

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) ENERJİ SİSTEMLERİNİN**  
**ANALİZİ**

**HALİL ONUR EZCAN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2019**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) ENERJİ**  
**SİSTEMLERİNİN ANALİZİ**

**HALİL ONUR EZCAN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİH ÖZEN ÜNVERDİ**

**GEBZE**

**2019**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC  
THERMAL (PV/T) ENERGY SYSTEMS**

**HALİL ONUR EZCAN**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF**  
**MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**ASSIST. PROF.DR. SALİH ÖZEN ÜNVERDİ**

**GEBZE**  
**2019**



## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 26/06/2019 tarih ve 2019/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18/07/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Halil Onur Ezcan'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ

ÜYE

: Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Prof. Dr. M. SABRİ GÖK

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

### İMZA/MÜHÜR

Prof. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU  
Gebze Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

Bu çalışma ile Fotovoltaik Termal Enerji Sistemlerinin termodinamik performans analizinin yapılması, İstanbul ilinde konutsal uygulamalar için PV/T sistemler kullanılması sonucunda ekonomiye getirmesi öngörülen katma değerin hesaplanması amaçlanmaktadır.

Enerji; ekonomik ve sosyal gelişme için gereklidir. Enerji kıtlığı, ekonomik büyümenin önündeki en büyük engeldir. Aynı zamanda da bir ülke için yenilenebilir enerji demek temiz ve yenilenebilir doğa demektir. Elektrik enerjisi üretimi için güneş enerjisini kullanarak sera gazlarının emisyonu azaltılabilir.

Konutlarda enerji performansının artırılması ve emisyon azaltma planları son yıllardaki yönetmeliklerin başlıca hedef alanlarından biri olmuştur. PV/T hibrit teknolojisi fosil yakıt tüketiminin önemli ölçüde azalmasına katkıda bulunarak karbon emisyonunu azaltılabilir. Binalarla bütünleşik güneş enerjisi sistemleri arasında Fotovoltaik Termal Sistemler (PV/T), hem elektrik hem de sıcak su ihtiyacını karşılaması ile giderek artan bir ilgi görmektedir. İki değişik enerji türü olan elektrik ve ısı aynı yüzey alanından elde edildiği hibrit sistemler olan PV/T sistemler vasıtasıyla güneş enerjisi eş zamanlı olarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmektedir. PV/T sistemlerin optimum çalışma koşullarında işletilerek en yüksek enerji veriminin elde edilmesi bu sistemlerin tasarımı aşamasında termodinamik modellerinin ortaya konmasını ve ayrıntılı ısı transfer analizlerinin yapılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada öncelikle mevcut olan PV/T sistem tiplerinin genel özellikleri ve karakteristik özellikleri karşılaştırılarak avantaj ve dezavantajları saptanmıştır. Daha sonra termodinamik kanunlar baz alınarak PV/T sistem analizi yapılmıştır. Hottel-Whillier denklemleri ile matematiksel modellemeden faydalanılarak sistem incelenmiştir. İnceleme sonucunda, Matlab-Simulink bilgisayar programı kullanılarak örnek bir PV/T model üzerinden İstanbul iklim koşulları dikkate alınarak termal ve elektriksel verim ve güç değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular hem ekonomik kazanç hem de enerji konusunda fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması hususlarında önemli veriler içermektedir.

**Anahtar Kelimeler: Ekonomi, Fotovoltaik Termal (PV/T) Sistem, İstanbul, Simulink, Termodinamik.**

## SUMMARY

In this study, the thermodynamic performance analysis of Photovoltaic Thermal Energy systems is aimed. Also it is aimed to calculate the added value that will be brought to economy as a result of using PV / T systems for residential applications in Istanbul.

Energy is necessary for economic and social development. Energy shortage is the biggest obstacle to economic growth. At the same time, renewable energy means a clean and renewable nature for a country. By using solar energy for the generation of electricity, the emission of greenhouse gases can be reduced.

Increasing energy performance in houses and emission reduction plans have been one of the main target areas of regulations in recent years. PV / T hybrid technology can reduce carbon emissions by contributing to a significant reduction in fossil fuel consumption. Photovoltaic Thermal Systems (PV / T), which are among the integrated solar energy systems can meet for both electricity and hot water needs and so they increasingly attracting people's attention. Solar energy is converted to electricity and heat energy simultaneously by means of PV / T hybrid systems. In this system, two different types of energy are obtained from the same surface area, whose names are electric and heat. In order to obtain the highest energy efficiency by operating the PV / T systems under optimum operating conditions, it is necessary to introduce thermodynamic models and to perform detailed heat transfer analysis during the design phase of these systems. In this study, the main properties and characteristics of the existing PV / T system types were compared and their advantages and disadvantages were determined. Then PV / T system analysis was performed based on thermodynamic laws. Hottel-Whillier equations were used for mathematical modeling. As a result of the study, thermal and electrical efficiency and power values have been reached by taking into account the climatic conditions of Istanbul via an exemplary PV / T model using the Matlab-Simulink computer program. The findings have important data on both economic gain and the reduction of dependence on fossil fuels.

**Key Words: Economics, İstanbul, Photovoltaic Thermal (PV/T) System, Simulink, Thermodynamics.**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda bana hep destek olup yol gösteren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Salih Özen ÜNVERDİ'ye, tezi düzenlememde yardımları bulunan kardeşim Nur Ezcan'a ve Matlab-Simulink kursunu aldığım Üçüncü Binyıl Eğitim ve Danışmanlık Tic. Ltd. Şirketine teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                               | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                                          | v                   |
| SUMMARY                                                                                       | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                                      | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                                   | viii                |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ                                                                | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                                               | xii                 |
| TABLolar DİZİNİ                                                                               | xiv                 |
| <br>                                                                                          |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                                      | 1                   |
| 1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği                                                          | 4                   |
| 2. FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) ENERJİ SİSTEMLERİ                                                | 6                   |
| 2.1. Fotovoltaik Termal Sistemlerin Tanıtılması                                               | 10                  |
| 2.1.1. Hava Bazlı PV/T Sistemleri                                                             | 10                  |
| 2.1.2. Su Bazlı PV/T Sistemleri                                                               | 12                  |
| 2.1.3. Soğutucu Gaz Esaslı PV/T Sistemleri                                                    | 14                  |
| 2.1.4. Isı Borusu Esaslı PV/T Sistemleri                                                      | 17                  |
| 2.2. Fotovoltaik Termal (PV/T) Enerji Sistemlerinin Elektriksel ve Isıl<br>Olarak İncelenmesi | 20                  |
| 2.2.1. PV/T Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları                                       | 22                  |
| 2.3. Mevcut Olan PV/T Tiplerinin Genel Özellikleri ve Karakteristik<br>Özellikleri            | 24                  |
| 2.4. Değerlendirme Standartları                                                               | 26                  |
| 3. FOTOVOLTAİK-TERMAL KOLLEKTÖR SİSTEMLERİNİN<br>ANALİZLERİ                                   | 27                  |
| 3.1. Isıl Analiz                                                                              | 28                  |
| 3.1.1. Fotovoltaik Sistem Analizi                                                             | 29                  |
| 3.1.2. Fotovoltaik Termal Sistem Analizi                                                      | 31                  |
| 3.2. Termal ve Elektriksel Verimler                                                           | 33                  |
| 3.3. Maliyet ve Çevreye Etkisi Bakımından Değerlendirme                                       | 35                  |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. HOTTEL-WHILLIER DENKLEMLERİ İLE SİSTEMİN<br>MATEMATİKSEL MODELLENMESİ | 37 |
| 5. PROJE YAKLAŞIMI                                                       | 39 |
| 5.1. Matlab Simulink Programı                                            | 39 |
| 5.2. Uygulama                                                            | 40 |
| 5.3. Sonuçlar                                                            | 45 |
| KAYNAKLAR                                                                | 57 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                 | 59 |
| EKLER                                                                    | 60 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler ve Açıklamalar

#### Kısaltmalar

|                      |                                                              |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| $T_a$                | : Ortam sıcaklığı                                            |
| $F$                  | : Standart kanat verimi                                      |
| $C_b$                | : Kanatçık ve boru arasındaki iletkenlik                     |
| $\eta_{PV}$          | : Enerji verimliliği                                         |
| $\psi_{PV-T}$        | : Ekserji verimliliği                                        |
| $H_f$                | : Boruların içindeki ısı transfer katsayısı                  |
| $W$                  | : Isı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk |
| $F'$                 | : Kollektör verim faktörü                                    |
| $F_R$                | : Kollektör ısı kazanç faktörü                               |
| $T_i$                | : Çalışma sıvısının kollektöre giriş sıcaklığı               |
| $U_L$                | : Toplam kollektör ısı kayıp katsayısı                       |
| $(\tau\alpha)_{eff}$ | : Etkin geçirgenlik soğurma katsayısı                        |
| $D_o$                | : Boruların iç çapları                                       |
| $D_i$                | : Boruların dış çapları                                      |
| $h_{wm}$             | : Çalışma şartlarındaki ısı transfer katsayısı               |
| $M$                  | : PV hücre ve emicinin termal iletkenlik katsayısı           |
| $T_{pm}$             | : Ortalama sıcaklık farkı                                    |
| $\eta_e$             | : PV/T sistemin elektriksel verimi                           |
| $U_{loss}$           | : Isı kaybı katsayısı                                        |
| $G$                  | : Güneş radyasyonu                                           |
| $A$                  | : Kollektör alanı                                            |
| $((T\alpha)_{PV})$   | : Fotovoltaik hücrelerde geçirgenlik-soğurma faktörü         |
| $\eta_{termal}$      | : PV/T sistemin termal verimliliği                           |
| $\eta_{pv}$          | : Anlık elektriksel verim                                    |
| $T_s$                | : Güneş radyasyon sıcaklığı                                  |
| $f$                  | : Difüz yansıtma katsayısı                                   |
| $E_{npv,elektrik}$   | : Sistem tarafından üretilen elektrik enerjisi               |
| $SI$                 | : Sürdürülebilirlik İndeksi                                  |
| $\dot{m}$            | : Birim zamanda geçen kütle debisi                           |
| $L_{pv}$             | : PV Kalınlığı                                               |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                    | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1.1: Fotovoltaik Modül Örneği-Mono Kristal Tip.                                            | 3                   |
| 2.1: Camsız ve Camla Kaplı PV Modüller.                                                    | 6                   |
| 2.2: Hava Soğutmalı PV Toplayıcılarda Üç Çeşit Hava Kanalının Akışa Dik Kesit Görünüşleri. | 7                   |
| 2.3: Dört Farklı Tip Güneş Enerjisi Toplayıcının Şematik Kesit Görünümleri.                | 9                   |
| 2.4: Tipik Bir PV/T Sisteminin Enine Kesiti.                                               | 10                  |
| 2.5 : Hava Soğutmalı, Üstü Açık, Tek veya Çift Camla Kaplı PV/T Modüller.                  | 12                  |
| 2.6: Su Soğutmalı, Tek veya Çift Camla Kaplı PV/T Modüller.                                | 14                  |
| 2.7: Üstü Camla Kapatılmış PV/T Buharlaştırıcı Çatı Paneli.                                | 15                  |
| 2.8: PV/T Tabanlı Isı Pompası Sistemi.                                                     | 16                  |
| 2.9: Geleneksel Bir Isı Borusunun Yapısı.                                                  | 19                  |
| 2.10: Üç Farklı Geometride Mikro Kanallar Dizisi İçeren Düz Levhalı Isı Boruları.          | 19                  |
| 2.11: Mikro Kanallı Düz Levha Isı Boru Soğutmalı PV/T Modüller.                            | 20                  |
| 2.12: PV/T Modüllerde Elektrik Üretimi.                                                    | 21                  |
| 2.13: PV/T Modülleri Kullanım Alanları.                                                    | 21                  |
| 5.1: Simulink Programı Sistem Kurma Örneği.                                                | 40                  |
| 5.2: Simulink Programı Ekran Arayüzü.                                                      | 40                  |
| 5.3: Temsili Su Bazlı PV/T Sistemi.                                                        | 41                  |
| 5.4: Bulunan Sonuçlar -1.                                                                  | 43                  |
| 5.5: Bulunan Sonuçlar-2.                                                                   | 43                  |
| 5.6: Parametreler -1.                                                                      | 44                  |
| 5.7: Parametreler-2.                                                                       | 44                  |
| 5.8: Subsystemler(Altsistemler).                                                           | 45                  |
| 5.9: Güneşlenme Süreleri.                                                                  | 48                  |
| 5.10: Termal Verimler.                                                                     | 48                  |
| 5.11: Elektriksel Verimler.                                                                | 49                  |
| 5.12: Güneş Isıtma Değerleri (Watt).                                                       | 49                  |
| 5.13: Toplam Verimler.                                                                     | 50                  |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.14: 4 Kişilik Bir Ailenin Sıcak Su İhtiyacı İçin 3m <sup>2</sup> 'lik Gerekli Kolektör Sayısı. | 50 |
| 5.15: PV Anlık Elektriksel Güç(Watt).                                                            | 51 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                                                           | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: PV/T Kollektör Çeşitlerinin Avantaj ve Dezavantajları.                                                       | 24                  |
| 5.1: İstanbul İklim Koşulları Baz Alınarak Su Bazlı PV/T Kollektörü İçin Yapılan Simülasyon Sonuçları.            | 47                  |
| 5.2: Bulunan Sonuçlara İlişkin Ortalama Değerler.                                                                 | 47                  |
| 5.3: 4 Kişilik Bir Aile İçin Aylık Değerler (Tek Hane) - (İstanbul/ Mayıs-Eylül Arası Dönem).                     | 54                  |
| 5.4: 1000 Daire İçin Aylık Ortalama Değerler(Yaklaşık 4.000 Kişi)(İstanbul/ Mayıs-Eylül Arası Dönem).             | 54                  |
| 5.5: 1.000.000 Kişi İçin Aylık Ortalama Değerler(İstanbul/Mayıs - Eylül Arası Dönem).                             | 55                  |
| 5.6: 1.000.000 Konut İçin Aylık Ortalama Değerler (İstanbul/Mayıs-Eylül Arası Dönem).                             | 55                  |
| 5.7: 4 Kişilik Bir Aile İçin Aylık Değerler(Tek Hane)- (Tüm Aylar Dikkate Alındığında Ortalama Değer).            | 55                  |
| 5.8: 1000 Daire İçin Aylık Ortalama Değerler (Yaklaşık 4.000 Kişi) Tüm Aylar Dikkate Alındığında Ortalama Değer). | 55                  |
| 5.9: 1.000.000 Kişi İçin Aylık Ortalama Değerler Tüm Aylar Dikkate Alındığında Ortalama Değer).                   | 55                  |
| 5.10: 1.000.000 Konut İçin Aylık Ortalama Değerler (Tüm Aylar Dikkate Alındığında Ortalama Değer).                | 55                  |
| 5.11: 1.000.000 Konut İçin Yıllık Ortalama Değerler (İstanbul).                                                   | 56                  |

# 1. GİRİŞ

Enerjinin tasarruflu kullanımı, ekonomik ve sosyal kalkınma açısından çok önemlidir. Mevcut geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynaklarının düşük verimli sistemler kullanılması sebebiyle ortaya çıkan israf ile meydana gelen enerji kıtlığı, ekonomik büyümenin ve sosyal gelişmenin önündeki en büyük engeldir. Öte yandan bir ülkede kullanılan enerji kaynakları içinde yenilenebilir enerji yüzdesinin artırılması, fosil yakıt tüketimine bağlı zararlı emisyonların azaltılarak çevre temizliğinin sağlanması ve doğanın kendisini yenileyebilmesine olanak sağlaması açısından elzemdir.

Günümüzde birçok uygulama alanında elektriksel ve termal enerji yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik Termal (PV/T) Sistemler güneş enerjisi kaynaklı, elektrik ve ısı enerjisi üreten hibrid sistemlerdir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte PV/T hibrid teknolojisi fosil yakıt tüketiminin önemli ölçüde düşürülmesini sağlayarak atmosfere salınan karbon emisyonunu azaltabilir. Yapılan araştırmalar düz levha PV/T güneş kollektörünün elektrik ve ısı enerjisi gerektiren düşük sıcaklıklı konut uygulamaları için umut verici bir alternatif sistem olduğunu göstermektedir [13].

Güneş enerjisi uygulamaları sıcaklık aralığına göre üç grupta incelenebilir [11]:

- Düşük sıcaklık (20-100°C) uygulamaları,
- Orta sıcaklık (100-300°C) uygulamaları,
- Yüksek sıcaklık (>300°C) uygulamaları.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi başlıca iki yöntemle yapılır:

- Dolaylı Yöntem

Güneş enerjisinden ısı-mekanik-elektrik enerji dönüşüm süreciyle elektrik üretimidir. Güneş ışınımının düz veya parabolik yansıtıcılar vasıtasıyla bir alıcıya odaklanması sonucunda eritilen tuz veya kızdırılan yağ vasıtasıyla veya doğrudan elde edilen kızgın buhardan, buhar türbini ve elektrik jeneratörü aracılığıyla geleneksel yöntemlerle elektrik üretimidir.

- Doğrudan Yöntem

Foto-voltaik, termo-elektrik ve termiyonik çeviriciler bu sınıfta yer alır. Foto-voltaik güneş panelleri, güneş ışığını foto-voltaik hücreler vasıtasıyla elektriğe dönüştürür [12]. Termo-elektrik Seebeck etkisi prensibiyle çalışan elektriksel olarak seri bağlı, ısı olarak paralel bağlı P ve N tipi yarı iletken malzemelerden oluşan sistemler güneş ışımasını sebebiyle ortaya çıkan sıcaklık farkını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Termiyonik sistemlerde ise, güneş ışımasıyla çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılan yüksek ergime sıcaklığına sahip tungsten, tantalum gibi metal veya baryum oksit veya stronsiyum oksit gibi metal oksitlerde, yüzeydeki potansiyel engelini (eşik enerjisini) aşacak kadar kinetik enerji kazanan serbest elektronların salınması sonucunda elektrik üretilir.

Güneş enerjisinden PV sistemlerle elektrik üretimi 1954 yılında gerçekleştirilmiş olmasına karşın, ilk güneş termik elektrik santralleri 1970'lerin sonunda kurulmuştur [12].

Fotovoltaik sistem, üzerine düşen güneş ışımasının %75'den fazlasını yansıtır veya ısı enerjisiye dönüştürür. Açığa çıkan ısı enerjisi PV hücrenin çalışma sıcaklığını artırır ve elektrik enerjisi dönüşüm verimini azaltır. PV panelindeki her 1 °C'lık artış PV verimini %0,4-0,5 arasında düşürmektedir. Bu ısı PV paneline zarar verir ve ömrünü kısaltır [1].

PV/T (Fotovoltaik/termal) güneş enerjisi endüstrisinde yeni standartlar yaratan bir toplam enerji sistemidir. Fotovoltaik modüller ile güneş enerjili ısıtma sistemlerinin avantajlarının bir enerji sisteminde bir araya getirilmesi yenilenebilir enerji sektöründe en heyecan verici buluşlardan birisi olmuştur. Güneş enerjisini elektrik enerjisine doğrudan ve dolaylı olarak dönüştüren geleneksel sistemlerin yanı sıra, doğrudan elektrik ve ısı enerjisi üreten karma bir sistem olarak üçüncü kategoride yer alır. Yüksek elektrik enerjisi üretim verimlerine ulaşmak için PV panelin soğutulması gerekmektedir. PV panelin soğutulması verimliliği arttırmakla birlikte, yatırım maliyetlerinin yüksek olması göz önüne alındığında sisteme yapılan yatırımın geri ödeme süresini uzatmaktadır. Öte yandan PV/T sistemlerde verim yüksek ve geri kazanım süresi daha kısadır.

Fotovoltaik sistemlerde güneş pillerinin ideal çalışma sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiştir. Normal şartlarda bu sıcaklığın 45°C'ye kadar çıkması sebebiyle güneş pillerini soğutmak ve ortaya çıkan atık ısıdan faydalanmak amacıyla karma sistemler geliştirilmiştir.

Karma güneş enerjisi toplayıcıları kavramı Wolf Kern ve Russel'in 1970'lerde yapmış olduğu öncü çalışmalarla başlamıştır. Buna rağmen PV/T sistemlerin verimliliğinin artırılması ancak son yıllarda başarılabilmektedir. Fotovoltaik termal kollektörün yapısı ve geometrik tasarımı, enerji dönüşüm verimliliğinde belirleyici role sahiptir [6].



Şekil 1.1: Fotovoltaik Modül örneği-Mono kristal tip.

PV/T sistemlerin pazar potansiyeli PV sistemlerin ve ısı toplayıcıların yalnız başlarına kullanılmasına göre çok daha yüksektir. Yüksek güneş enerjisi dönüşüm verimliliği, yerleştirildikleri alanın daha ekonomik şekilde kullanılması, aynı anda

hem elektrik hem de sıcak su veya sıcak havanın üretimi gibi önemli avantajlar sağlarlar. Tüm bu getirilerine rağmen hem kullanım hem de pazar potansiyeli açısından çözülmesi gereken bazı teknik problemler bulunmaktadır. Bu zorlukların çözülebilmesi için PV/T teknolojisi ile ilgili deneysel ve analitik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmalar akademisyen, araştırmacı, uygulama mühendisleri ve teknisyenlere PV/T sistemi çalışma ilkelerini ve teknik özelliklerini kavrayarak, sistem tasarımı, değerlendirilmesi, imalatı, seçimi, kurulumu, izlenmesi ve bakım-onarımını gerçekleştirebilme yeteneği sağlamalıdır. Öte yandan bu çalışmalar akademisyenlerin ve araştırmacıların PV/T teknolojisi ile ilgili güncel araştırma konularını belirleyebilmelerini, devlet görevlilerinin PV/T sistemler konusunda uygulanacak stratejik planları ve standartları yapabilmelerini, kanun yapıcıların ilgili mevzuatı oluşturabilmelerini sağlayabilecek kapsamda olmalıdır. Ayrıca yeni geliştirilen ürünlerin pazar payı ve fizibilite analizleri yapılmalı, endüstriyel üretim, ticarileştirme, pazarlama ve uygulamada karşılaşılan zorluklar da aşılmalıdır [8].

## **1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği**

Bu tez çalışmasında hem elektrik hem de sıcak su üretmek için tasarlanmış fotovoltaik/termal sistemler incelenmiştir.

Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan araştırmalarda, fosil yakıt tüketiminin %40'ının klasik konutların enerji ihtiyacını karşılamak üzere tüketildiği saptanmış olup Türkiye için bu oran %37'dir [2]. Fosil yakıt tüketimini azaltmak amacıyla konutlarda enerji verimliliği, kendi enerjisini üretebilen sıfır enerjili binalar gibi kavramlar ortaya çıkmıştır. Net-sıfır enerjili binalar, tükettiği enerjiyi üreten yapılar olup, pozitif enerjili binalar ise tükettiği enerjiden daha fazlasını üreten binalardır. Pozitif enerjili binalarda üretilen elektrik enerjisi fazlası ülkenin elektrik şebekesini beslemekte, ya da elektrikli otomobillerin şarj edilmesinde kullanılabilir. Fotovoltaik termal enerji sistemleri kullanılarak binaların elektrik ve sıcak su gereksinimleri bir yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ışıınıından sağlanabilecektir. Böylece konutlarda, iş yerlerinde, kamu binalarında ve askeri tesislerde elektrikli aletlerin şebekeden çektiği enerji ile ısınma ve sıcak su üretimi amaçlı doğalgaz, kömür gibi fosil yakıtların kullanımı büyük ölçüde azaltılabilir veya sıfırlanabilir. Bu şekilde ülkemizin enerji harcamalarında önemli

ölçüde tasarruf sağlanarak, daha güçlü bir ekonomik yapının oluşturulmasına katkıda bulunulabilir.

Avrupa Birliği “Bina Enerji Performansı Yönetmeliği” 2020 yılının sonunda tüm yeni binaların “Neredeyse sıfır enerjili” olmasını hedeflemektedir [2]. Türkiye’nin bu hedef doğrultusunda binaların elektrik ve sıcak su ihtiyaçlarını fotovoltaik termal ünitelerden sağlayan yeni tasarımların geliştirilmesini hedeflemesi gerekmektedir. Güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklı birleşik yerel elektrik üretimi ve merkezi ısıtma teknolojileri ülkemizde sürdürülebilir enerji ekonomisi ve çevre temizliği açısından hedeflenmesi gereken kavramlardır.

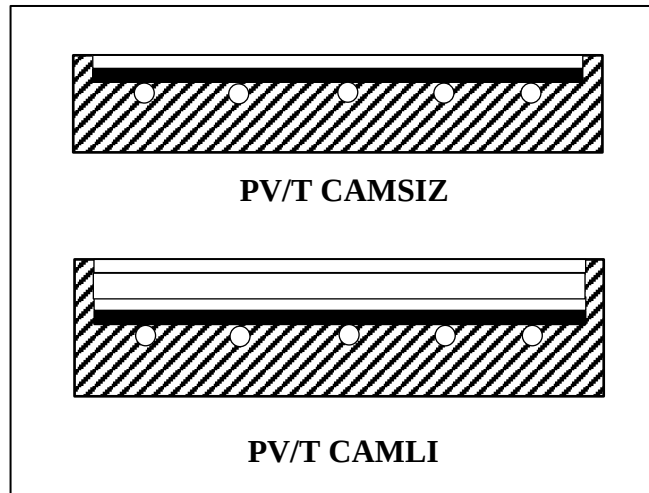
Bu çalışmada, PV/T sistem tasarımı ve termo-ekonomik analizinde ılıman iklim koşulları ve ülkemizin en yüksek nüfuslu ili olması sebebiyle “İstanbul” iline ait aylık güneş ışıma değerleri temel alınmıştır. İstanbul ilinde konutlarda PV/T kullanımı sonucunda elektrik ve doğal gaz faturalarından elde edilecek ekonomik kazanç, dört kişilik bir ailenin elektrik ve sıcak su ihtiyacı göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Sonuçlar ekonomik kazanç, çevre kirliliğinin azaltılması ve enerjide dış ülkelere bağımlılığın azaltılması hususlarında önemli veriler içermektedir.

## 2. FOTOVOLTAİK TERMAL (PV/T) ENERJİ SİSTEMLERİ

PV/T modüller farklı yapısal ve fonksiyonel özelliklere sahip olabilir. Düz panel veya odaklamalı yapıda imal edilebilirler ya da binaya entegre tipleri mevcuttur. PV/T modüller soğutucu akışkan türüne göre aşağıda sınıflandırılmıştır:

- Su bazlı,
- Hava bazlı,
- Soğutucu akışkan bazlı,
- Isı borusu bazlı (Su veya soğutucu akışkan kullanılabilir) [8].

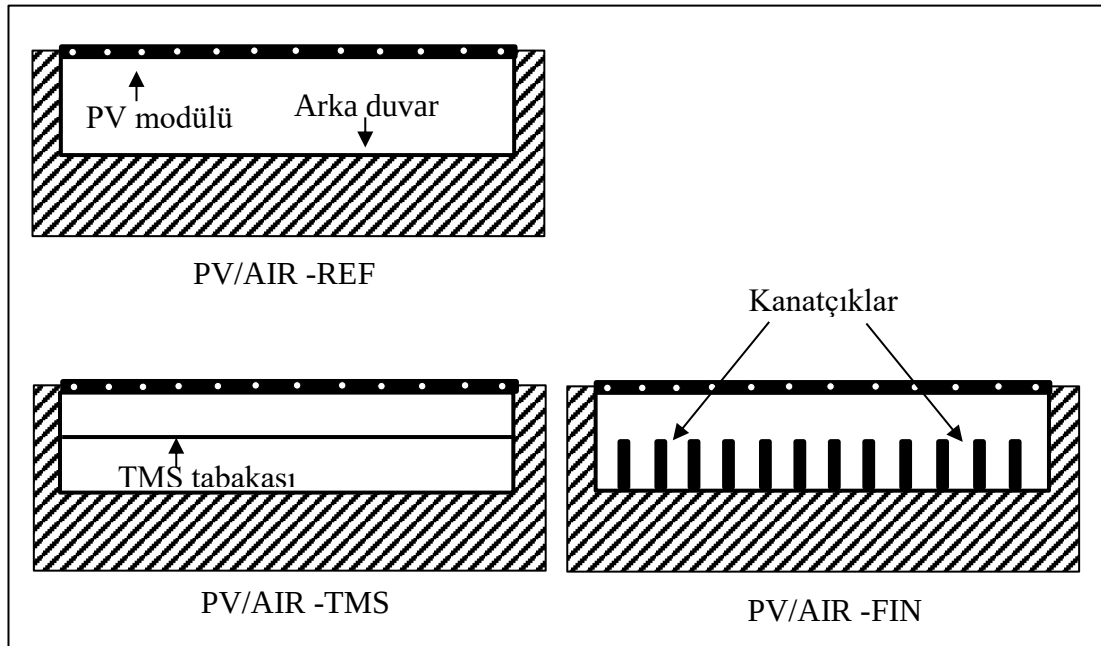
Sıvı esaslı bir PV/T sisteminde; PV modülünde ortaya çıkan ısıyı alarak kullanılacağı sisteme sevk eden atık ısı geri kazanım birimi, sıvı çevrimi için pompa ve harici borulardan oluşan alt-sistemler mevcuttur. Aydınlatılmış yüzeyleri dış ortama karşı korumasız PV modüllerden oluşan bir PV/T sistemde atmosfere önemli ısı enerjisi kayıpları sebebiyle çalışma sıcaklığı düşüktür. PV modülü yağışlara karşı korumak için üzerine yerleştirilen cam kaplamanın (güneş ısıyı toplayıcı panellerde olduğu gibi) modülün emdiği güneş ışınım miktarını artırarak sıcaklığını yükseltmesi sebebiyle PV modülün ürettiği elektrik gücü azalır [5].



Şekil 2.1: Camsız ve camla kaplı PV modüller.

PV modüllerde sıcaklık artması sebebiyle meydana gelen elektriksel verim düşüşünü engellemek için su veya hava ile soğutma yöntemleri günümüzde uygulanmaktadır.

Bir PV/T sistemi, PV modüller etkin olarak soğutulurken elektriksel verimliliği arttırmak için aralarında bir boşluk kalacak şekilde bir ısı toplayıcı üzerine yerleştirilmiş bir PV panelden oluşur. Bu sistemde düşük, orta veya yüksek odaklamalı yansıtıcılar mevcut olması halinde PV/T sistemin elektrik ve ısı verimi önemli ölçüde artmaktadır. Alüminyum düz levha odaklamalı, su temelli bir PV/T sistemin elektrik ve ısı enerji üretiminin yalın bir sisteme göre sırasıyla %8,6 ve %39 daha yüksek olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Alüminyum yaprak odaklamalı su temelli PV/T sistemlerde ise bu farklar hiç odaklama olmayan sistemlere göre sırasıyla %17,1 ve %55 daha yüksektir. Hava temelli PV/T kollektör sistemlerinde PV modül altında yer alan hava kanalı tek geçişli (REF), ince metal saca ayrılmış çift geçişli (Thin Metal Sheet, TMS) ve hava akış yönüne paralel olarak hava kanalının altına yerleştirilmiş dikdörtgen kanatlar kümesi (FIN) olmak üzere üç farklı yapıda tasarlanabilir. Kanal yüzeylerinden havaya ısı transfer verimliliği REF, TMS ve FIN yapılarında giderek yükselir. En yüksek ısı verimliliği kanatlı model sağlamakla birlikte, bu model yapının ağırlığını, imalat ve taşıma maliyetlerini artırır [4].

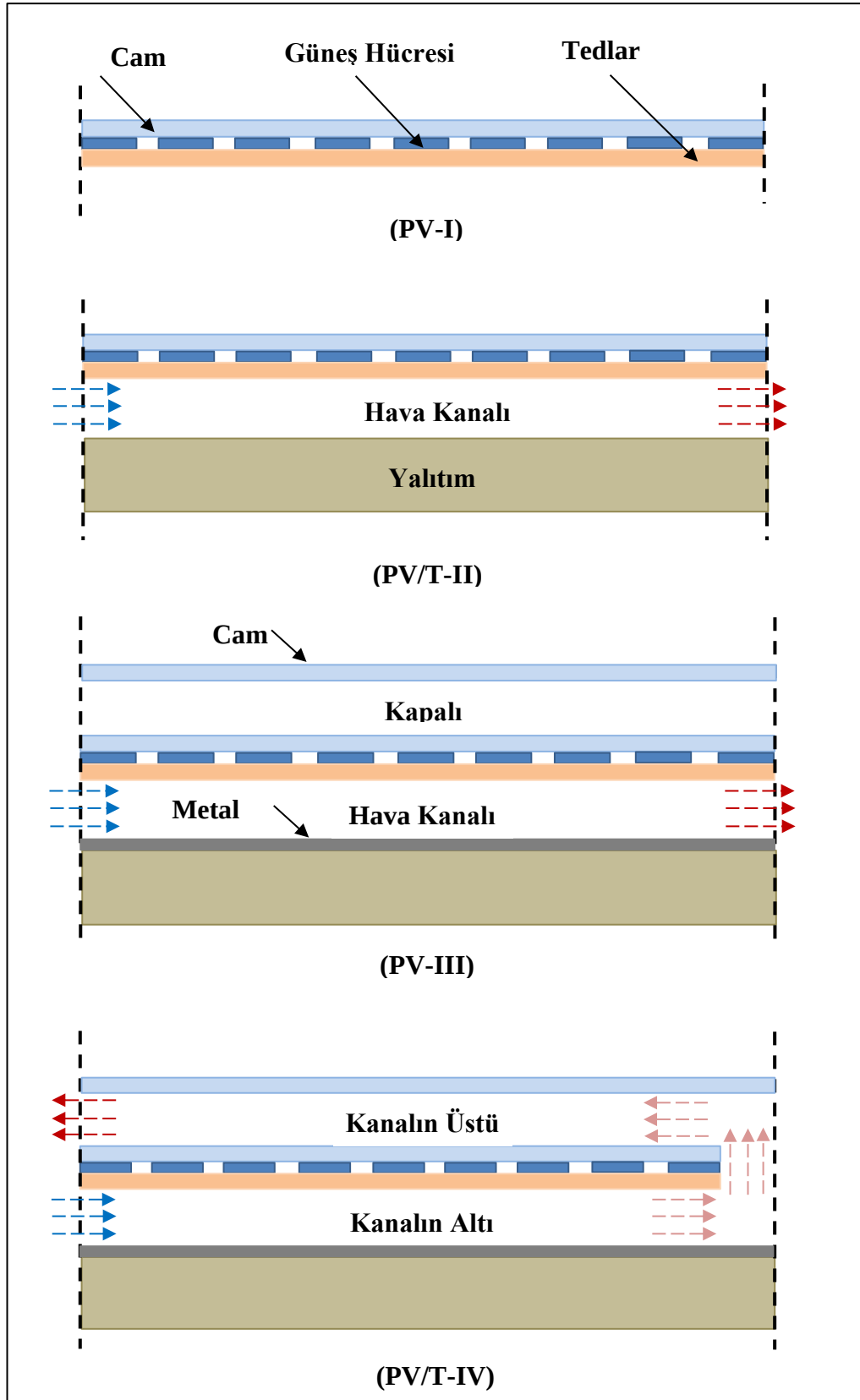


Şekil 2.2: Hava soğutmalı PV toplayıcılarda üç çeşit hava kanalının akışa dik kesit görünüşleri.

PV/T sistemler, iki değişik enerji türü olan elektrik ve ısının aynı yüzey alanından elde edildiği karma sistemlerdir. Bu ikili-üretim (co-generation) sistemlerinde güneş enerjisi eş zamanlı olarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştürüldüğü için verimleri yüksektir ve yer tasarrufu sağlarlar. Elektrik, sıcak su ve buharın aynı anda kullanıcıya sunulması mümkün olmaktadır [4].

Fotovoltaik enerji sistemine ilave edilen ısı emici plakalar sayesinde fotovoltaik modül soğutulurak elektriksel verim arttırılmakta, ayrıca atık ısı bir akışkana aktarılarak geri kazanılmaktadır. Günümüzde ikili üretim sistemlerinin önemi kıt enerji kaynakları nedeniyle giderek artmaktadır [4].

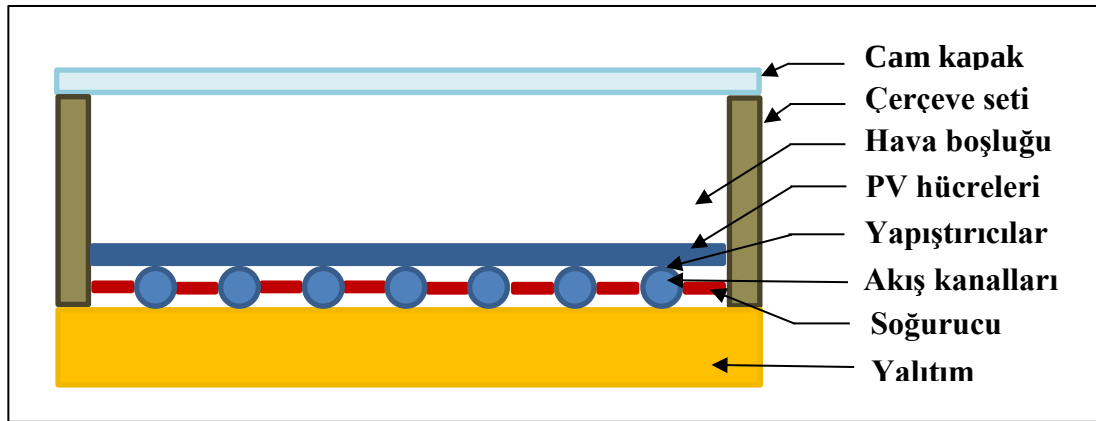
Karma PV/T toplayıcılar geometrileri, akışkan çeşidi - gaz (hava, su buharı), sıvı (su, nano- akışkan) veya soğutucu akışkan (faz değişimi ile) karakterize edilmektedir [6].



Şekil 2.3: Dört farklı tip güneş enerjisi toplayıcının şematik kesit görünüşleri: Fotovoltaik modül (PV-I), geleneksel hava soğutmalı karma PV/T toplayıcı (PV/T-II), üstü camla kapatılmış hava soğutmalı karma PV/T toplayıcı (PV/T-III) ve üstü camla kapatılmış hava soğutmalı çift geçişli karma PV/T toplayıcı (PV/T-IV).

Amorf silikon (a-Si) malzemeden imal edilmiş güneş pilleri, ışık ve ısı tavlama gibi mekanizmalardan kaynaklanan kendine özgü bir ısı davranışına sahiptir [3].

PV hücreler güneş enerjisinden elektrik üreten elemanlar olup, verimleri hücrelerin malzeme ve sıcaklığına bağlı olarak değişir. Nominal çalışma koşullarında (20 °C çevre sıcaklığı, 0,8 kW/m<sup>2</sup> güneş ışınım şiddeti ve 1m/s rüzgar hızına sahip ortamda) yapılan ölçümlere göre elektriksel verim %6 ile %18 arasında değişmektedir. PV hücrelerdeki 1 K çalışma sıcaklığı artışı kristal ve amorf silikon malzemeden yapılan hücrelerde elektriksel verimde sırasıyla %0,5 ve %25 düşüşe yol açmaktadır [8].



Şekil 2.4: Tipik bir PV/T sisteminin enine kesiti.

Tipik bir PV/T sistemi birçok tabakadan oluşur. En üstte bulunan güneş ışınımını geçiren saydam bir cam ile alt kısımda bulunan fotovoltaik hücreler arasında hava boşluğu yer alır. PV hücrelerin altında ise bu tabakaya yapıştırılmış içinden soğutucu akışkan geçen kanallar veya tüpler, bunlarla temasta olan ısı soğurucu tabaka ve en altta ısı yalıtım tabakası bulunmaktadır.

## 2.1. Fotovoltaik Termal Sistemlerin Tanıtılması

### 2.1.1. Hava Bazlı PV/T Sistemleri

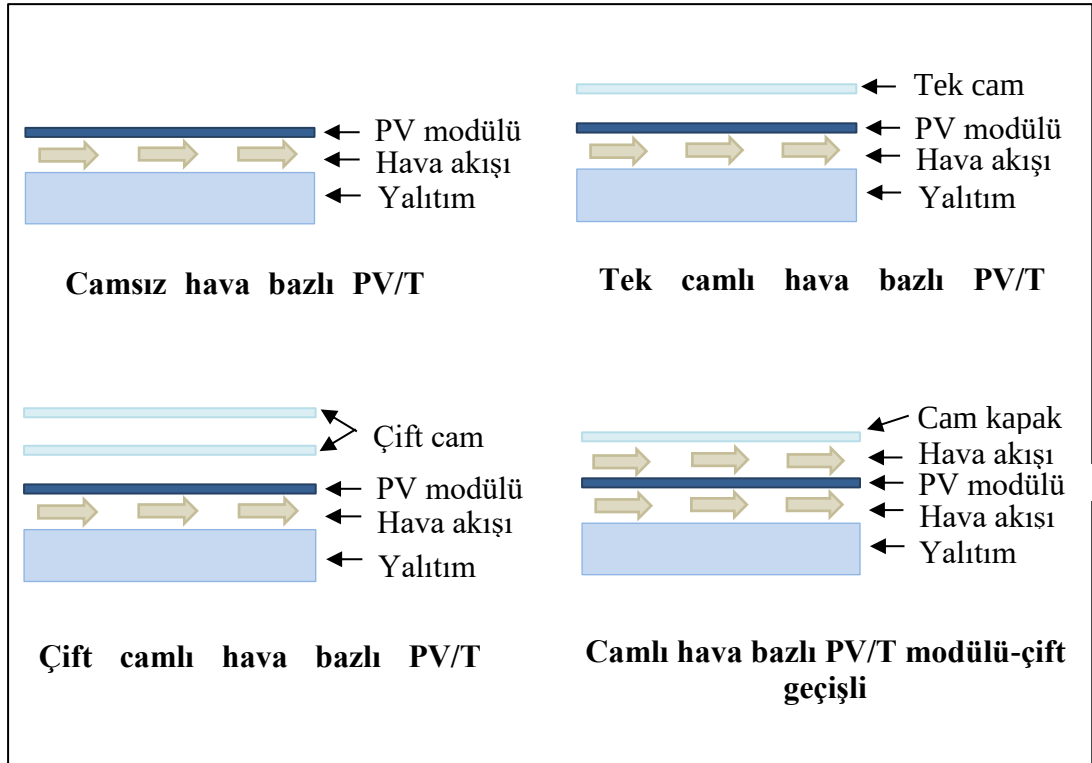
Hava soğutmalı PV/T toplayıcılarda, atık ısı havaya aktarılarak geri kazanılır. Bu tip toplayıcılar ısıtılmış havaya ihtiyaç duyulan bina veya seraların ısıtılması ve havalandırılması, kurutma gibi alanlarda kullanılmaktadır [9].

En çok kullanılan PV/T teknolojilerinden biridir ve ticari birimler halinde geliştirilmiş olup birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu tip sistemler genellikle ticari lamine PV modülleri, özel tasarlanmış hava akış kanalları, aktif fanlar, klima santrali veya hava ısı değiştiricileri içerir ve güneş verimliliği geometrik parametrelerin ve dış iklim koşullarının işlevi olarak davranır. En gözde ünite konfigürasyonu ve malzeme, dahili ticari PV hücrelerin varlığına veya yokluğuna sahip alüminyum emici ve lamine ayrılmış kanalların entegre şasisidir. Tipik bir hava bazlı PV/T tipi, yaklaşık maksimum %8 civarında elektrik verimine ve %39 civarında ısı verime ulaşabilir. Performansı büyük ölçüde hava akış hızı ve sıcaklığına bağlıdır [8].

Bu tür PV/T sistemler ile ilgili araştırmalar genellikle hava akış modellerini incelemeye odaklanır, örneğin zorlamalı akış, kanallar arasında etkin türbülansın yaratılması ve uygun cam modlarının seçilmesi için optimize edilmiş kanal geometrisi ve büyüklüğünün belirlenmesi gibi konulardır. [8]

Hava esaslı PV/T sistemlerdeki en büyük problem, hava yoğunluğunun düşük olması, özgül ısı kapasitesi ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle ısı aktarımının zayıf olmasıdır.

Hava esaslı bir PV/T modül doğal veya zorlanmış taşınım ile havanın ısıtıldığı, hava kanallarının üstü veya altında bir PV katmanı olan bir güneş enerji sistemidir. Bu tip PV/T modüllerin arka yüzeyi ile bina cephesi veya çatısı arasında bir hava boşluğu yer alır. Bu tip PV/T sistemler genelde sıcak hava ile ortam ısıtma, tarım/bitki kurutma, elektrik üretimi ve havalandırma amacıyla kullanılır. Bu tip modüllerde PV tabakanın üstü, altı veya her iki tarafından hava akışı sağlanarak atık ısı geri kazanılır [8].



Şekil 2.5 :Hava soğutmalı, üstü açık, tek veya çift camla kaplı PV/T modülleri. a. Üstü açık PV modül altında hava kanallı, b. Üstten camla yalıtılmış PV modül altında hava kanallı, c. Üstten çift camla yalıtılmış PV modül altında hava kanallı, d. Üstten camla yalıtılmış PV modül üstünde ve altında çift hava kanallı.

### 2.1.2. Su Bazlı PV/T Sistemleri

En gözde ikinci PV modül, soğutma tipi su bazlı PV/T sistemler olup, son yıllarda giderek artan ölçüde kullanılmaktadır. Piyasada çok sayıda ticari ürün ortaya çıkmış olup, PWTWINS ve Millenium Electric firmalarınca üretilen sırasıyla "PVTWIN" ve "MULTI SOLAR" isimli PV/T sistemler örnek olarak verilebilir [8].

Su esaslı PV/T modüllerin performansları; PV hücre tipi, su akış kanalı geometrisi ve boyutları, su akış hızı ve sıcaklığı, dış ortam koşullarına göre değişen elektriksel ve ısı verimleriyle ölçülür [8].

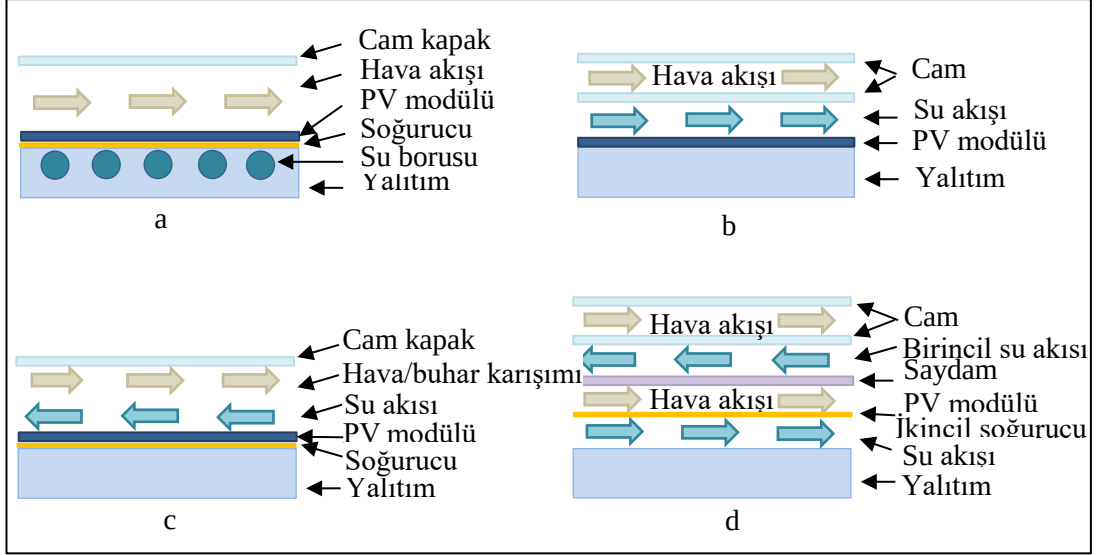
Toplam veriminin yüksek olması ve diğer modellere göre imalat kolaylığı sebebiyle, alüminyum çerçeve içinde üst kısımda tek camlı, PV-tabaka ile alt ısı yalıtım arasında yer alan soğurucu tabakalı-borulu tip (Şekil 7-a) gelecekte en yaygın kullanılacak tasarım olarak kabul edilir. Günümüzde su esaslı PV/T sistemlerin maksimum ısı ve elektrik verimleri sırasıyla %59 ve %9,5 civarındadır. Öte yandan,

düşük çevre sıcaklığında çalışan PV/T sistemler arasında en yüksek toplam verime ulaşan ise üstü açık tiptir. Bu sebeple soğuk iklimlerde ısı pompasıyla birlikte kullanılabilir [8].

Su esaslı PV/T sistemler ile ilgili araştırmalar genellikle su akış kanalı geometrisi, boyutları ve su debisinin, en yüksek toplam verimi verecek su akış hızı ve sıcaklığını sağlayacak şekilde belirlenmesine odaklanmaktadır [8].

Hava esaslı sistemlere kıyasla, su soğutmalı PV/T sistemler, PV hücrelerin elektriksel verimini ve güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisiyi arttırmada avantaj sağlarlar. Ancak, bazı teknik zorluklar nedeniyle iyileştirme kapsamı ciddi şekilde sınırlıdır. Öncelikle, su bazlı PV/T sistemler daimi rejime girene kadar su sıcaklığının artmasına bağlı olarak ısı geri kazanımının azalması ve buna bağlı olarak yükselen PV modül sıcaklığı sebebiyle giderek azalan sırasıyla ısı ve elektriksel verime sahiptir. İkinci olarak, ısı rejime girene kadar ısı cihazları için gereken su sıcaklığına ulaşmak için ek ısıtmanın gerekmesi sistemin karmaşıklığını artırmakta ve verimini düşürmektedir. Dahası, sistem soğuk iklimlerde çalıştırılırsa suyun donma problemi ortaya çıkabilir [8].

Geleneksel düz güneş enerji toplayıcıları ile benzer yapısal özelliklere sahiptir. Seri veya paralel bağlı çok sayıda hücreden oluşan PV modülün altında içinden su akan serpantin veya bir dizi paralel boru bulunur. Borular içinde akan suyun sıcaklığı düşük kaldığı sürece, PV hücreler etkin olarak soğutularak yüksek elektriksel verim sağlanır. PV hücrelerin ısısını alarak sıcaklığı yükselen su belirli cihazlara ısıtma sağlamak üzere iletilir. Sıcak su tüketilebilir veya alternatif olarak ortam ısıtmada kullanıldıktan sonra ısıyı geri kazanmak için PV/T sisteme geri akabilir. Hava soğutmalı sisteme göre su esaslı PV/T sistemleri suyun özgül ısısının yüksek olması sebebiyle etkin soğutma sağlayarak yüksek ısı ve elektriksel verimle çalıştırılabilir [8].

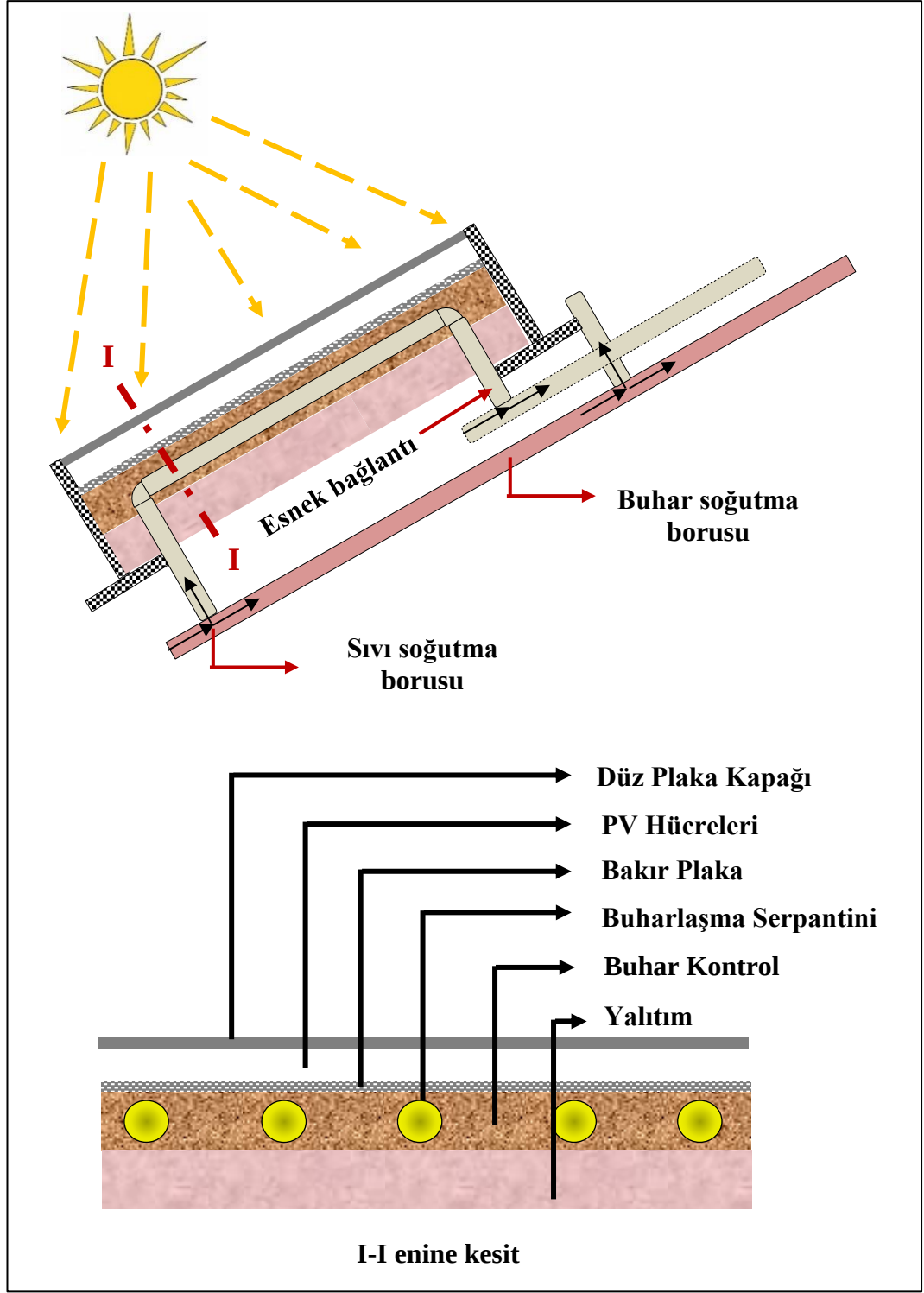


Şekil 2.6: Su soğutmalı, tek veya çift camla kaplı PV/T modüller: a. Soğurucu tabaka ve borulu, b. Su kanallı, c. Kanal içinde serbest yüzeyli su akışı, d. Çift su geçişli, çift soğurucu tabakalı.

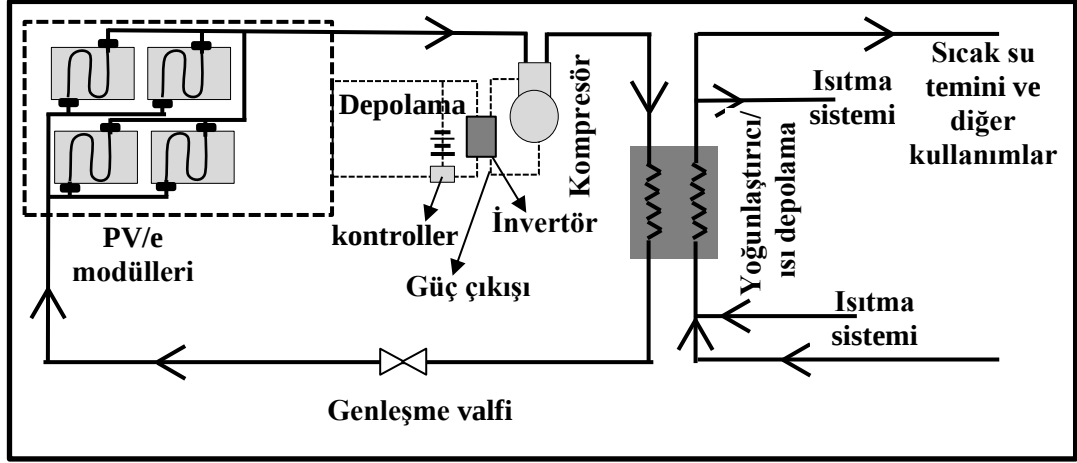
Su soğutmalı PV/T toplatıcılar dört ana başlıkta incelenebilir: a. Soğurucu tabaka ve borulu, b. Su kanallı, c. Kanal içinde serbest yüzeyli su akışı, d. Çift su geçişli, çift soğurucu tabakalı (Şekil 2.6) [8].

### 2.1.3. Soğutucu Gaz Esaslı PV/T Sistemleri

Son yıllarda soğutucu gaz tabanlı PV/T ısı pompası sistemleri üzerinde çalışılmaktadır. Kern ve Russell ilk olarak ısı pompası ile bağlantılı basit bir PV/T toplayıcı önererek enerji tasarrufu ve ekonomik faydaları konusunda çalışmalar yaptı. Son çalışmalar, ısı pompası uygulaması için yeni bir PV/T modül kavramını önermektedir. Bu tasarım PV modüllerin altına yerleştirilmiş ısı pompası buharlaşma serpantinlerinde soğutucu sıvının atık ısıyı alarak çok düşük sıcaklıklarda (0-20 °C) buharlaşması esasına dayanır. Sonuç olarak PV hücreleri düşük bir sıcaklığa kadar soğutularak PV/T panel ısı ve elektriksel verimliliğinde önemli artış sağlanır. Isı pompası kompresörü panellerde üretilen soğutucu gazın basıncını artırarak ortam ısıtma amacıyla ısı pompası yoğuşturucusuna iletir. Isı pompası kompresörü, PV hücrelerin ürettiği elektrik ile çalışan elektrik motorunca tahrik edilerek fosil yakıt enerjisinden bağımsız, güneş enerjisi kaynaklı bir ısı pompası geliştirilmiştir [8].



Şekil 2.7: Üstü camla kapatılmış PV/T buharlaştırıcı çatı paneli.



Şekil 2.8: PV/T tabanlı ısı pompası sistemi.

Soğutucu gaz esaslı PV/T yeni bir teknolojidir ve bu konudaki araştırmalar teknolojinin hava ve su temelli sistemlere göre güneş enerjisi kullanım oranını önemli ölçüde artırabildiğini ve bu nedenle yakın bir gelecekte bu sistemlerin yerini alabilme potansiyeli olduğunu göstermektedir. Soğutucu gaz temelli sistem genellikle bir ısı pompası ile birlikte çalışır ve performansı PV/T modüllerin elektriksel ve ısı verimleri ve PV/T ısı pompası sisteminin performans katsayısı COP sayısı ile değerlendirilir. PV/T modüllerin elektriksel ve ısı verimleri ve PV/T ısı pompası sisteminin performans katsayısı (COP) soğutucu gazın termal-fiziksel özellikleri, soğutucu akışkan debisi, buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklık ve basınçları, akış kanal geometrisi ve boyutları, PV tipi ve harici iklim koşulları ile değişmektedir [8].

En gözde entegre PV/T buharlaştırıcı modül, alüminyum-alışımli bir taban plakasının üst yüzeyine lamine edilmiş güneş pillerinin altında yer alan kanatlı bir alüminyum levhanın “U” şekilli oluklarına sıkıca yerleştirilmiş bakır serpantin, ısı yalıtım ve dış çerçeveden oluşur. Günümüzde tipik bir soğutucu gaz temelli PV/T panel %13.4 elektriksel verime, %65 ısı verime, PV/T-ısı pompası sistemi ortalama performans katsayısı (COP) ise R22 gaz ve 40 °C yoğunlaşma sıcaklığı için 6’ya, en yüksek toplam performans katsayısı (COP)<sub>p/t</sub> ise 16’ya ulaşabilmektedir [8].

Soğutucu akışkanlı PV/T sistemler üzerinde araştırmalar genellikle soğutucu gaz tipini, debisini, buharlaşma/yoğunlaşma sıcaklık ve basınçlarını belirlemeye, soğutucu akışkan kanallarının geometrik şekil ve boyutlarını iyileştirmeye yöneliktir [8].

Hava/su esaslı sistemlere göre soğutucu gaz temelli sistemler PV modüllerin elektriksel verimini ve güneş enerjisi kullanım oranını artırabilir. Bu girişim BIPV

soğutma teknolojisinde ileriye doğru bir adımı temsil etmektedir, ancak uygulamada bazı zorluklar ortaya çıkmıştır. Farklı bölümlerde yüksek ve alçak basınçları korumak ve çalışma sırasında sistemin içine hava emilmesini önlemek için soğutucu boru devresinde mükemmel bir sızdırmazlık gerekir, ancak çok sayıdaki bağlantı nedeniyle bunu sağlamak zordur. Ayrıca, büyük bir PV panel alanında kurulu olan çok sayıda serpantinde soğutucu akışkan sızıntısı riski yüksektir ve dengeli bir soğutucu akış dağılımı elde etmek teknik olarak zordur [8].

#### **2.1.4. Isı Borusu Esaslı PV/T Sistemleri**

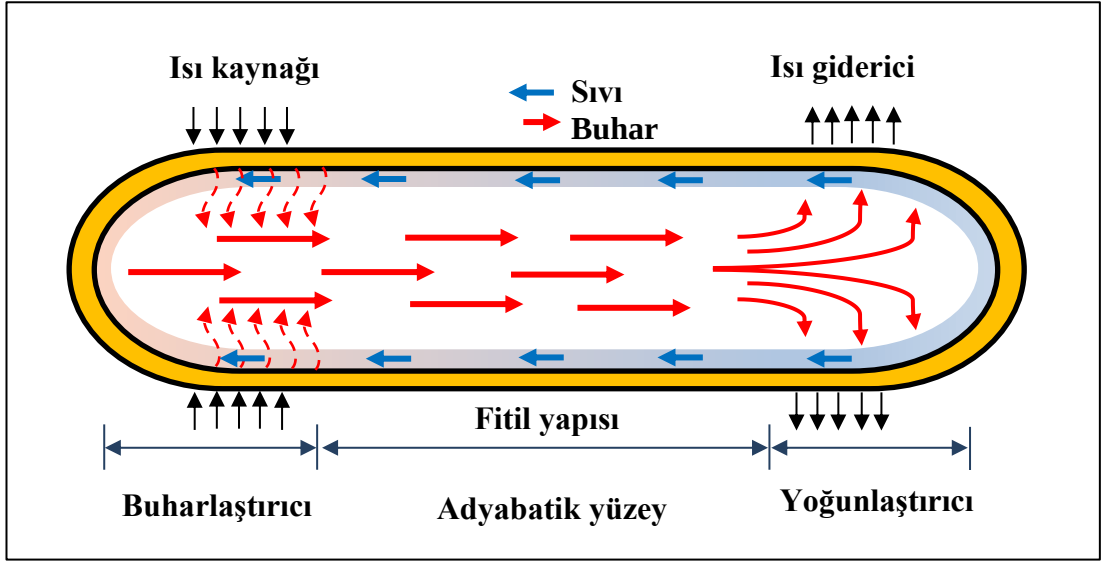
Isı-boru tabanlı PV/T sistemler yeni bir teknolojidir ve bu konudaki araştırmalar oldukça sınırlıdır. PV panellerin soğutulmasında potansiyel kullanım için düz plaka ve salınlı ısı boruları üzerinde çalışılmış olup, sonuçlar soğutucu akışkanlı sistemlerde karşılaşılan problemlerin (çevreye akışkan sızdırma, soğutucu akışkanın serpantinde dengesiz dağılımı, sistemin farklı bölgelerinde soğutucu akışkanın yüksek ve alçak basınçlarda tutulabilmesi gibi) üstesinden gelmek amacıyla ısı borularının kullanılabileceğini göstermiştir. [8].

Bu sistem genellikle bir ısı pompası veya ısı çevrimi ile birlikte çalışır ve performansını PV/T modülün elektriksel ve ısı verimleri ile ısı borusunun birim zamanda ısı taşıma sınırı belirler. Sistemin performans değerleri (verimler ve ısı taşıma sınırı) PV hücre tipi ve dış iklim koşulları, ısı borusunun yapısı/malzemesi ve vakum derecesi, ısı borusu sıvı çeşidi, ikincil sıvının sıcaklık ve debisine bağlı olarak değişmektedir [8]. En yaygın yapı ve malzeme, alüminyum düz plakalı ısı borularına tutturulmuş ticari PV panellerdir. Yapının baş kısmında bir su haznesine bulunur ve tüm elemanları ısıl olarak iletken silikon gres ile bağlanır. Günümüzde tipik bir düz ısı borusu temelli PV/T sistem maksimum %10 elektriksel verime ve %58 ısı verime ulaşabilir [8].

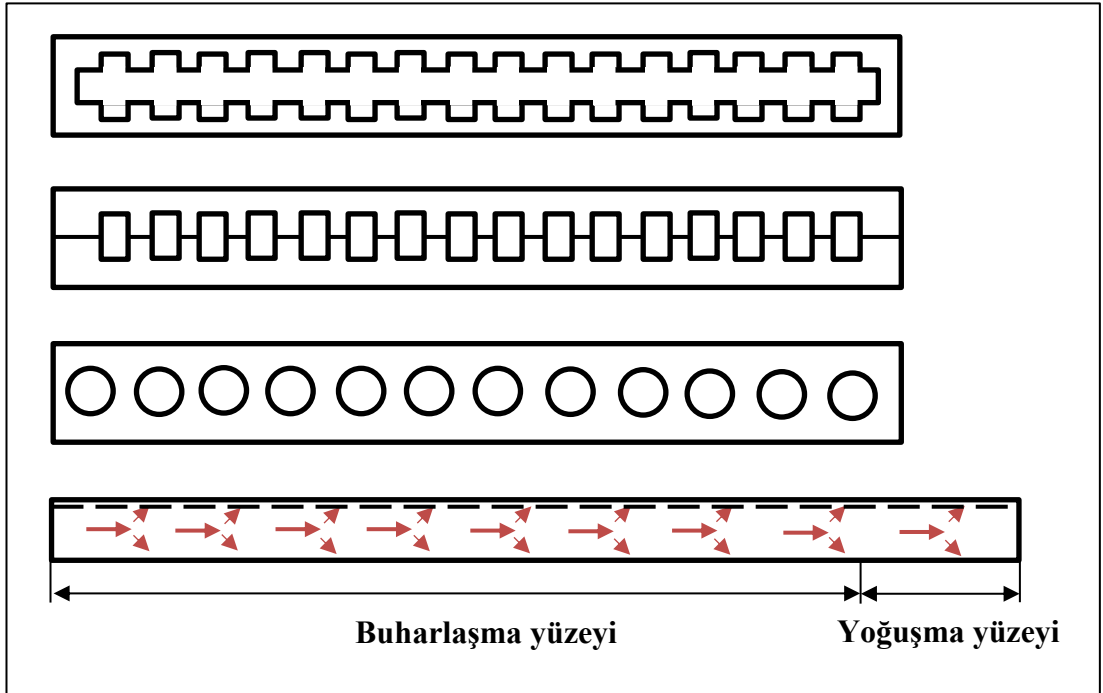
Günümüzde ısı borusu temelli PV/T sistem ile ilgili araştırmalar ısı borusu yapısını/malzemesini, vakum derecesini, ısı borusu akışkan tipini ve hacmini, ikincil sıvının hacmini, debisini ve giriş sıcaklığını belirlemek, ısı borusu geometrik boyutlarını optimize etmek ve entegre PV/T modül-ısı borusu paneli ve diğer ısı tahliye sistemlerinin yapısını belirlemeye yönelmiştir. Isı boruları yeterli bir sıcaklıkta çalıştığı takdirde soğutucu akışkan temelli sistemle eşdeğer bir anlık performans elde

edilebilmektedir. Bu sistem, soğutucu esaslı PV/T sistemlerde karşılaşılan zorlukları giderebilir ve PV modülde açığa çıkan ısıнын etkin tahliyesi ve faydalı kullanımını sağlayan yeni nesil bir teknoloji olabilir. Öte yandan ısı borularının yüksek maliyeti ve performanslarının doğru kontrolü gibi bazı problemlerin çözümü gereklidir [8].

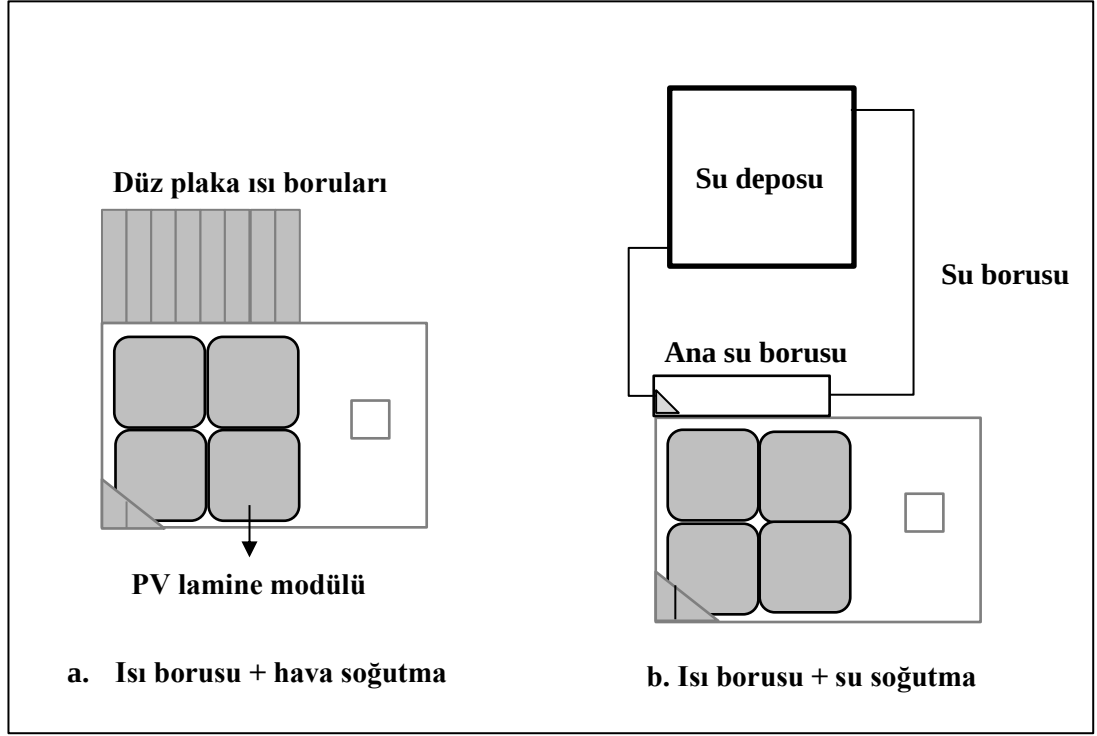
Isı boruları, gözenekli ortamda veya mikro kanallarda kılcal pompalama ve faz değişimi prensiplerini bir araya getiren, buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğuşturucu kısımlardan oluşan verimli ısı tahliye ve aktarım elemanlarıdır. Geleneksel bir ısı borusunun metal kabuk, çevresel gözenekli fitil ve merkezde yer alan vakumlanmış boşluktan oluşan yapısı ile borunun iki zıt tarafında ısı aktarımı sonucu gerçekleşen buharlaşma ile yoğuşma, gözenekli ortam sınırında buharlaşan eğri sıvı-buhar arayüzeyinde ortaya çıkan kılcal basınç farkının tahrik ettiği vakumlanmış ortamda gaz akışı ve gözenekli ortamda zıt yönde sıvı akışı gibi fiziksel olaylar Şekil 10’da gösterilmiştir. Küçük hacimlerde birim zamanda yüksek ısı enerji tahliyesi ve aktarımı gereken endüstriyel problemlere etkin çözüm sağlarlar. Zhao, elektrik ve sıcak hava veya suyun birlikte üretimi için bir PV panel/düz plaka ısı borusu sistemi önermiştir (Şekil 12). Bu prototip modülde bir fotovoltaiik katman ile çok sayıda mikro kanal dizisi içeren bir düz plaka ısı borusunun buharlaştırıcı bölümü yer alır (Şekil 11). Fotovoltaiik hücrelerde ortaya çıkan atık ısıyı alarak buharlaşan ısı borusu akışkanı, kılcal pompalama etkisiyle vakumlanmış boşluk boyunca akarak ısı borusunun diğer tarafında bulunan yoğuşturucu kısma ulaşır. Yoğuşturucu üzerinden geçen diğer bir akışkana taşınım ile ısı aktarımı sonucunda boru içindeki akışkanın yoğuşması sağlanır. Sıvılaşan akışkan, kılcal kanallar boyunca zıt yönde akarak buharlaştırıcı bölüme geri ulaşır. PV hücreler ve mikro kanallar arasındaki mükemmel ısı temasını sağladığı küçük ısı direnç sebebiyle düz levhali ısı boru soğutmalı PV/T sistemde ısı verim ve sonuçta toplam güneş enerjisi dönüşüm verimi yüksektir. Mikro kanallı ısı boruları vasıtasıyla PV panel yüzey sıcaklığı 40-50 °C aralığında tutulduğunda sistemin elektrik verimi soğutulmayan PV sisteme göre %15-30 artar. Günümüzde mikro kanallı düz ısı boru soğutmalı PV/T modül toplam güneş enerjisi dönüşüm verimi %40’tır [8].



Şekil 2.9: Geleneksel bir ısı borusunun yapısı.



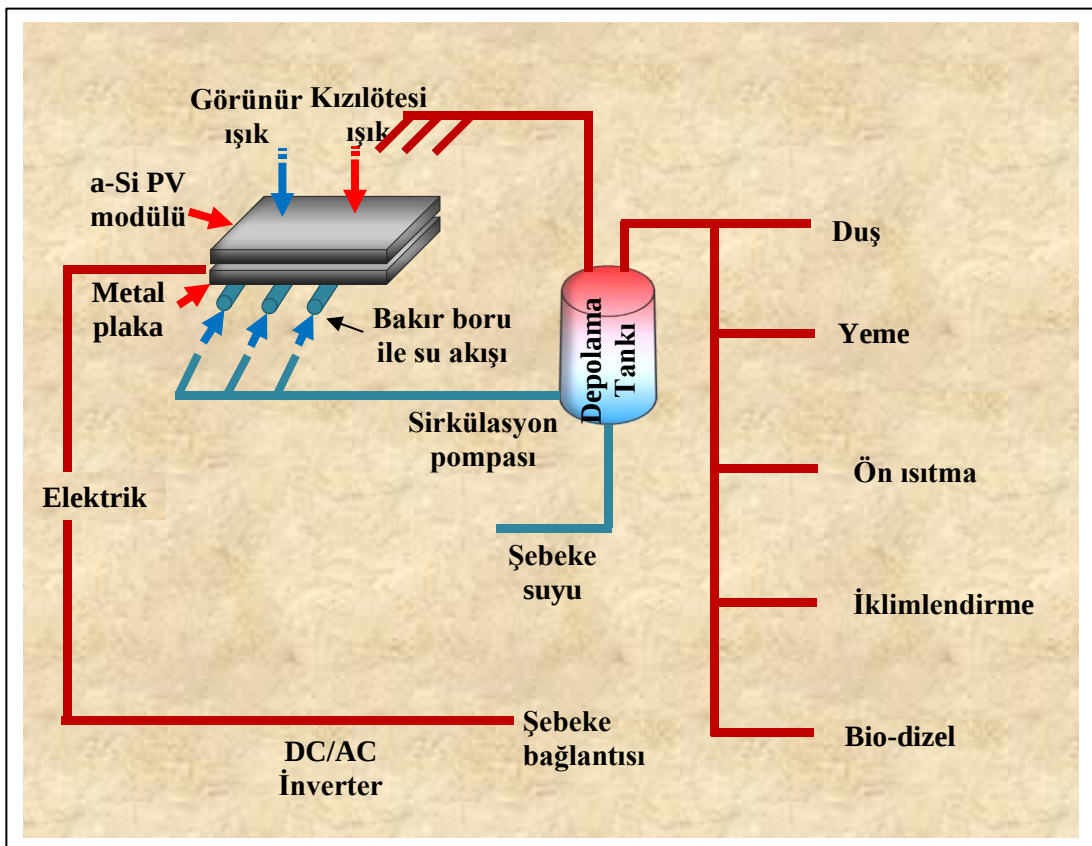
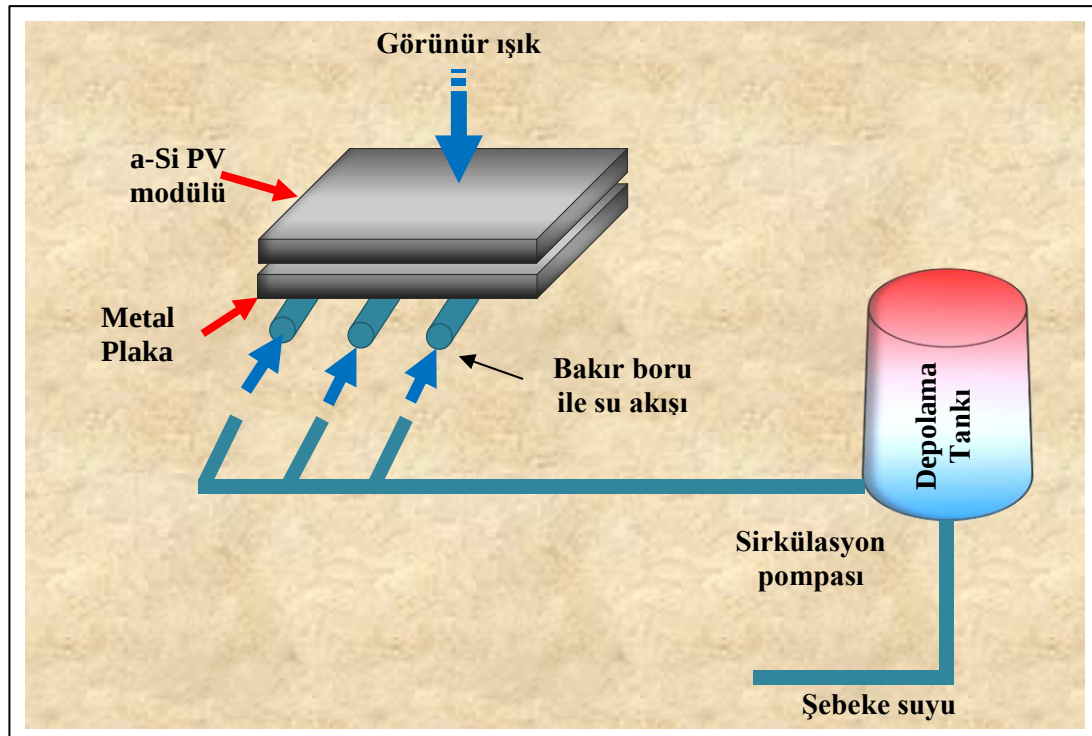
Şekil 2.10: Üç farklı geometride mikro kanallar dizisi içeren düz levhalı ısı boruları.



Şekil 2.11: Mikro kanallı düz levha ısı boru soğutmalı PV/T modüller: a. Hava soğutmalı, b. Su soğutmalı.

## 2.2. Fotovoltaik Termal (PV/T) Enerji Sistemlerinin Elektriksel ve Isıl Olarak İncelenmesi

Tayland'da bulunan Bang Lamung Hastanesinde 50 metrekareye kurulmuş PV/T sistem sayesinde her gün 70 °C sıcaklıkta 2500 litre su elde edilmektedir. Tayland'da bulunan Queen Skirit Hastanesinde fizyoterapi için gerekli olan ılık suyun temini fotovoltaik ısı enerjisi sistemi sayesinde sağlanmaktadır.



PV modüllerinin soğutulması elektrik verimini artırır. Doğal veya cebri hava sirkülasyonu, ticari PV modülün arka tarafındaki atık ısının giderilmesi için basit ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Ancak ortam hava sıcaklığı 20 °C'nin üzerinde ise bu yöntemin etkinliği azalır. Hava yerine su ile PV modülünün soğutulması daha pahalıdır ama şebekeden gelen su sıcaklığının yıl boyunca 20 °C'nin altında olması nedeniyle tercih edilmektedir [3].

PV modüllerinde yaygın olarak kullanılan malzemeler pc-Si (polycrystalline Silicon, çok kristalli Silikon), cam, alüminyum çerçeve ve diğer laminasyon malzemeleridir (EVA, vb.). Reflektör malzemeleri olarak genelde alüminyum (reflektör) ve galvaniz kaplı demir (kurulum malzemesi) kullanılmaktadır. Isı geri kazanım malzemeleri olarak bakır (levha + borular) - PUR (yalıtım), alüminyum (kollektör arka kapak), cam (cam kaplamalı PVT sistemleri için), alüminyum (sadece camlı PVT sistemleri için ek kollektör çerçevesi) malzemeleri kullanılmaktadır [3].

“Hottel-Whiller-Bliss denklemleri güneş enerjisi toplayıcı sistemlerin performanslarını ölçmek için kullanılmaktadır. Karma PV/T toplayıcı sistemlerin elektrik ve ısı performanslarının analizi için Hottel-Whiller-Bliss denklemleri kullanılmaktadır [3].

### 2.2.1. PV/T Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları

- PV/T paneller sayesinde kısıtlı alanda geri kazanılan ısı enerjisi nedeniyle toplam verimin önemli ölçüde artması.
- Ülkemizde PV/T sistemlerden birim alandan birim zamanda ortalama 110 Watt/m<sup>2</sup> elektrik, 300 Watt/m<sup>2</sup> ısı enerjisi elde edilebilir. Fakat PV/T sistemler sadece ısı gereksinimi olan binalar için uygun değildir (Bu durumda vakum tüplü sistemlerden 550 Watt/m<sup>2</sup> ısı sağlanabilir).
- Tek sistem ile elektrik ve ısı enerjisi birlikte elde edilebilir ve fotovoltaik sistemin daha dengeli ve verimli çalışması sağlanır.
- PV/T sistemler yalın fotovoltaik sistemlerden %25 daha maliyetli olmakla birlikte ilk yatırım maliyetlerinin kısa süre içinde geri kazanımı mümkündür.

PV/T sistemlerde güneş enerjisinden elektrik ve ısı enerjisinin birlikte üretilmesi sebebiyle yalın PV toplayıcılara göre sistemin karmaşıklığı, ilk yatırım ve bakım-

onarım maliyetleri artar. Ayrıca performans değerlendirmesinde soğutucu akışkanın zorlanmış sirkülasyonu için kullanılacak enerjiyi dikkate almak gerekir [3].

PV/T sistemde elektrik verimi ısı kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişir. Soğutucu akışkan sıcaklığı PV modülü soğutacak kadar düşük, aynı zamanda ön ısıtmaya yetecek kadar yüksek olmalıdır [3].

PV/T sistemin bir avantajı da çalışma koşullarına göre esnek olmasıdır, elektrik –ısı performans oranı kurulum yerinin ihtiyaçlarına göre herhangi bir zamanda değiştirilebilir optimize edilebilmektedir. PV modül sıcaklığı arttığında fotovoltaik dönüşüm verimi PV modülün enerji bandı genişliğine bağlı olarak azalır. Bir güneş pilindeki her kayıp mekanizması voltaj ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişir [3].

Günümüzde PV sistemler ile karşılaştırıldığında PV/T pazarı oldukça küçüktür, ancak PV/T sistemlere olan ilgi giderek artmaktadır. Basit bir su/hava soğutmalı düz toplayıcı karma PV/T güneş enerji sisteminin toplam elektrik ve ısı verimi düşüktür. Bu nedenle günümüze kadar performansları deneysel olarak incelenmiş, ticari açıdan efektif olamamışlardır. Bu sistemleri ticari olarak uygulanabilir kılmak için, sistem konfigürasyonlarındaki gelişmelerden faydalanılmakta, PV emici şekli, büyüklüğü ve malzemeleri değiştirilmekte, PV modülün kenarlarına çeşitli türde dağınık reflektörleri veya düz yoğunlaştırıcıları birleştirme uygulamaları yapılmaktadır. Bir PV/T sistemin toplam enerji çıktısı PV sisteme göre önemli miktarda yüksek olup, ısı bileşenlerin ek maliyetlerinin düşürüldüğü oranda mali açıdan da üstünlüğünü göstermeye başlayacaktır. Sistem performansını iyileştirmek için, basit açık hava kanalı, dikdörtgen tünelli tek geçiş, spiral akış emici toplayıcı, hava kanalının ortasında asılı duran ince metalik sac, hava kanalının arka duvarındaki yüzgeçler vb. PVC emici yüzeyler kullanılabilmektedir [7].

## 2.3. Mevcut Olan PV/T Tiplerinin Genel Özellikleri ve Karakteristik Özellikleri

Tablo 2.1: PV/T kollektör çeşitlerinin avantaj ve dezavantajları.

| PV/T Tipleri     | Ortalama Verimlilikler (%) | Avantajlar                                                                                                               | Dezavantajlar                                                                                                                    |
|------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hava bazlı       | 24-47                      | Maliyeti ucuz<br>Basit yapı                                                                                              | Düşük termal kütle<br>Yüksek hava hacmi<br>Etkili olmayan ısı giderme<br>Yüksek ısı kaybı<br>Hala yüksek PV çalışma sıcaklıkları |
| Su bazlı         | 33-59                      | Maliyeti ucuz<br>Direkt katkı sağlar<br>Yüksek termal kütle<br>Düşük akış hacmi                                          | Stabil olmayan ısı giderme<br>Karışık yapı<br>Olası boruda donma tehlikesi                                                       |
| Soğutucu bazlı   | 56-75                      | Düşük PV sıcaklığı<br>Kararlı performans<br>Yüksek verimlilik<br>Etkili ısı giderme                                      | Sızdırma riski<br>Dengeli olmayan sıvı dağılımı<br>Yüksek maliyet<br>İşletmesi zor                                               |
| Isı borusu bazlı | 42-68                      | Düşük PV sıcaklığı<br>Kararlı performans<br>Yüksek güneş verimliliği<br>Yüksek termal kütle<br>Güç gereksinimini azaltır | Yüksek maliyet<br>Hassas bir yapıda olmasından dolayı zarar görme olasılığı yüksek<br>Karışık yapı                               |

Yukarıdaki tablo incelendiğinde hava esaslı ve su esaslı PV/T sistemlerin daha ucuz maliyete sahip olduğu, soğutucu bazlı ve ısı borulu tiplerin ise yüksek maliyetli olduğu görülmektedir. Su bazlı ve ısı borulu tipler karmaşık yapılara sahiptir. Hava esaslı PV/T en basit yapıya sahip olan tiptir. En yüksek verimlilik değerlerine soğutucu

bazlı tiplerde ulaşılırken verim bakımından en düşük olanlar hava bazlı tiplerdir. Hava bazlı ve su bazlı PV/T tipleri hem ucuzdur hem de işletme bakımından risksizdir. Bu nedenle uygulamalar için daha pratik yöntemler olarak görölmektedir. Soğutucu bazlı tipler düşük çalışma sıcaklığına sahip olmalarından dolayı güneş dönüşüm verimliliğı yüksektir buna mukabil ısı borulu tipler ısıyı PV hücrelerinden anlık olarak çekmelerinden dolayı ve ısı borusundaki akışkanın çalışma sıcaklığı kontrol edilebilirse güneş dönüşüm verimliliğı önemli ölçüde artmaktadır. Sonuç olarak düşük termal kütle nedeniyle hava bazlı tiplerin ısıyı uzaklaştırıcı etkinliğı düşüktür, su esaslı tiplerde de çalışma periyodu esnasında suyun sıcaklığının artmasına bağılı olarak ısıyı dağıtma özelliğı düşmektedir. Soğutucu tiplerin ekipmanın belirli bölümleri için gerekli olan basınçlandırma ve basınçsızlaştırmaya bağılı olarak çalışma esnasında idare edilmesi zordur, ayrıca sızdırma riski ve akışkanın dengesiz dağılma riski yüksektir. Isı bazlı PV/T sistemleri için en büyük engel maliyet sorunudur. [8]

Su esaslı tiplerin PV çalışma sıcaklıkları yüksektir. Boruların içindeki suyun donma olasılığı mevcuttur. Isıl işlem etkinliğı kararsızdır. Karmaşık yapıya sahiptir. Maliyeti düşüktür. Yüksek termal kütle mevcuttur. Düşük akış hacminin olması bir avantajdır. Düz yapıya sahip bina çatıları, sistemin kurulumu için uygundur. Elde edilen sıcak su harici bir depoda saklanması mümkündür. Camlı özellikte olanlarda yüksek termal performans, camsız özellikte olanlarda ise yüksek elektriksel performans elde edilmektedir. [14]

Hava esaslı PV/T sistemleri en yaygın kullanılan PV/T teknolojilerinden biridir. Basit bir yapıya sahiptir ve maliyetleri düşüktür. Termal kütle mevcudiyetinin az olması dezavantajdır. Hava hacminin fazla olması dezavantajdır. ısıyı dağıtma etkinliğı düşüktür. Isı kaybı fazladır. Ayrıca düşük yoğunluğı nedeniyle transfer hacmi, sıvı tipli olanlara göre çok daha yüksek olmak zorundadır, düşük hacimli uygulamalar için uygun değıildir. Büyük hacimli borular estetik açıdan hoş durmamaktadır. [9] Gürültüye neden olabilmektedir. Avrupa ve Kuzey Amerika pazarlarına dayalı proje uygulaması için daha fazla tercih edilmektedir. Pratikte řu an için en popüler PV/T uygulamasıdır. Düşük işletme maliyetine sahiptir ve minimum malzeme kullanılmaktadır. Sızıntı olması durumunda herhangi bir hasara neden olmamaktadır. Kollektör sıvısının donma veya kaynama sıkıntısı yoktur.[10]

Soğutucu bazlı tipler düşük PV çalışma sıcaklığına sahiptir. Performans bakımından stabildir. Yüksek verimliliğı sahiptir. Isı dağıtma özelliğı efektiftir.

Sızdırma tehlikesi mevcuttur. Sıvı dağıtımı dengesizdir. Yüksek maliyetlidir ve işletilmesi zordur.

Isı borulu tipler düşük PV çalışma sıcaklığına sahiptir. Performansı stabildir. Yüksek güneş verimliliği mevcuttur. Isı dağıtma özelliği efektiftir. Gereken güç miktarı daha azdır. Bu avantajlarının yanında maliyeti yüksektir, yapısı karmaşıktır ve hassas bir yapıda olup zarar görme olasılığı mevcuttur.

Hava ve su bazlı tipler nispeten olgun teknolojilerdir ve uygulamalı projelerde yaygın olarak kullanılmakta olup, refrakter ve ısı-boru tabanlı sistem hala araştırma aşamasındadır ve geniş uygulamalarını engelleyen bazı teknik ve ekonomik engeller hala devam etmektedir. [8]

## **2.4. Değerlendirme Standartları**

Binaların Enerji Performansı Standardı (EN 153161; 2007): Binaların tüm enerji kayıp ve kazançlarını tanımlayan bir standarttır. [2]

Değerlendirme standartları olarak EN 12975, EN 12976, EN 12977, ISO 9806, IEC (61215, 61646, 61730) IEEE (1262 ve 929) kullanılabilir. PV/T sistemlerin ekonomik verimlilikleri yaşam döngüsü maliyeti (LCC), amorti etme süresi (CPT), çevre açısından katkısı enerji amorti etme süresi (EPBT) ve sera gazı amorti etme süresi (GPBT) ile ölçülmektedir. PV/T sistemler enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve güneş enerjisinden yararlanma oranı vb. parametrelere göre değerlendirilmektedir. [8]

### 3. FOTOVOLTAİK-TERMAL KOLLEKTÖR SİSTEMLERİNİN ANALİZLERİ

Genel enerji verimliliği, toplanan elektrik ve ısı enerjisinin, fotovoltaik emici yüzeye çarparak gelen güneş ışınlarına oranıdır. Termodinamiğin birinci yasasından elde edilmekte olup, güneş ışınlamından dönüştürülen enerjinin yüzdelerini belirtir. Bir PV/T modülünde elektrik verimliliği termal verimliliğinden çok daha düşüktür ve dolayısıyla genel verim büyük ölçüde korumanın termal enerjisine dayanacaktır. Genel enerji verimliliği, enerji sınıfı açısından ısı ve elektrik enerjisi arasındaki farkı göz ardı eder ve bu nedenle PV/T sistemlerinde enerji performansını tam olarak doğrulamak için yetersizdir. [8]

Genel ekserji verimliliği, ısı ve elektriği etkileyen enerji derecelerinin farklılıklarını dikkate alır ve Carnot Döngüsü teorisini kullanarak düşük dereceli termal enerjinin eşdeğer yüksek dereceli elektrik enerjisine dönüştürülmesini içerir.[8]

$$e_0 = e_{th} + e_e = (\xi_{th} + \xi_e)I = \xi_0 \quad (3.1)$$

Termal ve elektrik ekserjinin toplamı ile genel ekserji bulunmaktadır.

$\xi_{th} + \xi_e$  ; termal ve elektrik ekserji verimliliklerinin toplamını göstermektedir.

$$e_{th} = n_{cu} Q_u = n_c n_{th} I = \xi_{th} I = \text{termal toplam ekserji} \quad (3.2)$$

$$n_c = (1 - (293K / (293K + (t_{wm} - t_a)))) \quad (3.3)$$

$T_{wm}$  = Çalışma ortamının son sıcaklığıdır.

Ekserji verimliliği, ısı ve elektrik arasındaki enerji sınıfı farkını dikkate alır ve bu nedenle, PV/T sistemlerinin performansını değerlendirmek için daha rasyonel bir indekstir. [8]

PV/T sistemlerini değerlendirmek için kullanılan bir diğer parametre güneşten yararlanma oranıdır. [8]

$$f = 1/2 \times ((Q_{LOAD,T} - Q_{AUX,T} / Q_{LOAD,T}) + (Q_{LOAD,E} - Q_{AUX,E} / Q_{LOAD,E})) \quad (3.4)$$

$F = \frac{1}{2} [(toplam\ termal\ yük - yardımcı\ ısı\ gereksinimi) / toplam\ termal\ yük + (toplam\ elektriksel\ yük - yardımcı\ elektrik\ gereksinimi) / toplam\ elektriksel\ yük]$

Sıcak su sistemleri için bu katsayı kış aylarında azalır ve yaz aylarında artarken yıllık ortalama 0,49 değerlerini bulabilmektedir.

Sonuç olarak PV/T sistemlerinin analizi için enerji ve ekserji verimlilik parametreleri ana kriterler olup bazen güneşten faydalanma oranları gibi ek parametrelerden de faydalanılmaktadır.

### 3.1. Isıl Analiz

Fotovoltaik-termal sistemler sürekli akışlı bir kontrol hacmi (açık sistem) olarak düşünülmekte ve termodinamik 1. kanundan faydalanarak termodinamik analizde bulunmak için, kontrol hacmi sınırlarından geçen kütle ve enerji akılarından faydalanılmaktadır. [7]

Bir sistem için enerji dengesi;

$$f = 1/2 \times ((Q_{LOAD,T} - Q_{AUX,T} / Q_{LOAD,T}) + (Q_{LOAD,E} - Q_{AUX,E} / Q_{LOAD,E})) \quad (3.4)$$

$$e_{depola} = e_{girdi} - e_{çikti} \quad (3.5)$$

Kontrol hacmine veya kontrol hacminden sisteme belirli bir zamandaki kütle geçişi aynı zamanda da kontrol hacmindeki kütle değişimine eşittir. [7]

$$\dot{m}_g - \dot{m}_ç = \Delta \dot{m}_{kh} \quad (kg/s) \quad (3.6)$$

Eğer sistem sürekli akışlı, daimi bir kontrol hacminden meydana geliyorsa kontrol hacminde herhangi bir değişim olmayacaktır. Sürekli akışlı sistemler için, [7]

$$\dot{Q}_{THERMAL} = \Delta \dot{m} (h_ç - h_g) \quad (kW) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{THERMAL} = \Delta \dot{m} c_p (T_ç - T_g) \quad (kW)$$

Proses analizi yapmak için termodinamiğin 2. kanunundan dolayısıyla ekserji ve entropi kavramlarından faydalanmamız gerekmektedir. Ekserji herhangi bir maddenin çevresiyle tersinir olarak termodinamik dengede olması durumunda kendisinden elde edilebilecek maksimum ıştır. Entropi, ısı enerjisinin tamamını mekanik enerjiye dönüştürülemeyeceğini gösteren bir düzensizlik ölçüsüdür. [7]

Termodinamik parametreler;

- Enerji verimliliği:

$$\eta = \text{çıktı ürünlerindeki enerji} / \text{proses girdilerindeki enerji} = E_{\text{girdi}} / E_{\text{çıktı}} \quad (3.8)$$

- Ekserji verimliliği:

$$\psi = \text{çıktı ürünlerindeki ekserji} / \text{proses girdilerindeki ekserji} = Ex_{\text{çıktı}} / Ex_{\text{girdi}} \quad (3.9)$$

- Sürdürülebilirlik indeksi:

$$SI = 1 - \psi^{-1} \quad (3.10)$$

### 3.1.1. Fotovoltaik Sistem Analizi

- Enerji dengesi;

$$En_{pv} = En_{pv, \text{elektrik}} + En_{pv, \text{termal}} \quad (3.11)$$

- Sistem tarafından üretilen elektrik enerjisi [7]:

$$En_{pv, \text{elektrik}} = V_{oc} I_{sc} \quad (3.12)$$

- Isı kayıpları [7]:

$$En_{pv, \text{termal}} = h_{ca} A_c (T_c - T_a) \quad (3.13)$$

- Güneş hücre sıcaklığı [7]:

$$4T_C^5 - 3T_a T_C^4 - T_a T_S = 0 \quad (3.14)$$

- Çevreye olan ısı kaybı [7]:

$$h_{ca} = 2,8 + (3,0 x_r) \quad 0 \leq v_r \leq 7 \text{ ms}^{-1} \quad (3.15)$$

- Enerji dengesi [7]:

$$E_{NPV} = V_{OC} I_{SC} + h_{CA} A_C (T_C - T_a) \quad (3.16)$$

Enerji verimliliği; ışınımsal enerjinin elektrik enerjisine dönüşme kapasitesi olup, elektrik çıkış gücü fotovoltaiik cihazın çıkış voltajının ve akımının bir ürünüdür.[7]

$$\eta_{PV} = E_{NPV} / (I_S X A_C) = (V_{OC} I_{SC} + h_{CA} A_C (T_C - T_a)) / I_S X A_C \quad (3.17)$$

Ekserji dengesi; mevcut enerjinin tamamının faydalı olarak kullanılması hedefidir. Ekserji üretimi;

- Elektrik kazancı
- İç kayıp
- Dış kayıp

$$E_{XPV} = E_{XPV,elektrik} - E_{XPV,termal} - E_{XPV-d,elektrik} \quad (3.18)$$

- Elektrik ekserjisi:

$$E_{XPV,elektrik} = V_{OC} I_{SC} \quad (3.19)$$

- Elektrik ekserji kaybı:

$$E_{XPV-d,elektrik} = V_{OC} I_{SC} - V_m I_m \quad (3.20)$$

- Dışsal kayıp:

$$EX_{PV,thermal} = (1 - T_a/T_c) \times [h_{ca} A_c (T_c - T_a)] \quad (3.21)$$

- Toplam ekserji:

$$EX_{PV} = V_m I_m - (1 - T_a/T_c) \times [h_{ca} A_c (T_c - T_a)] \quad (3.22)$$

Ekserji verimliliği; sistemin ekserji değerinin sistem yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserji değerine oranıdır. Güneş kolektörünün yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserji değerine oranı ile bulunur.

$$\eta_{PV} = EX_{PV} / EX_{güneş} \times A_c$$

$$= (V_m I_m - (1 - T_a/T_c) \times [h_{ca} A_c (T_c - T_a)]) / [(1 - T_a/T_s) \times I_s \times A_c] \quad (3.23)$$

- Güneş radyasyonunun ekserjisi:

$$EX_{güneş} = [1 - (T_a/T_s)] \times I_s$$

$$EX_{güneş} = [1 + (1/3) (T_a/T_s)^4 - (4/3) (T_a/T_s)] \times I_s \quad (3.24)$$

$$EX_{güneş} = I_{be} \times [1 - (4/3) (T_a/T_s)] + I_{dif} [1 - (4/3) (T_a/T_s^*)]$$

$$T_s/T_s^* = 0,9562 + 0,2777 \ln(1/f) + 0,0511f$$

- $T_s$  = Güneş radyasyon sıcaklığı; 5777 K
- $f$  = difüz yansıtma katsayısı

### 3.1.2. Fotovoltaik Termal Sistem Analizi

Fotovoltaik sistemlerin ısı sistemler ile yan yana kullanılmasına nazaran daha az yer kaplaması ve ortak kullanım sayesinde ekipman masraflarının azaltılması gibi üstünlükleri vardır. Enerji dengesi; [7]

$$Q_{u,PV-T} = Q_T - Q_L \quad (3.25)$$

$$Q_{u,PV-T} = A_c F_R [(\tau\alpha)_{eff} I_s - U_L (T_i - T_a)]$$

- Isı kazanç faktörü;  $F_R$
- Etkin geçirgenlik soğurma katsayısı  $(\tau\alpha)_{eff}$
- Çalışma sıvısının kollektöre giriş sıcaklığı;  $T_i$
- Toplam kollektör ısı kayıp katsayısı;  $U_L$

- Kollektör ısı kazanç faktörü:

$$F_R = (\dot{m} C_p) / (A_c U_L) [1 - \exp [(-A_c U_L F') / (\dot{m} C_p)]] \quad (3.26)$$

- Kollektör verim faktörü:

$$F' = (1/U_L) / [W[1/(U_L[D+(W-D)F]) + (1/C_b) + 1/(\pi D h_f)]] \quad (3.27)$$

- $H_f$  : Boruların içindeki ısı transfer katsayısı
- $W$  : ısı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk
- $D$  : Borunun iç çapı (m)
- $F$  : standart kanat verimi
- $C_b$ : İletkenlik

- Enerji verimliliği;

$$\eta_{PV-T} = \dot{Q}_{u,PV-T} / I_s A_c = (F_R [(\tau\alpha)_{eff} I_s - U_L (T_i - T_a)]) / I_s \quad (3.28)$$

Isıl performans; su giriş ve ortam sıcaklığına kollektör üzerine gelen güneş ışınlarının yoğunluğuna ve yansıtıcıya bağlıdır.

$$\eta_{PV-T,D} = \eta_E / \eta_{güç} + \eta_{I,PV-T} \quad (3.29)$$

Ekserji Dengesi, fotovoltaik sistemlerden farklı olarak atık enerji faydalı işe çevrildiği için kazanç olarak alınmaktadır.

$$EX_{PV-T} = EX_{PV-T,elektrik} + EX_{PV-T,termal} - EX_{PV-T,d-elektrik}$$

$$EX_{PV-T,elektrik} - EX_{PV-T,d-elektrik} = V_m I_m \quad (3.30)$$

$$EX_{PV-T} = V_m I_m + [1 - (T_i/T_a)] Q_{u,PV-T}$$

Ekserji termal ve elektrik ekserjilerin toplamıdır.

- Ekserji verimliliği; [7]

$$\eta_{PV-T} = EX_{PV-T} / EX_{güneş} = [V_m I_m + (1 - (T_a/T_i)) Q_{u,PV-T}] / [(1 - (T_a/T_s)) A_c I_s] \quad (3.31)$$

### 3.2. Termal ve Elektriksel Verimler

DeneySEL PV/T modellerinin termal verimliliği, gelen güneş ışımasının (G), giriş akışkan sıcaklığının ( $T_{in}$ ) ve ortam sıcaklığının ( $T_a$ ) fonksiyonu olarak belirlenir. PV/T sistemlerinin elektriksel verimliliği, çalışma sıcaklıklarının ( $T_{PV}$ ) fonksiyonu olarak sistemde ne kadar PV modülü varsa dikkate alınarak belirlenmektedir. [5]

Sistem termal verimliliğinin tespiti için yapılan testler sırasında, PV modülleri gerçek sistem çalışmasını simüle etmek ve PV modülünün elektrik yerine ısıya dönüşen güneş radyasyonu ile aşırı ısınmasını önlemek için yük ile bağlama yöntemi tercih edilebilmektedir. [5]

$$\eta_{th} = \dot{m} C_p (T_o - T_i) / G A_a \quad (3.32)$$

- Termal verim = sıvı kütle akış hızı x sıvı özgül ısı x (giriş sıvı sıcaklığı - çıkış sıvı sıcaklığı) / (PV/T sistem boşluk alanı)
- Termal verim =  $T_i - T_a / G$
- $T_a$  = Ortam Sıcaklığı

Düz plakalı bir PV/T sistemde termal verim, faydalı termal verimin, genel gelen radyasyona oranı ile bulunmaktadır. [8]

$$\eta_{th} = \dot{m} Q_u / I \quad (3.33)$$

$$Q_u = \dot{m} C_p (t_{out} - t_i) \quad (3.34)$$

Faydalı verim, kütle akış hızı ile akışkanın ısı kapasitesinin toplayıcı giriş ve çıkışlarının arasındaki sıcaklık farkının çarpımı ile bulunmaktadır. Ayrıca alternatif olarak aşağıdaki formül ile de hesaplanabilmektedir. (kollektör alanı, cam tabakanın geçirgenlik-emme etkisi, termal kayıp verimi, hava sıcaklığı, PV hücrelerden elde edilen elektrik enerjisi, emici plaka sıcaklığı gibi parametreler kullanılmaktadır.)[8]

$$Q_u = A_c [I(\tau\alpha) - U_L(t_{p,m} - t_a)] \quad (3.35)$$

Emici plaka sıcaklığını hesaplamak, farklı kollektör tasarımları ve çalışma ortamı özellikleri nedeniyle zordur. Hesaplamayı yapabilmek için yukarıdaki denklem Hottel ve Whillier tarafından sıvı giriş sıcaklığı ile değiştirilmiştir. Sıvı giriş sıcaklığı güneş hava ve sıvı kollektörlerinin dizayn ve değerlendirilmesinde sıkça kullanılan bir parametredir. ( $t_i$ )

$$Q_{u,PV-T} = A_c F_R [I(\tau\alpha)_{eff} I_S - U_L(T_i - T_a)] \quad (3.36)$$

$F_R$ , ısı giderme faktörü olup aşağıdaki formülden bulunmaktadır.

$$F_R / F' = I C_p / U_L F' [1 - \exp(-U_L F' / I C_p)] \quad (3.37)$$

- Su için;

$$F' = 1 / U_L / (W [1 / U_L [D_0 + (W - D_0) F] + (1 / C_b) + (1 / \pi D_i h_{wm})]) \quad (3.38)$$

- Hava için;

$$F' = 1 / (1 + [U_L / (h_{wm} A / A_c + 1 / (1 / h_r + 1 / h_{wm}))]) \quad (3.39)$$

- $W$ ; Borular arasındaki uzaklık
- $D_o, D_i$ ; Boruların iç ve dış çapları
- $C_b$ ; Kanatçık ve boru arasındaki iletkenlik
- $h_{wm}$ ; Çalışma şartlarındaki ısı transfer katsayısı
- $F$ ; Kanatçık verimi

$$F = \tanh \left[ \sqrt{U_L / K \delta} (W - D_0/2) \right] / \sqrt{U_L / K \delta} (W - D_0/2) \quad (3.40)$$

- K; kanatçıının termal iletkenlik katsayısı

Elektrik verimliliği esas olarak gelen güneş radyasyonu ve PV sıcaklığına ( $T_{PV}$ ) bağlıdır.

$$\eta_{el} = I_m V_m / G A_a \quad (3.41)$$

Maksimum güçte çalışan sistemin akım ve voltaj değerleri dikkate alınmaktadır.[5]

$$\eta_e = P_0 / I A_c \quad (3.42)$$

PV modülün elektriksel verimi, ölçülen çıkış gücünün güneş radyasyonuna oranı ile bulunmaktadır. [8]

Elektriksel verim hücrenin çalışma sıcaklığı arttıkça azalmaktadır.

$$\eta_e = \eta_{rc} [1 - \beta_{PV} (T_{PV} - T_{rc})] \quad (3.43)$$

Elektriksel verim: referans sıcaklıkta başlangıç elektrik verimliliği [1- hücre verimi sıcaklık katsayısı (PV hücre sıcaklığı- referans sıcaklığı)]

- Üretilen elektrik enerjisi:

$$Q_e = P_0 = \eta_e I A_c \quad (3.44)$$

### 3.3. Maliyet ve Çevreye Etkisi Bakımından Değerlendirme

PV/T sistemlerde, sistem kurulumunun sermaye maliyetini ve sistem ömrü boyunca bakım maliyetini hesaba katan yaşam döngüsü maliyet yöntemi kullanılmaktadır. Bu parametrelere ilaveten enflasyon, vergi ve şirket iskonto oranları gibi ilgili zamanın da dikkate alınması gerekmektedir. [8]

PV/T sistemin ekonomik değerini değerlendirmek için basitleştirilmiş bir yaklaşım, ilgili ürünleri ve bakım maliyetlerini göz ardı eden ve bu nedenle yanlış olan maliyet geri ödeme süresini (CPT) kullanmaktır. [8]

Çevresel değerlendirme için enerji geri ödeme süresi (EPBT) ve sera gazı geri ödeme süresi (GPBT) parametreleri kullanılabilmektedir. EPBT, PV/T sistemin yıllık enerji gücü ve gömülü enerjisi (Gömülü enerjiyi, bir maddeden birim miktar üretmek için kullanılan enerji olarak tanımlayabiliriz.) arasındaki bir orandır. Burada kastedilen, üretim aşamasında PV/T' nin üretilmesi için gerekli olan enerjinin miktarıdır. Enerji miktarının artması aynı zamanda da sera gazı miktarının artması ile doğru orantılıdır.

$$EPBT = (\sum_{pvt} + \sum_{bos} - \sum_{mt}) / (E_{pv} + E_{th} + E_{ac}) \quad (3.45)$$

EPBT= (PV/T gömülü enerjisi +sistemin dengesi+ yapı malzemelerinin değişimi) / yıllık faydalı elektrik üretimi +yıllık faydalı ısı kazancı +Termal yük azaltma nedeniyle HVAC sistemlerinin yıllık elektrik tasarrufuru)

$$GPBT = (\Omega_{pvt} + \Omega_{bos} - \Omega_{mtl}) / (Z_{pv} + Z_{th} + Z_{ac}) \quad (3.46)$$

GPBT= Green houses gases (veya CO<sub>2</sub> eşdeğeri) / (PV/T) işletmesi nedeniyle yerel enerji santralinden yıllık sera gazı emisyonunun azaltılması

## 4. HOTTEL-WHILLIER DENKLEMLERİ İLE SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Tek boyutlu kararlı hal modeli baz alınarak sistemin modellenebilmesi için Hottel- Whillier denklemleri kullanılmaktadır. [11]

- Isı kazancı (Q):

$$Q = AFR[(T_{\infty})PV * G - U_{loss}(T_i - T_a) \quad (4.1)$$

Düzenleme faktörü (FR), kollektör alanı (A), güneş radyasyonu (G), fotovoltaiik hücrelerde geçirgenlik-soğurma faktörü ((T<sub>a</sub>)PV), ısı kaybı katsayısı (U<sub>loss</sub>), giriş sıcaklığı (T<sub>i</sub>), ortam sıcaklığı (T<sub>a</sub>). [9]

- Kollektör ısı değiştirici düzeltme faktörü (FR); [9]

$$F_R = mC_p / AU_{loss} [1 - \exp(-AU_{loss}F' / mC_p)] \quad (4.2)$$

Kollektör ısı değiştirici düzeltme faktörü (FR); kollektördeki kütle akışı hızı (m) ve kollektör soğutucu maddesinin özgül ısısına (C<sub>p</sub>) bağlıdır.

- Kanatçık verimlilik faktörü (F); [9]

$$F = \tanh(M [(w-d)/2]) / M[(w-d)/2] \quad (4.3)$$

- PV hücresi ve emicinin termal iletkenlik katsayısı (M); [9]

$$M = \sqrt{U_{loss} / [(k_{abs}L_{abs}) + (k_{pv}L_{pv})]} \quad (4.4)$$

$$F' = (1/U_{loss}) / (w[U_{loss}(d+(w-d)F)] + (1/wh_{pv}A) + (1/\pi d_{fluid})) \quad (4.5)$$

- Ortalama sıcaklık farkı (T<sub>pm</sub>): [9]

$$T_{pm} = T_i + [(Qu / Ae) / (FR * UL)](1 - FR) \quad (4.6)$$

- PV/T sistemin elektriksel verimi:

$$\eta_e = 0,15(1 - 0,005(T_{pm} - NOCT)) \quad (4.7)$$

- PV/T sistemin termal verimliliği: [9]

$$\eta_{\text{termal}} = F_R(S \cdot \tau \alpha_{PV}) + (1 - S \cdot \tau \alpha_T) - F_R U_{\text{loss}} (T_i - T_a) / G \quad (4.8)$$

Bir PV/T kollektörün termal verimliliği, giriş sıcaklığı ( $T_i$ ), ortam sıcaklığı ( $T_a$ ), kollektör yüzeyine gelen ışıyım miktarı ( $G$ ), sızdırmazlık faktörü ( $s$ ), PV ve termal hücrenin emici ürün iletkenliğine bağlıdır.

- Anlık elektriksel verim: [12]

$$\eta_{pv} = E_{pv} / \xi A_c G = UI / \xi A_c G \quad (4.9)$$

## 5. PROJE YAKLAŞIMI

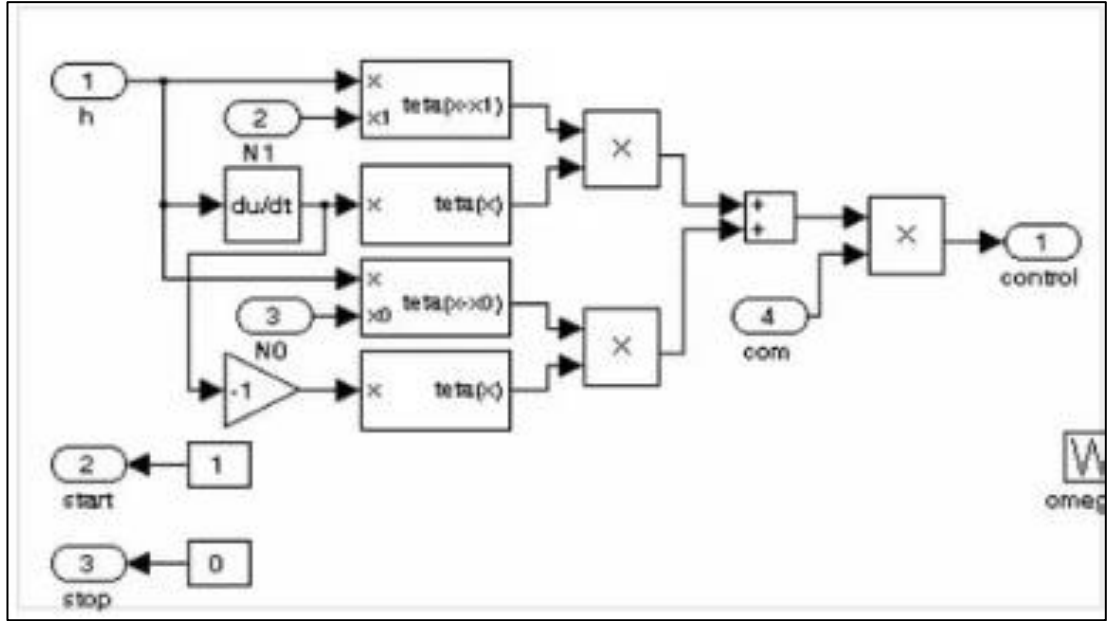
### 5.1. Matlab Simulink Programı

Dinamik sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve analizi için kullanılan bir yazılım paketidir. Son yıllarda akademik ve endüstriyel ortamlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır.

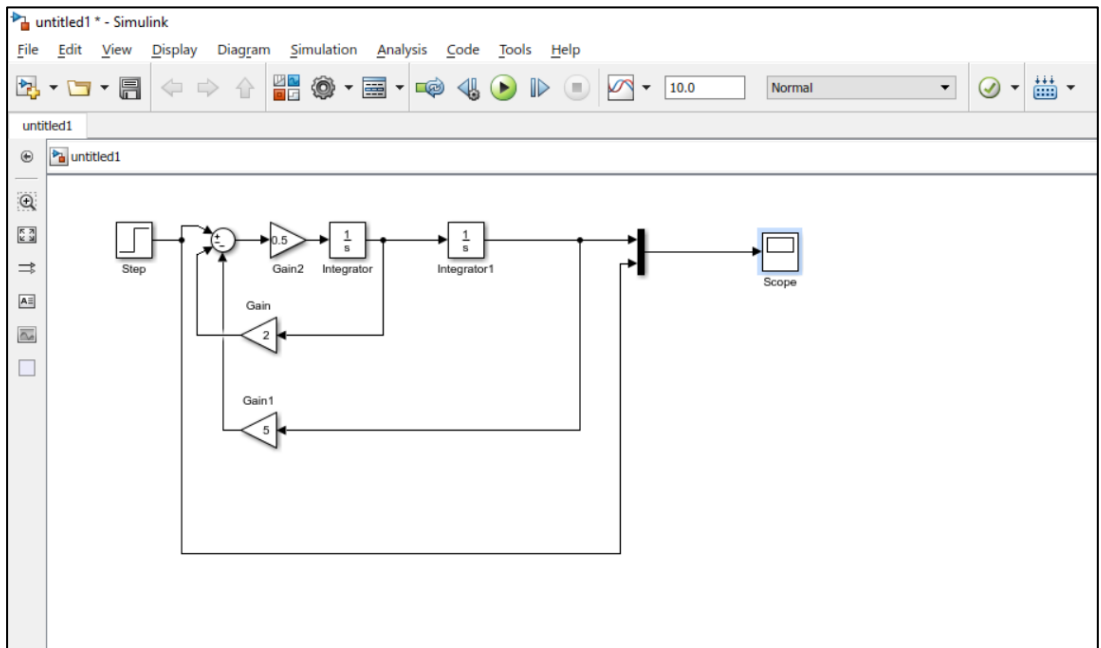
Simulink;

- İş akış kontrolü
- Isı, soğutma, süspansiyon ve fren sistemleri
- Sayısal işaret işleme ve haberleşme
- Diferansiyel denklem çözümü
- Durum-uzay modelleri
- Transfer fonksiyonları
- Neuro-Fuzzy sistem modelleme
- Elektrik devre çözümü
- Kontrol sistemleri (Uçuş kontrol, PID kontrolü)
- Dış ortam ile veri alışverişi
- Uzaktan ve web tabanlı kontrol
- Robotics çalışmaları

Gibi birçok elektrik, elektronik, finans, mekanik ve termodinamik gerçek dünya sistemini simüle edebilme özelliğine sahiptir.



Şekil 5.1: Simulink programı sistem kurma örneği.



Şekil 5.2: Simulink programı ekran arayüzü.

## 5.2. Uygulama

İstanbul şartlarında aylara göre Camlı sıvı esaslı PV/T (Glazed liqued type PV/T collector) sistemin termal ve elektriksel verimini analiz etmek amacıyla tek boyutlu

kararlı hal sisteminin matematiksel modellemesinde Hottel-Whillier denklemleri kullanılmış ve Matlab-Simulink programında modellemesi gerçekleştirilmiştir. Mevcut sistem 20 ve 30 yıl beklenen kullanım ömrü ile yüksek güvenilirliğe ve çok düşük bakım maliyetine sahiptir. Söz konusu sistem için elde edilen geri ödeme süresi değişmekle elektrik birim maliyetlerindeki değişikliklere bağlı olarak tahmini 6-7 sene civarındadır. Yeşil bina konseptlerinde kullanılabilmekte ve binalara kolayca monte edilebilmektedir.

Araştırma için sıvı esaslı PV/T sisteminin seçilmesinde günümüz ticari uygulamaları içinde en optimum koşulları sağlayan PV/T sistem modeli olmasının etkisi büyüktür. Hava esaslı sistemler ucuz olmalarına rağmen verimlilikleri düşüktür. Soğutma sıvısı esaslı sistemler hem pahalıdır hem işletmesi zordur hem de sızdırma riski taşımaktadır. Isı borusu bazlı tipler yeni bir teknoloji olup geliştirilme aşamasındadır ve daha çok özel uygulamalarda kullanılmaktadır, henüz ticarileşmemiştir. Maliyeti yüksektir ve hassas yapısından dolayı zarar görüp kullanım dışı kalma olasılığı mevcuttur bu nedenle kendi kendine sürdürülebilir bir sistem olma konusunda eksiklikleri mevcuttur.



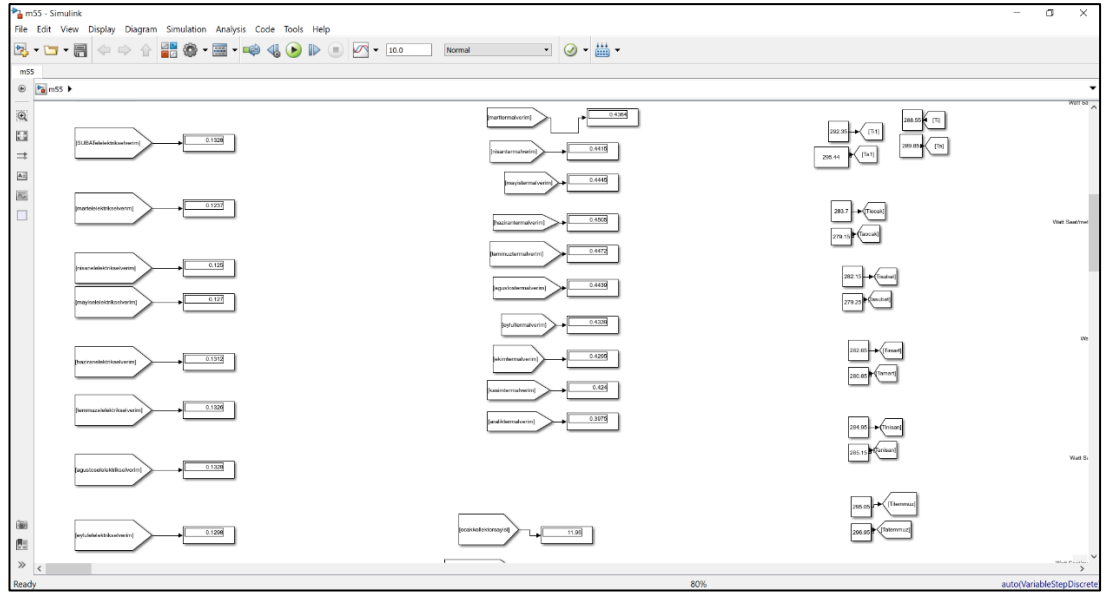
Şekil 5.3: Temsili Su bazlı PV/T sistemi.

Paketleme faktörü, "sert küre" atomları veya iyonları tarafından işgal edilen bir birim hücrenin hacminin fraksiyonudur. Birim hücre hacmine bölünerek (atomik sert küre modelini varsayarsak) birim hücre içindeki tüm atomların küre hacimlerinin toplamıdır. Boyutsuz bir sayıdır. Paketleme faktörü ayrıca atomik paketleme faktörü (APF), paketleme verimliliği veya paketleme fraksiyonu olarak da bilinir. Paketleme faktörü, bir birim hücrede atomların ne kadar yakından paketlenildiğini ve birim hücre içindeki atomların hacminin ve birim hücrenin hacminin oranı ile verildiğini gösterir. Atomik sistemlerde, konvansiyonel olarak paketleme faktörü, atomların rijit küreler olduğu varsayılarak belirlenir.

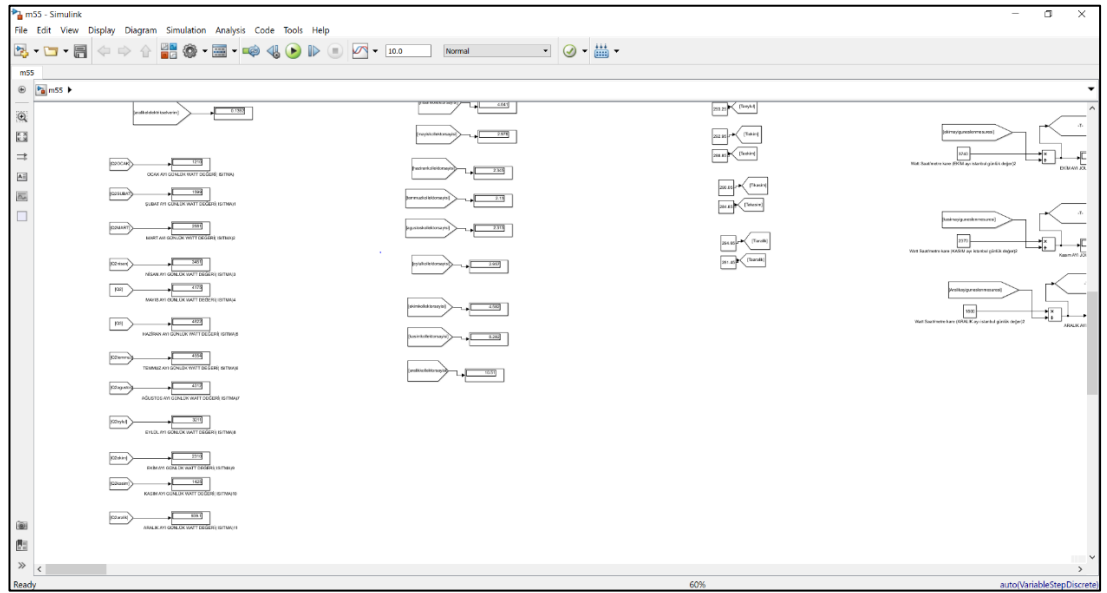
NOCT :Nominal test koşulları - U Akım - Gerilim eğrilerinin ölçümlerinin, hücre veya panele dikey 800 W/m<sup>2</sup>; 600 W/m<sup>2</sup>; 400 W/m<sup>2</sup> ve 200 W/m<sup>2</sup> ışıınım değerlerinde, 20°C çevre sıcaklığı derecesinde, 1m/s rüzgar hızında ve AM 1,5 güneş spektrumunda yapılması olup nominal operating cell temperature (nominal işletim hücresi sıcaklığı) anlamına gelmektedir. Bir solar hücrenin, 800 W/m<sup>2</sup> ışıınım, 1m/s rüzgâr ve 20 °C ortam sıcaklığı koşullarındaki sıcaklığı NOCT olarak isimlendirilir. Bu konuda yaklaşık bir değer olan 48 °C kabulü yapılabileceği gibi deneysel çalışmalardan elde edilen formüllerden de faydalanılabilmektedir.

NOCT, sistem tasarımcısı tarafından bir modülün sahada çalışacağı sıcaklığa kılavuzluk etmek için kullanılabilir ve bu nedenle farklı modül tasarımlarının performansını karşılaştırırken yararlı bir parametredir. Bununla birlikte, gerçek çalışma sıcaklığı doğrudan montaj yapısına, radyasyona, rüzgar hızına, ortam sıcaklığına, yerden ve yakındaki nesnelerden yansımalara, emisyonlara vb. bağlıdır.

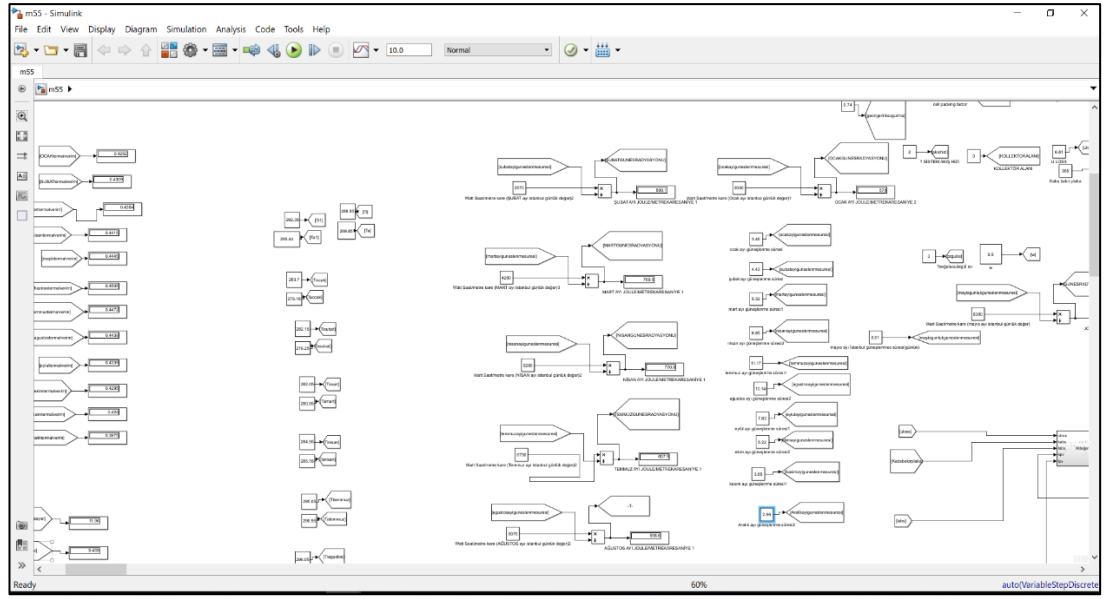
NOCT sayısını belirlemeye yönelik “*birincil yöntem*” olarak adlandırılan, hem IEC 61215 hem de IEC 61646 tarafından kullanılan dış mekân ölçüm yöntemidir ve evrensel olarak tüm PV modüllerine uygulanabilir.



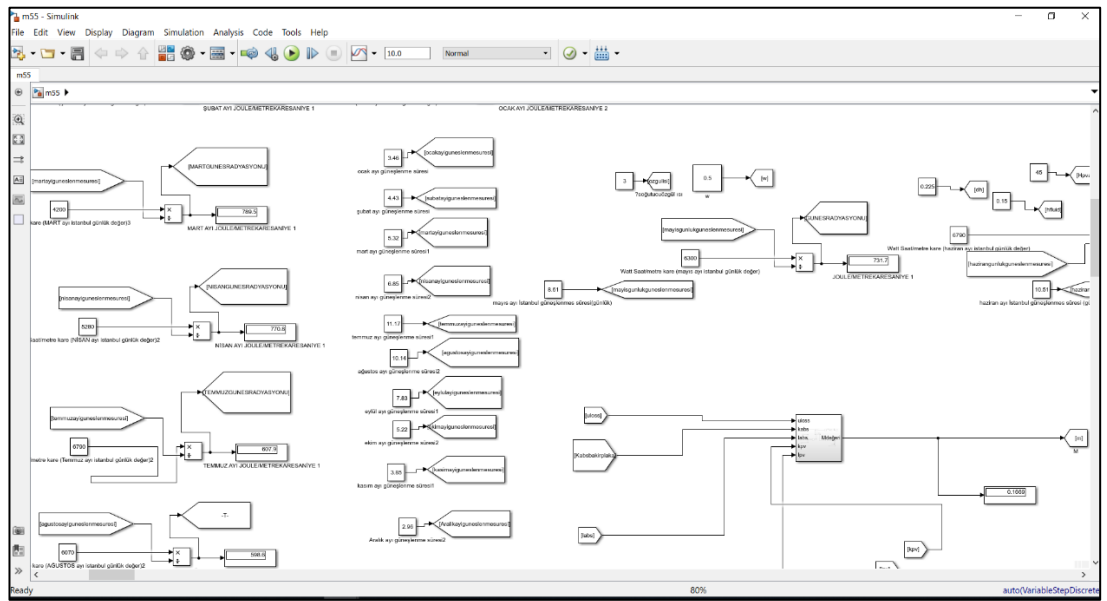
Şekil 5.4: Bulunan sonuçlar-1.



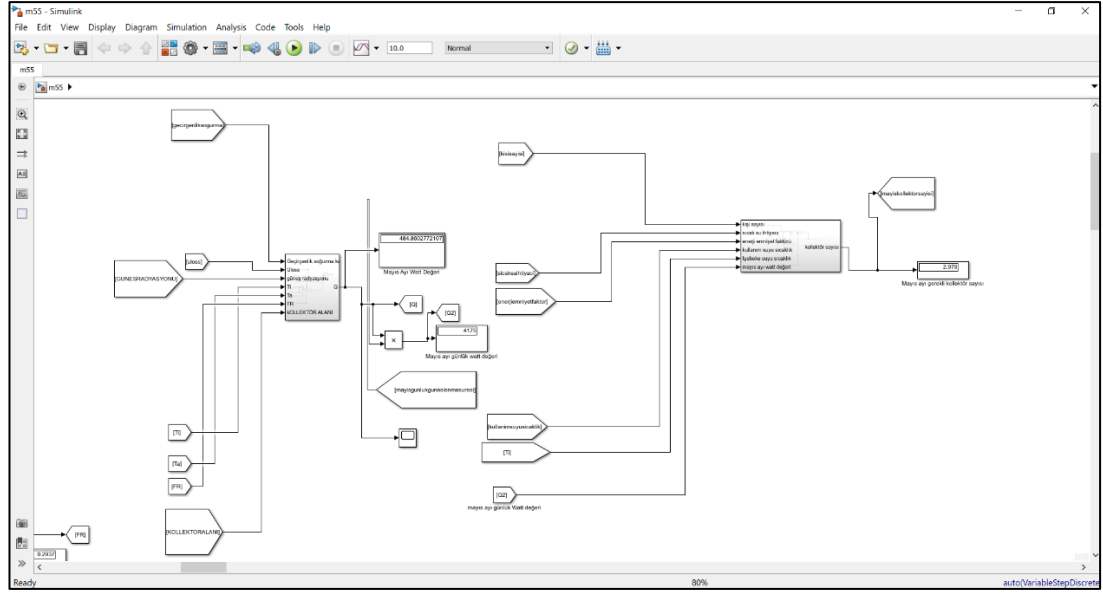
Şekil 5.5: Bulunan sonuçlar-2.



Şekil 5.6: Parametreler -1.



Şekil 5.7: Parametreler-2.



Şekil 5.8: Subsystemler(altsistemler).

### 5.3. Sonuçlar

Camlı sıvı esaslı PV/T (Glazed liqued type PV/T collector) sistemin termal ve elektriksel verimini analiz etmek amacıyla tek boyutlu kararlı hal sisteminin matematiksel modellenmesi sonucunda aylara göre ortalama sistem verimi %43,38 termal + %13,03 elektriksel verim değerlerine ulaşılmıştır. Literatürdeki araştırmalarda yer alan sonuçlar ile bulgular uyumludur. Elektriksel verimin %10'dan fazla olması sebebiyle ekonomik açıdan uygun bir yatırımdır. Su esaslı PV/T sistemler için ortalama en yüksek verimlilik değerlerinin (ticari uygulamalar için) literatürde %59 olması bakımından, bulunan %56,41 değeri İstanbul il koşulları açısından uygundur. (Hindistan'ın Chennai şehri için Elektriksel enerji ve mevcut sistemin toplam verimliliğine ilişkin bir çalışma International Journal of Research in Engineering and Technology makalesinde yayınlanmış olup, analiz sonucunda konut uygulamaları için fotovoltaik güneş enerjisi uygulamaları için sırasıyla %10-12, %53-58 sonuçlarına ulaşıldığı belirtilmiştir. -Dubey ve Tiwari 2009) [13]

Mayıs ayı verim değerleri daha yüksek olmasına rağmen güneşlenme süresinin uzunluğu nedeniyle haziran ayı günlük güç değerleri mayıs ayı günlük güç değerlerinden daha fazla olmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda güneşlenme süresinin önemli bir parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Güneş enerjisi uygulamalarında da kombine verim toplamı, sistemin elektriksel ve termal verim toplamı ile bulunmaktadır. PV/T sistemlerin diğer PV ve termal kollektör sistemlerine göre en bariz avantajı kombine verim bakımından üstünlüğüdür. Tek başına verim karşılaştırmalarında diğer sistemlere göre eksiklikleri mevcut olsa da sistem bazlı düşünüldüğünde PV/T sistemlerinin verim ortalamaları daha iyi değerler vermektedir.

Grafiklerden de anlaşılacağı gibi elektriksel verim değerleri kış aylarında daha iyi sonuçlar vermiştir. Genel bir yanlışlık güneş panellerinin elektrik üretimi için ısıya ihtiyaç duyduğu şeklindedir. Güneş panelleri güneşteki enerjiden faydalanırlar fakat güneşin ısınısını değil güneş ışınımını elektriğe çevirirler. Hava soğuk olduğunda aslında daha fazla elektrik üretilir ama güneşlenme süresinin azlığından dolayı faydalanabileceğimiz elektrik miktarı düşmektedir. Yazın hava sıcaklığının mevsim ortalamalarının altında olduğu zamanlarda elektriksel verimler artmaktadır.

Kullanım suyu sıcaklığı için gerekli olan doğal gaz miktarının büyük bir kısmının PV/T entegre sistem tarafından karşılanabilir olması önemli bir bulgudur. Bu durum, doğalgaz bakımından dışa bağımlı bir ülke olmamız açısından stratejik öneme sahiptir.

Tablo 5.1: İstanbul iklim koşulları baz alınarak su bazlı PV/T kollektörü için yapılan simülasyon sonuçları.

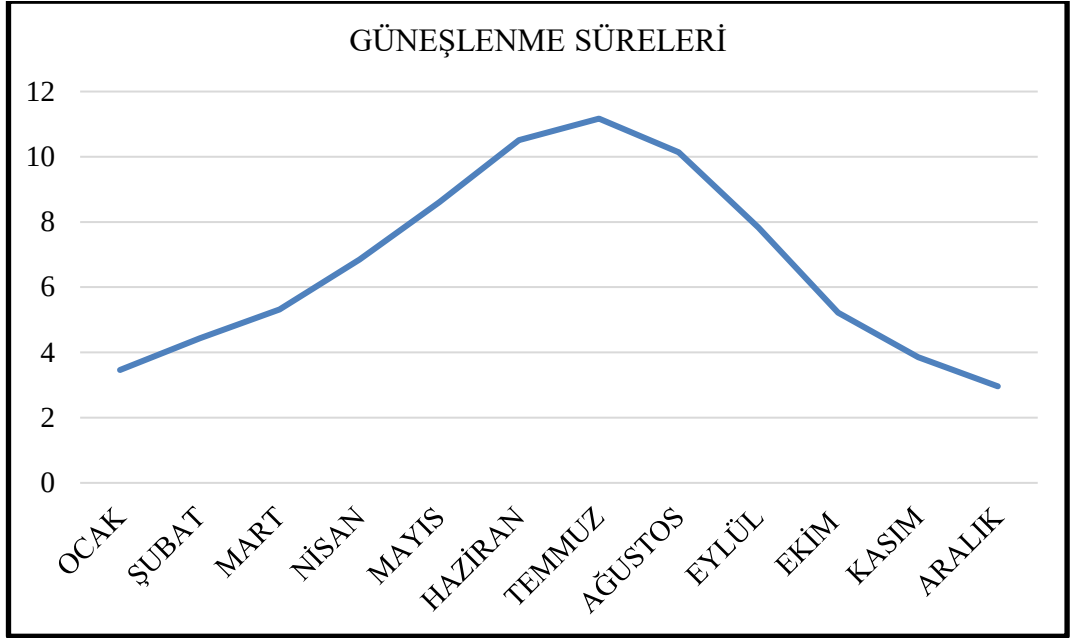
| Aylar   | Elektrik-<br>sel<br>Verim | Günlük<br>Isıtma<br>Watt<br>Değeri<br>(Wh) | Termal<br>Verim | Toplam<br>Verim | Güneşlenme<br>Süresi<br>(Saat) | Dört<br>Kişilik Bir<br>Ailenin<br>Sıcak Su<br>İhtiyacı<br>İçin<br>3m <sup>2</sup> 'lik<br>Gerekli<br>Kollektör<br>Sayısı | PV Anlık<br>Elektrik<br>Güç<br>Değeri<br>(Watt) |
|---------|---------------------------|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Ocak    | 0,1325                    | 1210                                       | 0,4252          | 0,5577          | 3,46                           | 11,96                                                                                                                    | 181,6                                           |
| Şubat   | 0,1328                    | 1590                                       | 0,4309          | 0,5637          | 4,43                           | 9,45                                                                                                                     | 182,6                                           |
| Mart    | 0,1237                    | 2681                                       | 0,4364          | 0,5601          | 5,32                           | 5,56                                                                                                                     | 231,5                                           |
| Nisan   | 0,125                     | 3451                                       | 0,4415          | 0,5665          | 6,85                           | 4,04                                                                                                                     | 228,3                                           |
| Mayıs   | 0,127                     | 4175                                       | 0,4445          | 0,5715          | 8,61                           | 2,97                                                                                                                     | 220,2                                           |
| Haziran | 0,1312                    | 4622                                       | 0,4505          | 0,5817          | 10,51                          | 2,34                                                                                                                     | 200,9                                           |

Tablo 5.1: İstanbul iklim koşulları baz alınarak su bazlı PV/T kollektörü için yapılan simülasyon sonuçları. (Devam)

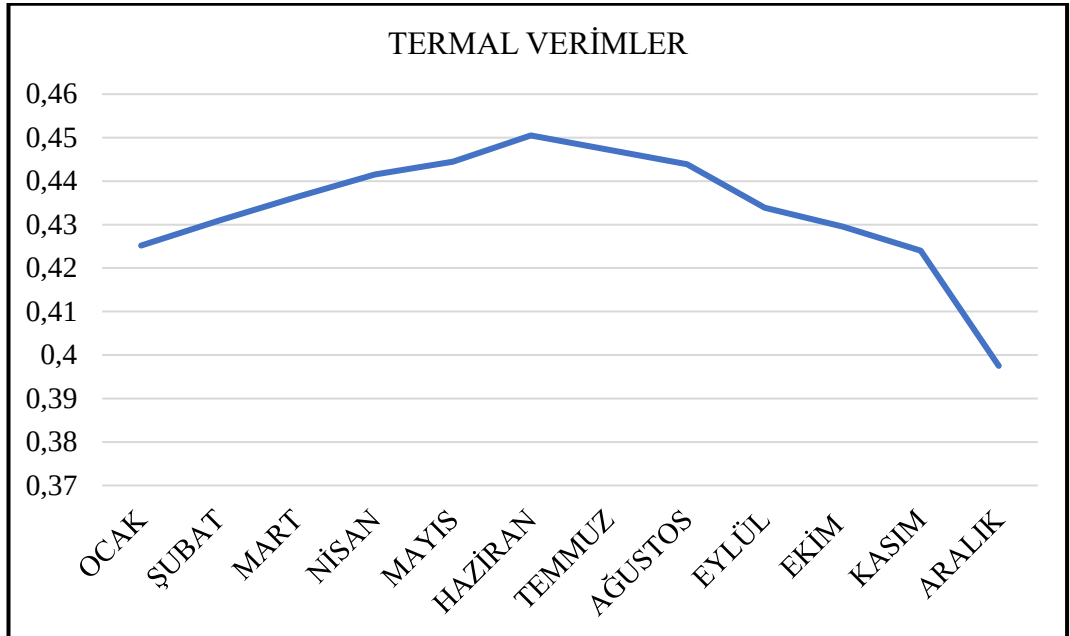
| Aylar   | Elektrik-sel Verim | Günlük Isıtma Watt Değeri (Wh) | Termal Verim | Toplam Verim | Güneşlenme Süresi (Saat) | Dört Kişilik Bir Ailenin Sıcak Su İhtiyacı İçin 3m <sup>2</sup> 'lik Gerekli Kollektör Sayısı | PV Anlık Elektrik Güç Değeri (Watt) |
|---------|--------------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Temmuz  | 0,1326             | 4554                           | 0,4472       | 0,5798       | 11,17                    | 2,13                                                                                          | 191,1                               |
| Ağustos | 0,1328             | 4012                           | 0,4439       | 0,5767       | 10,14                    | 2,31                                                                                          | 188,4                               |
| Eylül   | 0,1298             | 3211                           | 0,4339       | 0,5637       | 7,83                     | 2,95                                                                                          | 200                                 |
| Ekim    | 0,1265             | 2310                           | 0,4295       | 0,556        | 5,22                     | 4,58                                                                                          | 214,8                               |
| Kasım   | 0,1307             | 1425                           | 0,424        | 0,5547       | 3,85                     | 8,28                                                                                          | 190,7                               |
| Aralık  | 0,1392             | 939.1                          | 0,3975       | 0,5367       | 2,96                     | 10,51                                                                                         | 200,6                               |

Tablo 5.2: Bulunan sonuçlara ilişkin ortalama değerler.

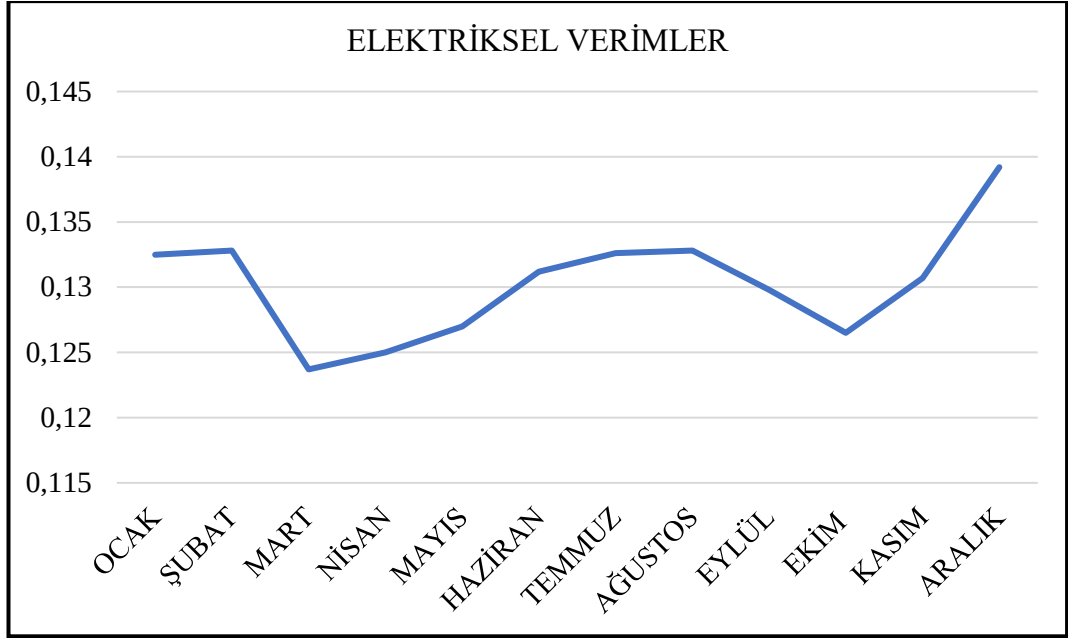
|                                                                                               | Ortalama Değerler |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Elektriksel Verimler                                                                          | 0,1303            |
| Günlük Isıtma Değerleri (Wh)                                                                  | 2848,34           |
| Termal Verimler                                                                               | 0,4338            |
| Toplam Verimler                                                                               | 0,5641            |
| Güneşlenme Süreleri(saat)                                                                     | 6,69              |
| Dört Kişilik Bir Ailenin Sıcak Su İhtiyacı İçin 3 m <sup>2</sup> 'lik Gerekli Kolletör Sayısı | 5,59              |
| PV Anlık Elektriksel Güç (Watt)                                                               | 202,5583          |



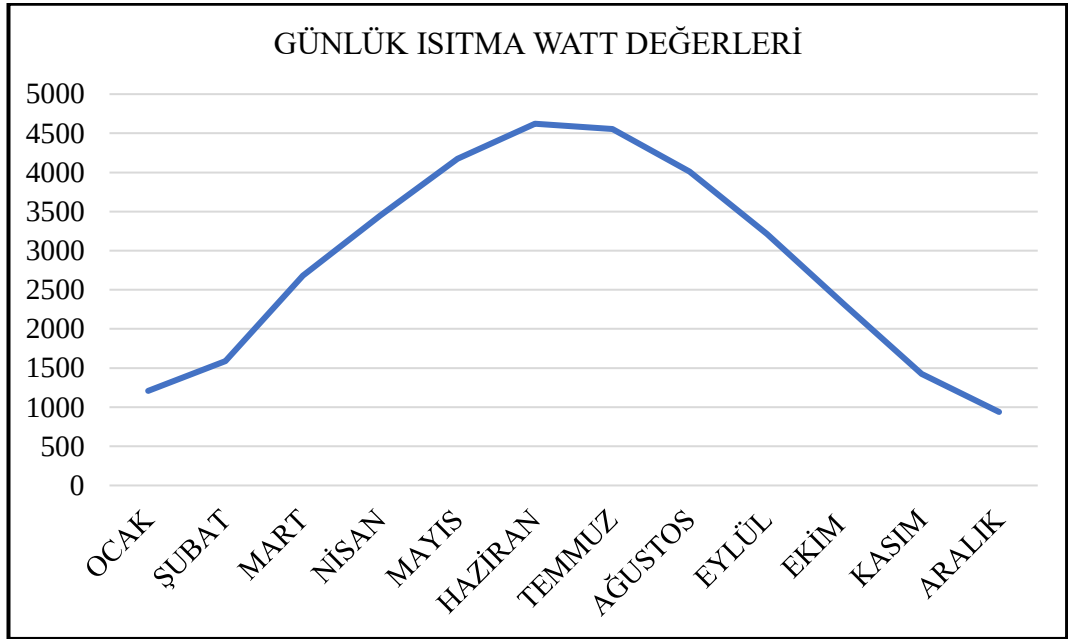
Şekil 5.9: Güneşlenme süreleri(Saat).



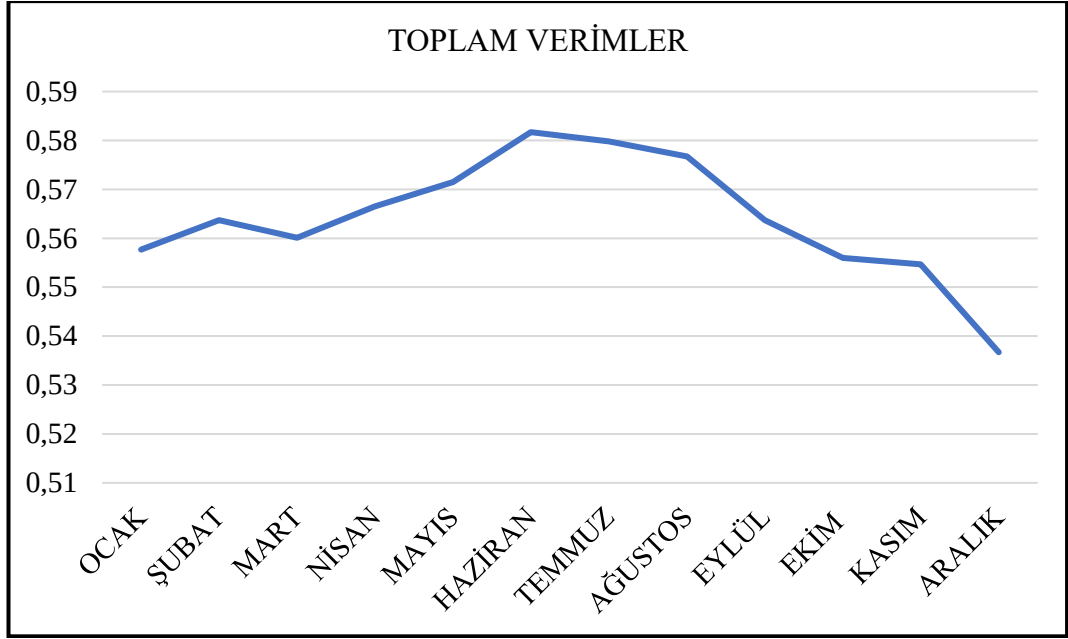
Şekil 5.10: Termal verimler.



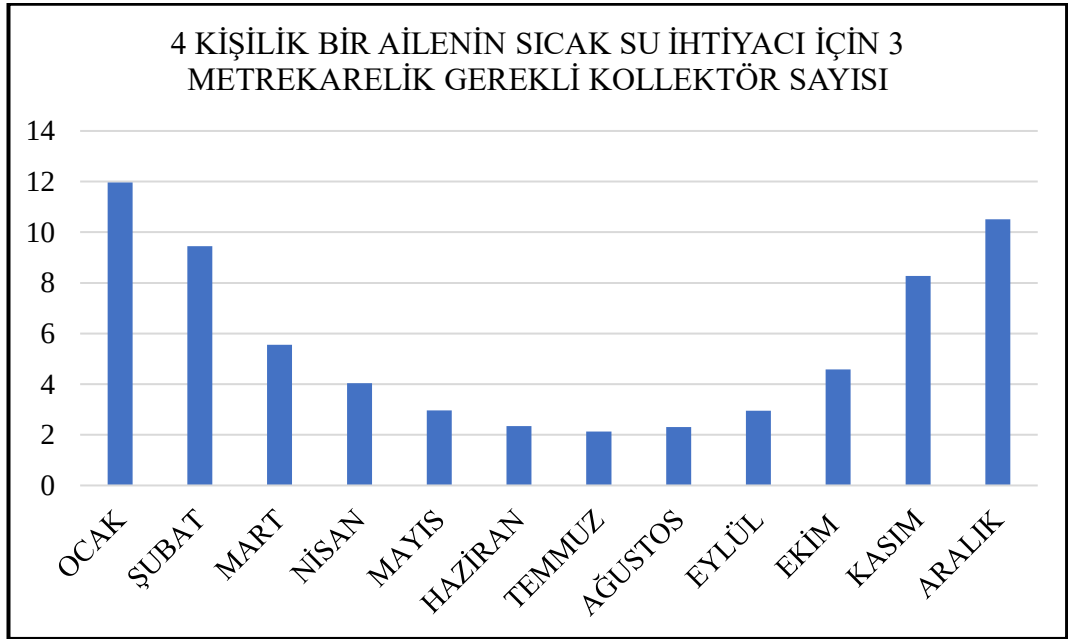
Şekil 5.11: Elektriksel verimler.



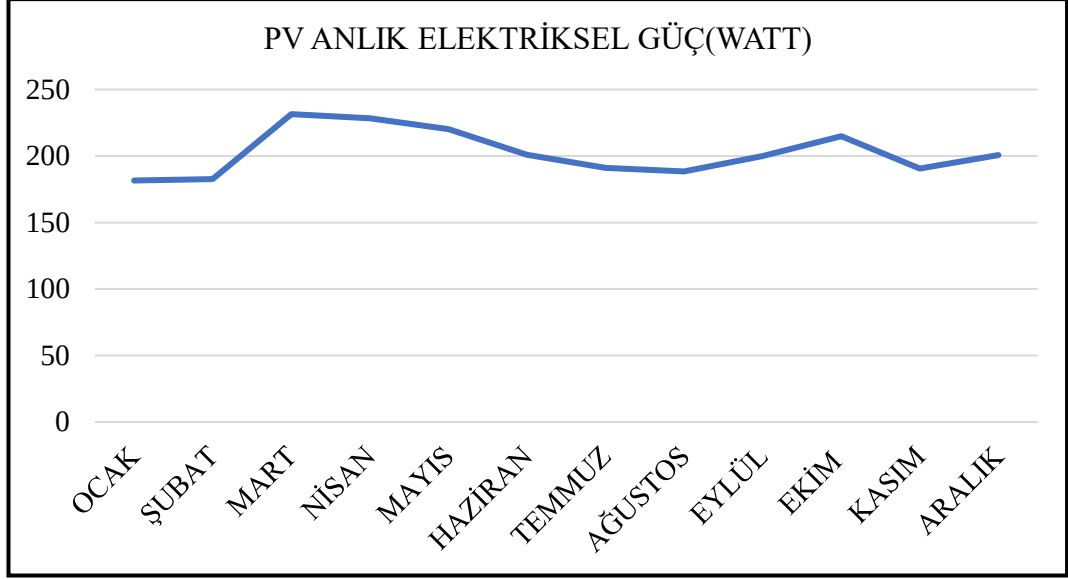
Şekil 5.12: Güneş ısıtma değerleri (Watt).



Şekil 5.13: Toplam Verimler.



Şekil 5.14: 4 kişilik bir ailenin sıcak su ihtiyacı için 3m<sup>2</sup>'lik gerekli kollektör sayısı.



Şekil 5.15: PV anlık elektriksel güç (Watt).

Mayıs-eylül arası dönem incelendiği çalışma sonucunda ulaşılan günlük ısıtma değerleri, konutlardaki sıcak su kullanımı uygulamaları için optimum çözümler sunmaktadır. Çalışmadaki sonuçlara göre ekim ile nisan arası dönem de ticari olarak uygulanabilir. Diğer aylar için direkt sıcak su kullanımını sağlayabilecek bir sistem olarak değil mevcut sistemlere (kombi vb.) bir yardımcı sistem olarak düşünülmesi gerekmektedir. Elektriksel güç açısından incelendiğinde ise evdeki tasarruflu ampuller (200 watt) ile elektrik ihtiyacının karşılanabileceği görülmektedir. 4 kişilik aile için 3'lü bir PV/T sistemi kullanılacak olunursa Mayıs-eylül arası dönem için ailenin tüm kullanım suyu ihtiyacı ve sene boyunca orta büyüklükteki bir buzdolabını, bulaşık makinesi ve kombinin elektrik enerji ihtiyacı da güneşlenme süresine müteakiben karşılanabilir olacaktır. Bu da neredeyse elektrik tüketiminin yarısına tekabül etmektedir.

NOT: 2019 yılı elektrik birim fiyatlarına göre 1 kWh elektrik tüketim birim fiyatı 53 kuruş olarak belirlenmiştir.

- A + sınıfı buzdolabı (orta boy): Ortalama günlük 608 Wh enerji tüketmektedir.
- Günlük fatura tutarı:  $0,608 \times 53$  kuruş = 3,2224 TL
- Aylık fatura tutarı : 9,6672 TL
- Kombi günlük enerji gideri (elektrik kullanımı): 1000 Wh
- Günlük Fatura tutarı: 53 kuruş

- Aylık Fatura Tutarı:15,9 TL
- Günde 1 saat bulaşık makinesi kullanımı ( A + özellikte):
- Günlük enerji gideri:1800 Wh
- Günlük fatura tutarı:1,8X53 kuruş= 0,954 TL
- Aylık fatura tutarı: 30 TL

Günlük enerji ihtiyacı= Panel gücü x Güneşlenme süresi

- 3408 Wh= Panel gücü x 6,69 saat
- Panel gücü=3408 Wh x6,69 saat
- PanelGücü = 509 Watt (Kayıplarla birlikte düşünüldüğünde 3 adet 200 Watt gücünde bir sistem yeterli olacaktır)
- Aylık elektrik tasarrufu: 55,6 TL (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama değer)
- 3408 Wh = 9,654 saat (mayıs- eylül ayları arası ortalama güneşlenme süresi) x Panel gücü Panel Gücü: 353 Watt (Mayıs- Eylül ayları arasında panel gücü ihtiyacı)

Tüm aylara göre enerji ihtiyacını karşılamak için hesap yapılması nedeniyle 3 adet 200 Watt gücünde sistem tercih edilecek olduğundan, mayıs- eylül arası dönemde elektrik tasarrufu daha da fazla olacaktır.

Kayıplarla (kapalı geçen gün sayısı vb.) birlikte düşünüldüğünde ortalama 500 Watt güç esas alınırsa 500 Watt x9,654= 4827 Wh (Aylık 144,81 kw) elde edilir. 2,55831 TL=76,7493 TL aylık elektrik tasarrufu (Mayıs- Eylül Ayları arasında)

Kayıplarla (kapalı geçen gün sayısı vb.) birlikte düşünüldüğünde toplamda 509 Watt gücü sağlayabilecek panellerin evdeki kombi, bulaşık makinesi ve buzdolabının günlük elektriksel tüketimini karşılayabileceği ve bunun sonucunda aylık toplam 55,6 TL kazanç elde edileceği öngörülmektedir. 4 kişilik bir aile için ortalama elektrik tüketiminin 126 TL olduğu göz önüne alındığında ulaşılan bulgular daha önemli hale gelmektedir.

4 kişilik bir aile için aylık ortalama elektrik ihtiyacının 230 kw olduğu düşünüldüğünde fotovoltaiik termal sistemin kullanılması sonucunda elde edilecek olan 102,24(3,048x30) kw'lık kazanç önemli sonuçlar doğurmaktadır.

Yapılan piyasa araştırmasında 3 adet 200 Watt (tek paneli) gücünde panel + 1200 Watt Carspa Power İnverter, PWM solar kontrol cihazı, 2 adet derin döngülü solar jel

akü, solar bağlantı kablo ve sigortalama sisteminden meydana gelen fotovoltaik termal sistemlerin ekonomik ömrü ortalama 25 sene olduğu bulgusuna erişilmiş olup, amorti süresi yaklaşık 7 sene (panel + ekipman fiyatları ortalama 4.500 TL) olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 5.14'ten de görüleceği üzere mayıs-eylül arası dönem için günlük kullanım suyu ısıtması için mevcut PV/T sisteminin yeterli olacağı öngörülmektedir. Söz konusu dönemde günlük ısıtma suyu kullanımı doğrudan PV/T sistem tarafından karşılanacağı düşünüldüğünde üçlü bir sistem esas alınarak mayıs-eylül ayı için gerçekleştirilen hesaplamalar aşağıda mevcuttur.

Konutsal uygulamalar için sıcak su kullanımında referans alınan değerin 45 °C olduğu ve 4 kişilik bir aile için gerekli olan günlük kullanım suyu miktarının 400 litre olduğu dikkate alındığında;

$$Q = mc(t_2 - t_1) \quad (5.1)$$

$$Q = 400000 \text{ cm}^3 \times (45 - 16,01 (\text{İstanbul ortalama şebeke suyu sıcaklığı})) \times 1 \text{ cal/C.gr} \\ = 11.596.000 \text{ cal}$$

Günlük kullanım suyu için gerekli enerji değeri 11.596 kcal olarak bulunmuştur. NOT: Doğalgaz metreküp fiyatı: 1,35 TL olarak belirlenmiştir. 1 m<sup>3</sup> doğalgazdan 10,64 kWh enerji açığa çıkmaktadır, sonuç olarak 1 m<sup>3</sup> doğalgaz = 10,64 kWh'dır.(9.148,75 kcal)

- 4 kişilik bir aile için günlük doğalgaz gereksinimi (mayıs-eylül ayları arası):  
11.596/9.148,75=1,26 m<sup>3</sup>
- 4 kişilik bir aile için aylık doğalgaz gereksinimi: 37,8 m<sup>3</sup>

Kullanım suyu için ödenen ortalama günlük fatura ücreti 1,26x1,35 TL = 1,70 TL (mayıs- eylül ayları arası)

Kullanım suyu için ödenen ortalama aylık fatura ücreti: 1,70 TLX30 = 51 TL kullanım suyu için ödenen ortalama aylık fatura ücreti (mayıs-eylül ayları arasında doğalgaz tasarrufundan elde edilen değer)

Tüm aylar dikkate alınarak hesaplama yapılmak istendiğinde; günlük ortalama ısıtma değeri Tablo 5.2 dikkate alınarak 2.84834 kWh değeri, üçlü bir sistem için 8,54502 kWh değeri kullanılacaktır.

8,54502 kWh=7.347,3920 kcal

4 kişilik bir aile için tasarruf edilen doğalgaz miktarı: 7.347,3920 kcal/ 9.148,75 kcal =0,803 m<sup>3</sup> (Tüm aylar dikkate alındığında günlük ortalama değer)

4 kişilik bir aile için tasarruf edilen doğalgaz miktarı: 24,09 m<sup>3</sup> (Tüm aylar dikkate alındığında aylık ortalama değer)

- Kullanım suyu için tasarruf edilen günlük fatura ücreti: 1,35 TLx0,803=1,08405 TL
- Kullanım suyu için tasarruf edilen aylık fatura ücreti:32,5215 TL
- Toplam kazanç: 76,7493 TL +51 TL(mayıs – eylül ayları arası)
- Toplam elektrik tasarrufu: 144,81 kw (mayıs – eylül ayları arası)
- Toplam doğalgaz tasarrufu: 37,8 m<sup>3</sup> (mayıs – eylül ayları arası)
- Toplam kazanç: 55.6 TL+ 32,5215 TL (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama aylık değer)
- Toplam elektrik tasarrufu: 102,24 Kw (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama aylık değer)
- Toplam doğalgaz tasarrufu: 24,09 m<sup>3</sup> (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama aylık değer).

Bu rakamlar genel uyarlandığında ulaşılabilecek katma değerlerin sonuçları daha da önem kazanmaktadır. 1.000.000 Kişinin bu sistemden faydalanıldığı düşünüldüğünde sonuçlar daha da anlam kazanmaktadır.

Tablo 5.3: 4 kişilik bir aile için aylık değerler (tek hane) - (İstanbul/ mayıs- eylül arası dönem).

| Doğalgaz tasarrufu  | Elektrik Tasarrufu | Kazanç      |
|---------------------|--------------------|-------------|
| 37,8 m <sup>3</sup> | 144,81 kW          | 127,7493 TL |

Tablo 5.4: 1000 daire için aylık ortalama değerler (yaklaşık 4.000 kişi) (İstanbul/mayıs-eylül arası dönem).

| Doğalgaz tasarrufu  | Elektrik Tasarrufu | Kazanç       |
|---------------------|--------------------|--------------|
| 37800m <sup>3</sup> | 144.810 kW         | 127.749,3 TL |

Tablo 5.5: 1.000.000 kişi için aylık ortalama değerler (İstanbul/mayıs- eylöl arası dönem).

| Doğalgaz tasarrufu       | Elektrik Tasarrufu | Kazanç        |
|--------------------------|--------------------|---------------|
| 9.450.000 m <sup>3</sup> | 36.202.500 kW      | 31.937.325 TL |

Tablo 5.6: 1.000.000 konut için aylık ortalama değerler (İstanbul/mayıs-eylöl arası dönem).

| Doğalgaz tasarrufu       | Elektrik Tasarrufu | Kazanç         |
|--------------------------|--------------------|----------------|
| 37.800.00 m <sup>3</sup> | 144.810.000 kW     | 127.749.300 TL |

Tablo 5.7: 4 kişilik bir aile için aylık değerler (tek hane) – (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama değer).

| Doğalgaz tasarrufu   | Elektrik Tasarrufu | Kazanç     |
|----------------------|--------------------|------------|
| 24,09 m <sup>3</sup> | 102,24 kW          | 88,1215 TL |

Tablo 5.8: 1000 daire için aylık ortalama değerler (yaklaşık 4.000 kişi) (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama değer).

| Doğalgaz tasarrufu    | Elektrik Tasarrufu | Kazanç    |
|-----------------------|--------------------|-----------|
| 24.090 m <sup>3</sup> | 102.240 kW         | 88.125 TL |

Tablo 5.9: 1.000.000 kişi için aylık ortalama değerler (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama değer).

| Doğalgaz tasarrufu       | Elektrik Tasarrufu | Kazanç        |
|--------------------------|--------------------|---------------|
| 6.022.500 m <sup>3</sup> | 25.560.000 kW      | 22.031.250 TL |

Tablo 5.10: 1.000.000 konut için aylık ortalama değerler (Tüm aylar dikkate alındığında ortalama değer).

| Doğalgaz tasarrufu        | Elektrik Tasarrufu | Kazanç        |
|---------------------------|--------------------|---------------|
| 24.090.000 m <sup>3</sup> | 102.240.000 kW     | 88.125.000 TL |

Tablo 5.11: 1.000.000 konut için yıllık ortalama değerler (İstanbul).

| Doğalgaz tasarrufu         | Elektrik Tasarrufu | Kazanç           |
|----------------------------|--------------------|------------------|
| 289.080.000 m <sup>3</sup> | 1.226.880.000 kW   | 1.057.500.000 TL |

## KAYNAKLAR

- [1] Zafer C., (2013), “Yeni Nesil Organik Fotovoltaik Teknolojiler”, 6. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Mersin, Türkiye, 6-7 Aralık.
- [2] Adıgüzel E., Javani N., (2015), “Güneş Termal Enerjili ve Fotovoltaik Destekli “Neredeyse Sıfır Enerjili Binaların” Enerji ve Ekonomik Açından İncelenmesi”, Teskon 2015 Bildiriler Kitabı, s. 1237-1252, 2015.
- [3] Dupre O., Vaillon R., Green M.A., (2016), “Thermal Behaviour of Photovoltaic Devices”, Springer
- [4] Palaskar V. N., Deshmukh S. P., (2013), “A Critical Review on Enhancement in System Performance of Flat Plate Hybrid PV/T Solar Collector System”, International Journal of Energy Science (IJES), Volume 3 Issue 6
- [5] Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Battisti R., Corrado A., (2003), “Application Aspects of Hybrid PVT/AIR Solar Systems”
- [6] Slimani M.A., Amirat M., Kurucz I., Bahria S., Hamidat A., Chaouch W.B., (2016), “A Detailed Thermal-Electrical Model Of Three Photovoltaic/Thermal (PV/T) Hybrid Air Collectors Adn Photovoltaic (PV) Module: Comparative Study Under Algiers Climatic Conditions”, Energy Conversion and Management 133 (2017) 458–476
- [7] Öztürk M, Özek N., Batur H., Koç M., (2011), “Fotovoltaik Sistemlerin ve Fotovoltaik Termal Kolektörlerin Termodinamik Değerlendirilmesi”, Mühendis ve Makine, Cilt 52 Sayı 619, Sayfa:50-62
- [8] Zhang X., Zhao X., Smith S., Xu J., Yu X, (2011), “Review of R&D Progress and Practical Application of the Solar Photovoltaic/Thermal (PV/T) Technologies” Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(2012)599-617
- [9] Koç İ., Başaran K., (2018), “PV/T Tabanlı Bir Sistemde MATLAB/Simulink Kullanılarak Yapılan Performans Analizi”, Politeknik Dergisi
- [10] Yeşilyurt M.K., Khalaji N.M., Özakın A.N., (2018), “Techniques for Enhancing and Maintaining Electrical Efficiency of Photovoltaic Systems”, <https://www.researchgate.net/publication/324706543>
- [11] Duffie J.A., Beckman W.A., (2013), “Solar Engineering of Thermal Processes”, 4th Edition, Wiley
- [12] Hu M., Zheng R., Pei G., Wang Y., Li J., Ji J., (2016), “Experimental Study of the Effect of Inclination Angle on the Thermal Performance of Heat Pipe Photovoltaic/Thermal(PV/T) Systems With Wickless Heat Pipe and Wire-Meshed Heat Pipe”, Applied Thermal Engineering 106(2016) 651-660

- [13] Rekha L., Vijayalakshmi M.M., Natarajan E., (2016), “Photovoltaic Thermal Hybrid Solar System for Residential Applications”, *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects* 38(7):951-959

## ÖZGEÇMİŞ

Halil Onur Ezcan 1986 yılında Bitlis-Tatvan’da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2009 yılında İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2017 yılında Uluslararası Kaynak Mühendisliği diploması aldı. 2016 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2013 yılında Türk Standartları Enstitüsünde uzman yardımcısı olarak çalışmaya başlamış olup TSE Uzmanı olarak görevine devam etmektedir. Kalite yönetim sistemi, enerji yönetim sistemi, müşteri memnuniyet sistemi ve ürün belgelendirme konularında eğitimler almıştır.

## **EKLER**

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar**

Ezcan H.O., Ünverdi S. Ö., (2019), “Fotovoltaik Termal (PV/T) Enerji Sistemlerinin Analizi”, Poster Sunumu, Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu ve Tanıtım Günleri 2019, Gebze Teknik Üniversitesi.