

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**FOTOVOLTAİK TERMAL HİBRİT  
GÜÇ SİSTEMİNİN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ,  
OPTİMİZASYONU VE  
EKONOMİK ANALİZİ**

**İLAYDA KOÇ**

**DANIŞMAN  
DR. ÖĞR. ÜYESİ KIVANÇ BAŞARAN**



**MANİSA-2019**

## TEZ ONAYI

**İlayda KOÇ** tarafından hazırlanan "**Fotovoltaik Termal Hibrit Güç Sisteminin Performans Değerlendirmesi, Optimizasyonu ve Ekonomik Analizi**" adlı tez çalışması 25/10/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç BAŞARAN**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Numan Sabit ÇETİN**  
Ege Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÇAŞKA**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**İlayda KOÇ**



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER .....	I
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ .....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
ÖZET.....	VII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
2.1. Performans Analizi İle İlgili Önceki Çalışmalar .....	9
2.2. Ekonomik Analiz İle İlgili Önceki Çalışmalar .....	13
2.3. Tezin Amacı .....	15
3. PV/T SİSTEMLER .....	18
3.1. PV/T Kolektörün Temel Yapısı .....	19
3.2. PV/T Kolektör Çeşitleri.....	20
3.2.1. Sıvı Tip Düz PV/T Kolektörler.....	20
3.2.2. Hava Tipi Düz PV/T Kolektörler.....	21
3.2.3. Havalandırmalı PV/T Kolektör.....	22
3.2.4. Konsantre PV/T Kolektörler .....	23
3.3. Sistem Seçimi .....	24
3.3.1. Referans Bir Ev İçin Elektrik Enerjisi Talebinin Belirlenmesi .....	25
3.3.2. Referans Bir Ev İçin Isı Enerjisi Talebinin Belirlenmesi .....	26
3.4. Sistem Elemanları.....	27
3.4.1. Sistemin Blok Şeması .....	30
4. MATERYAL ve YÖNTEMLER .....	31
4.1. Matematiksel İfadeler .....	36
4.1.1. Termal ve Elektriksel Verim Analizi İçin Matematiksel İfadeler .....	36
4.1.2. Enerji Üretim Modeli İçin Matematiksel İfadeler .....	39
4.1.3. Ekonomik Analiz İçin Matematiksel İfadeler.....	40
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	43
5.1. PV/T Kolektör Optimizasyonu.....	43
5.1.2. Simülasyon Sonuçları .....	45
5.2 Ekonomik Analiz.....	50
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR .....	58
ÖZGEÇMİŞ .....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>A</b>	Kolektör Alanı
<b><math>C_0</math></b>	Sermaye Maliyeti
<b><math>CF_t</math></b>	t Yıllık Nakit Akışı
<b><math>C_t</math></b>	t Yılındaki Toplam Maliyeti
<b>DE</b>	Borcun Öz Sermaye Oranı
<b>dh</b>	Boru Hidrolik Çapları
<b>dge</b>	PV/T Kolektörün Elektrik Parçalarının 0-t Yıl Arasında Bozulma Oranı
<b>dgth</b>	PV/T Kolektörün Termal Parçalarının 0-t Yıl Arasında Bozulma Oranı
<b>d/w</b>	Boru Genişliğinin Aralığa Oranı
<b><math>E_c</math></b>	Kapaktaki Işıma
<b><math>E_{ey}</math></b>	Üretilen Yıllık Elektrik Enerjisi Miktarı
<b><math>E_p</math></b>	Yüzeydeki Işıma
<b><math>EP_t</math></b>	t Yıllık Elektrik Fiyatı
<b><math>E_t</math></b>	Üretilen Yıllık Toplam Enerji Miktarı
<b><math>E_{thy}</math></b>	Üretilen Yıllık Termal Enerji Miktarı
<b><math>G_t</math></b>	t Yılındaki Ortalama Günlük Işınım
<b><math>HP_t</math></b>	t Yıllık Isınma Fiyatı
<b><math>h_{pva}</math></b>	Hücreden Emiciye Isı Transfer Katsayısı
<b><math>I_0</math></b>	İlk Yılda Yatırım Harcamalarını
<b><math>Ifr_t</math></b>	t Yıllık Enflasyon Oranı
<b><math>Itr_t</math></b>	t Yıllık Faiz Oranı
<b><math>k_{PV}</math></b>	PV Panel İletkenliği
<b>LCOE</b>	Sistemin Kullanım Süresi Boyunca Genel Birim Enerji Maliyeti
<b><math>L_t</math></b>	t Yıllık Finansman Kredisi Maliyeti
<b><math>L_{PV}</math></b>	PV Panel Kalınlığı
<b>M</b>	Sistem Akış Hızı
<b>N</b>	Boru Sayısı
<b>n</b>	Kolektörün Kullanım Ömrü
<b>NPV</b>	Kümülatif Kâr

$OM_t$	t Yıllık İşletme ve Bakım Maliyeti
$PP$	Geri Ödeme Periyodu
$PV$	Fotovoltaik Güneş Kolektörü
$PV/T$	Fotovoltaik-Termal Panel
$r$	İskonto Oranıdır (%)
$S_{et}$	Elektrik Tasarrufu
$S_{tht}$	Isınma Tasarrufu
$T_a$	Ortam Sıcaklığı
$t_e$	Emici Kalınlığı
$TR$	kWh Başına Vergi Oranı
$\tau_{\alpha\_PV}$	PV trans/abs
$\tau_{\alpha\_T}$	Termal trans/abs
$T\alpha_t$	t Yıllık Elektrik Üretimi İçin Ödenen Vergi
$v$	Rüzgâr Hızı
$W$	Boru Aralığı
$\eta_e$	Kolektörün Toplam Elektrik Verimi
$\eta_{th}$	Kolektörün Toplam Termal Verimi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Dünya Güneşlenme Haritası .....	2
Şekil 1.2. Türkiye'nin Yıllık Ortama Güneşlenme Süresi .....	3
Şekil 1.3. Türkiye'nin Aylık Ortama Güneşlenme Süresi .....	4
Şekil 1.4. Manisa/Turgutlu Işınım Miktarı Dağılım Grafiği.....	5
Şekil 1.5. Manisa/Turgutlu Sıcaklık Dağılım Grafiği .....	6
Şekil 3.1. Standart PV Kolektör .....	18
Şekil 3.2. PV/T Kolektör.....	19
Şekil 3.3. Sırlı Camlı Sıvı PV/T.....	21
Şekil 3.4. Sırsız Camlı Sıvı PV/T .....	21
Şekil 3.5. Hava Tipi Düz PV/T Kolektörler Uygulaması .....	22
Şekil 3.6. Havalandırılmalı PV Kolektörün Uygulaması .....	23
Şekil 3.7. Konsantre PV/T Kolektörü ve Uygulaması .....	24
Şekil 3.8. PV/T Kolektör Yapısı .....	25
Şekil 3.9. Sistemin Blok Şeması .....	30
Şekil 4.1. Yıllık Enflasyon Oranı .....	36
Şekil 5.1. MATLAB/Simulink Model .....	44
Şekil 5.2. Elektrik Veriminin Sızdırmazlık Faktörüne Göre Değişimi.....	45
Şekil 5.3. Elektriksel Verimin S ile Değişimi .....	46
Şekil 5.4. Termal Verimin S ile Değişimi.....	47
Şekil 5.5. Termal Verimin $(T_i - T_a)/G$ ile Değişimi .....	48
Şekil 5.6. Elektriksel Verimin Isı Aktarım Katsayısı ile Değişimi .....	49
Şekil 5.7. Sistemin Günlük Elektrik Enerjisi Üretim Miktarı .....	50
Şekil 5.8. Sistemin Günlük Termal Enerji Üretim Miktarı .....	51
Şekil 5.9. 25 Yıl İçin Elektrik Enerjisi Üretim Miktarı.....	52
Şekil 5.10. 25 Yıl İçin Termal Enerji Üretim Miktarı.....	53
Şekil 5.11. Sistem Nakit Akışı .....	54

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 1.1. Türkiye'nin Bölgelere Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Güneşlenme Süresi.....	4
Tablo 3.1. Referans Ev İçin Günlük Enerji Talebi.....	26
Tablo 3.2. Kişi Başına Düşen Sıcak Su Miktarı.....	27
Tablo 3.3. PV/T Kolektör Teknik Özellikleri .....	28
Tablo 4.1. PV/T Kolektör Performans Analizi Parametreleri.....	32
Tablo 4.2. PV/T Kolektör Ekonomik Analizi Parametreleri.....	33
Tablo 4.3. Elektrik Bedeli .....	34
Tablo 4.4. Evsel Sıcak Su Kullanımı .....	35





## TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aőamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, bilgi ve tecrübesi ile kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç BAŞARAN'a, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

İlayda KOÇ  
Manisa, 2019



## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### Fotovoltaik Termal Hibrit Güç Sisteminin Performans Değerlendirmesi, Optimizasyonu ve Ekonomik Analizi

İlayda KOÇ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kıvanç BAŞARAN

Bu çalışmada fotovoltaik/termal (PV/T) kolektörlerin elektriksel/termal verim analizi Manisa ili iklim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan çalışma, 4 kişinin yaşadığı bir ev için yıllık enerji üretimi ve sistem yatırım geri dönüş süresinin hesaplandığı teorik uygulama analizi içermektedir.

Bu amaçla, ilk aşamada sıcak su ve elektrik enerjisi üretimi için uygun olan Sıvı Tip Düz PV/T Kolektör sistemi tercih edilmiştir. Bu tip sistemlerin maksimum verimle çalışabilmesi için sızdırmazlık faktörü, ışınım, giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığı, emici plaka parametreleri (tüp aralığı, boru çapı, kanatçık kalınlığı vb.), emici plakadaki akışkanın termal iletkenliği gibi çeşitli parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. PV/T kolektörlerin termal verimliliği, giriş sıcaklığı ile ortam sıcaklığı ( $T_i - T_a$ ) arasındaki sıcaklık farkının, kolektör yüzeyine düşen global güneş ışınımına ( $G$ ) oranından önemli ölçüde etkilenmektedir.  $(T_i - T_a)/G$  oranının artması termal verimin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, termal verime etki eden diğer faktörler sızdırmazlık faktörü ( $s$ ) ve farklı kanatçık oranı ( $d/w$ ) değerleridir.  $d/w$  oranının artması kolektör alanının artması ve PV panel sıcaklığının düşmesine sebep olduğundan elektriksel verim artışı da sağlamaktadır. PV/T kolektörlerdeki önemli sorun, optimum verim elde edebilmek için tüm bu parametrelerin göz önünde bulundurulma zorunluluğudur.

Çalışmanın ilk bölümü için, PV/T kolektörün MATLAB/Simulink modeli, matematiksel eşitliklerden faydalanılarak hazırlanmıştır. Bu model üzerinde, tasarım parametreleri ile bunların termal ve elektriksel verime etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile PV/T kolektörden elde edilen maksimum termal verim %64,5, elektriksel verim %13,5 ve toplam verim %78 olarak tespit edilmiştir.

İkinci aşamada, yapılan ekonomik analiz için yüksek elektrik çıkışı baz alınarak PV/T kolektör seçimi yapılmıştır. Seçilen sistemin enerji üretim modeli ( $E_t$ ), sistemin kurulum ve kullanım ömrü boyunca, seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) hesaplanarak, kurulacak sistemin yıllık elektrik üretimi, termal enerji üretimi ve sistem nakit akışı şemaları oluşturulmuştur. Kullanılan PV/T Kolektör  $30^\circ$  eğim açısı ve güney cephesi yönünde  $10 \text{ m}^2$ 'lik bir alana sahip bina çatısı için incelenmiştir. Termal sistem için  $10 \text{ m}^3$  hacminde depolama tankı kullanılmıştır.

Yapılan hesaplamalarda 4 kişilik bir evin ısı ve elektrik talebi Manisa ili iklim koşulları için değerlendirilmiştir. Enerji üretim modeli oluşturulurken; güneş ışınımı, elektrik/termal verim ve çalışma süresi boyunca yoğunlaştırıcı performansındaki azalma dikkate alınmıştır. Yapılan incelemede sistemin ilk yıldaki elektrik enerjisi üretim miktarı 2168,97 kWh, ilk yıldaki termal enerji üretim miktarı 10395,4 kWh, LCOE değeri 0,044 Euro/kW ve NPV değeri 2494,5 Euro olarak bulunmuştur. Ayrıca sistemin kendini amorti etme süresi 7 yıl olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik/Termal Sistemler, PV/T Kolektör Performans Analizi, Güneş Enerjisi, PV/T Kolektör MATLAB Simulink Modeli, PV/T Kolektör Ekonomik Analiz**

**2019, 61 sayfa**



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Performance Analysis, Optimization and Economic Analysis of Photovoltaic Thermal Hybrid Power System**

**İlayda KOÇ**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Science  
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Kıvanç BAŞARAN**

In this study, the electrical and thermal efficiency analysis of photovoltaic/thermal (PV/T) collectors were performed in climatic conditions of Manisa. Furthermore, a theoretical application analysis is carried out to calculate the annual energy production and system depreciation period for a house where 4 people live. For this purpose, a liquid type flat PV/T collector system is used since this system is suitable for hot water supply and electrical power generation. The Sealing factor, radiation, inlet temperature, ambient temperature, absorbent plate parameters (tube spacing, pipe diameter, vane thickness, etc.), and thermal conductivity of the fluid in the absorbent plate must be taken into consideration for operation with maximum efficiency. The thermal efficiency of the PV/T collectors is significantly affected by the ratio of the temperature difference between the inlet temperature and the ambient temperature ( $T_i - T_a$ ) to the global solar radiation ( $G$ ) on the collector surface. The increase in  $(T_i - T_a) / G$  ratio decreases the thermal efficiency. Besides the previous factors, the ratio of the sealing factor ( $s$ ) on the different flap ( $d/w$ ) affects the thermal efficiency values. The increase in the  $d/w$  ratio also increases the collector area and decreases the PV module temperature, thus increasing the electrical efficiency. The main problem in PV/T systems is that the optimum efficiency can only be achieved by considering all these parameters.

The first part of this study is concluded by preparing the PV/T collector with a MATLAB/Simulink model by using mathematical equations. The design parameters and their effects on thermal and electrical efficiency were evaluated with this model. The maximum thermal efficiency, the electrical efficiency and total efficiency of the PV/T collector were determined as 64,5%, 13,5%, and 78%, respectively.

At the second stage of the study, the PV / T system selection was made based on high electrical output and economic analysis was performed accordingly. The energy generation model of the selected system ( $E_t$ ), the leveled cost of energy (LCOE) is calculated during the installation and lifetime of the system and annual electricity generation, thermal energy generation, and system cash flow charts are established. The PV/T system that are used were examined for the roof of the building with a tilt angle of 30 degrees and an area of  $10 \text{ m}^2$  in the south side direction.  $10 \text{ m}^3$  storage tank was used for the thermal system. The heat and

electricity consumption of a 4-person house was evaluated in the calculations for the climatic conditions of Manisa. The solar irradiation, electrical/thermal efficiency and decrease in concentrator performance was taken into consideration while creating an energy production model. The first year electricity generation of the system was 2168,97 kWh, the first year thermal energy production was 10395,4 kWh, the LCOE value is calculated 0,044 Euro / kW and the NPV value is calculated as 2494,5 Euro. The depreciation period of the system was considered as 7 years.

**Keywords: Photovoltaic/Thermal Systems, PV/T Collector Performance Analysis, Solar Energy, PV/T Collector MATLAB Simulink Model, PV/T Collector Economic Analysis**

**2019, 61 pages**



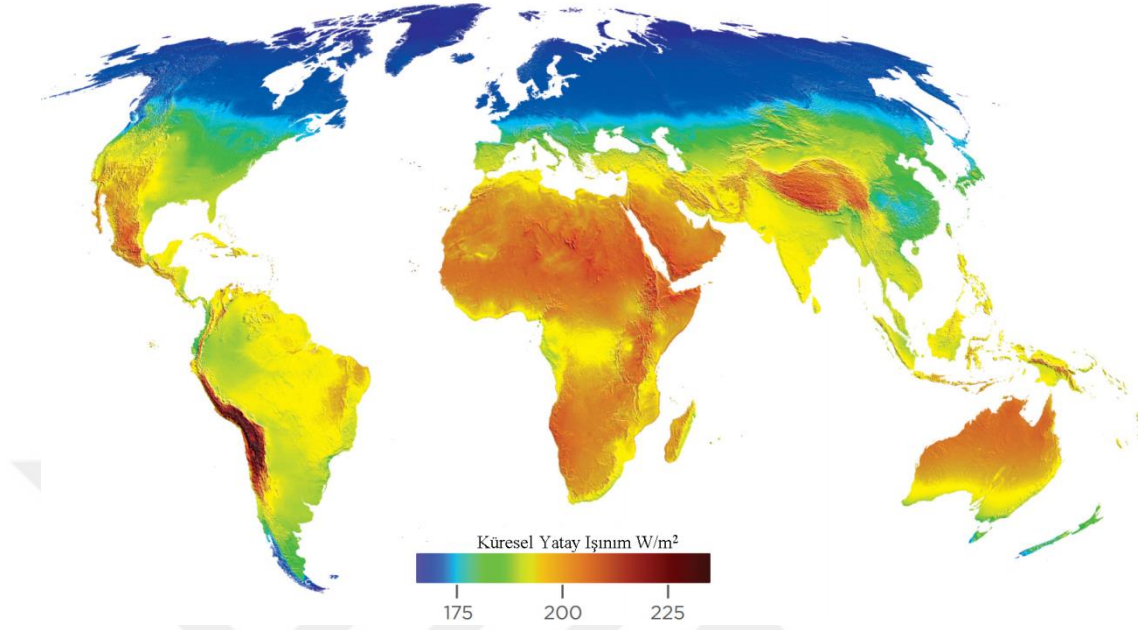
## 1. GİRİŞ

Günümüzde enerjiye duyulan talep ve enerji kullanımı dünya ülkelerinin gelişmişlik düzeyini belirleyen bir unsur haline gelmiştir. Gelişime açık ve gelişmiş olan ülkelerin en büyük gereksinimlerinden biri olan enerji talebi sürekli yükselmektedir ve bu yükselişin sonraki dönemlerde de devam edeceği ön görülmektedir. Teknolojinin hızla gelişmesi ve kullanım alanının oldukça yaygın olması, insanlığın enerjiye duyduğu talebin karşı konulamaz bir hal almasına neden olmaktadır. Enerji ihtiyacımızın büyük bir bölümünü fosil yakıtlarından, geri kalan bölümü ise nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Dünya üzerinde fosil yakıt kullanımının, çevreye ve insan sağlığına verdiği zararlar nedeni ile azaltılması gerekmektedir. Ayrıca, fosil yakıt tüketiminin önüne geçilmezse, ilerleyen dönemlerde bedelini insanların ödeyeceği çok fazla sorunla karşı karşıya kalınacaktır.

Dünya üzerindeki enerji talebinin büyük bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanıyor olmasına rağmen, teknolojinin gelişmesi ile birlikte yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynaklarının, fosil yakıt talebini azaltacağı ön görülmektedir. Sanayide yaşanan gelişmeler nedeni ile artmakta olan enerji talebinin karşılanması, ülkelerin kalkınması ve sanayileşmesi yolunda daha önceden göz ardı edilen yenilenebilir enerji kaynağı kullanımının yaygınlaşması gerçeği günümüzde daha fazla anlaşılmaktadır.

Temiz enerji kaynakları içerisinde, güneş enerjisinin önemi çok büyüktür. Dünya çapında güneş enerjisinde yaşanan büyük gelişmelerle birlikte Türkiye’de de bu alanda bilimsel çalışmaların sayısı artmıştır. Enerji kaynaklarının ülkeler ve devletler açısından oldukça önemli bir konuma geldiği bu dönemde, enerji kaynağı arayışı ve bu alanda yapılan araştırmalarda artış gözlenmektedir. Özellikle son zamanlarda ülkemizde enerji sektöründe büyük ivmelenme gerçekleşmekte ve sektörün daha iyi olabilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu durumun en önemli nedenlerinden biri yenilenebilir enerji kaynağı potansiyelinin, özellikle güneş enerjisi potansiyelinin Türkiye’de yüksek olmasıdır. Yeryüzüne düşen ışınım miktarı ülkelere göre farklılık göstermektedir. Şekil 1.1.’de verilen dünya güneşlenme haritasında en yüksek ışınım alan yerler kırmızı ve en az ışınım alan yerler mavi renk ile gösterilmektedir. Dünya güneşlenme haritasına bakıldığında Türkiye’nin rengi

turuncudur. Bu da güneşlenme miktarının oldukça fazla olduğunu ve bu bölgede yapılacak yatırım kararlarının önemini doğrular niteliktedir.

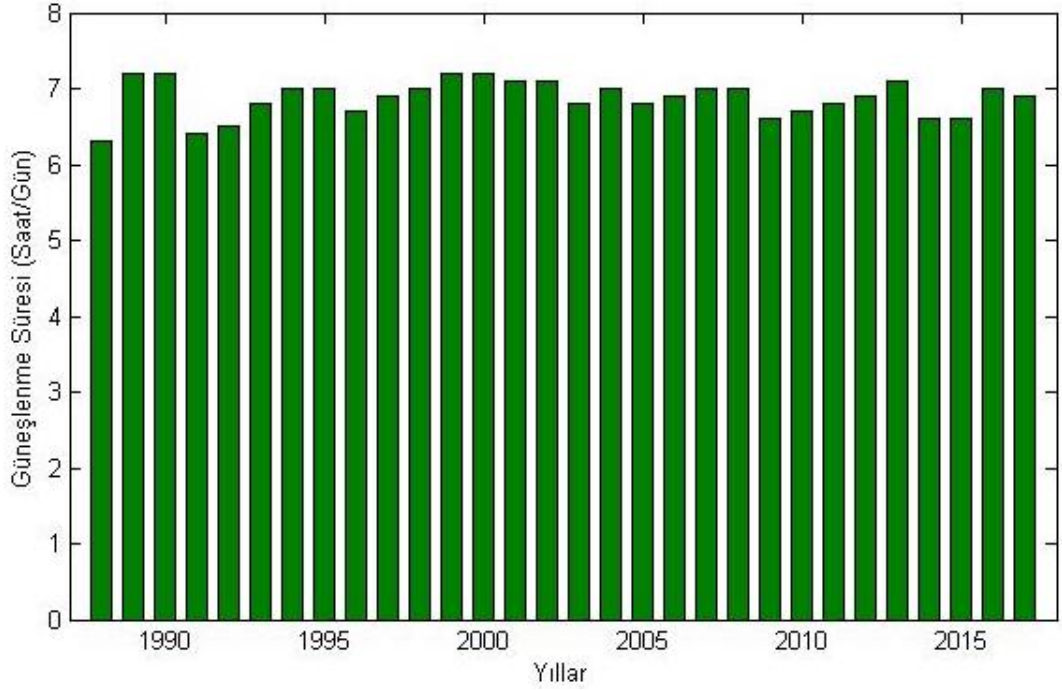


**Şekil 1.1.** Dünya Güneşlenme Haritası

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını hızlandırmanın ana nedeni, 2015 yılında düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP21) olmuştur. Bu konferansta imzalanan Paris Antlaşması ile 196 ülke, küresel ısınmayı 2°C derece azaltmak için çalışmayı kabul etmiştir [1]. Sadece yenilenebilir enerji kaynakları arasında değil, tüm enerji kaynakları arasında en büyük potansiyel güneş enerjisidir. Yapılan araştırmalar, dünyanın güneş ışınımından yaklaşık 1,8 x 1011 MW güç aldığını göstermektedir [2]. Ayrıca, son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ve buna bağlı olarak fotovoltaik (PV) panel fiyatlarındaki düşüş nedeniyle güneş enerjisinin kullanılması diğer kaynaklar arasında en büyük atılımı yapmıştır. Büyük bir potansiyele sahip olan güneş enerjisi, dünyanın birçok noktasında ulaşılabilir hale gelmiştir. Türkiye gibi bazı ülkelerde bu potansiyelin büyüklüğü dikkat çekicidir. Almanya, Fransa, İspanya ve Türkiye için ortalama toplam yatay düzlemdeki yıllık ışınım miktarı sırasıyla yaklaşık, 900 ile 1260 kWh /m<sup>2</sup>, 900 ile 1650 kWh/m<sup>2</sup>, 1200 ile 1850 kWh/m<sup>2</sup>, 1450 ve 1850 kWh/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir [3]. 2016 yılı sonu itibariyle kurulu PV gücü Çin'de 78 GW, Japonya'da 42,8 GW, Almanya'da 41,2 GW, ABD'de 40,3 GW, İtalya'da 19,3 GW, Fransa'da 7,1 GW, İspanya'da 5,4 GW'a ulaşmıştır. Türkiye, 2016 yılında bir önceki yıla göre 583 MW güç artışı sağlayarak, toplam kurulu gücünü 832 MW seviyesine yükseltmiştir [4].

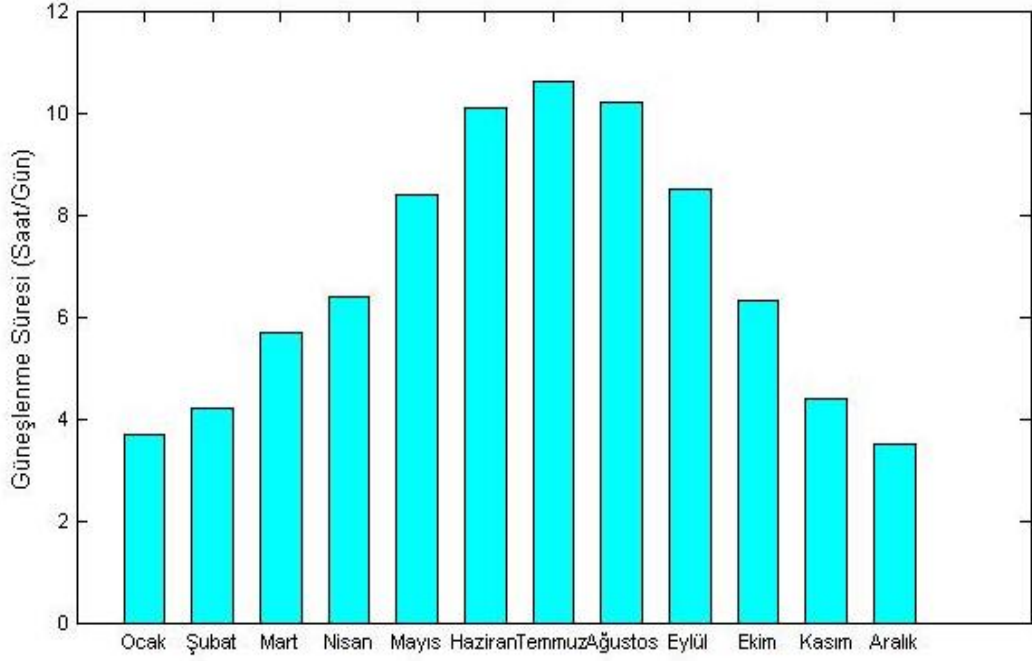
Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı son verilere göre 1988-2017 yılları arasında Türkiye'nin yıllık ve aylık ortalama güneşlenme süreleri Şekil 1.2. ve Şekil 1.3.'de verilmiştir. Güneşlenme süresi, doğru sistem seçimi ve ekonomik analiz için oldukça önemli bir faktördür. Türkiye için yıllık ve aylık güneşlenme süresi grafikleri incelendiğinde, bölgenin güneş enerjisi potansiyeli bakımından önemi anlaşılmaktadır.

Şekil 1.2. incelendiğinde 1989 yılında Türkiye için yıllık ortalama güneşlenme süresi değeri 7,2 saat/gün olarak en yüksek değerine ulaşmıştır.



**Şekil 1.2.** Türkiye'nin Yıllık Ortama Güneşlenme Süresi





**Şekil 1.3.** Türkiye'nin Aylık Ortama Güneşlenme Süresi

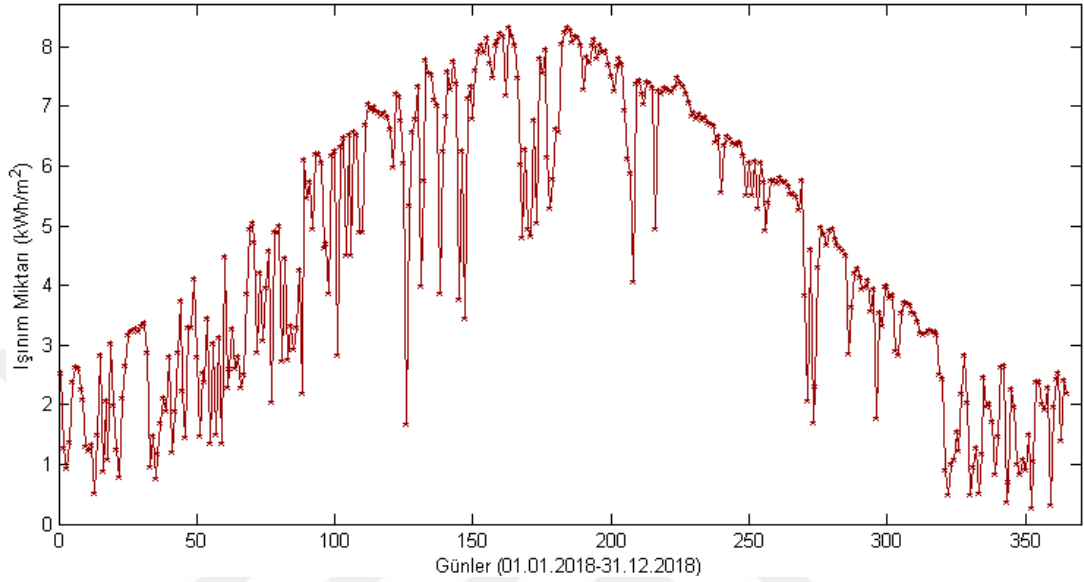
Şekil 1.3. incelendiğinde Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarının güneşlilik süresi bakımından en verimli aylar olduğu görülmektedir. Temmuz ayı verilerine göre güneşlilik süresi, 11 saat/gün olarak en yüksek değere ulaşmıştır.

**Tablo 1.1.** Türkiye'nin Bölgelere Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Güneşlenme Süresi [5]

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ kWh/m <sup>2</sup> - yıl	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2293
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

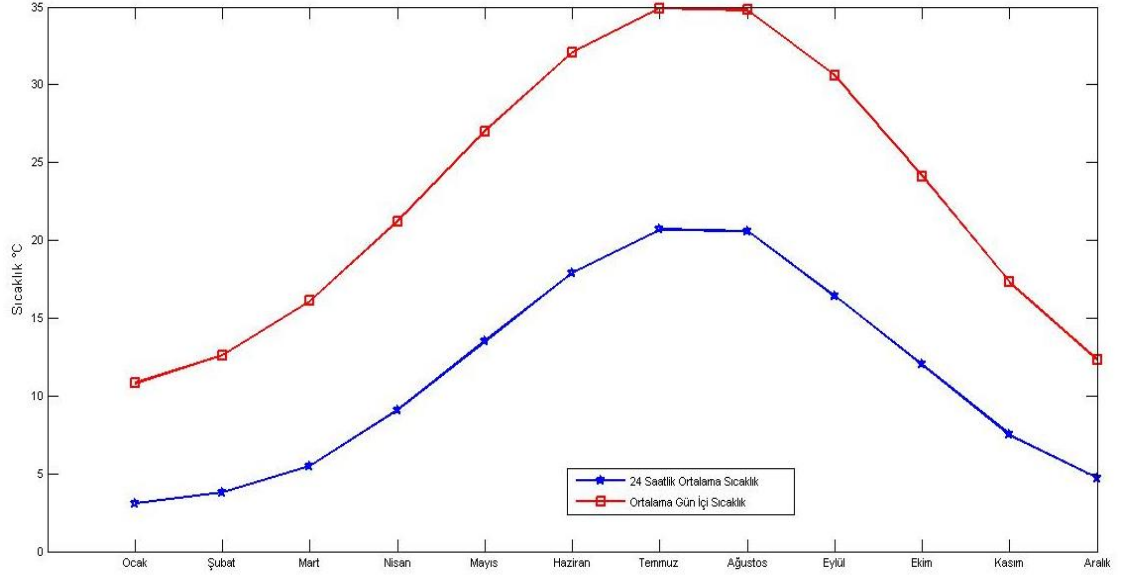
Tablo 1.1.'de meteorolojik olarak yapılan ölçümlerden elde edilen verilere göre, Türkiye'nin bölgesel olarak güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süreleri verilmiştir. Tablo 1.1.'e göre Güneydoğu Anadolu Bölgesi yıllık toplam 1460 kWh/m<sup>2</sup> güneş enerjisi üretme potansiyeline sahipken, Ege Bölgesi 1304 kWh/m<sup>2</sup> güneş enerjisi potansiyeline sahiptir.

Manisa ili Turgutlu ilçesi Ege Bölgesinde 37,5 Enlem ve 27,7 boylamlarında yer almaktadır. Deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 68 metredir. PVGIS programının PVGIS-CMSAF veri tabanından Turgutlu ilçesi için elde edilen meteorolojik veriler Şekil 1.4. ve Şekil 1.5.'de verilmiştir.



**Şekil 1.4.** Manisa/Turgutlu Işınım Miktarı Dağılım Grafiği

Turgutlu için aylara göre günlük ışıınım değerleri Şekil 1.4.'de verilmiştir. Aralık ve Ocak aylarında Turgutlu en düşük ışıınım miktarına sahipken, en yüksek ışıınım değerine Temmuz ayında ulaşmaktadır.



**Şekil 1.5.** Manisa/Turgutlu Sıcaklık Dağılım Grafiği

Turgutlu için ortalama gün içi ve 24 saatlik ortalama sıcaklık grafiğine göre en düşük ortalama gün içi sıcaklık Ocak aylarında 7°C olarak kaydedilmiştir. En yüksek ortalama gün içi sıcaklık değerine ise Temmuz ayında 31°C'ye ulaşılmıştır.

Türkiye'deki yıllık ortalama güneşlenme potansiyeli Tablo1.1.'de verilen verilerle hesaplandığında 1303 kWh/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Bu değer yaklaşık olarak Ege Bölgesi ortalamasına eşittir. Bölgesel açıdan bakıldığında da Turgutlu ilçesinin güneşlenme potansiyeli de, Ege Bölgesi ortalama güneşlenme potansiyeline eşittir. Bu değerler güneş enerjisi potansiyeli bakımından Turgutlu'nun oldukça yüksek bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Manisa-Turgutlu bölgesinde güneş enerjisine dayalı sistem kurulumunun, güneşlenme süresi ve güneş enerjisi potansiyelleri dikkate alındığında verimli olacağı anlaşılmaktadır.

Endüstride güneş enerjisine dayalı birçok sistem mevcuttur. Ancak termal-elektriksel dönüşüm sistemlerinin kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir. Standart PV panellerin yerine elektrik ve toplam verim açısından daha avantajlı olan PV/T kolektörlerin kullanılması, bu teknolojinin yaygınlaşmasını sağlayacak potansiyele sahiptir.

Bu çalışmanın başlıca amacı, PV/T kolektörün elektriksel performans değerlendirmesi ve PV/T kolektörün ısıl performans değerlendirmesi yaparak, elde edilecek verilere göre sistemin yıllık enerji üretim miktarları belirlemektir. Yapılan

simülasyon çalışmasına ve teorik hesaplamalara göre ekonomik analiz yapılmış ve sistemlerin yatırım geri dönüş süreleri hesaplanmıştır. Böylece PV/T kolektör kullanımının yaygınlaşması ve yapılacak olan akademik çalışmalar için somut veriler elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve yenilenebilir enerjiye duyulan ihtiyaç nedeni ile PV kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ancak PV paneller sadece elektrik enerjisi elde etmemizi sağlarken, PV/T kolektörler, ihtiyaca göre suyu veya havayı ısıtmamızı da sağlar.

Ege Bölgesi'nde evler, genellikle elektrikli ısıtıcılar, klima, soba ve son yıllarda yaygınlaşan doğalgaz ile ısıtılmaktadır. Ancak, ısıtma için elektrik enerjisi kullanımı pahalı bir seçimdir ayrıca, fosil yakıtlar ise çevre için zararlıdır ve doğalgaz hatları bölgede oldukça sınırlı bir alanda mevcuttur. Bölgenin yüksek güneş potansiyeli göz önüne alındığında PV/T kolektörler kullanılarak hem ısıtma hem de elektrik enerjisi elde ederek ülke ekonomisine katkı sağlamak mümkündür. Bu nedenle yapılan çalışma Ege Bölgesi için oldukça büyük önem taşımaktadır. Projenin özgün değeri, PV/T kolektörler için sadece termal ve elektriksel verim analizi yapmak yerine bir uygulama alanı için (konut, otel, ev vb.) sistem boyutlandırması da yapmaktır. Böylece PV/T kolektörlerin Ege Bölgesi'nde yaygınlaşması sağlanacaktır. Ayrıca yapılan incelemeden elde edilen veriler, yapılacak olan bilimsel çalışmalarda kullanılabilir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

PV/T kolektörlerin potansiyel kullanım alanı oldukça fazla olmasına rağmen günümüzde istenilen seviyede değildir. Ancak literatürde PV/T kolektörlerle ilgili yapılan çalışmalar, kullanım alanının geliştirilebileceğini göstermektedir [6].

Edmond Becquerel'in keşfettiği fotovoltaiik etki PV panellerin temelini oluşturmaktadır [7].

Sıvı temelli PV/T kolektörlerin teknik ve ekonomik uygunluğu ilk olarak 1976 yılında Martin Wolf tarafından incelendi [8].

1978 yılında ilk sıvı temelli PV/T kolektörler, Böer tarafından bir ev uygulaması üzerinde test edildi [9].

1976 ve 1978 yıllarında yapılan çalışmaların ardından birçok araştırmacı bu alanda çalışmalar yapmaya başladılar. 1978 yılında Arizona Devlet Üniversitesi'nde aktif soğutmalı PV/T kolektörlerin matematiksel denklemleri kullanılarak TRNSYST modeli geliştirildi [10].

1978 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü laboratuvarlarında yapılan çalışmada, PV/T kolektörlerinin elektriksel ve termal verimi sırasıyla % 6,5 ve % 40 olarak ölçüldü. Daha sonra, PV/T kolektörlerin elektriksel ve termal verimliliğini artırmak için ABD, Japonya, Hollanda, Danimarka ve Almanya'da birçok çalışma yapıldı [11,12].

1979 yılında yapılan başka bir çalışmada, PV/T kolektörlerde emici yüzeyden elde edilen verimin bulunması için kullanıla Hottel Whitler modeli geliştirilmiş ve bu parametre tasarım parametresinin fonksiyonu olarak sunulmuştur [13].

1985 yılında yapılan simülasyonda PV/T kolektör üzerine yansıyan ışınım miktarının emilimini artırmak için, yüzeye yansıyan kızılötesi ışınım miktarını azaltmayı hedefleyen bir çalışma yapılmıştır [14].

PV/T kolektörlerine yönelik çalışmalar, 1980 ve 1990 yılları arasında düşük petrol fiyatları nedeniyle azaltılmış olmasına rağmen, İsviçre ve Yugoslavya gibi bazı Avrupa ülkelerinde çalışmalar yapılmaya devam edildi [15,16].

1992 yılında küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin politik olarak tanınmasıyla birlikte, PV/T kolektörleri üzerindeki çalışmalar yeniden önem kazandı. Özellikle Almanya, Danimarka ve Hollanda'da 1990-2000 yılları arasında birçok proje gerçekleştirildi [17,18].

Sonraki yıllarda Japonya, Hindistan, İsrail, Brezilya, Tayvan, Kıbrıs ve ABD gibi birçok ülke PV/T alanında çalışmalar yaptılar [19,20].

1999 yılında yapılan bir simülasyonda, hücreli ve hücretsiz emici yüzeye sahip kolektörlerin termal verimleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda hücretsiz emici yüzeye sahip kolektörlerden elde edilen ısı miktarının bir bölümü elektrik enerjisine dönüştürülmediğinden dolayı termal verimi daha yüksek bulunmuştur [21].

Manisa'da yapılan çalışma ile karşılaştırma yapabilmek için PV panel ve PV/T kolektörler üzerine farklı bölgelerde yapılan çalışmalar araştırılarak sistemlerin performans ve ekonomik analiz sonuçları incelenmiştir.

### **2.1. Performans Analizi İle İlgili Önceki Çalışmalar**

2006 yılında İzmir'de yapılan bir çalışmada yapı ile bütünleştirilebilir güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrit sistemin performans analizi ve optimizasyonu incelenmiştir. PV/T kolektör giriş-çıkış suyu sıcaklıkları ve güneş pili hücre sıcaklıklarının saatlik ortalamaları incelenmiştir. Hem matematiksel analiz hem de deneysel çalışma yapılan sistemde, verim değeri deneysel çalışmadan %4,35 ve matematiksel modelden %6,12 olarak bulunmuştur [6,22].

2010 yılında Lizbon'da yapılan bir çalışmada, MATLAB programını kullanarak PV/T kolektörler için simülasyon çalışması yapılmış, termal ve elektriksel verim değerleri incelenmiştir. Çalışma sonunda %52 elektriksel, %15 termal verim olmak üzere %67 genel verim elde edilmiştir [6,23].

2011 yılında yapılan bir deneysel çalışmada sıvı tip PV/T kolektörlerin termal ve elektriksel verim değerleri incelenmiştir. Kurulan sistemden belirli aralıklarla

alınan veriler sonucu sistemin ortalama termal ve elektriksel verimi sırası ile %64, %12 olarak bulunmuştur [24].

2012 yılında Konya’da PV ve PV/T kolektörler üzerinde performans iyileştirmesi için deneysel çalışma ve her iki sistem için ekonomik analiz yapılmıştır. Sistemin verim analizini yapmak için, her iki sistem için güneş ışınımı, üretilen voltaj ve akım değerinden yararlanılmış, ayrıca PV/T kolektöre giren ve çıkan suyun çıkış sıcaklıkları ve debisi, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi faktörler dikkate alınmıştır. Deney sonucunda; PV panel sıcaklığı 55-63°C aralığında gözlenirken, PV/T kolektör sıcaklığı 32°C olarak ölçülmüştür. PV ve PV/T sistem elektriksel dönüşüm modelleri sırası ile %9 ve %13,6 olarak ölçülmüştür. Ek olarak yapılan ekonomik analiz sonucuna göre Konya ili için PV ve PV/T kolektör amortisman süreleri sırası ile 10,6 yıl ve 6,22 yıl olarak hesaplanmıştır [5].

2014 yılında yapılan bir çalışmada, PV/T kolektörün tasarımı ve duyarlılık analizi üzerine çalışmıştır. Analiz için MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Kanatçık oranına göre termal verimlilik değişimi incelenmiştir. En yüksek termal verim, 0,009 kanatçık oranında %45 olarak hesaplanmıştır [6,25].

2014 yılında yapılan bir çalışmada, Kırklareli ilinde PV/T kolektörlerin performans analizini yapmak için farklı eğim açılarında TRNSYS programından yararlanılmıştır. Yapılan çalışmada 2012 iklim ve elektrik tüketim verilerinden yararlanılarak, üç farklı panel eğim açısına göre sistem değerlendirmesi yapılmıştır. Analiz sonucunda, sistemden elde edilen verim değerleri 16°, 37° ve 66° eğim açısı için sırası ile %61,29, %62,95 ve %55,48 olarak bulunmuştur. Kırıkkale bölgesi için en iyi performans alınan eğim açısı değerinin 37° olduğu görülmektedir [26].

2016 yılında Tunus’ta PV/T kolektör tabanlı bir sistemin performans analizini içeren bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, seçilen sistemin simülasyonu LABVIEW programı kullanılarak yapılarak aynı özelliklere sahip PV ve PV/T hücre sıcaklıkları saatlik olarak incelenmiştir. Günlük ortalama PV hücre sıcaklığı 42°C iken, PV/T hücre sıcaklığı 35°C olarak bulunmuştur. PV/T kolektörün elektrik enerji verimi, simülasyon süresi boyunca ortalama %14,4 olarak hesaplanırken PV panel verimi %13 olarak bulunmuştur. Bu durum hücre sıcaklığı artışının sistem verimi üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir [27].

2016 yılında Fransa’da, Ouargla şehrinin iklim şartlarında, bir sıcak su elde edilmesi ve sıfır enerji tüketimini sağlamak amacıyla PV/T kolektörler üzerine TRNSYS programı kullanılarak, teorik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaya göre kurulacak sistem Mayıs - Ekim ayları aralığında bir evin sıcak su ihtiyacının tamamını, Ocak - Nisan ayları boyunca sırasıyla %54 ve %93 arasında sıcak su ihtiyacını karşılayacağı hesaplanmıştır. Ayrıca kullanılan sistem, evin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi miktarını yıllık ortalama %62,5 oranında karşılamaktadır [6,28].

2016 yılında Avustralya’da yapılan çalışmada, standart bir konut için PV/T hava kolektör sisteminin optimizasyon ve performans analizi yapılmıştır. PV gücü, birim kolektör alan için  $8 \text{ W/m}^2$  sabit güç ile çalıştırılan bir fanda ortalama hava akış kütlesi  $0,04 \text{ kg/sm}^2$  olarak ölçülmüştür. Ayrıca yaklaşık olarak aynı akış kütlesi için termal enerji çıkışındaki güç  $22 \text{ W/m}^2$ , maksimum efektif termal enerji çıkışındaki güç  $45 \text{ W/m}^2$  ve fan güç tüketimi  $12 \text{ W/m}^2$  olarak hesaplanmıştır [6,29].

2016 Amerika’da yaptıkları çalışmada, enerji depolama sistemi olmaksızın, tarımsal kullanım amacıyla PV panellerle çalışan su pompalama ve arıtma sisteminin ekonomik analizini incelemişlerdir. Sistemde 15 ile 250 kW arasında değişen PV panel kullanılarak sistemin MATLAB programında simülasyonu yapılmış ve sistemin ekonomik analiz modeli çıkarılmıştır. Modellemede Ürdün’ün güneş ışınım değerleri temel alınmış, 4 farklı invertör kullanarak inceleme yapılmıştır. Kurulacak olan sistemin getiri oranı, sistem maliyetinden %26 fazla bulunduğu için sistemin karlı bir yatırım olacağı sonucuna varılmıştır [6,30].

2018 yılında Adana iklim koşullarında yapılan deneysel çalışmada PV ve PV/T kolektörlerin performans karşılaştırmasını yapmak amacı ile Mayıs-Ağustos ayları boyunca değişik ortam koşullarında ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre sistemlerin günlük ortalama elektriksel verimi ve toplam verimleri hesaplanmıştır. PV ve PV/T kolektörlerin günlük elektriksel verim ortalamaları sırasıyla %6-8 ve %7-10 aralığında hesaplanmıştır. Sistemlerin günlük toplam verimler ortalamaları PV panel için %20-33 ve PV/T kolektör için %57-69 aralığındadır. Bu durum PV/T kolektör seçiminin hem elektriksel verim açısından hem de toplam verim açısından daha yararlı olacağını göstermektedir [31].



2014 yılında Tunus'ta, PV/T kolektör temelli tuzlu su arıtma sistemi tasarımının kavram ve değerlendirmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmalarında, ısının tuzlu su üzerinde etkisi ve yüzey performansı incelemiştir. Ayrıca besleme suyu sıcaklığının enerji tüketimi üzerinde olan etkisi de incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça sistem için gereken toplam enerji miktarı azalmaktadır. 45°C sıcaklıkta gerekli olan enerji miktarı 2000 Wh'dir [6,32].

2015 yılında Fas'ta yapılan bir çalışmada PV panellerin MATLAB simülasyonu üzerinde, ışınım ve sıcaklığın düzensiz dağılımı altındaki modül ve dizileri incelemiştir. Modelde, güneş simülatörü vasıtasıyla ölçülen değerler, deneysel olarak kontrol edilmiştir. 25°C sıcaklıkta, 800 W/m<sup>2</sup>, 900 W/m<sup>2</sup>, 1000 W/m<sup>2</sup>, 1100 W/m<sup>2</sup> ışınım seviyelerinde ölçümler yapılmıştır. Elde edilen en yüksek güç, 1100 W/m<sup>2</sup> ışınımında 250 W olarak ölçülmüştür [6,33].

2016 yılında Çin'de yapılan bir çalışmada, fitilsiz ısı borusu ve tel örgülü ısı borusu ile PV/T kolektörlerin eğim açısının termal performans üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Paneller 10°, 20° ve 40° olmak üzere üç farklı eğim açısında ayarlanmıştır. Bu açılarda ölçülen değerler sırası ile 0,014 K/W, 0,012 K/W, 0,011 K/W'dir [6,34].

2016 yılında Çin'de yapılan PV/T kolektör tabanlı deneysel bir çalışmada sistemin enerji performansı üzerine hesaplama yapılmıştır. Yapılan deney sonucuna göre, sistemden 900 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımında 150 (Q<sub>e</sub>/W) elektrik çıkışı elde edilmiştir [35].

2019 yılında Muğla'da PV/T kolektörler üzerine deneysel bir çalışma yapılmış olup, 5 adet 900 Wp'lik PV/T kolektörün bina çatısına kurulumu gerçekleştirilmiştir. Farklı aylarda ve farklı ışınım değerinin olduğu günlerde elektriksel ve termal enerji değerleri hesaplanmıştır. Deney sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek elektrik enerjisi miktarı Nisan ayında 668,8 W olarak ölçülmüştür. Aynı güne ait termal enerji değeri 4104 W'tır. En yüksek termal enerji değeri ise Temmuz ayında 4285,4 W olarak ölçülmüştür, o güne ait elektrik enerjisi değeri de 638,6 W'tır. Bu sonuçlar termal verimdeki yani sıcaklıktaki artışın elektriksel verimi düşürdüğünü göstermektedir [36].

## 2.2. Ekonomik Analiz İle İlgili Önceki Çalışmalar

Güneşlenme süresinin oldukça düşük olduğu İsveç'teki Monte Carlo simülasyonunu kullanan bir çalışmada PV/T kolektör için tekno-ekonomik analiz yapılmış ve bir analitik model geliştirilmiştir. Yapılan analiz kapsamında çoklu enerji dengesi/finansal denklemler ve çeşitli değişkenlerin riskleri (ortalama günlük güneş ışınımı, elektrik/termal verim, işletme ve yönetim maliyeti, PV/T fiyatları sermaye maliyeti, faiz oranı) gibi ölçütler kullanılarak sistemin kapsamlı bir simülasyonu oluşturulmuştur. Analiz sonucunda, 25 yıl kullanım ömrüne sahip 10,37 m<sup>2</sup> alana kurulu PV/T kolektör için elde edilen sermaye maliyeti 4482–5378 SEK/m<sup>2</sup>, sistem amorti süresi de 10 yıl olarak bulunmuştur [37].

Patras Üniversitesi'nde, deneysel olarak da kullanılan su soğutmalı hibrit PV/T Kolektör için SimaPro programı ile ekonomik analiz yapılmıştır. Yatay ve eğimli çatı montajı için ayrı ayrı simülasyonu yapılan bir sistemin, maliyeti ve geri ödeme süresi hesaplanmış ayrıca sistemin enerji ve çevresel değerlendirmesini gerçekleştirmek için yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) metodolojisi uygulanmıştır. Analiz sonucuna göre 30 m<sup>2</sup> aktif yüzey alanı ve 1500 L'lik depolama tankına sahip sistem için kurulum maliyeti yatay çatı montajı için 50 £ /m<sup>2</sup>, eğimli çatı montajı için 30 £/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır [38].

2012 yılında Hindistan Haryana'da hibrit PV/T kolektör entegreli güneş kurutucusunun ekonomik analizini üzerine çalışmalar yapılmıştır ve kurutucu, şebeke elektriği gibi harici güç kaynakları kullanılmadan hava sirkülasyonunun kullanımına dayalı tasarlanmıştır. Yüksek enerji verimliliği içinse, güneş takip sistemi ve emici plakalarda karartılmış yüzey kullanılmıştır. Yıllık PV/T kolektör başına net elde edilen elektrik ve termal verim sırası ile 45,6 kWh/yıl, 120 kWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Yapılan tekno-ekonomik analiz sonuçlarına göre sistemin kendini amorti etme süresi 5,6 yıldır [39].

Polonya iklim koşullarında çalışan mikro PV/T kolektör için 2010 yılında standart bir evin veya şebekeye enerji sağlayan mikro ölçekli bir sistemin çeşitli finansal değerler doğrultusunda tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Analiz için NFEP & WM "Prosument" programı kullanılmış ve analiz sonucuna göre 7,83 m<sup>2</sup>

yüzey alanına sahip PV/T kolektör için belirlenen amorti süresi 8,2 yıl olarak bulunmuştur [40].

S. Tselepis ve Y. Tripanagnostopoulos 2002'de hibrit PV/T kolektörlerin ekonomik analizini yapmış ve standart PV paneller ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sırasında fazla ısının elektrik verimini azalttığını ve sıvı sirkülasyonu ile fazla ısının sistemden uzaklaştırıldığını, dolayısıyla PV/T kolektörlerin verimlerinin PV panellere göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ancak hibrit PV/T kolektörlerin termal ekleme nedeni ile standart PV panellerden daha fazla maliyete sahip olduğu sonucuna varmış olup her iki sistem için de ekonomik analiz yapmışlardır. Elde edilen verilere göre PV panelin amorti süresi evsel kullanım için yaklaşık 27 yıl iken PV/T kolektör amorti süresi yaklaşık 10 yıl olarak hesaplanmıştır. Her iki sistem içinde kurulu güç artışının, amorti süresini azalttığı gözlemlenmiştir [41].

TRNSYS programı kullanılarak 2017 yılında yapılan simülasyon çalışmasında, Sevilla, Roma, Madrid ve Bükreş bölgelerinin PV/T kolektör için potansiyelinin yüksek olduğunu belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda 100 m<sup>2</sup> toplam alan ve 50 m<sup>2</sup> bir çatı alanına sahip 4-5 kişilik evler için yıllık ve aylık ortalama güneş ışınımı ve enerji talebi verileri dikkate alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre, PV/T kolektörlerin söz konusu dört bölgedeki ısı talebini (ısınma ve sıcak su) %60 oranında ve evlerin soğutma taleplerini neredeyse %100 oranında karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca PV/T kolektörlerden elde edilen kullanılabilir enerjinin maliyeti 0,06-0,12 €/kWh aralığında olarak hesaplanmıştır ve bu oranın eşdeğer PV panellere göre %30-40 daha düşük olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [42].

Freiburg, Almanya'da 2013 yılında yapılan bir ekonomik analizde evsel sıcak su uygulaması için hibrit PV/T kolektörlerin farklı tipleri, bir apartman bloğu (45 daireli ve 100 kişiden oluşan bir konut) için incelenmiştir. Toplam kolektör alanı aynı olan (100 m<sup>2</sup>), PV/T kolektör çeşitlerinin aynı yük koşulları altında, enerji fiyatlarına ve konvansiyonel PV/T kolektör fiyatlarına dayanan karşılaştırmasını yapmıştır. Belirli ekonomik koşullar için fiyat aralığı, cam yüzeyi sırsız tipte 290 €/m<sup>2</sup>'den 410 €/m<sup>2</sup>'ye ve cam yüzeyi sırlı tipte 370 €/m<sup>2</sup>'den 500 €/m<sup>2</sup>'ye kadar değişebileceği gözlemlenmiştir [43].

Sri Lanka'da 2015 yılında farklı çalışma koşullarında yapılan ekonomik analizde, binaya entegreli termal ve elektriksel depolama yapabilen PV/T kolektör incelenmiştir. Sri Lanka'nın beş farklı bölgesinin (Anurdhapura, Hambantota, Trincomalee, Puttalam, Ratmalana) ışıyım, rüzgâr hızı ve su sıcaklığı değerleri kullanılarak oluşturulan simülasyonda net bugünkü değer (NPV) her bölge için ayrı ayrı hesaplanmış ve bir adet PV/T kolektör kullanımında bölgelerin coğrafik özellikleri birbirine yakın olduğundan her bir bölge için NPV değeri 1,8 olarak bulunmuştur [44].

Binaya entegreli PV/T kolektörler için 2016 yılında, Anuradhapura-Sri Lanka, Geneva,-İsviçre, Beijing-Çin ve Oslo-Norveç bölgelerinin coğrafik konumları, iklim şartları gibi parametreler dikkate alınarak tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Aynı özelliklere sahip 15 panel için elde edilen yıllık şebeke etkileşimleri Anuradhapura 2 kW, Beijing 3 kW, Geneva 3,4 kW ve Oslo 3,9 kW olarak hesaplanmıştır. Şebeke etkileşiminin az olması yakıt hücre kapasitesinin artmasına bağlıdır. Bu durumda Anuradhapura-Sri Lanka bölgesinin diğer bölgelerden daha yüksek potansiyele sahip olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [45].

2017 yılında Milano'da yapılan bir simülasyonda su çevrimli bir PV/T kolektörde kapalı ve açık çevrim yapan iki tip sistem için elde edilen verimler incelenmiştir. Analiz sonuçlarında göre, %35 toplam verim elde edilen açık sistemde verimin %6'sı elektriksel verimden %29'u termal verimden oluşmaktadır. Aynı özelliklere sahip, kapalı sistem PV/T için toplam verim %37 olarak hesaplanmıştır. Bu verim değerinin %14,2'si elektriksel verim, %22,8'i termal verimdir [46].

### **2.3. Tezin Amacı**

Manisa-Turgutlu bölgesi güneşli gün sayısı ve güneşlenme potansiyeli yüksek olan bir bölgedir. Bölgesel açıdan bakıldığında da Turgutlu ilçesi, yapılacak güneş enerjisi yatırımları için yüksek potansiyele sahiptir. Enerjiye duyulan talebin artması ve fosil kaynakların zararlarının anlaşılması ile yenilenebilir enerji arayışı da artış göstermiştir. Bu nedenle PV kullanımları yaygınlaşmış ancak bu sistemlerden sadece elektrik enerjisi elde edildiği için sistem verimleri yetersiz kalmıştır. Bu sistemlerin başında, eski bir teknolojiye sahip olan PV paneller ve sadece termal enerji üretmek için kullanılan sistemler yer almaktadır.

Gelişen teknoloji ve yapılan bilimsel araştırmalar sayesinde daha yeni bir teknolojiye sahip olan, sadece elektrik enerjisi değil aynı zamanda termal enerji de elde etmemizi sağlayan PV/T kolektörler endüstride yaygın olarak kullanılmamaktadır. PV/T kolektörlerde güneş enerjisi potansiyeli, sistemden elde edilen toplam verim üzerinde doğrudan etkilidir. Turgutlu bölgesinin potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, PV/T kolektörler kullanımının elverişli olabileceği düşünülmüştür.

Bu çalışmanın başlıca amacı, PV/T kolektörün elektriksel performans değerlendirmesi ve ısı performans değerlendirmesi yapılarak, elde edilecek verilere göre sistemin yıllık enerji üretim miktarlarını belirlemektir. Yapılan değerlendirme sonuçlarına göre ekonomik analiz yapılmış ve sistemlerin yatırım geri dönüş süreleri hesaplanmıştır. Böylece PV/T kolektör kullanımının yaygınlaşması ve yapılacak olan akademik çalışmalar için somut veriler elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Ek olarak, PV/T kolektörlerin Ege Bölgesi için uygunluğu araştırılarak, bölgedeki ev ısıtma alışkanlığının (genellikle elektrikli ısıtıcılar, klima, soba ve son yıllarda yaygınlaşan doğalgaz) değiştirilmesi amaçlanmaktadır. Evlerde ısıtma için kullanılan elektrik enerjisi oldukça pahalıya mal olmaktadır, fosil yakıtlar ise çevre için zararlıdır ve doğalgaz hatları bölgede oldukça sınırlı bir alanda mevcuttur. Bölgedeki yüksek güneş potansiyeli göz önüne alındığında PV/T kolektörler kullanılarak hem ısıtma hem de elektrik enerjisi elde ederek ihtiyaç duyulan enerjiyi daha ucuza ve daha sağlıklı olarak karşılamak mümkündür. Bu nedenle yapılan çalışma Ege Bölgesi için oldukça büyük önem taşımaktadır. Projenin özgün değeri, PV/T kolektörler için sadece termal ve elektriksel verim analizi yapmak yerine bir uygulama alanı için (konut, otel, ev vb.) sistem boyutlandırması da yapmaktır. Böylece PV/T kolektörlerin Ege Bölgesi'nde yaygın olarak kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca yapılan incelemeden elde edilen veriler, yapılacak olan bilimsel çalışmalarda kullanılabilir.

PV ve PV/T kolektörler için öncelikle detaylı literatür taraması yapılmıştır, yapılan araştırma sonuçlarına göre kullanılacak sistemler belirlenip sistemin matematiksel modeli MATLAB/Simulink programı ile çıkartılmıştır. Bu model üzerinde ışınım, rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı, giriş ve çıkış suyu sıcaklığı, debi,

sızdırmazlık faktörü, emici plaka iletkenliği gibi faktörlerin sistem verimi üzerine olan etkileri incelenerek, bu etkiler sistem optimizasyonu yapılırken dikkate alınmıştır. Değişken olarak kullanılacak çevresel faktörler ve panelin yapısına ait büyüklükler literatüre uygun seçilmiştir. Bu sayede panellerin teorik performans analizi yapılmıştır. Ayrıca PV/T kolektörün ısıl verim analizi yapılmıştır.

PV/T kolektörler için 25 yıllık kullanım süresi esas alınarak ekonomik analiz yapılmıştır. Ayrıca sistem kurulumu, yatırım harcamaları ve bakım maliyetleri gibi etkenler hesaplanarak sistemin yatırım geri dönüş süresi hesaplanarak PV/T kolektörlerin Ege Bölgesi için yatırım olanakları değerlendirilmiştir. Sistemin ekonomik analiz sonuçları büyük yatırımcıları teşvik edecek niteliktedir. Böylece PV/T kolektörlerin Ege Bölgesi'nde yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır.

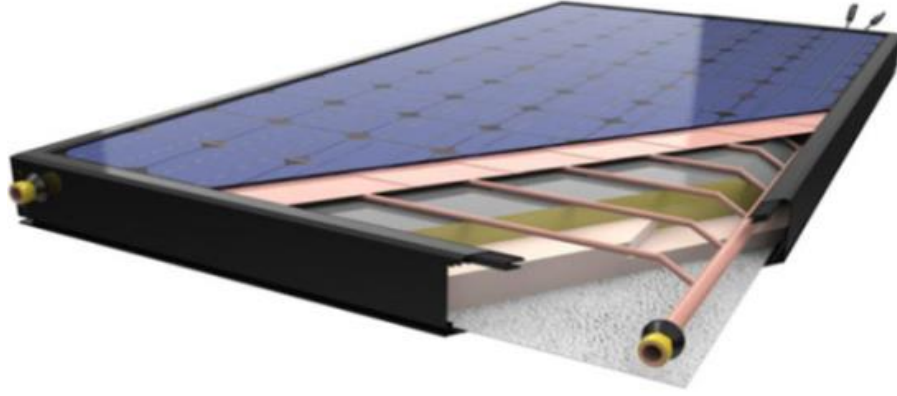
Manisa ili iklim verilerinden yararlanılarak yapılan enerji analizi, simülasyon ve ekonomik analiz, bu alanda yapılmış araştırma sayısının az olması nedeni ile akademik açıdan son derece önemlidir. Ulaşılan sonuçlar birçok araştırmaya ışık tutacak niteliktedir. Türkiye'nin güneşlenme potansiyeli göz önüne alındığında PV/T kolektör kullanımı için son derece uygundur. Ancak bu sistemler ülkemizde ilk kurulum maliyetinin PV panellerden yüksek olması nedeni ile tercih edilmemektedir, oysa PV/T kolektörlerin hem elektrik hem de toplam verimi daha yüksek olduğu için yatırım geri dönüş süreleri daha kısadır, bu nedenle PV/T kolektörlerin tercih edilmesi ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

### 3. PV/T SİSTEMLER

Endüstride güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin kullanımı her ne kadar sınırlı olsa da, özellikle fotovoltaik sistemler için, standart PV panellerin yerine PV/T kolektörler kullanılması güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin endüstride kullanımını yaygınlaştırabilir. 1970'li yılların sonlarında hem PV hem de termal kolektörlerin tek bir cihazda birleştirilerek kullanılması ile ilgili bir dizi çalışma yapıldı. Bu yeni güneş sistemleri, hem elektrik elde etmede hem de su veya hava ısıtma da kullanıldığı için endüstriyel uygulamalara etkili bir şekilde katkı sağlamaktadır. Şekil 3.1.'de standart PV kolektör ve Şekil 3.2.'de sıvı tip PV/T kolektörü gösterilmektedir. PV kolektörlerde güneşten elde edilen ışınım tamamen elektrik enerjisine dönüştürülemez. Ortaya çıkan atık ısı, panel veriminin düşmesine neden olur. Ancak Şekil 3.2. gösterilen PV/T kolektörde mevcut olan su çevrimi sayesinde sistem veriminin düşmesine neden olan atık ısı ortamdaki uzaklaştırılmış olur. Böylece hücre verimi artarken atık ısının termal enerjiye dönüşüm işlemi gerçekleşmiş olur. Şekil 3.1.'de gösterilen standart PV panellerde hücre sıcaklıkları daha düşük olduğu için ve atık ısıdan enerji elde edilmediği için verimleri daha düşüktür [6].



Şekil 3.1. Standart PV Panel



**Şekil 3.2. PV/T Kolektör**

### **3.1. PV/T Kolektörün Temel Yapısı**

PV/T kolektörler güneşten doğrudan elektrik ve termal enerji üretmek için tasarlanmıştır, PV ve termal olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. PV paneller güneşten alınan enerjinin %15'ini elektrik enerjisine dönüştürebilir, geri kalan bölümün ise çoğu ısı enerjisine dönüşerek PV panel hücrelerinin ısınmasına neden olur. Hücrelerde oluşan her 1°C sıcaklık artışı panel verimi üzerinde %0,45 daha az elektrik üretimi gerçekleşmesine neden olur. PV/T kolektörlerde, panel hücrelerinde oluşan fazla ısı, termal bölümde bulunan bakır borular içinde dolaşan su ile ortamdaki uzaklaştırılarak hücre sıcaklığının düşmesini, böylece panelden elde edilen elektrik enerjisinin artmasını sağlar.

PV bölümde enerji üretimi, güneşten gelen fotonların yarı iletken malzeme (genellikle silisyum) yüzeyine çarparak, atomlardan elektron koparılması sayesinde açığa çıkan enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle sağlanır.

Termal bölümde ise, güneşten gelen ve PV panelde oluşan fazla ısılar PV panel arkasına entegre edilmiş bakır boru içerisinden geçen suya aktarılır. Böylece evlerde ön ısıtma için kullanılabilen termal enerji elde edilmesi sağlanmış olur.

PV/T kolektörler, güneş enerjisinin büyük bir kısmının toplayıcı yüzeyine odaklanması ile faydalı termal ve elektrik enerjisine dönüştürülmesine olanak sağlar. Sıradan PV panellerde hücre sıcaklığı arttıkça elektriksel verim azalmaktadır. Ancak PV/T kolektörlerde sıcaklık artışı olduğunda, termal kolektörden geçen su, fazla ısıyı PV hücreden uzaklaştırarak daha verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca, PV ve termal kolektör bir arada olduğu için, kullanılan sınırlı çatı alanından daha fazla enerji elde



etmemizi sağlarlar. Birçok farklı PV/T kolektör teknolojisi bulunmaktadır. Her teknolojinin farklı hedef uygulamaları, kurulum maliyetleri ve performans özellikleri vardır [6,43].

### **3.2. PV/T Kolektör Çeşitleri**

Aynı anda hem ısı hem de elektrik enerjisi elde etmemizi sağlayan PV/T kolektörler, elektrik enerjisi üretmek için kullanılan PV panel ve termal enerji üretmek için PV panele entegre edilmiş termal kolektörden oluşmaktadır. PV/T kolektörler elektrik enerjisi üretiminin yanı sıra kullanım alanına göre akışkan ya da hava ısıtılabilir şekilde tasarlanmaktadır. Piyasada yaygın olarak kullanılan dört çeşit PV/T kolektör vardır. Bunlar;

- Sıvı tip düz PV/T kolektörler
- Hava tipi düz PV/T kolektörler
- Isı geri kazanımlı havalandırılmalı PV/T kolektör
- Konsantre PV/T kolektörlerdir.

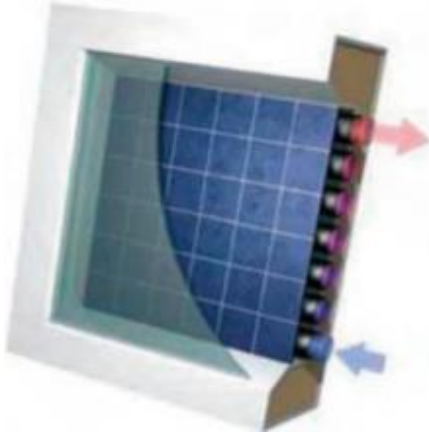
Bu sistemler farklı kullanım alanı ve enerji taleplerine göre tasarlanmıştır. Piyasada en yaygın olarak kullanılanı sıvı tip PV/T kolektörlerdir [6].

#### **3.2.1. Sıvı Tip Düz PV/T Kolektörler**

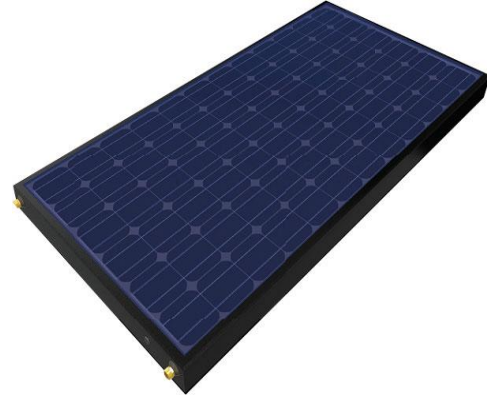
Sıvı tip düz PV/T kolektörlerde, su veya kullanılan akışkan toplayıcı plaka içerisinde dolaştırılarak ısıyı toplar. Sıcak su talebi olması durumunda bu tip bir sistemin kullanılması avantajdır. Düz yapıya sahip bina çatıları, sistemin kurulumu için uygundur. Ayrıca elde edilen sıcak su, harici bir depoda saklanabilir. Ancak bu sistemlerin aşırı koşullarda sızıntı ve donma gibi dezavantajı oluşmaktadır.

Sıvı tip düz PV/T kolektörlerin sırlı ve sırsız olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Sırlanmış yüzeye sahip kolektörler, daha az ısı kaybı ve yüksek termal performans sağlar. Ancak yüksek sıcaklık fotovoltaik hücreyi olumsuz etkilediği için, hücrenin elektriksel performansını bir dereceye kadar düşürmüş olur. Sırsız sıvı tip düz PV/T kolektörlerde, kolektör yüzeyinde sır bulunmaması ısı kayıplarına neden olmaktadır ve ısı kayıpları fazla olduğu için sistemin çalışma sıcaklığında düşüş gözlenir. Böylece, daha yüksek elektriksel performans ve daha düşük termal performans elde edilmiş olur. Kurulan sistemden yüksek termal performans elde edilmek isteniyorsa sırlı, yüksek elektriksel performans elde

edilmek isteniyorsa sırsız sıvı tip düz PV/T kolektör kullanımı uygun olacaktır. Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'de sırlı ve sırsız sıvı tip düz PV/T kolektör gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** Sırlı Camlı Sıvı PV/T



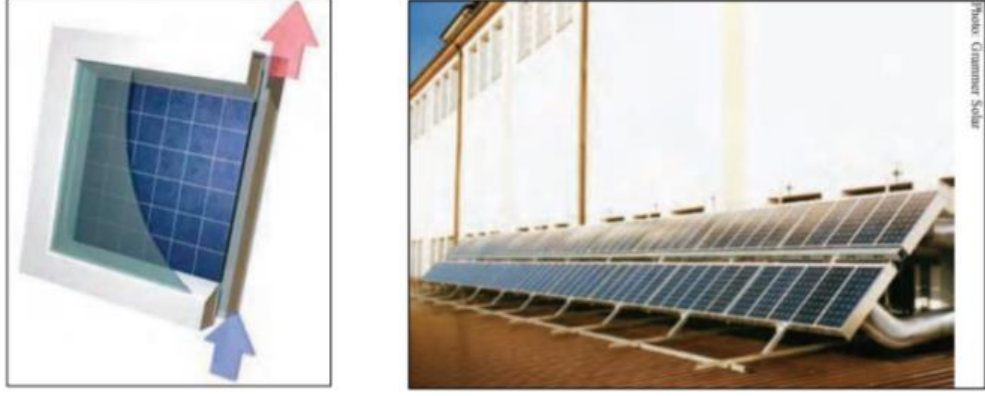
**Şekil 3.4.** Sırsız Camlı Sıvı PV/T

Sıvı tip PV/T kolektörlerde ısıtılan suyu depolayabilmek için depolama tankı gerekmektedir. Genellikle, kolektör alanının metre karesi başına, hacmi 4,5 ile 9 litre arasında değişen depolama tankı kullanılması gerekir. Depolama tankında kullanılan yük eşanjörüne göre depolanan su, içilebilir veya içilemez özellikte olabilir. Küçük sistemlerde genellikle, cam kaplamalı çelik tanklar kullanılmaktadır. Büyük sistemlerde ise, polimerden yapılmış ya da polimer astarları kullanan basınçsız depolama tankları yaygındır. Bu sistemler, küçük basınçlı tanklara kıyasla birim hacim başına depolama maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır [6,47].

### **3.2.2. Hava Tipi Düz PV/T Kolektörler**

Hava tipi düz PV/T kolektörlerde, toplayıcıda sıvı akışkan yerine hava dolaştırılarak havanın ısıtılması sağlanır. Bu tip kolektörler ısıtılmış havaya ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılmalıdır. Sıvı tip kolektörlere göre maliyetleri daha düşüktür ve bir sızıntı durumunda, donma, kaynama veya sistemin zarar görmesi gibi bir risk olmadığından daha avantajlıdır. Ancak, hava tipi PV/T kolektörlerinin, sıvı tipe kıyasla daha düşük termal performansa sahip olması gibi dezavantajları vardır. Sirkülasyon akışkanı düşük ısı kapasitesine sahip olduğundan, daha düşük ısı transferine sahiptir. Ayrıca düşük yoğunluğu nedeniyle transfer hacmi, sıvı tipli olanlara göre çok daha yüksek olmak zorundadır. Dolayısıyla, düşük hacimli uygulamalar için uygun değildir ve kurulumda estetik açıdan hoş olmayan daha büyük hacimli borulara ihtiyaç duyulur. Son olarak, bir sızıntı durumunda sıvı tip

PV/T kolektörlere göre daha yüksek ısı kaybı gözlemlenmektedir. Bu dezavantajlara rağmen hava tipi PV/T kolektörleri düşük maliyetlerinden dolayı, ısıtılmış havaya ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılabilir. Şekil 3.5.'de hava tipi düz PV/T kolektör uygulaması gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** Hava Tipi Düz PV/T Kolektörler ve Uygulaması [6,47]

### 3.2.3. Havalandırmalı PV/T Kolektör

Havalandırmalı PV panelleri, temel olarak havanın doğal taşınımı ile havalandırılmış bir PV panelinden, ısı geri kazanımı yoluyla PV kolektörün ısını kullanın duvarın bir bölümüne veya çatıya entegre edilmiştir. Bu sistemin avantajı yaz aylarında binayı koruyarak, soğutma yükünü azaltmasıdır. Ayrıca kaplama malzemesinin yerini aldıkları için ekonomik bir fizibilite çalışması için uygundur.

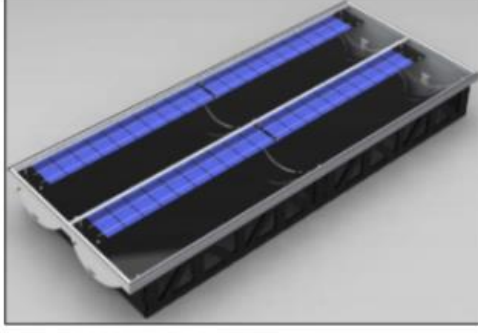
Entegre edilmiş PV kolektörlerini kurmanın dezavantajı ise her bir bina için ayrı ayrı tasarımlarının gerekmesidir. Ayrıca yüksek hacim nedeni ile büyük borulara ihtiyaç duymaları, her uygulama için uygun olmadıklarını göstermektedir. Son olarak, kolektördeki hava dolaşımı, doğa şartlarına maruz kaldığı için yüksek ısı kaybı nedeni ile entegre PV kolektör uygulamalarında düşük sıcaklıklar elde edilir. Şekil 3.6.'da Havalandırmalı PV kolektörün iki uygulaması gösterilmiştir.



**Şekil 3.6.** Havalandırılmalı PV Kolektörün Uygulaması [6,47]

#### **3.2.4. Konsantre PV/T Kolektörler**

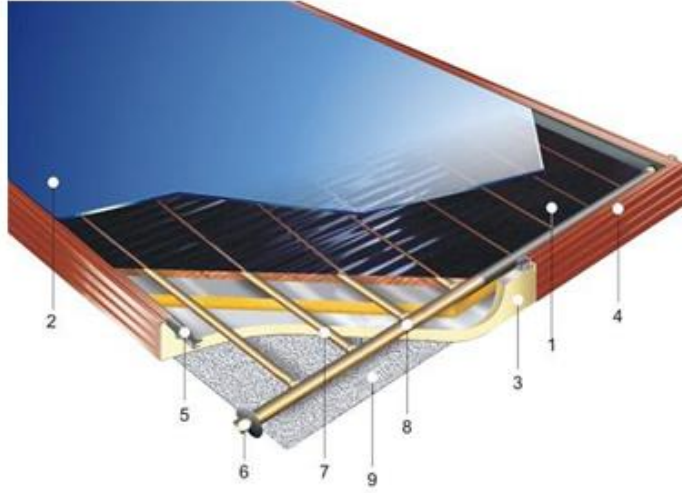
Konsantre PV/T kolektörlerde güneş ışınları toplanarak PV/T kolektörün modülünün bulunduğu merkezi bir noktaya yansıtılır. Bu sistemin avantajı kullanılan reflektör malzemesinin maliyetinin düşük olmasıdır. Ayrıca düz PV/T kolektöre kıyasla daha az PV malzemesine ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemlerde daha az fotovoltaik hücre kullanıldığı ve reflektör maliyeti PV panellerden daha düşük olduğu için sistem maliyeti düz PV/T kolektörlerden daha düşüktür. Böylece sistem daha ucuza mal edilmiş olur. Konsantre PV/T kolektörlerinin dezavantajı ise yüksek sıcaklıklara çıktığından dolayı, sabit bir soğutmaya ihtiyaç duymalarıdır. Eğer termal yük (soğutma) arızalanırsa sistem sorunlu hale gelebilir. Bu sistemlerin daha iyi performans elde etmeleri için diğer sistemlerden daha fazla izlenmeleri ve olası sistem arızalarının önüne geçebilmek için sürekli kontrol edilmeleri gerekmektedir. Düz plakalı PV/T kolektörlerine göre yapıya entegrasyonu zordur. Ayrıca, yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan malzeme bozulması diğer tüm PV/T kolektörlerine göre daha fazla gözlenmektedir. Son olarak, bu kolektörlerin performansı rüzgârla taşınan kum ve toza karşı hassasiyet göstermektedir [6,48]. Şekil 3.7.'de konsantre PV/T kolektörün yapısı ve bir bina üzerindeki uygulama görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Konsantre PV/T Kolektörü ve Uygulaması [6,47]

### 3.3. Sistem Seçimi

PV/T kolektörler elektrik enerjisi üretiminin yanı sıra kullanım alanına göre akışkan ya da hava ısıtılacak şekilde tasarlanmaktadır. Akışkanın ısıtılması ile termal enerji elde etmemizi sağlayan PV/T kolektörlerde genellikle akışkan olarak su tercih edilmektedir. Ancak bu durum panelin kullanılacağı bölge şartlarına göre değişiklik göstermektedir. Eğer kolektör hava sıcaklığı 0 derecenin altında olan bölgelerde kullanılacaksa, donma noktası daha yüksek olan bir akışkan tercih edilmesi gerekir. Yapılan çalışmada sıcak su ve elektrik enerjisi talebini karşılamak amacı ile sistem analizi hedeflendiği için akışkan çevrimli sistem tercih edilmiştir. Ege Bölgesi'nin ortalama sıcaklık değerleri ve önceden yapılan çalışmalar incelendiğinde akışkan olarak su kullanımının sistem için doğru olduğuna karar verilmiştir. Ege Bölgesi için istenilen talepler ve ortam şartları göz önünde bulundurulduğunda, yapılan analizler için sıvı tip düz PV/T kolektör seçimi uygun görülmüştür. Bu tip kolektörler sıcak su ve elektrik ihtiyacını bir arada karşıladıkları için oldukça kullanışlıdır. Sistemin ısı kayıplarının düşük olması istenildiği için sırlı cam seçilerek hesaplamalar yapılmıştır.



- 1- İç Panel
- 2- Üst Örtü
- 3- İzolasyon
- 4- Kasa- Çıta
- 5- Cam Fiteli
- 6- Manifold Contası
- 7- Taşıyıcı Boru ve Kanat
- 8- Manifold Borusu
- 9- Taban Sacı

**Şekil 3.8. PV/T Kolektör Yapısı**

Sıvı tip düz PV/T kolektörün yapısı ve elemanları Şekil 3.8.'de gösterilmiştir. PV/T kolektör şekilde görüldüğü gibi iç panelin (panel hücresi) üzerine üst örtü ve panel altında izolasyon bulunan bir yapıya sahiptir. Ayrıca panel kasesinin içinde termal bölümün su çevrimini sağlamak amacı ile taşıyıcı bakır boru, kanatçık bulunmaktadır. Kasanın en alt bölümünde dış ortamla teması kesmeye yarayan taban sacı bulunmaktadır. Seçilen panelde sırlı cam kullanıldığı için termal performansın yüksek olması beklenmektedir.

### **3.3.1. Referans Bir Ev İçin Elektrik Enerjisi Talebinin Belirlenmesi**

Güneş enerjisi ile elektrik üretimine ait bir sistem tasarlanırken dikkate alınan önemli parametreler;

- ▶ Günlük enerji talebi
  - Yüklerin ortalama güçleri
  - Yükün maksimum gücü
- ▶ Sistemin çalışma gerilimi
- ▶ Depolanacak enerji miktarının belirlenmesi

Günlük toplam enerji ihtiyacı kWh olarak hesaplanır. Her bir yük için ortalama güç ve ortalama çalışma saatleri hesaplanır ve verimler de hesaba katılarak toplam günlük enerji ihtiyacı elde edilir. Enerji ihtiyacı belirlenirken sistemin toplam verimi dikkate alınır.

**Tablo 3.1.** Referans Ev İçin Günlük Elektrik Enerji Talebi

Yük	Ortalama Güç (W)	Çalışma Süresi (h)	Adet	Günlük Enerji Tüketimi	Haftalık Enerji Tüketimi
Aydınlatma	12	4 (tümü aynı anda )	4	192 Wh	1344 Wh
Buzdolabı	200	10	1	2000 Wh	14000 Wh
TV	120	5	1	600 Wh	4200 Wh
Bilgisayar	150	2	1	300 Wh	2100 Wh
Çamaşır Makinesi	150	2 (Haftada)	1	-	150 Wh
Ütü	2000	3( Haftada)	1	-	6000 Wh
Ortalama Haftalık Enerji Tüketimi	27794 Wh				
Ortalama Günlük Enerji İhtiyacı	$27794/7=3970 \text{ Wh} \cong 4 \text{ kWh}$				

Dört kişinin yaşadığı bir ev için ortalama günlük enerji talebi Tablo 3.1.'de verilmiştir. Tablo temel ihtiyaçlar dikkate alınarak hazırlanmıştır. Referans ev için ortalama günlük enerji talebi yaklaşık 4 kWh olarak hesaplanmıştır.

### 3.3.2. Referans Bir Ev İçin Isı Enerjisi Talebinin Belirlenmesi

Güneş Enerjisi ile su ısıtmasına ait bir sistem tasarlanırken dikkate alınan önemli parametreler;

- ▶ Hesaplanacak Ayın Belirlenmesi
- ▶ Toplam Su İhtiyacının Belirlenmesi



Dâhili sıcak su kullanımı olan birimlerde, sıcak su tüketim miktarı, tüketim birimindeki insanların hayat standartları, alışkanlıkları, kültür ve eğitim düzeyleri ile ilişkili olmakla birlikte en önemli gösterge ekonomik gelir seviyesidir.

**Tablo 3.2.** Kişi Başına Düşen Sıcak Su Miktarı

Ekonomik gelir seviyesi	Kişi başına düşen sıcak su miktarı (L/gün kişi)
Dar gelir grubu	30-50
Orta gelir grubu	50-70
Üst gelir grubu	70-90
En üst gelir grubu	90-150

Orta gelir grubuna dâhil bir aile için kişi başı günlük sıcak su ihtiyacı ortalama 55 L olarak belirlenmiştir.

Enerji talepleri doğrultusunda sistemden maksimum verim alacak şekilde sistem elemanları belirlenmiştir.

### 3.4. Sistem Elemanları

Sistem kurulumu için bina çatısı tercih edilmiştir. Sistem 30° eğim açısı ve güney cephesi yönünde 10 m<sup>2</sup>'lik bir alana sahip bina çatısı için tasarlanmıştır. Çatı kurulumlarında pompa tahrikli sistemler kullanılmaktadır. Sistemden yüksek termal verim hedeflendiğinden dolayı, sırlı cam yüzeye sahip PV/T kolektör tercih edilmiştir. Sistem elemanları sırası ile aşağıda yer almaktadır.

- PV/T Kolektör

Yapılan analiz kapsamında sistemin en önemli bileşeni PV/T kolektördür. Sistem analizi için, Solimpeks marka Wunder model ürünün teknik özelliklerinden yararlanılarak PV/T kolektör seçimi yapılmıştır.

Seçilen panel için güç, voltaj, akım ağırlık ve basınç değerleri;

- Pmax: 200 Wp (belirlenen güç)
- Vmp : 37,89 V (en yüksek güç voltajı)
- Imp : 5,28 A (en yüksek güç akımı)
- Voc : 45,26 V (açık devre voltajı)
- Isc : 5,66A (kısa devre akımı)



- Ağırlık : 24,4 kg
- Maksimum basınç: 6 bar

Kullanılacak sistem için seçimi yapılan PV/T kolektörün teknik özellikleri Tablo 3.3.'de verilmiştir.

**Tablo 3.3. PV/T Kolektör Teknik Özellikleri**

<b>Ebatlar</b>	828mm*1601mm*90mm
<b>Toplam Yüzey (m<sup>2</sup>)</b>	1,37
<b>Açıklık Yüzeyi (m<sup>2</sup>)</b>	1,36
<b>Hücre Yüzeyi (m<sup>2</sup>)</b>	1,3
<b>Ağırlık (kg)</b>	24,4
<b>Taşınan Sıvı Hacmi</b>	1,21
<b>Hücre Paneli</b>	Mono Kristal Silisyum Modül
<b>Hücre Sayısı</b>	72
<b>Hücre Ebatları (mm)</b>	125*125mm
<b>WP (W) Nominal Güç/ IMP (A) Nominal Akım</b>	190/5,2
<b>ISC (V) Kısa Devre Akımı</b>	5,6
<b>VMP (V) Nominal Güç</b>	36,4
<b>VOC (V) Kısa Devre Voltajı</b>	45,2
<b>Soğurucu Yüzey/Boru</b>	Bakır
<b>Test Basıncı (Bar)</b>	20
<b>Maksimum Çalışma Basıncı (BAR)</b>	10
<b>Dış Cam</b>	4mm PV Modül Camı
<b>Sızdırmazlık</b>	EPDM&Silikon Conta
<b>Maksimum Isı</b>	<110

- Çift Serpantinli Boyler

Boyerler, ısı transferinin gerçekleştiği, sıcak kullanım suyunun hazırlamaya ve depo etmeye yarayan bir çeşit ısı değiştiricisidir. Güneş enerjili sistemlerde kullanılan boylerler; termosifonik sistemlerde kullanılan boylerler ve pompalı sistemlerde kullanılan boylerler ve endüstriyel tip boylerler olmak üzere üçe

ayrılabilir. Kolektör ve deponun birbirine akuple olarak kullanıldığı termosifonik sistem uygulamalarında, (genelde 300 L'ye kadar) güneş enerjisi boylerleri (cidarlı boyler) kullanılmaktadır. Termosifonik sistem uygulamalarında kolektör ve boyler bir arada kullanılmaktadır.

Dört kişinin yaşadığı bir konutta bölge iklim şartları da dikkate alındığında sıcak su talebini karşılayabilmek için 300 L kapasiteli dik tip ısı pompası için üretilmiş çift serpantinli boyler tercih edilmiştir.

- Pompa Grubu

Bina çatısına kurulacak sistem için ikili pompa grubu tercih edilmiştir.

Değerlerinde pompa, debimetre, gidiş hattında termometreli vanası olan, yaylı çekvalf bulunan, su basılması için tasarlanmış basma hattı bulunan, dönüş hattında hava ayırıcı olan, ısı izolasyonu için polistren sert köpük ceketli bulunan, pompa grubu gidiş hattına bağlanarak kolektörlere doğru sirkülasyon yapmalıdır.

Pompa özellikleri;

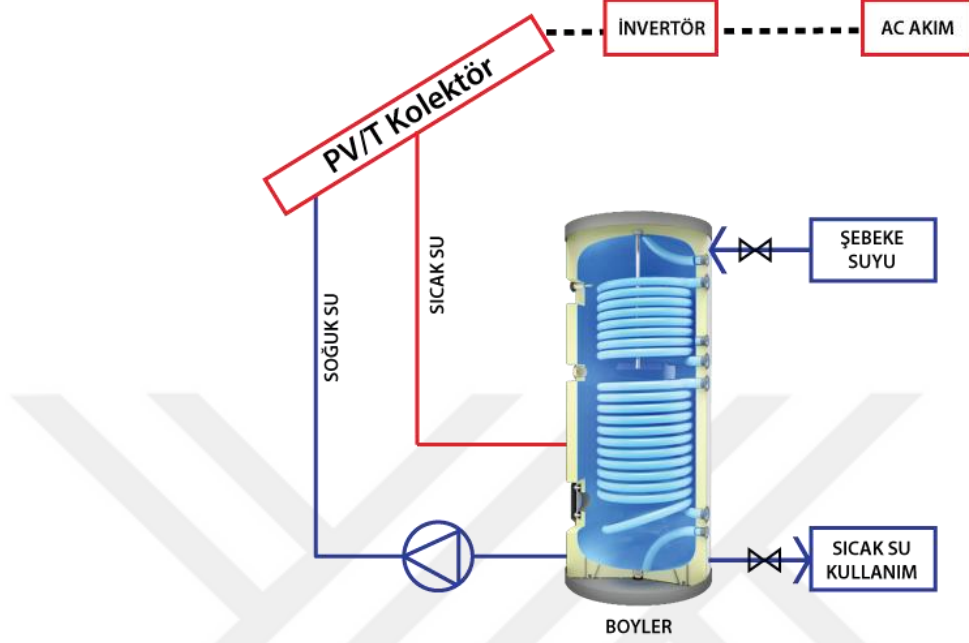
- Hmax: 5,8 mSS
- Qmax: 4 m<sup>3</sup>/h

- İnverter

Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalar için sistemde inverter kullanılır. Böylece güneş panellerinde üretilen ve akülerde depolanan DC gerilim, 220 V ve 50 Hz'lik sinüs dalgasına dönüştürülür [49,50].

### 3.4.1. Sistemin Blok Şeması

PV/T kolektör kullanılarak oluşturulan sistemin blok şeması Şekil 3.9.'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Sistemin Blok Şeması

Güneş ışınımı PV/T kolektör üzerine düştüğünde PV panel tarafından doğru (DC) akım üretilir. DC akım invertör vasıtasıyla alternatif (AC) akıma çevrilir ve yüklerle aktarılır. Şekil 3.9.'da kesik çizgiyle gösterilen kısım elektrik akımının geçiş yolunu göstermektedir. Ayrıca, güneş ışınımının kolektör üzerine düşmesi ile termal kısımdaki borular içerisinde bulunan su ısınmaktadır. Isınan su, boiler kazanına aktarılarak kazan içerisindeki suyun ısıtılmasını sağlar. Buradan daha düşük sıcaklıktaki su kütlesi kolektöre doğru hareket etmektedir. Kolektörde oluşan fazla ısı enerjisi düşük sıcaklıktaki suya aktarılarak kolektör veriminin artması sağlanır. Boyler kazanı içerisindeki sıcak su ise uzun süre ısı enerjisini koruyabilmektedir ve ihtiyaç halinde evsel tüketim için kullanılmaktadır [6].

#### 4. MATERYAL ve YÖNTEMLER

Standart bir PV panel ve su ısıtmak için kullanılan termal kolektörden oluşan PV/T hibrit sistemler, güneş enerjisinin büyük kısmını toplayıcı yüzeye odaklayarak faydalı termal enerji ve elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar. PV panel verimi hücre sıcaklığı arttıkça azalır. Bununla beraber PV/T kolektörlerde toplayıcıdan geçen su, PV hücresindeki fazla ısıyı ortadan kaldırarak daha verimli çalışmasını sağlar. Ayrıca PV ve termal toplayıcılar birleştiği için sınırlı çatı alanından daha fazla verim elde etmemizi sağlar. Piyasada farklı hedef uygulamaları için farklı PV/T kolektörler mevcuttur. Her teknolojinin farklı kurulum maliyeti ve performans özelliği vardır.

Bu çalışmada, PV ve PV/T kolektörler için öncelikle detaylı literatür taraması yapılarak, bu çalışma için sıvı tip PV/T kolektör uygun bulunmuştur. Seçilen PV/T kolektörün matematiksel modeli MATLAB/Simulink programı ile çıkartılmıştır. Bu model üzerinde çeşitli çevresel faktörlerin ve panellerde kullanılan malzemelere ait değerlerin değiştirilmesi ile termal-elektriksel verim değişimleri incelenmiştir. Değişken olarak kullanılan çevresel faktörler ve panelin yapısına ait büyüklükler literatüre uygun seçilmiştir. Bu sayede sistemin teorik performans analizi yapılmıştır.

Yapılan çalışmasının bir diğer boyutu da oluşturulan sisteme ait ekonomik analiz yapılmasıdır. Ekonomik analiz için literatürde belirtilen yöntemler izlenerek sistemin hem termal hem de elektrik enerjisi üretimi belirlenerek, sistem için enerji üretim modeli çıkartılmış ve sistem yatırım geri dönüş süresi hesaplanmıştır.

PV/T kolektörün performans ve ekonomik analizi için gerekli parametreler Tablo 4.1. ve Tablo 4.2.'de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** PV/T Kolektör Performans Analizi Parametreler [6]

PARAMETRE	SEMBOL	DEĞER	BİRİM
Ortam Sıcaklığı	Ta	293	K
Yüzeidenki Işıma	$\epsilon_p$	0,95	-
Kapaktaki Işıma	$\epsilon_c$	0,88	-
Boru Sayısı	n	66	-
Sistem Akış Hızı	m	2	lps
Kolektör Alanı	A	10	m <sup>2</sup>
Rüzgar Hızı	v		m <sup>2</sup> /s
PV trans/abs	$\tau\alpha_{PV}$	0,74	-
Termal trans/abs	$\tau\alpha_T$	0,925	-
Emici Kalınlığı	t	0,5	mm
PV Kalınlığı	L <sub>PV</sub>	0,4	mm
PV iletkenliği	k <sub>PV</sub>	130	W/mK
Boru Hidrolik Çapları	dh	9,7	mm
Boru Aralığı	w	0,1	mm
Boru genişliğinin aralığa oranı	d/w	1,5	-
Hücreden emiciye ısı transfer katsayısı	h <sub>pva</sub>	45	W/m <sup>2</sup> K

Tablo 4.1.'de verilen değerler PV/T kolektör performansını doğrudan etkilemektedir. Performans analizi yapılırken, ortam koşulları, PV/T kolektör özellikleri ve önceki çalışmalar incelenmiş olup, Tablo 4.1.'de verilen değerler simülasyon için kullanılmıştır.

Emici kalınlığı, PV kalınlığı, PV iletkenliği, boru hidrolik çapları, boru aralığı, boru genişliğinin aralığa oranı, hücreden emiciye ısı transfer katsayısı parametreleri seçilen PV/T kolektöre bağlı sabit parametrelerdir. Yapılan sistem seçimine göre değerler belirlenmiştir.

Yapılan sistem simülasyonuna göre elde edilen değerler sonuçlar bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.

**Tablo 4.2.** PV/T Kolektör Ekonomik Analizi Parametreleri

PARAMETRE	SEMBOL	DEĞER	BİRİM
Elektrik Bedeli	EP	0.1024	Euro/kWh
Isıtma Bedeli	HP	0.08	Euro/kWh
Etkili PV/T Kolektör Alanı	A	9,36	m <sup>2</sup>
Çalışma süresi	n	25	Yıl
Elektriksel verim	$\eta_e$	13,5	%
Isıl verim	$\eta_{th}$	64,5	%
Bozulma oranı	dg	0.01	Yıl
Sermaye maliyeti	$C_0$	4900	Euro
Özkaynak borcu	DE	0.6	%
Faiz oranı	Itr	0.02	%
Kredi vadesi		25	Yıl
Etkili vergi	$T\alpha_t$	0.05	Euro/kWh
İndirim oranı	r	3	%
İşletme ve bakım maliyeti	OM	1	%
Enflasyon oran	Ifr	10,4	%

Tablo 4.2.'de verilen değerler PV/T kolektörün enerji üretim modelinin oluşturulması ve ekonomik analizinin yapılabilmesi için kullanılmıştır. Analiz yapılırken PV/T kolektör özellikleri, önceki çalışmalar ve yapılan detaylı piyasa araştırması sonucunda değerler belirlenmiştir. Ekonomik analiz yapılırken ortak para birimi olmasından ve araştırılan çalışmalarda Euro kullanıldığı gözlemlendiğinden dolayı bu çalışmada para birimi olarak Euro tercih edilmiştir.

Referans bir ev için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi miktarı Tablo 3.1.'de detaylı olarak incelenmiştir. 4 kişinin yaşadığı bir ev için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi miktarı günlük 4 kWh olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.3.'de aylara göre aktif elektrik enerjisi tüketim miktarı ve bedeli verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Elektrik Bedeli

AYLAR	TÜKETİM MİKTARI (kWh)	FİYAT (EURO)
Ocak	124	14,09
Şubat	112	12,73
Mart	124	14,09
Nisan	120	13,64
Mayıs	124	14,09
Haziran	120	13,64
Temmuz	124	14,09
Ağustos	124	14,09
Eylül	120	13,64
Ekim	124	14,09
Kasım	120	13,64
Aralık	124	14,09
<b>TOPLAM</b>	<b>1460</b>	<b>165,90</b>

Elektrik bedeli hesaplanırken tek zamanlı tarifeye göre hesaplama yapılmış olup aşağıda yer alan formüller kullanılmıştır.

$$\text{Aktif tüketim}(kWh) \times \text{Aktif birim fiyat} \left( \frac{\text{Euro}}{kWh} \right) =$$

$$\text{Toplam Tüketim Bedeli} \quad (1)$$

Elektrik faturasına eklene vergiler;

$$\text{Enerji Fonu} (\%1) = \text{Tüketim Tutarı} \times 0,01 \quad (2)$$

$$\text{TRT Payı} (\%2) = \text{Tüketim Tutarı} \times 0,02 \quad (3)$$

$$\text{Elektrik Tüketim Vergisi} (\%5) = \text{Tüketim Tutarı} \times 0,05 \quad (4)$$

Katma Değer Vergisi (KDV) yukarıdaki işlemlerden sonra çıkan tutar üzerinden yapılmaktadır.

$$KDV = (Tüketim tutarı + Bedeller + Enerji Fonu + TRT Payı + ETV) * 0,18$$

(5)

Hesaplamalar sonucunda elektrik enerjisi birim fiyatı 0,1024 Euro/kWh olarak hesaplanmıştır [51].

Tablo 3.2’de yer alan verilere göre orta gelir grubuna dahil bir ailenin günlük ihtiyaç duyduğu sıcak su miktarı ortalama 220 L olarak hesaplanmıştır. Eysel kullanım suyunu istenilen sıcaklığa ısıtmak için gerekli olan enerji miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$Q = [m * c * (t_2 - t_1)] \text{ Wh} \quad (6)$$

Burada,

$Q$ = ısı miktarı, (Wh),

$m$ = su miktarı, (kg),

$c$ = suyun özgül ısısı, (Wh/kg.K),

$t_2$ = ısıtılmış su sıcaklığı, K

$t_1$ = suyun ilk sıcaklığı, K

Kullanım suyunu ısıtmak için gerekli olan enerji  $t_1$  ile doğru orantılı olduğu ve  $t_1$  sıcaklığı mevsimsel olarak değişiklik gösterdiği için aylara göre ortalama değer alınarak hesaplamalar yapılmıştır [52].

**Tablo 4.4.** Eysel Sıcak Su Kullanımı

Kullanım Yeri	Sıcaklık (°C)
Lavabo	41
Duşlar	43

Tablo 4.4.’de evlerde kullanılan sıcak suyun kullanım alanları ve sıcaklıkları verilmiştir. Kullanım miktarına göre yapılan analizde, evsel kullanımda ihtiyaç duyulan su sıcaklığı ortalama 42°C olarak belirlenmiştir. İstenilen sıcaklığa ulaşabilmek için gereken ısı enerjisi  $Q=4,4$  kWh olarak belirlenmiştir.

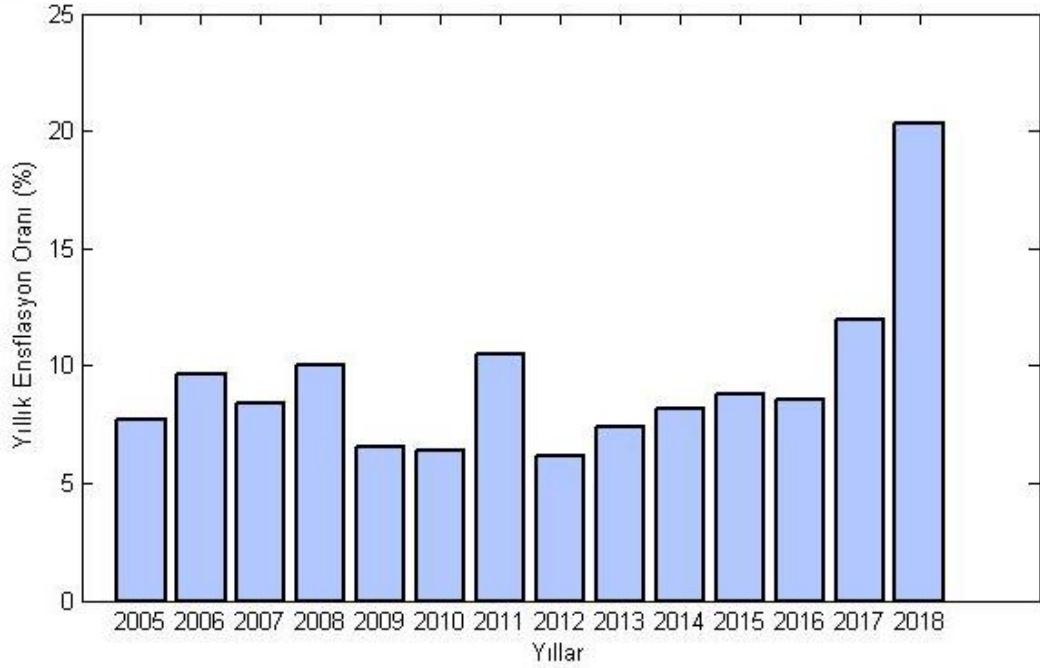
Isıtma bedeli hesaplanırken Türkiye’de yaygın olarak kullanıldığı için doğalgaz ve elektrik fiyatı üzerinden hesaplama yapılmıştır. 2019 yılı Ekim ayı



itibari ile doğalgaz enerjisinin kWh fiyatı 0,02 Euro'dur [53]. Elektrik enerjisinin birim fiyatı ise 0,1024 Euro/kWh olarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda 4 kişinin yaşadığı bir ev dikkate alındığında günlük 220 L suyu ortalama 42°C'ye ısıtmak için gereken enerji miktarı 4,4 kWh'dır. Isı enerjisini karşılayabilmek için doğalgaz kullanıldığında ısıtma bedeli 0,08 Euro/kWh ve elektrik enerjisi kullanıldığında ise 0,45 Euro/kWh olarak hesaplanmıştır.

2005-2018 yılları arasındaki yıllık enflasyon oranı Şekil 4.1.'de yer almaktadır [54].



Şekil 4.1. Yıllık Enflasyon Oranı

Ekonomik analiz sırasında enflasyon değerini belirlemek için Şekil 4.1.'den yararlanılmıştır. 2005-2018 yılları arası ortalama yıllık enflasyon oranı hesaplanarak analiz için enflasyon oranı %10,4 olarak alınmıştır.

#### 4.1. Matematiksel İfadeler

##### 4.1.1. Termal ve Elektriksel Verim Analizi İçin Matematiksel İfadeler

PV/T kolektörün termal ve elektriksel verimini analiz etmek amacıyla kolektöre eklenmiş düz plaka termal toplayıcıyla, tek boyutlu kararlı hal modeli 2015

yılında yapılan bir çalışma ile geliştirilmiştir. Bu analizde Hottel-Whillier denklemleri kullanılmıştır [6,29].

Isı kazancı ( $Q$ ):

$$Q = AF_R[(T \propto)_{PV} * GU_{loss}(T_i - T_a)] \quad (7)$$

Bu denklemde ısı kazancı ( $Q$ ); düzenleme faktörü ( $F_R$ ), kolektör alanı ( $A$ ), ışınım ( $G$ ), fotovoltaik hücrelerde geçirgenlik-soğurma faktörü ( $T \propto_{PV}$ ), ısı kaybı katsayısı ( $U_{loss}$ ), giriş sıcaklığı ( $T_i$ ), ortam sıcaklığının ( $T_a$ ) bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

Kolektör ısı değiştirici düzeltme faktörü ( $F_R$ ):

$$F_R = \frac{mC_p}{AU_{loss}} [1 - \exp(-\frac{AU_{loss}F'}{mC_p})] \quad (8)$$

Kolektör ısı değiştirici düzeltme faktörü ( $F_R$ ); kolektördeki kütle akışı hızı ( $\dot{m}$ ) ve kolektör soğutucu maddesinin özgül ısısına ( $C_p$ ) bağlı olarak hesaplanır.

Kanatçık verimlilik faktörü  $F$ :

$$F = \frac{\tanh(M\frac{w-d}{2})}{M\frac{w-d}{2}} \quad (9)$$

Denklem 9'da, bitişik borular arasındaki etki hesaba katılarak PV/T kolektör imalatı sırasında oluşturulan dikdörtgen kesitli tüplerin içerisinde bulunan boruların, boru aralıkları ( $w$ ) ve boru genişliği ( $d$ ) dikkate alınarak kanatçık verimlilik faktörü ( $F$ ) hesaplanmıştır. Tüplerdeki akışla ilgili tüm hesaplamalarda, boru hidrolik çapı ( $d_h$ ) dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

PV hücre ve emicinin termal iletkenlik katsayısı ( $M$ );

$$M = \sqrt{\frac{U_{loss}}{k_{abs}l_{abs} + k_{PV}l_{PV}}} \quad (10)$$

Bu denklemde  $M$ , emici ve PV hücrenin ısı iletkenliğini ifade eden bir katsayıdır.

Kolektör verim faktörü  $F'$  denklem 11'de verilmiş olan formülle hesaplanır.

$$F' = \left[ \frac{\frac{1}{U_{loss}}}{d + (w-d)F} \right] + \frac{1}{wh_{PVA}} + \frac{1}{\pi dh_{fluid}} \quad (11)$$

Burada Dittus-Boelter denklemine göre  $h_{pVA}$ , PV panel ile emici plaka arasındaki bağ direncinin ısı transfer katsayısı olup,  $h_{fluid}$  belirlenen soğutma kanalı içindeki zorlanmış ısı transfer katsayısını ifade etmektedir.

Sistemdeki toplam performans kayıpları denklem 12'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanabilir. Genel kayıp katsayısı ( $U_{loss}$ );

$$U_{loss} = U_t + U_b + U_e \quad (12)$$

Üst kayıp katsayısı ( $U_t$ ) denklem 13 kullanılarak hesaplanır.

$$U_t = \left\{ \frac{N_g}{\frac{c}{T_{pm} - T_a} e} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,0059N_g h_w)^{-1} + \frac{2N_g + f^{-1} + 0,33C_p}{\varepsilon_g} - N_g} \right\} \quad (13)$$

Burada;  $N_g$  cam kapak sayısı,  $\varepsilon_p$  yüzey yayılımı,  $\varepsilon_g$  cam yayılımı,  $T_{pm}$  ortalama yüzey sıcaklığı,  $h_w$  Rüzgâr ısı transfer katsayısı ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $v$  Rüzgâr hızı (m/s),  $\beta$  eğim açısı,  $p$  kolektör çevresi ve  $L$  emici kalınlığıdır.

$$c = 520(1 - 0,000051\beta^2) \quad (14)$$

$$e = 0,43\left(1 - \frac{100}{T_{pm}}\right) \quad (15)$$

$$f = 0(1 + 0,089)^{h_w} - 0,1166h_w\varepsilon_p(1 + 0,07866N) \quad (16)$$

Rüzgâr ısı transfer kat sayısı ( $h_w$ );

$$h_w = 5,7 + 3,8v \quad (17)$$

Alt kayıp katsayısı aşağıdaki denklemde verilen matematiksel ifadeler ile hesaplanır:

$$U_b = \frac{K_b}{L_b} \quad (18)$$

Kenar kayıp katsayısı aşağıdaki denklemde verilen matematiksel ifadeler ile hesaplanır:

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (19)$$

Ortalama Sıcaklık Farkı ( $T_{pm}$ ):

$$T_{pm} = T_i + \frac{Q_u}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (20)$$

PV panelin elektriksel verimliliği ortalama sıcaklık arasındaki fark ve bağ hücresi çalışma sıcaklığına ( $NOCT$ ) göre hesaplanır. Bir PV/T kolektörün elektriksel verim hesabı, denklem 21'de ifade edilmiştir;

$$\eta_e = 0,15(1 - 0,005(T_{pm} - NOCT)) \quad (21)$$

Bir PV/T kolektörün termal verimliliği, giriş sıcaklığı ( $T_i$ ), ortam sıcaklığı ( $T_a$ ), kolektör yüzeyine gelen ışınım miktarı ( $G$ ), sızdırmazlık faktörü ( $s$ ), PV ve termal hücrenin emici ürün iletkenliği ile doğrudan bağlantılıdır [6,23].

$$\eta_{thermal} = F_R(S * \tau\alpha_{PV}) + (1 - S * \tau\alpha_T) - F_R U_{loss} \frac{T_i - T_a}{G} \quad (22)$$

#### 4.1.2. Enerji Üretim Modeli İçin Matematiksel İfadeler

PV/T kolektörlerden hem elektrik hem de termal enerji üretimi gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, toplam enerji miktarı, elektrik enerjisi ve termal enerji toplamına eşittir. Güneş enerjisi miktarı ve panel yüzeyi hem elektrik hem de termal enerji miktarının hesaplanmasında belirleyici faktörlerdir [1].

Enerji üretim modeli üç temel bileşen kullanılarak basitleştirilmiştir. Bunlar güneş ışınımı, elektrik/termal verim ve çalışma süresi boyunca yoğunlaştırıcı performansındaki azalmadır. PV/T kolektöründen enerji üretimi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir [34].

$$E_t = E_{ey} + E_{thy} \quad (23)$$

$$E_{eg} = G_t * \eta_e * A \quad (24)$$

$$E_{ey} = \sum_{n=1}^{n=365} E_{eg} \quad (25)$$

$$E_{et} = \sum_{n=1}^{n=25} E_{ey} * (1 - dg_e)^t \quad (26)$$

$$E_{thg} = G_t * \eta_{th} * A \quad (27)$$

$$E_{thy} = \sum_1^{365} E_{thg} \quad (28)$$

$$E_{tht} = \sum_1^{25} E_{thy} * (1 - dg_e)^t \quad (29)$$

Burada  $E_t$  üretilen yıllık toplam enerji (kWh/yıl),  $E_{ey}$  üretilen yıllık elektrik enerjisi miktarı (kWh/yıl) ve  $E_{thy}$  üretilen yıllık termal enerji miktarı (kWh/yıl) olarak ifade edilmiştir. Ayrıca  $E_{eg}$  ve  $E_{thg}$  sırası ile üretilen günlük elektrik enerjisi miktarını ve termal enerji miktarını ifade ederken  $E_{et}$  ve  $E_{tht}$  sistemin 25 yıl kullanılması durumunda elde edilecek elektrik ve termal enerji miktarını hesaplamak için kullanılır.

$A$ , PV/T kolektörün etkin toplam alanıdır ( $m^2$ ).

$G_t$ , ortalama günlük ışıınımdır ( $kWh/m^2$ ).

$\eta_e$ , kolektörün toplam elektrik verimidir (%).

$\eta_{th}$ , kolektörün toplam termal verimidir (%).

$dg_e$  ve  $dg_{th}$ , sırası ile PV/T kolektörün elektrik ve termal parçalarının 0-t yıl arasında bozulma oranını ifade eder [32].

#### 4.1.3. Ekonomik Analiz İçin Matematiksel İfadeler

$LCOE$ , kullanım ömrü boyunca bir enerji sistemi kurmanın ve çalıştırmanın genel birim enerji maliyetlerini ifade eder. Yakıt, finansman, teşvikler, vergiler, işletme maliyetleri ve bozulma gibi tüm maliyet faktörleri, seviye maliyet hesaplamalarında dikkate alınmalıdır. Özellikle, PV/T kolektörler için,  $LCOE$ , iki farklı enerji sistemini, hibrit olarak standartlaştırılmış bir formül sunmakta, böylece farklı üretim kaynaklarının enerji maliyetlerini karşılaştırabilmektedir [34].

$LCOE$  değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n-1} \frac{C_t}{(1-r)^t}}{\sum_{t=0}^{n-1} \frac{E_t}{(1-r)^t}} \quad (30)$$

Burada;

$n$ , kolektörün kullanım ömrü açısından yıl sayısıdır.

$C_t$ ,  $t$  yılındaki toplam maliyeti ifade eder (Euro).

$r$ , iskonto oranıdır (%).

PV/T kolektörün bir yıldaki toplam maliyeti aşağıdaki denklemde verilen matematiksel ifadeler ile ifade edilir;

$$C_t = (I_0|t = 0) + L_t + OM_t + T\alpha_t \quad (31)$$

Burada,

$I_0$ , ilk yıldaki yatırım harcamalarını ifade eder (Euro).

$L_t$ , yıllık krede ödeme ve faiz miktarı dâhil olmak üzere,  $t$  yıllık finansman kredisi maliyetini ifade eder (Euro).

$T\alpha_t$ ,  $t$  yıllık elektrik üretimi için ödenen vergidir (Euro).

$OM_t$ ,  $t$  yıllık işletme ve bakım maliyetidir.

İlk yıl için yatırım harcamaları ( $I_0$ );

$$I_0 = C_0 \times (1 - DE) \quad (32)$$

Burada,

$C_0$ , sermaye maliyetini ifade eder (Euro).

$DE$ , borcun özsermaye oranıdır (%).

$t$  yıllık finansman kredisi  $L_t$ , aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$L_t = C_0 \times DE \times \left[ \frac{1}{n} + \left( 1 - \frac{t}{n} \right) \times Itr_t \right] \quad (33)$$

Burada,

$Itr_t$ ,  $t$  yıllık faiz oranını ifade eder (%).

Vergi ( $T\alpha_t$ ) Denklemi;

$$T\alpha_t = TR \times E_{et} \quad (34)$$

Burada,

$TR$ , kWh başına vergi oranıdır (Euro /kWh).

Kümülatif kârın bir ölçümü olan  $NPV$ , nakit çıkışlarının (başlangıç maliyeti dâhil) toplam değerleri ve PV/T kolektörün kullanım ömrü süresi boyunca nakit giriş değerlerinin arasındaki fark ile hesaplanır (Denklem 35).  $NPV$  değeri sadece tek bir yatırım için kullanılarak yatırımın kârlı olup olmayacağını değerlendirmek için kullanılabilir gibi, alternatif yatırım ya da rakip yatırım projelerini değerlendirmek için de kullanılabilir. Pozitif bir  $NPV$ , bir proje veya yatırım tarafından üretilen tahmini kazancın, beklenen maliyetleri aştığını gösterir. Genel

olarak, pozitif bir  $NPV$ 'ye sahip olan bir yatırım karlı olabilir ve daha yüksek  $NPV$  daha yüksek kar anlamına gelir. Bu kavram, yapılması gereken tek yatırımın pozitif  $NPV$  değerlerine sahip olduğunu belirleyen  $NPV$  karar kuralının temelidir.

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=0}^{n-1} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (35)$$

Burada,

$CF_t$ ,  $t$  yıllık nakit akışını ifade eder (Euro).

$CF_t$ , aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$CF_t = S_{et} + S_{tht} - C_t \quad (36)$$

Ek olarak sırası ile elektrik ve ısınma tasarrufu hesabı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$S_{et} = EP_t \times Ifr_t \times E_{et} \quad (37)$$

$$S_{tht} = HP_t \times Ifr_t \times E_{tht} \quad (38)$$

Burada,

$EP_t$ ,  $t$  yıllık elektrik fiyatıdır (Euro /kWh).

$HP_t$ ,  $t$  yıllık ısınma fiyatıdır (Euro /kWh).

$Ifr_t$ ,  $t$  yıllık enflasyon oranıdır (%).

$PP$ , geri ödeme periyodu, bir projenin, nakit akışının pozitifleşmeye başladığı ilk yatırım fonlarının geri kazanılması için geçen zamandır. Eğer  $PP$  kullanılan PV/T ömrünün üzerinde ise yatırım karlı olmayacağı şeklinde ifade edilmektedir [1,48].

$$PP = T_{(CF_t) > 0} \quad (35)$$

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

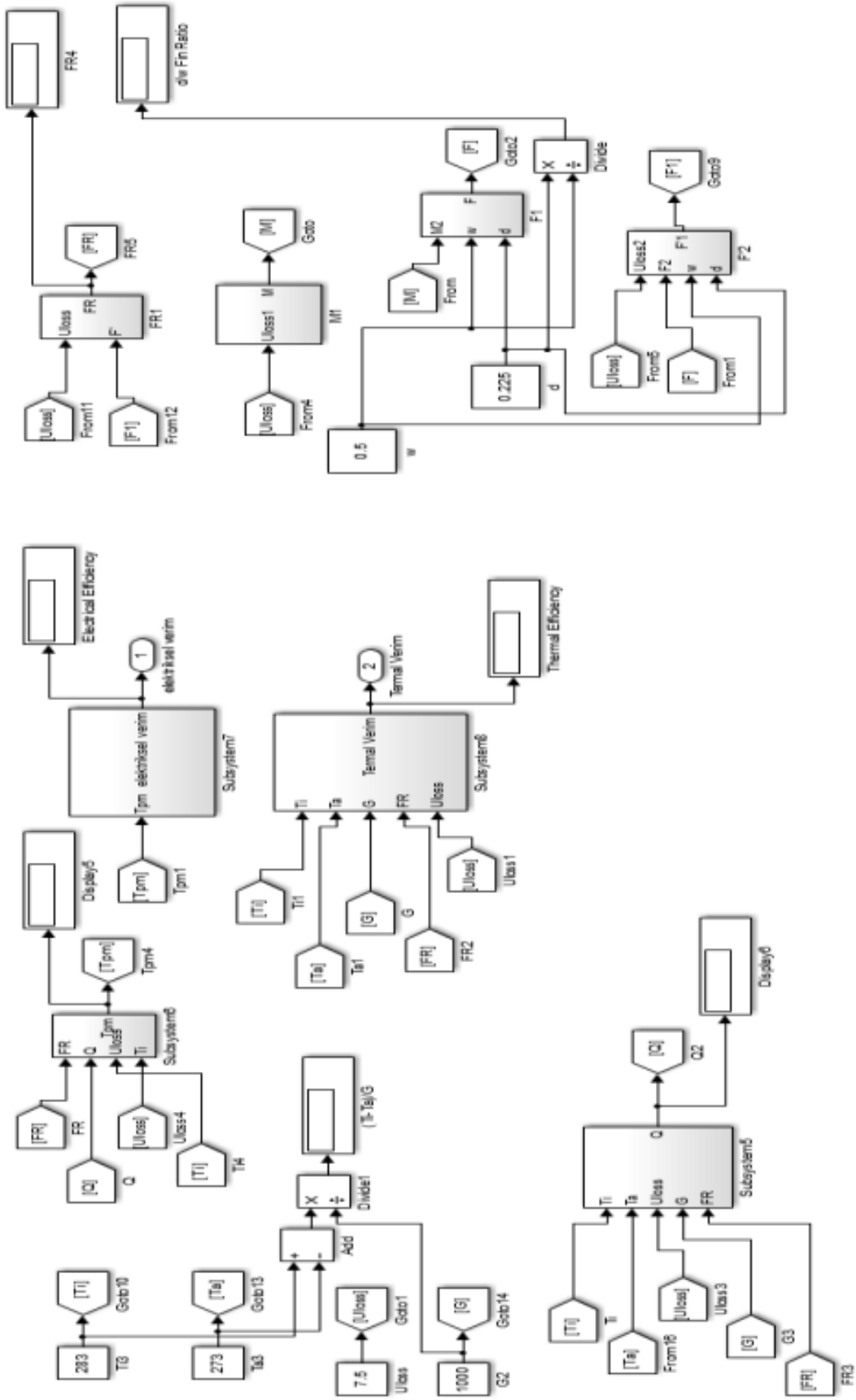
### 5.1. PV/T Kolektör Optimizasyonu

PV/T kolektörün performansına etki eden faktörler, kütle akış hızı, emici plaka parametreleri (tüp aralığı, boru çapı, kanatçık kalınlığı), emici plakadaki akışkanın termal iletkenliği, kolektör eğim açısı ve tasarım parametreleridir.

Şekil 5.1.'de gösterilen sistemin MATLAB/Simulink modeli, bu parametrelerden bazılarının, sistemin termal verimini nasıl etkilediğini belirlemek amacı ile kullanılmıştır. Kolektör girişi ile çevre arasındaki ( $T_i - T_a$ ) sıcaklık farkının kolektör yüzeyinde ( $G$ ) meydana gelen global güneş radyasyonuna oranı, termal verimliliğin bağımlı olduğu PV/T parametresidir. Bu parametre, PV/T performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Hazırlanan Simulink modeli, PV/T kolektörün değişik parametreler altında elektriksel ve termal verimlerin tespit edilmesini sağlamaktadır.

Şekil 5.1.'de gösterilen simulasyon modelinde  $T_a$  değeri 273K,  $T_i$  değeri ise 283K olarak verilmiştir. Farklı ışınlım, kütle akış hızı, tüp boşluğu, boru çapı, kanat kalınlığı, sızdırmazlık faktörü, PV hücrenin geçirgenlik-soğurma faktörü ve emici yüzeyin iletkenlik gibi parametre değerleri kullanılarak oluşturulan modelde elde edilen verilere sonuçlar bölümünde yer verilmiştir [6].

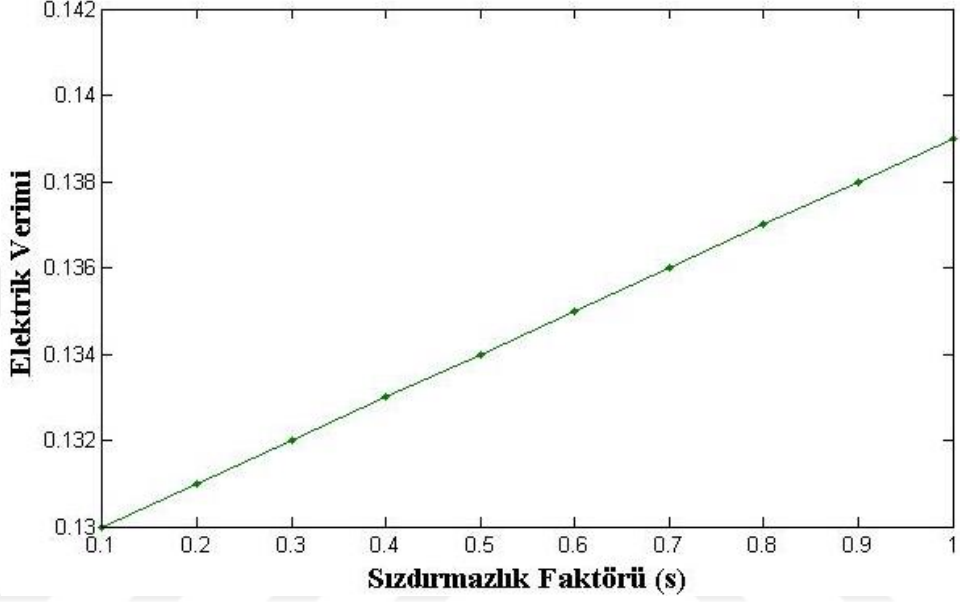




Şekil 5.1. MATLAB/Simulink Model

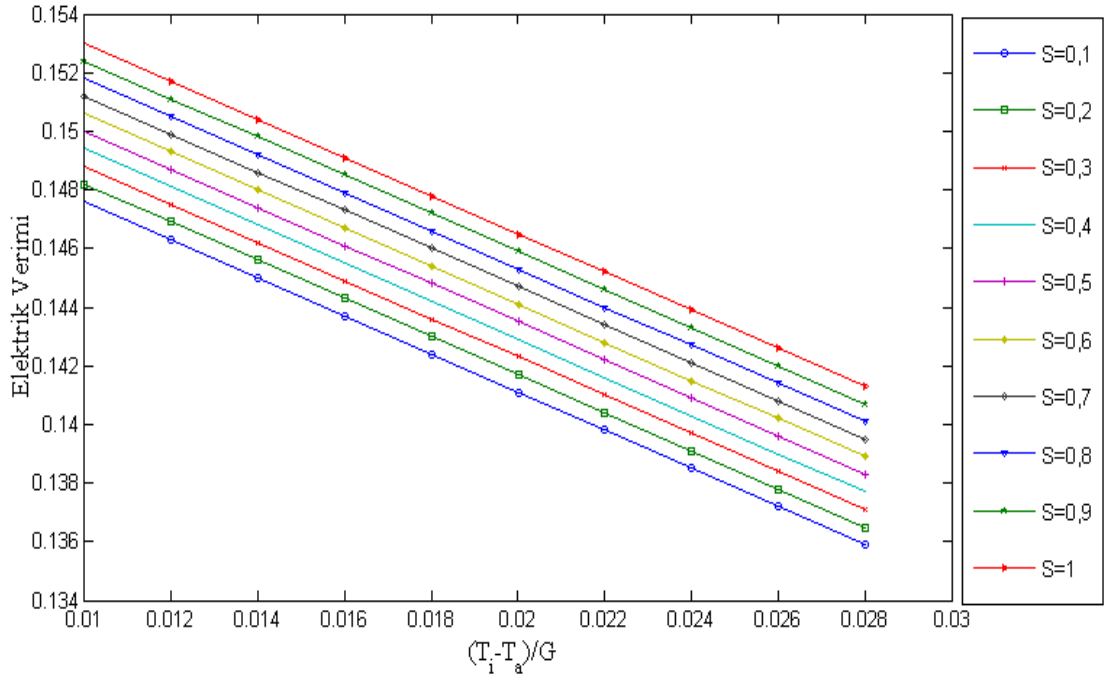
### 5.1.2. Simülasyon Sonuçları

Çeşitli parametrelerin etkisi altında PV/T kolektörün performansı incelenmiştir. Bu parametreler; kütle akış hızı, tüp boşluğu, boru çapı, kanat kalınlığı, sızdırmazlık faktörü, PV panelin geçirgenlik-soğurma faktörü ve emici yüzeyin iletkenliğidir. Şekil 5.2.'de sızdırmazlık faktörünün elektrik verimine etkisi gösterilmiştir.



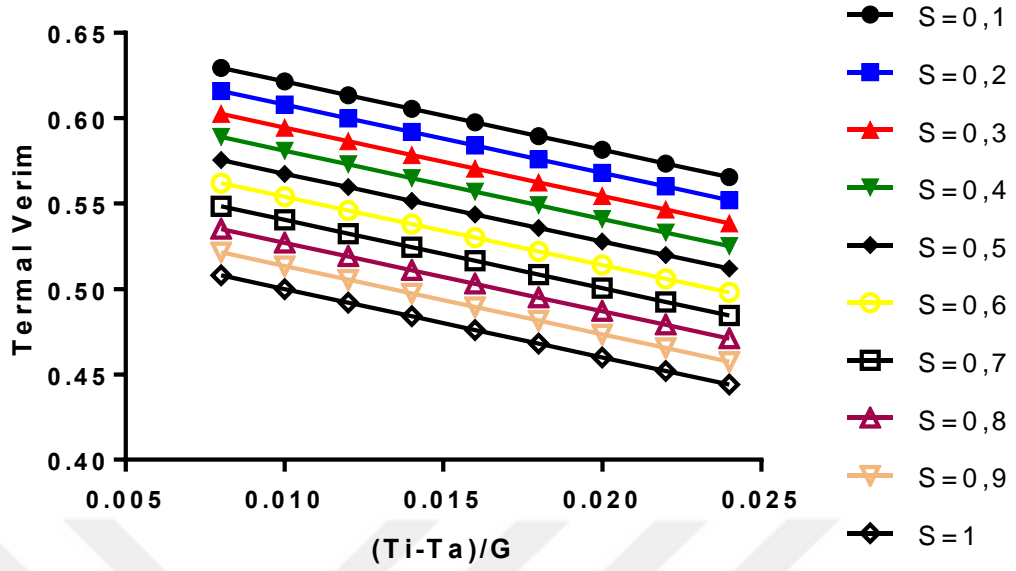
**Şekil 5.2.** Elektrik Veriminin Sızdırmazlık Faktörüne Göre Değişimi

Sızdırmazlık faktörü bir tasarım parametresidir. Sızdırmazlık faktörünün artması, daha fazla kolektör alanının PV hücreler tarafından kaplandığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla soğurucu blok alanının artması PV hücrelerdeki ısı artışını azaltıcı yönde etki oluşturmaktadır. PV hücre sıcaklığının düşmesi de PV panel tarafından üretilen elektrik enerjisinin artışına sebep olmaktadır. Sızdırmazlık faktörü arttığında elektrik veriminin arttığı Şekil 5.2.'de gösterilmiştir [6].



**Şekil 5.3.** Elektriksel Verimin S ile Değişimi

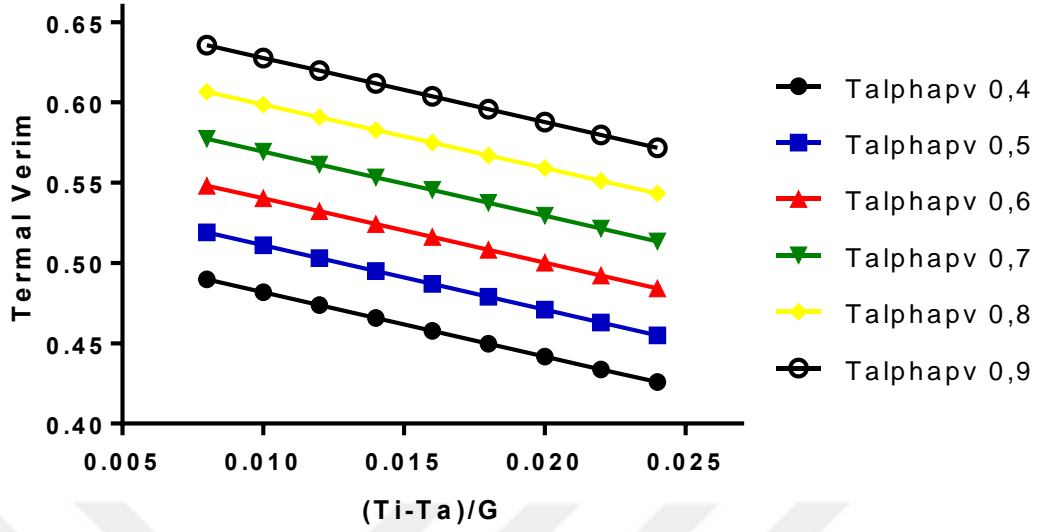
$(T_i - T_a)/G$  ifadesinin farklı değerlerinde sızdırmazlık faktörünün elektriksel verime etkisi Şekil 5.3.'de gösterilmiştir.  $(T_i - T_a)/G$  değerinin artışı PV/T kolektörün matematiksel eşitliklerinde de gösterildiği gibi elektriksel verimi düşürmektedir. Sızdırmazlık faktörünün artışı ise Şekil 5.3.'de de gösterildiği gibi elektriksel verimi artırmaktadır. Buna göre elektriksel verim en yüksek değerini,  $(T_i - T_a)/G$  değerinin 0,008 ve sızdırmazlık faktörünün 0,9 olduğu durumda almaktadır. Elektriksel verimdeki değişim, sızdırmazlık faktörüne ve  $(T_i - T_a)/G$  değerine bağlı olarak 0,157 ile 0,136 değerleri arasında yaklaşık % 15,44 oranında değişim göstermektedir. Sabit bir  $(T_i - T_a)/G$  değerinde sadece sızdırmazlık faktörüne bağlı olarak elektriksel verim değişimi ise yaklaşık %6'dır [6].



Şekil 5.4. Termal Verimin S ile Değişimi

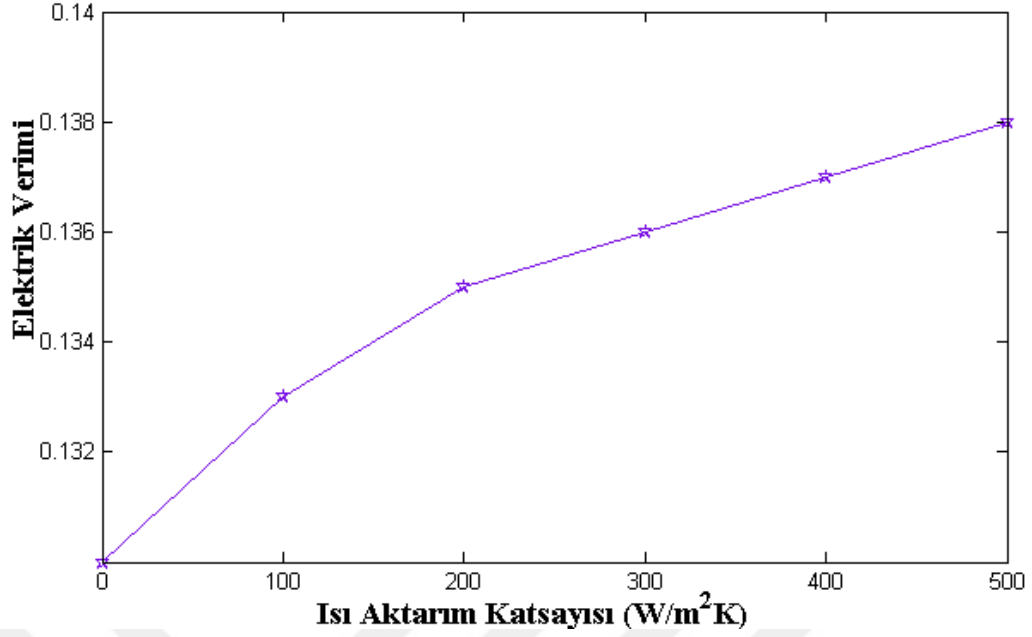
Sızdırmazlık faktörünün artması, PV hücreler tarafından kaplanan alanın artışına sebep olmaktadır. Bu artış aynı ışınım değeri altında daha fazla alanın ısıtılması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla sızdırmazlık faktörüne bağlı olarak termal verimde düşüş meydana gelecektir. Termal verimin,  $(T_i - T_a)/G$  ifadesinin farklı değerlerinde sızdırmazlık faktörüne bağlı olarak değişimi Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.  $(T_i - T_a)/G$  eşitliğinin 0,008 değeri için sızdırmazlık faktörünün 1 olması durumu ile 0,1 olması durumu arasındaki verim farkı yaklaşık %23,5'dir. Dolayısıyla sızdırmazlık faktörünün değişimi elektriksel verimden ziyade termal verim üzerinde daha çok etkilidir.

PV/T kolektör için sistem optimizasyonu yapıldığında en uygun sızdırmazlık faktörü değeri 0,1 olarak hesaplanmıştır. Sistemden elde edilen toplam verim ve sızdırmazlık faktörünün termal verim üzerindeki etkisi dikkate alınarak sızdırmazlık faktörü değeri 0,1 seçilmiştir. Sızdırmazlık faktörünün tasarım parametresi olduğu göz önünde bulundurulursa, ileride yapılacak tasarımlarda, sistemden maksimum verim elde edilebilmesi için 0,1 olarak seçilmesi önerilmektedir [6].



Şekil 5.5. Termal Verimin  $T_{alphanpv}$  ile Değişimi

PV/T kolektör performansını etkileyen önemli faktörlerden biri geçirgenlik-soğurma ( $T_{alphanpv}$ ) özelliğidir. Bu değer, PV/T kolektörlerin üretim aşamasında kullanılan malzemelere bağlıdır. Şekil 5.5.'de giriş sıcaklığı ile ortam sıcaklığı farkının ışıınım değerine oranının  $(T_i - T_a)/G$ , termal verime etkisi farklı geçirgenlik-soğurma katsayıları göz önünde bulundurularak gösterilmiştir. Buna göre, geçirgenlik-soğurma katsayısının artması termal verimi arttırmaktadır. Bu durum PV hücrenin soğurma özellikleri ile ilgilidir. Tipik bir PV hücrenin absorbe edeceği ışığın dalga boyu termal kolektörün absorbe edeceği ışığın dalga boyundan daha küçüktür. Dolayısıyla büyük dalga boylu ışıklar PV hücreden yansyarak termal kolektör tarafından absorbe edilir. Bu nedenle geçirgenlik-soğutma katsayısının artması termal verimi arttırmaktadır [6].



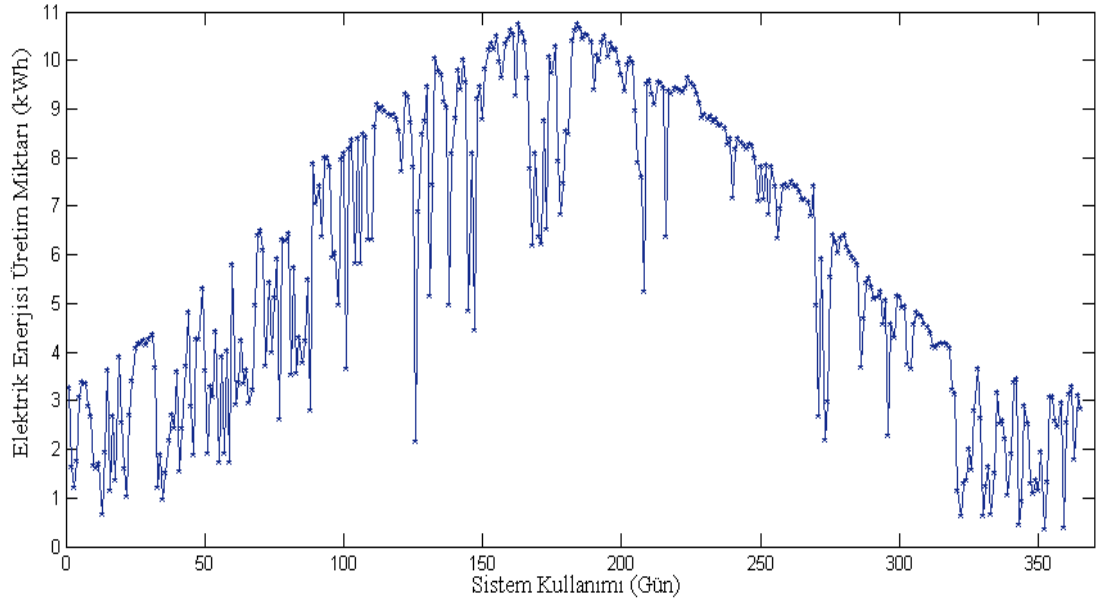
**Şekil 5.6.** Elektriksel Verimin Isı Aktarım Katsayısı ile Değişimi

PV hücreden emici yüzeye ısı aktarım katsayısındaki değişimin elektriksel verim üzerindeki etkisi Şekil 5.6.'da gösterilmiştir. Isı aktarım katsayısının elektriksel verim üzerindeki etkisini incelemek için geçirgenlik-soğurma ( $T_{\alpha_{pvp}}$ ) değeri 0,74'de ve sızdırmazlık faktörü 0,4'de sabit tutulmuştur. Böylelikle sadece ısı aktarım katsayısının verim üzerindeki etkisi görülmüştür. Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi ısı aktarım katsayısının değişimine bağlı olarak elektriksel verim çok az değişim göstermektedir. Bu nedenle ısı aktarım katsayısının elektriksel verim üzerindeki etkisi ihmal edilebilir [6].

## 5.2 Ekonomik Analiz

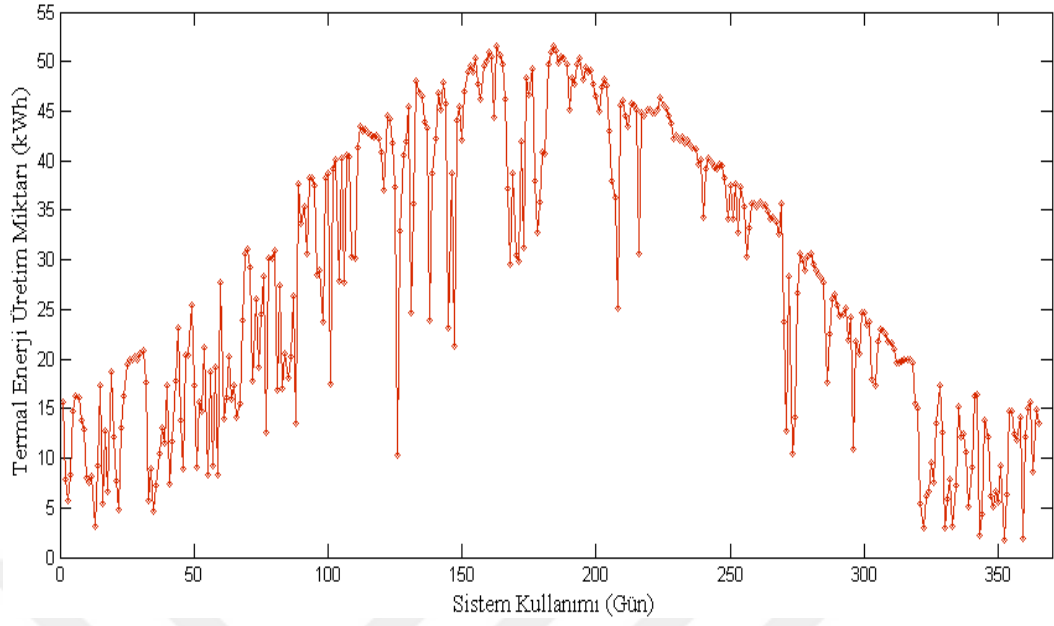
Bu bölümde, giriş değerlerinin *LCOE* ve *NPV* üzerindeki duyarlılığını değerlendirmek için bir analiz yapılmıştır. Değerlendirme için yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak, Manisa/Turgutlu bölgesi PV/T kolektör uygulaması için incelenmiştir. Sistem kurulumu için 10 m<sup>2</sup>'lik çatı alanı seçilmiş olup 7 adet PV/T kolektör için 9,59 m<sup>2</sup>'lik aktif yüzey alanına göre hesaplamalar yapılmıştır. İlk aşamada günlük ışınım değerleri dikkate alınarak ilk yıl için elektrik ve termal enerji üretim miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra panel kayıplarının sistem üzerindeki etkisine göre 25 yıllık elektrik ve termal enerji üretim miktarları hesaplanmıştır.

Sistemin ilk yılda ürettiği elektrik ve termal enerji miktarı sırası ile Şekil 5.7. ve 5.8.'de verilmiştir.



**Şekil 5.7.** Sistemin Günlük Elektrik Enerjisi Üretim Miktarı

Şekil 5.7.'de sistemin 01.01.2018-31.12.2018 tarihleri arasında alınan ışınım değerlerine göre ürettiği elektrik enerjisi miktarı görülmektedir. Beklenildiği gibi en yüksek üretim yaz aylarında gerçekleşmiştir. En yüksek elektrik enerjisi üretimi 12.06.2018 ve 03.07.2018 tarihlerinde 10,74 kWh olarak hesaplanmıştır. En düşük elektrik enerjisi üretimi ise 18.12.2018 tarihinde 0,35 kWh olarak hesaplanmıştır.



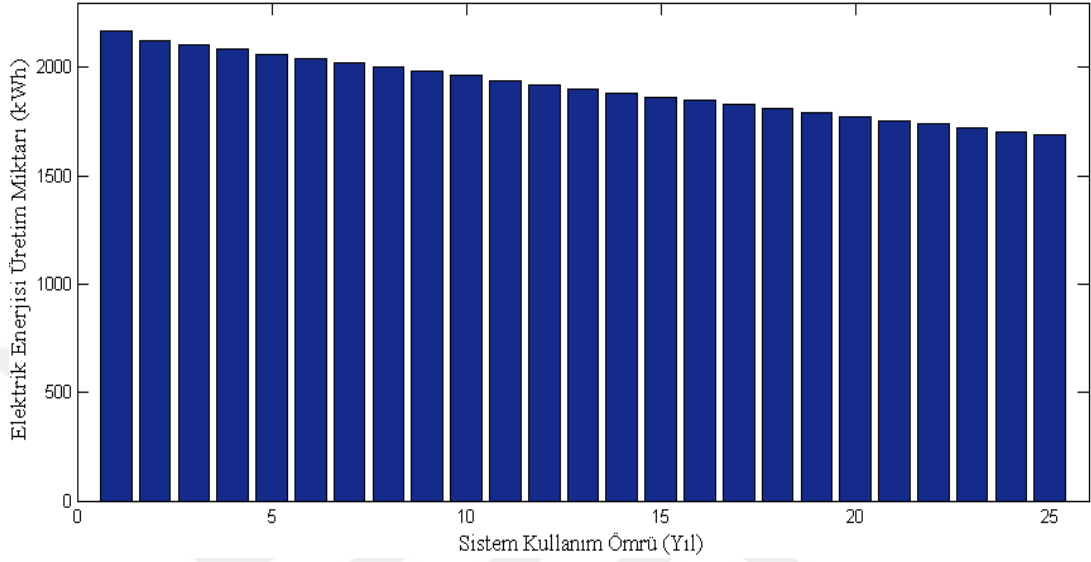
**Şekil 5.8.** Sistemin Günlük Termal Enerji Üretim Miktarı

Şekil 5.8.'de sistemin 01.01.2018-31.12.2018 tarihleri arasında alınan ışınım değerlerine göre ürettiği elektrik enerjisi miktarı görülmektedir. Beklenildiği gibi en yüksek üretim yaz aylarında gerçekleşmiştir. En yüksek termal enerji üretimi 12.06.2018 ve 03.07.2018 tarihlerinde 51,5 kWh olarak hesaplanmıştır. En düşük termal enerji üretimi ise 18.12.2018 tarihinde 1,7 kWh olarak hesaplanmıştır.



PV/T Kolektör performans analizi bölümünde yer alan enerji üretim hesapları, ekonomik analiz bölümünde kullanılarak sistemin 25 yıl boyunca ürettiği elektrik ve termal enerji miktarları hesaplanmıştır.

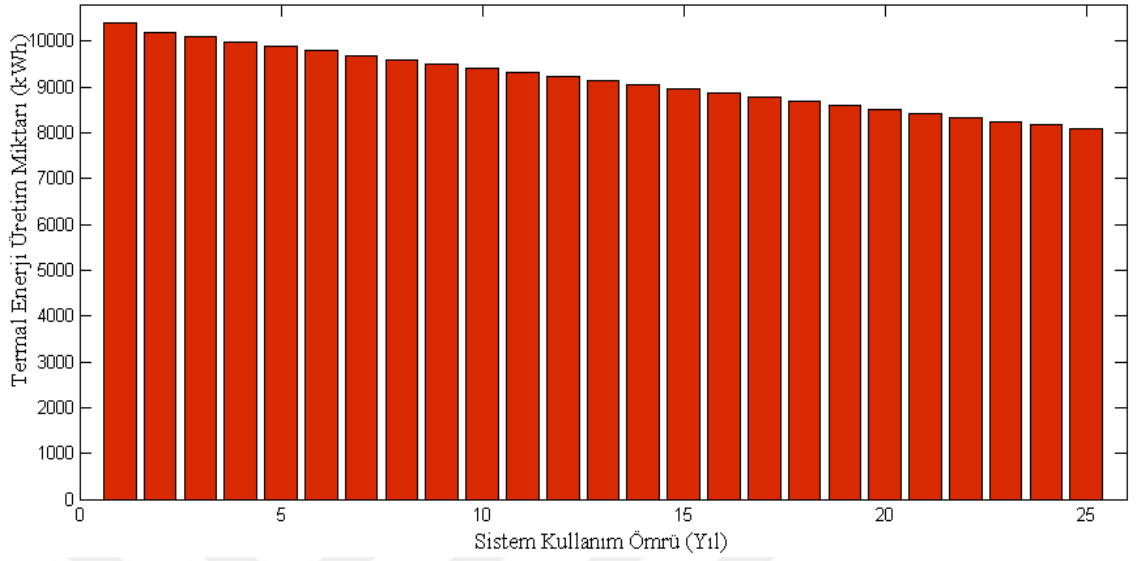
Sistemin 25 yıl boyunca ürettiği elektrik enerjisi miktarı Şekil 5.9.'de verilmiştir.



**Şekil 5.9.** 25 Yıl İçin Elektrik Enerjisi Üretim Miktarı

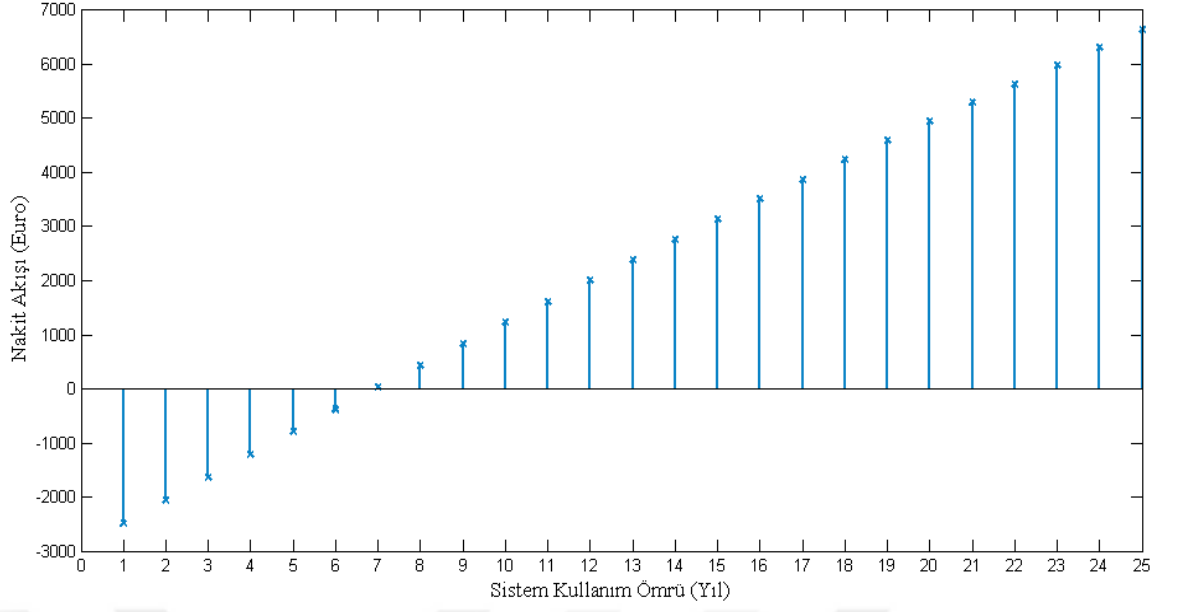
Beklendiği gibi, her yıl için panel bozulma oranı nedeni ile elektrik üretimi azalmaktadır. İlk yılda üretilen elektrik miktarı 2168,97 kWh iken bu değer 25. Yılın sonunda 1687,07 kWh'e kadar düşmüştür. Bu değerler 25 yıllık kullanım süresi boyunca yaklaşık %22,2'lik bir düşüş olduğunu göstermektedir.

Sistemin 25 yıl boyunca ürettiği termal enerji miktarı Şekil 5.10.'da gösterilmektedir.



**Şekil 5.10.** 25 Yıl İçin Termal Enerji Üretim Miktarı

Termal enerji üretimi, her yıl paneldeki bozulma oranı nedeni ile elektrik üretiminde olduğu gibi azalma göstermektedir. İlk yılda termal enerji miktarı 10395,4 kWh olarak hesaplanırken bu değer 25. yılın sonunda 8085,7 kWh olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 5.11. Sistem Nakit Akışı**

Sisteminin amorti süresi; sistemin ilk yatırım maliyetine, toplam enerji üretimine ve finansal parametrelere göre yaklaşık 7 yıl olarak hesaplanmaktadır. Önerilen sistemin nakit akışı Şekil 5.11.'de gösterilmektedir.

Doğru yatırım kararını vermek için geri ödeme süresi tek başına yeterli değildir. *LCOE* ve *NPV* değerleri sistem maliyeti üzerinde oldukça etkilidir. Bu nedenle sistemin *LCOE* ve *NPV* değerleri literatürde belirtilen formüller yardımı ile hesaplanmıştır. *LCOE*, sadece bir projenin maliyetini değil, aynı zamanda işletme ve bakım maliyetlerini de hesaba katar. *LCOE*, güneş enerjisinin maliyetini diğer kaynaklarla karşılaştırmak ve bir santralin uzun vadeli karlılığını belirlemek için kullanılır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda bu çalışma için *LCOE* değeri 0,044 Euro/kW olarak bulunmuştur.

PV/T kolektörün ekonomik analizi 25 yıllık operasyon için gerçekleşmiştir. Referans alınan PV/T kolektörün 25 yıllık operasyondan sonraki *NPV* değeri 2494,5 Euro olarak hesaplanmıştır. Önerilen sistem için *NPV* değeri pozitiftir. *NPV* değerinin pozitif olması yapılacak olan yatırımın karlı olduğu anlamına gelmektedir yani Manisa/Turgutlu için PV/T kolektör uygun bir yatırım olacaktır.

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Manisa ilinin iklim koşulları dikkate alınarak, sıvı tip düz PV/T kolektörün elektriksel ve termal verimleri hesaplanmış olup, sızdırmazlık faktörü, geçirgenlik-soğurma faktörü, ortam sıcaklığı, ışıınım parametresinin farklı değerleri için inceleme yapılmıştır.

Analiz çalışması için MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Elektriksel verim için en önemli etken sızdırmazlık faktörü olup bu değer artması ile elektriksel verimin artacağı gözlenmiştir. Sızdırmazlık faktörü PV paneller için tasarım parametresidir ve 0,1 ile 0,9 arasında değişmektedir. PV panelden yüksek elektriksel verim elde edilmesi için, sızdırmazlık faktörü yüksek olan paneller tercih edilmelidir.

Termal verimi etkileyen en önemli faktörlerden biri ise geçirgenlik-soğurma özelliğidir. Geçirgenlik-soğurma katsayısı tasarım parametresidir ve PV panel özelliğine göre değişkenlik göstermektedir, katsayının artması ile termal verimin arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel verimdeki değişim, sızdırmazlık faktörüne ve  $(T_i - T_a)/G$  değerine bağlı olarak 0,157 ile 0,136 değerleri arasında yaklaşık % 15,44 oranında değişim göstermektedir. Sabit bir  $(T_i - T_a)/G$  değerinde sadece sızdırmazlık faktörüne bağlı olarak elektriksel verim değişimi ise yaklaşık %6'dır. Termal verimin  $(T_i - T_a)/G$  eşitliğinin 0,008 değeri için sızdırmazlık faktörünün 1 olması durumu ile 0,1 olması durumu arasındaki verim farkı yaklaşık %23,5'dir. Dolayısıyla sızdırmazlık faktörünün değişimi elektriksel verimden ziyade termal verim üzerinde daha çok etkili olmaktadır. Sızdırmazlık faktörü bir tasarım parametresidir ve sistem optimizasyonu açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Sistemden elde edilecek toplam verim değerinin maksimum olması için sızdırmazlık faktörü değerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Çünkü sızdırmazlık faktörü elektriksel verimi negatif etkilerken termal verimin artmasını sağlamaktadır. Yapılan analiz sonucuna göre elde edilen verim değerleri karşılaştırılarak sistem optimizasyonu yapıldığında sızdırmazlık faktörü için en uygun değer 0,1 olarak belirlenmiştir. Sızdırmazlık faktörünün tasarım parametresi olduğu göz önüne alındığında, ileride yapılacak sistem tasarımları ve performans analizi çalışmaları için sızdırmazlık faktörünün 0,1 olarak belirlenmesi önerilmektedir [6].

Bu çalışmada özellikleri verilen PV/T kolektörlerin Manisa ilinde kurulması durumunda elde edilebilecek termal verim %64,5, elektriksel verim %13,5 ve toplam verim %78 olarak tespit edilmiştir.

Önceki çalışmalar incelendiğinde elde edilen değerler ile benzerlikleri gözlemlenmiştir. 2006 yılında İzmir’de yapılan bir çalışmada PV/T hibrit sistemin elektriksel verim değeri %6,12 olarak bulunmuştur [22]. Lizbon’da yapılan benzer bir çalışmada elektriksel ve termal verim değerleri sırası ile %15 ve %52 olarak bulunmuştur [23]. 2011 yılında yapılan deneysel çalışmada PV/T hibrit sistemin elektriksel verim değeri %12 bulunurken termal verim değeri % 64 olarak hesaplanmıştır [24]. Bir başka çalışmada ise farklı eğim açılarında sahip bir PV/T hibrit sistemin en yüksek toplam verim değeri 37° eğim açısında %62,95 olarak gözlemlenmiştir [26].

Yapılan ekonomik analiz sonucunda bu çalışma için *LCOE* değeri 0,044 Euro/kW olarak bulunmuştur.

PV/T kolektörün ekonomik analizi 25 yıllık operasyon için gerçekleşmiştir. Referans alınan PV/T kolektörün 25 yıllık operasyondan sonraki *NPV* değeri 2494,4 Euro olarak hesaplanmıştır. Önerilen sistem için *NPV* değeri pozitiftir. *NPV* değerinin pozitif olması yapılacak olan yatırımın karlı olduğu anlamına gelmektedir. Yani Manisa/Turgutlu için PV/T kolektör uygun bir yatırım olacaktır.

PV/T kolektörler Türkiye’de kullanılan rüzgâr türbinleri ve PV paneller gibi büyük potansiyele sahiptir. Bu çalışma, PV/T kolektörlere yapılan yatırımın ekonomik gelişme açısından iyi fırsatlara sahip olduğunu göstermektedir. Bu sistemlerin kullanılabilmesi için bina çatılarında uygun ve yeterli alanlar vardır. PV/T kolektörlerde elektrik üretimi için ayrı bir alana ihtiyaç olmadığından, aynı alanda hem elektrik enerjisi üretimi hem de termal enerji üretimi yapılabilir. Bu çalışmada mevcut piyasa fiyatı ve cari mali parametre araştırmasına dayanarak elde edilen sonuçlar PV/T kolektörünün Manisa’da 7 yıl yatırım geri dönüş süresine sahip olacağını göstermiştir. Finansal analiz parametrelerine göre, PV/T kolektör yatırımının kârlı olabileceğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] COP21, Adoption of the Paris Agreement, Paris United Nations Climate Change Conference, France, 2015
- [2] Dwivedi, K., Jain, P. Solar Parabolic Trough - A Review of Performance Analysis, Journal of Mechanical and Civil Engineering, Mumbai, 2017, 17-20
- [3] Dinçer, F. Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli - Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme, KSU Mühendislik Dergisi, 2011, 14(1), 8-17
- [4] Girgin, M. Bir Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralının Fizibilitesi, Karaman Bölgesinde 5 Mw’lık Güneş Enerjisi Santrali İçin Enerji Üretim Değerlendirmesi Ve Ekonomik Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2010, 202 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [5] Varınca, K., Gönüllü, T. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Arastırma, 21-23 Haziran, 2006, Eskişehir
- [6] Koç, İ., Başaran K. PV/T Tabanlı Bir Sistemde MATLAB/Simulink Kullanılarak Yapılan Performans Analizi, Politeknik Dergisi, 2019, 22, (1), 229-236
- [7] Ömeroğlu, G. Fotovoltaik - Termal (PV / T) Sistemin Sayısal (CFD) ve Deneysel Analizi, Türkiye, Science and Eng. J of Fırat Univ., 2018, 30(1), 161-167
- [8] Wolf M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. Energy Convers 1976, 16(1), 79–90
- [9] Boer KW., Tamm G. Solar conversion under consideration of energy and entropy, Sol Energy 2003, 74(1), 525-8
- [10] Florschuetz LW. Extension of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors, Sol Energy 1979, 22 (1), 361–6
- [11] Cox CH., Raghuraman P. Design considerations for flat plate photovoltaic/thermal collectors, Sol Energy 1985, 35(3), 227–41
- [12] Komp RJ. Field experience and performance evaluation of a novel photovoltaic thermal hybrid solar energy collector, Intersol, 1985, 85
- [13] Florschuetz LW. Extension of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors, Sol Energy, 1979, 22(1), 361–366
- [14] CH Cox I., Raghuraman P., Raghuraman P. Design considerations for flat-plate photovoltaic/ thermal collectors, Sol Energy, 1985, 35(1), 227–241
- [15] Schwartz R, Rao KHS., Tscherner R. Computer-aided analysis of thermal images of solar cells and solar PV/T collectors, In: Fifth EPSEC, Athens, 1983
- [16] Lalovic B., Pavlovic T., Kiss Z., van Dine J. The application of hybrid a-Si:H PV and thermal collectors for different usages. In: Eighth EPSEC, 1988.
- [17] Zondag HA., De Vries DW., Van Helden WGJ., Van Zolingen RJC., Van Steenhoven AA. The yield of different combined PV-thermal collector designs, Sol Energy, 2003, 74, 253–69
- [18] Soerensen B. Modelling of hybrid PV-thermal systems, In: 17th EPSEC, Munich, 2001
- [19] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M., Yianoulis P. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Sol Energy, 2002, 72(3), 217–34
- [20] Krauter S., Salhi MJ, Schroer S., Hanitsch R. New fac-ade system consisting of combined photovoltaic and solar thermal generators with building insulation, In: Seventh IBPSA, Rio de Janeiro, Brazil, 2001

- [21] Garg, H.P., Adhikari, R.S. System performance studies on photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collector, *Renewable Energy*, 1999, 16(1), 725-730
- [22] Engin D. Yapı İle Bütünleştirilebilir Güneş Pili/Termal Toplayıcı (PV/T) Hibrid Sistemin Performans Analizi ve Optimizasyonu, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir, 2006, 151s. (Doktora Tezi).
- [23] Silva R.M., Fernandes J.L.M. Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Systems Simulation with Simulink/MATLAB, *Solar Energy*, 2010, 84(1), 1985–1996
- [24] Michael J.J., Iniyan S., Ranko G. Flat Plate Solar Photovoltaic–Thermal Collector (PV/T) systems: A reference guide, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51(1), 62-88
- [25] Farghally H.M., Ahmed N.M., El-madany N.M., Atia D.M., Fahmy F.H. Design and Sensitivity Analysis of Photovoltaic/Thermal Solar Collector, *International Energy Journal*, 2015, 15(1), 21-32
- [26] Doğanay H. Ö., Kırklareli İklim Şartlarında Hibrit Fotovoltaik/Termal Kollektör Sisteminin Analizi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, 2014, 62 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [27] Ammous M., Charfi S., Harb A., Chaabene M. Improvement of PV/T Based Reverse Osmosis Desalination Plant Performances Using Fuzzy Logic Controller, *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, 2016, 5(1), 11-27
- [28] Sotehi O., Chaker A., Maalouf C. Hybrid PV/T Water Solar Collector For Net Zero Energy Building And Fresh Water Production A Theoretical Approach, *Solar Energy*, 2016, 385(1), 1-11
- [29] Farshchimonfared M., Bilbao J.I. Sprou A.B., Full Optimisation and Sensitivity Analysis of A Photovoltaic–Thermal (PV/T) Air System Linked To A Typical Residential Building, *Solar Energy*, 2016, 136(1), 15–22
- [30] Jones M.A., Odeh I., Haddad M., Mohammad A.H., Quinn J.C. Economic Analysis of Photovoltaic (PV) Powered Water Pumping and Desalination without Energy Storage For Agriculture, *Desalination*, 2016, 387(1), 35–45
- [31] Benli, F. Fotovoltaik (PV) ve Fotovoltaik Termal (PV-T) Kolektörlerin Deneysel Olarak Karşılaştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Osmaniye, 2018, 69 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [32] Ammous M., Chaabene M. Design of a PV/T based desalination plant: Concept and Assesment, The fifth International Renewable Energy Congress IREC, Tunisia, 2014, 1-6
- [33] Celsa G., Tina G.M. MATLAB/Simulink Model of Photovoltaic Modules-Strings under Uneven Distribution of Irradiance and Temperature, 6th International Renewable Energy Congress (IREC), Tunisia, 2015
- [34] Hu M., Zheng R., Pei G., Wang Y., Li J., Jie J. 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*, 2016, 106(1), 651–660
- [35] Qiu Z., Ma X., Zhao X., Li P., Ali S. Experimental Investigation Of The Energy Performance Of A Novel Micro-Encapsulated Phase Change Material (MPCM) Slurry Based PV/T System, *Applied Energy*, 2016, 165(1), 260–271
- [36] Deveci, O. Fotovoltaik Termal (PV/T) Sistemin Farklı Sıvılarla Enerji Analizi. Muğla Sıtkı KOÇman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Muğla, 2019, 152 s. (Yüksek Lisans Tezi).



- [37] Dean J., McNutt P., Lisell L., Burch J., Jones D., Heinicke D. Photovoltaic-Thermal New Technology Demonstration, National Renewable Energy Laboratory, 2015
- [38] Yaxiu G., Xingxing Z., Jonn A. M., Mengjie H., Xiangjie C., Yanping Y. Techno-economic analysis of a solar photovoltaic/thermal (PV/T) concentrator for building application in Sweden using Monte Carlo method, *Energy Conversion and Management*, 2018, 165(1), 8-24
- [39] Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Battisti R., Corrado A. Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems, Wiley InterScience, 2005, 13(1), 235–250
- [40] Sujata N., Zeba N., Pushpendra Y., Ruchi C. Economic Analysis of Hybrid Photovoltaic-Thermal (PVT) Integrated Solar Dryer, *International Journal of Engineering Inventions*, 2012, 11(1), 21-27
- [41] Jarosław B., Dorota C. Technical and economic analysis of a micro photovoltaic/thermal system working in Polish climatic conditions, Warsaw University of Technology, Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Institute of Heat Engineering, Warsaw, Poland, 2010, 8s
- [42] Tselepis S., Tripanagnostopoulos Y. Economic Analysis Of Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems And Comparison With Standard PV Modules, Centre for Renewable Energy Sources Physics Department, University of Patras, 2002, 12s
- [43] Tomas M. Performance and economic analysis of hybrid PVT collectors in solar DHW system, *ScienceDirect*, 2014, 48(1), 150 – 156
- [44] Athukorala A. U. C. D., Jayasuriya W. J. A., Ragulageethan S., Sirimanna M.P.G., Attalage R. A. A. Techno-economic analysis for an integrated solar PV/T system with thermal and electrical storage –case study, *Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), EPFL, CH-1015 Lausanne, Switzerland*, 2015
- [45] Athukorala A. U. C. D., Jayasuriya W. J. A., Perera A.T.D., Sirimanna M.P.G., Attalage R. A. A techno-economic analysis for an integrated solar PV/T system for building applications, *IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability*, 2016
- [46] Aste N., Del Pero C., Leonforte F. Water PVT Collectors Performance Comparison *ScienceDirect Energy Procedia*, 2017, 105 (1), 961 – 966
- [47] Kaya M., Thermal and Electrical Performance Evaluation of PV/T Collectors in UAE, *School of Industrial Engineering and Management*, 2013, (Yüksek Lisans)
- [48] Bakır, C. Fotovoltaik/Isıl Sistemlerde Performans İyileştirmesi ve Termo-Ekonomik Analiz. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2012, 125 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [49] Anonim, 2018. <https://eurdep.jrc.ec.europa.eu>, Erişim Tarihi: 01.10.2018
- [50] IEA, Trends 2017 in Photovoltaic Applications Executive Summary, Report IEA PVPS 2017, 1-32
- [51] Anonim, 2019. <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/23-2-3/elektrik-piyasasi>, Erişim Tarihi: 27.09.2019
- [52] Oskay M. Sıcak Su İhtiyacının Tesbiti, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 2006, 93, 37-52
- [53] Anonim, 2019. <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/23-2-1007/mevzuat>, Erişim Tarihi: 27.09.2019
- [54] Anonim, 2019. <https://tcmb.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 16.07.2019

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlayda KOÇ  
Doğum Yeri ve Yılı : Ankara, 1993  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : ilyda.koc@gmail.com

### Eğitim Durumu

Lise : Celal Yardımcı Anadolu Lisesi, 2011  
Lisans : Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2016  
Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 2019-(halen)

### Mesleki Deneyim

Contec Makina İmalat Üretim San İç ve Dış. Tic. Ltd. Şti. Şubat 2018-(halen)

### Yayınları

Koç İ., Başaran K. PV/T Tabanlı Bir Sistemde MATLAB/Simulink Kullanılarak Yapılan Performans Analizi, UMAS 2017 Bildiri Özet Kitabı, Düzce, 2017, 125  
Koç İ., Başaran K. Hibrit PV/T kolektörler İle Bir Evin Sıcak Su ve Elektrik Enerjisi Temini, UMAS 2017 Bildiri Özet Kitabı, Düzce, 2017, 126  
Başaran K., Koç İ. Economic Analysis of Photovoltaic/Thermal System, ENRES 2018 Bildiri Kitabı, 2018, 222-229  
Koç İ., Başaran K. PV/T Tabanlı Bir Sistemde MATLAB/Simulink Kullanılarak Yapılan Performans Analizi, Politeknik Dergisi, 2019, 22, (1), 229-236