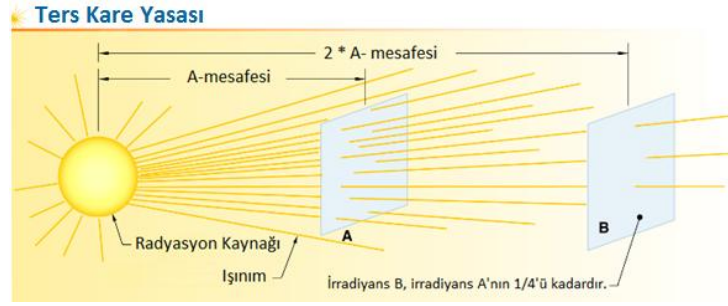
Işınım güç yoğunluğu, ışınım gücünün birim alandaki değeridir ( $W/m^2$  veya  $kW/m^2$ ) ve güneş ışınlarının yerküreye düşen iz düşüm alanıyla hesaplanır [8]. Işınım güç yoğunluğu, gücün anlık bir ölçüsüdür, güneşin günlük aktivite periyodu içinde minimum'dan maksimum'a kadar değişiklik göstermektedir. Güneşten çıkan ışınların kat ettiği yolun ışınım güç yoğunluğu üzerinde çok önemli etkisi vardır. Şekil 2.1'de ışınım güç yoğunluğu görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.1 : Işınım güç yoğunluğu [6]

### 2.2.2 Ters kare yasası

Işınım güç yoğunluğu, güneşten çıkan ışının kat ettiği mesafenin karesiyle ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Yani güneşten ışının dünya yüzeyine gelirken kat ettiği mesafe iki katına çıkarsa, ışınım güç yoğunluğu dörtte birine iner. Bu sayede güneş sistemi içinde farklı yerlere gelen ışınım güç yoğunluklarının hesaplanmasında belirleyici bir faktör oluşturmaktadır. Şekil 2.2’de ters kare yasası görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.2 : Işınım ters kare yasası [6]

### 2.2.3 Günlük toplam ışınım

Şekil 2.3’te de görsel olarak ifade edilen günlük toplam ışınım belli bir zaman aralığında birim alana düşen toplam enerji miktarıdır. Genellikle günlük ışınım ( $Wh/m^2$ ) veya ( $kWh/m^2$ ) olarak belirtilir [8]. Fotovoltaik sistemlerinin kurulumlarında boyutlandırma ve performans değerlerinin hesaplamasında kullanılır. Daha yüksek ışınım güç yoğunluğu (güç), hedeflenen enerjinin daha hızlı toplanmasını sağlar bu da daha yüksek günlük ışınım oluşumu demektir. Dünya yüzeyine gelen ışınım güç yoğunluğu miktarı gün içinde değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.3 : Işınım güç yoğunluğu ve günlük toplam ışınım [6]

Işınım güç yoğunluğu geceleri sıfırken, güneş yükseldikçe artar. Öğle saatlerinde güneşin dik olarak dünya yüzeyine geldiği zaman aralıklarında ışınım güç yoğunluğu en yüksek seviyelerine ulaşmaktadır.

Günlük toplam ışınım değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$E_s^d = \int_0^{t_d} J_s(t) dt \quad (2.1)$$

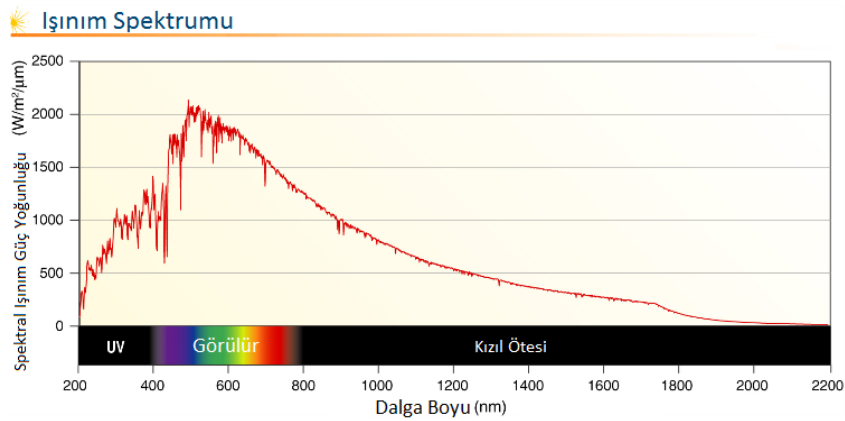
burada  $E_s^d$  günlük ışınımı ( $Wh/m^2$ ),  $J_s(t)$  ışınım güç yoğunluğunu ( $W/m^2$ ),  $t$  zamanı ve  $t_d$  ise toplam gün süresini temsil etmektedir.

#### 2.2.4 Atmosfer dışı ışınım:

Atmosfer dışı ışınım güneşten gelen ışınların atmosfer dışındaki oluşturduğu ışınımaya denir. Bu ışınım etkisi, uzay araçlarında kullanılan fotovoltaik dizilerin tasarımları aşamasında düşünülmesi gereken bir unsurdur.

#### 2.2.5 Işınım spektrumu:

Elektromanyetik dalgalarla güneşten gelen enerjiye güneş ışınımı denir [9]. Elektromanyetik dalgalar zamanla sinüsoidal değişim gösteren elektriksel ve manyetik alanlardan oluşur. Güneş ışınımı farklı dalga boylarında elektromanyetik dalgaların toplamından meydana gelir. Şekil 2.4'te gösterilen ışınım spektrumu, ışınım güç yoğunluğunun dalga boylarına göre dağılımını ifade eder. Spektrum güneş ışınlarının kat ettikleri mesafeye ve ortam koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir.

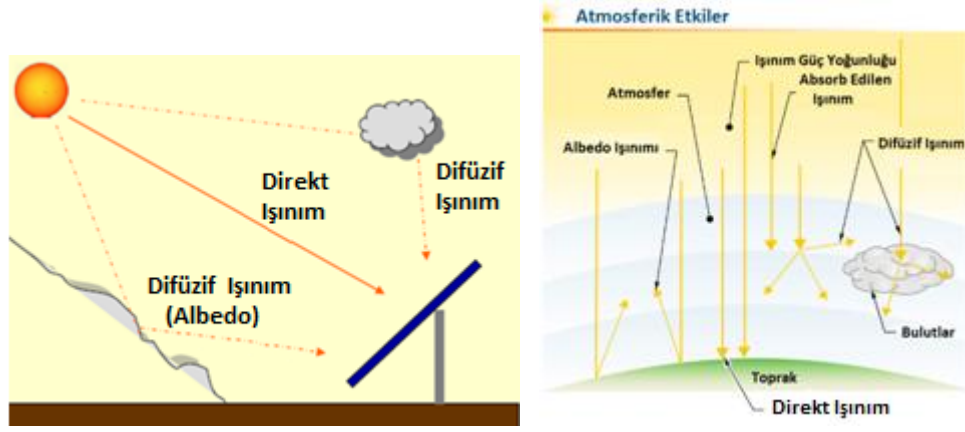


Şekil 2.4 : Işınım spektrumu [6]



### 2.2.6 Atmosferik etkiler:

Atmosferik etkiler güneşten gelen ışınların emilmesi, dağılması, atmosfer içinde ozon tabakasında bulunan karbondioksit, su buharı ve diğer tür gaz ve partiküller sonucu yansınmasıyla oluşan etkiler olarak özetlenebilir. Dünya yüzeyine gelen ışın miktarlarında bulutlardan, farklı bölgelerdeki hava koşullarından fırtına, volkanik patlama külleri veya hava kirliliği sonucu değişiklikler görülmektedir. Şekil 2.5'te atmosferik etkiler ifade edilmiştir.



Şekil 2.5 : Atmosferik etkilerin gösterimi [6]

### 2.2.7 Direkt ışınım:

Güneş ışınlarının güneşten çıkıp atmosferden geçerek dünya yüzeyine direkt olarak kırılmaya veya dağılmaya uğramadan gelen kısmına denir [7].

### 2.2.8 Difüzyf ışınım:

Difüzyf ışınım, güneşten gelen atmosferde dağılmaya uğramış ışınların yeryüzüne ulaşan kısmına denir[7]. Difüzyf ışınımın temel kaynağı güneşten gelen ve atmosferde kırılmaya uğramış ışınlardır. Difüzyf ışınımın diğer bir kaynağıysa (Albedo Işınımı) dünya yüzeyine gelmiş güneş ışınların yüzeyden yansımaları sonucu uzaya geri dönme sürecindeyken bazıları bulut veya atmosfer içindeki diğer katmanlardan geçemeyerek dünya yüzeyine geri dönerler bunlar da diğer difüzyf ışınım kaynağıdır.

Bunların haricindeki mekanizmalarla oluşan difüzyf ışınımın fotovoltaik sistemlerinde elektrik üretimleri için uygun değildir. Açık bir havada dünya yüzeyine gelen toplam güneş ışınımının ancak %10-20'si difüzyf ışınımken bulutlu kapalı bir hava ortamında bu oran %100'lere kadar yükselebilmektedir.

### 2.2.9 Air-mass kavramı

Atmosfer içerisinde güneş ışınlarının emilim veya dağılımları, dünya yüzeyine gelen güneş ışınları miktarını doğrudan etkiler [7]. Zenith konumu güneşin yeryüzünde ölçüm yapılan noktaya tam dik olarak üzerinde bulunduğu konuma denmektedir. Güneş Zenith konumundayken, güneş ışınlarının dünya yüzeyine gelmeleri için kat etmeleri gereken mesafe en kısadır. Zenith açısı güneşin bulunduğu konumla zenith konumu arasındaki açıya denir. Zenith açısı arttıkça güneş ışınlarının atmosfer içerisinde kat etmeleri gereken mesafelerde artış göstermektedir. Bu da ışınım güç yoğunluğunun azalmasına neden olur. Ayrıca güneş spektrumdaki dalga boyu kompozisyonlarında değişikliğe yol açar. Air-Mass (A.M.) güneş ışınının atmosfer içerisinde ne kadarlık bir mesafe kat etmesi gerektiği hakkında bilgi, atmosferin göreceli kalınlığı konusunda fikir vermektedir.

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi A.M. = 1.0 olduğunda güneş ölçüm yapılan noktanın tam üstündedir. Güneş ışınları 90° açıyla, dik olarak dünya yüzeyine gelmektedir. A.M.'in daha yüksek olan değerleri için atmosfer güneş ışınımı azaltıcı görev yapar. A.M.=0 olduğunda atmosfer'in ışınım güç yoğunluğu sıfırdır [6]. Bunun sebebi de güneş ışınlarının yer yüzüne hiçbir şekilde gelmiyor olmasıdır. A.M=0 durumu atmosferin dışı içinde geçerlidir.

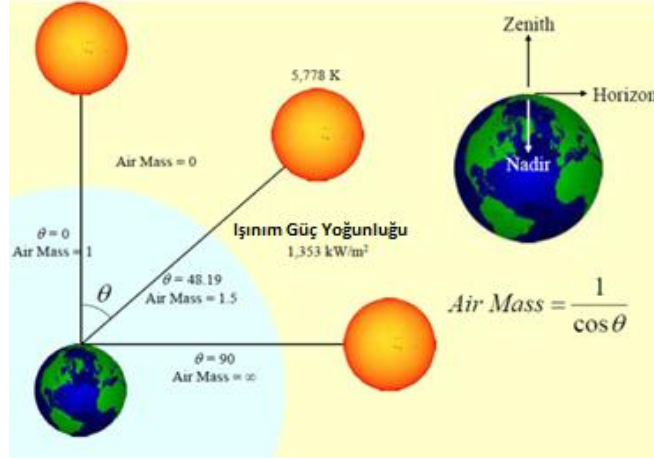
Genel olarak Air-Mass (A.M.) hesaplaması aşağıdaki gibi yapılır.

$$A.M = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.2)$$

Air-Mass hesaplaması (A.M.) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$A.M = \frac{P_{local}}{1013 \times \cos \theta} \quad (2.3)$$

burada AM air-mass'ı,  $P_{local}$  lokal atmosferik basıncı (mbar),  $\theta$  'da zenith açısını (Derece) ve 1013'te deniz seviyesindeki atmosferik basıncın mbar cinsinden ifadeleri olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Güneş ışınlarının geliş açıları [6]

### 2.2.10 Güneşin pik yaptığı zamanlar

Güneşten yeryüzüne gelen enerjinin toplamının 1/3'ü atmosfer içinde soğurur veya dağılır. Ayrıca bunlar dışında bazı güneşten gelen ışınlar yeryüzüne gelmeden uzaya geri yansır. Buna göre ışınım güç yoğunluğu sabit  $1366\text{W/m}^2$  olarak kabul edildiğine göre güneşin tam dik olarak geldiği ve pik yaptığı zaman aralığında ışınım güç yoğunluğunun yaklaşık 2/3'ü dünyaya gelebilmektedir. Güneş Sabiti değeri de  $1000\text{W/m}^2$  olarak alınmaktadır.

### 2.2.11 Güneş ışınım ölçümü

Tarihsel bir veri tabanı oluşturmak için, uzun dönemli ışınım güç yoğunluğu ölçümleri yapılması yararlılık göstermektedir. Bu elde edilmiş bilgiler fotovoltaik sistemlerinin boyutlandırılmasında, ne kadar enerji üretilebilecekleri konusunda ve zamana bağlı performans beklentilerinin değerlendirilmesinde yardımcı olacaktır.

### 2.2.12 Pironometre

Pironometre, ışınım güç yoğunluğunu ölçme cihazlarına denir. Pironometre bir çeşit sensör olup, global ışınımı yarım küresel alan içinde ölçmeye yarar [6]. Pironometre hem direkt hem de difüzyif ışınımı ölçer. Bu sensörler bitişik diziler halinde aynı tabanda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sensörler belli aralıklarla veri toplayıp sistem içinde bulunan veri sağlama ekipmanlarına kayıt edilir. Bu sayede ölçüm yapılmak istenen yerin toplam ışınım güç yoğunluğu ölçülür.

Difüzyif ışınım gölgelendirme aparatı kullanılarak pironometrelerde ölçülür. Direkt ışınımı ölçmek içinse toplam ışınımdan difüzyif ışınımı çıkartarak bulunduğu gibi

ayrıca direkt ışınım Piroliometre cihazlarıyla da ölçülebilir. Pironometre ve piroliometre görünümleri şekil 2.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7 :** Eppley Laboratuvar’ındaki pironometre ve bir peroliometre [6]

### **2.2.13 Güneş deklinasyonu:**

Güneş Deklinasyonu: Ekvator düzlemiyle güneş ışınları arasındaki açıya denir.[9]

Güneş Işınlarnın dünyaya geliş açıları  $-23.5^0 \leq D \leq 23.5^0$  arasında değişmektedir.

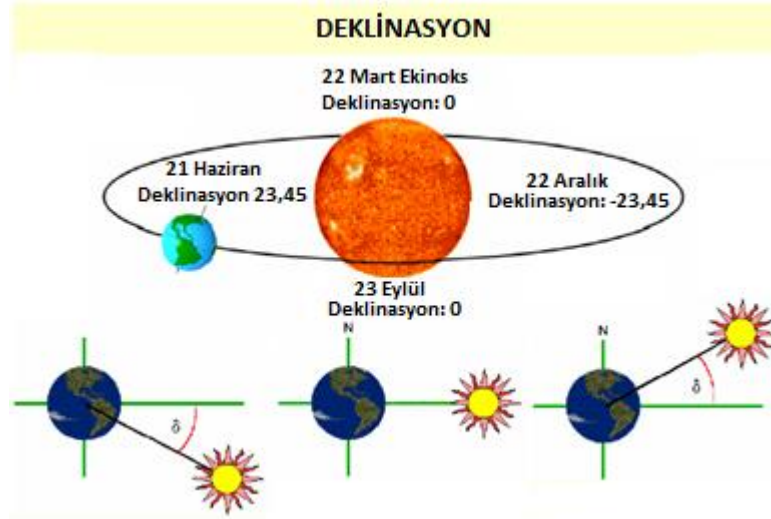
Deklinasyon Hesaplama Formülü:

$$D = 23.5^0 \sin \times \left( \frac{T}{365.25} \right) \times 360 \quad (2.4)$$

burada T ile bahar noktası 21 Mart’tan itibaren geçen gün sayısı ve D ile deklinasyon ifade edilmektedir. Deklinasyon açıları ve dünya yörüngesinin o açıya geldiği tarihler aşağıda ve şekil 2.8’de gösterilmiştir.

Deklinasyon açısının 0 ve dünya eksen açısına geldiği zamanlar:

- $D = 23.5^0$  Kuzey Enlemi → 21 Haziran
- $D = -23.5^0$  Güney Enlemi → 21 Aralık
- $D = 0^0$  Ekinoks → 21 Mart-23 Eylül



**Şekil 2.8 :** Güneş deklinasyonu [12]

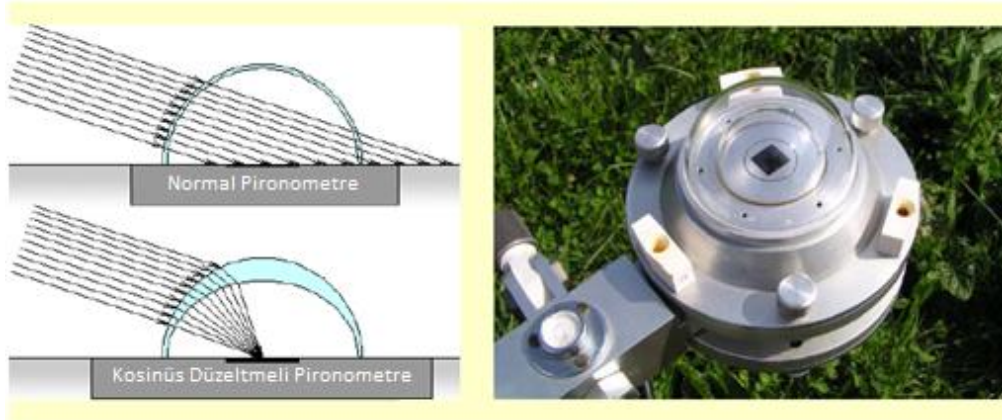
Fotovoltaik sistemleri yerleştirilirken en uygun panel açısının belirlenmesi (a) aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$a = \varphi - D \quad (2.5)$$

burada a ile optimum panel açısı,  $\varphi$  ile panelin bulunduğu bölgenin enlemi ve D ile deklinasyon ifade edilmektedir.

#### 2.2.14 Kosinüs düzeltmesi:

Fotovoltaik sistem uygulamalarında optimum açıda gelen global güneş ışınımının ölçülmesi gereklidir. Bunun için yere paralel konmuş olan pironometrelerde de güneşin geliş açısına göre bir düzeltme gerekir. Buna kosinüs düzeltmesi denir. Bunlar optik sistemlerle yapılmaktadır. Şekil 2.9’da kosinüs düzeltmeli pironometre gösterilmiştir.



**Şekil 2.9 :** Kosinüs düzeltmeli pironometre [12]

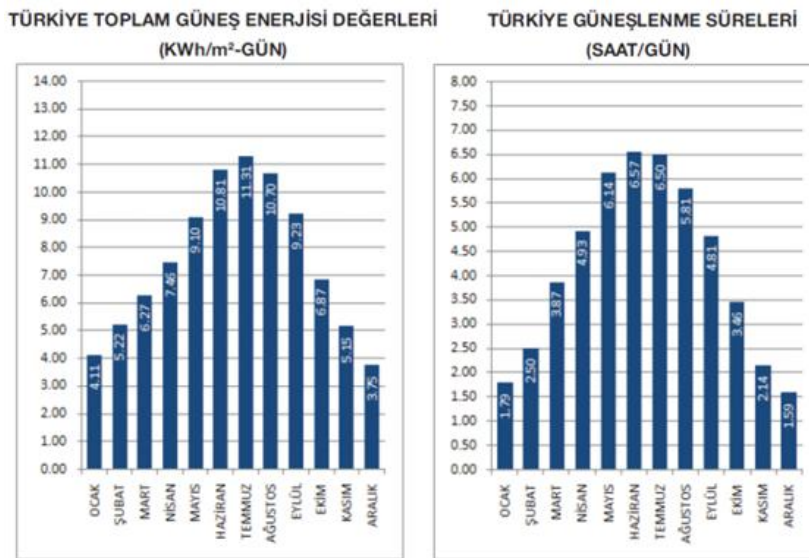
### 2.3 GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası)

Türkiye güneş kuşağı içinde yer almakta olup önemli bir enerji potansiyeline sahiptir. Bu enerji potansiyeli, ağırlıklı olarak sıcak su üretiminde kullanılmakta olup, elektrik enerjisi üretiminde kullanımı yok denecek kadar az seviyelerdedir. Güneş enerjisi potansiyelinden sonuna kadar yararlanmak amacıyla mevcut potansiyelin elektrik enerjisi üretimi amaçlı olarak da kullanılması ülkemiz için yararlı olacaktır. Bu amaçla, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) güneş enerjisine dayalı yatırım yapılabilecek uygun alanların nereler olduğu ve bu alanlardaki elektrik enerjisi üretim imkânlarının belirlenmesi amacıyla Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasını (GEPA) hazırlayarak kullanıma sunmuştur.

GEPA içersinde,

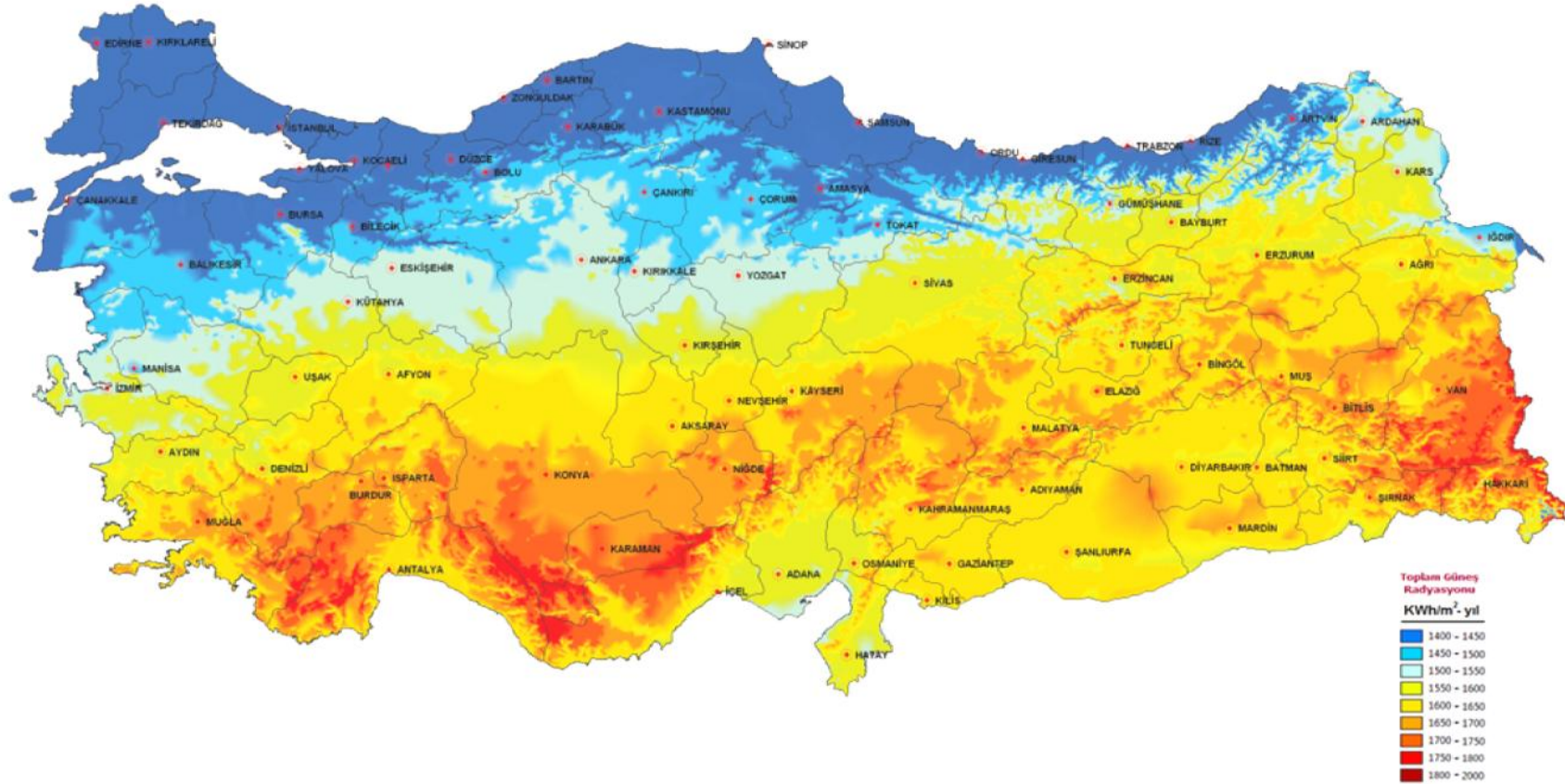
- Türkiye Geneli
- Türkiye Bölgeler
- Türkiye Şehirler

bazında yıllık güneşlenme süreleri ve toplam güneş enerjisi değerleri verilmiştir. Ayrıca o bölgelerde bulunan güneş santralleri kurulabilecek alanlar veya o bölgelere yakın enerji nakil hatları gösterilmiştir. Şekil 2.10'da Türkiye toplam güneş enerjisi değerleri ve güneşlenme süreleri gösterilmiştir. Şekil 2.11'de Türkiye güneş enerjisi potansiyeli renk skalasıyla ifade edilmiştir.



Şekil 2.10 : Türkiye toplam güneş enerjisi değerleri ve güneşlenme süreleri [13]

# TÜRKİYE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ ATLASI

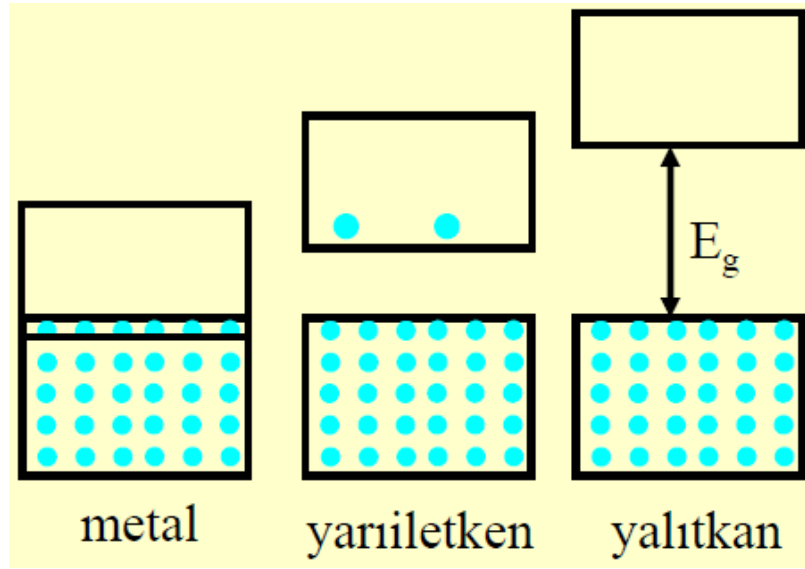


Şekil 2.11 : Türkiye güneş enerjisi potansiyeli ve ışınım güç yoğunluğu değerleri renk skalasıyla harita üzerindeki gösterimi [13]

## 2.4 Fotovoltaik Modüllerle İlgili Temel Bilgiler

### 2.4.1 Metaller yarı iletkenler ve yalıtkanlar

Metallerde iletim bandıyla valans bandı üst üste binmiştir. Bu sayede elektron transferi kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Yalıtkan ve yarı iletkenlerde ise iletim bandıyla valans bandı aralarında bir enerji bariyeri ( $E_g$ ) bulunmaktadır [10]. Si (yarı iletkenleri ) için  $E_g= 1.1eV$  iken elmas (yalıtkan) için enerji bariyeri  $E_g=5eV$ 'tur. Şekil 2.12'de metal, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin valans bandlarının konumları gösterilmiştir. Şekil 2.13'te silikonun bağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Metal, yarı iletken ve yalıtkan malzemelerin enerji bariyerleri [14]



Şekil 2.13 : Silikon'un valans elektronları ve oktet kuralına bağ yapısı gösterimi [14]

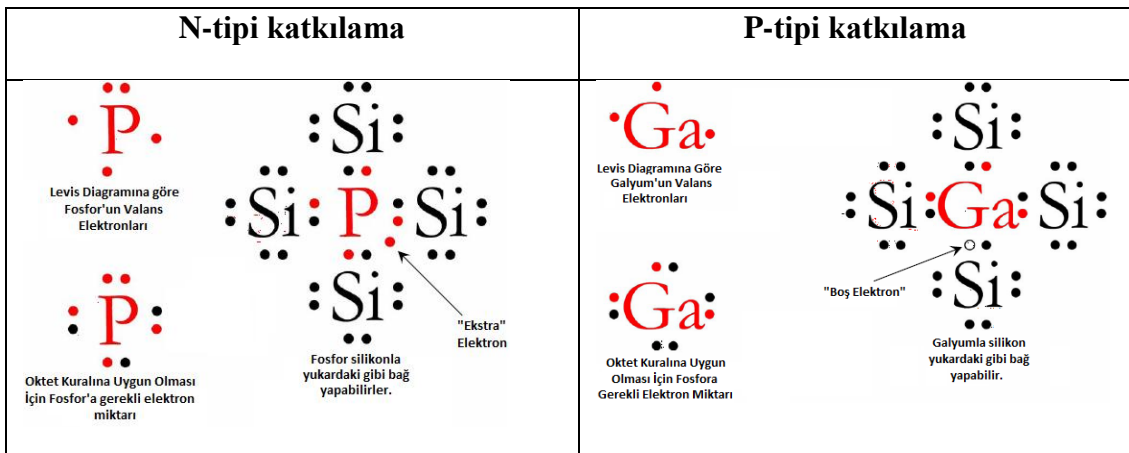


## 2.4.2 Fotovoltaik pillerin yapısı ve çalışma prensipleri

Bir güneş pili, iki temel bölümden oluşur. Birinci bölüm gelen ışımının büyük bir kısmını soğuracak ölçüde kalın, yarı iletken bir malzemeden yapılmış bir katmandır. Fotovoltaik etki, bu katmanda doğar. Gelen ışımının yeterli enerji (yarı iletkenin “yasak bant” genişliğinden büyük) taşıyan fotonları soğurularak bir elektron-deşik çifti oluşumuna yol açar. Ne var ki elektron-deşik çifti çok güçlü bir birleşme ve elektrik akımı vermeden ısı açığa çıkarma eğilimi gösterir. İşte bu aşama da, güneş pilinin ikinci temel bölümü olan yarı iletken eklem devreye girer.

Yarı-iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmeleri için n ya da p tipi katkılamaları gereklidir. Katkılama, saf yarı-iletken eriyip içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır. Soğurucu malzeme oluşturulması için “n-katkılı” yarı iletken malzeme eklenirken elektron sağlanması için “katkılayıcı” malzeme eklenir ve “p-katkılı” yarı iletken katman oluşturulur. Yarı-iletken madde olarak çok kristalli silisyum kullanılır. P ve n tipi yarı-iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür ve aralarında elektrik akımı oluşmaz. p ve n tipi katkılı yarı iletken malzemeler sandwich denen üst üste yerleşim şekliyle, bir “p-n” eklemi oluştururlar [7]. Böyle bir eklemde bir elektrik alanı ortaya çıkar. Şekil 2.14’te n ve p tipi katkılama gösterilmiştir.

P-N eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder ve bu sayede elektrik akımı oluşur [9].



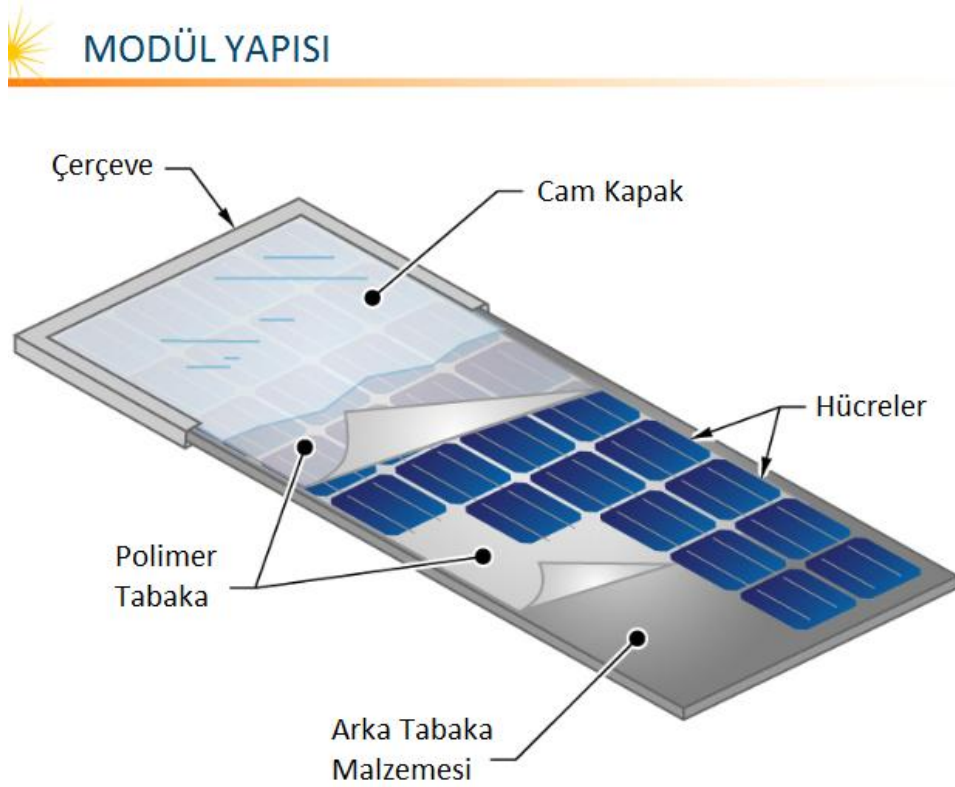
Şekil 2.14 : n tipi ve p tipi katkılama [14]

Yarı-iletken eklemın güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaiik dönüşümün sağlanması gereklidir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-tutucu çiftler oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektriksel alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.

Elektron-deşik çiftlerinin birbirlerinden ayrılmalarıyla, fotovoltaiik pilinin iki yanındaki kontaklar kapalı bir devreye bağlanır ve buralardan da oluşan akım toplanır.

### 2.4.3 Fotovoltaiik modüllerin yapıları

Fotovoltaiik modüllerin kısaca 5 ana bölümden oluştuğu kabul edilebilir. Bunlar alt – üst polimer tabakalar, fotovoltaiik hücreler, cam kapak, metal dış çerçeve ve parçaların üzerine yerleştirileceği arka taban plakasıdır. Şekil 2.15'te güneş pili modül yapısı gösterilmiştir.

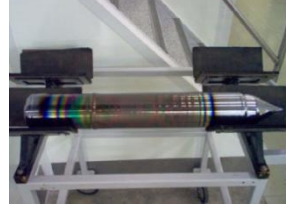


Şekil 2.15 : Güneş pili yapısı ve bileşenleri [6]

## 2.4.4 Fotovoltaik modül hücre tipleri

### Mono-Kristal Si

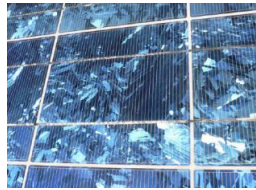
Yüksek saflıkta silisyumdur; çapı 15cm'ye ulaşan külçeler “Czochralski çekmesi” ve “yüzer bölge” yönetimi denen, iki kristal oluşum yönetimiyle elde edilir [11]. Bu külçeler, çok güç bir kesim işlemiyle, ince rondelalar halinde (75-100 mm çap, birkaç yüz mikrometre kalınlık) kesilirler. Bu rondelalar güneş pilinin gövdesini oluşturmakta kullanılır. Bu amaçla bir çok tamamlayıcı işlem uygulanır: rondelalar üzerine yapılan yüzeysel katkılarla bir eş-eklem gerçekleştirme; metal kontakları çökeltme; hücreyi koruyucu kılıfla zırhlama. Silikon bu alanda en çok kullanılan gereçtir. Şekil 2.16'da gösterilen mono kristalli silikondan yapılmış güneş pilleri çok iyi verim sağlarlar; laboratuarda %18 ve üretimde yaklaşık %12-13'lere ulaşılmaktadır [6].



Şekil 2.16 : Mono-kristal hücre ve yapımında kullanılan silisyum külçeleri [14]

### Poli-Kristal Si

Silikonlu güneş pillerinin üretiminde harcanan enerji miktarını ve maliyetleri azaltmak için tek kristalli “Czochralski” silikondan daha düşük kalitede (dolayısıyla düşük saflıkta) bir malzeme üretmeye ve bunu kullanmaya yönelik yeni teknikler geliştirilmiştir [11]. Böylece gerek külçe, gerekse kesme işlemini ortadan kaldıran doğrudan levha biçiminde (şerit halinde kristalleştirmeye dayanan yeni yöntemler) “çoklu kristalli” silisyum elde edilmiştir. Şekil 2.17'de gösterilen çok kristalli silikonun verimi daha düşük olmasına rağmen (yöntemlerin birçoğu için %8-10 arası) sağladığı avantajlardan dolayı önem kazanmıştır [6].



Şekil 2.17 : Poli-kristal hücre yapısı [14]

### **Amorf - Silikon Hücreler**

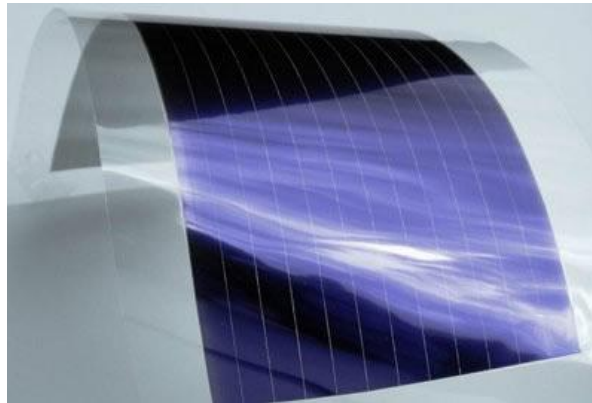
Bu teknolojiye amorf silikon buharı birkaç mikrometre kalınlıktaki paslanmaz çelik çubukların üzerine cam filmlerin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur [11]. Mono veya Poli Kristal teknolojileriyle karşılaştırıldığında sadece bu teknolojiyle diğerlerinin % 1'i kadar malzeme kullanılır. Verimleriyse kristal tip gözelerin yarısı seviyesindedir. Şekil 2.18'de gösterilen amorf-silikon hücrelerin en önemli avantajları watt başına maliyetlerinin diğer teknolojilere göre çok daha düşük olmasıdır [6].



**Şekil 2.18 :** Amorf-silikon hücre yapısı [14]

### **Galyum Arsenür**

Verimi en yüksek tür fotovoltaik pillerendir. Şekil 2.19'da hücre yapısı gösterilen Tek kristalli galyum arsenür güneş pillerinin verimleri laboratuvar ortamında %22'lere kadar ulaşmıştır [6]. Ne var ki yüksek üretim maliyetleri yüzünden bu güneş pillerinin kullanımı, pek yaygın olmasa da, sınırlı olarak yoğunlaştırılmış fotovoltaik üreteçlerde kullanılmaktadır.



**Şekil 2.19 :** Galyum arsenür hücre yapısı [15]

## İnce Film

Bunlar yalnızca birkaç mikrometre kalınlıkta ve geniş yüzey alanına sahip ürünlerden oluşan gereçlerdir; maliyetleri ise verimleriyle orantılı olarak (üretim halinde verimleri %8'den azdır) oldukça düşüktür [6]. Bu gereçler içinde en çok umut verenler, kadmiyum sülfür (bakır sülfür ile ayrık eklem halinde), amorf silisyum ve çok kristalli galyum arsenürdür. Giderek daha da düşen maliyetlerle piyasada önem kazanmaktadırlar. Şekil 2.20'de ince film hücre gösterilmiştir.



Şekil 2.20 : Esnek ince film hücre [14]

## Copper Indium Deselenide (CIS)

CIS = Copper-Indium-Diselenid (Bakır-İndiyum-Diselenid =  $CuInSe_2$ )  
CIS-Hücreler ince tabakalı güneş pillerindedir. Klasik güneş pilleri (mono. veya poli kristal kalın tabakalı hücreler) 180-350  $\mu m$  kalınlıklardadır, CIS olanlar ise 5  $\mu m$  kalınlıktadır. Düşük olan tabaka kalınlığı nedeniyle maliyetleri de çok düşük olmaktadır. Şekil 2.21'de gösterilen CIS güneş pillerinin verimleri ise 10% civarlarında olup birçok açıdan avantajlıdır. CIS Hücreler ayrıca ışığın band genişliğinin büyük bölümünü kullanabildikleri için kötü hava koşullarında bile istikrarlı olarak çalışabilmektedir.



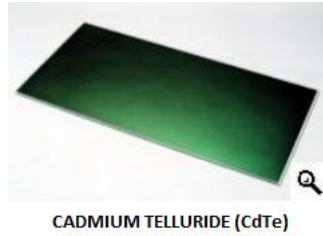
Şekil 2.21 : Bakır indiyum diselenit hücreli modül [16]

Ayrıca CIS teknlolojisi yarı-şeffaf güneş pili üretimini de sağlamaktadır. İleride binaların pencerelerinde veya güneş kolektörlerinde bu teknolojinin kullanımı da düşünülecektir. CIS teknolojisinin en önemli dezavantajı ise indiyum olmasıdır,

Çünkü indiyum'un dünyada sınırlı bir madde olması düşündürücüdür. Fakat retimde çok az kullanıldığı için şu an sorun olarak görülmemektedir.

### **Kadmiyum Telorayt (CdTe)**

Kadmiyum Telorayt hücrelerde kadmiyum ve tellerium'un birleşik formdaki kristallerdir. Fotovoltaik pillerde optik ve infrared malzeme olarak kullanılır. Genellikle Kadmiyum Sülfit ile sandwich denen st üste konma tekniğiyle yapılarak p-n junction'lı fotovoltaik güneş pilleri oluşturulur. Genellikle CdTe hücreler n-i-p yapı şeklinde kullanılır. Fotovoltaik sistem verimleri laboratuvar koşullarına %19 civarlarıyken standart üretim koşullarında verimler % 11 civarlarına inmektedir. Verimleri açısından ince film teknolojilerine göre gelişmiş olup mono ve poli kristal teknolojilerine göre daha düşüktür. şekil 2.22'de CdTe güneş pili gösterilmiştir.



**şekil 2.22 :** Kadmiyum telorayt fotovoltaik modül [16]

### **2.4.5 Fotovoltaik modül dizileri**

#### **Seri Bağlı Sistemler:**

Aynı akım ve gerilim özelliklerine sahip fotovoltaik piller, seri olarak bağlandığı sistemlerde, gerilim bağlanan fotovoltaik sayısıyla doğru orantılı olarak artarken akım sabit olarak aynı kalmıştır.

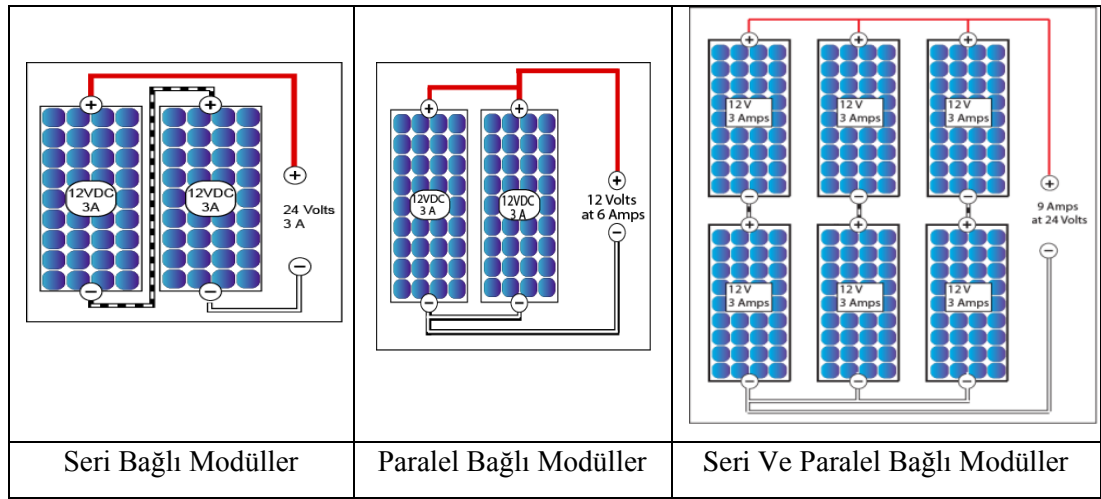
#### **Paralel Bağlı Sistemler:**

Aynı akım ve gerilim özelliklerine sahip fotovoltaik piller paralel olarak bağlandığı sistemlerde, gerilim sabit olarak aynı kalırken, akım modül sayılarıyla doğru orantılı olarak artar.

#### **Seri ve Paralel Bağlı Sistemler:**

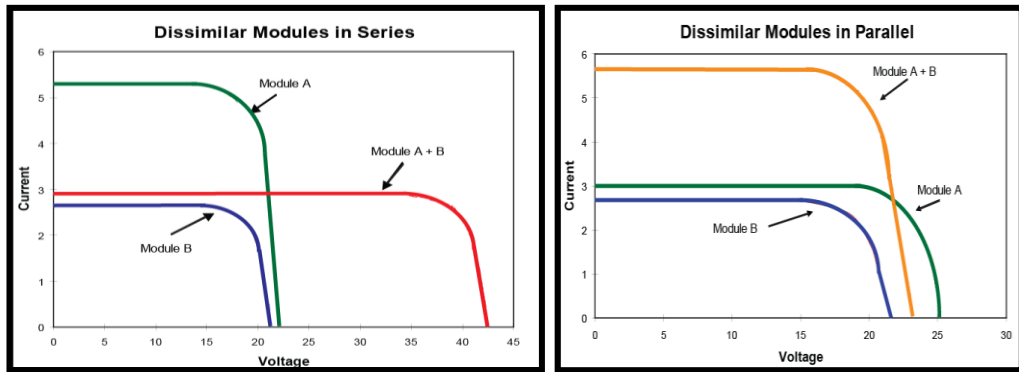
Aynı akım ve gerilim özelliklerine sahip fotovoltaik pillerin hem seri hem de paralel olarak bağlandığı dizilerde, gerilimde ve akımda modül sayılarıyla bağlantılı olarak bir artış görülür. şekil 2.23'te seri ve paralel bağlı güneş pilleri gösterilmiştir.

## Seri – Paralel ve Seri – Paralel Bağlı Diziler:



Şekil 2.23 : Farklı şekilde bağlanmış modüllerin akım ve voltaj değerleri [16]

Fotovoltaik sistemler kurulurken aynı fotovoltaik modüllerin kullanılması gereklidir. Aksi takdirde modüllerin seri ve paralel bağlanmalarında ciddi güç düşümleri olabilmektedir. Şekil 2.24'te farklı modüllerin seri ve paralel bağlanması sonucu oluşabilecek kayıplar gösterilmiştir.



Şekil 2.24 : Farklı modüllerin farklı bağlantı koşullarında gerilim-akım grafikleri [16]

## 2.5 Fotovoltaik Pillerin Avantaj ve Dezavantajları

Çizelge 2.1, çizelge 2.2 ve çizelge 2.3'te güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları ifade edilmiştir.

**Çizelge 2.1 :** Genel olarak güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları.

| <b>Avantaj</b>                                    | <b>Dezavantaj</b>   |
|---|---|
| - Işınımı doğrudan elektrik enerjisine çevirirler | - Yüksek başlangıç kurulum maliyeti                             |
| - Hareketli parçaları yoktur                      | - Verimlerinin düşük olması                                     |
| - Yüksek çalışma sıcaklıkları gerektirmezler      | - Ciddi güç için çok büyük fotovoltaik modül dizileri gerekmesi |
| - Çevreyi kirletmezler                            | - Yüksek maliyetlerden devlet desteği gerektirmesi              |
| - Ömürleri uzundur                                | - Müşterilerin yeterli düzeyde bilgiye sahip olmamaları         |
| - Enerji kaynağı güneştir (tükenmez, bedava)      | -   |
| - Çok geniş güç ölçeğine sahipler ( $\mu W$ - MW) | -   |

**Çizelge 2.2 :** İnce film güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları

| <b>İnce – Film Modüllerin Avantajları</b>      | <b>İnce – Film Modüllerin Dezavantajları</b>                   |
|--|--|
| - Ucuzluk ( 100 kat az Si ve Üretim kolaylığı) | - Düşük verim: Her Watt Üretim için daha çok alan gerekliliği. |
| - Daha Az Sıcaklık Bağımlılığı                 | -  |
| - Verimin daha az güneş ışınımına bağımlılığı  | -  |
| - Kolay üretim ve uygulama olanağı             | -  |

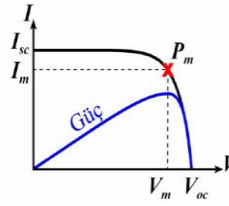


**Çizelge 2.3 :** Mono ve poli kristal güneş pillerinin avantaj ve dezavantajları

| <b>Mono-Poli Kristal Modüllerin Avantajları</b>               | <b>Mono-Poli Kristal Modüllerin Dezavantajları</b> |
|---|--|
| - Yüksek Verim: Her watt üretim için daha az alan gerekliliği | - Daha Pahalı                                      |
| -   | - Daha Çok Sıcaklık Bağımlılığı                    |
| -   | - Verim daha çok güneş ışınımına bağlıdır.         |

## 2.6 Fotovoltaik Modüllerin Temel Karakteristikleri

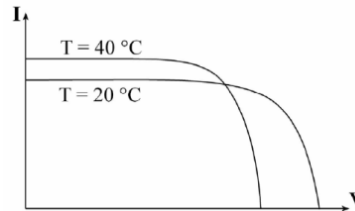
Şekil 2.25'te güneş pillerinin (I-V) Akım-Gerilim Karakteristikleri gösterilmiştir.



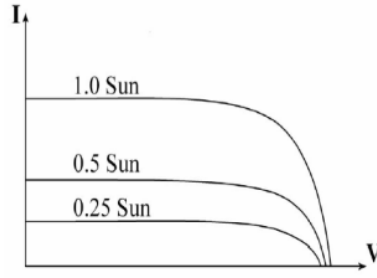
**Şekil 2.25 :** Güneş pillerinin akım gerilim karakteristikleri [14]

Burada  $V_{OC}$  açık devre gerilimini,  $I_{SC}$  kısa devre akımını,  $P_M$  maksimum güç noktasını,  $I_M$  maksimum güç noktasındaki akımı,  $V_M$  maksimum güç noktası gerilimini ifade etmekte ve grafikte mavi çizgi ile gücün gerilimle değişimi gösterilmiştir.

Şekil 2.26 ve şekil 2.27'de güneş pillerinin (I-V) akım-gerilim karakteristiklerinin sıcaklığa ve ışınım güç yoğunluğuna bağlı değişimi gösterilmiştir.

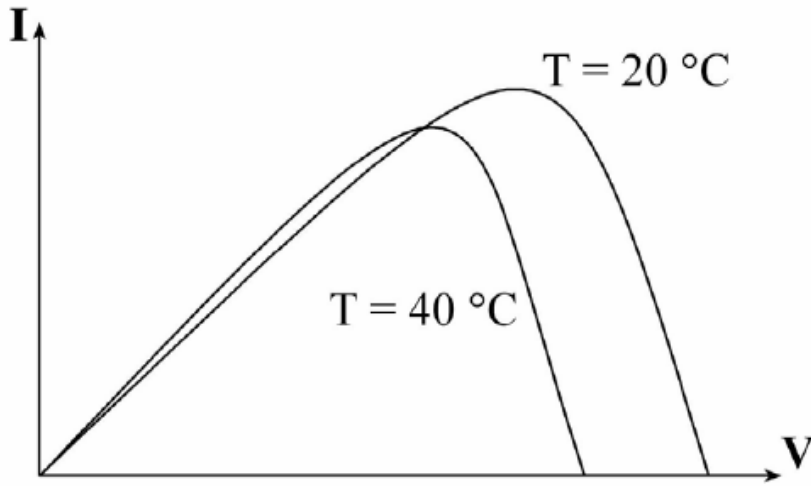


**Şekil 2.26 :** Modülerin farklı yüzey sıcaklıklarda akım-gerilim değişimleri [14]



**Şekil 2.27 :** Modülün farklı ışınım güç yoğunluğunda akım-gerilim değişimleri [14]

Güneş pilleri sıcaktan direkt olarak etkilenmektedir. Şekil 2.28’de gösterildiği gibi akım-gerilim değerleri sıcaklık artışına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bunun sonucunda akım ve gerilimin bir fonksiyonu olan çıkış gücünde bir azalma da görülmektedir.

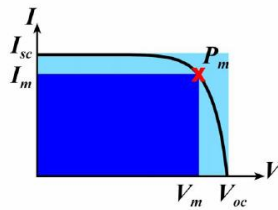


**Şekil 2.28 :** Güneş pillerinin üretim güçlerinin sıcaklıkla değişimi [14]

## 2.7 Fotovoltaik Modüllerin Performansları

### 2.7.1 Fill factor (FF) doluluk oranı

Şekil 2.29’da doluluk oranı ifadesi I-V eğrisinde gösterilmiştir. Modül veriminin ve modül akımının maksimum güç noktasındaki değerleri  $V_m$  ve  $I_m$ ’dir.



**Şekil 2.29 :** Modül doluluk oranı hesaplaması grafiksel gösterimi [14]

$$FF = \frac{\text{Gerçek Pilin Maksimum Gücü}}{\text{İdeal Pilin Maksimum Gücü}} = \frac{(V_M \times I_M)}{(V_{OC} \times I_{SC})} \quad (2.6)$$

burada FF doluluk oranını,  $V_M$  ile  $I_M$  sırasıyla modül gerilimini, modül akımını  $V_{OC}$  ile  $I_{SC}$ 'de sırasıyla açık devre gerilimini ve kısa devre akımını ifade etmektedir.

### 2.7.2 Verim

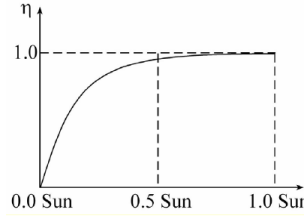
Şekil 2.32'de verim ifadesinde kullanılan akım ve gerilim değerleri Güneş pilinin I-V eğrisi üzerinde ifade edilmiştir

$$\eta = \frac{(V_M \times I_M)}{(P_{IN})} = \frac{(V_{OC} \times I_{SC}) \times FF}{(P_{IN})} \quad (2.7)$$

burada FF doluluk oranını,  $V_M$  ile  $I_M$  sırasıyla modül gerilimini, modül akımını  $V_{OC}$  ile  $I_{SC}$ 'de sırasıyla açık devre gerilimini ve kısa devre akımını  $P_{IN}$ ' toplam sisteme gelen gücü ifade etmektedir.

### 2.7.3 Işınım şiddeti verim ilişkisi

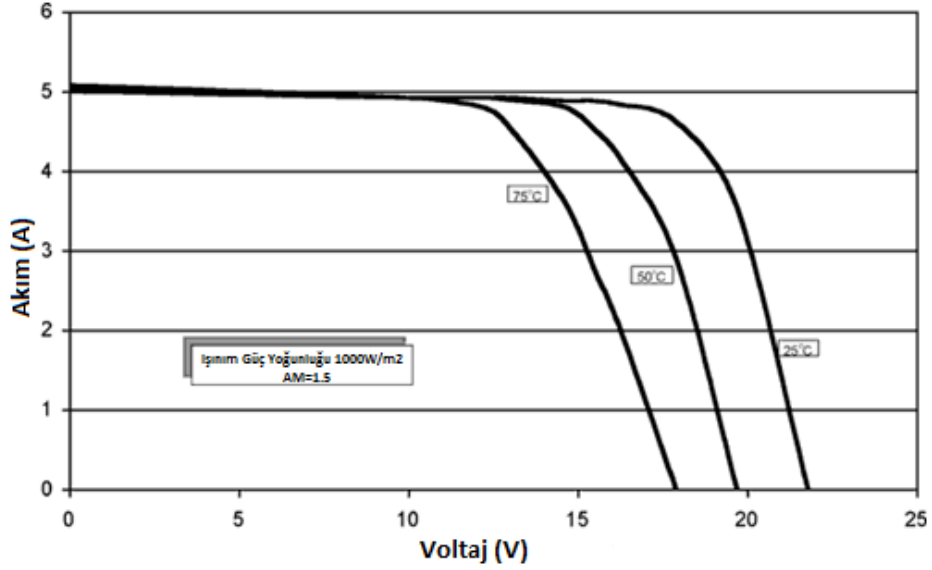
Şekil 2,30'da güneş pillerinin ışınım şiddetine göre verim değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.30 : Farklı güneşlenme şiddetlerinde modüllerin verim değişimleri[14]

### 2.7.4 Sıcaklık katsayıları

Şekil 2.31'de gösterildiği gibi farklı sıcaklıklarda fotovoltaik pillerin üretim değerlerinde de değişiklikler görülmektedir. Fotovoltaik hücrelerin sıcaklıkları arttıkça çıkış üretim gerilimlerinde de bir düşüş görülmektedir. Aşağıdaki grafikte de görüldüğü üzere  $25^{\circ}\text{C}$  -  $50^{\circ}\text{C}$  -  $75^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda yapılan testlerde görüldüğü üzere sıcaklıklar çıkış gerilimlerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir. Bununla birlikte çok belirgin olmasa da kısa devre akımı da sıcaklık artmasıyla ufak bir artış göstermektedir. Genellikle açık devre geriliminde %4 civarlarında bir düşüş gözlemlenmekteyken, kısa devre akımında her  $10^{\circ}\text{C}$ 'lik artışta yaklaşık %0,5'lik bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 2.31 : Farklı ortam sıcaklıklarında modül performans değişimleri [17]

$C_p$  ile sıcaklığa bağlı güç katsayısı ifade edilmektedir. Her fotovoltaik modülün kendine ait bir sıcaklığa bağlı güç katsayısı bulunmaktadır. Aşağıdaki formülde de sıcaklıkla modül gücünün nasıl değiştiği matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$P_M = P_{M_0} + C'_p \times (T_M - T_0) \quad (2.8)$$

$$\frac{P_M}{P_{M_0}} = 1 + C_p \times (T_M - T_0) \quad (2.9)$$

burada  $P_M$  ile modül gücü,  $T_M$  ile modül sıcaklığı,  $T_0$  ile standard işletim koşulu olan  $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklık,  $P_{M_0}$  ile sistemden alınabilecek maksimum modül gücü ve  $C'_p$  ile sıcaklığa bağlı güç katsayısının  $P_{M_0}$  ile çarpımını ifade edilmektedir.

$C_\eta$  ile sıcaklığa bağlı verim katsayısı ifade edilmektedir. Her fotovoltaik modülün kendine ait bir sıcaklığa bağlı güç katsayısı bulunmaktadır. Aşağıdaki formülde de sıcaklıkla modül gücünün nasıl değiştiği matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\eta_M = \eta_{M_0} + C'_\eta \times (T_M - T_0) \quad (2.10)$$

$$\frac{\eta_M}{\eta_{M_0}} = 1 + C_\eta \times (T_M - T_0) \quad (2.11)$$

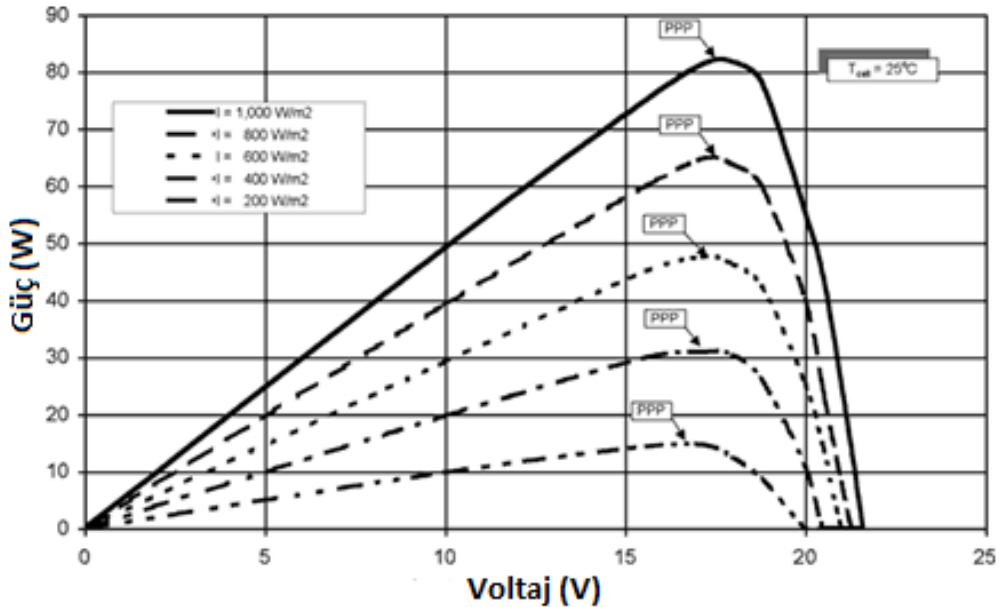
burada  $\eta_M$  ile modül verimi,  $T_M$  ile modül sıcaklığı,  $T_0$  ile standard işletim koşulu olan  $25^0C$  sıcaklık,  $\eta_{M0}$  ile sistemden alınabilecek maksimum modül verimi ve  $C'_n$  ile sıcaklığa bağlı verim katsayısının  $\eta_{M0}$  ile çarpımı ifade edilmektedir.

### 2.7.5 Farklı ışınım güç yoğunluğundaki fotovoltaik modüllerin güç çıkışları

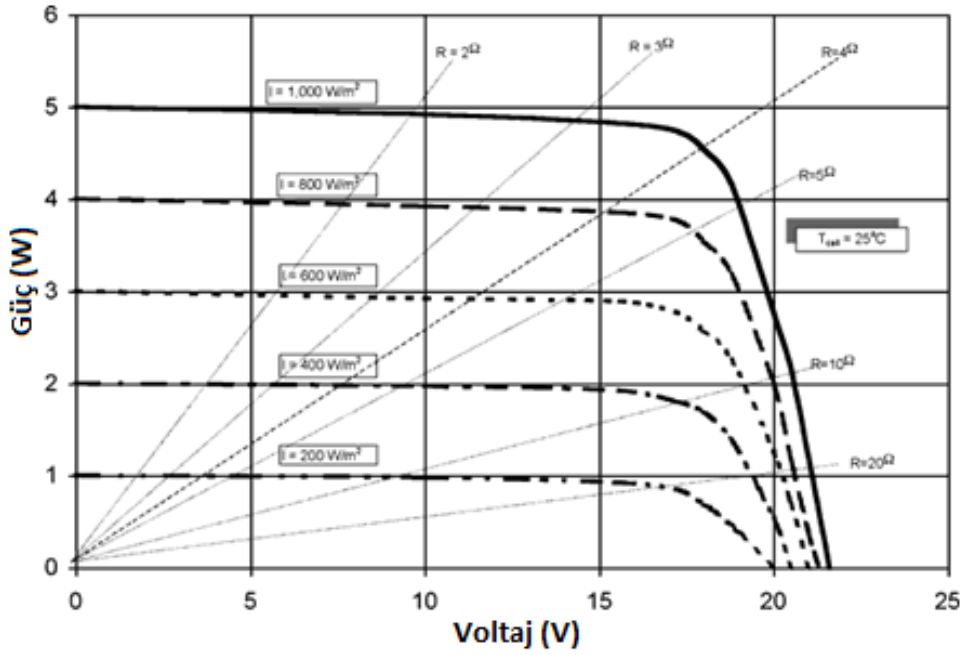
Bir panelin aynı sıcaklık koşulları altında farklı ışınım güç yoğunluklarında çıkış gerilimleri bakımından ufak farklılıklar oluşsa da, çıkış gücü üretim değerleri bakımından ciddi farklılıklar oluşmaktadır. Akım orantısal olarak artış göstermektedir. Şekil 2.32 ve 2.33'te gösterildiği gibi maksimum güç noktası değerleri de farklı ışınım güç yoğunluklarında, farklı değerler almaktadır. Işınım güç yoğunluğu, akım ve güç arasında aşağıdaki doğrusal ilişki vardır:

$$\frac{J_{S2}}{J_{S1}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.12)$$

burada  $J_{S1}$  ve  $J_{S2}$  ( $W/m^2$ ) farklı ışınım güç yoğunluklarını temsil ederken,  $I$  ve  $P$  değerleri modülün bu ışınım güç yoğunluklarına karşılık ürettiği sırasıyla akım (A) ve güç (W) değerlerini temsil etmektedir. Bu orantısal ilişkiyi kullanarak farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde akımı güç değerlerinin değişimleri belirlenebilir.



Şekil 2.32 : Farklı ışınım güç yoğunluklarında modül performans değerleri [17]



Şekil 2.33 : Farklı ışınım güç yoğunluklarında modül performans değerleri [17]

## 2.8 Eviriciler

### 2.8.1 Eviricilerin genel tanıtımı

Eviriciler DC gerilimi AC gerilime çevirmek için kullanılır. Çıkış gerilimi farklı formlarda olabilir: Bunlar;

- Kare dalga
- Sinüs benzeşimli
- Tam sinüs

dalga formlarıdır. Günümüzde en çok kullanılan ve en yüksek kalitedeki eviricilerin çıkış gerilimleri de sinüs dalga formundadır. Şekil 2.34'te fotovoltaik sistemlerde kullanılan standard bir evirici gösterilmiştir.



Şekil 2.34 : SMA evirici [18]

Eviricilerin giriş gerilimi 12V, 24V ve 48V olarak değişiklik göstermektedir. Eviricilerin güçleri ise küçük güçler için 100W'tan başlar ve daha yüksek güçlere

kadar çıkabilmektedir. Bir eviriciyle sağlanamayacak kadar yüksek gücün ihtiyacı duyulduğu uygulamalarda büyük eviriciler birbirlerine paralel bağlanarak çözümler sağlanır. Piyasada büyük sistemler için Tri-faze eviriciler de mevcuttur. Eviriciler hem fotovoltaik sisteme hem de şebekeye bağlanacak şekilde amaca yönelik olarak tasarlanmışlardır. Fotovoltaik sistemlerden gelen enerjiyi alıp şebeke uygun hale getirerek enerjiyi şebekeye verirler. İşletim koşullarına göre piyasa da sunulmuş birçok evirici vardır. Bunlar, merkezi eviriciler (geniş güç aralıklarında 1kW'tan 100kW'a varan eviriciler), dizi evirici serileri ve modül eviricilerdir. Merkezi eviriciler büyük uygulamalarda kullanılırlar. Uygulamalarda birçok sefer merkezi eviriciler master-slave criteria as-üs kriterlerine göre yerleştirilirler. As – üs kriterlerine göre yerleştirilmiş takipçi evirici yeterli ışınım güç yoğunluğu oluştuğunda veya ana evirici arıza yaptığı koşulda devreye girer. Eviricilerin paralel bağlı olduğu dizi evirici serileri geniş güç aralıklarında güvenilir bir işletim koşulu sağlarlar. Modül eviriciler düşük güç gerektiren fotovoltaik sistemlerde kullanılmaktadır. Bu tip eviriciler büyük sistemlerde de kullanılabilir. Fakat uygulamada daha ucuz olmalarına rağmen çok daha az güvenilir olmaları bu sistemlerin yerine merkezi eviricilerin veya dizi evirici serilerinin tercih edilmelerini sağlamaktadır. Hibrit sistemler için özel tasarlanmış eviricilerde piyasada mevcuttur. Günümüz koşullarında birçok güçlü eviricide şarj kontrol devresi mevcuttur. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan en karmaşık parçalardan biri modern eviricilerdir. Bu tip yüksek kaliteli ve güvenilir elektronik ekipmanlar da mutlaka yıldırım korumaları olmalıdır. Eviriciler mikro-işlemci devrelerinden (Klasik veya RISC) ve transistörlerden (MOS veya IGBT) meydana gelmektedirler.

### **2.8.2 Evirici özellikleri, uygulamaları teknik parametreler**

Eviriciler de en önemli parametreler maksimum güç noktasındaki gerilim aralığı, maksimum DC / AC akım, gerilim, güç ile DC / AC güç, akım ve gerilim değerleridir. Diğer parametreler ise bekleme modu güç tüketimi, uyku modu güç tüketimi, güç faktörü, distorsiyon (deformasyon) değerleri ve frekanslardaki kirlilik seviyeleridir. Çizelge 2.4'te eviriciler için gerekli genel parametreler belirtilmiştir.

**Çizelge 2.4 : Evirici (inverter) genel parametreleri.**

| Parametreler                              | Kısaltmalar     |
|---|-----------------|
| DC Gerilimi                               | $V_{DC}$        |
| Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim Aralığı | $V_{MPP}$       |
| Maksimum DC Gerilimi                      | $V_{DCmax}$     |
| Kapatma Gerilimi                          | $V_{Dcoff}$     |
| AC Gerilimi                               | $V_{AC}$        |
| DC Akımı                                  | $I_{DC}$        |
| Maksimum DC Akımı                         | $I_{DCmax}$     |
| AC Akımı                                  | $I_{AC}$        |
| Maksimum AC Akımı                         | $I_{ACmax}$     |
| DC Güç                                    | $P_{DC}$        |
| Maksimum DC Güç                           | $P_{DCmax}$     |
| AC Güç                                    | $P_{AC}$        |
| Maksimum AC Güç                           | $P_{ACmax}$     |
| Güç Faktörü                               | $\cos \phi$     |
| DC güç kapama eşiği                       | $P_{Dcoff}$     |
| DC güç açma eşiği                         | $P_{Dcon}$      |
| Bekleme Modu Güç Tüketimi                 | $P_{DCStandBy}$ |
| Uyku Modu Güç Tüketimi                    | $P_{Night}$     |
| Frekans Kirlilik Seviyesi                 | dB              |
| Sıcaklık Aralığı                          | T               |
| Toplam Harmonik Distorsiyon               | K               |

Eviriciler karmaşık, bir o kadar da geniş alanda kullanılan elektronik cihazlardır.

### 2.8.3 Evirici verimi

Evirici verimi AC gücün DC güce oranı olarak hesaplanır:

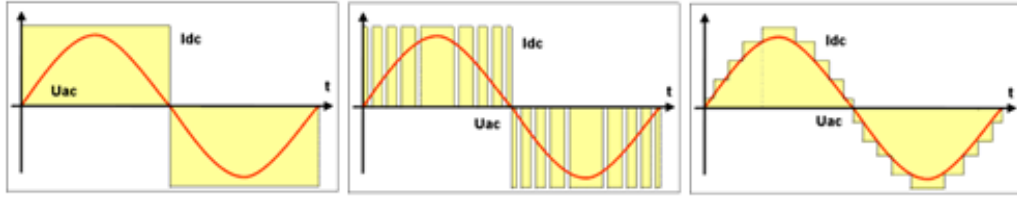
$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (2.13)$$



Burada  $\eta$  ile evirici verimi;  $P_{AC}$  ile AC güç,  $P_{DC}$  ile DC güç ifade edilmiştir. Farklı eviricilerin farklı işletim koşullarında ki sağladıkları verimleri, gerçekçi olarak karşılaştırabilmek için "Euro  $\eta$ " verimi tanımlanmıştır:

$$\eta_{EURO} = 0.03 \times \eta_{5\%} + 0.06 \times \eta_{10\%} + 0.13 \times \eta_{20\%} + 0.1 \times \eta_{30\%} + 0.48 \times \eta_{50\%} + 0.2 \times \eta_{100\%} \quad (2.14)$$

Euro  $\eta$  Verimi Hesaplanması: Bu verim eviricinin %5, %10, %20, %30, %50, %100 çalışma gücü durumunda sistem verimlerinin belli kat sayılarla çarpılıp bunların toplanmasıyla ortaya çıkan yeni verim ifadesidir. Şekil 2.35'te hat kontrollü, PWM kendinden kontrollü ve kaskad eviricilerin akım ve gerilimin zamanla değişim eğrileri gösterilmiştir.



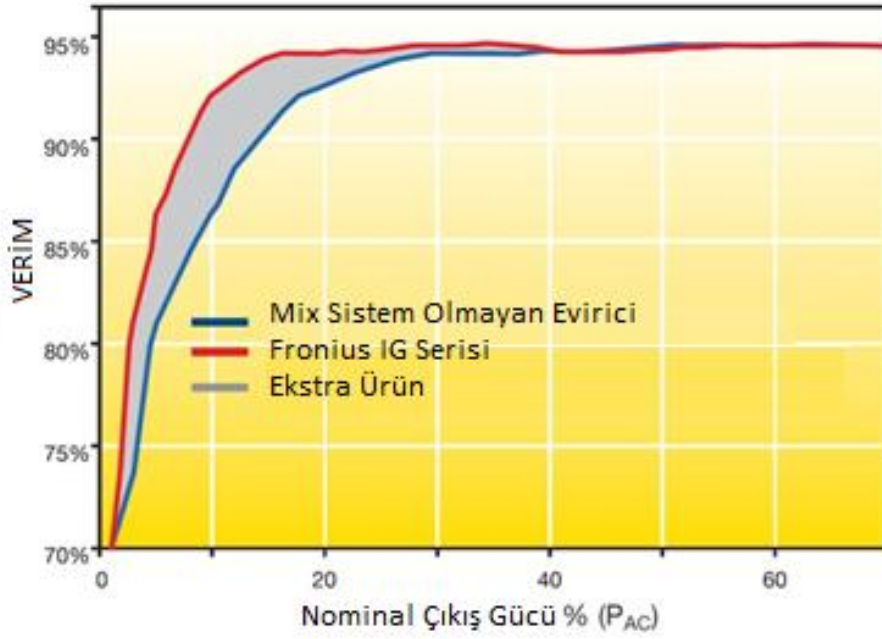
Şekil 2.35 : Farklı tipteki eviricilerin gerilim ve akımlarının zamanla değişimleri [18]

#### 2.8.4 Evirici teknolojileri

Fotovoltaik sistemlerde birçok farklı çeşit evirici kullanılmaktadır. Hat kontrollü eviricilerde tristörler değiştirme elemanı olarak kullanılırlar. Şebekeye bağlı olmayan sistemlerde hat kontrollü eviriciler uygun değildir. Çünkü tristörleri kapatmak için AC gerilim gereklidir. İkinci grup olan kendinden kontrollü eviriciler AC şebeke gerilimi olmadan da kendi başlarına çalışabilirler. Bu tip eviricilerde IGBT, MOSFET or GTO (GTO kapama için) tristörler kullanılır. Eviricilerin, uygulamalara göre voltaj-akım şemaları farklılaşır. Şebekeye bağlı eviricilerin sağladığı birçok avantajdan dolayı, birçok durumda akım kontrol şeması kullanılır. Sağladığı avantajlar yüksek güç faktörü, iyi geçiş akım sönümü sağlaması, kısa devre akımı sınırlandırmasıdır. Hat kontrollü eviricilerdeki AC akım basit dikdörtgen formdadır, bunlar düşük geçişli çıktı filtresiyle filtrelenerek yok edilir. Kendinden kontrollü eviriciler de PWM sinyali çoğunlukla olur ve kaskad eviricilerde küçük parça dikdörtgenlerin toplanıp bir araya gelmeleriyle oluşan yeni formda sinüs akım formu oluşturulur. Tristörler ve MOSFET köprüler

devre anahtarı olarak kullanılırlar. Tristör köprüler daha çok hat kontrollü eviricilerde kullanılır. Kendinden kontrollü eviricilerde ise MOSFET'ler, IGBT'ler ve GTO tristörler en önemli anahtar eleman olarak kullanılırlar.

Fotovoltaik test platformunda kullanılan Fronius IG-15 ve diğer IG serisi eviricilerin teknik verileri ileride gösterilmiştir[19]. Şekil 2.36'da test platformunda kullanılan evirici modelinin verim anma gücü ilişkisini gösteren eğri gösterilmiştir[19].



Şekil 2.36 : Fronius IG serisi eviricilerin anma gücü - verim ilişkisi [19]

Fotovoltaik test platformunda kullanılan Fronius IG-15 ve diğer IG serisi eviricilerin teknik verileri:[19]

# Fronius IG

## DC GİRİŞ VERİLERİ

|  | IG15           | IG20           | IG30           | IG40           | IG60           |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Maksimum Güç Noktası Voltaj Aralığı                            | 150 - 400 V    | 150 - 400 V    | 150 - 400 V    | 150 - 400 V    | 150 - 400 V    |
| Maksimum Giriş Voltaj Gerilimi (1000 W/m <sup>2</sup> ; -10°C) | 500 V          | 500 V          | 500 V          | 500 V          | 500 V          |
| PV Dizi Çıkış Gücü   | 1300 - 1850 Wp | 1800 - 2500 Wp | 2500 - 3500 Wp | 3500 - 4800 Wp | 4600 - 6100 Wp |
| Maksimum Giriş Akımı   | 10 A           | 13,6 A         | 18 A           | 26,5 A         | 33 A           |

## AC ÇIKIŞ VERİLERİ

|  | IG15          | IG20   | IG30   | IG40   | IG60   |
|--|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Nominal Çıkış Gücü (P <sub>nom</sub> ) | 1300 W        | 1800 W | 2500 W | 3500 W | 4600 W |
| Maksimum Çıkış Gücü                    | 1400 W        | 1900 W | 2600 W | 3600 W | 4600 W |
| Maksimum Verim                         | 94,0 %        | 94,5 % | 94,5 % | 94,5 % | 94,5 % |
| Euro Verimi                            | 92,7 %        | 93 %   | 93 %   | 93,2 % | 93,5 % |
| Şebeke Gerilimi / Frekansı             | 230 V / 50 Hz |        |        |        |        |
| Toplam Harmonic Distorsiyon            | < 3,5 %       |        |        |        |        |
| Güç Faktörü                            | 1             |        |        |        |        |
| Gece Güç Tüketimi                      | 0,03 W        |        |        |        |        |

## GENEL VERİLER

|                            | IG15  | IG20 | IG30 | IG40               | IG60 |
|----------------------------|---|------|------|--------------------|------|
| Boyutlar (B x E x Y)       | 366 x 338 x 220 mm  |      |      | 629 x 338 x 220 mm |      |
| Ağırlık                    | 9 kg  |      |      | 16 kg              |      |
| Soğutma                    | Özel Havalandırmalı Soğutma                                   |      |      |                    |      |
| Muhafaza                   | Std. Muhafaza Kapalı Ortam İçin; Opsiyonel Dış Ortam Muhafaza |      |      |                    |      |
| Dış Ortam Sıcaklık Aralığı | -20 ..... 50 °C   |      |      |                    |      |
| Nem Oran Aralığı           | 0 ..... 100 %   |      |      |                    |      |

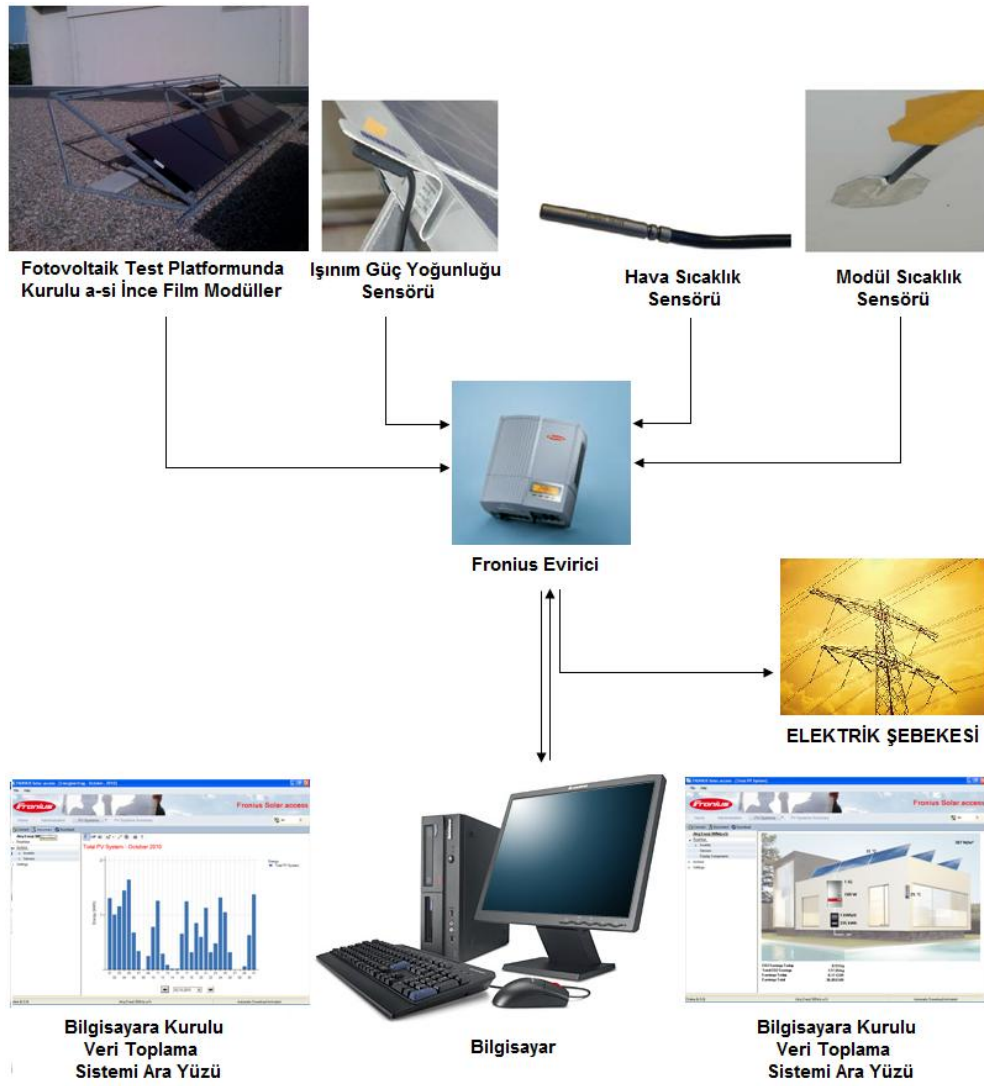
## KORUMA

|                           | IG15                      | IG20 | IG30 | IG40 | IG60 |
|---------------------------|---------------------------|------|------|------|------|
| DC İzolasyon Ölçümü       | R <sub>ISO</sub> < 1 Mohm |      |      |      |      |
| Ters Polarite Koruma      | Entegre                   |      |      |      |      |
| DC Aşırı Yükleme Koruması | İşletim Noktası Değişim   |      |      |      |      |

### 3. TEST PLATFORMUNUN BİLEŞENLERİ VE TASARIMI

#### 3.1 Fotovoltaik Sistem Test Platformu Deney Şeması

Işınım güç yoğunluğu, hava ve modül sıcaklık sensörleri evirici'ye bağlanır. Sensörler ölçülen verileri eviriciye aktarır. Evirici ara yüzü sensörlerden okunan veriler gösterilir. Şekil 3.1'de fotovoltaik modül test platformunun bileşenleri deney şeması içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Fotovoltaik modül test platformu deney şeması

### 3.2 Fotovoltaik Sistem Test İstasyonu Konstrüksiyon Tanıtımı

Şekil 3.2’de gösterilen farklı tipteki fotovoltaik modüllerin gerçek saha koşullarında testlerinin yapılabilmesi için özel tasarlanmış boyutlandırılabilir taşıyıcı konstrüksiyon 4mm kalınlığındaki demir profillerden yapılmıştır. Demir profillerin pas veya oluşabilecek dış ortam koşullarından zarar görmemesi için profiller özel bir astar ile boyanmıştır. Taşıyıcı konstrüksiyon İstanbul için yaz koşullarında 30° ile kış koşullarında 60° olacak şekilde istenen açığa göre konumlandırılacak yapıda tasarlanmıştır. Test süreci Nisan- Ekim ayları arası olduğundan bu süreçte fotovoltaik modüller 30°’lik açıyla konumlandırılmışlardır.

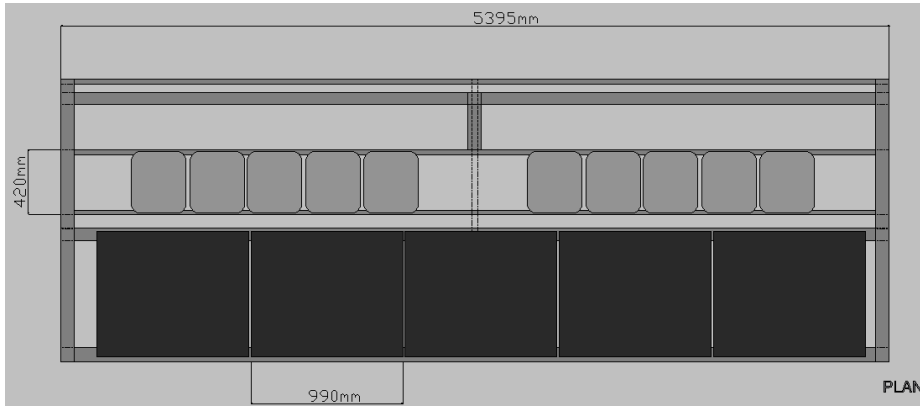


**Şekil 3.2 :** İTÜ’de kurulu olan güneş pili test istasyonu konstrüksiyon yapısı

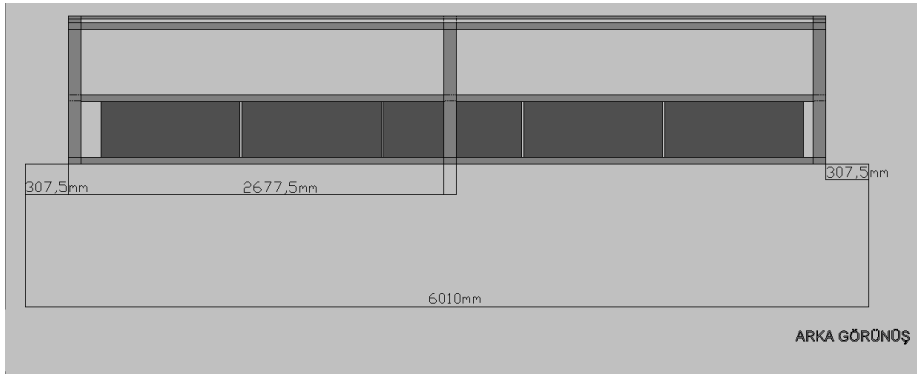
Sistemin yukarıda belirtildiği üzere farklı fotovoltaik modüllerin takılmasına imkan veren yapısı şu şekilde tasarlanmıştır. Fotovoltaik modüllerin tabanlarının sabitleneceği taban demir profili ana gövde yapısına bağlı olarak sabittir ve buna paralel olarak gelecek yukarı üst tavan demir profili hareketli kaydırılabilir şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede fotovoltaik modüllerin boyutlarına göre 1’er cm lik aralıklı kaydırılabilecek şekilde tasarlanmış hareketli üst tavan profiliyle test için istenen fotovoltaik modüllerin boyutlarına göre konstrüksiyon yeniden boyutlandırılmıştır. Tavan profilinin bir parçası olan kaydırma sisteminin sabitlenmesi için somunlu civatalar kullanılmış ve istenen boyutlar ayarlandıktan sonra bu somunlu civatalar sıkılır ve sabitleme gerçekleştirilir.

Sistem konstrüksiyonu üzerinde takılı 5 adet a-si ince film fotovoltaik modül bulunmaktadır. Fakat yeterli boyutlardaki farklı fotovoltaik modüllerden oluşacak dizilerle konstrüksiyon üzerine toplam 10 adet maksimum olacak şekilde fotovoltaik modül de takılabilir. Ayrıca sistemin rügardan dolayı dengesinin kaybolup öne doğru devrilmesini önlemek amacıyla sistem tabanına kalıplar içine dökülerek çimentodan yapılmış 10 adet 40 kg ağırlıkta yük yerleştirilmiştir. Taban üzerine eklenen bu yüklerle sistemin güvenli bir şekilde yere basması ve karşılaşılabilecek uçma veya devrilme problemlerinin önüne geçilmesi sağlanmıştır. Sistemin teknik çizimleri şekil 3.3, şekil 3.4 ve şekil 3.5'te gösterilmiştir.

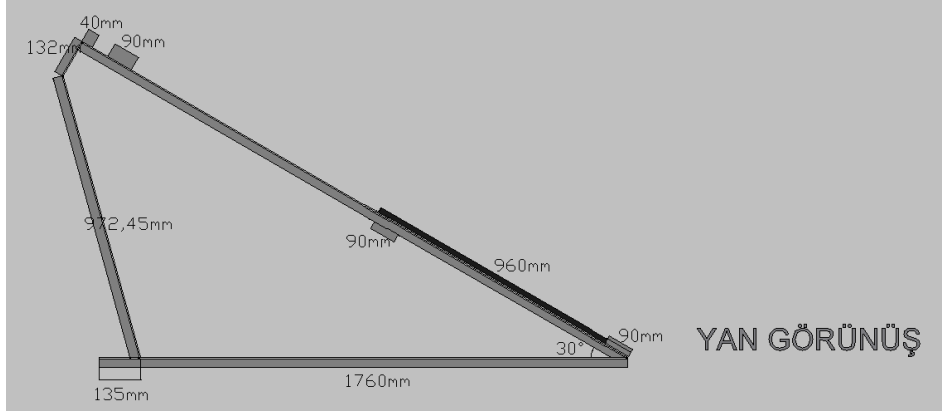
**Sistemin Teknik Çizimleri Aşağıda Belirtilmiştir:**



**Şekil 3.3 :** AutoCad'te çizilmiş olan sistemin plan görünümü ve boyutları



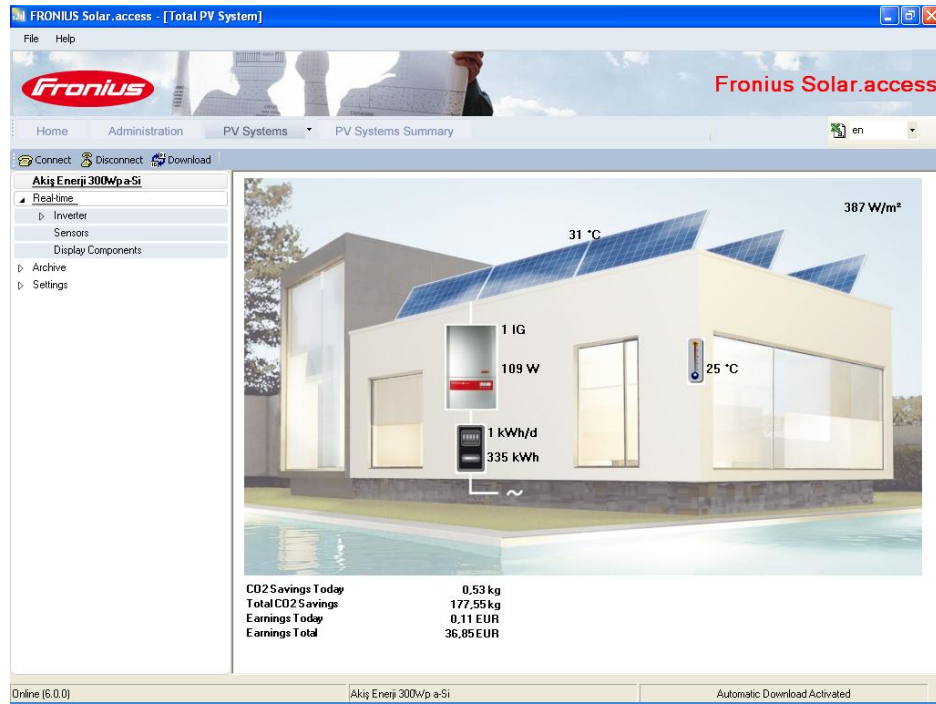
**Şekil 3.4 :** AutoCad'te çizilmiş olan sistemin arka görünümü ve boyutları



Şekil 3.5 : AutoCad'te çizilmiş olan sistemin yan görünümü ve boyutları

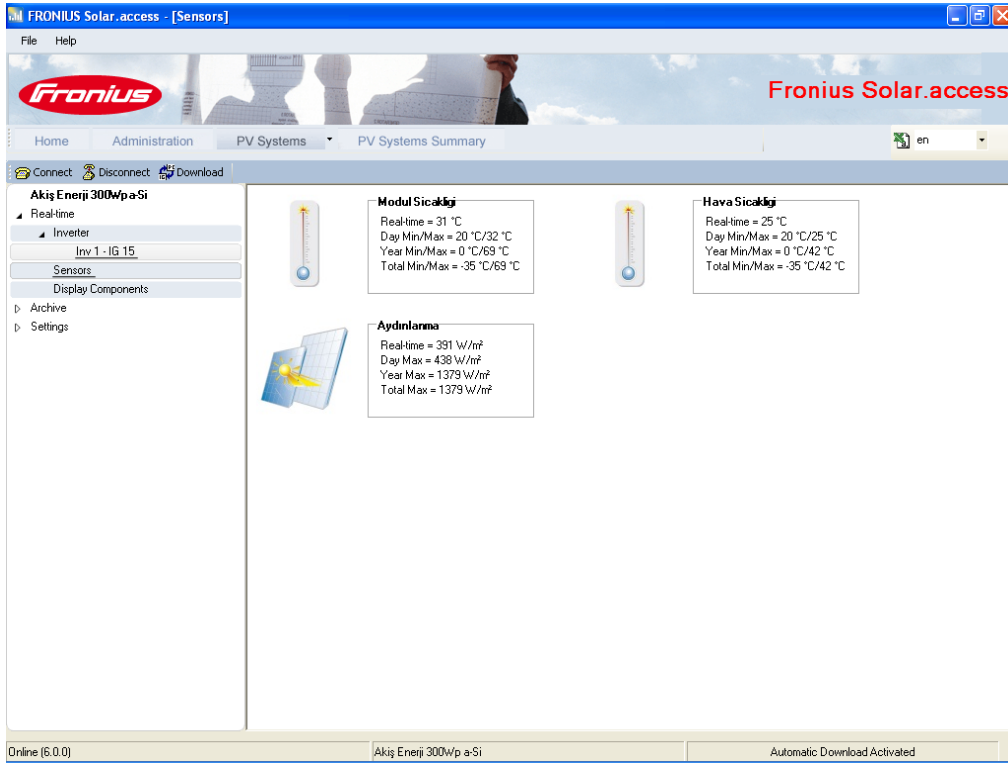
### 3.3 Veri Toplama Sisteminin Özellikleri:

Eviricinin veri toplama sistem yazılımı; eviriciden, ışınım güç yoğunluğu sensöründen, dış hava sıcaklık sensöründen ve modül yüzey sıcaklık sensöründen bilgisayar üzerine yerleştirilmiş olan sensör kartına gelen verilerin görüntülenmesini sağlayan ara yüzdür. Şekil 3.6 - Şekil 3.9 sistemin ara yüz ekran görüntülerini göstermektedir. Bu programla sistemdeki fotovoltaik modüllerin hangi açıyla yerleştirildikleri ve birim enerji fiyatı girilerek, kullanılan evirici tipine göre günlük ne kadar enerji ürettiği ve bunun euro para birimi cinsinden sağladığı ekonomik kazanç gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Fronius veri toplama programının açılış ekranı

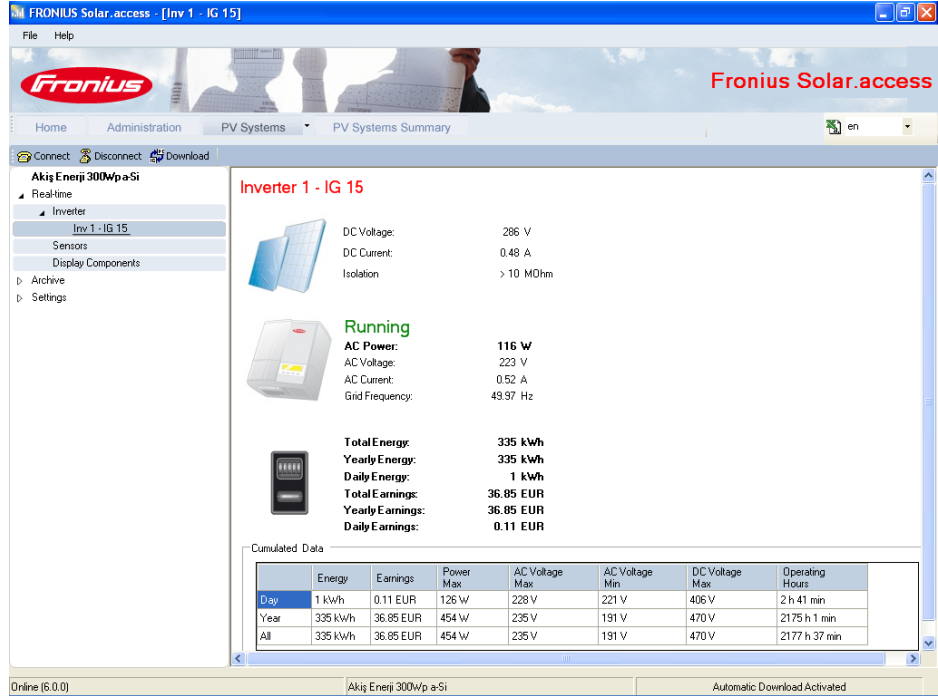
Anlık olarak sistemdeki fotovoltaik modüllerin yüzey sıcaklığı, dış hava sıcaklığı, ışınım güç yoğunluğu değerleri tablolarla gösterilmektedir. Sistemin anlık, günlük ve kurulduğu zamandan bakılan en son zamana kadar geçen sürede yapılan toplam enerji üretimi farklı tablolarla gösterilmektedir. Kurulu sistemin günlük ve işleme alındığı günden en son bakıldığı zamana kadarki geçen sürede sağlanan Euro para birimi cinsinden toplam ekonomik kazancı ve bu enerjiyi üretmek için farklı enerji üretim teknolojileriyle ortama salınacak ne kadar CO<sub>2</sub>'in önüne geçildiği, yine tablolarla gösterilmektedir.



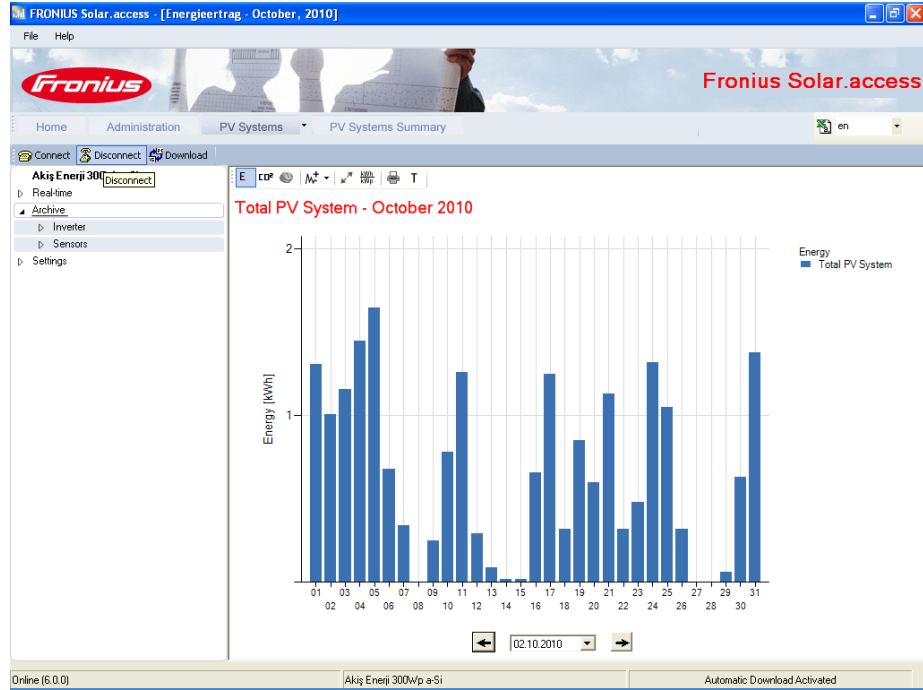
**Şekil 3.7 :** Fronius ara yüzünde görülmüş minimum-maksimum değerleri

Ayrıca çubuk diyagramlı tablolarla aylık üretim tabloları içinde günlük sağlanan CO<sub>2</sub> salınımında ki azalma, sağlanan ekonomik kazançlar, modül sıcaklığı ve ışınım güç yoğunluğu üzerindeki değişimler gösterilebilmektedir. Bununla birlikte anlık görüntü olarak bakılan andaki DC ve AC akım, gerilim ve güç değerleri ile şebeke frekans değerleri gösterilmektedir. Üretim değerleri Microsoft Office içinde Excel dokümanı olarak bilgisayara aktarılabilir. Aktarılan bu değerler sırasıyla Modül Sıcaklığı, Hava Sıcaklığı, Işınım Güç Yoğunluğu, Üretim Gücü, AC ve DC gerilimlerdir.





Şekil 3.8 : Fronius ara yüzünde kayıt edilmiş akım, gerilim ve güç değerleri



Şekil 3.9 : Fronius ara yüzünde çubuk diyagramlı aylık üretim tabloları

Evirici ara yüzünden okunabilen tüm veriler aşağıda belirtilmiştir. Sistem kullanıcının beklentisine göre ister SMS veya E-mail olarak da verileri planlanan zamanlarda kullanıcıya gönderebilmektedir. Sistem üzerinde sensör kartının eviriciden veri toplama aralığı 5 – 30 dakika arasında ayarlanabilmektedir. Kurulu sistem de 15 dakika aralıklarla veriler alınmaktadır.

Fronius eviricinin ara yüzünden okunan veriler:

- AC Güç
- AC Akım
- DC Güç
- DC Akım
- Modül Gücü
- Toplam Enerji Üretim Miktarı
- Işınım Güç Yoğunluğu Değerleri
- Dış Hava Sıcaklığı
- Modül Sıcaklığı
- Şebeke Frekansı
- Toplam İşletim Süresi
- Minimum ve Maksimum AC Gerilimi
- Maksimum DC Gerilimi
- Minimum ve Maksimum Modül Sıcaklığı
- Minimum ve Maksimum Hava Sıcaklığı
- Minimum ve Maksimum Işınım Güç Yoğunluğu Değerleri
- Günlük Sağlanan CO<sub>2</sub> Salınımındaki Azalma
- Euro Para Birimi Cinsinden Yapılan Günlük ve Aylık Tasarruf

### 3.4 Fotovoltaik Modül Gerçek Saha Test İstasyonu Ekipman Teknik Verileri

Fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda kullanılan tüm sistem ekipmanlarının teknik özellikleri aşağıda belirtilmiştir [20].

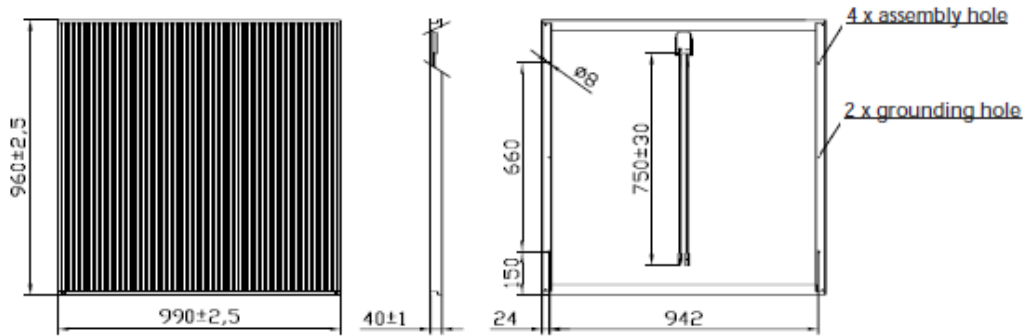
#### 3.4.1 KANEKA K-60 60Wp a-si ince film

Şekil 3.10'da gösterilen fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda 5 adet kullanılan Kaneka K-60 60Wp a-si ince film güneş pildir.



Şekil 3.10 : Kaneka K-60 amorf silikon ince film fotovoltaik modül

Şekil 3.11'de Kaneka K60 a-si İnce Film fotovoltaik modülün boyutları ve teknik çizimi plan, arka ve yan görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : Kaneka K-60 ince film fotovoltaik modülün boyutları

Kaneka K-60 60Wp a-si ince film güneş pilinin teknik verileri çizelge 3.1'de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.1 : Kaneka K-60 a-si ince film modülün teknik verileri**

| <i>Elektriksel Veriler:</i>                        | <i>SOC Değerleri:</i>            |
|--|----------------------------------|
| Nominal Güç (Pmax):                                | 60Wp                             |
| Tolerans:  | +10,-5%                          |
| Modül Verimi:                                      | %6,3                             |
| Hücre Tipi:  | a-si                             |
| Modül Başına Hücre Sayısı:                         | 108                              |
| Hücre şekli:                                       | İnce Film Üzerine Yerleştirilmiş |
| Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim (V):             | 67V                              |
| Maksimum Güç Noktasındaki Akım (A):                | 0,90A                            |
| Açık Devre Gerilimi(V):                            | 92V                              |
| Kısa Devre Akımı(A):                               | 1,19A                            |
| -10°C Açık Devre Gerilimi(V):                      | 102V                             |
| 70°C Sıcaklıkta Maksimum Güç Noktasındaki Akım(A): | 1.23A                            |
| Gerilim Üzerindeki Sıcaklık Katsayısı:             | $-\frac{0,305\%}{^{\circ}C}$     |
| Akım Üzerindeki Sıcaklık Katsayısı:                | $\frac{0,0752\%}{^{\circ}C}$     |
| Maksimum Güç Üzerindeki Sıcaklık Katsayısı:        | $-\frac{0,23\%}{^{\circ}C}$      |
| Maksimum Sistem Gerilimi (V):                      | 530V                             |
| Yükseklik(mm):                                     | 960mm                            |
| Genişlik(mm):                                      | 990mm                            |
| Kalınlık(mm): {Kutusuz}                            | 40mm                             |
| Kullanılan Çerçeve:                                | Alüminyum                        |
| Kullanılan Bağlantı:                               | MC Konektör                      |
| Ağırlık(kg):                                       | 13,7Kg                           |
| Sertifikalar                                       | IEC61646 / CE Damgalı            |

### 3.4.2 Dış ortam hava sıcaklık sensörü:

Şekil 3.12’de gösterilen fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda kullanılan Fronius dış ortam hava sıcaklık sensörü teknik verileri aşağıda çizelge 3.2’de belirtilmiştir [21].



Şekil 3.12 : Fronius hava sıcaklık sensörü

Dış ortam hava sıcaklık sensörünün çok geniş bir ölçüm aralığı olduğu için sensörün yerleşim noktası da önem kazanmaktadır.

Çizelge 3.2 : Fronius hava sıcaklık sensörü teknik verileri

|   |  |
|---|--|
| Sensör                                    | PT1000   |
| Ölçüm Aralığı                             | -40°C’den 180°C’ye kadar                               |
| Sistemin Doğruluk Seviyesi                | $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ (-40°C ile 100°C aralığında) |
| Dizayn Tipi                               | Paslanmaz Çelik Silindir İçine Yerleştirilmiş Sensör   |
| Boyutlar                                  | Uzunluk 50mm Ø 6mm                                     |
| Kablo                                     | 3m Cu Kablo, 2 x 0,5mm, silikon yalıtımlı              |
| Kullanılabilecek Maksimum Kablo Uzunluğu: | 20m  |
| Fronius Tasarım Numarası                  | 43,0001,1188   |

Bu tip dış ortam hava sıcaklık sensörleri için özel bir montaj tekniği gerekmemektedir. Fotovoltaik modül altına yerleştirilmesi yeterlidir.

### 3.4.3 Fotovoltaik modül sıcaklık sensörü:

Şekil 3.13'te gösterilen fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda kullanılan Fronius modül yüzey sıcaklık sensörü teknik verileri aşağıda çizelge 3.3'te belirtilmiştir [21].



**Şekil 3.13 :** Fronius modül sıcaklık sensörü

Modül sıcaklık sensörü fotovoltaik modülün arkasına yerleştirilerek modül yüzey sıcaklığını ölçer.

**Çizelge 3.3 :** Fronius modül sıcaklık sensörü teknik verileri

|   |   |
|---|---|
| Sensör                                    | PT1000  |
| Ölçüm Aralığı                             | -15°C'den 150°C'ye kadar  |
| Sistemin Doğruluk Seviyesi                | ± 0,8°C (-20°C ile 100°C aralığında)  |
| Dizayn Tipi                               | Plaka sıcaklıklarını ölçmek için yapışkan film üzerine yerleştirilmiş sensörler |
| Boyutlar                                  | 50 x 100mm  |
| Kablo                                     | 3m Cu Kablo, silikon yalıtımlı  |
| Kullanılabilecek Maksimum Kablo Uzunluğu: | 20m   |
| Fronius Tasarım Numarası                  | 43,0001,1190  |

### 3.4.4 Işınım güç yoğunluğu sensörü:

Şekil 3.14'te gösterilen fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda kullanılan Fronius ışınım güç yoğunluğu sensörü teknik verileri aşağıda çizelge 3.4'te belirtilmiştir [21].



Şekil 3.14 : Fronius ışınım güç yoğunluğu sensörü

Fotovoltaik Modül üzerine gelen ışınım güç yoğunluğunu bu sensörle ölçülür. Fotovoltaik modüllerinin kenarlarındaki alüminyum profil kısımlar üzerine yerleştirilir.

Çizelge 3.4 : Fronius ışınım güç yoğunluğu teknik verileri

| Sensör                                    | Mono-Kristaline Si-Sensör   |
|---|---|
| Sensör Gerilimi:                          | Yaklaşık 70mV Işınım Güç Yoğunluğu 1000W/m <sup>2</sup> 'ikendir. (Tam net gerilimi sensör üzerinde yazılıdır.) |
| Sistemin Doğruluk Seviyesi:               | ± %5 (1 yıllık ortalama)  |
| Dış Hava İşletim Koşulları:               | -40°C'den 85°C'ye kadar   |
| Dizayn Tipi:                              | Z şeklinde alüminyum profil üzerine yerleştirilmiş sensör   |
| Boyutlar:                                 | U x G x Y : 110 x 40 x 40 mm  |
| Kablo:                                    | 3m Cu Kablo, UV Dirençli  |
| Kullanılabilecek Maksimum Kablo Uzunluğu: | 30m   |

### 3.5 Modül Veriminin Belirlenme Yöntemi

Modül verimi Fronius'un hazırladığı verim-anma gücü grafiği değerlerinden geriye dönük hesaplama yaparak belirlenmiştir. Modül verimi hesabına, Fronius IG serisi eviriciler için üretici firma tarafından hazırlanmış verim-anma gücü grafiğinin değerlerine, Excel ve Mathematica ortamında matematiksel bir fonksiyonun oturtulması (temsil edebilir hale getirilmesi) ile başlanmıştır. Böylece eviricinin verimini güç ile ilişkilendiren denklem elde edilmiş ve bu verim değerleri kullanılarak modül verimine aşağıdaki formülle geçilmiştir:

$$\eta_M = \frac{P_{INV}}{\eta_{inv}(P_{INV}) \times J_s \times A} \quad (3.1)$$

Burada  $P_{INV}$  ile evirici çıkış gücü,  $\eta_M$  ile modül verimi,  $\eta_{inv}$  ile evirici verimi,  $J_s$  ile ışınım güç yoğunluğu ve  $A$  ile toplam modül yüzey alanı ifade edilmiştir. Evirici çıkış gücü  $P_E$ 'nin, ışınım güç yoğunluğu, toplam modül yüzey alanı ve evirici veriminin çarpımlarına bölünmesiyle modül verimi elde edilmektedir. Fronius ara yüzünden okunan  $P_E$  değerinin invertör verimine bölünmesi ise modül anma gücünü ( $P_M$ ) verir.

### 3.6 Toplanan Verilerin İşlenmesinde Kullanılan İstatistiksel Yöntemler

Toplanan veriler; ışınım güç yoğunluklarına göre  $1000\text{W/m}^2$ ,  $800\text{W/m}^2$ ,  $600\text{W/m}^2$ ,  $400\text{W/m}^2$ ,  $200\text{W/m}^2$  olarak, hava sıcaklıklarına göre  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  ve modül sıcaklıklarına göre ise  $15^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$  olarak ayrılmıştır. İstenen ışınım güç yoğunluğu değerine  $20\text{ W/m}^2$  eklenip ve  $20\text{ W/m}^2$  çıkarılmasıyla oluşan bant aralığındaki veriler kullanarak filtrelenmiş ışınım güç yoğunluğu değerleri oluşturulmuştur. Modül ve hava sıcaklığı değerleri ise istenen sıcaklık değerinin üzerine  $1^\circ\text{C}$  eklenip ve  $1^\circ\text{C}$  çıkarılarak oluşan bant aralığındaki verilerden oluşturulmuştur.

Yukarıda belirtilmiş şekilde filtrelenmiş tüm verilerin değerlendirilmesinden önce kullanılacak veriler üzerine en küçük kareler metodu ile bir ince filtreleme daha uygulanmıştır. En küçük kareler metoduyla deneysel verilere denklem oturtulduktan sonra denklemin standart sapması kadar bir değer denkleme ilave edilerek ve çıkartılarak elde edilen bandın dışında kalan veriler atılarak kalan veriler güvenilir veriler olarak değerlendirilerek işlemlere devam edilmiştir.



### **3.7 Sistemdeki Ölçüm Belirsizliklerinin Kaynakları**

İTÜ Enerji Enstitüsü çatısına kurulmuş olan fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda kullanılan her ölçüm cihazının ve teçhizatının kendine göre ölçüm belirsizlikleri olup çizelge 3.2, 3.3 ve 3.4’de sunulan etiket bilgileri üzerinde bu belirsizlikler verilmiştir. Bu belirsizliklerin ötesinde Fronius IG serisi eviriciler için verilmiş verim – güç eğrisinden okunan değerler de belirsizlikler içerebilmektedir. Modül üzerinde hava veya çevresel koşullardan oluşabilecek toz ve benzeri kirlilikler sistemin veri ölçüm cihazlarında öngörülemeyen ölçüm sapmalarına yol açabilmektedir. Örneğin tesadüfi olarak kuşlardan veya bulutlardan vs. gerçekleşebilecek gölgelemeler sistemin ölçüm belirsizliklerini etkileyecektir. Yukarıda bahsedilen tüm nedenler sistemin üzerinde gerçekleşebilecek ölçüm belirsizliklerinin kaynakları olarak düşünülebilir.

### **3.8 Hesaplamalardaki Kabullerden Kaynaklı Oluşabilecek Hatalar**

Fotovoltaik modül gerçek saha test istasyonunda yapılan ölçümlerden elde edilen veriler üzerine yapılan hesaplamalarla güneş pillerinin performansları değerlendirilmektedir. Bu hesaplamalar yapılırken bazı kabullerde yapılmıştır. Bu kabullerden kaynaklanan çeşitli hatalar olabilmektedir. Sistemin performansının değerlendirilmesi için kullanılan hesaplamalarda yapılan kabuller aşağıda belirtilmiştir:

- Sistem üzerinde kullanılan kablolar da oluşacak kayıplar ihmal edilmiştir.
- Modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki lineer (doğrusal) olarak kabul edilmiştir.
- Modül gücü ile modül sıcaklığı arasındaki ilişki lineer (doğrusal) olarak kabul edilmiştir.

Bu yapılan kabullere göre sistem üzerinde kullanılan güneş pillerinin performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Sistemin kendi iç dinamiklerinden dolayı modül gücünün ışınım güç yoğunluğuyla ve modül sıcaklığıyla kendine göre daha farklı bir ilişki karakteristikleri varsa bunlar göz ardı edilmiştir. Bu da kabuller kaynaklı hataların oluşmasına neden olabilir.

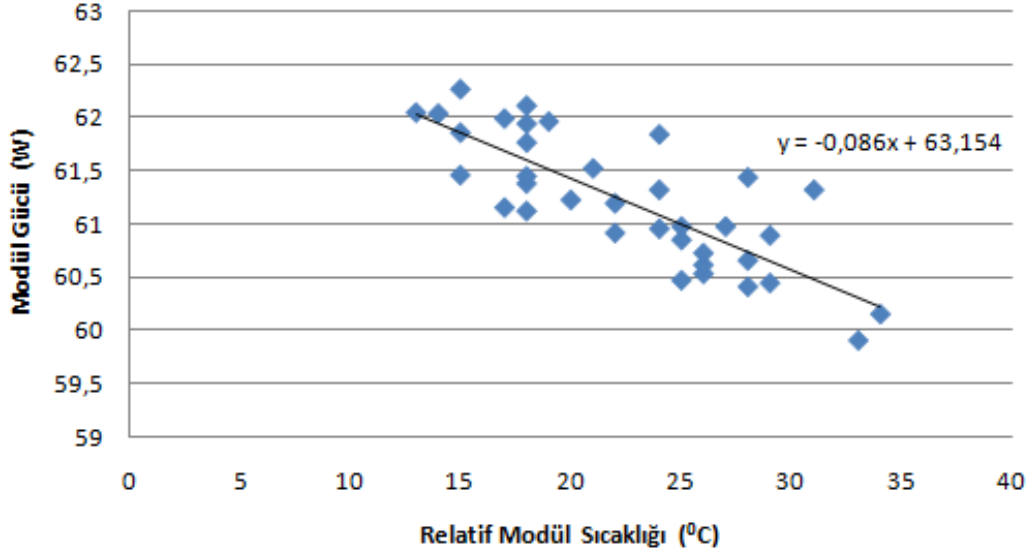
#### **4. TEST PLATFORMUNDA KURULU GÜNEŞ PİLLERİNİN PERFORMANS ÖLÇÜMÜ VE DEĞERLENDİRMESİ**

Test platformunda güneş pillerinin performans ölçümlerinin sağlıklı yapılıp yapılamadığını kontrol etmek amacıyla etiket bilgilerine güvenilebilecek uluslararası güvenilirliğini kanıtlamış bir marka olarak Kaneka K-60 güneş pilleri test için seçilmiştir. Böylece test platformunda elde edilen değerler firmanın sunduğu değerlerle karşılaştırılarak ölçüm sistemimizin güvenilirliği sınanmıştır. Test süresince K-60'ın performans karakteristikleri ile panellerden havaya ısı geçişini temsil eden havanın taşınım katsayısı ve güneş pillerinin üretim değerleri aşağıda gösterilmiştir.

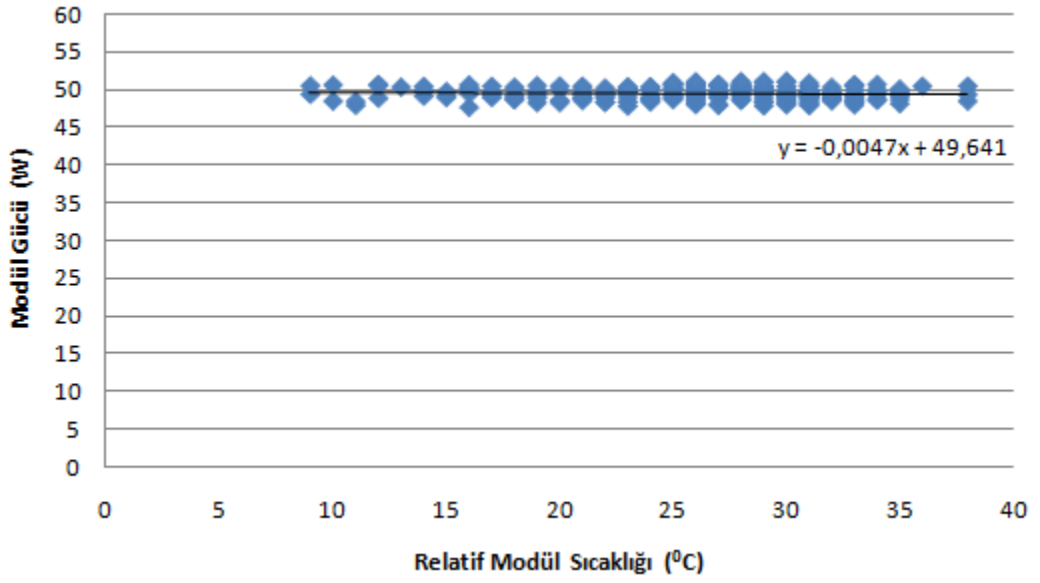
##### **4.1 KANEKA K-60 Güneş Pillerinin Gerçek Saha Test Performans Sonuçları**

###### **4.1.1 Modül gücü ile relatif modül sıcaklığı arasındaki ilişki**

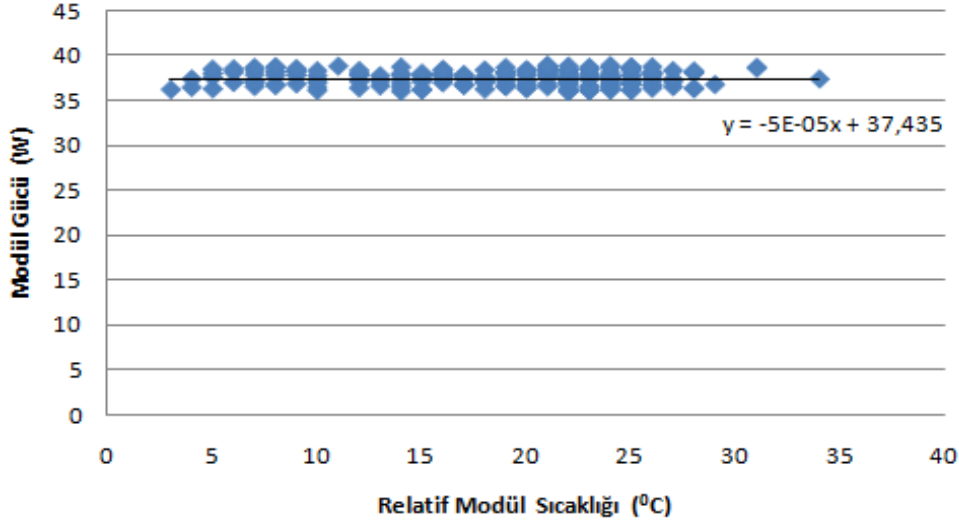
Aşağıdaki grafiklerde farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül gücünün relatif modül sıcaklığıyla değişimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Relatif modül sıcaklığıyla  $T_M - T_0$  olarak ifade edilmektedir.  $T_M$  ile modül sıcaklığı,  $T_0$  ile standard işletim koşul sıcaklığı yani  $25^{\circ}\text{C}$  ifade edilmektedir. Işınım güç yoğunluğu değerleri  $1000\text{W/m}^2$ ,  $800\text{W/m}^2$ ,  $600\text{W/m}^2$  ( $\pm 20\text{ W/m}^2$ ) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te modül gücü relatif modül sıcaklığı grafikleri Şekil 4.4'te de bu eğrilerin toplu gösterimi yapılmıştır. Farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değerlerinin lineer bir şekilde değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te görüleceği üzere ışınım güç yoğunluğu değerlerindeki artışla birlikte modül güçleri de artmaktadır. Ayrıca ışınım güç yoğunluğu azaldıkça modül gücünün relatif sıcaklığa bağımlılığının da azaldığı gözlemlenmektedir.



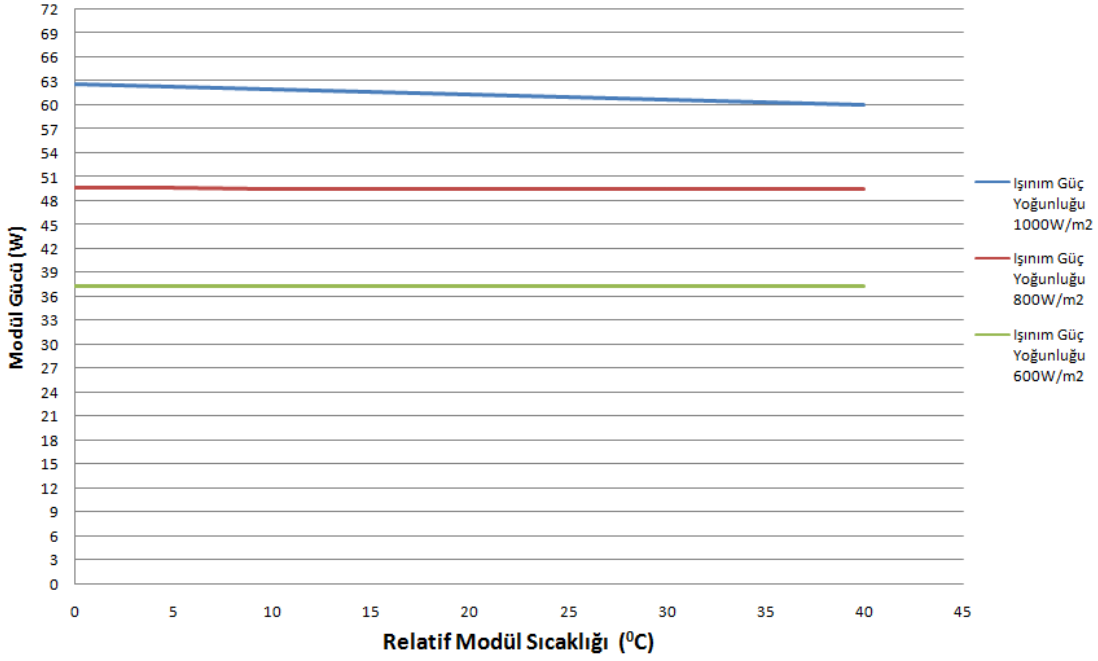
Şekil 4.1 : 1000 W/m<sup>2</sup> ( $\pm 20$  W/m<sup>2</sup>) ışınım güç yoğunluğunda modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.2 : 800 W/m<sup>2</sup> ( $\pm 20$  W/m<sup>2</sup>) ışınım güç yoğunluğunda modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.3 :  $600 \text{ W/m}^2$  ( $\pm 20 \text{ W/m}^2$ ) ışınım güç yoğunluğunda modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.4 :  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  ve  $600 \text{ W/m}^2$  ( $\pm 20 \text{ W/m}^2$ ) ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül gücü ile relatif modül sıcaklığı değişim grafikleri.

Modülün  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışı nım güç yoğunluğ unda ve  $25^{\circ}\text{C}$  modül sıcaklığındaki gücü olan  $P_{M0}$  ile aynı modülün herhangi bir modül sıcaklığındaki üreteceği modül gücü olan  $P_M$  arasındaki ilişki

$$P_M = P_{M_0} + C'_p \times (T_M - T_0) \quad (4.1)$$

ile ifade edilir. Böylece modül gücünün relatif modül sıcaklığı ile değişimini  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışı nım güç yoğunluğu için temsil eden Şekil 4.1 grafiğine denklem 2.8'in oturtulması ile sıcaklık güç katsayısı değerleri hesaplanabilir.

Test istasyonunda kurulu olan modüllerin  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışı nım güç yoğunluğu için yapılan ölçüm verilerinden çıkarılan modül gücü relatif modül sıcaklığı eğrisinin denklemi:

$$P_M = 63,154 - 0,086 \times (T_M - T_0) \quad (4.2)$$

Yukarıda bahsedildiği gibi bu fotovoltaik modülün sıcaklık güç kat sayısı;

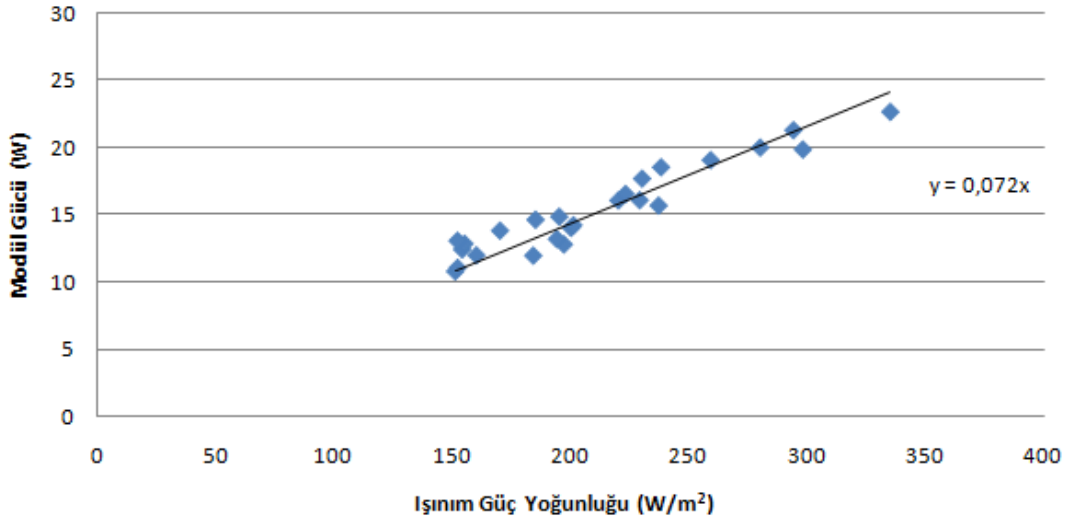
$$C'_p = \frac{C_p}{P_{M_0}} = \frac{-0,086}{63,154} = -0,001361 \quad (4.3)$$

bu da % -0,14'e eşittir. Teknik verilerinde % -0,23 olarak görülmektedir. Bu değerler arasındaki farkın gerçek saha koşulları ile laboratuvar koşulları arasındaki farklardan ve ayrıca ölçüm platformunun belirsizlik ve hatalarından kaynaklanabileceği söylenebilir.

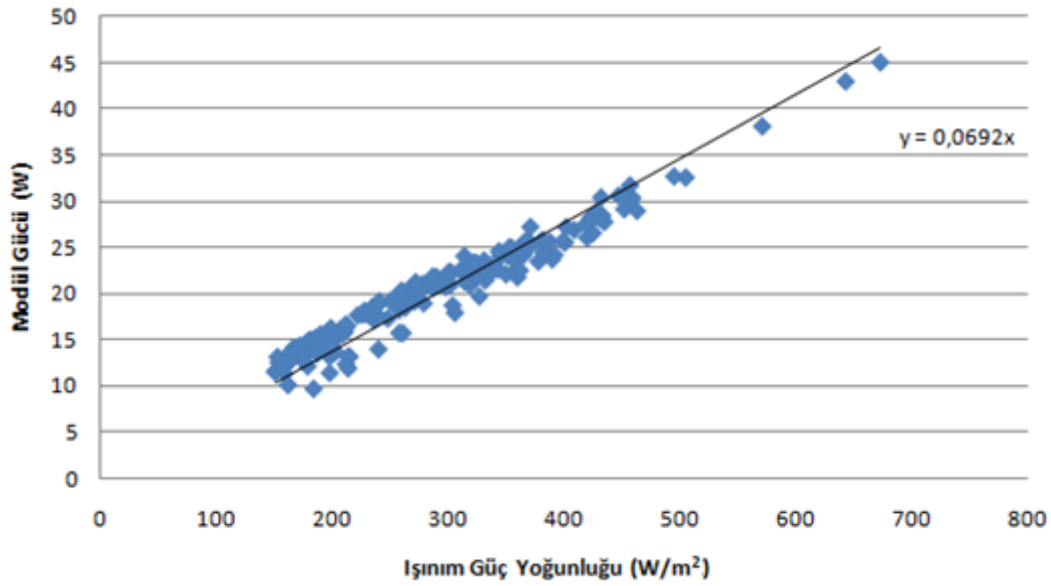
#### 4.1.2 Modül gücü ile ışı nım güç yoğunluğu arasındaki ilişki

Aşağıdaki grafiklerde farklı modül sıcaklıklarında modül verimi ile ışı nım güç yoğunluğu arasındaki ilişki incelenmiştir. Modül sıcaklıkları  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  ve  $45^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.5, şekil 4.6, şekil 4.7 ve şekil 4.8'de farklı modül sıcaklıklarında modül gücü ışı nım güç yoğunluğu eğrileri şekil 4.9'da da bu eğrilerin toplu gösterimi bulunmaktadır. Farklı modül sıcaklıklarında, modül gücü ile ışı nım güç yoğunluğu değerlerinin lineer bir şekilde değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.9'da görüleceği üzere ışı nım güç yoğunluğu değerleri artıp modül yüzey sıcaklığı soğudukça modül üretim gücünün arttığı görülmektedir. Şekil 4.6'da görüleceği üzere  $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında ve  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışı nım güç

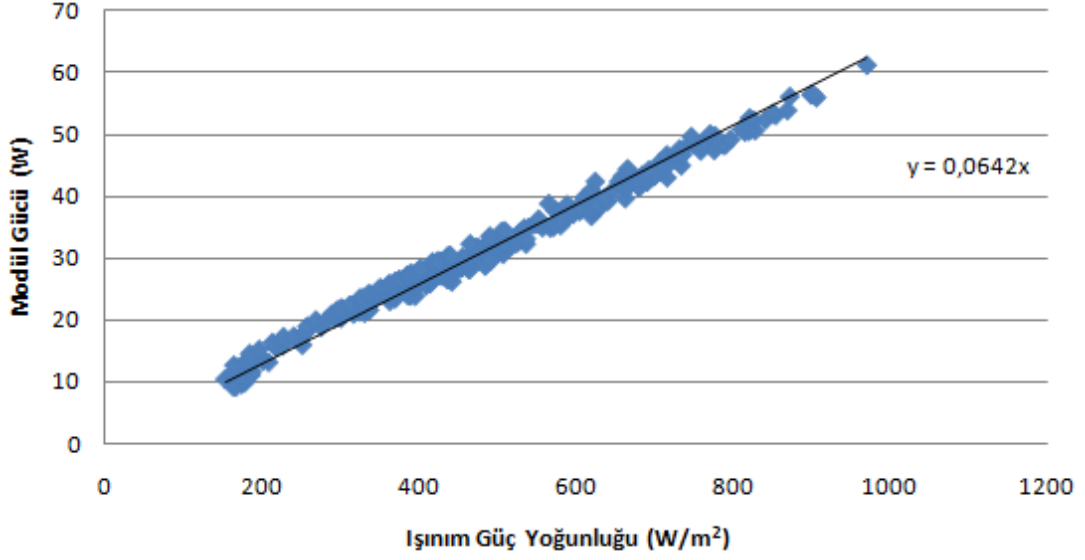
yoğunluğunda modül gücü 69W olarak ölçülmüştür. Bu değer 60W (+%10,-%5) değerine oldukça yakın bir değerdir.



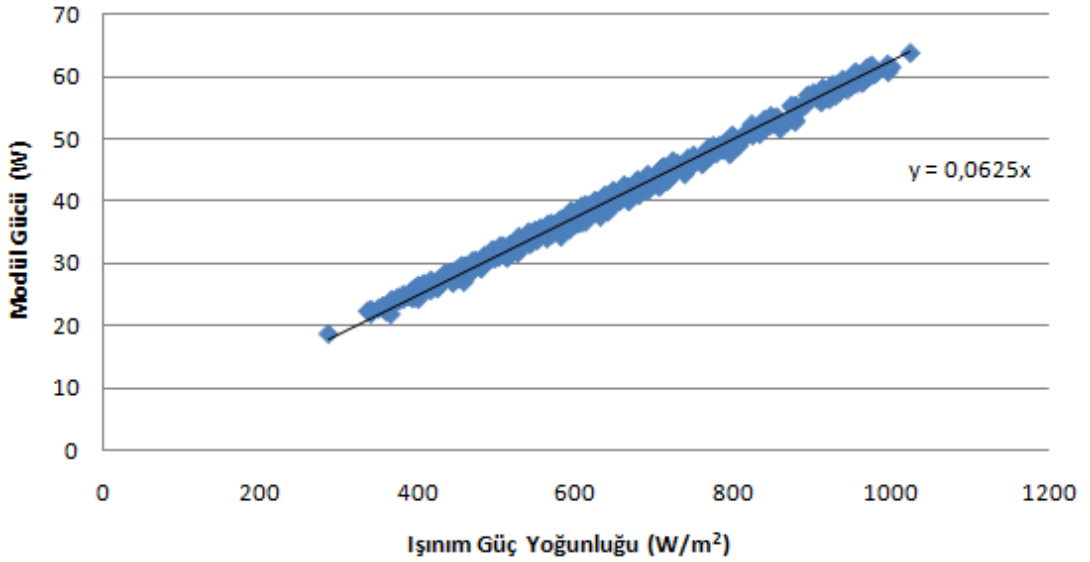
Şekil 4.5 : 15<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.



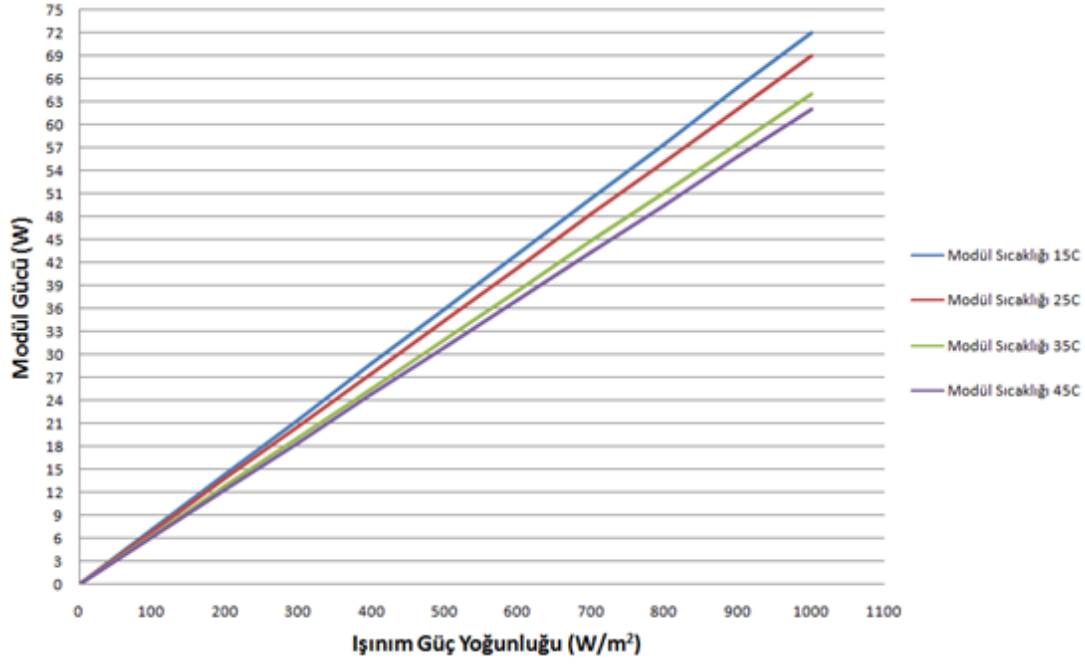
Şekil 4.6 : 25<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.



Şekil 4.7 : 35<sup>0</sup>C (±1<sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınlm güç yoğunluğu değişim grafiği.



Şekil 4.8 : 45<sup>0</sup>C (±1<sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül gücü ile ışınlm güç yoğunluğu değişim grafiği.

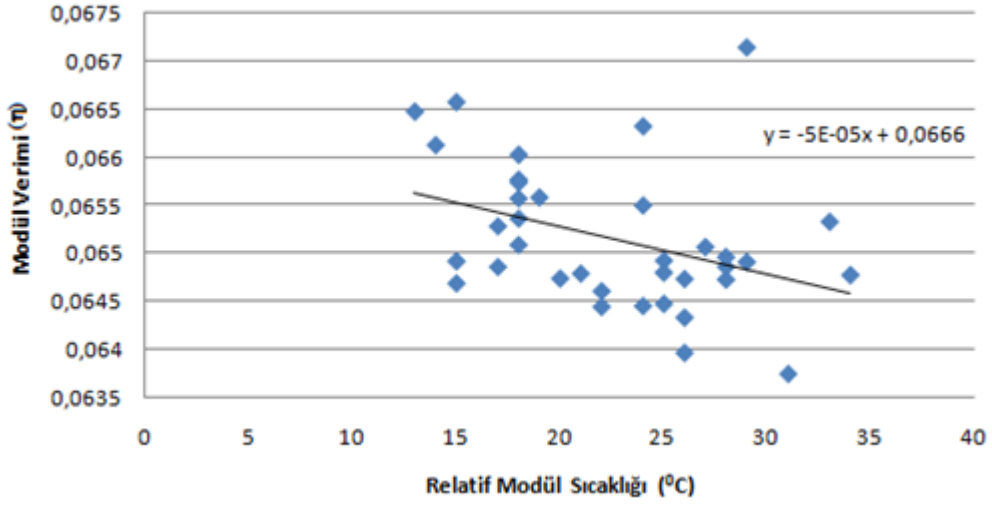


Şekil 4.9 : 15<sup>0</sup>C, 25<sup>0</sup>C, 35<sup>0</sup>C ve 45<sup>0</sup>C ( $\pm 1$  <sup>0</sup>C) farklı modül sıcaklıklarında ışınım güç yoğunluğu ile modül gücü değişim grafikleri.

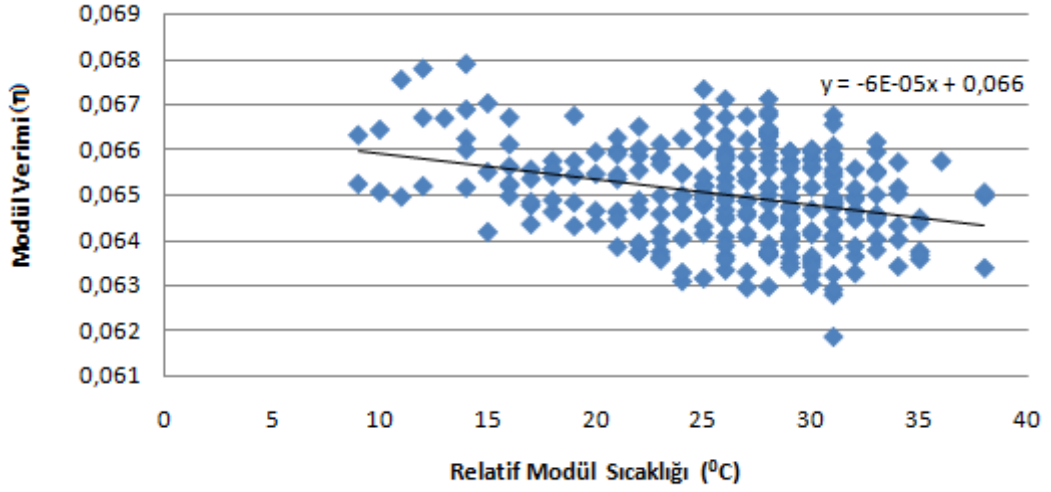
#### 4.1.3 Modül verimi ile relatif modül sıcaklığı arasındaki ilişki

Aşağıdaki grafiklerde farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül veriminin relatif modül sıcaklığıyla değişimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Relatif modül sıcaklığıyla  $T_M - T_0$  olarak ifade edilmektedir.  $T_M$  ile modül sıcaklığı,  $T_0$  ile standard işletim koşul sıcaklığı yani 25<sup>0</sup>C ifade edilmektedir. Işınım güç yoğunluğu değerleri 1000W/m<sup>2</sup>, 800W/m<sup>2</sup>, 600W/m<sup>2</sup> ( $\pm 20$  W/m<sup>2</sup>) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de modül verimi relatif modül sıcaklığı grafikleri Şekil 4.13’te de bu eğrilerin toplu gösterimi yapılmıştır. Farklı ışınım güç yoğunluğu değerleri için modül verimi ile modül sıcaklığı doğrusal bir değişim göstermekte ve artan sıcaklıkla modül verimi azalmaktadır. Şekil 4.13’te görüldüğü üzere verilen bir modül sıcaklığı için ışınım güç yoğunluğu değerindeki artışla modül verimi de artmaktadır.

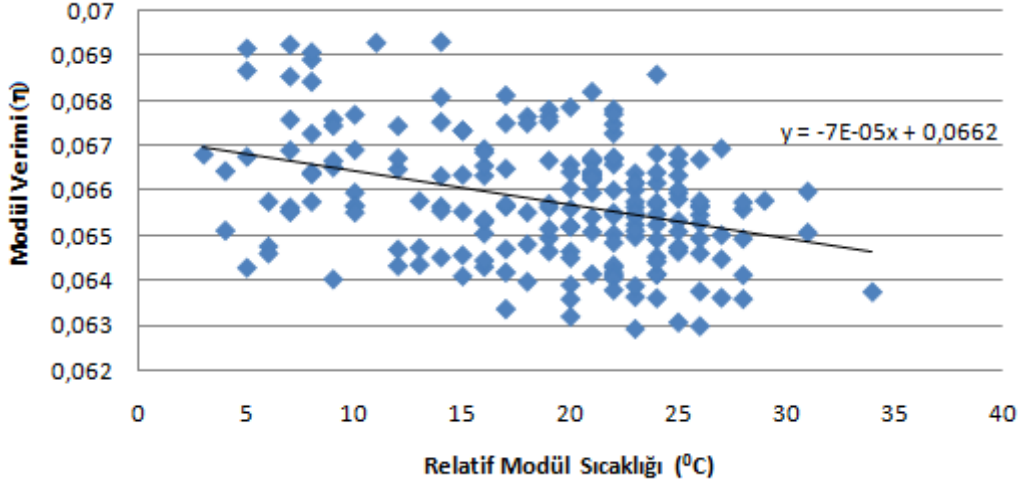




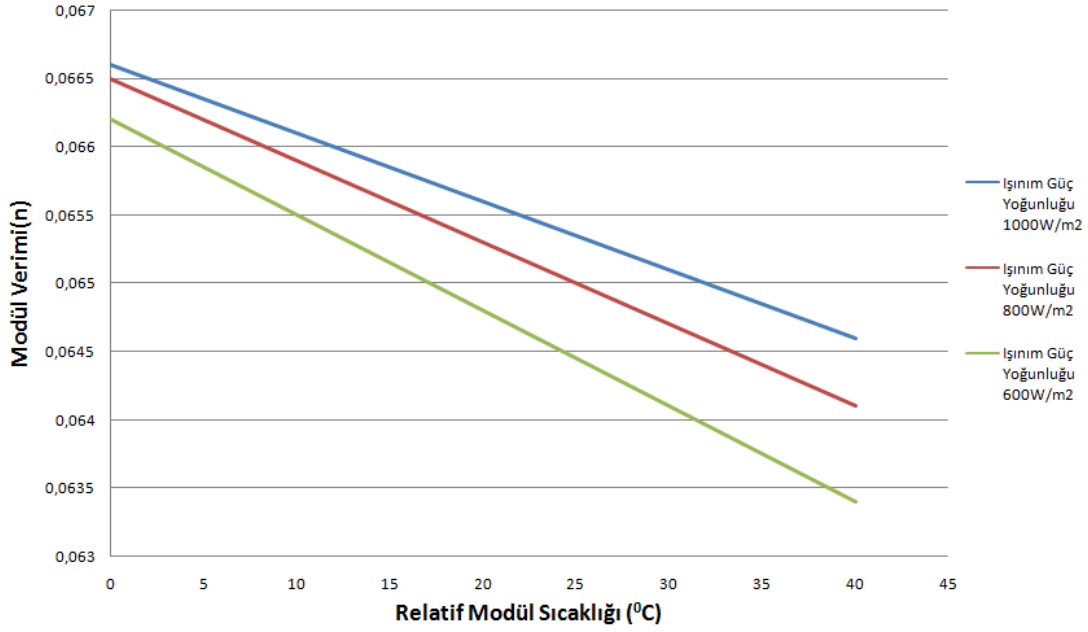
Şekil 4.10 : Işınım güç yoğunluğu 1000 W/m<sup>2</sup> ( $\pm 20$  W/m<sup>2</sup>) iken modül verimi ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.11 : Işınım güç yoğunluğu 800 W/m<sup>2</sup> ( $\pm 20$  W/m<sup>2</sup>) iken modül verimi ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.12 : Işınım güç yoğunluğu  $600 \text{ W/m}^2$  ( $\pm 20 \text{ W/m}^2$ ) iken modül verimi ile relatif modül sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.13 :  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  ve  $600 \text{ W/m}^2$ , ( $\pm 20 \text{ W/m}^2$ ) ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül verimi relatif modül sıcaklığı değişim grafikleri.

Modülün  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım güç yoğunluğunda ve  $25^{\circ}\text{C}$  modül sıcaklığındaki verimi olan  $\eta_{M0}$  ile aynı modülün herhangi bir modül sıcaklığındaki üreteceği modül verimi olan  $\eta_M$  arasındaki ilişki

$$\eta_M = \eta_{M_0} + C'_n \times (T_M - T_0) \quad (4.4)$$

ile ifade edilir. Böylece modül veriminin relatif modül sıcaklığı ile değişimini  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım güç yoğunluğu için temsil eden Şekil 4.10 grafiğine denklem 4,4'ün oturtulması ile sıcaklık verim katsayısı değerleri hesaplanabilir.

Test istasyonunda kurulu olan modüllerin  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışınım güç yoğunluğu için yapılan ölçüm verilerinden çıkarılan modül verimi relatif modül sıcaklığı eğrisinin denklemi:

$$\eta_M = 0,0666 - 0,00005 \times (T_M - T_0) \quad (4.5)$$

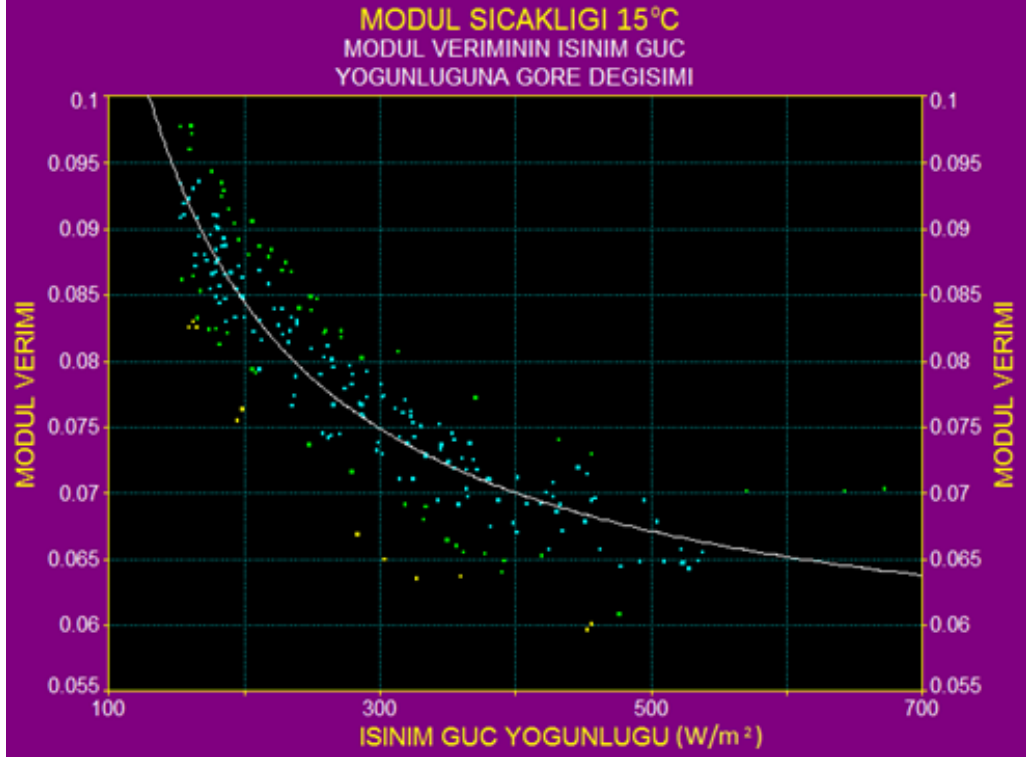
Yukarıda bahsedildiği gibi bu fotovoltaik modülün sıcaklık güç kat sayısı;

$$C'_n = \frac{C'_n}{\eta_{M_0}} = \frac{-0,00005}{0,0666} = -0,0007507 \quad (4.6)$$

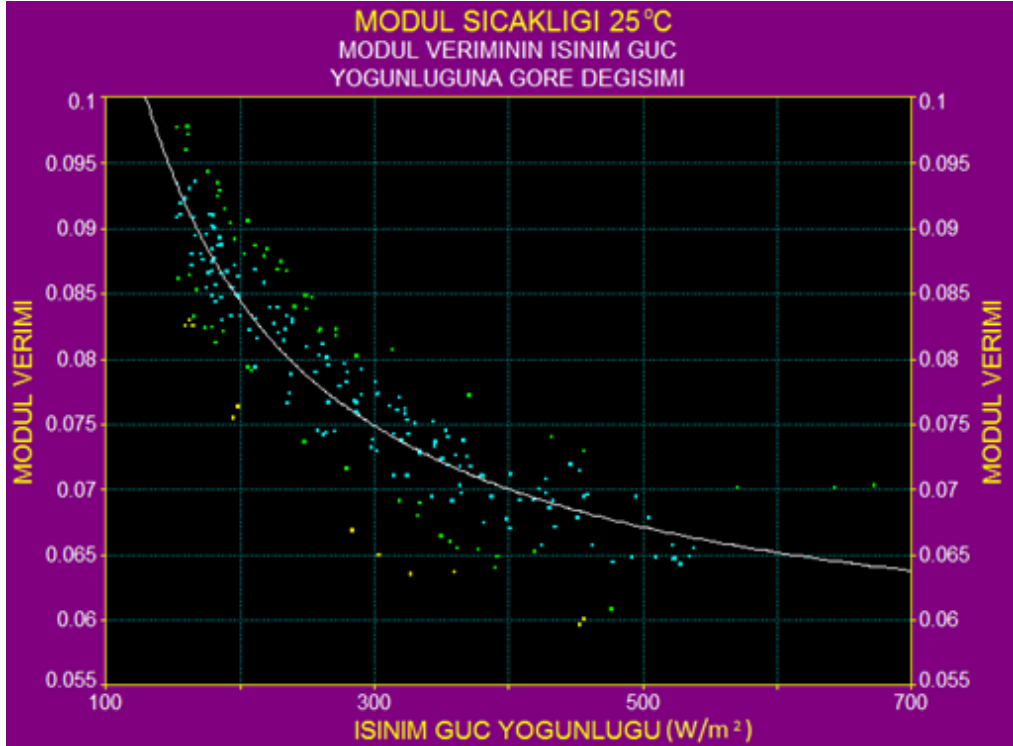
bu da % -0,075'e eşittir.

#### 4.1.4 Modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki

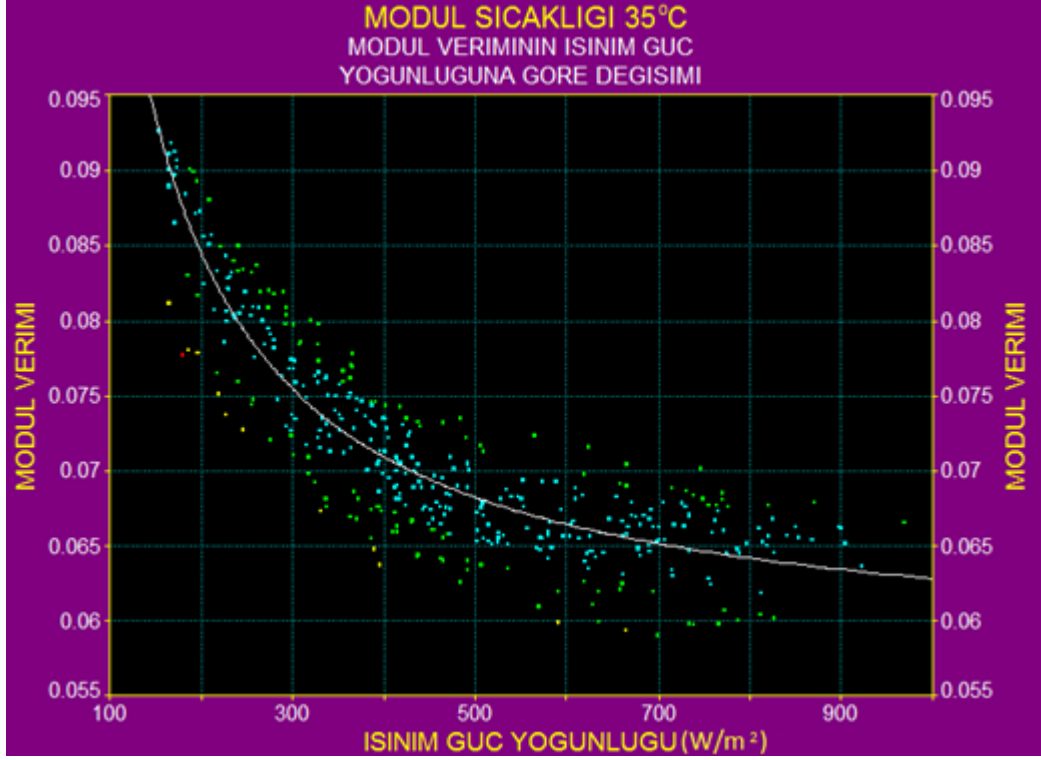
Aşağıdaki grafiklerde farklı modül sıcaklıklarında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki incelenmiştir. Modül sıcaklıkları  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  ve  $45^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.14, şekil 4.15, şekil 4.16 ve şekil 4.17'de farklı modül sıcaklıklarında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu eğrileri şekil 4.18'da da bu eğrilerin toplu gösterimi bulunmaktadır. Işınım güç yoğunluğu değerlerinin artmasıyla sistem veriminde belirli bir oranda azalma olduğu görülmektedir. Modül veriminde ışınım güç yoğunluğu ile olan azalma eğilimi a-si ince film modüller için literatürle uyumludur [4].



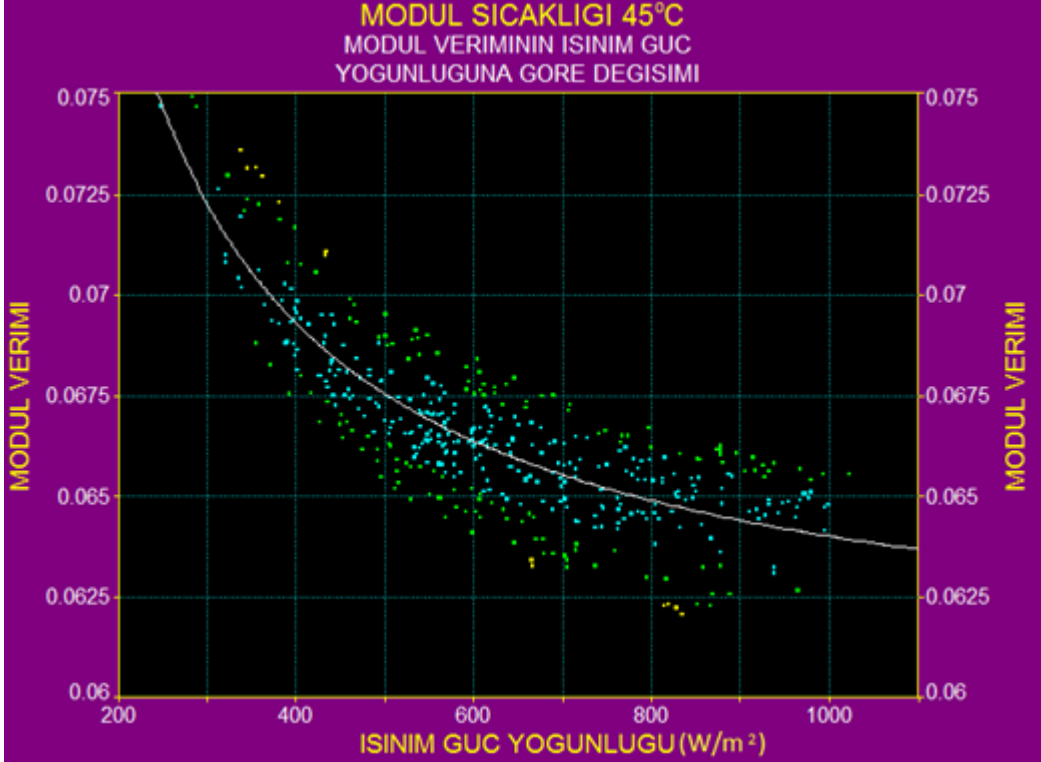
**Şekil 4.14 :** 15<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu grafiği



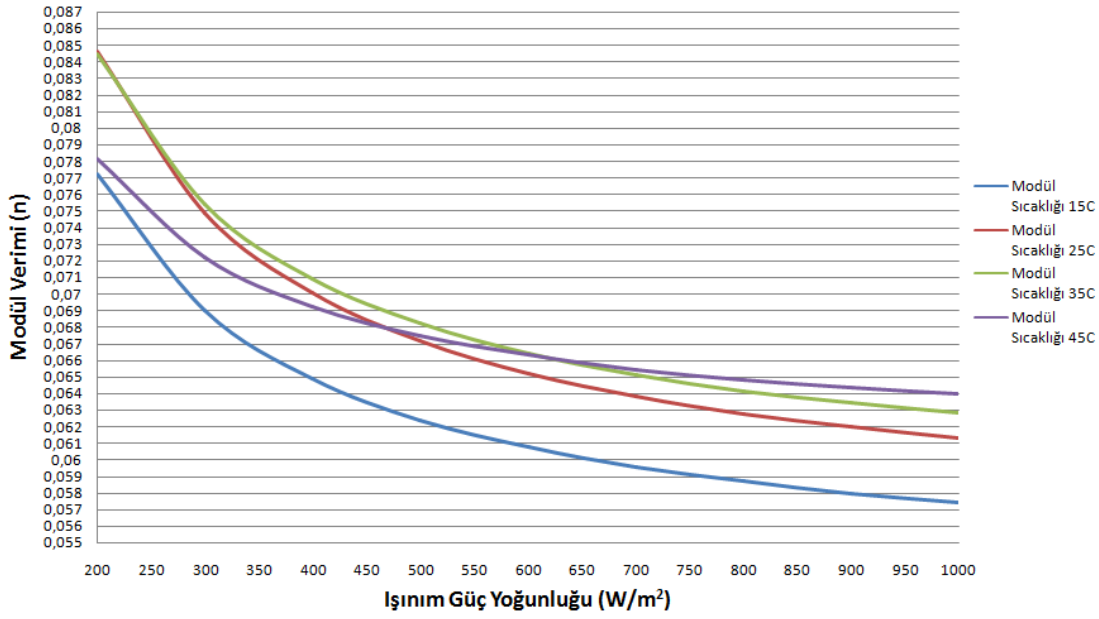
**Şekil 4.15 :** 25<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışınım güç yoğunluğu grafiği.



Şekil 4.16 : 35<sup>0</sup>C (±1<sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışıınım güç yoğunluğu grafiği.



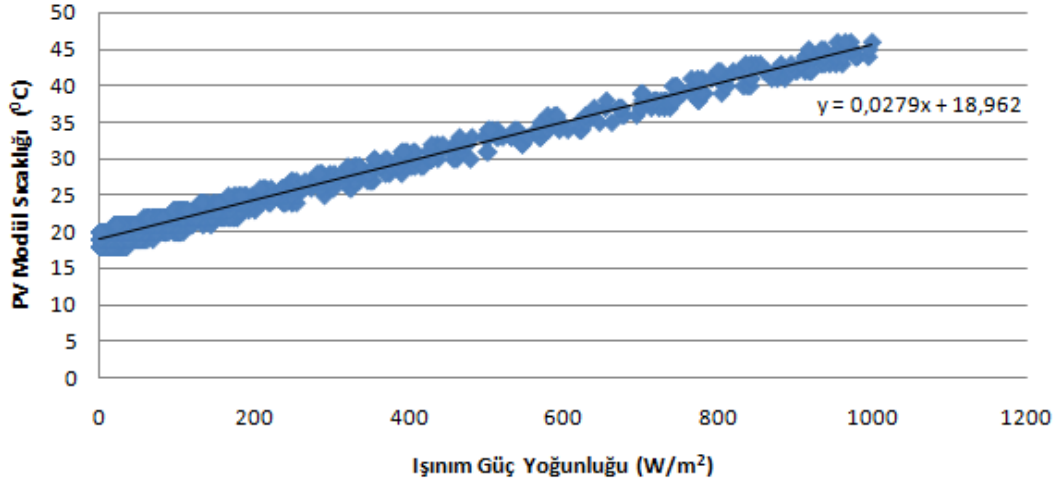
Şekil 4.17 : 45<sup>0</sup>C (±1<sup>0</sup>C) sabit modül sıcaklığında modül verimi ile ışıınım güç yoğunluğu grafiği.



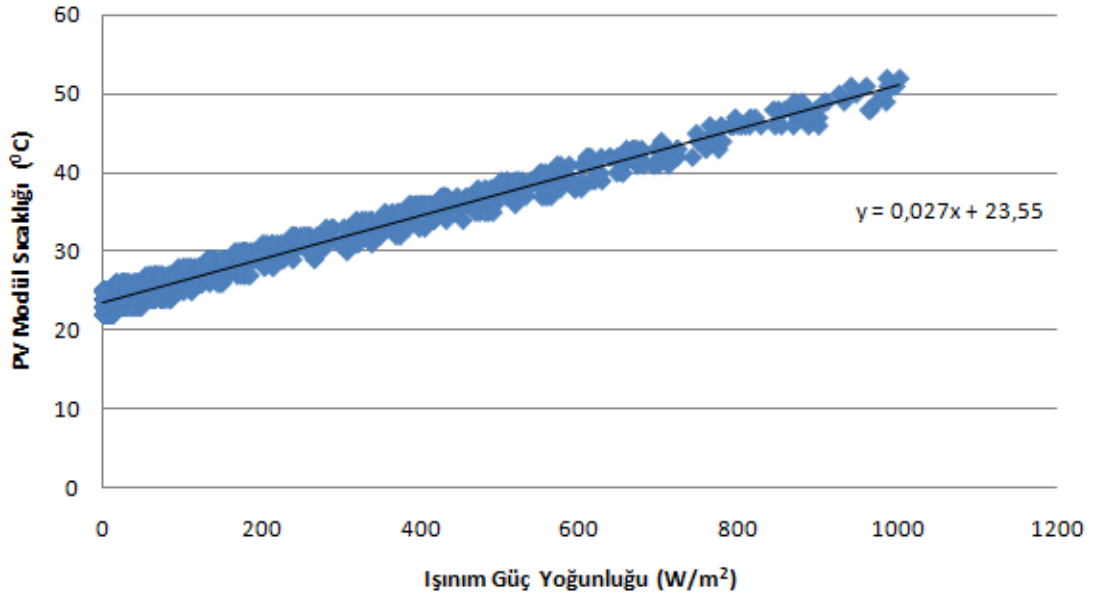
**Şekil 4.18 :** 15<sup>0</sup>C, 25<sup>0</sup>C, 35<sup>0</sup>C ve 45<sup>0</sup>C ( $\pm 1$  °C) modül sıcaklıklarında ışınım güç yoğunluğu ile modül verimi değişim grafikleri.

#### 4.1.5 Modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki

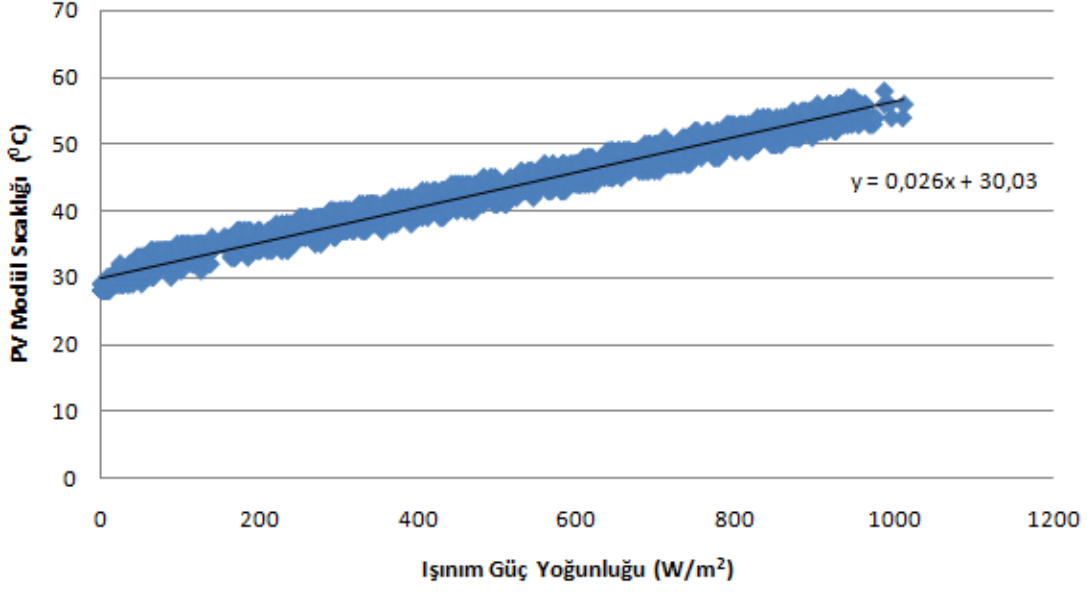
Aşağıdaki grafiklerde farklı hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu arasındaki ilişki incelenmiştir. Hava sıcaklıkları 20<sup>0</sup>C, 25<sup>0</sup>C, 30<sup>0</sup>C ve 35<sup>0</sup>C ( $\pm 1$  °C) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.19, şekil 4.20, şekil 4.21 ve şekil 4.22’de farklı hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu eğrileri ölçülen verilerle birlikte görülmektedir. Şekil 4.23’te de bu eğrilerin toplu gösterimi bulunmaktadır. Farklı hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değerleri lineer bir değişim göstermiştir.



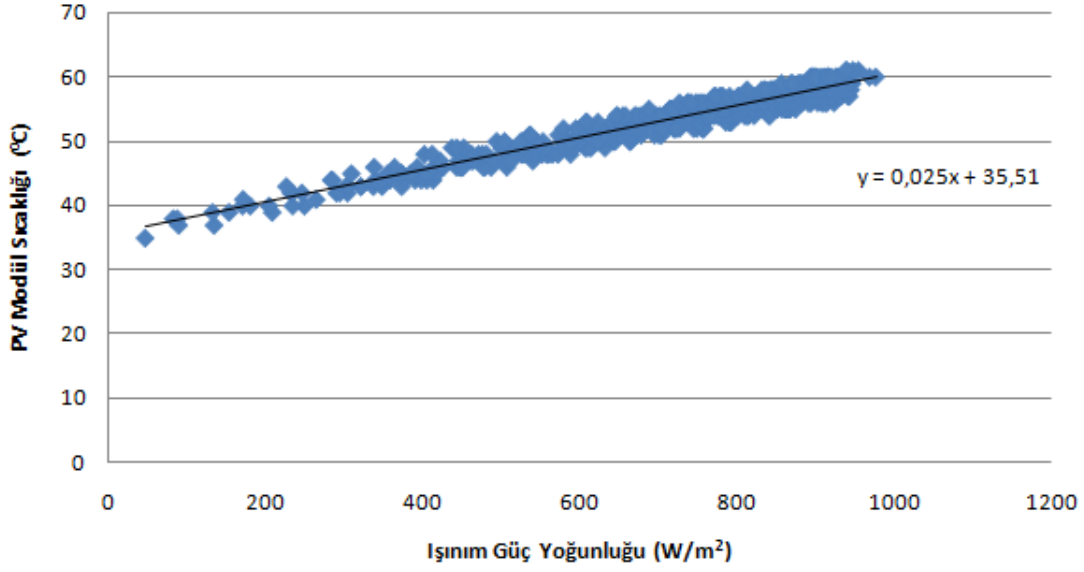
Şekil 4.19 : 20<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.



Şekil 4.20 : 25<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişim grafiği.

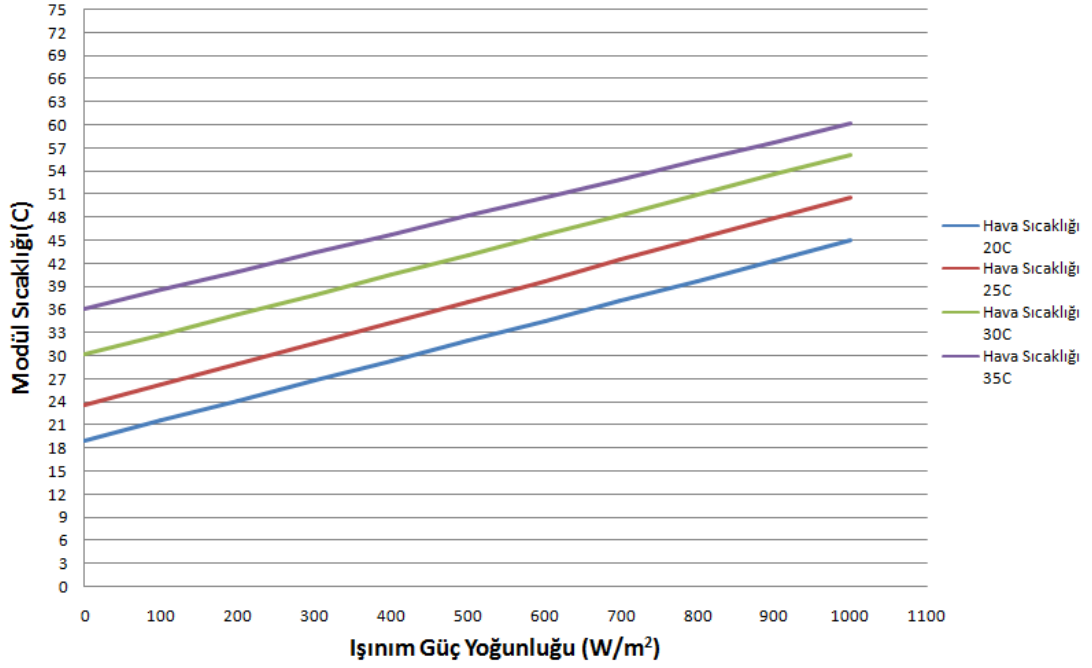


Şekil 4.21 : 30<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınlm güç yoğunluğu değişim grafiği.



Şekil 4.22 : 35<sup>0</sup>C (±1 <sup>0</sup>C) sabit hava sıcaklığında modül sıcaklığı ile ışınlm güç yoğunluğu değişim grafiği.

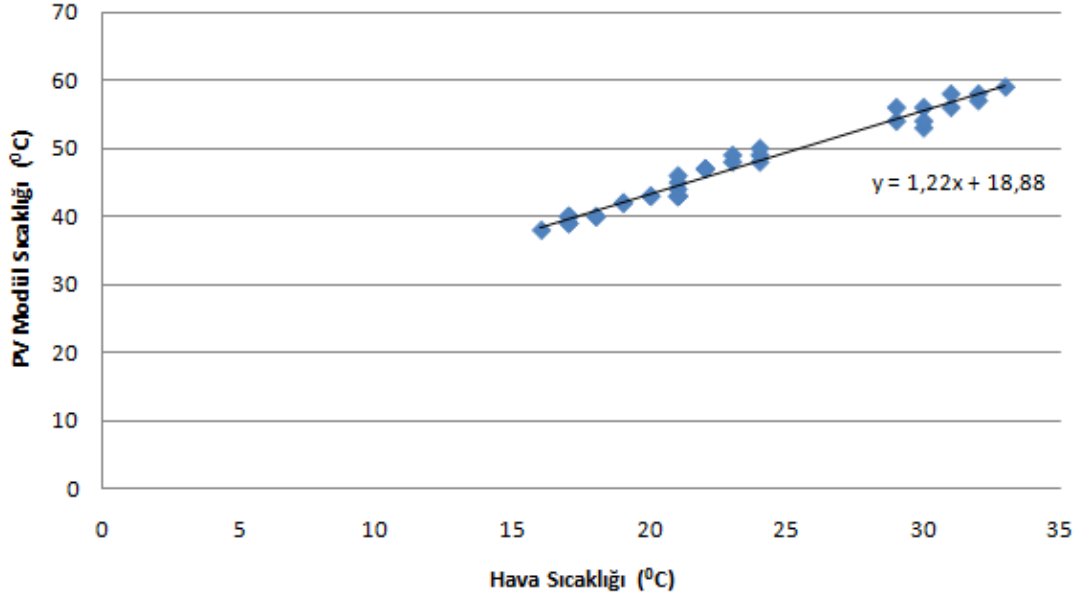




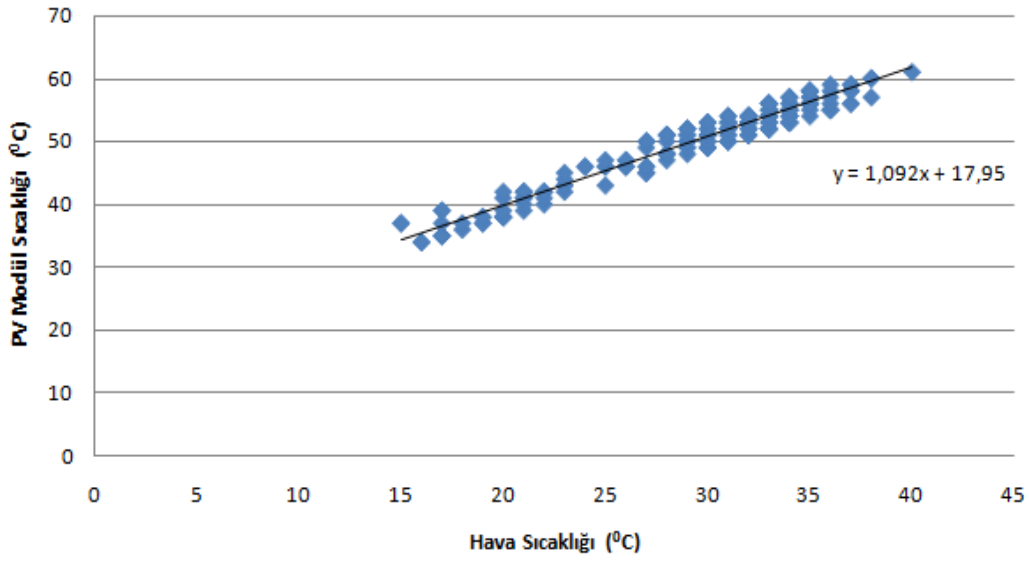
Şekil 4.23 : 20<sup>0</sup>C, 25<sup>0</sup>C, 30<sup>0</sup>C, 35<sup>0</sup>C ( $\pm 1$  °C) hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışınım güç yoğunluğu değişimi grafikleri.

#### 4.1.6 Modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki ilişki

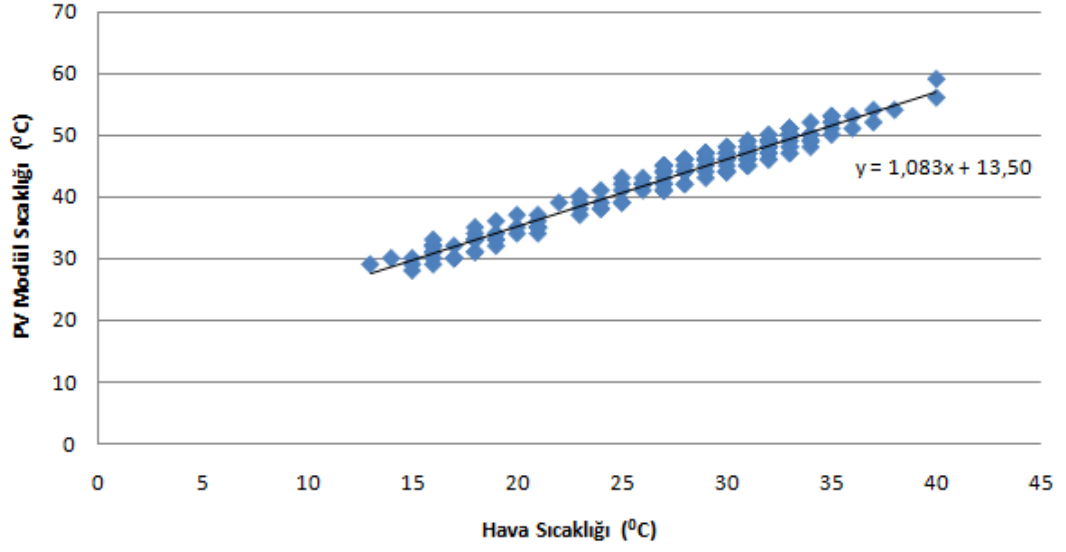
Aşağıdaki grafiklerde farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül sıcaklığı hava sıcaklığıyla değişimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Işınım güç yoğunluğu değerleri 1000W/m<sup>2</sup>, 800W/m<sup>2</sup>, 600W/m<sup>2</sup>, 400W/m<sup>2</sup>, 200W/m<sup>2</sup> ( $\pm 20$  W/m<sup>2</sup>) olarak belirlenmiştir. Şekil 4.24, şekil 4.25, şekil 4.26, şekil 4.27 ve şekil 4.28’de farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde hava sıcaklığı ile modül sıcaklığı eğrileri ölçülen verilerle birlikte görülmektedir. Şekil 4.29’da ise bu eğrilerin toplu gösterimi bulunmaktadır. Denklem 4.11’den de görüleceği üzere, farklı ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül sıcaklığı değerleri ile hava sıcaklığı değerleri lineer bir değişim göstermektedir.



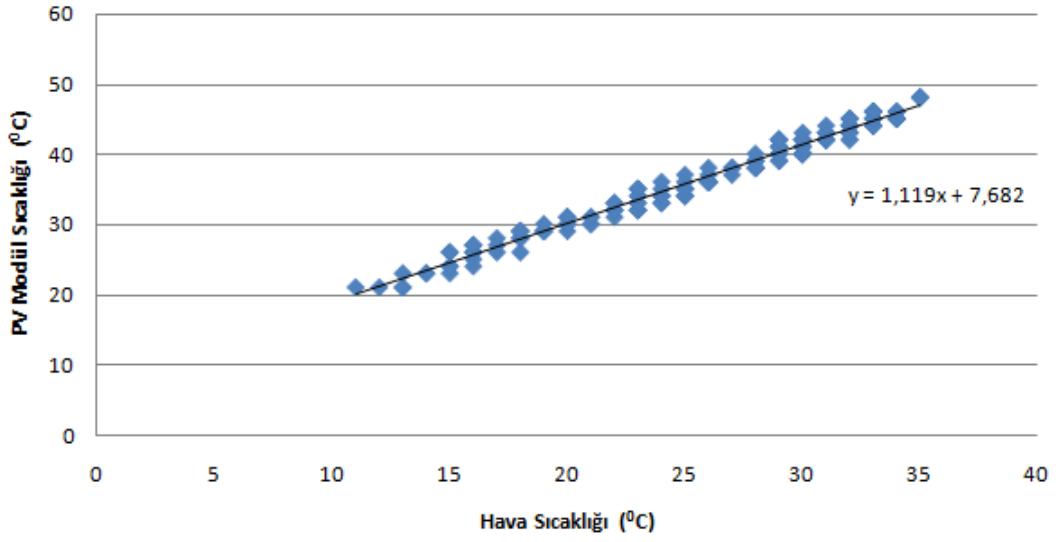
**Şekil 4.24 :**  $1000 \text{ W/m}^2 (\pm 20 \text{ W/m}^2)$  ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.



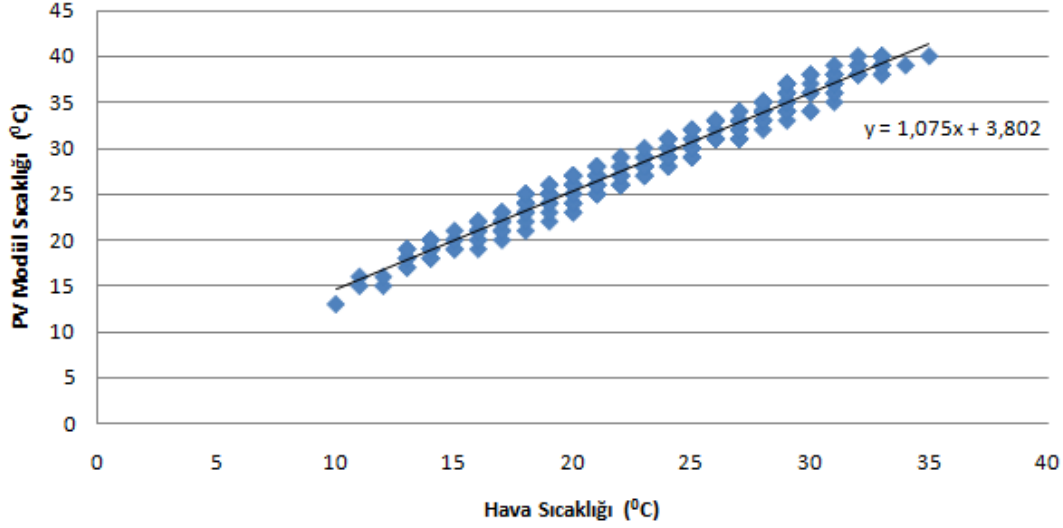
**Şekil 4.25 :**  $800 \text{ W/m}^2 (\pm 20 \text{ W/m}^2)$  ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.



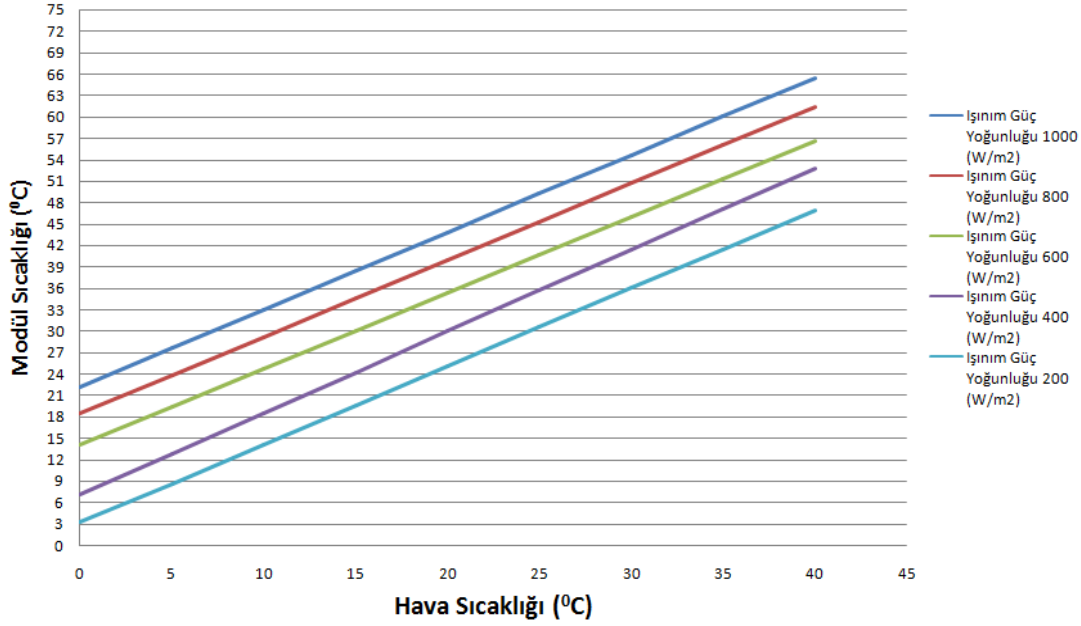
**Şekil 4.26 :**  $600 \text{ W/m}^2 (\pm 20 \text{ W/m}^2)$  ışınlım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.



**Şekil 4.27 :**  $400 \text{ W/m}^2 (\pm 20 \text{ W/m}^2)$  ışınlım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.28 : 200 W/m<sup>2</sup> (±20 W/m<sup>2</sup>) ışınım güç yoğunluğunda modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.



Şekil 4.29 : 1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup> ve 200 W/m<sup>2</sup> (±20W/m<sup>2</sup>) ışınım güç yoğunluğu değerlerinde modül sıcaklığı ile hava sıcaklığı değişim grafiği.

## 4.2 Havanın Taşınım Katsayısının Hesaplanması

Isı geçişi; iletim, taşınım ve ışıma ile gerçekleşir. Panelden havaya olan ısı geçişinde baskın mekanizma taşınımdır. Dolayısıyla verilen bir ışınım güç yoğunluğu ve hava sıcaklığı koşullarında modül sıcaklığını belirleyen havanın taşınım katsayısıdır. Taşınım katsayısı ise modülün eğimine, hava ve modül sıcaklığının kendisine ve taşınımın rejimine (doğal ya da zorlanmış) eğer rüzgar varsa havanın akış hızına da

bağlıdır. Bununla birlikte uzun süreli ölçümlerin sonucunda bir ortalama değer elde etmek de mümkündür. Havanın taşınım katsayısı  $h$  ile gösterilir. Havanın doğal taşınım katsayısı  $5 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  mertebeleri arasında değişim göstermektedir.

Havanın taşınım katsayısının ortalama değeri, farklı hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışıınım güç yoğunluğu arasındaki ilişkiyi veren grafikten bulunabilir.

Havanın ortalama taşınım katsayısının hesabı aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır:

$$J_s A - P_M = 2Ah \times (T_M - T_h) \quad (4.7)$$

$$J_s A - J_s A \eta_M = 2Ah \times (T_M - T_h) \quad (4.8)$$

$$J_s A \times (1 - \eta_M) = 2Ah \times (T_M - T_h) \quad (4.9)$$

$$h = \frac{(1 - \eta_M) \times J_s}{2 \times (T_M - T_h)} \quad (4.10)$$

Burada  $P_M$  ile modül gücü,  $J_s$  ile ışıınım güç yoğunluğu,  $A$  ile toplam modül yüzey alanı,  $T_M$  ile modül sıcaklığı,  $T_H$  ile hava sıcaklığı,  $\eta_M$  ile modül verimi,  $h$  ile havanın taşınım katsayısı ifade edilmiştir. Farklı hava sıcaklıklarında modül sıcaklığı ile ışıınım güç yoğunluğunun ilişkisini veren grafiklerden havanın ortalama taşınım katsayısını bulmak için modül sıcaklığı aşağıdaki şekilde ifade edilerek verilere oturtulur.

$$T_M = \frac{(1 - \eta_M)}{2 \times h} \times J_s + T_h \quad (4.11)$$

Böylece havanın taşınım katsayısı hesaplanabilir. Denklem 4.5’de modül verimi panelin teknik veri tablosundaki verim değeri olan % 6.3 alınmıştır.

Aşağıda  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  sabit dış hava sıcaklıklarındaki Modül Sıcaklığı ile Işıınım Güç Yoğunluğu grafiklerinin denklemleri aşağıda belirtilmiştir:

$20^\circ\text{C}$  Sabit Hava Sıcaklığında Modül Sıcaklığı ile Işıınım Güç Yoğunluğu İlişkisi

$$T_M = 0,0279J_s + 18,96$$

$$0,0279 = \frac{(1 - 0,063)}{2 \times h} \rightarrow h = 16,79 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.12)$$

25<sup>0</sup>C Sabit Hava Sıcaklığında Modül Sıcaklığı ile Işınım Güç Yoğunluğu İlişkisi

$$T_M = 0,0276J_S + 23,56$$

$$0,0276 = \frac{(1-0,063)}{2 \times h} \rightarrow h = 16,97 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.13)$$

30<sup>0</sup>C Sabit Hava Sıcaklığında Modül Sıcaklığı ile Işınım Güç Yoğunluğu İlişkisi

$$T_M = 0,0262 J_S + 30,03$$

$$0,0262 = \frac{(1-0,063)}{2 \times h} \rightarrow h = 17,88 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.14)$$

35<sup>0</sup>C Sabit Hava Sıcaklığında Modül Sıcaklığı ile Işınım Güç Yoğunluğu İlişkisi

$$T_M = 0,025 J_S + 35,51$$

$$0,025 = \frac{(1-0,063)}{2 \times h} \rightarrow h = 18,74 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.15)$$

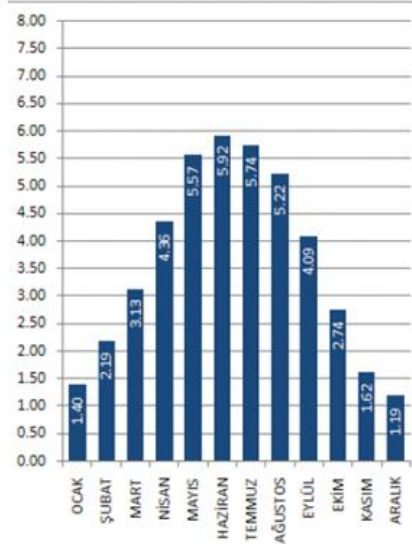
Yukarıdaki verilerden çıkan sonuçların da gösterdiği üzere havanın sıcaklığı arttıkça konveksiyonla havanın taşınım katsayısı da artış göstermektedir. Bu sonuçlardan hareketle modülün 30 ° eğimle yerleştirildiği durum için havanın ortalama taşınım katsayısını 17,60 W/m<sup>2</sup>K olarak vermek mümkündür. Bu değer literatürde verilen 15-25 W/m<sup>2</sup>K değeri ile de uyum içersindedir [6].

### 4.3 KANEKA K-60 Güneş Pillerinin Üretim Değerleri

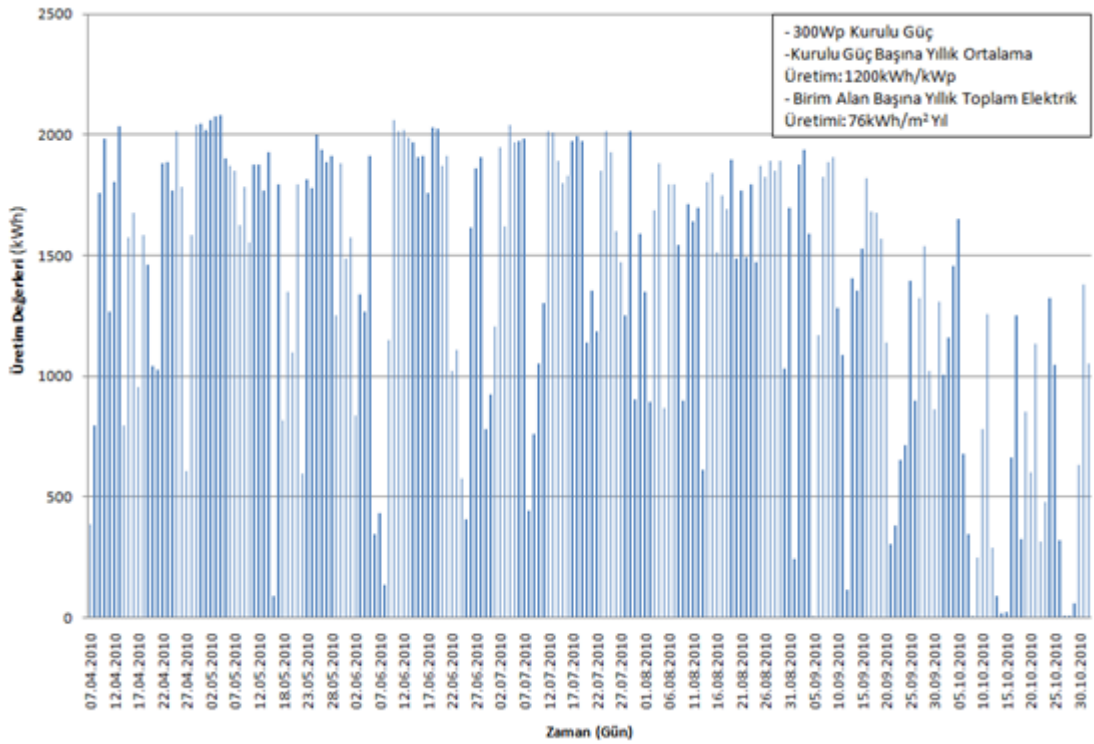
Kaneka K-60, 60Wp'lik 5 adet seri bağlı toplam 300Wp, a-si ince film güneş pillerinden oluşan sistemin, veri toplama sürecince günlük üretim değerleri, aylık üretim değerleri ve aylık baz da ki sürekli güç bileşenleri belirlenmiştir. Bu üretim değerlerinden elde edilen sonuçlara göre kurulu güç başına yıllık ortalama üretim değerleri 1200kWh/kWp ve birim alan başına yıllık toplam elektrik üretimi 76 kWh/m<sup>2</sup>yıl olarak hesaplanmıştır. 7 aylık toplam enerji üretimi yaklaşık 280kWh olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.30'da GEPA'dan alınmış olan İstanbul ili aylara göre günlük ortalama ışınım değerleri gösterilmiştir. GEPA'dan ölçüm yapılan zaman aralığını tüm bir yıl İstanbul koşuluna göre oranladığımızda sistemden üretilebilecek yıllık ortalama enerji üretimi 360kWh olarak kabul edebiliriz. Buradan kurulu güç başına ortalama yıllık üretim  $360 / 300 = 1,200\text{kWh/kWp}$ 'tir. Herbir modülün alanı 0,9504m<sup>2</sup>'dir.

Böylece birim alan başına yıllık toplam elektrik üretimi de  $360 / (5 * 0,9504) = 76$  kWh/m<sup>2</sup>yıl'dır. Şekil 4,31 ve şekil 4,32'de sırasıyla veri toplanan zaman aralığında günlük ve aylık enerji üretimi değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.31 ve 4.32'de görüleceği üzere fotovoltaik sistemin toplam enerji üretiminde yaz aylarında beklenen şekilde artış olduğu gözlemlenmiştir.

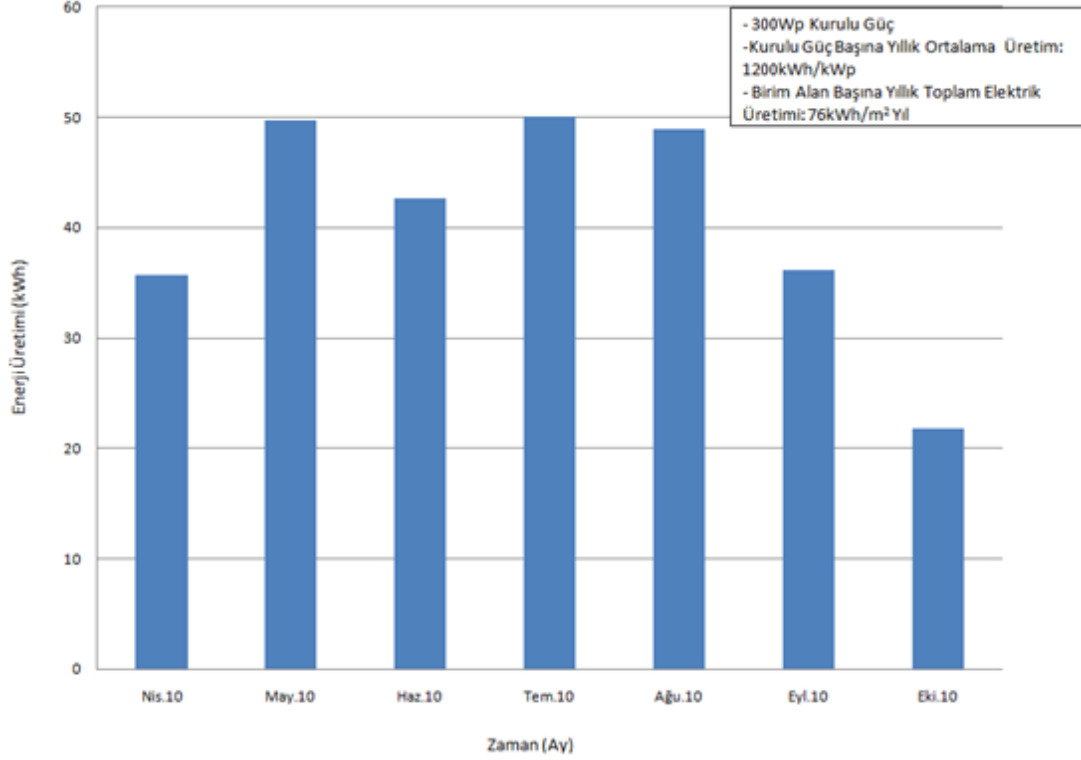
İSTANBUL İLİ TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ DEĞERLERİ (KWh/m<sup>2</sup>-GÜN)



Şekil 4.30 : İstanbul ili toplam güneş enerjisi değerleri



Şekil 4.31 : 7 Nisan 31 Ekim 2010 tarihleri arasında 300Wp kurulu güce sahip sistemin günlük enerji üretim değerleri



**Şekil 4.32 :** 7 Nisan 31 Ekim 2010 tarihleri arasında 300Wp kurulu güce sahip sistemin aylık enerji üretim değerleri

Sistemin sürekli güç bileşeninin 24 saate oranı, sistemin toplam kurulu güçten günlük ne kadar enerji üretebileceğini veren bir çarpım katsayısıdır. Kurulu güç başına günlük enerji üretimi; günlük enerji üretiminin toplam kurulu güce oranıdır. Kurulu güç başına günlük enerji üretimi değerinin, 24'e bölünmesiyle sistemin sürekli güç bileşeni hesaplanmıştır.

Nisan ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 35,739kWh

$$\text{Kurulu Güç, Günlük Enerji Üretimi: } \frac{35,74}{30 \times 0,3} = 3,971 \text{ kWh/kWp} \quad (4.16)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{3,971} = 6,044 \quad (4.17)$$

$$\text{Nisan ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{6,044} \times 300 = 1,191 \text{ kWh/g} \quad (4.18)$$

Mayıs ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 49,749kWh



$$\text{Kurulu Güç Günlük Enerji Üretimi: } \frac{49,75}{30 \times 0,3} = 5,527 \text{ kWh/kWp} \quad (4.19)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{5,527} = 4,342 \quad (4.20)$$

$$\text{Mayıs ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{4,342} \times 300 = 1,658 \text{ kWh/g} \quad (4.21)$$

Haziran ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 42,661kWh

$$\text{Kurulu Güç Günlük Enerji Üretimi: } \frac{42,66}{30 \times 0,3} = 4,740 \text{ kWh/kWp} \quad (4.22)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{4,740} = 5,063 \quad (4.23)$$

$$\text{Haziran ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{5,063} \times 300 = 1,422 \text{ kWh/g} \quad (4.24)$$

Temmuz ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 50,080kWh

$$\text{Kurulu Güç Günlük Enerji Üretimi: } \frac{50,08}{30 \times 0,3} = 5,564 \text{ kWh/kWp} \quad (4.25)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{5,564} = 4,313 \quad (4.26)$$

$$\text{Temmuz ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{4,313} \times 300 = 1,669 \text{ kWh/g} \quad (4.27)$$

Ağustos ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 48,929kWh

$$\text{Kurulu Güç Günlük Enerji Üretimi: } \frac{48,93}{30 \times 0,3} = 5,436 \text{ kWh/kWp} \quad (4.28)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{5,527} = 4,415 \quad (4.29)$$

$$\text{Ağustos ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{4,415} \times 300 = 1,631 \text{ kWh/g} \quad (4.30)$$

Eylül ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 36,194 kWh

$$\text{Kurulu Güç Günlük Enerji Üretimi: } \frac{36,19}{30 \times 0,3} = 4,021 \text{ kWh/kWp} \quad (4.31)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{4,021} = 5,967 \quad (4.32)$$

$$\text{Eylül ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{5,967} \times 300 = 1,206 \text{ kWh/g} \quad (4.33)$$

Ekim ayı için sürekli güç bileşen hesabı:

Evirici ara yüzünden okunan nisan ayı aylık enerji üretim değeri: 21,749 kWh

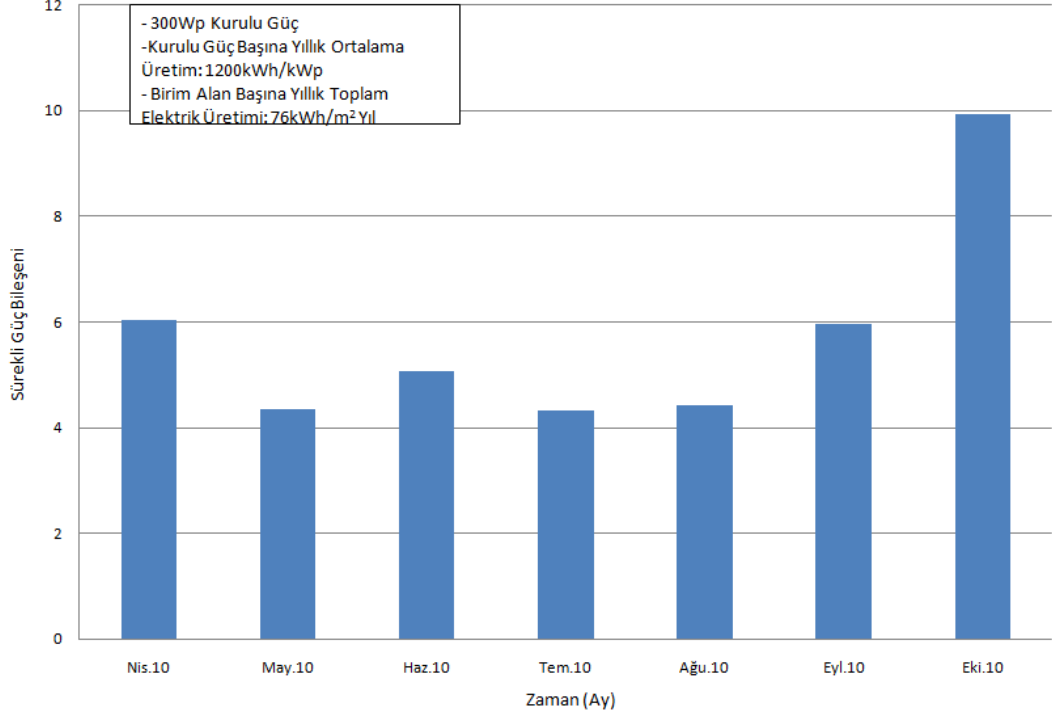
$$\text{Kurulu Güç Günlük Enerji Üretimi: } \frac{21,75}{30 \times 0,3} = 2,416 \text{ kWh/kWp} \quad (4.34)$$

$$\text{Sürekli Güç Bileşeni: } \frac{24}{2,416} = 9,931 \quad (4.35)$$

$$\text{Ekim ayı günlük enerji üretimi: } \frac{24}{9,931} \times 300 = 0,725 \text{ kWh/g} \quad (4.36)$$

göstermektedir.

Şekil 4.33'te aylık bazda İstanbul koşulları için sürekli eşdeğer güç katsayısı değerlerinin sütun grafikte gösterimi vardır. Şekil 4.33'te görüleceği üzere ışınlam güç yoğunluğunun yüksek olduğu yaz aylarında ay bazında sürekli eşdeğer güç katsayısında bir azalma olmuştur.



**Şekil 4.33 :** 7 Nisan 31 Ekim 2010 tarihleri arasında 300Wp kurulu güce sahip sistemin ay bazında sürekli güç bileşeni değerleri.

#### 4.4 KANEKA K-60 Fotovoltaik Modülün Standard İşletim Koşullarındaki Ölçülen Teknik Parametreler

Çizelge 4.1’ de fotovoltaik modül test platformunda kurulu olan ve işletimdeki KanekaK-60 modeli modüllerin performans değerleri ve test sürecindeki havanın iletim katsayısı değerleri gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Standard işletim koşulunda fotovoltaik modüllerin performans verileri.

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| $C_{\eta}$ : | % -0,0751 / °C           |
| $C_p$ :      | % -0,136 / °C            |
| $P_M$ :      | 63,154 W                 |
| $\eta_M$ :   | 0,0666                   |
| $h$ :        | 17,60 W/m <sup>2</sup> K |



## 5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI

Fotovoltaik modüller için bir gerçek saha performans ölçüm platformu projesinde Fronius markasının ürünlerinden oluşan bir sistem kurulmuştur. Deney düzeneğinin İTÜ Enerji Enstitüsü çatısına kurulmasını takiben 7 Nisan itibariyle veri toplanmaya başlanmış ve 7 Kasım'a kadar toplanan 7 aylık veri üzerinden elde edilen değerlere göre kurulu sistemin performansları değerlendirilmiştir. Yapılan test sonucu olarak sıcaklığın ve ışınım güç yoğunluğunun panel gücü ve verimi üzerindeki etkileri incelenmiş, ayrıca farklı hava sıcaklıklarında panel sıcaklığının ışınım güç yoğunluğu ile ilişkisini veren katsayısı da belirlenmiştir. Son olarakta bu 7 aylık süreçte toplam üretim değerleri aylık ve günlük bazda grafiksel olarak olarak değerlendirilmiştir.

Sistemin performansının belirlendiği sıcaklık ve ışınım güç yoğunluğu verileri, panelin yanına takılmış olan Fronius eviricinin modül sıcaklık, hava sıcaklık ve ışınım güç yoğunluğu sensörlerinden gelen verilere göre değerlendirilmiştir.

Bu elde edilen verilere göre farklı sıcaklık koşullarında ve ışınım güç yoğunluğu değerlerinde sistem üzerinde olan panellerin verimleri, sıcaklığa bağlı güç katsayısı ile havanın taşınım katsayısı değerleri hesaplanarak panellerin performans değerleri grafik ve tablo olarak sunulmuştur.

Ülkemizde üretilen veya ülkemize ithal edilen ürünlerin bazılarında etiket değerleriyle gerçek sahadaki performans değerleri arasında önemli farklılıklar görülebilmektedir. Kurulu sistemle, bu oluşan farklılıklar basit bir test platformuyla ortaya konulabilecektir. Bu da ülke kaynaklarının kötü kullanımına, ithal eden sanayi ya da ticari kuruluşun ekonomik zarar görmesine ve güven kaybına, bunlarla birlikte kullanıcının ekonomik ve teknik zarar görmesi ayrıca teknolojiye olan güven kaybına yol açması da önlenecektir.

Kurulu test platformundan toplanan verilerle GEPA'nın sağladığı verilerin yanında, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nün de elinde İstanbul koşulları için uzun süreli ışınlam güç yoğunluğu ve sıcaklık verileri oluşturulmuş olacaktır. Bu elde edilen veriler gerek bilimsel araştırmalar için gerekse İstanbul için yapılacak projeksiyonlar da kullanılmak üzere yararlı faydalar sağlayacaktır.

İleride test düzeneğinin geliştirilmesi açısından ışınlam güç yoğunluğu değerlerinin daha kesin ve doğru alınması amacıyla sisteme bir adet yüksek çözünürlük ve doğruluğa sahip pironometrenin konumlanması, toplanan verilerin ve buna bağlı hesaplamaların doğruluğunu arttıracaktır. Ayrıca çok kanallı bir sıcaklık ölçerinde sisteme entegre edilmesiyle, modül yüzey sıcaklıklarının ve hava sıcaklıklarının tek bir sensörden gelen verilerin yerine farklı bölgelerden ölçülüp bu değerlerin ortalaması alınarak çıkacak değerlerin kullanılmasıyla daha doğru ve güvenilir bir değerlendirme yapılabilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Jung Hun So, Young Seok Jung, Gwon Jong Yu, Ju Yeop Choi and Jae Ho Choi.** 2007: Performance results and analysis of 3kW grid-connected PV systems. *Renewable Energy* **32**, 1858 – 1872.
- [2] **A.J. Carr, T.L. Pryor.** 2004: A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates. *Solar Energy*, **76**, 285 – 294.
- [3] **Takashi Minemoto, Shunichi Fukushige, Hideyuki Takakura.** 2009: Difference in the outdoor performance of bulk and thin-film silicon-based photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **93**, 1062 – 1065.
- [4] **E.E. Van Dyk, E.L. Meyer, F.J. Vorster, A.W.R. Leitch.** 2001: Long-term monitoring of photovoltaic devices. *Renewable Energy* **25**, 183 – 197.
- [5] **Shunichi Fukushige, Kyoko Ichida, Takashi Minemoto, Hideyuki Takakura.** 2009: Analysis of the temperature history of amorphous silicon photovoltaic module outdoors. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **93**, 926 – 931.
- [6] **James P. Dunlop.** 2010: *Photovoltaic Systems Second Edition*. American Technical Publishers INC. Illinois USA.
- [7] **Paul A. Lynn.** 2010: *Electricity from Sunlight An Introduction to Photovoltaics*. John Wiley & Sons, Ltd. London United Kingdom.
- [8] **Mark Hankins.** 2010: *Stand-Alone Solar Electric Systems The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. Earthscan Ltd. London United Kingdom.
- [9] **Tomas Markvart.** 2000: *Solar Electricity Second Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. San Francisco USA.
- [10] **P. Jayarama Reddy.** 2010: *Science & Technology of Photovoltaics Second Edition*. BS Publications. India.
- [11] **Falk Antony, Christian Dürschner, Karl-Heinz Remmers.** 2007: *Photovoltaics for Professionals*. Solarpraxis AG. Berlin Germany.
- [12] **Burak Barutçu.** 2009: *Photovoltaic Power Systems Ders Notları-1*. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Türkiye.
- [13] **Elektrik İdaresi Genel Müdürlüğü.** 2008: *Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası*. Ankara, Türkiye.

- [14] **Burak Barutçu.** 2009: *Photovoltaic Power Systems Ders Notları-2.* İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Türkiye.
- [15] <<http://www.physorg.com/news193557233.html>>, 19.10.2010.
- [16] **Altuğ Şişman.** 2009: *Güneş Pili Sistemlerinin, Tasarımı, Boyutlandırma ve Maliyet Hesaplamaları. Kurs-notu,* Foto Elektron & İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [17] <<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter05/chapter05.html# 5.4.1Flat-plate Collectors, The Curve>> , 01.11.2010.
- [18] <<http://www.pvresources.com/en/inverter.php>>, 06.11.2010.
- [19] <[http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-5C590A23-C2385C88/fronius\\_international/hs.xsl/83\\_362\\_ENG\\_HTML.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-5C590A23-C2385C88/fronius_international/hs.xsl/83_362_ENG_HTML.htm)>, 07.11.2010.
- [20] <<http://www.pv.kaneka.co.jp/products/index.html>>, 07.11.2010.
- [21] <[http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-5C590A23-C2385C88/fronius\\_international/hs.xsl/83\\_16139\\_ENG\\_HTML.htm#Einstrahlung](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-5C590A23-C2385C88/fronius_international/hs.xsl/83_16139_ENG_HTML.htm#Einstrahlung)>, 08.11.2010.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Kerem TURHAN

**Doğum Yeri ve Tarihi:** 08.10.1985

**Adres:** Adnan Saygun Cad. Aydınlık Sokak Tekfen Sitesi  
Birlik Apt. B Blok No: 19 Ulus Beşiktaş / İSTANBUL

**Lisans Üniversitesi:** 2008 – Koç Üniversitesi  
Kimya – Biyoloji Mühendisliği Bölümü  
2003 Şişli Terakki Lisesi

21 Aralık 2009 tarihinden itibaren ERICOM TELEKOMÜNİKASYON ve ENERJİ TEKNOLOJİLERİ A.Ş. firmasında Ar-Ge mühendisi olarak çalışmakta olup LiFePO<sub>4</sub>, COOLBATT ve VRB ile ilgili Ar-Ge projelerinde karakterizasyon ve performans ölçümleri ile ilgili çalışmalarda bulunmuştur.