

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ISI VE ELEKTRİK ELDESİNİN**  
**TEKNO-EKONOMİK SİMÜLASYONU: ÖRNEK BİR**  
**UYGULAMA**

**C. CAN TUTAŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**2018**

**GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ISI VE ELEKTRİK ELDESİNİN  
TEKNO-EKONOMİK SİMÜLASYONU: ÖRNEK BİR  
UYGULAMA**

**TECHNO-ECONOMIC SIMULATION OF THERMAL AND  
ELECTRICITY YIELD FROM SOLAR:  
A CASE STUDY**

**C. CAN TUTAŞI**

Başkent Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

2018

“Güneş enerjisinden ısı ve elektrik eldesinin tekno-ekonomik simülasyonu: Örnek bir uygulama” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 18/09/2018 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hamit ERDEM

Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK

Üye : Doç. Dr. M. Zeki YILMAZOĞLU

**ONAY**

..../09/2018

Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 25 / 09 / 2018

Öğrencinin Adı, Soyadı : Celaleddin Can Tutaşı

Öğrencinin Numarası : 21420203

Anabilim Dalı : Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Enerji Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Dr. Öğretim Üyesi Levent Çolak

Tez Başlığı : Güneş enerjisinden ısı ve elektrik eldesinin tekno-ekonomik simülasyonu:  
Örnek bir uygulama

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 76 sayfalık kısmına ilişkin, 25 / 09 / 2018 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9'dur.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

Onay

25 / 09 / 2018

Öğrenci Danışmanı Unvan, Ad, Soyad,  
Dr. Öğretim Üyesi Levent Çolak

## **TEŐEKKÜR**

Bu araştırmanın konusu, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı ve çalışma sırasında bilimsel katkıları ile bana yardımcı olan, eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım ve hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Levent ÇOLAK'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma teőekkür ederim.

Bu araştırma boyunca tüm desteklerinden dolayı eşim ve aileme teőekkür ederim.

## ÖZ

### GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ISI VE ELEKTRİK ELDESİNİN TEKNO-EKONOMİK SİMÜLASYONU: ÖRNEK BİR UYGULAMA

C. CAN TUTAŞI

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmanın amacı, sıcak su ve elektriğe beraber ihtiyaç duyan tüketiciler için fotovoltaik ve termal sistemlerin ayrı ayrı veya bütünleşik kullanımı sistem tasarımı yapıp, simülasyon ile üretim değerlerini hesaplamaktır. Tespit edilen üretim değerleri ile farklı analizler yaparak buralarda uygun lokasyon tespiti ve Türkiye'ye uygulanabilirliği de değerlendirilmiştir. Ayrıca bu tür sistemler için önemli parametreler olan sıcaklık ve ışıınım değerlerinin simülasyonlara etkilerine yer verilmiştir. Bu değerlendirmeler için literatür taraması ile günümüzde kullanılan simülasyon yazılımları ve benzer konularda yazılmış çalışmalar incelenmiş, çalışmada PVSYST uygulamasından faydalanılmıştır. Sonrasında, ısı ve elektrik sağlayan bu sistemlerin ayrı ve bütünleşik hallerinin matematiksel modellemeleri yapılmıştır. Bu sistemlere ait hesaplamalar için Excel üzerinde yazılım geliştirilmiş, örnek senaryolar için simülasyonlar yapılmış, parametrelerin sistem performanslarına etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, fotovoltaik/termal (FV/T) bütünleşik melez sistemlerin, ayrı melez termal ve fotovoltaik sistemlere göre kısıtlı alanda daha yüksek getiri sağladığı belirlenmiştir. İhtiyaçların karşılanması göz önünde bulundurulduğunda da bütünleşik melez sistemlerin daha az alan kaplayarak, daha az maliyetle kurulabileceği tespit edilmiştir. Bu tür bütünleşik melez sistemlerin, daha çok getiri ile yatırımın geri dönüş süresini düşürdüğü ve daha çok ihtiyacı karşıladığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde verimler incelendiğinde en yüksek verim %88,9 ile ısı getirisinin sabit tutulduğu FV/T sistemlere aittir. Ayrıca FV/T sistemlerin kurulabileceği en uygun lokasyonların, farklı getirilere ağırlık verilmesine bağlı olarak, Mersin'in Mut, Silifke ve Gülnar ilçeleri ile Van'ın Merkez ilçesi olduğu belirlenmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Güneş enerjisi, termal kolektör, fotovoltaik panel, tekno-ekonomik simülasyon, melez güneş enerjisi uygulamaları.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Levent ÇOLAK, Başkent Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü.

## **ABSTRACT**

### TECHNO-ECONOMIC SIMULATION OF THERMAL AND ELECTRICITY YIELD FROM SOLAR: A CASE STUDY

C. CAN TUTAŞI

Baskent University Institute of Science Engineering

Department of Energy Engineering

The aim of this research is optimizing and simulating a system with an integrated or separated photovoltaic and thermal hybrid systems for the consumer who needs both electricity and hot water. Appropriate location and applicability to Turkey is evaluated with analyzing simulated results. Moreover, the effects of main parameters of these systems, which are temperature and irradiation, to simulation and optimization are also studied. For this evaluation, simulation softwares and related articles are also analyzed in the scope of literature searching and PVSYST is chosen to benefit from. Then, mathematical models of these hybrid systems are developed and parameters are defined. Software is developed for the calculation of simulation in Excel and with using this software example scenarios are simulated. In addition, effects of the parameters to the performances of these systems are also analyzed. As a result, it is determined that income of photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid systems are more than separated hybrid systems for limited area. The integrated hybrid systems cover less area and investment cost is less than separated hybrid systems in terms of providing needs. It is resulted that return of investment is less in integrated hybrids systems due to more income and more meeting needs. In addition, when the efficiency of the systems are taken into account, it is observed that PV/T system in which thermal income is fixed has the maximum efficiency of 88,9%. Furthermore, for the optimum locations where FV/T is constructed are Mut, Silifke, Gulnar districts of Mersin and center of Van according to the different incomes.

**KEYWORDS:** Solar energy, thermal collector, photovoltaic panel, techno-economic simulation, hybrid solar energy applications.

**Supervisor:** Asst. Prof. Dr. Levent ÇOLAK, Baskent University, Department of Mechanical Engineering.

# İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ .....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	viii
<b>1 GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2 LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1 Günümüzde Kullanılan Simülasyon Yazılımları .....	3
2.2 Bilimsel Yayınlar ve Tezlerin İncelenmesi.....	4
2.3 Genel Tanımlar .....	9
2.3.1 Elektriksel sistemler .....	10
2.3.2 Isıl sistemler .....	14
2.3.3 Fotovoltaik/termal sistemler .....	15
<b>3 MATEMATİKSEL MODEL .....</b>	<b>18</b>
3.1 Fotovoltaik Sistemler .....	20
3.1.1 Elektrik ihtiyacına yönelik kurulabilecek FV sistemin getirisinin hesabı .....	31
3.1.2 Kısıtlı alanda kurulabilecek FV sistemin getirisinin hesabı .....	32
3.2 Isıl Sistemler .....	33
3.2.1 Isıl ihtiyaca yönelik kurulacak ısı sistemlerinin getirisinin hesabı .....	34
3.2.2 Kısıtlı alanda kurulabilecek ısı sistemlerinin getirisinin hesabı .....	35
3.3 FV/T Sistemler .....	36
3.3.1 Isıl sistem getirisinin sabit tutulduğu durum .....	40
3.3.2 FV sistemin getirisinin sabit tutulduğu durum .....	40
3.4 Ekonomik Analizler .....	41
<b>4 ÖRNEK UYGULAMA .....</b>	<b>43</b>
4.1 Örnek Uygulama Tanımı .....	43
4.2 Örnek Simülasyon Senaryoları .....	44
4.2.1 Kısıtlı alanda ayırık ve bütünleşik melez sistemlerin simülasyonu .....	45
4.2.2 İhtiyaçlar doğrultusunda kurulabilecek optimum melez sistem tespiti .....	52
4.3 Sıcaklık ile Işınımın Duyarlılık Analizleri ve Türkiye için İncelenmesi .....	54



<b>5 SONUÇ</b> .....	65
KAYNAKLAR LİSTESİ .....	70
EK 1: Optimizasyon Sonuçları .....	75
EK 2: Düz Çatı Simülasyon Sonuçları Çıktı Ekranları.....	76

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	Teknolojilerine göre FV hücre üretimleri .....12
Şekil 2.2	Güneş enerjili su ısıtma sistemleri .....14
Şekil 2.3	Solar ısıtma sistem bileşenleri .....15
Şekil 2.4	FV/T kolektör kesiti .....16
Şekil 2.5	FV/T sistemlerin sınıflandırılması .....17
Şekil 3.1	Simülasyon ve optimizasyon mimari yapısı ve çalışma prensibi.....19
Şekil 3.2	PVSYST - ana ekranı .....19
Şekil 3.3	PVSYST - parametre giriş ekranları .....20
Şekil 3.4	FV panellerin ışınımına bağlı akım, gerilim, güç değişim değerleri .....21
Şekil 3.5	Zenit açısı .....24
Şekil 3.6	Çoklu sehpa sistemlerinde gölgeleme etkisi .....24
Şekil 3.7	Sehpa sayısının artışının yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı) ..25
Şekil 3.8	Sehpalar arasındaki mesafenin azalışının yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı) .....25
Şekil 3.9	Sehpa yüksekliğinin yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı) .....26
Şekil 3.10	Panel eğim açısının artışının yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı).....26
Şekil 3.11	Tekli sehpa sistemlerinde gölgeleme etkisi .....27
Şekil 3.12	Aynı eğimde, üst üste ve tek sehpa olarak kurulmuş FV sistem örneği .....27
Şekil 3.13	Oval çatıya uyarlanmış farklı eğimlerde panel yerleşimi .....28
Şekil 3.14	Oval çatıya uyarlanmış aynı eğimde, üst üste ve tek sehpa FV sistem .....28
Şekil 3.15	FV sistem matematiksel modeli .....30
Şekil 3.16	İhtiyaca bağlı fotovoltaik sistem alan hesabı .....32
Şekil 3.17	Kısıtlı alan için toplam karşılanacak elektrik ihtiyacının hesabı .....32
Şekil 3.18	Isıl sistemlerin matematiksel modeli .....33
Şekil 3.19	İhtiyaç duyulan termal kolektör alan hesabı ekran görüntüsü .....35
Şekil 3.20	Mevcut alanın tamamına kurulacak termal kolektörün getirisi .....36
Şekil 3.21	FV/T sistem matematiksel modeli .....37
Şekil 3.22	FV sistem ısı kayıpları .....39

Şekil 3.23	FV/T kolektör ısı transfer katsayısı hesabı ekran görüntüsü .....	34
Şekil 3.24	Yeni hücre sıcaklığı hesabı ve elektriksel getirinin değişimi .....	40
Şekil 3.25	Yeni hücre sıcaklığı hesabı ve ısı getirisinin değişimi.....	41
Şekil 4.1	Fotovoltaik ve termal melez sistem çatı yerleşimi .....	43
Şekil 4.2	Tüm çatının FV panel ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı .....	45
Şekil 4.3	Tüm çatının düz kolektör ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı .....	46
Şekil 4.4	Tüm çatının FV/T ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı (elektriksel getiri sabit).....	47
Şekil 4.5	Tüm çatının FV/T ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı (ısı getiri sabit) .....	48
Şekil 4.6	Eğimli çatı ve düz çatının kıyaslanması (PVSYST Çıktısı) .....	50
Şekil 4.7	Ayrık melez sistem optimizasyonu.....	55
Şekil 4.8	Türkiye global yatay ışınım ve ortalama sıcaklık değerleri .....	49
Şekil 4.9	FV/T sistemde elektriksel getiri sabit tutulduğu zaman ortam sıcaklığı ve ışınımın (a) toplam enerji, (b) termal enerjiye etkisi .....	57
Şekil 4.10	FV/T sistemde ısı getirisinin sabit tutulduğu zaman ortam sıcaklığı ve ışınımın (a) toplam enerjiye, (b) elektrik enerjisine etkisi ...	58
Şekil 4.11	FV/T sistemlerde global yatay ışınımına bağlı ısı, elektriksel enerji üretimleri ve ısı kaybı değişimleri .....	59
Şekil 4.12	FV/T sistemlerde global yatay ışınımına bağlı ısı, elektriksel enerji üretimi ve ısı kaybı değişimleri .....	60
Şekil 4.13	FV/T sistem alternatiflerinin ışınımına bağlı getirilerinin değişimi .....	61
Şekil 4.14	FV/T sistemler için sıcaklığa bağlı enerji değerleri .....	62
Şekil 4.15	FV/T sistemler için sıcaklığa bağlı toplam enerji değişimleri .....	63
Şekil 4.16	FV/T sistem alternatiflerinin sıcaklığa bağlı getirilerinin değişimi .....	64

## ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan simülasyon yazılımları kıyaslama tablosu .....	3
Çizelge 2.2 PVSYST ve diğer simülasyon uygulamalarının kıyaslanma tablosu .....	4
Çizelge 2.3 Tez ile daha önceki çalışmaların kıyaslanması .....	9
Çizelge 2.4 2016 yılı en iyi 10 FV panel üreticisi .....	13
Çizelge 2.5 2016 yılı en iyi 10 FV panel üreticisi ürün kıyaslamaları .....	13
Çizelge 2.6 Panellerin sıcaklık özellikleri .....	15
Çizelge 3.1 Mut/Mersin için aylık ve yıllık örnek ışınım verileri .....	22
Çizelge 3.2 Türkiye için optimum eğim açıları .....	24
Çizelge 3.3 Transpozisyon faktörü ile çarpılan ışınım değeri hesabı.....	29
Çizelge 4.1 Örnek uygulama sistem tasarım parametreleri .....	44
Çizelge 4.2 Kısıtlı alanda (eğimli çatı) yapılabilecek alternatif uygulamalar ve sonuçları .....	49
Çizelge 4.3 Kısıtlı alanda (düz çatı) yapılabilecek alternatif uygulamalar ve sonuçları .....	51
Çizelge 4.4. Yatırım maliyetleri ve geri dönüş sürelerinin kıyaslanması .....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

FV	Fotovoltaik
FV/T	Fotovoltaik/Termal
TF	Transpozisyon Faktörü
$I_{net}$	Net Işınım ( $kWh/m^2$ )
$I_{global\ yatay}$	Global Yatay Işınım ( $kWh/m^2$ )
$\beta$	Eğim Açısı ( $^{\circ}$ )
$\emptyset$	Enlem Açısı ( $^{\circ}$ )
$Q_{toplam}$	Güneşten Gelen Toplam Enerji (kWh)
$E_{el}$	Elektrik Enerjisi (kWh)
$Q_{kayıp}$	Kayıp Enerji (kWh)
$\eta_{el}$	Elektriksel Verim (FV) (%)
$A_{FV}$	FV Modül Alanı ( $m^2$ )
$\eta_{el,ref}$	Elektriksel Referans Verim (%)
$\beta_{el}$	Sıcaklık Katsayısı ( $\%/^{\circ}C$ )
$T_{hücre}$	Hücre Sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$T_{ref}$	Referans Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )
$T_{ortam}$	Ortam Sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )
$v$	Rüzgar Hızı (m/s)
$Q_{faydalı}$	Faydalı Enerji (kWh)
$A_{kolektör}$	Kolektör Alanı ( $m^2$ )
$\eta_{kolektör}$	Kolektör Verimi (%)
$m$	Yıllık Isıtılması Gereken Su Miktarı (lt/yıl)
$c$	Özgül Isı (cal/g $^{\circ}C$ )
$T_{giriş}$	Giriş Suyu Sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )

$T_{\text{çıkış}}$	Çıkış Suyu Sıcaklığı (°C)
$Q_{\text{ihtiyaç}}$	İhtiyaç Duyulan Enerji (kWh)
$Q_{\text{termal}}$	Termal Enerji (kWh)
$U_{L(FV)}$	FV Toplam Isı Transfer Katsayısı (FV) (W/m <sup>2</sup> -K)
$U_1$	Üst Yüzey Toplam Isı Transfer Katsayısı (W/m <sup>2</sup> -K)
$U_2$	Alt Yüzey Toplam Isı Transfer Katsayısı (W/m <sup>2</sup> -K)
$U_{L(FV/T)}$	FV/T Toplam Isı Transfer Katsayısı (FV/T) (W/m <sup>2</sup> -K)
$A_{FV/T}$	FV/T modül alanı

## 1. GİRİŞ

Güneşin çekirdeğinde gerçekleşen füzyon süreci ile açığa çıkan ışınım enerjisinin Dünyaya ulaşan bölümü, insanlığın mevcut enerji tüketiminin elektriksel ve termal kısmının karşılanmasına kaynak oluşturmaktadır. Elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik sistemlerin son yıllarda teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşüş göstermesi; diğer yandan termal enerji elde etmede kullanılan sistemlerin teknolojilerinde büyük değişiklikler olmamakla birlikte kullanımının yaygınlaşması, bu iki sistemin melez çözümlerde birleştirilmesini popüler kılmaya başlamıştır.

Güneş enerjisini kaynak olarak kullanan sistemlerin Türkiye’de yaygınlaşmasının ilk örnekleri olan ısı sistemlere, özellikle Akdeniz ve Ege bölgelerinde sıkça rastlamak mümkündür. Ayrıca, 2013 yılı itibariyle sayıları hızla artan fotovoltaik sistemlerden elektrik üretimi, ülkemizde güneş enerjisi için yeni bir pazar aynı zamanda yeni bir endüstri haline gelmiştir. Bu iki sistemin bir arada kullanılmaya başlandığı, çatı üstü melez uygulamalar için örnekler mevcut iken; sınırlı bir alana yerleştirilecek bu sistemlerin, optimum seviyede ayarlanarak bu sistemlerden getiri sağlamak bir başka araştırmayı beraberinde getirmiştir. Güneş enerjisi sistemlerinde, dünyaya ulaşan ışınımın toplandığı ilk bileşenler olan fotovoltaik paneller veya solar kolektörler ile diğer sistem bileşenlerinin maksimum verim ve performanstaki tasarımı, profesyonel tasarımları gerektirmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen bir uygulama ile bu tür melez sistemlerin tekno-ekonomik analizi de yapılabilmektedir.

Bu çalışma ile ısı ve elektriğe bir arada ihtiyaç duyan tüketiciler için alternatif sistemlerin ayrı ayrı veya birlikte kullanımı ile optimum sistem tasarımı ve bu tasarımların sonucunda simülasyon ile üretim değerlerinin belirlenmesi amaç edinilmiştir. Tasarım öncesi araştırma ve teknik analizler yapıp, sistemin performansını etkileyecek etmenlerin incelenmesi sağlanmıştır. Ayrıca sistemin matematiksel modellemesi, bu modellemede kullanılacak simülasyon ve optimizasyon mekanizmalarının kurulması, bu modele ait sonuçların kıyaslanması ve sistemin tekno-ekonomik yönden optimizasyonu sağlanmıştır. Tüm bunlar için; yeni ve geliştirilebilir bir melez sistem tasarımı, düşük ekserjili güneş enerjisinin ısı ve elektrik eldesinde kullanımının artırılması, ısı ve elektriksel getirisinin maksimum seviyeye çıkarılması, ihtiyaçlar karşısında optimum sistem tasarımı ve temel

parametrelerin sisteme etkilerinin incelenmesine yer verilmiştir. Bu tür örnek bir uygulama için tercih edilecek tüketicinin hem ısı hem de elektrik eldesine ihtiyacının olması için endüstriyel tesis veya mesken aboneliği olması gerekmektedir. Geliştirilen uygulama ile optimizasyon için birden çok çözüm belirlenebilmektedir. Bunun göre termal sistemler için yaygın olarak kullanılan düz kolektörler, elektrik üretimi için ise benzer şekilde yaygın olarak kullanılan ve aynı zamanda sıcaklığa en duyarlı hücre yapısına sahip polikristal fotovoltaik sistemler kullanılarak senaryolar belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında; ikinci bölümde literatür taraması yapılmış, günümüzde kullanılan simülasyon yazılımları kıyaslanmış, fotovoltaik simülasyonun maksimum doğrulukta çalıştığı yazılım değerlendirilmiş, daha önce benzer konularda yazılmış çalışmalar incelenmiş ve genel seviyede solar sistemlerin açıklamalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise bu sistemlerin ayrı ayrı ve bütünlükte matematiksel modellemeleri yapılmış, güneşten elde edilecek ısı ve elektrik enerjisi sistem tasarımlarında kullanılacak parametreler belirlenmiş, ve her bir sisteme ait hesaplamalara yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, kurulan bu matematiksel modelin uygulanabilmesi için örnek bir yapı ve özellikleri tanımlanmış, bununla ilgili senaryolar belirlenmiş ve her bir senaryo için yapılan hesaplar ve sonuçlar mukayese edilmiştir. Son olarak sonuç bölümünde elde edilen bulguların değerlendirmelerine yer verilerek, gelecekte bu çalışmaya dahil edilebilecek ve hazırlanan uygulamaya dahil edilebilecek yeni çalışmalara değinilmiştir.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Günümüzde Kullanılan Simülasyon Yazılımları

Bu çalışma kapsamında güneş enerjisinden elektrik ve sıcak su eldesi için simülasyon ve optimizasyon çalışmaları hedeflendiğinden mevcutta ticari olarak kullanılan simülasyon yazılımları da incelenmiştir. Dünya genelinde kullanılan çok sayıda simülasyon amaçlı bedelsiz veya lisanslı uygulama bulunmaktadır. Bu uygulamalar içerisinde en çok kullanılanlar, PV\*SOL, RETScreen, TRNSYS, HOMER, INSEL, PV F-Chart, NREL (SAM), PVSYST, SolarDesignTool, SolarPro, PV DesingPro-G, PVSOL yazılımlarıdır. Ekonomik optimizasyon, teknik optimizasyon gibi etkenler bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon aracı ile sağlandığından, bu tür özelliklerin bulunması önem arz etmemektedir. Bununla birlikte uygulamanın güneş enerjisi özelinde çalışması, incelenen konuya bağlı daha detaylı analiz yapılabilmesi için önemlidir. Bu tür uygulamalar içerisinde bilimsel laboratuvar desteği alan ürünlere olan güven daha fazladır. Çizelge 2.1’de piyasada yaygın kullanılan simülasyon yazılımlarının farklı açılardan kıyaslamaları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan simülasyon yazılımları kıyaslama tablosu

Ürün	Fiyat	Bilimsel Laboratuvar Desteği	Güneş Enerjisi Özelinde Çalışabilirlik	Temel Çıktılar
RETScreen	Ücretsiz	Public Service Renewal Video, Natural Resources Canada	Hayır	Amortisman, emisyon
TRNSYS	5.060 \$	University of Wisconsin, Madison	Hayır	Güç üretim miktarı, enerji oranı
HOMER	Ücretsiz	National Renewable Energy Laboratory	Hayır	Maliyet, performans, duyarlılık analizleri
NREL SAM	Ücretsiz	National Renewable Energy Laboratory	Evet	Performans, ekonomik model

Çizelge 2.1 Güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan simülasyon yazılımları kıyaslama tablosu (devamı)

Ürün	Fiyat	Bilimsel Laboratuvar Desteği	Güneş Enerjisi Özelinde Çalışabilirlik	Temel Çıktılar
PVSYST	1.368 \$	Institute of Sciences (ISE), Environmental, University of Geneva	Evet	Enerji üretimi, gölgelenme faktörü hesaplama, kayıp analizleri
PV*SOL Expert	1.295 €	Yok	Evet	Çatı uygulamaları gölgeleme analizleri

Buna ek olarak bu tür simülasyon uygulamalarının genel bir kıyaslaması için Çizelge 2.2'den faydalanılabilir.

Çizelge 2.2 PVSYST ve diğer simülasyon uygulamalarının kıyaslanma tablosu

Özellik	Diğer Uygulamalar	PVSYST
Lisans	Ücretsiz veya ücretli olanları mevcut	30 gün tüm özellikleri ile DEMO sürümü mevcut, lisanslı
Kayıp Parametreleri	Parametrelerin büyük çoğunluğu mevcut	Daha geniş parametre ağına sahip
Meteorolojik Veri	TMY2, TMY3, EPW	Meteonorm, TMY2, TMY3, EPW, PVGIS, WRDC, Retscreen, Helioclim, SolarGIS
Kullanım Kolaylığı	Sade içerikten dolayı kolay öğrenme	Kapsamlı içerikten dolayı zor öğrenme
Raporlama	Kısa ve açık	Detaylı, profesyonel, özelleştirilebilir
Ekonomik Model	Basit ekonomik analiz	Kompleks ekonomik analiz

Yukarıda verilen karşılaştırma kriterlerine göre, çalışmanın amacına en uygun yazılım PVSYST olarak belirlenmiştir.

## 2.2. Bilimsel Yayınlar ve Tezlerin İncelenmesi

Bu çalışma kapsamında ulusal ve uluslararası tezler, yayınlar ve bildiriler incelenmiş olup, Türkiye'de benzer bir tez çalışması yapılmadığı tespit edilmiştir. Ancak; çalışmanın konusuyla direkt ilişkili ayrı ayrı konuları göz önünde bulunduran farklı çalışmalar incelenmiştir. Bu kaynaklar içerisinde simülasyona ve

optimizasyona odaklanan çalışmalara yer verilirken; ek olarak FV, termal veya FV/T sistemler özelinde çalışmalar yapılmıştır.

FV/T ile ilgili hazırlanmış Türkiye'deki tezlerden biri Duman'a ait çalışmadır. Bu çalışmada hem elektrik hem de sıcak su üreten, FV ve termal kolektörlerin birlikte kullanıldığı bir sistem tasarlanmıştır. Farklı hava şartları ve debilerde elde edilen deneysel veriler kullanılarak kolektör modelleri incelenmiştir. Bu sayede, istenen elektriksel ve ısıl gleri karşılayabilen optimum kolektör sayılarının tespitini sağlayan bir uygulama geliştirilmiştir [1]. Bu durumda FV/T sistemler için simülasyon analizleri incelenerek ve uygulamanın parametrelerinin çalışmalara katkı sağlaması değerlendirilmiştir.

Buna benzer bir diğer çalışma da Engin ve olak tarafından hazırlanan "Modeling and Performance Optimization of Photovoltaic and Thermal Collector Hybrid System" başlıklı çalışmadır. Bu araştırma kapsamında da benzer şekilde FV/T sistemler göz önünde bulundurulup, endüstriyel olarak yaygınlaşmamış bu tür sistemlerin modellenmesi ve performans optimizasyonu için hazırlanan yüksek lisans tezine kaynak sağlamıştır [2].

Mutluay tarafından hazırlanan çalışma ile fotovoltaik sistem tasarımına ait simülasyon için mevcut bütün programlar için literatür taraması yapılmış tüm Dünya'da geçerli olan ve verdiği sonuçların güvenilirliği bakımından kredi imkanı sunabilen PVSYST programı seçilmiştir. Bu sayede bu çalışmada kullanılan uygulama için en doğru seçimin PVSYST yazılımının olduğunu destekleyici kaynaklar sağlanmıştır [3].

Türkiye'deki tezlerden bir diğeri ise Gltuna tarafından hazırlanan "Gürsu-Bursa Fotovoltaik Güç Santralinin Simülasyonu; Tekno-ekonomik ve evresel Optimizasyonu" başlıklı çalışmadır. Bu tezde, fotovoltaik güç santralinin tekno-ekonomik ve çevresel optimizasyonuna yönelik bir simülasyon modeli geliştirilmiş, eğik düzleme gelen ışınım, PV panel verimi, santralin elektrik üretim değerleri, yıllık kazancı, salımı nlenen karbon miktarı ve amortisman süresi hesaplanmıştır [4].

Pathak, Sanders ve Pearce tarafından hazırlanan "Optimizing Limited Solar Roof Access by Exergy Analysis of Solar Thermal, Photovoltaic, and Hybrid

Photovoltaic Thermal Systems” başlıklı çalışma ise sınırlı bir alan için optimum uygulamanın yapılmasını incelemektedir. Tez kapsamında yapılacak çalışmanın optimizasyon aşamasında verim açısından desteği olan bu kaynak sadece sınırlandırılmış alana ait optimum çözümler sunarken ekonomik yönden analize değinmemiş ve işlenen endüstriyel bir tesisteki uygulama için kısıtla karşılaşıldığında izlenmesi gereken yolun tespit edilmesi hususunda destek olmuştur [5].

Herrando ve Markides’in çalışması ışınımı ülkemize nazaran düşük olan İngiltere’yi solar sistemlerin performansı açısından incelemiştir. “A UK-Based Assessment of Hybrid PV and Solar-thermal Systems for Domestic Heating and Power: System Performance” başlıklı çalışma evlerdeki elektrik ve ısı ihtiyacının karşılanması için geliştirilecek böyle bir hibrit sistemin, sistem performansı açısından incelenmesini ele almaktadır [6]. Aynı yazarların bir diğer çalışmasında ise bu konunun tekno-ekonomik değerlendirmesi ele alınmaktadır. Ancak, optimizasyon detaylı olarak ele alınmamış, uygulaması değerlendirilmemiştir ve İngiltere özelinde kısıtlanmıştır [7].

Gooda, Chenb, Daib ve Hestnesa’nın hazırladığı “Hybrid photovoltaic-thermal systems in buildings – a review” başlıklı çalışma ise kısıtlı alanı olan binalara uygulanmış FV/T sistemlere, bu uygulamaların farklı teknolojilerine ve uygulamaların sonuçlarının değerlendirmesine yer vermektedir. Buna ek olarak çalışmada, bu sisteme ait pazarın gelişmesini sağlayan etmenler ve gelişmesine engel konulardan bahsetmektedir [8].

Dupeyrat, Menezo, Rommel ve Henning’e ait “Efficient single glazed flat plate photovoltaic–thermal hybrid collector for domestic hot water system” konulu çalışma ise evsel kullanım için farklı teknolojilerle oluşturulmuş FV/T sistemlerin matematiksel modellemelerine yer vermiş, bu modellemelerde en çok FV hücreler ve ısı sistemini taşıyan akışkan arasındaki ısı transferine dikkat çekmiştir. Bunun için oluşturulan prototipin ise farklı koşullardaki deneysel sonuçlarında FV, ısı ve toplam sistem için verimler analiz edilmiştir [9].

Daghigh, Ruslan, Zaharim ve Sopian’a ait “Monthly Performance of a Photovoltaic Thermal (PV/T) Water Heating System” konulu makalede ise TRNSYS simülasyon

programı kullanılarak, Malezya'da bir FV/T sistemin aylık performansı hesaplanmış ve kolektör alanının sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ısı enerjisinden elde edilen kazanç ve elektrik güç çıkışı için en uygun mevsimler irdelenmiştir. Ayrıca, optimum kolektör alanını seçmek için gerekli olan sistem parametreleri belirlenmiş ve çıkan sonuçlar incelenmiştir [10].

Buonomano, Calise ve Vicidomini'nin ele aldığı "Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors" konulu makale ise PV/T sistemlerin teknik değerlendirmesini amaçlayan sayısal ve deneysel analizler sunmaktadır. Dizaynı yapılan ve Avellino/İtalya da kurulan bu sistem sayesinde FV/T ve FV sistemin elektriksel sonuçlarının kıyaslanması sağlanmıştır. Sistemin deneysel sonuçlarının yanı sıra TRNSYS modellemesi ile ortaya çıkan teorik sonuçlar kıyaslanmıştır. Çalışma sadece teknik sonuçları incelememekte ayrıca ekonomik getirileri de değerlendirmektedir [11].

Babatunde ve Abbasoğlu tarafından ele alınan "Evaluation of field data and simulation results of a photovoltaic system in countries with high solar radiation" başlıklı çalışmada farklı simülasyon araçlarının uygunluğu analiz edilmektedir. Güneş radyasyonu yüksek olan ülkelerde FV sistemlerin performansı değerlendirilmiş ve sonuçlar global olarak bilinen 3 FV yazılım aracının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu araçlar, pvPlanner, PVSYST ve Homer'dir. Bu çalışmada değerlendirilen parametreler ise enerji üretimi, verim, performans oranı ve kapasite faktörüdür. Belirlenen sistem performansı oranı için üç ayrı simülasyon aracında hesaplanan değerlerden, en az sapmayla en yakın değeri veren ise PVSYST olarak belirlenmiştir [12].

Öner, Yeşilyurt, Yılmaz ve Ömeroğlu tarafından yazılan "Photovoltaic Thermal (PVT) Solar Panels" başlıklı makale ise artan enerji talebi ve daha az alanda daha fazla enerji üretecek, daha kompakt sistemlerin geliştirilmesi ihtiyacına vurgu yapmaktadır. Ayrıca, enerji sistemlerinin daha verimli olması için güneş pili ve güneş kolektörü sistemlerini birleştirerek oluşturulan FV/T sistemlerin çalışma prensipleri, avantaj ve dezavantajları ile teknolojileri hakkında genel bilgi vermeyi amaçlamaktadır [13]. Buna benzer bir çalışma Sharma, Rabia, Chuahan ve

Pathak tarafından “Photovoltaic Thermal (PV/T) and Its Recent Developments” başlıklı makalede ele alınmıştır. Bu çalışmada ise FV/T sistemlerin 30 yıllık geçmiş süreçteki teknolojik değişimlerine ve gelişmelerine yer verilmiştir [14].

Ramoliya tarafından yazılan “Performance Evaluation of Grid-connected Solar Photovoltaic plant using PVSYST Software” çalışmada ise şebekeye bağlı bir FV sistemin simülasyonu, PVSYST ile gerçekleştirilmiştir. Performans oranı, güç kayıplarının detaylıca incelendiği çalışmada büyük kurulu güçte santralin uygulanabilirliği Şapur/Gujarat için tartışılmaktadır [15].

Sauer, Roessler, Hansen tarafından yapılan “Modeling the Irradiance and Temperature Dependence of Photovoltaic Modules in PVSyst” başlıklı çalışmada FV sistemlerin simülasyonunda, ışınım ve hücre sıcaklığının panel performansı üzerinde gösterdiği etki vurgulanmıştır. Bunun için farklı ışınım ve sıcaklıklarda PVSYST uygulamasıyla simülasyonlar yapılmıştır. PVSYST'e göre optimize edilmiş modeller kullanılarak enerji tahminlerinde iyileştirmeler yapılabileceğinden ve proje finansmanı gibi kararların alınabileceğinden bahsedilmiştir [16].

Turkey ve Acar'a ait “A Solar Domestic Hot Water System Simulation Study in Sivas/Turkey” konulu makalede ise Sivas'ta kurulacak olan evsel sıcak su sisteminin simülasyonu ele alınmıştır. MATLAB ile matematiksel modellenerek hesaplama aracı geliştirilmiş ve bununla verimlilik ve optimum sistem tasarım parametreleri hesaplanmıştır. Bu sıcak su ihtiyacının konvansiyonel sistemler ile karşılanması durumundaki ekonomik getiri analiz edilmiş ve yakıt faturalarını azaltmak için solar sisteminin gerekli olduğuna değinilmiştir [17].

Yukarıdaki araştırmaların değerlendirilmesinin ardından bu çalışmayı daha önceki çalışmalardan ayıran ve özgün noktalarının anlatıldığı kıyaslamalara Çizelge 2.3.'te görmek mümkündür.

Çizelge 2.3 Tez ile daha önceki çalışmaların kıyaslanması

Önceki Çalışmalar ve Uygulamalar	Tez
Tek tip (genellikle FV) sistemler ele alınmıştır.	FV, termal ve FV/T sistemler ve farklı kombinasyonları mevcuttur.
FV/T sistemin simülasyonu ve optimizasyonunu amaçlayan yazılım mevcut değil.	FV/T sistemin simülasyonu ve optimizasyonu amaçlanmıştır.
Ağırlıklı olarak simülasyon hesaplarına yer verilmiştir.	Bütünleşik ve ayrı sistemlerin hem simülasyonu hem optimizasyonu mevcuttur.
Genellikle teknik analize yönelik çalışmalar ve uygulamalar mevcuttur.	Teknik analiz ve ekonomik analiz birlikte incelenmiştir.
İhtiyaç ve sistem tasarım kriterlerinin birlikte değerlendirildiği uygulamalar mevcut değil.	Hem ihtiyaca yönelik hem de tasarım kriterlerine (kısıtlara) göre analiz yapılabilmektedir.
Genellikle enerji üretim değerleri hesabına yer verilmiştir.	Hem üretilen enerji hem de bundan faydalanabilen hane sayısı hesaplarına yer verilmiştir.
Türkiye özelinde optimum sonuçlar değerlendirilmemiştir.	Türkiye üzerinde ilgili kriterlere göre en uygun bölgelerin tespitine (lokasyon-performans kıyaslamalarına ve lokasyona uygun optimum çözüm tespitine) yer verilmiştir. Farklı tipteki ayrı veya bütünleşik melez sistemlerin ilgili konum için optimum tasarımına da müsaade etmektedir.
Farklı sistemler için sıcaklık ve ışınımın simülasyon ve optimizasyon sonuçlarına etkisi değerlendirilmemiştir.	Güneşten ısı ve elektrik enerjisi eldesi için farklı etkilere sahip iki önemli parametre olan sıcaklık ve ışınım değişimlerinin simülasyon sonuçlarına etkilerini gösteren analizlere yer verilmiştir.

### 2.3. Genel Tanımlar

Güneş enerjisi sistemleri metot, ekipman ve teknoloji düzeyi açısından çeşitlilik göstermekle birlikte, temel iki başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki, güneş enerjili ısıl sistemlerdir. Bu sistemlerde güneş enerjisinden ısı eldesi sağlanır ve ısı enerjisi doğrudan kullanılabilir gibi elektrik üretimine de kaynak sağlayabilir. Bir diğer temel başlık ise güneş enerjili elektrik sistemleridir. Fotovoltaik güneş pili

(FV) olarak anılan bu sistemler güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir.

Solar sistemlerin farklı kriterlere göre sınıflandırması yapılırsa da, en yaygın olarak sınıflandırma sıcaklık derecelerine göre yapılandırılır. Sıcaklık, bu tür sistemler üzerinde büyük etkiye sahip bir parametredir. Bu parametrenin iki farklı sistem olan fotovoltaik ve termal sistemlere etkisi zıt yönlüdür. Sıcaklık termal sistemler için doğru orantılı etki sunarken, fotovoltaik sistemler için etkisi ters orantılıdır. Güneş enerjisi uygulamaları sıcaklık değerlerine göre üç ana başlık altında toplanır. Bunlar;

- Kullanım sıcak suyu eldesi, bina ısıtılması-soğutulması, sera ısıtılması, tarım ürünlerinin kurutulması, yüzme havuzu ısıtılması, güneş ocakları ve fırınları, deniz suyundan tatlı su eldesi, tuz üretimi, sulama, toprak solarizasyonu ve FV sistemler ile elektrik eldesi gibi uygulamalar için düşük sıcaklık uygulamalarıdır. Bu uygulamaların sıcaklıkları 100°C'nin altındadır. Isıl sistem ve fotovoltaik uygulamaları bu başlıkta yer almaktadır.
- Orta sıcaklık (100-300°C) uygulamaları diye belirtilenler ise endüstriyel kullanım için buhar üretimi ve elektrik üretimi ve büyük ısıtma-soğutma sistemleridir.
- 300°C'den yüksek sıcaklıktakiler ise yüksek sıcaklık uygulamaları olarak tanımlanmakta ve parabolik çanak, merkezi alıcılarla elektrik üretimi gibi teknolojileri kapsamaktadır.

Dolayısıyla bu sistemlerin bileşik uygulaması olan ve bu çalışma kapsamında bütünleşik melez olarak adlandırılan ısıl dengeden faydalanmayı amaçlayan FV/T sistemleri de düşük sıcaklık uygulamaları başlığı altında değerlendirmek mümkündür. Bu sistemlerin ayrı ayrı uygulanmasıyla oluşturulan kombinasyonun bu çalışma kapsamındaki adlandırılması ise ayrık melez sistemlerdir. Tüm bu sistemlerin detaylı incelenmesi aşağıdaki alt başlıklarda incelenmiştir.

### **2.3.1. Elektriksel sistemler**

Güneşin elektrik eldesinde kullanıldığı fotovoltaik sistemlerin kurulumu son yıllarda büyük bir ivme göstererek geleceğin temel enerji kaynakları arasında



gösterilmektedir. Teknolojisinin gelişmesine paralel maliyetlerinin düşmesiyle birlikte fotovoltaik uygulama alanları hızla artmakta ve bireysel tüketicilerin aynı zamanda birer elektrik üreticisi rolü kazanmasına olanak sağlamaktadır. Bu tür sistemlerde termal sistemlerdekine benzer ışınımı toplayıcı bir güneş paneli mevcuttur. Bu güneş paneli içerisinde yer alan hücreler (güneş pilleri) basitçe bir p ve n eklemden oluşan diyotlara benzemektedir. Fotoelektrik olay prensibine dayanarak pilden fotonlar tarafından koparılan elektronlar eklemden harekete geçer ve bir elektriksel doğru akımı oluşturur. Yaygın olarak tercih edilen güneş panelleri aşağıda irdelenmiştir [18].

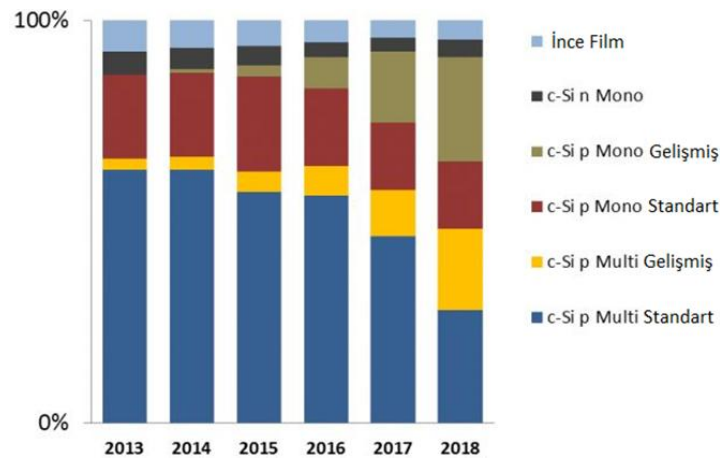
- Monokristal: Endüstriyel olarak kullanılan en yaygın fotovoltaik hücrelerden bir tanesidir. Kalite ve verimlilik açısından monokristal güneş pilleri yüksek verimli monokristal hücrelerden oluşmuşlardır. Bu paneller aynı gücü üreten polikristal fotovoltaik hücrelere göre daha yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Buna karşın üretiminde kullanılan teknoloji sebebiyle üretim süreci uzun sürmektedir ve dolayısıyla birim fiyatı daha yüksektir. Güneş pillerinin monokristal olması tüm hücrenin sadece kristalden oluşması ve materyalin atomsal yapısının homojen olması demektir. Doğada bulunan tüm kristalin bileşimler ise polikristaldir [18].
- Polikristal: Kalite ve verimlilik açısından monokristal olanlardan biraz daha düşük verimli hücreler ile üretilmiştir. Ancak buna rağmen kullanım alanı daha yaygındır. Bunun en büyük nedeni ise daha kolay ulaşılabilir ve buna bağlı olarak daha uygun fiyatlı olmasıdır. Bu nedenle fayda/maliyet oranı yüksektir. Polikristal fotovoltaik hücre materyali tam olarak homojen olmaması anlamına gelmektedir.
- İnce film: Işık yutma oranı yüksek olan bu hücreler, düşük verimlilikleri nedeni ile pazar payının küçük bir bölümünü oluştururlar. İnce film paneller sıcağa daha dayanıklıdır. Ayrıca paneller üzerine herhangi bir gölge düştüğünde gölge dışındaki alanın elektrik üretmesine olanak sağlamaktadır. İnce film fotovoltaik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir. Başka bir deyişle ince film yarı-iletken malzeme,

büyükükleri bir milimetrenin binde birinden, milyonda birine değişen damarlardan oluşmaktadır.

Mevcut fotovoltaik panellere ek olarak esnek yapıda olanları üretilmeye başlanmıştır. Bu panel çeşidi genellikle özel kullanım alanları veya çatıya uyarlamaları kolay olduğundan çatı tipi paneller olarak değerlendirilmektedir. Özellikle taşıyıcı sistemlerin çatıya entegresinin zor olduğu uygulamalarda çatı izolasyonuna zarar vermeden monte edilebilirler. Bu ürünler enerji üretiminin yanı sıra çatı membranı olarak da kullanılabilir. Bu tip panellerde ise kristal ve ince film hücreler mevcuttur. İnce film hücrelerden oluşan bu tür panellerin en önemli özelliği esnek yapıda olmalarıdır. Herhangi bir taşıyıcı sistem ihtiyacı yoktur. Ayrıca kristal yapılı güneş panellerine göre ağırlık bakımından avantaj sağlamaktadırlar. Esnek yapının verdiği bu panellerde cam ve çerçeve olmaması maliyeti düşürürken, esneklik sağlması için harcanan tutarlar fiyatın artmasına sebep olmaktadır.

Elektrik eldesi için en çok tercih edilen yukarıdaki ürünlere ek olarak ayrıca daha özel olan Kadmiyum Tellür (CdTe), Amorf Silikon (a-Si) türünde üretimi olan fotovoltaik paneller de mevcuttur.

Yukarıda da belirtildiği gibi farklı teknolojilerle farklı kullanım alanlarına sahip çeşitleri olmasına rağmen en yaygın kullanım polikristal FV panellerde gözlemlenmektedir. Yıllara göre değişen FV panel teknoloji üretimleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Teknolojilerine göre FV hücre üretimleri [19]

2016 yılının en iyi 10 FV panel üreticisi listesini Çizelge 2.4'te görmek mümkündür. Bu panel üreticilerinden First Solar ince film üreticisiyken diğer üreticiler polikristal ve monokristal bazlı ürün üretimine ağırlık vermektedir.

Çizelge 2.4 2016 yılı en iyi 10 FV panel üreticisi [20]

Sıra	Marka
1	Jinko Solar
2	Trina Solar
3	Canadian Solar
4	Hanwha Q-Cells
5	Ja Solar
6	GCL
7	First Solar
8	Yingli Green
9	Talesun
10	Risen

First Solar dışındaki firmaların o dönem üretebildikleri panel güç çıkışındaki (250 Watt) ürünlerin verim ve yüzey alanları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.5 2016 yılı en iyi 10 FV panel üreticisi ürün kıyaslamaları

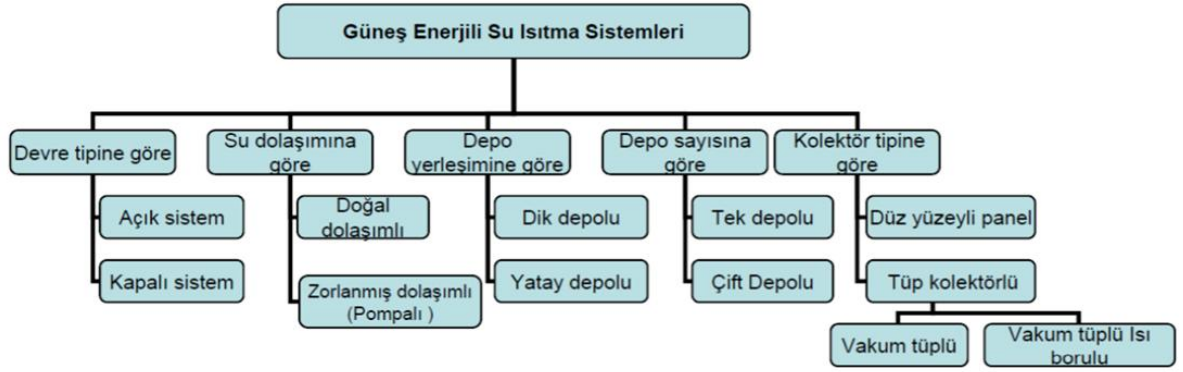
Marka	Verim	Alan (m <sup>2</sup> )
Jinko Solar	%15,27	1650
Trina Solar	%15,30	1650
Canadian Solar	%15,54	1638
Hanwha Q-Cells	%15,00	1670
Ja Solar	%15,29	1650
GCL	%15,40	1640
Yingli Green	%15,30	1650
Talesun	%15,40	1640
Risen	%15,30	1650
Ortalama	%15,30	1650

Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyon ve optimizasyon çalışmalarında piyasada en çok rastlanabilecek ürün olan polikristal hücre teknolojisine sahip 60 hücreli paneller tercih edilmiştir. Bu sayede 250 Watt güç baz alınarak %15,6 verim ve 1,6 m<sup>2</sup> alan baz alınarak standartlaştırma yapılmıştır.

Son yıllarda teknolojisi ve kullanımı hızla yükselişe geçen fotovoltaik sistemlerin ülkemizdeki pazarı 2012 yılında başlamış ve 2017 yılı sonu itibariyle toplam kurulu güç 4.000 MW'ın üzerine çıkmıştır.

### 2.3.2. Isıl sistemler

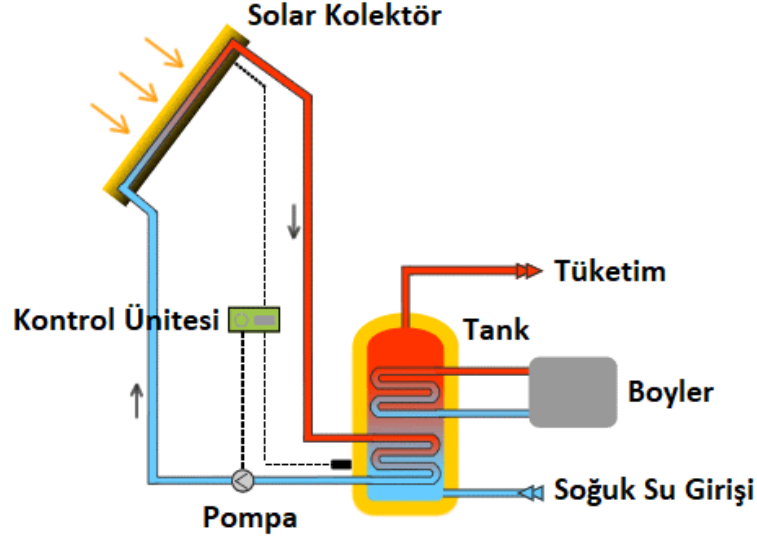
Güneşin su ısıtma için kullanıldığı yöntemler geleneksel ve en yaygın yöntemlerdir. Bu sistemler güneş enerjisinden gelen ısıyı suya aktarır, suyu ısıtan sistemlerdir. Güneş enerjisi ile su ısıtma sistemleri hazırlanacak suyun kullanma yerine, suyun ısıtılma şekline, sistemdeki suyun dolaşımına, kullanılan malzemelerin özelliklerine ve amacına göre değişiklik gösterirler. Isıl (termal) sistemler ile ilgili sınıflandırma Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Güneş enerjili su ısıtma sistemleri [21]

Çalışma kapsamında, su ısıtma sistemlerinde popüler olarak kullanılan düz yüzeyli kolektörler kullanılmıştır. Düz kolektörler; cam, yutucu yüzey, yutucu yüzeye bağlı ısı taşıyıcı borular, yalıtım malzemeleri ve çerçeveden oluşmaktadır.

Termal sistemlerde kolektör dışında sistemi tamamlayan başka bileşenler de mevcuttur. Bunlar tesisatı oluşturan borular, sıcak suyun depolanmasını sağlayan tanklar, destek ısıtma sistemleri ve kontrol elemanlarıdır. Şekil 2.3'te bu bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Solar ısı sistem bileşenleri [22]

Piyasada yaygın kullanılan kolektör ebatları genellikle 2 m<sup>2</sup> ile 2,5 m<sup>2</sup> arasında yüzey alanına sahip olmakla birlikte, kolektör tipi ve modeline göre farklı ebatlarda da üretilmektedir.

### 2.3.3. Fotovoltaik/termal sistemler

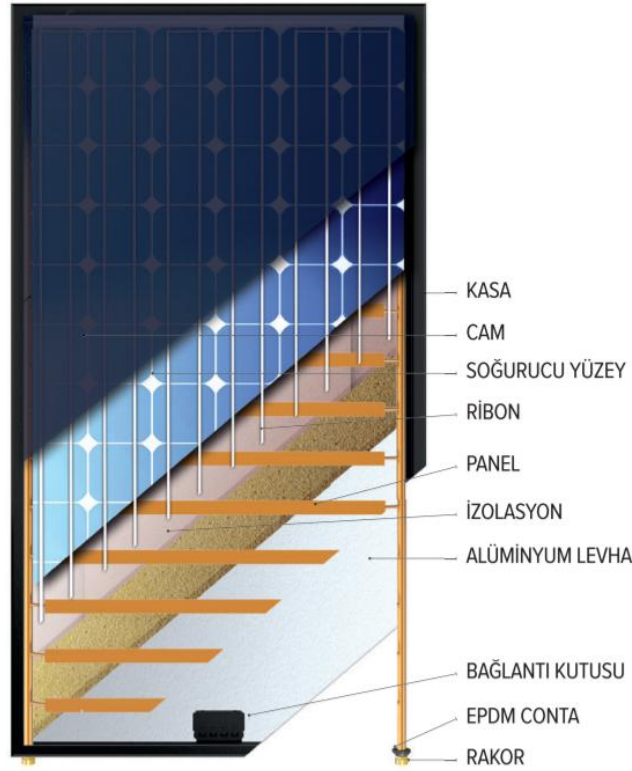
Güneş pilleri, güneşten gelen enerjinin yaklaşık %15'ni elektrik enerjisine dönüştürebilirler. Kalan enerjinin büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek güneş pilinin ısınmasına neden olur. Güneş pilindeki her 1°C sıcaklık artışı fotovoltaik paneldeki elektrik üretimini belirli seviyede düşürmektedir. Özellikle güç değerindeki katsayılar simülasyon sonuçları için önemlidir. Bu düşüşe ait katsayı değerleri her panellerin veri çizelgesinde verilmektedir. Aşağıda Çizelge 2.6 örnek bir panelin 1°C sıcaklık artışında akım, gerilim ve güçteki değişim oranlarını göstermektedir.

Çizelge 2.6 Panellerin sıcaklık özellikleri [23]

<b>Akım Katsayısı:</b>	0,06 %/°C
<b>Gerilim Sıcaklık Katsayısı:</b>	-0,31 %/°C
<b>Güç Sıcaklık Katsayısı:</b>	-0,41 %/°C

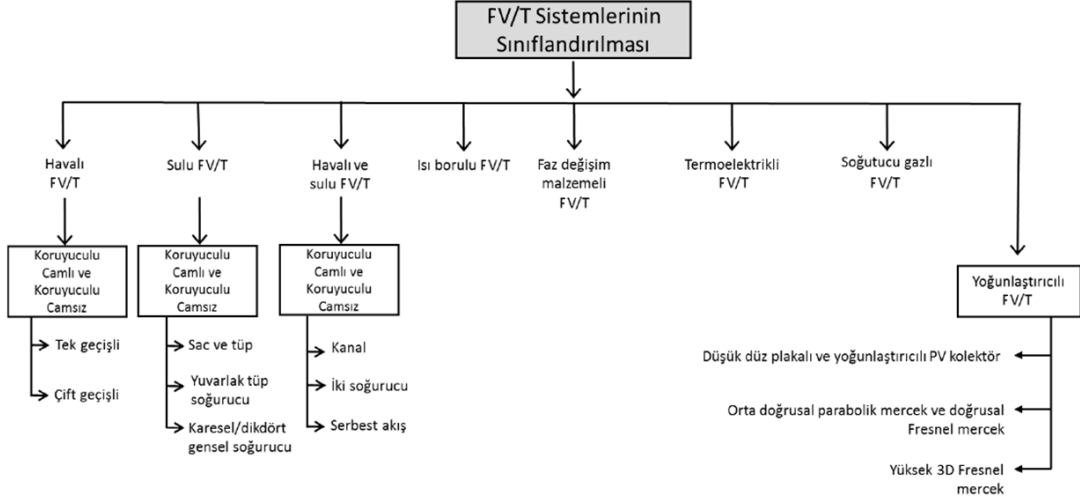
Güneş pillerinin ideal çalışma sıcaklığı 25°C (standart test koşulları için değer oluşturmaktadır) olarak hesaplanırken sıcaklığın daha da düşük olması verimi

artırmaktadır. Ortam sıcaklığı 25°C olan bir bölgede çalışan güneş panelleri ışınım ve rüzgâr hızına bağlı olarak 45°C'nin üzerine çıkabilmektedir. Bu durum karşısında güneş panellerinin elde ettiği bu ısıdan faydalanmak ve fotovoltaik sistemi soğutmak amacı ile melez sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerde FV panel arkasına yerleştirilen termal sistem içerisindeki akışkana ısı aktarımı gerçekleştirdiğinden panelin soğuması sağlanarak verim artışı gerçekleşmektedir. Diğer yandan termal sistemde ısınan akışkandan da faydalanılmaktadır.



Şekil 2.4 FV/T kolektör kesiti [24]

Melez fotovoltaik-termal (FV/T) sistemleri, üzerine düşen güneş ışınımını eş zamanlı olarak elektriksel güce ve ısıya dönüştüren soğurma yüzeyine sahip sistemlerdir [15]. Son yıllarda bu tür sistemler prototipten çıkarak ticari ürün haline gelmiştir. Bütünleşik melez yapıların sınıflandırılması Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 FV/T sistemlerin sınıflandırılması [25]

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen hesaplamalarda FV/T sistem performansı için bir model oluşturularak simülasyon aracı içerisine gömülmüştür.

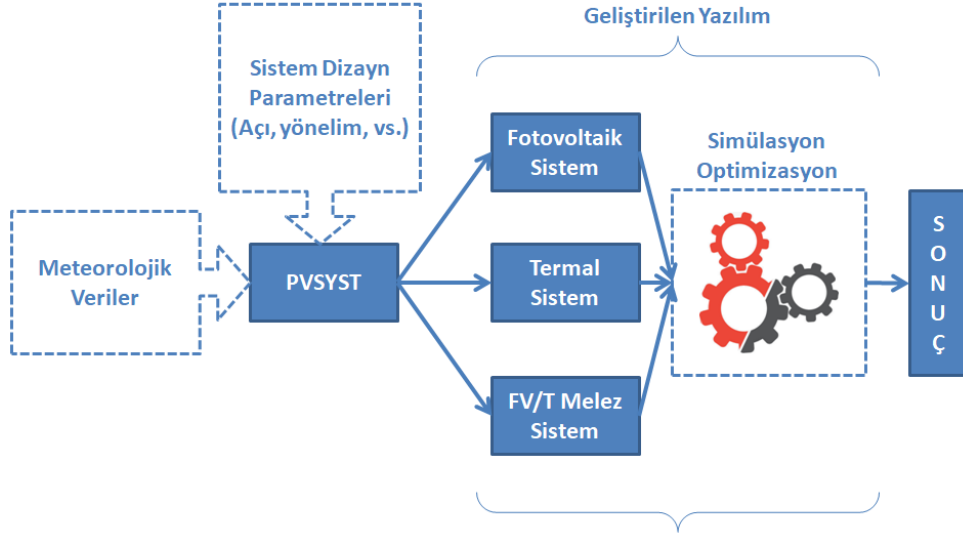
### 3. MATEMATİKSEL MODEL

Güneş enerjisinden elektrik, ısı ve elektrik-ısının birlikte elde edildiği sistemler dikkate alındığı zaman bu sistemleri etkileyen çok sayıda parametrenin olduğunu görmek mümkündür. Bu durum matematiksel olarak modellemelerinin de karmaşıklaşmasına neden olmaktadır. Her bir parametrenin pozitif veya negatif yönde etkisinin olduğu da dikkate alınmalıdır. Bu yüzden farklı sistemlerin parametrelerinin matematiksel modellemesinin ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir. Bu aşamada kullanılan en önemli meteorolojik veriler global yatay ışınım ve sıcaklık verileridir. Direkt, yayılı ve yansıyan ışınımın toplamına global yatay ışınım denir. Ancak, panele verilen eğim ile ışınımdan faydalanma miktarı değiştiğinden bu değer direkt simülasyon aracında kullanılmamaktadır. Panele eğim verildiği durumda hangi oranda kazanç sağlanmakta, bu eğim hangi oranda kayba neden olmakta sorusunun cevabı uygulama içerisinde hesaplanan transpozisyon faktörü ile belirlenmektedir. Dolayısıyla, fotovoltaik sistem hesaplarında kullanılan toplayıcı yüzeye gelen ışınımın (net ışınımın) hesabı için transpozisyon faktörüne ihtiyaç vardır. Transpozisyon faktörü, net ışınımın global ışınıma oranı ile Denklem 3.1'deki gibi hesaplanmaktadır. Transpozisyon faktörünün %100'den büyük veya küçük olması, global yatay ışınımdan ne oranda faydalandığını göstermektedir.

$$TF = \frac{I_{net}}{I_{global\ yatay}} \quad (3.1)$$

Net ışınım, çalışma kapsamında geliştirilen uygulamada panel/kolektör üzerine düşen ışınım olarak girdi oluşturmaktadır. Bu aşamadan itibaren, sistemlerin diğer girdileri ve çıktıları ayrı ayrı hesaplanmakta; geliştirilen yeni uygulama sayesinde farklı kriterler doğrultusunda optimum tasarım yapılmaktadır. Şekil 3.1'de verilen genel mimaride görüldüğü üzere, meteorolojik veriler ve sistem tasarımına ait parametreler olan açı, yönelim bilgileri PVSYST uygulamasına girilmekte, PVSYST içerisinde ilgili hesaplar yapılmaktadır. Sonrasında net ışınım bilgisi geliştirilen yazılıma girdi oluşturmakta ve 3 ayrı sistem için simülasyon ve optimizasyon yapılmaktadır.

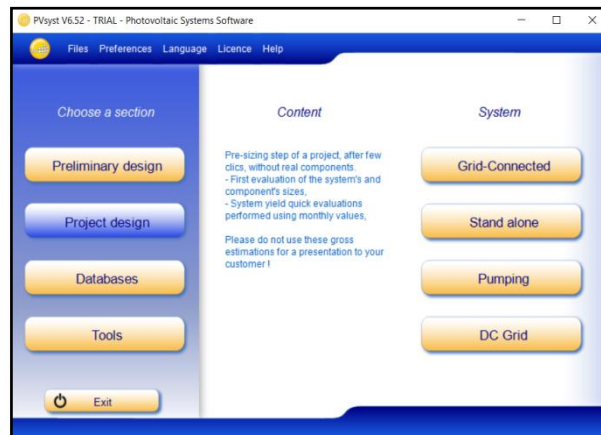




Şekil 3.1 Simülasyon ve optimizasyon mimari yapısı ve çalışma prensibi

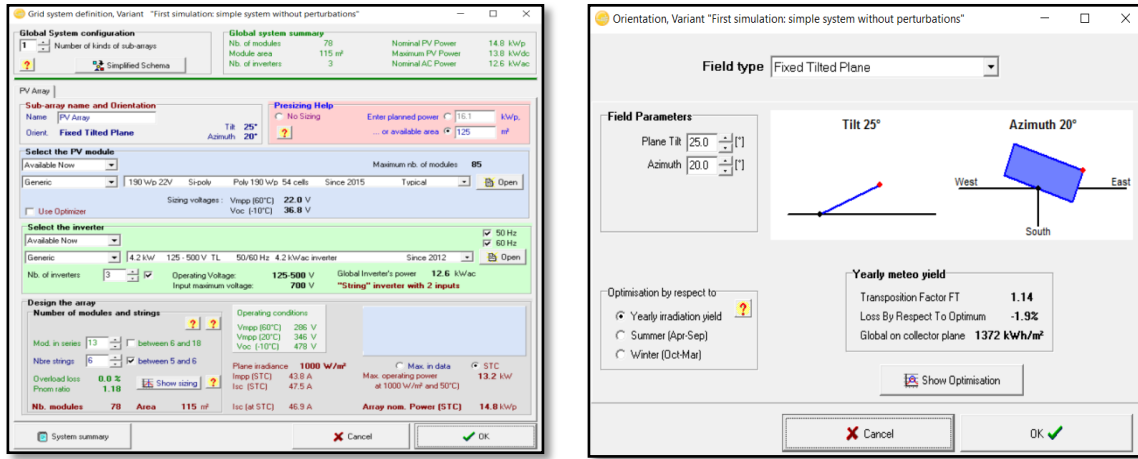
Bu yüzden fotovoltaik, termal ve fotovoltaik-termal sistemlerin yeni geliştirilen simülasyon aracındaki matematiksel modellemeleri detaylı incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, bu üç sisteme de girdiyi hesaplayan PVSYSY'nin değerlendirilmesi de önemlidir. PVSYSY yazılımı içerisinde barındırdığı birçok özellik ile karmaşıklaşan tasarım, simülasyon, üretim analizi süreçlerini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. Ana ekranda yer alan 4 temel başlıktan "Proje Tasarımı", dört farklı sistem için çalışma yapmayı sağlar. Şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız, pompa sistemleri ve DC şebeke yapısına uygun tasarım seçenekleri ile kurulabilecek neredeyse tüm tasarım biçimlerine ait alt yapıyı sunabilmektedir.



Şekil 3.2 PVSYSY - ana ekranı [26]

Bu çalışma kapsamında şebekeye bağlı sistemler tasarlanmıştır. Sistemin adım adım tüm tasarımı bu araçla yapılabilir ve temel ekipmanları seçilerek bunların tüm veri belgeleri sistemde kullanılmak üzere simülasyon aracına yüklenebilmektedir. Yapılan çalışma için gerekli en önemli hesap ışınımın dönüştürüldüğü transpozisyon faktörü olduğundan, PVSYST içerisindeki ayar penceresinde yerleşim, konumlandırma ve açılar ayarlanmaktadır. Sahanın optimum seviyede elde ettiği üretim değerinde panellerin açısı burada tanımlanmaktadır.



Şekil 3.3 PVSYST - parametre giriş ekranları [26]

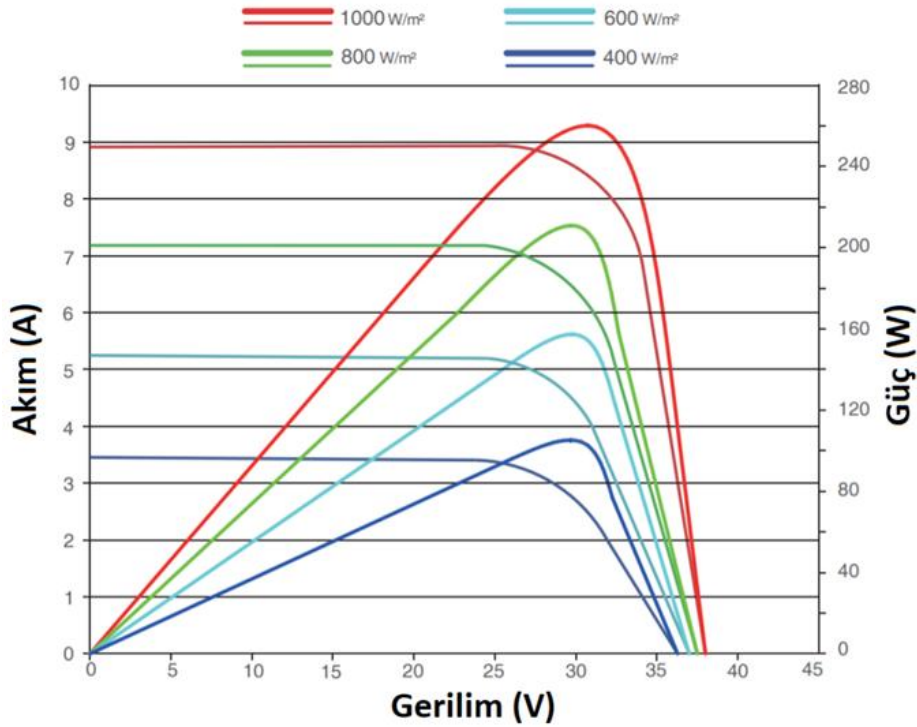
### 3.1. Fotovoltaik Sistemler

Güneş enerjisi santrallerinin ekonomik ömürleri 20 yılın üzerinde kabul edilmektedir. 20 yıl boyunca enerji üretecek bir sistemin verimliliğindeki çok küçük değişimlerin yıldan yıla etkisi önemli seviyelere çıkmaktadır. Bu santrallerin verimliliğini kayıplar belirler. Şebeke bağlantılı bir FV sistemin ürettiği enerji birçok faktöre bağlıdır. Bu yüzden hem yatırımcılar, hem de uygulamacılar tarafından iyi analiz edilmelidir. Sistemi oluşturan bileşenlerin nominal karakteristik değerleri, sistem konfigürasyonu, sistemin coğrafi konumu, kurulum noktasının etrafında bulunan yapılar ve işletim sırasında gerçekleşebilecek arızalar bunlardan bazılarıdır.

Girdi olarak güneş ışınımı, çıktı olarak ise elektrik enerjisi sunan bu sistemlerde sistemin verimini etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerin birçoğu üretimde kayıplara yol açmaktadır. Bunların bazıları (sıcaklık, tozlanma, karlanma)

çevresel ve sistemin içinde bulunduğu yerel koşullarla ilgilidir. Bazı faktörler ise tasarımı ilişkilidir. Bunların örnekleri gölgelenme, AC ve DC kablo kayıpları vs.'dir. Bunların dışında da etmenler bulunmakta ve bu etmenler kullanılan malzemelerin kalitesiyle alakalıdır. Uyumsuzluklar, evirici kayıpları gibi etmenler buna örnektir. Paneller ve sistem dâhilinde kullanılan eviricilerin verimleri ise direkt olarak performansı etkiler. Bunun için sistem kullanılan tüm bileşenlerde iyileştirmeler ve yeni teknolojik geliştirmelere yer verilmektedir.

Fotovoltaik güneş enerjisi sistemi tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken ilk konulardan biri güneşten alabildiği ışınımdır. Şekil 3.4.'te ışınımın FV panellerin performansına etkisini görülmektedir.



Şekil 3.4 FV panellerin ışınımına bağlı akım, gerilim, güç değişim değerleri [27]

Bu yüzden global yatay ışınım değeri bu tür sistemlerin tasarımları için de öncelikli parametrelerdendir. Farklı kaynaklardan edinilecek ışınım verilerinin en doğrusu sahaya en yakın ölçüm istasyonundan elde edilen en uzun süreli ölçümü içeren verilerdir. 10 yıldan az süreli ölçümlere dayalı veri kaynakları kabul edilebilir değildir. Ancak her zaman ve her koşulda bu verilere erişim direkt olarak sağlanamayacağından farklı meteorolojik kaynaklardan elde edilebilecek veriler

girdiyi oluşturabilir. Örnek olarak PVSYST uygulamasının içerisinde ve bedelsiz olarak bulunabilecek Meteororm verileri mevcuttur. Bunun yanı sıra SolarGIS, 3TIER, HelioClim, PVGIS gibi kaynaklardan elde edilebilecek meteorolojik verilerin ortalamasıyla gerçeğe daha yakın veriler bulmak mümkündür. Çizelge 3.1 Mersin ili Mut ilçesi için farklı meteorolojik kaynaklardan alınan verileri göstermektedir. Çizelgedeki değerlerden de görüleceği gibi yaygın olarak kullanılan bu meteorolojik veriler içerisinde bile farklılıklar gözlemlenmektedir.

Çizelge 3.1 Mut/Mersin için aylık ve yıllık örnek ışınım verileri

	<b>Global Yatay Işınım Değerleri (kWh/m<sup>2</sup>)</b>				
	<b>MeteoNorm</b>	<b>SolarGIS</b>	<b>3TIER</b>	<b>Helio-Clim</b>	<b>PVGIS CMSAF</b>
<b>Ocak</b>	73	73	77	83	74
<b>Şubat</b>	87	92	91	100	92
<b>Mart</b>	138	145	147	159	163
<b>Nisan</b>	166	171	175	182	181
<b>Mayıs</b>	202	222	226	220	222
<b>Haziran</b>	216	242	251	241	250
<b>Temmuz</b>	218	251	258	250	258
<b>Ağustos</b>	220	226	230	225	235
<b>Eylül</b>	163	177	180	179	185
<b>Ekim</b>	124	131	136	137	139
<b>Kasım</b>	83	89	90	95	93
<b>Aralık</b>	68	68	72	79	72
<b>Yıllık Toplam</b>	1757	1887	1933	1951	1965

Enerji üretiminin bulunabilmesi için öncelikle eğimli yüzeye gelen güneş ışınımının bilinmesi gerekmektedir. Eğimli yüzeye gelen saatlik toplam güneş ışınım; eğimli yüzeye gelen direkt, difüz ve yansıyan ışınımın toplamıyla hesaplanır. Bu değerlerin hesaplanmasıyla ilgili Badescu, Tian, Perez, Hay,

Klucher ve Liu Jordan gibi transpozisyon modelleri mevcuttur. Çalışma kapsamında geliştirilen uygulamaya girdi sağlayan PVSYST yazılımı, içerisinde Hay ve Perez transpozisyon modellerini bulundurmaktadır. Dolayısıyla çalışma kapsamında Hay ve Perez modelleri ile transpozisyon faktörünün hesaplanmasından faydalanılmıştır. Hay modeli, difüz ışığa mükemmel olmasa bile başarılı sonuçlar verdiği için önemli bir modeldir. Perez modeli ise ölçülmüş iyi seviyede yatay ışınım verisine ihtiyaç duyan karmaşık bir modeldir ve genellikle Hay modelinden daha yüksek transpozisyon faktörü değerleri vermektedir. Daha tutarlı bir sonuca ulaşmak için iki modelden alınan verinin ortalamasıyla ilerlemek en doğru yöntemdir. Işınım dönüşümlerini, PVSYST kendi içerisinde gerçekleştirdiği için çalışma kapsamında bu modellerin hesaplamalarından ve denklemlerinden bahsedilmemiştir.

Bu tür modellerin geliştirilmesinin sebebi dünyaya gelen güneş ışınımı dağılımının homojen olmaması, zamana ve geliş açısına bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. Konuma bağlı kalmak kaydıyla, yıl içerisinde gündün güne değişen bir ışınımına göre tasarlanan sistemde sabit bir altyapı kurulacaksa burada belirlenen optimum açığa göre sistemi kurmak gerekmektedir. Bu yüzden de optimum açı belirleme yöntemleri geliştirilmiştir. Optimum eğim açısı eğrileri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [28];

$$\beta = \phi * 0,9 \quad (3.2)$$

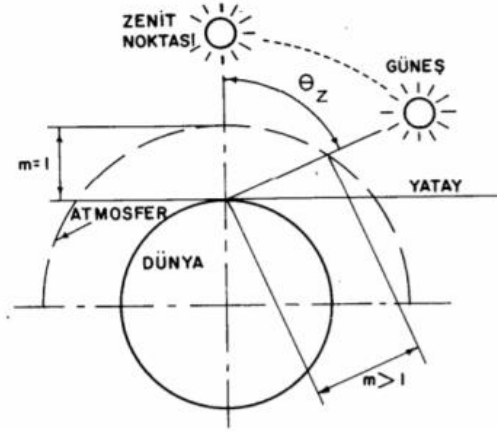
Kış mevsimi için;

$$\beta = \phi + 25^\circ \quad (3.3)$$

Yaz mevsimi için;

$$\beta = \phi - 25^\circ \quad (3.4)$$

Enleme ilave edilen sayısal değerlerin nedeni Zenit açısıdır. Zenit açısı yatay yüzeyin normali ile güneş ışınları arasında oluşan açıdır. Bu açı kışın büyümekte iken yazın ise küçülmektedir. Bu tanım Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



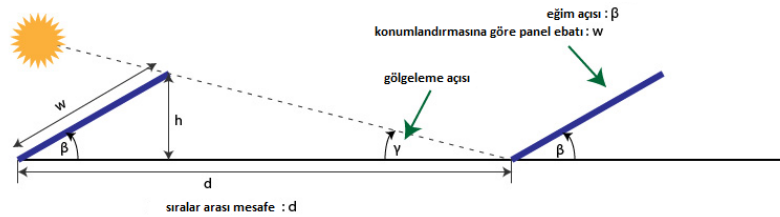
Şekil 3.5 Zenit açısı [18]

Türkiye'nin  $36^{\circ}$ - $42^{\circ}$  kuzey paralelleri arasında yer aldığı düşünülürse denklem 3.1'den faydalanarak Türkiye'de yıllık optimum verim için belirlenen eğim açısı değerleri Çizelge 3.2'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2 Türkiye için optimum eğim açıları

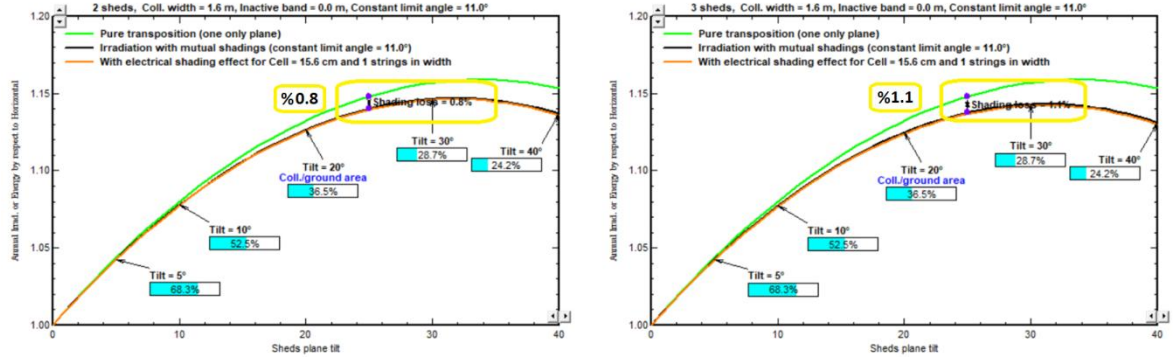
Türkiye'nin Uç Koordinatları	$36^{\circ}$ K	$42^{\circ}$ K
Optimum Eğim Açıları	32,4	37,8

Ancak tasarımın fiziksel kısıtları arasındaki alan ve yakın gölgeleme faktörlerinden dolayı, bu açıların her zaman optimum sonuçlar vermeyeceği unutulmamalıdır. Çünkü güneş enerjisi santrallerinde sınırsız alan olmamak kaydıyla eğim açısı arttıkça panelin arkasına düşüreceği gölge boyu da artmaktadır. Dolayısıyla, eğim açısı kaynaklı kayıplar olabileceğinden eğim açıları daha düşük seviyelere çekilebilmektedir. Bu yakın gölgeleme veya diğer bir ifadeyle sehpa gölgesinin etkisini farklı parametrelere bağlı kalmak kaydıyla en özet haliyle Şekil 3.6'de görmek mümkündür.



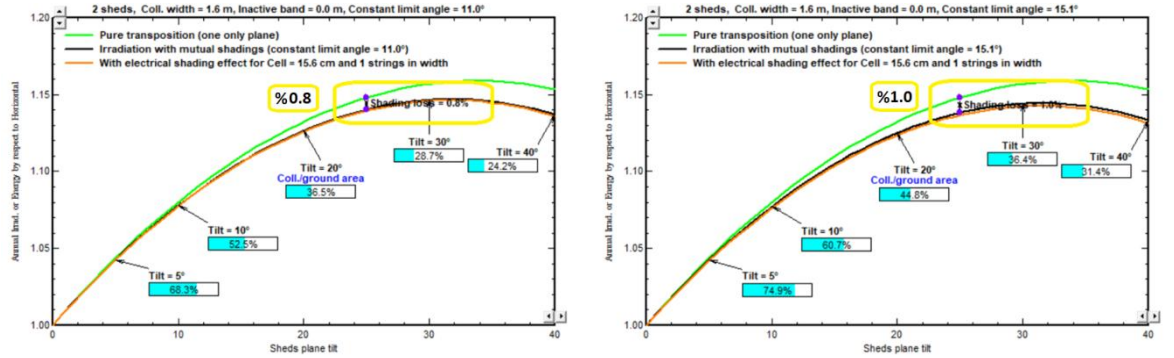
Şekil 3.6 Çoklu sehpa sistemlerinde gölgeleme etkisi

Yakın gölgeleme farklı etmenlere bağlıdır. Örneğin, aynı büyüklükteki sistem, birden fazla sehpayla kurulmaya çalışılırsa gölgeleme kaynaklı kaybin oranı sehpa sayısı arttıkça artar. Gölge artışının analizi PVSYST ile örnek bir senaryo için gerçekleştirilerek Şekil 3.7'deki gibi gözlemlenebilir.



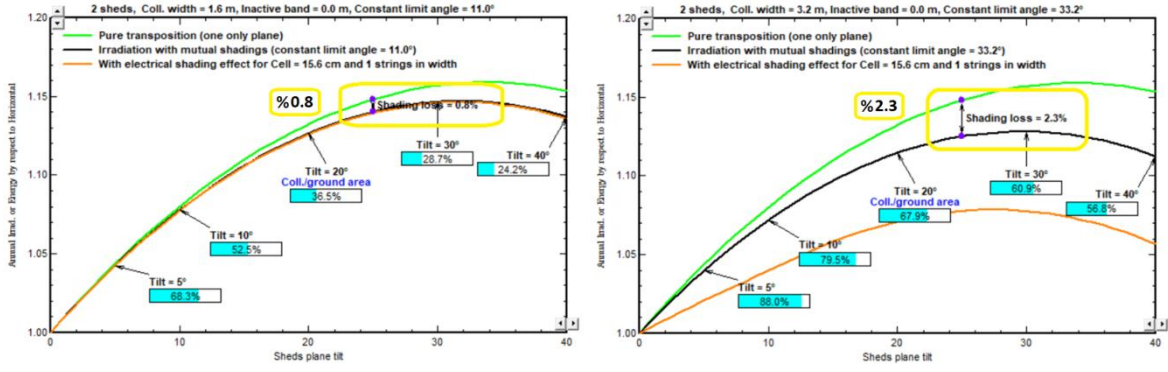
Şekil 3.7 Sehpa sayısının artmasının yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı)

Benzer şekilde sehpa arası mesafeler azaldıkça sehpa arası birbirleri üzerine düşürecekleri gölgeler artacağından, gölgelemeden kaynaklı üretim kayıpları artmaktadır. PVSYST'te gerçekleştirilen analiz sonucu sehpa mesafelerinin 5 metreden 4 metreye düşürülmesi durumunda ortaya çıkan gölgeleme artışı Şekil 3.8'deki gibi incelenebilmektedir.



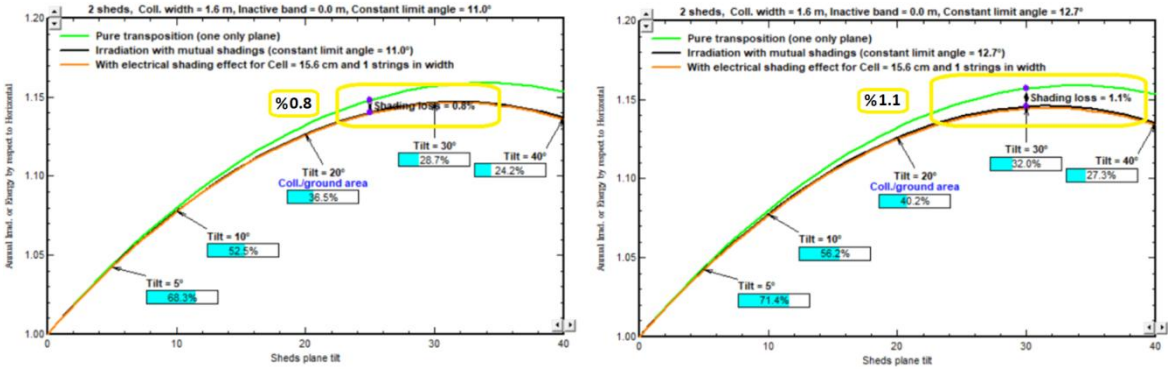
Şekil 3.8 Sehpa arası mesafenin azalışının yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı)

Sehpalarda kullanılan üst üste panel sayısı artarsa ya da paneller yatay yerine düşey monte edilirse benzer şekilde gölgelemenin etkisi artmaktadır. Bu durumun analizini Şekil 3.9'de görmek mümkündür. 1,6 m'den 3,2 metreye çıkan panel yüksekliği durumunda gölgeleme oranı neredeyse 3 katına ulaşmaktadır.



Şekil 3.9 Sehpa yüksekliğinin yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı)

Sehpadaki panellerin eğim açıları artarsa ön sıradaki panellerden arka sıradaki panellere düşen gölge miktarı artacağından yakın gölgelemeden kaynaklı kayıplarda artış gözlemlenecektir. Bu durum 3.10'daki gibi incelenebilir.

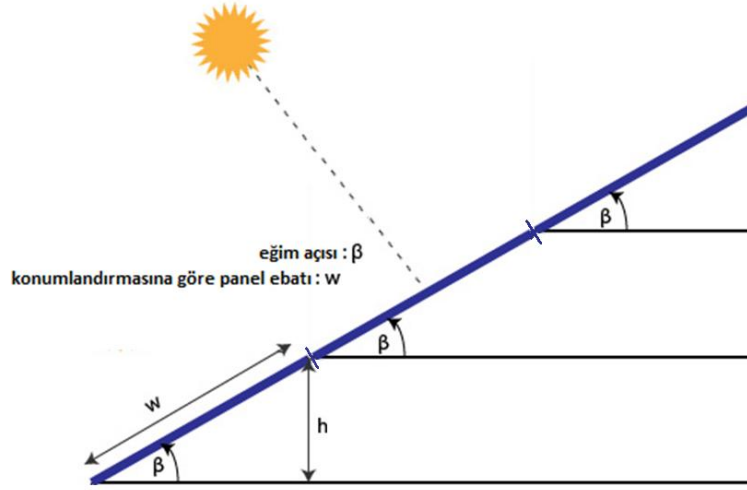


Şekil 3.10 Panel eğim açısının artışının yakın gölgelemeye etkisi (PVSYST çıktısı)

Yukarıdaki iki grafikten ilkinde açı 25° iken, ikinci grafikte bu açı 30°'ye yükseltilmiştir. Bu durumdaki kayıp artışını görmek mümkündür.

Diğer yandan doğal eğime sahip bir çatı mevcutsa, bu çatı ek eğim verilmeden, mevcut haliyle de kullanılabilir. Şekil 3.11'de görüldüğü üzere düz bir çatı üzerine kurulacak sistemlerde zeminin optimum açığa uyarlanarak tek sehpa biçiminde inşa edilmesi veya eğimli bir çatı üzerine kurulacak sistemlerde mevcut açıdan faydalanılması durumunda yakın gölge etkisi sıfırlanabilmektedir.





Şekil 3.11 Tekli sehpa sistemlerinde gölgeleme etkisi

Bu çalışma kapsamında benzer şekilde eğik çatıların mevcut açılarının kullanıldığı, düz çatıların ise aynı eğimde, üst üste ve tek sehpa şeklinde kurulduğu kabul edilerek gölgeleme parametreleri ihmal edilmiştir. Bu şekilde kurulumlar gerçekleştiğinde ise sisteme dahil edilecek yeni konstrüksiyon malzemeleri toplam sistemin kurulum maliyetini arttıracaktır. Bu tür yapılar ile yükseltilecek sistemlerde ortaya çıkacak sorun ise sistemlerin statik hesapları ile ilgilidir. Yükseltilecek panellerin arka yüzeylerinden maruz kalacakları şiddetli rüzgârlar panellerin statığı için tehlike oluşturabilmektedir. Burada sistemlerin arkasına yapılabilecek rüzgâr bariyerleri ve düz çatı çevresindeki beton yapıların yükseltilmesi ile bu sorun ortadan kaldırılabilecektir. Düz çatılarda, eş seviyede ve tek sehpa şeklinde belli bir eğimle kurulum gerçekleştirilmesinin örneği Şekil 3.12'deki gibi verilebilir.



Şekil 3.12 Aynı eğimde, üst üste ve tek sehpa olarak kurulmuş FV sistem örneği

Bir diğer alternatif çatı Őekli ise oval çatılardır. Bu çatılara kurulabilecek panellerin tamamının aynı açıda olmadığı kurulumlar mevcutken, düz çatıya benzer Şekilde konstrüksiyonla tüm panellerin aynı eğimde olması da sağlanabilir. Oval çatıya farklı açılarda yapılabilecek yerleŐimin rneği Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Oval çatıya uyarlanmış farklı eğimlerde panel yerleşimi

Oval çatılarda mevcut çatının Şekil 3.13'teki gibi değerlendirilmesi panellerin üretim değerlerinde farklılıklara sebep olacağından, toplam üretimi uyumsuzluk kayıpları sebebiyle düŐürecektir. Bu yüzden düz çatılardaki gibi oval çatılara da yapılabilecek ek konstrüksiyon sistemleri ile aynı eğimli, st üste ve tek sehpa dizilim gerçekleŐtirilebilir. Bunun rneği ise Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Oval çatıya uyarlanmış aynı eğimde, st üste ve tek sehpa FV sistem

Yukarıdaki detaylar ışığında yıllık ortalama global yatay ışınım değeri transpozisyon faktörü (TF) ile çarpılırsa sistem için belirlenen optimum açı için birim yüzey alanına düşen ışınım elde edilmiş olur.

$$I_{net} = I_{global\ yatay} * TF \quad (3.5)$$

Bunun için örnek değerlere aşağıdaki tablodan ulaşılabilir:

Çizelge 3.3 Transpozisyon faktörü ile çarpılan ışınım değeri hesabı

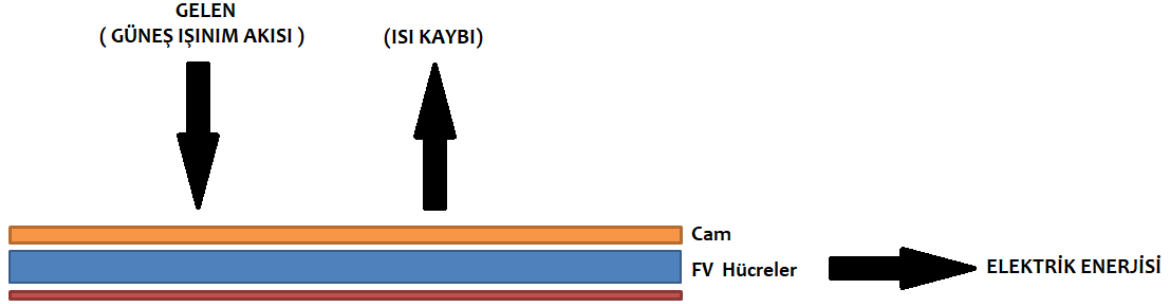
	Global Yatay Işınım (kWh/m <sup>2</sup> )	Hay	Perez	Ortalama	TF
<b>Ocak</b>	76,5	105,0	106,2	105,6	138%
<b>Şubat</b>	93,5	117,8	119,7	118,7	127%
<b>Mart</b>	151,1	173,9	176,7	175,3	116%
<b>Nisan</b>	175,3	186,2	189,0	187,6	107%
<b>Mayıs</b>	219,1	217,8	220,4	219,1	100%
<b>Haziran</b>	242,8	231,7	234,4	233,1	96%
<b>Temmuz</b>	248,7	242,3	245,1	243,7	98%
<b>Ağustos</b>	227,9	235,5	238,5	237,0	104%
<b>Eylül</b>	176,9	200,8	202,7	201,7	114%
<b>Ekim</b>	134,2	166,7	168,7	167,7	125%
<b>Kasım</b>	90,3	125,0	126,1	125,5	139%
<b>Aralık</b>	72,2	104,3	105,1	104,7	145%
<b>Yıllık Toplam</b>	1909,9	2107	2133	2120	111%

Yıllık bazda elde edilecek global yatay ışınım ve transpozisyon faktörü çarpımı sonucu elde edilen net ışınım değeri tüm hesaplarda dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, global ışınımın panel çıkışında dönüştüğü enerji üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Dolayısıyla geliştirilen uygulama panelin verimini göz önünde bulundurmaktadır. Ancak, diğer fotovoltaik sistem bileşenleri olan inverter kaybı, kablo kaybı vs. gibi etmenler ihmal etmektedir.

Geliştirilen simülasyon aracı için fotovoltaik sistem modellemesi için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$Q_{toplam} = E_{el} + Q_{kayıp} \quad (3.6)$$

Burada eşitliğin solundaki kısımda güneşten gelen toplam enerji, eşitliğin sağındaki fotovoltaik sistem ile elektriğe dönüştürülen ve dönüştürülemeyip kaybedilen enerjiye eşitlenmiştir. Bu eşitliği Şekil 3.15 ile göstermek mümkündür.



Şekil 3.15 FV sistem matematiksel modeli

FV sistemlerin verimi; elektriksel enerjiye dönüştürülen kısmın, toplam enerjiye oranıyla bulunur.

$$\eta_{el} = \frac{E_{el}}{Q_{toplam}} \quad (3.7)$$

Bu durumda elektriğe dönüştürülen enerjiyi aşağıdaki formülle ifade etmek mümkündür.

$$E_{el} = \eta_{el} * Q_{toplam} \quad (3.8)$$

Eşitliğin sağında yer alan ifadede güneşten gelen toplam enerji Denklem 3.9'daki gibi açıkça yazılabilir. Burada net ışınım ile enerji dönüşümünün yapılacağı yüzey alanının çarpımı hesaplanmaktadır.

$$Q_{toplam} = I_{net} * A_{FV} \quad (3.9)$$

Diğer terim ise fotovoltaik kısmın verimidir. Verimin açık halini daha önceden yapılan çalışmalara [29] bağlı kalarak aşağıdaki gibi yazmak mümkündür. Bu denklem ele alındığı zaman dikkati çeken en önemli nokta sıcaklıktır. Sıcaklık katsayısı, hücre sıcaklığı ve referans sıcaklık gibi değerler fotovoltaik sistem verimini direk etkileyen en önemli unsurlardır. FV panelin referans olarak alınan

verimi, standart test şartlarındaki sıcaklık katsayısı, hücre sıcaklığı ve referans sıcaklığa bağlı olarak Denklem 3.10'dan hesaplanmaktadır.

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} [1 - \beta_{el} * (T_{hücre} - T_{ref})] \quad (3.10)$$

Burada dikkati çeken husus ise hücre sıcaklığının tespitidir. Hücre sıcaklığı hesabı karmaşık bir hesabı içermekteyken Muzathik'in çalışmasının sonucu [30] olarak bu hesaplar daha basite indirgenmiş ve rüzgâr hızı, ışınım, ortam sıcaklığı ve bazı sabitlerin hesaba katılmasıyla hücre sıcaklığı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$T_{hücre} (°C) = 0.943 * T_{ortam} + 0.0195 * I_{net} - 1.528 * v + 0.35 \quad (3.11)$$

Dolayısıyla güneşten gelen toplam enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülen kısmının hesabına ait bilinmeyenlerinin bulunması sağlanmıştır.

Denklem 3.6'da da görüldüğü gibi güneşten gelen toplam enerjinin elektriğe dönüştürülen kısmının yanı sıra kaybedilen kısmı mevcuttur. Kayıp enerjinin hesabı için ise aşağıdaki denklem kullanılmıştır [31].

$$Q_{kayıp} = U_{L(FV)} * A_{FV} * (T_{hücre} - T_{ortam}) \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemler ile fotovoltaik sistem enerji çıktısı belirlenebilmekte olup, ait farklı senaryolar için hesaplar yapmak mümkündür. Bu senaryolardan ilki ihtiyaca yönelik kurulabilecek kapasitenin, ikincisi ise kısıtlı alanda üretilebilecek maksimum enerji miktarının belirlenmesidir.

### 3.1.1. Elektrik ihtiyacına yönelik kurulabilecek FV sistem getirisinin hesabı

Geliştirilen simülasyon aracı ile ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin tamamını güneşten karşılayabilmek için kurulması gereken FV sistem alanı hesaplanmıştır. Bu hesabı yapan simülasyon aracının ekran görüntüsü Şekil 3.16'da verilmiştir. Geliştirilen simülasyon aracı içerisinde yeşil ile renklendirilmiş alanlar hesaplanan değerleri göstermekte diğer alanlar ise kullanıcının veri girişine ihtiyaç duyulan alanları göstermektedir.

<b>Toplam Elektrik İhtiyacı:</b>	Değer Giriniz	kWh
<b>Ortam Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>	Değer Giriniz	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Rüzgar Hızı:</b>	Değer Giriniz	m/s
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>		°C
<b>Referans Sıcaklık:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Modül Sıcaklık Katsayısı:</b>	Değer Giriniz	%/°C
<b>Modül Referans Verim:</b>	Değer Giriniz	%
<b>Fotovoltaik Panel Verimi:</b>		%
<b>İhtiyacı Karşılacak Fotovoltaik Panel Alanı:</b>		m <sup>2</sup>

Şekil 3.16 İhtiyaca bağlı fotovoltaik sistem alan hesabı

Yukarıda verilen simülasyon aracının ekran görüntüsünde toplam elektrik ihtiyacı bilinen bir tüketicinin ihtiyacı olan toplam fotovoltaik panel alanını bulmak mümkündür. Bu hesabı yapılırken panelin verilen ortam sıcaklığındaki verimi dikkate alınmıştır.

### 3.1.2. Kısıtlı alanda kurulabilecek FV sistemin getirisinin hesabı

Simülasyon aracı sayesinde kısıtlı alanın tamamında kurulabilen fotovoltaik panel alanından elde edilen elektrik enerjisi hesaplanmıştır. Bu hesap yapılırken Denklem 3.7 ile Denklem 3.12 arasındaki eşitlikler kullanılmıştır. Kısıtlı alanda toplam karşılanacak elektrik ihtiyacının hesabının simülasyon aracındaki ekran görüntüsünü Şekil 3.17’de verilmiştir.

<b>Kullanılabilir Alan:</b>	Değer Giriniz	m <sup>2</sup>
<b>Ortam Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>	Değer Giriniz	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Rüzgar Hızı:</b>	Değer Giriniz	m/s
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>		°C
<b>Referans Sıcaklık:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Modül Sıcaklık Katsayısı:</b>	Değer Giriniz	%/°C
<b>Modül Referans Verim:</b>	Değer Giriniz	%
<b>Fotovoltaik Panel Verimi:</b>		%
<b>Toplam Karşılacak Elektrik İhtiyacı:</b>		kWh
<b>Toplam Elektrik İhtiyacı Karşılacak Aile Sayısı:</b>		
<b>Karşılacak Elektriğin Şebekeden Alınması Durumunda Değeri:</b>		TL

Şekil 3.17 Kısıtlı alan için toplam karşılanacak elektrik ihtiyacının hesabı



Simülasyon aracının bu hesabına ek olarak bu elektriğin şebekeden karşılanması durumundaki ekonomik değeri ve ihtiyacı karşılanan aile sayısı da hesaplanmıştır. Sağlanan enerjinin şebekeden alınması durumunda 1 Nisan 2018 itibariyle geçerli olan birim elektrik fiyatı kullanılmıştır. İhtiyacı karşılanan aile sayısının hesabında ise Türkiye'de iki çocuklu dört kişilik bir ailenin yıllık ortalama elektrik tüketimi kullanılmıştır.

### 3.2. Isıl Sistemler

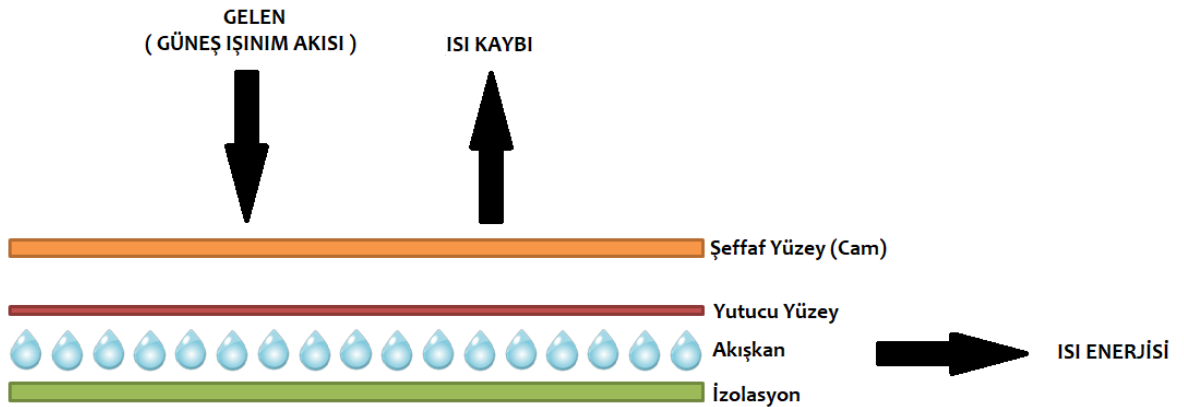
Güneş enerjisinden faydalanılan bir diğer sistem ise ısı sistemleridir. Burada da benzer şekilde PVSYST çıktısı olan net ışınım simülasyon aracına girdi olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden elde edilen toplam enerji faydalı ve kayıp enerji olarak ayrılabilir. Bu eşitlik Denklem 3.13'de verilmiştir.

$$Q_{toplam} = Q_{faydalı} + Q_{kayıp} \quad (3.13)$$

dolayısıyla;

$$Q_{faydalı} = Q_{toplam} - Q_{kayıp} \quad (3.14)$$

Faydalı enerji, güneşten gelen toplam enerjiden kaybın çıkarılması ile bulunmuştur. Isıl sistemlerin matematiksel modeli Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Isıl sistemlerin matematiksel modeli

Güneşten gelen toplam enerjinin hesabı ise Denklem 3.15 ile elde edilmiştir.

$$Q_{toplam} = I_{net} * A_{kolektör} \quad (3.15)$$

Kolektör yüzeyindeki toplam enerji gelen net ışınım ile kolektör alanının çarpımıyla elde edilmiştir. Faydalı enerji ise güneşten gelen enerjinin kolektör verimi ile çarpılmasıyla bulunmaktadır. Toplam enerjinin faydalı enerjiye dönüştürülemeyen kısmı ise kayıp enerji olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda kolektör verimini Denklem 3.16'daki gibi hesaplanmıştır.

$$\eta_{kolektör} = \frac{Q_{faydalı}}{Q_{toplam}} \quad (3.16)$$

Fotovoltaik sistemlerdeki panel verimi hesabındaki gibi sıcaktan veya ışıınımdan etkilenen bir kolektör verimi hesabı yapılmamıştır, dolayısıyla çalışma kapsamındaki termal sistem hesaplarına sabit bir değer olarak dahil edilmiştir.

Geliştirilen simülasyon aracı sayesinde, ihtiyaç duyulan ısı enerjisi hesaplamak ve kısıtlı alana kurulacak kolektörlerden elde edilecek enerjiyi hesaplamak mümkündür.

### 3.2.1. Isıl ihtiyaca yönelik kurulabilecek ısı sistemin getirisinin hesabı

İhtiyaç duyulan ısı enerjisi miktarının tespitinde aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$Q_{ihtiyaç} = m * c * (T_{giriş} - T_{çıkış}) \quad (3.17)$$

Bu denklemde; "Q" yıllık ısı ihtiyacını, "m" yıllık ısıtılması gereken su miktarını, "c" suyun özgül ısısını,  $T_{giriş}$  ve  $T_{çıkış}$  ise kolektöre giren ve çıkan su sıcaklıklarını ifade etmektedir.

İhtiyaç duyulan ısı enerjisi kolektörden elde edilen faydalı enerji ile karşılanmaktadır.

$$Q_{ihtiyaç} = Q_{faydalı} \quad (3.18)$$

Simülasyon aracında bu hesaplamaların yapılması sonrasında aşağıdaki çıktı ekranı elde edilmiştir.



<b>Yıllık Toplam Sıcak Su İhtiyacı:</b>	Değer Giriniz	litre (kg)
<b>Talep Edilen Su Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Giriş Suyu Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Yıllık Işınım:</b>	Değer Giriniz	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Toplam Enerji İhtiyacı:</b>		kJ
<b>Toplam Enerji İhtiyacı:</b>		kWh
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>		kJ/m <sup>2</sup>
<b>Faydalı Enerji:</b>		kJ/m <sup>2</sup>
<b>Kurulması Gereken Solar Kolektör Alanı:</b>		m <sup>2</sup>
<b>Bu Enerjiyi Sağlayacak Toplam Doğalgaz Miktarı:</b>		m <sup>3</sup>
<b>Toplam Doğalgaz Bedeli:</b>		TL

Şekil 3.19 İhtiyaç duyulan termal kolektör alan hesabı ekran görüntüsü

Burada yıllık toplam sıcak su ihtiyacı tespit edilmiş bir tüketici için, talep edilen su sıcaklığı ve şebekeden alınacak giriş suyunun sıcaklığı verileri ile toplam enerji ihtiyacı hesaplanmıştır. Daha sonra bu ihtiyaç duyulan enerjiyi karşılayabilecek termal kolektörlerin kurulduğu bölgenin ışınımı hesaplara dâhil edilmiştir. Kolektör yüzeyine gelen toplam ışınımın bir kısmından faydalanılan termal sistem verimi hesaplara dâhil edilmiş ve birim yüzey alanında elde edilen faydalı enerji hesaplanmıştır. Toplam enerji ihtiyacının birim alandaki faydalı enerjiye bölünmesiyle gerekli kolektör alanı belirlenmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen simülasyon aracı ile sonraki ekonomik analizler de yapılmaktadır. Termal sistemlerin ekonomik analizlerinde, güneşten elde edilen faydalı enerji miktarı arttırılarak geri ödeme süresinin kısaltılması önemlidir. Termal kolektörden elde edilen enerjinin yerine doğalgaz enerjisi kullanımında, bu yakıt için bir bedel ödenmektedir. Aynı miktar sıcak suyun doğalgazlı sistemden sağlanması için gerekli doğalgaz miktarına ait ısı değeri hesaplandıktan sonra doğalgazın birim fiyatından toplam yakıt gideri elde edilmiştir. Dolayısıyla aynı miktardaki suyu ısıtmak için doğalgaz kullanılması yerine termal kolektör kullanılması durumundaki kazanç simülasyon aracı ile hesaplanmıştır.

### 3.2.2. Kısıtlı alanda kurulabilecek ısı sistemlerinin getirisinin hesabı

Çalışma kapsamında, termal sistemler ile ilgili yapılan analiz farklı boyutta da incelenmiştir. Bu durumda mevcut alanın tamamına kurulan bir uygulamanın sonucunda elde edilen toplam sıcak su miktarı belirlenmiştir. Aynı parametreler

kullanılarak yapılan bu çalışma, sınırlı çatı alanında fazla tüketimin olduğu durumlardaki tasarımlar için kullanılmaktadır. Bu analiz sonucunda simülasyon aracında elde edilen ekran görüntüsü Şekil 3.20’de verilmiştir.

<b>Kurulabilecek Alan:</b>	Değer Giriniz	m <sup>2</sup>
<b>Talep Edilen Su Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Giriş Suyu Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Yıllık Işınım:</b>	Değer Giriniz	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Güneşten Gelen Toplam Enerji:</b>		kWh
<b>Solar Kollektörün Kullandığı Verimli Enerji:</b>		kWh
<b>Solar Kollektörün Kullandığı Verimli Enerji:</b>		kJ
<b>Yıllık Sağlanabilecek Sıcak Su Miktarı:</b>		litre (kg)
<b>Bu Enerjiyi Sağlayacak Toplam Doğalgaz Miktarı:</b>		m <sup>3</sup>
<b>Toplam Doğalgaz Bedeli:</b>		TL
<b>Sıcak Suyu Karşılacak Toplam Aile Sayısı:</b>		

Şekil 3.20 Mevcut alanın tamamına kurulacak termal kolektörün getirisi

Bu analizde çıktıların değerlendirilmesi yapılırken incelenen sonuçlardan biri de kaç ailenin sıcak su ihtiyacının karşılandığıdır. Bu analiz için ilk olarak 4 kişilik bir ailenin yıllık sıcak su tüketimi hesaplanmıştır. Bu durumda toplam karşılanacak sıcak su ihtiyacı bu değere bölünerek toplam aile sayısı tespit edilmiştir.

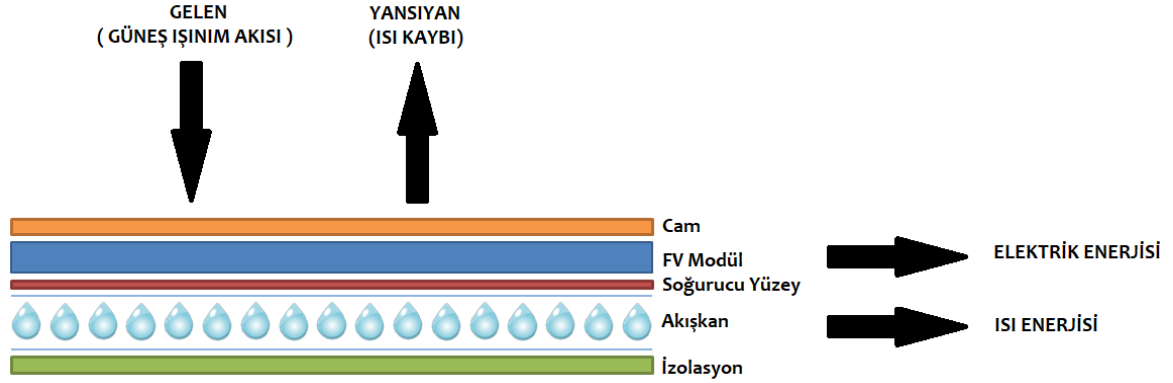
Bu analiz için toplam kurulum alanı, giriş ve çıkış suyu sıcaklığı ile yıllık net ışınım bilgisi girdi olarak kullanılmaktadır. Faydalı enerji hesaplandıktan sonra bu değer ihtiyaç duyulan enerjiye eşitlenerek toplam sıcak su miktarı hesaplanmıştır. Sonrasında da bu miktardaki suyun kaç ailenin ihtiyacını giderdiği ve bu miktardaki enerjinin doğalgaz enerjisi ile karşılanması durumundaki kazanç belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon aracında yapılan hesaplamalarda kolektör sistemini oluşturan tesisata bağlı kayıplar dikkate alınmamıştır. Ürünlerin değişkenliği kayıplarda farklılıklara sebep olacağından yapılan çalışmaların sonuçlarını etkilemektedir; dolayısıyla bu değerler hesaplara dahil edilmemiştir.

### 3.3. FV/T Sistemler

FV/T sistemler güneş enerjisinin eş zamanlı olarak elektrik ve ısı enerjisi eldesinde kullanıldığı bütünleşik melez yapılardır. FV/T güneş pillerinin elektrik enerjisi üretimi esnasında artan hücre sıcaklığı sıvı/hava dolaşımı ile soğutulmaktadır.

düşürülmektedir. Bu çalışma kapsamında sıcak su ihtiyacının karşılanması için su dolaşımı sistem çalışmaları dâhil edilmiştir ve kullanılan standart özelliklere sahip bir FV/T sistemin matematiksel modeli Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

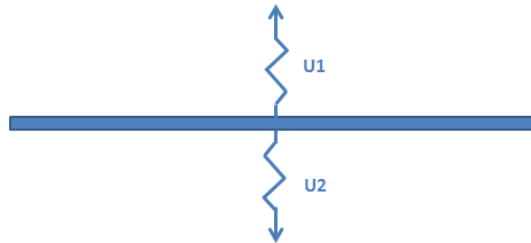


Şekil 3.21 FV/T sistem matematiksel modeli

Yukarıdaki matematiksel model ele alınarak enerji dengesi Denklem 3.19’da ifade edilmiştir.

$$Q_{toplam} = Q_{termal} + E_{el} + Q_{kayıp} \quad (3.19)$$

Burada; eşitliğin solundaki terim sisteme gelen toplam enerjiyi, sağdaki terimler ise sırasıyla FV/T modülde iş akışkanına aktarılan termal enerji, FV/T modülde üretilen elektrik enerjisi ve FV/T modülden çevresine olan ısı kaybıdır. FV/T sistemlerde kaybın dışında kalan enerji termal enerji ve elektriksel enerjiye dönüştürülür. Kaybın hesabının yapılabilmesi için toplam ısı transfer katsayısının bulunması gerekmektedir. Isı transfer katsayısı hesabının yapılabilmesi için öncelikle fotovoltaik sistemlerdeki ısı kaybı incelenmiştir. Bu yapı Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22 FV sistem ısı kayıpları

Fotovoltaik panellerin farklı yüzeylerinden ısı kayıpları gerçekleşmektedir. Isı kayıplarının büyük kısmı yüzey alanının büyüklüğünden kaynaklı alt ve üst yüzeydedir. Dolayısıyla yan yüzeylerde gerçekleşen ısı kayıpları bu çalışmada ihmal edilmiştir. Şekil 3.15'te verildiği gibi hem alt hem üst yüzeyden gerçekleşen ısı kayıpları bu çalışma için eşit olarak alınmış ve alt ile üst yüzey ısı transfer katsayısının toplamı ile toplam ısı transfer katsayısı belirlenmiştir. Bu ifade Denklem 3.20'de verilmiştir.

$$U_{L(FV)} = U_1 + U_2 \quad (3.20)$$

Alt ve üst ısı kayıpları eşit kabul edildiğinden, bu yüzeylere ait ısı transfer katsayıları da eşit olarak alınmıştır.

$$U_1 = U_2 \quad (3.21)$$

Dolayısıyla toplam ısı transfer katsayısı üst veya alt yüzeyin iki katı olarak hesaplanmıştır.

$$U_{L(FV)} = U_1 + U_2 = 2 * U_1 \quad (3.22)$$

FV/T sistemlerde ise alt yüzeye yerleştirilen termal kolektör sayesinde alt yüzeydeki ısı transferi akışkana aktarılmış, dolayısıyla ısı kaybının sadece üst yüzeyden gerçekleştiği kabul edilmiştir. Alt yüzeydeki ısı akışkanına aktarılan ısının artırılması üst yüzeydeki ısı kayıplarını azaltmasına karşın, bu çalışmada FV/T sistem üst yüzey ısı kayıplarının benzer boyuttaki FV sistemle aynı olduğu kabul edilip, FV panellerden alınan toplam ısı transfer katsayısı değerinin yarısı hesaplanarak eşitliğe dâhil edilmiştir.

$$U_{L(FV/T)} = \frac{U_{L(FV)}}{2} = U_1 \quad (3.23)$$

Belirlenen yeni FV/T ısı transfer katsayısı, Denklem 3.12'de yerine koyularak FV/T sistemler için kayıp enerji denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Q_{kayıp} = U_{L(FV/T)} * A_{FV/T} * (T_{hücre} - T_{ortam}) \quad (3.24)$$

FV/T sistemler için hesaplanması gereken ısı transfer katsayısının simülasyon aracındaki ekran görüntüsü ise Şekil 3.23'te verilmiştir.

<b>Ortam Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>	Değer Giriniz	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Rüzgar Hızı:</b>	Değer Giriniz	m/s
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>		°C
<b>Referans Sıcaklık:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Modül Sıcaklık Katsayısı:</b>	Değer Giriniz	%/°C
<b>Modül Referans Verim:</b>	Değer Giriniz	%
<b>Fotovoltaik Panel Verimi:</b>		%
<b>Elektrik Enerjisi:</b>		kWh
<b>Yüzey Alanı:</b>	Değer Giriniz	m <sup>2</sup>
<b>Güneşten Gelen Toplam Enerji:</b>		kWh
<b>Kayıp Enerji:</b>		kWh
<b>Isı Transfer Katsayısı:</b>		W/m <sup>2</sup> - K
<b>Yeni Isı Transfer Katsayısı (FV/T):</b>		W/m <sup>2</sup> - K

Şekil 3.23 FV/T kolektör ısı transfer katsayısı hesabı ekran görüntüsü

Şekil 3.15'te de görüldüğü gibi FV/T sistemin ısı transfer katsayısı hesaplanırken öncelikle FV kısma ait veriler doğrultusunda ısı transfer katsayısı hesaplanmaktadır. Denklem 3.22'den faydalanılarak hesaplanan FV sistem ısı transfer katsayısının yarısı alınarak FV/T sistem için yeni ısı transfer katsayısı belirlenmiştir.

Bu durumda, FV/T sistemlerdeki enerji dengesini gösteren Denklem 3.18'deki tüm bilinmeyenlerin hesabı sağlanmıştır. Son durumda FV/T sistemler için belirlenen eşitlik Denklem 3.25'te gösterilmiştir.

$$Q_{toplam} = (m * c * (T_{giriş} - T_{çıkış})) + (\eta_{el} * Q_{toplam}) + (U_{L(FV/T)} * A_{FV/T} * (T_{hücre} - T_{ortam})) \quad (3.25)$$

FV/T ile ilgili simülasyon çalışmalarında ısı enerjisinin hesabı için elektrik enerjisi değeri sabit alınmış ya da elektrik enerjisinin hesabı için ısı enerjisi sabit tutulmuştur. Bu iki duruma ait hesaplar ayrı ayrı incelenmiştir.

### 3.3.1. Isıl sistemin getirisinin sabit tutulduğu durum

Bu çalışma kapsamında ilk aşamada FV/T sistemdeki ısı enerjisi sabit tutulmuştur. Hesaplama metodolojisi aşağıda verilmiştir.

- İstenen ısı enerjisi miktarı sabit tutulduğundan toplam enerjiden talep edilen ısı enerjisi miktarı çıkarılarak elektriksel enerji ve kayıp enerji toplamı tespit edilmiştir.
- Isı kaybı denklemindeki ısı transfer katsayısı bilinmeyen Denklemin 3.23 kullanılarak hesaplanmıştır.
- Bu durumda, hem kayıp enerji hem de fotovoltaik sistem hesabında tek bilinmeyen kalan FV/T sistemdeki yeni hücre sıcaklığı hesabına ihtiyaç vardır. Denklem 3.25'ten faydalanarak hem elektrik enerjisi hesabında hem kayıp enerji hesabında bilinmeyen olan hücre sıcaklığı hesaplanmıştır.
- Yeni durumdaki hücre sıcaklığı hesabıyla FV/T sistemin elektriksel getirisi hesabı yapılmıştır.

<b>Toplam Isıl Enerji İhtiyacı:</b>		<b>kJ</b>
<b>Toplam Isıl Enerji İhtiyacı:</b>		<b>kWh</b>
<b>FV + Kayıp Enerji:</b>		<b>kWh</b>
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>		<b>°C</b>
<b>Elektrik Enerjisi:</b>		<b>kWh</b>
<b>Kayıp Enerji:</b>		<b>kWh</b>

Şekil 3.24 Yeni hücre sıcaklığı hesabı ve elektriksel getirisinin değişimi

### 3.3.2. FV sistemin getirisinin sabit tutulduğu durum

Çalışma kapsamındaki bir diğer analizde ise fotovoltaik sistemin getirisinin sabit tutulmuştur. Hesaplama metodolojisi aşağıda verilmiştir.

- Isı kaybı denklemindeki toplam ısı transfer katsayısı bilinmeyen Denklemin 3.23 kullanılarak hesaplanmıştır.

- Fotovoltaik sistemin getirisi sabit tutulduğundan bu aşamada hücre sıcaklığının aynı seviyede kaldığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla hücre sıcaklığı bilindiğinden Denklem 3.25 kullanılarak kayıp enerji hesaplanmıştır.
- Toplam enerjiden kayıp enerji ve elektrik enerjisi düşülerek ısı enerjisinin değeri hesaplanmıştır. Bu hesabın simülasyon aracındaki ekran görüntüsü Şekil 3.25'te verilmiştir.

<b>Toplam Elektrik İhtiyacı:</b>	Değer Giriniz	kWh
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Ortam Sıcaklığı:</b>	Değer Giriniz	°C
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>	Değer Giriniz	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Yüzey Alanı:</b>	Değer Giriniz	m <sup>2</sup>
<b>Güneşten Gelen Toplam Enerji:</b>		kWh
<b>Kayıp:</b>		kWh
<b>Termal:</b>		kWh

Şekil 3.25 Yeni hücre sıcaklığı hesabı ve ısıl getirinin değişimi

Fotovoltaik ve termal sistemlerde olduğu gibi enerji miktarları hesaplandıktan sonra bunların ekonomik analizleri ve ihtiyacı karşılanabilecek aile sayıları benzer hesaplarla yapılabilmektedir.

### 3.4. Ekonomik Analizler

Çalışma kapsamında simülasyonlara ve teknik analizlerin yanı sıra ekonomik analizlere de yer verilmiş olup, ekonomik analizleri kolaylaştıracak bazı kabuller ve kısıtlar kullanılmıştır. Bu kapsamda; Türkiye'de iki çocuklu dört kişilik bir ailenin yıllık ortalama elektrik tüketimi 3036 kWh [32] olarak bulunmuş ve bu elektrik tüketiminin 1 Nisan 2018 tarihinden itibaren geçerli olan tarifeye birlikte bedeli, birim kWh saat için, fonlar ve vergiler dahil 0,4612 TL olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla dört kişilik standart bir ailenin yıllık elektriğe ödediği tutar 1.400,20 TL olarak hesaplanmıştır [33]. Bu hesap benzer şekilde üretilen elektriğin çatı FV sistemden karşılanmasıyla da değerlendirilebilir. Tüketimde elektriğe ödenecek tutar yerine çatıda kurulacak fotovoltaik sistemden elde edilen elektriğin bu birim fiyatla çarpılması, fotovoltaik sistemden elde edilecek kazancı göstermektedir.

Güneş enerjisinden elde edilen bir diğer çıktı olan sıcak su içinde benzer bir hesaplama yapılmıştır. İstenilen sıcak su miktarına ve sıcaklığına göre ihtiyaç duyulan enerjinin doğalgazlı sistemle sağlanması için ödenen tutar yerine, kurulmuş bir kolektörün sağlayacağı sıcak suyun kullanılması kazancın göstergesidir. Kişi başı günlük su tüketimi 217 litre olarak belirlenmiştir [34]. Bu durumda kişi başı yıllık su tüketimi 79.205 litre, dört kişilik bir ailenin yıllık su tüketimi ise 316.820 litre olarak hesaplanmaktadır. Harcanan suyun yaklaşık yarısının sıcak su olduğu varsayımıyla yola çıkılırsa dört kişilik bir ailenin yıllık sıcak su tüketimi 158.410 litre olarak hesaplanmıştır. Toplam harcanan doğal gazın tespiti için ise 1 m<sup>3</sup> doğalgazın yakılması ile sağlanan enerjinin de bilinmesi gerekir. Bu değer 10,64 kWh olup [35]. 1 m<sup>3</sup> doğalgazın bedelinin ise 1,22 TL olduğu bulunarak harcanan doğalgazın maliyeti hesaplanmıştır [35].

Ekonomik analizler ele alınırken, dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de yatırım maliyetidir. Bu tür sistemlerin kurulumu için harcanan tutar ve elde edilecek getiriler ile hesaplanacak geri ödeme süresi bu analizlerde olduğu göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardır. Burada dikkat edilmesi gereken konulardan biri de sistem için sadece panel veya kolektör değil aynı zamanda ek sistem bileşenlerinin de dahil edilmesi gerektiğidir. Bu durumda 1 kW<sub>p</sub>'lik bir fotovoltaik sistemin yaklaşık birim maliyeti 4,6 TL (1 \$ cent)'dir [36]. Burada çalışmanın yapıldığı dönem için dolar kuru 4,6 TL/\$ olarak alınmış olup, burada kullanılan panelin maliyeti ise 0,40 cent \$/Watt olarak dikkate alınmıştır. Bu tutar yaklaşık 1,84 TL'dir. 2018 yılı ortalarında 60 hücreli standart bir polikristal panelin gücü 275 Watt olarak ele alınırsa 1,6 m<sup>2</sup>'lik panelin fiyatı yaklaşık 506 TL olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde 2,1 m<sup>2</sup> büyüklüğünde bir solar kolektör ve bileşenleri için bu tutar 3.400 TL'dir [37]. Bu tutarda yalnız kolektörün fiyatı ise yaklaşık 1.000 TL'dir. Bir diğer karşılaştırma ürünü olan FV/T panelin 1,6 m<sup>2</sup>'lik 275 Watt gücündeki tipi ise 1.855 TL'dir.



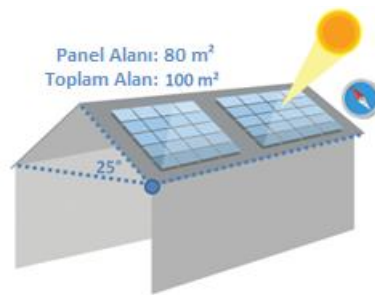
## 4. ÖRNEK UYGULAMA

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon aracının kabiliyetlerini irdeleyebilmek için örnek bir uygulamaya yer verilmiştir. Bu sayede ayırık ve bütünleşik melez sistemlerin farklı kombinasyonlarının sonuçlarının kıyaslanması, optimum sistem tasarımlarının belirlenmesi, sıcaklık ve ışınım parametrelerinin sistem verimine etkilerinin incelenmesi ve seçilen sistemin Türkiye'nin farklı bölgelerinde uygulanabilirliği konusunda analizler yapılabilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla ilk aşamada örnek uygulama için tasarlanan sistem tanımlanmış, sonrasında da senaryolar belirlenerek sonuçlar incelenmiştir.

### 4.1. Örnek Uygulama Tanımı

Düz çatılarda sistem dizaynı için sehpa arası mesafe, yan duvarlar, gölge açısı, çatıdaki diğer objelerin gölgesi vs. gibi durumlar termal ve fotovoltaik sistemler için ayrı etki göstereceğinden, bu çalışma kapsamında kullanılan örnek uygulama için doğal eğimli üçgen yapıda bir çatı tercih edilmiştir. Bu durumda sehparın yapacağı gölge, çatıdaki diğer gölgelemeler, diziler arası mesafeler vs. gibi durumların ihmal edilmesi sağlanmıştır. Bu durumda çatının doğal eğimi veya yapılacak basit konstrüksiyonlarla istenen açılarının verilmesi sağlanabilecektir.

Örnek uygulamada  $25^\circ$  eğim açısına sahip çatının güneye bakan  $100 \text{ m}^2$ 'lik kısmı ele alınmıştır. Bu çatının simüle edilmesi durumunda kedi yolu diye anılan ara yolların, kenarların ve diğer gölgeleme unsurlarından (baca vs.) kaynaklı yer kaybı %20 olarak belirlenmiş,  $80 \text{ m}^2$ 'lik bir çatıya kurulum yapılacağı kabul edilmiştir. Örnek uygulama çatı yerleşimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Fotovoltaik ve termal melez sistem çatı yerleşimi

Simülasyon sırasında metrekare bazında hesaplamalar yapılacağı için kısa kenar ve uzun kenar çatı ebatları göz ardı ve uygulama için belirlenen sistem tasarım parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Örnek uygulama sistem tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Çatı Alanı	100 m <sup>2</sup>
Modül Referans Verimi	%15,6 (Polikristal) (STK)
Kullanılabilir Alan	80 m <sup>2</sup>
Çatı Eğim Açısı	25°
Rüzgar Hızı	3 m/s
Çevre Sıcaklığı	25°C
Modül Sıcaklık Katsayısı	0,32%
Global Yatay Işınım	1.650 kWh/m <sup>2</sup>
TF (PVSYST Çıktısı)	%111
Panel Üzerindeki Işınım	1.831,5 kWh/m <sup>2</sup>
Talep Edilen Su Sıcaklığı	65°C
Isıtılacak Suyun İlk Sıcaklığı	15°C
Kolektör Verimi	%73,7

## 4.2. Örnek Uygulama Senaryoları

Yukarıdaki tanımlar doğrultusunda seçilen uygulama için 2 farklı senaryo belirlenmiş ve aşağıda sunulan bu senaryoların tekno-ekonomik analizleri, bu çalışmada geliştirilen simülasyon aracı ile yapılmıştır.

- Senaryo 1: Kısıtlı alanda kurulabilecek ayırık melez sistem ve bütünleşik melez sistemlerin simülasyonları sayesinde sıcak su ve elektriğin ayrı veya birlikte eldesi incelenmiştir. Sonuçlarla birlikte ihtiyacı karşılanabilecek aile sayısı, ekonomik getirinin değerlendirilmesi ve maksimum seviyeye çıkarılması analiz edilmiştir.
- Senaryo 2: Sıcak su ve elektrik ihtiyacı belli olan tüketiciler için belirli bir alanda kurulabilecek ayırık ve bütünleşik melez termal ve fotovoltaik

sistemlerin optimum oranlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu farklı sistem kombinasyonları için yatırım maliyetleri ve geri dönüş süreleri incelenerek ekonomik analizlerine yer verilmiştir.

Bu bölümde ek olarak, fotovoltaik sistemler için etkin parametreler olarak belirlenen, lokasyona bağlı değişkenlik gösteren çevre sıcaklığı ve ışınımın, yukarıda tanımlanan senaryolardaki sistemlere etkisinin değerlendirilmesi ve bu tür sistemlerin Türkiye’de bölgesel bazda en uygun uygulanabilirliği de analiz edilmiştir.

#### 4.2.1. Kısıtlı alanda ayırık ve bütünleşik melez sistemlerin simülasyonu

İlk olarak ele alınan durum tüm çatının fotovoltaik sistemle donatılmasıdır. Tüm çatı FV sistemle donatıldığında çıktı ekran görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.

<b>Kullanılabilir Alan:</b>	80	m <sup>2</sup>
<b>Ortam Sıcaklığı:</b>	25	°C
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>	1.831,5	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Rüzgar Hızı:</b>	3,0	m/s
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>	55,1	°C
<b>Referans Sıcaklık:</b>	25,0	°C
<b>Modül Sıcaklık Katsayısı:</b>	0,32	%/°C
<b>Modül Referans Verim:</b>	15,6	%
<b>Fotovoltaik Panel Verimi:</b>	14,1	%
<b>Toplam Karşılancak Elektrik İhtiyacı:</b>	20.658,6	kWh
<b>Toplam Elektrik İhtiyacı Karşılancak Aile Sayısı:</b>	6,8	
<b>Karşılancak Elektriğin Şebekeden Alınması Durumunda Değeri:</b>	9.527,7	TL

Şekil 4.2 Tüm çatının FV panel ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı

Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi simülasyon modelinde verilen tasarım parametrelerine göre çatının tamamına uygulanacak fotovoltaik sistem sayesinde 6,8 ailenin elektrik ihtiyacı karşılanmıştır. Ancak bu tür sistemlerde tam sayıda bir ailenin ihtiyacı karşılanmadığı zaman bu tutar en yakın tam sayıya indirgenir bu durumda bu sistemin 6 ailenin elektriğini tam olarak karşıladığını söylemek mümkündür. Bu elektriğin piyasadan sağlanması durumundaki karşılığı ise 9.528

TL'dir. Benzer şekilde tüm çatının düz güneş kolektörleri ile kaplanması durumundaki çıktı ekran görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir.

<b>Kurulabilecek Alan:</b>	80,0	m <sup>2</sup>
<b>Talep Edilen Su Sıcaklığı:</b>	65,0	°C
<b>Giriş Suyu Sıcaklığı:</b>	15,0	°C
<b>Yıllık Işınım:</b>	1.831,5	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Güneşten Gelen Toplam Enerji:</b>	146.520,0	kWh
<b>Solar Kollektörün Kullandığı Verimli Enerji:</b>	107.985,2	kWh
<b>Solar Kollektörün Kullandığı Verimli Enerji:</b>	388.746.864,0	kJ
<b>Yıllık Sağlanabilecek Sıcak Su Miktarı:</b>	1.860.032,8	litre (kg)
<b>Bu Enerjiyi Sağlayacak Toplam Doğalgaz Miktarı:</b>	10.149,0	m <sup>3</sup>
<b>Toplam Doğalgaz Bedeli:</b>	12.381,8	TL
<b>Sıcak Suyu Karşılacak Toplam Aile Sayısı:</b>	11,7	

Şekil 4.3 Tüm çatının düz kolektör ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı

Verilen tasarım parametrelerine göre kısıtlı alanın tamamına uygulanacak düz güneş kolektörleriyle 11 ailenin sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu sıcak suyun doğalgaz enerjisiyle elde edilmesi durumundaki doğalgaz bedeli 12.382 TL olarak hesaplanmıştır.

Bütünleşik melez FV/T sistemin tüm çatıya uygulanması durumundaki sistem çıktılarına ilişkin simülasyon ekran görüntüsü Şekil 4.4'te verilmiştir. Kısıtlı alana yalnız fotovoltaik sistem kurulumunda elde edilen 20.659 kWh'lik elektrik enerjisi getirisi sabit tutularak FV/T sistem getirileri hesaplandığında 6 ailenin sıcak su ihtiyacının da karşılanabildiği hesaplanmıştır. Bu durumda 6 ailenin hem elektrik hem de sıcak su ihtiyacı karşılanmış olup 9.528 TL fotovoltaik sistemden, 7.216 TL ise termal sistemden olmak üzere toplam 16.743 TL toplam kazanç elde edilmiştir.

<b>Ortam Sıcaklığı:</b>	25,0	°C
<b>Yıllık Gelen Işınım:</b>	1.831,5	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Rüzgar Hızı:</b>	3,0	m/s
<b>Hücre Sıcaklığı:</b>	55,1	°C
<b>Referans Sıcaklık:</b>	25,0	°C
<b>Modül Sıcaklık Katsayısı:</b>	0,3	%/°C
<b>Modül Referans Verim:</b>	15,6	%
<b>Fotovoltaik Panel Verimi:</b>	14,1	%
<b>Elektrik Enerjisi:</b>	20.658,6	kWh
<b>Yüzey Alanı:</b>	80,0	m <sup>2</sup>
<b>Güneşten Gelen Toplam Enerji:</b>	146.520,0	kWh
<b>Kayıp Enerji:</b>	125.861,4	kWh
<b>Isı Transfer Katsayısı:</b>	52,3	W/m <sup>2</sup> - K
<b>Yeni Isı Transfer Katsayısı (FV/T):</b>	26,2	W/m <sup>2</sup> - K
<b>Kayıp Enerji:</b>	62.930,7	kWh
<b>Elektrik Enerjisi:</b>	20.658,6	kWh
<b>Toplam Elektrik İhtiyacı Karşılancak Aile Sayısı:</b>	6,8	
<b>Karşılancak Elektriğin Şebekeden Alınması Durumunda Değeri:</b>	9.527,7	TL
<b>Termal Enerji:</b>	62.930,7	kWh
<b>Toplam Doğalgaz Bedeli:</b>	7.215,7	TL
<b>Sıcak Suyu Karşılancak Toplam Aile Sayısı:</b>	6,8	

Şekil 4.4 Tüm çatının FV/T ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı (elektrik getirisi sabit)

Aynı alan için, FV/T sistemde üretilen elektrik enerjisinin, FV sistemden elde edilen elektrik enerjisi ile aynı değerde tutulmaya çalışıldığı durumda, üretilen termal enerji 62.931 kWh'tir. Bu değer aynı alana yalnız termal kolektör konduğu durumdaki üretim olan 107.985 kWh'lik enerjinin yaklaşık %60'ı kadardır. Bu durumda aynı elektrik getirisi beklentisinde termal getiri büyük oranda düşüş göstermiştir.

Benzer şekilde aynı alanda, yalnız termal sistemin olduğu durumdaki termal getiri vermesi beklenen FV/T bütünleşik melez sistem kurulumundaki çıktılar Şekil 4.5'te verilmiştir.

Ortam Sıcaklığı:	25	°C
Yıllık Gelen Işınım:	1.831,5	kWh/m <sup>2</sup>
Rüzgar Hızı:	3,0	m/s
Hücre Sıcaklığı:	55,1	°C
Referans Sıcaklık:	25,0	°C
Modül Sıcaklık Katsayısı:	0,32	%/°C
Modül Referans Verim:	15,6	%
Fotovoltaik Panel Verimi:	14,1	%
Elektrik Enerjisi:	20.658,6	kWh
Yüzey Alanı:	80,0	m <sup>2</sup>
Güneşten Gelen Toplam Enerji:	146.520,0	kWh
Kayıp Enerji:	125.861,4	kWh
Isı Transfer Katsayısı:	52,3	W/m <sup>2</sup> - K
Yeni Isı Transfer Katsayısı (FV/T):	26,17	W/m <sup>2</sup> - K
Toplam Isıl Enerji İhtiyacı:	388.746.897,0	kJ
Toplam Isıl Enerji İhtiyacı:	107.985,25	kWh
FV + Kayıp Enerji:	38.534,75	kWh
Hücre Sıcaklığı:	32,76	°C
Elektrik Enerjisi:	22.289,58	kWh
Kayıp Enerji:	16.245,17	kWh
FV + Kayıp Enerji:	38.534,75	kWh

Şekil 4.5 Tüm çatının FV/T ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı (ısıl getiri sabit)

Aynı alanda yalnız termal sistemden elde edilen ısı enerjisini FV/T sistemin vermesi istendiğinde hücre sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir. Isı kayıplarının azalması sayesinde fotovoltaik sistemden gelecek getiri de artış gözlemlenmektedir. Total getiri ise 22.664 TL olarak kıyaslamada en üst seviyeye çıkmaktadır. Dolayısıyla kısıtlı bir alana yapılacak ayırık termal sistem, ayırık fotovoltaik sistem ve bütünleşik hibrit olan FV/T sistemin getirileri ve ihtiyacını karşıladıkları aile sayısının mukayesesi yapılabilmektedir. Tüm bu senaryoların sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Kısıtlı alanda (eğimli çatı) yapılabilecek alternatif uygulamalar ve sonuçları

	<b>Termal Sistem</b>	<b>Fotovoltaik Sistem</b>	<b>FV/T (Elektrik Enerjisi Getirisi Sabit)</b>	<b>FV/T (Isıl Enerji Getirisi Sabit)</b>
<b>Güneşten Gelen Toplam Yıllık Enerji (kWh)</b>	146.520			
<b>Yıllık Isıl Enerji Getirisi (kWh)</b>	107.985	-	62.931	107.985
<b>Yıllık elektrik Enerjisi Getirisi (kWh)</b>	-	20.659	20.659	22.290
<b>Sistem Verimi</b>	%73,7	%14,1	%57,1	%88,9
<b>Yıllık Toplam Kazanç (TL)</b>	12.382	9.528	7.216 (T) 9.528 (FV) ± 16.744 (FV+T)	12.382 (T) 10.280 (FV) ± 22.662 (FV/T)
<b>İhtiyacı Karşılanan Aile Sayısı</b>	11 (11,7)	6 (6,8)	6 (6,8) Sıcak Su + 6 (6,8) Elektrik	11 (11,7) Sıcak Su + 7 (7,3) Elektrik

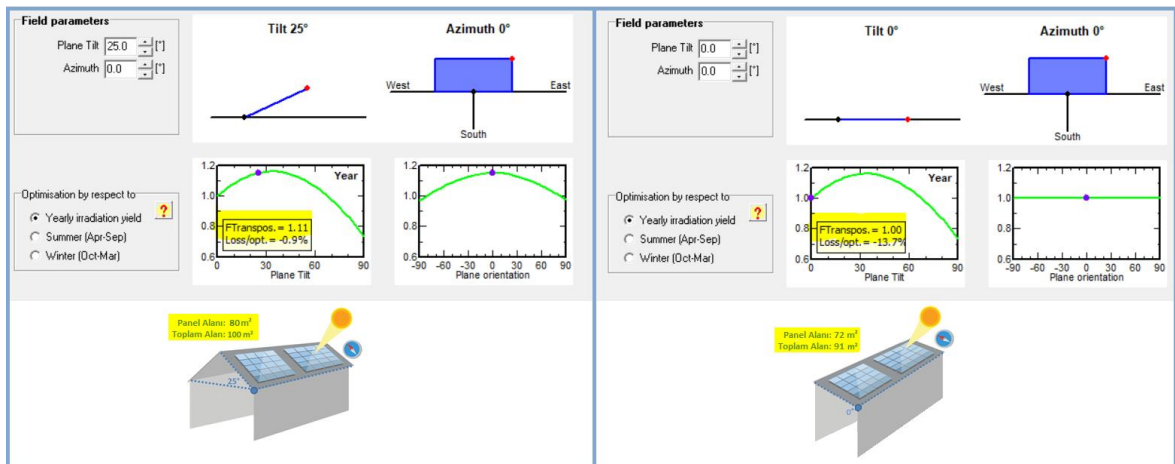
Yukarıdaki çizelgeden de görüldüğü üzere, ısıl getirinin daha önceden belirlenen değerde sabit tutulduğu senaryoda, sistem en yüksek seviyede üretim yapmaktadır. Bu farkın sebebi, FV/T sistemin fotovoltaik kısmının artan performansının diğer parametreler sabit kaldığında artış göstermesidir. Diğer FV/T sistem senaryosunda ise aynı fotovoltaik getiriye elde etme tercihi kaybın artmasına sebebiyet vermekte dolayısıyla ısı kayıpları toplam üretimin düşmesine neden olmaktadır. İki ihtiyacı karşılanan aile sayısı de benzer şekilde ısıl getirinin sabit tutulduğu FV/T sistemde maksimum olup, 7 aile olarak bulunmuştur. Buna ek

olarak 4 ailenin de ek sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır. Elektrik ihtiyacının sabit tutulmaya çalışıldığı senaryoda ısıl enerji getirisi termal yüzeyin direkt güneşi görmemesi ve ısı transferi etkinliğinin azalması sebebiyle azalmaktadır.

Çizelge 4.2'den çıkarılan bir diğer sonuç ise sistemlerin verimidir. Güneşten gelen toplam enerjinin ısıl ve elektriksel enerjiye dönüştürüldüğü 4 farklı sistemde en yüksek verim ısıl sistem getirisinin sabit olduğu FV/T sistem iken en düşük verim FV sisteme aittir. Yalın termal sistemin getirisi FV/T sistemlerden daha düşük iken, bu sistemin veriminin elektriksel enerjinin sabit tutulduğu FV/T sisteme oranla daha yüksek olması ise dikkat çeken önemli bir husustur. Bunun sebebi ise FV/T sistemde elektrik enerjisini sabit tutmaya çalışmak için hücre sıcaklığının yüksek ve sabit tutulmasının ısı kayıplarını artırarak FV/T sistemdeki verimi düşürmesidir.

Buraya kadar yapılan çalışmalarda kısıtlı bir alan için genel simülasyon değerlerinin kıyaslanması yapılmış ve bu değerlerdeki en yüksek sonucun hangi uygulamadan elde edilebildiği sonuçlarına varılmıştır.

Örnek uygulamalarda kabul edilen eğimli çatı sistemine ek olarak düz çatılar için düz panel yerleşimi gerçekleştirilerek simülasyonlar incelenmiştir. Bu durumda kurulacak güneş enerjisi sistemine herhangi bir eğim verilmediğinde transpozisyon faktörü değeri %100 olacağından, global yatay ışınım değeri net ışınım eş olarak hesaplara dahil edilmiştir. Bu yapının PVSYSY'Teki görüntüsü aşağıdaki gibi incelenebilir. 100 m<sup>2</sup> çatının izdüşümü ile elde edilecek yaklaşık 91 m<sup>2</sup>'lik çatının kullanılabilen alanı benzer oranda alınırsa 72 m<sup>2</sup>'lik bir kurulum gerçekleştirilir.



Şekil 4.6 Eğimli çatı ve düz çatının kıyaslanması (PVSYSY Çıktısı)



Bu kurulum sonucu elde edilecek sonuçlara ise Çizelge 4.3'ten ulaşmak mümkündür. İlgili simülasyona ait ekran çıktıları EK-2'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Kısıtlı alanda (düz çatı) yapılabilecek alternatif uygulamalar ve sonuçları

	<b>Termal Sistem</b>	<b>Fotovoltaik Sistem</b>	<b>FV/T (Elektrik Enerjisi Getirisi Sabit)</b>	<b>FV/T (Isıl Enerji Getirisi Sabit)</b>
<b>Güneşten Gelen Toplam Yıllık Enerji (kWh)</b>	118.800			
<b>Yıllık Isıl Enerji Getirisi (kWh)</b>	87.556	-	50.920	87.556
<b>Yıllık elektrik Enerjisi Getirisi (kWh)</b>	-	16.960	16.960	18.128
<b>Sistem Verimi</b>	%73,7	%14,3	%57,1	%88,9
<b>Yıllık Toplam Kazanç (TL)</b>	10.039	7.822	5.839 (T) 7.822 (FV) <u>+</u> 13.661 (FV+T)	10.039 (T) 8.361 (FV) <u>+</u> 18.400 (FV/T)
<b>İhtiyacı Karşılanan Aile Sayısı</b>	9 (9,5)	5 (5,6)	5 (5,5) Sıcak Su + 5 (5,6) Elektrik	9 (9,5) Sıcak Su + 6 (6,0) Elektrik

Bu durumda ışınımın düşmesine ve alanın küçülmesine bağlı kalarak sistemdeki toplam enerji, ayırık ve bütünleşik sistemlerin ürettiği enerjiler, dolayısıyla getiriler düşmektedir. Burada dikkat çeken husus ise hücre sıcaklığının azalmasından kaynaklı FV sistemin veriminin artmasıdır.

#### 4.2.2. İhtiyaçlar doğrultusunda kurulabilecek optimum melez sistem tespiti

Çalışma kapsamında bulunan sonuçlarda öncelikli hedef ısı ve elektriksel ihtiyacı maksimum düzeyde karşılamak olduğu için benzer şekilde kısıtlı bir alanda ihtiyacı karşılamaya yönelik optimum sistem tasarımı da ele alınmıştır. Fotovoltaik ve termal sistemlerin ayırık melez ve bütünleşik melez olarak karşılaştırıldığı simülasyon ekranı Şekil 4.7’de verilmiştir. FV ve termal sistemlerin 80 m<sup>2</sup>’lik alan üzerine kurulumuna ilişkin paylaşım yüzdeleri %1’lik oranlar ile değiştirilerek her dağılım için FV, termal, FV/T sistemin toplam enerji üretimlerinin TL bazındaki getirileri ve ısı ve/veya elektrik ihtiyacı karşılanan aile sayıları Excel bazlı simülasyonda hesaplanmış ve Ek 1’de verilmiştir.

FV (%)	T (%)	Aile Sayısı FV	Kazanç (TL) - FV	Üretim (kWh) - FV	Aile Sayısı (T)	Kazanç (TL) T	Üretim (kWh) T	Aile Sayısı (FV+T)	Kazanç (TL) FV+T	Üretim (kWh) - FV+T
0	100	0	0	0	11	12.382	107.985	11	12.382	107.985
1	99	0	95	207	11	12.258	106.905	11	12.353	107.112
⋮										
57	43	3	5.431	11.775	5	5.324	46.434	8	10.755	58.209
58	42	3	5.526	11.982	4	5.200	45.354	7	10.726	57.336
59	41	4	5.621	12.189	4	5.077	44.274	8	10.698	56.462
60	40	4	5.717	12.395	4	4.953	43.194	8	10.669	55.589
61	39	4	5.812	12.602	4	4.829	42.114	8	10.641	54.716
62	38	4	5.907	12.808	4	4.705	41.034	8	10.612	53.843
63	37	4	6.002	13.015	4	4.581	39.954	8	10.584	52.969
64	36	4	6.098	13.222	4	4.457	38.875	8	10.555	52.096
65	35	4	6.193	13.428	4	4.334	37.795	8	10.527	51.223
66	34	4	6.288	13.635	3	4.210	36.715	7	10.498	50.350
67	33	4	6.384	13.841	3	4.086	35.635	7	10.470	49.476
⋮										
99	1	6	9.432	20.452	0	124	1.080	6	9.556	21.532
100	0	6	9.528	20.659	0	0	0	6	9.528	20.659

Şekil 4.7 Ayırık melez sistem optimizasyonu

Aynı anda hem elektrik hem sıcak su ihtiyacının kıyaslanması esas amaç olan bu simülasyon sonucunda Şekil 4.6’dan görüldüğü üzere 4 ailenin ihtiyaçlarının birlikte karşılanması durumunun optimum karşılama oranını verdiği tespit edilmiştir. Çatı üzerine %59-%65 aralığında fotovoltaik ile %41-%35 aralığında termal kolektör sistemi kurulduğunda 4 ailenin toplam ısı ve elektrik ihtiyacının karşılandığı görülmekte olup, TL bazında yıllık kazanç göz önünde bulundurulduğunda bu aralıktaki en yüksek kazancın sağlandığı optimum çatı

alanı kullanımının %59 fotovoltaik sistem, %41 termal sistem için olduğu tespit edilmiştir.

Aynı kriterlerde mevcut alana kurulan FV/T bütünleşik melez sistemin versiyonları karşılaştırıldığında; fotovoltaik getirinin sabit tutulduğu durum için 6 ailenin hem sıcak su hem elektrik ihtiyacı karşılanırken, ısıl sistemin sabit tutulduğu durumda ise 7 ailenin her iki ihtiyacının birlikte karşılandığı ve buna ek olarak 4 ailenin de sıcak su ihtiyacının karşılanabildiği tespit edilmiştir. Buna göre bütünleşik FV/T sistemin getirisi, FV ve termal sistemlerin ayrı melez kombinasyonunun %59 ile %41 oranlarında optimum seviyede kurulduğu senaryonun getirisinin iki katından daha fazla değere ulaştığı görülmüştür.

FV ve termal ayrı melez kurulumundaki maksimum değer olan 4 ailenin ihtiyacı baz alındığında, FV/T hibrit sistemden yaklaşık 46 m<sup>2</sup>'lik kurulumla 4 ailenin elektrik ihtiyacı karşılanabilmekte, 6 ailenin de sıcak su ihtiyacını karşılayabilecek enerji üretilmektedir. 4 ailenin elektrik ihtiyacı ve 6 ailenin sıcak su ihtiyacının yaklaşık bedeli 11.927 TL'dir. Bu seçenek FV ve termal sistem ayrı melez uygulamasına göre yaklaşık %13 daha fazla kazanç sağlamakta olup, %42,5 oranında çatı alanından tasarruf ettirmektedir.

Bu durumda ihtiyaca yönelik, kısıtlı alanda kurulacak bütünleşik melez FV/T sistemin; gelir, alan ve ihtiyacı karşılama açısından ayrı melez sistem kurulmasından her durumda daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında seçeneklerin geri ödeme süreleri yönünden karşılaştırılması için, yapılan analiz sonucunda hesaplanan 4 ailenin hem elektrik hem ısıl ihtiyacını karşılayan sistemlerin maliyetleri de belirlenmiştir. Simülasyon yazılımı kullanılarak yapılan analizler sonucunda farklı sistemlerin geri ödeme süreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Yatırım maliyetleri ve geri dönüş sürelerinin kıyaslaması

	<b>Termal Sistem (4 Ailenin sıcak su İhtiyacı) (Düz Kolektör)</b>	<b>FV Sistem (4 Ailenin elektrik ihtiyacı) (275 Watt'lık)</b>	<b>FV/T (4 Ailenin elektrik ihtiyacı + 6 ailenin sıcak su ihtiyacı)</b>
Toplam Alan	32,8 m <sup>2</sup>	47,2 m <sup>2</sup>	46 m <sup>2</sup>
Birim Alanı	2,1 m <sup>2</sup>	1,6 m <sup>2</sup>	1,6 m <sup>2</sup>
Adet	16	30	29
Birim Fiyatı	1.000 TL	506 TL	1.855 TL
Sistem Fiyatı	54.400 TL	37.950 TL	66.780 TL
Sistem'in Yıllık Getirisi	10.698 TL		10.698 TL
Geri Dönüş Süresi	8,6 Yıl		6,2 Yıl

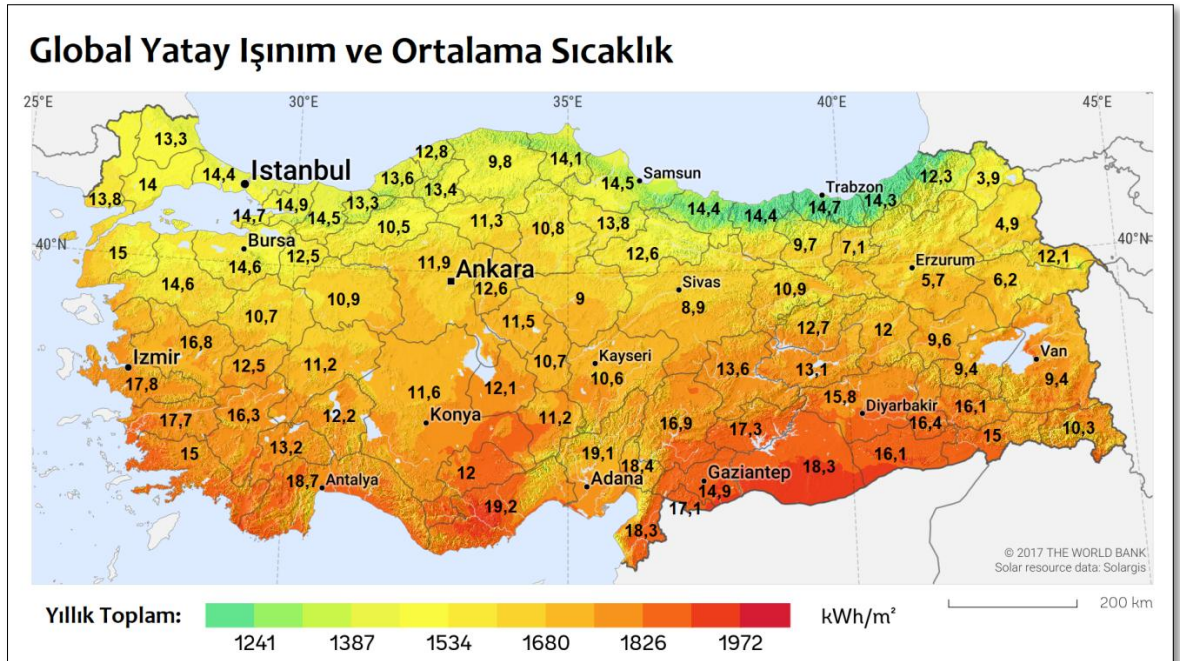
Daha önceden verilen kurulum maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda fotovoltaik ve termal sistemlerin ayırık melez ve bütünleşik melez kurulumlarında maliyet kıyaslamaları yapılmıştır. Bu durumda 4 ailenin elektrik ve ısıl ihtiyacının birlikte karşılandığı durumda 32,8 m<sup>2</sup> kolektör, 47,2 m<sup>2</sup> fotovoltaik panel olmak üzere 80 m<sup>2</sup>'lik alan kullanılmıştır. Ayırık melez sistemler yerine bütünleşik melez sistemler ele alındığında ise 46 m<sup>2</sup>'lik çatı kullanımıyla ihtiyaç karşılanmıştır. Ayırık sistemlerin maliyetlerinin toplamı 92.350 TL iken, bütünleşik melez sistemin maliyeti 66.780 TL'dir. 4 ailenin ihtiyaçları karşılanacağından toplam ihtiyaç duyulan enerji her iki durumda da aynıdır. Bütünleşik melez FV/T sistemin yıllık getirisi daha düşük görünmesine rağmen yatırım maliyeti sebebiyle yatırımın geri dönüş süresi ayırık melez sistemden yaklaşık 2,5 yıl daha kısadır. Aynı zamanda çatıda kullanılan alanın da düşürülmesiyle bütünleşik hibrit sistemlerin ayırık hibrit sistemlere oranla daha karlı olduğunu tespit edilmiştir.

### 4.3. Sıcaklık ile Işınımın Duyarlılık Analizleri ve Türkiye için İncelenmesi

Bu çalışma kapsamında yapılan bir diğer analiz ise ortam sıcaklığı ve ışınımın bu tür sistemlere ayrı ayrı ve beraber etkisinin değerlendirilmesidir. Güneş enerjisi

sistemleri tasarlanırken lokasyonun önemine bağlı kalınarak Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli de değerlendirilmelidir. Türkiye, 36° - 42° Kuzey paralelleri ile 26° - 45° Doğu meridyenleri arasında yer alır. Diğer bir ifadeyle, Türkiye Ekvator'un Kuzeyinde ve Greenwich'in Doğusunda bulunmaktadır. Enerji Bakanlığı verilerine göre, Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresinin 2.737 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi potansiyelinin ise 1.527 kWh/m<sup>2</sup>/yıl (günlük toplam 4,2 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir. Türkiye genelinde yıllık ortalama güneş enerjisi potansiyeli ise 1.315 kWh/m<sup>2</sup>'dir. Ege Bölgesi, Akdeniz Bölgesi, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi'nin bir kısmı güneş enerjisi uygulamalarında en çok tercih edilen bölgelerdir [38].

Uzun dönemli ışınım verilerini sağlayan çok fazla kaynak olmakla birlikte bu kaynaklardan bazıları ışınım haritalarını da sunmaktadır. Çalışma kapsamında bu kaynaklardan SOLARGIS tercih edilmiştir [39]. Ancak güneş enerjisi sistemlerinin optimizasyonunda ışınım ile birlikte sıcaklık da büyük öneme sahiptir. Ancak hem ışınım hem de sıcaklık verilerini aynı haritada sağlayan kaynak bulunmamaktadır. Çalışma kapsamında SOLARGIS firmasının hazırladığı Türkiye'nin güncel ışınım haritasına Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün illere bağlı ortalama sıcaklıkları eklenmiş ve Şekil 4.8'deki harita elde edilmiştir [40].



Şekil 4.8 Türkiye global yatay ışınım ve ortalama sıcaklık değerleri

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün illere bağlı yıllık ortalama sıcaklıklarına göre Türkiye'nin yıllık ortalama sıcaklığı 13,1°C olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla yapılan çalışmalarda bu değerin üstünde ve altında 1°C'lik aralıklarla analizler yapılmıştır. Tez kapsamında, alt değer ve üst değer olarak seçilen limitler ise; Türkiye'nin yıllık ortalama sıcaklığı en yüksek (19,2°C ile Mersin) ve en düşük (3,9°C ile Ardahan) illerine ait değerlerdir. Simülasyonlardaki ışıınım hesaplarında ise, kullanılan global yatay ışıınım haritasındaki kırılımlar baz alınmış ve buna göre yaklaşık 73 kWh/m<sup>2</sup> ışıınım değişimi ile en yüksek 1972 kWh/m<sup>2</sup>, en düşük 1241 kWh/m<sup>2</sup> ışıınım aralığı kullanılmıştır. Bu aralığın neredeyse tam ortası da bir güneş enerjisi santralının hem teknik hem ekonomik olarak kabul edilebilir olabilmesi için belirlenen değer olan 1650 kWh/m<sup>2</sup>'ye karşılık gelmektedir [41]. Sıcaklık ve ışıınımın etkisinin araştırıldığı çalışmada bu değerler göz önünde bulundurulmuştur.

FV/T sistemler içerisinde elektriksel getirinin sabit tutulduğu (20.657 kWh) senaryoda, hücre sıcaklığı 55,1°C'de sabit alınarak hesaplanmış ve sistemin ortam sıcaklığı ve ışıınıma bağlı toplam enerji eldesindeki değişimleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu durumda toplam enerji getirisinin, ışıınımla birlikte artmakta olduğu ancak sıcaklıkla değişmediği tespit edilmiştir. Burada dikkat çeken husus; bazı sıcaklık ve ışıınım değerleri için toplam enerji getirisinin pozitif değerler almamasıdır (Bkz. Şekil 4.9). Örneğin, 1241 kWh/m<sup>2</sup>'de 18°C'nin altında negatif değerler hesaplanmıştır. Çünkü fotovoltaik sistemden elde edilecek elektrik enerjisinin sabit tutulması durumunda düşük sıcaklıklarda ısı kayıpları artmaktadır, bu da ısı getirisinin negatif değerler almasına neden olmaktadır. Bu yüzden, FV/T sistemde fotovoltaik getiri sabit tutulursa, daha fazla ısı getiri elde etmek için sıcaklık ve ışıınımın yüksek değerde olduğu bölgeler tercih edilmelidir. Bu durumda kolektör toplam verimi de artmaktadır.

Sıcaklık °C	Işınım kWh/m <sup>2</sup>					
	1241	1387	1534	1680	1826	1972
4,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
5,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
6,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
7,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
8,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
9,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
10,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
11,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
12,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
13,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
14,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
15,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
16,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
17,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
18,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
19,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
20,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0

(a)

Sıcaklık °C	Işınım kWh/m <sup>2</sup>					
	1241	1387	1534	1680	1826	1972
4,0				6.758,6	18.438,6	30.118,6
5,0				8.852,2	20.532,2	32.212,2
6,0				10.945,9	22.625,9	34.305,9
7,0			1.359,5	13.039,5	24.719,5	36.399,5
8,0			3.453,1	15.133,1	26.813,1	38.493,1
9,0			5.546,8	17.226,8	28.906,8	40.586,8
10,0			7.640,4	19.320,4	31.000,4	42.680,4
11,0			9.734,0	21.414,0	33.094,0	44.774,0
12,0		67,7	11.827,7	23.507,7	35.187,7	46.867,7
13,0		2.161,3	13.921,3	25.601,3	37.281,3	48.961,3
14,0		4.254,9	16.014,9	27.694,9	39.374,9	51.054,9
15,0		6.348,6	18.108,6	29.788,6	41.468,6	53.148,6
16,0		8.442,2	20.202,2	31.882,2	43.562,2	55.242,2
17,0		10.535,8	22.295,8	33.975,8	45.655,8	57.335,8
18,0	949,4	12.629,4	24.389,4	36.069,4	47.749,4	59.429,4
19,0	3.043,1	14.723,1	26.483,1	38.163,1	49.843,1	61.523,1
20,0	5.136,7	16.816,7	28.576,7	40.256,7	51.936,7	63.616,7

(b)

Şekil 4.9 FV/T sistemde elektriksel getiri sabit tutulduğu zaman ortam sıcaklığı ve ışınımın (a) toplam enerji, (b) termal enerjiye etkisi

FV/T sistem için termal getirinin sabit tutulduğu (87.083 kWh) senaryoda, ortam sıcaklığı ve ışınımına bağlı toplam enerji değişimi Şekil 4.10'dan incelenebilir. Bu durumda, toplam enerji getirisi ışınım ile birlikte artmakta, sıcaklıkla değişmemektedir. Bazı ışınım ve sıcaklık değerleri için elektrik enerjisi eldesi negatif değerler almaktadır. Çünkü bu durumda ısı sistemden istenen enerjiyi sağlamaya çalışırken fotovoltaik sistemden enerji alınamamaktadır. Bu durum için, yüksek sıcaklıklarda çalışma yapılabilmesi kaybın artmasına elektriksel getirinin düşmesine sebep olmaktadır. FV/T sistemde ısı getiri sabit tutulduğunda daha fazla elektrik getirisi için düşük sıcaklık ve yüksek ışınımın olduğu yerler tercih edilmelidir. Yüksek ışınım ve düşük sıcaklıkla ısı kayıplarının arttığı gözlemlense de toplam enerji eldesindeki artış maksimum performansı sağlamaktadır.

Toplam (kWh)		Işınım kWh/m <sup>2</sup>					
Sıcaklık °C		1241	1387	1534	1680	1826	1972
	4,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	5,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	6,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	7,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	8,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	9,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	10,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	11,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	12,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	13,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	14,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	15,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	16,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	17,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	18,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	19,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0
	20,0	99.280,0	110.960,0	122.720,0	134.400,0	146.080,0	157.760,0

(a)

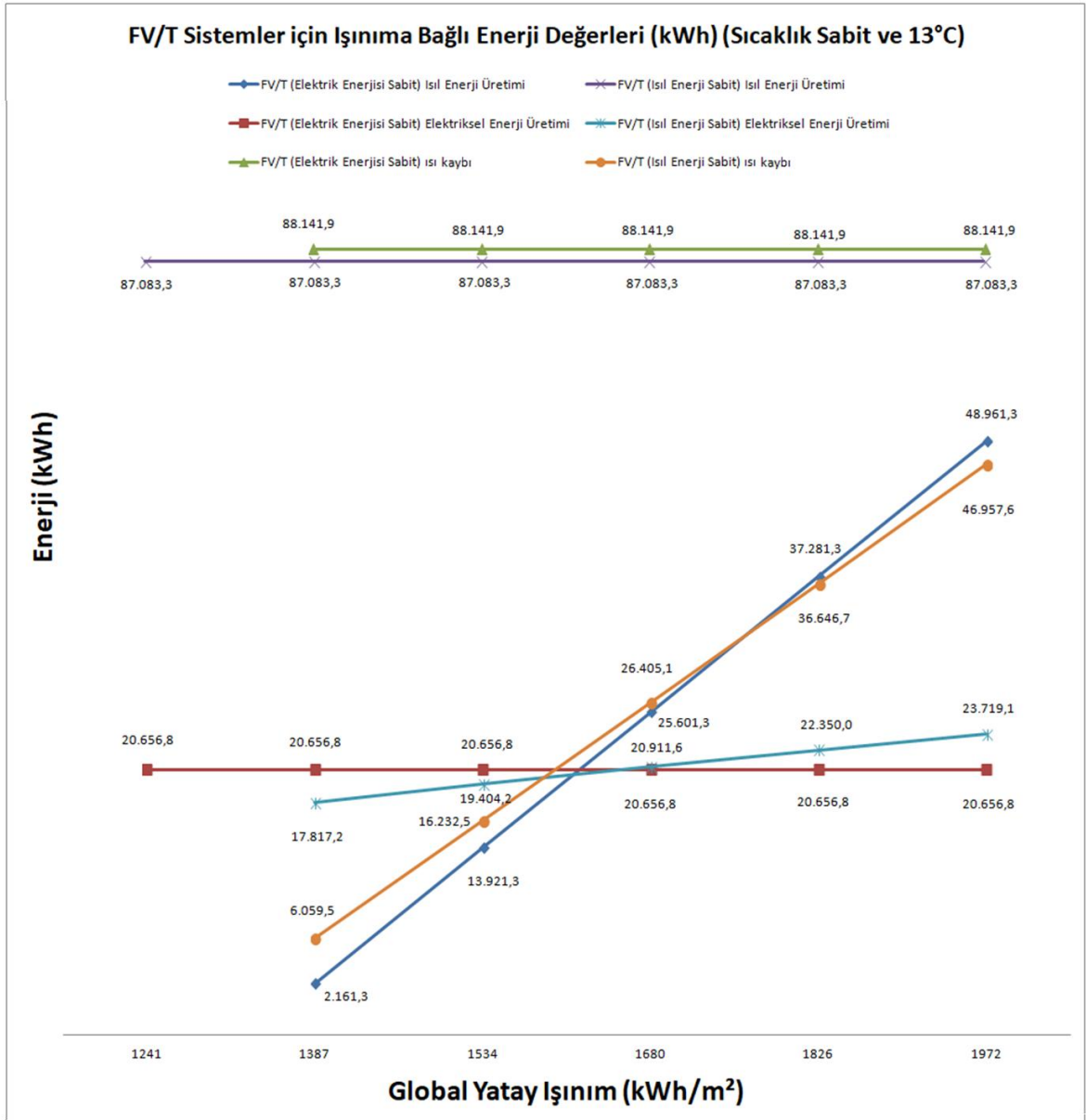
Elektrik (kWh)		Işınım kWh/m <sup>2</sup>					
Sıcaklık °C		1241	1387	1534	1680	1826	1972
	4,0		18.324,8	19.960,0	21.515,3	23.001,5	24.418,4
	5,0		18.268,3	19.898,2	21.448,2	22.929,1	24.340,6
	6,0		18.211,9	19.836,4	21.381,0	22.856,7	24.262,9
	7,0		18.155,5	19.774,7	21.314,0	22.784,2	24.185,2
	8,0		18.099,1	19.712,9	21.246,9	22.711,8	24.107,5
	9,0		18.042,7	19.651,1	21.179,8	22.639,5	24.029,8
	10,0		17.986,3	19.589,4	21.112,7	22.567,1	23.952,1
	11,0		17.929,9	19.527,6	21.045,7	22.494,7	23.874,4
	12,0		17.873,5	19.465,9	20.978,6	22.422,3	23.796,7
	13,0		17.817,2	19.404,2	20.911,6	22.350,0	23.719,1
	14,0		17.760,8	19.342,5	20.844,5	22.277,6	23.641,4
	15,0		17.704,5	19.280,8	20.777,5	22.205,3	23.563,8
	16,0		17.648,1	19.219,1	20.710,5	22.133,0	23.486,2
	17,0		17.591,8	19.157,4	20.643,5	22.060,7	23.408,6
	18,0		17.535,5	19.095,7	20.576,5	21.988,4	23.330,9
	19,0		17.479,2	19.034,0	20.509,5	21.916,1	23.253,3
	20,0		17.422,9	18.972,4	20.442,5	21.843,8	23.175,8

(b)

Şekil 4.10 FV/T sistemde ısıl getirinin sabit tutulduğu zaman ortam sıcaklığı ve ışınımın (a) toplam enerjiye, (b) elektrik enerjisine etkisi

Türkiye'nin yıllık ortalama sıcaklığı olan 13°C için global yatay ışınımın değişmesine bağlı kalarak ısıl enerji, elektrik enerjisi ve kayıp enerjinin değişimi ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



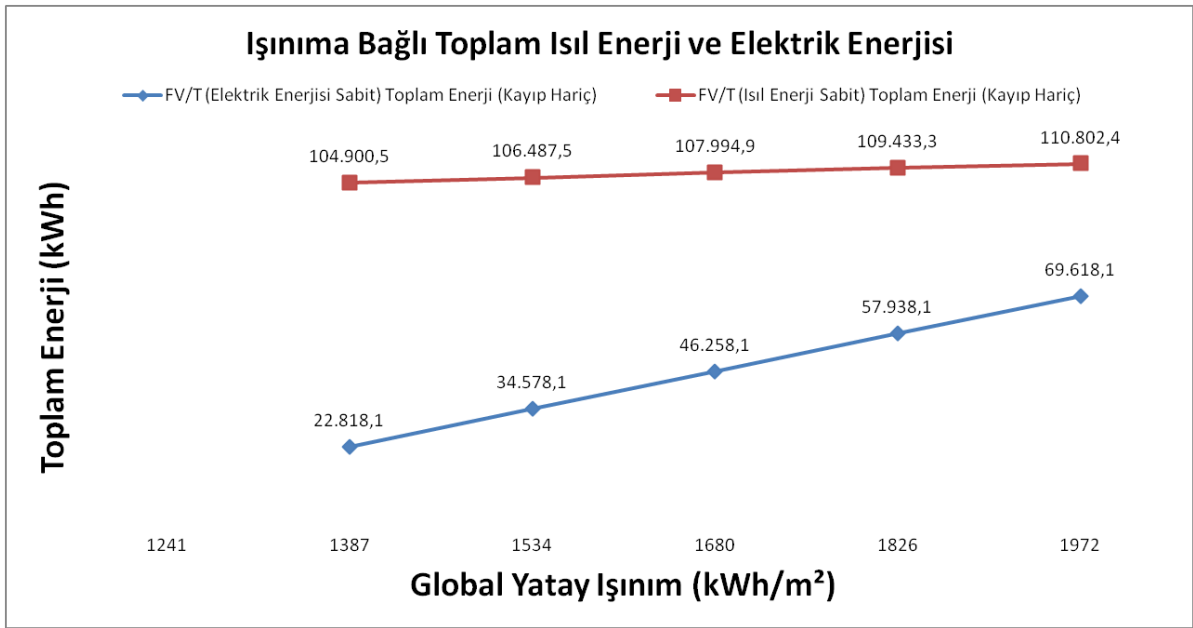


Şekil 4.11 FV/T sistemlerde global yatay ışınımına bağlı ısı, elektriksel enerji üretimleri ve ısı kaybı değişimleri

Elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemler senaryosunda sabit sıcaklıkta ışınımın değişimiyle ısı kayıplarında değişim olmamaktadır. Işınım artışıyla üretilen ısı enerjide ise artış gözlemlenmektedir. Bunun sebebi elektrik ve kayıp enerjinin sabit olduğu yerde güneşten gelen toplam enerjinin artışıyla birlikte bu artışın ısı sisteme aktarılmasıdır. Global yatay ışınımdaki her bir kWh/m<sup>2</sup> ışınım artışı için yaklaşık 80 kWh'tir. Bunun ekonomik değeri yaklaşık 9,2 TL/yıl'dır. Termal enerjinin sabit tutulduğu FV/T sistemler senaryosunda sabit sıcaklıkta

ışınımın değişimiyle ısı kaybı ve elektrik enerjisi üretimi artmaktadır. Güneşten alınan ışıının artmasına bağlı olarak bu enerjinin büyük bir kısmının ısı kaybı olarak ortama transfer olduğunu, geri kalan kısmının ise elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü göstermektedir. Bu senaryoda elektriksel artış ise her bir kWh/m<sup>2</sup> ışıının için yaklaşık 10 kWh'tir. Bunun getirisi ise yaklaşık 4,6 TL/yıl'dır. Bu sonuçlara göre; 1 kWh/m<sup>2</sup>'lik ışıının artışında, elektrik enerjisinin sabit tutulduğu senaryodaki termal enerji artışı, termal enerjinin sabit tutulduğu senaryodaki elektrik enerjisi artışının 8 katı olmasına karşın, bu değişimin ekonomik getiriye etkisi iki kat olarak yansımaktadır.

Şekil 4.12'de ise benzer şekilde sıcaklığın sabit tutulduğu, global yatay ışıının arttığı durumda, iki ayrı tipteki FV/T sistem için elektrik ve ısı enerjisinin toplamının değişimi yer almaktadır.

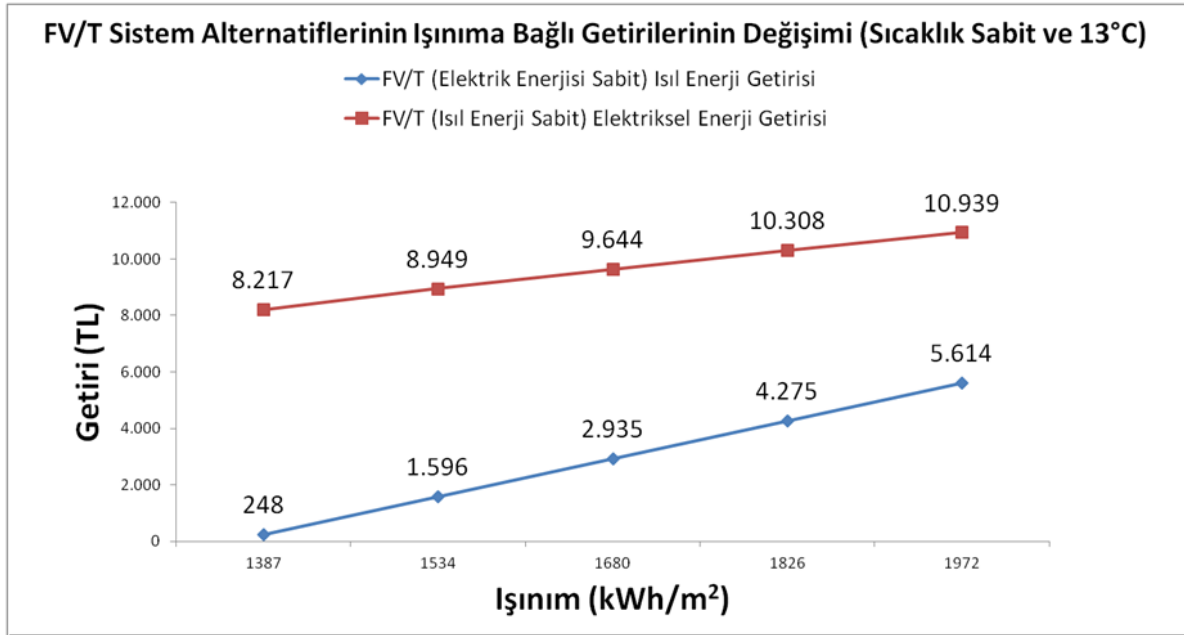


Şekil 4.12 FV/T sistemlerde global yatay ışıına bağlı ısı, elektriksel enerji üretimi ve ısı kaybı değişimleri

Bu durumda ışıının artışıyla elde edilen ısı ve elektrik enerjisinin toplamı her iki durumda da artış göstermekte, ancak elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemde bu artış daha büyük miktardadır. Bunun sebebi ise elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemde artan ışıının ısı enerjisine aktarılarak toplam enerjiyi arttırmasıdır. Isıl enerjinin sabit olduğu durumda gelen enerjinin büyük bir

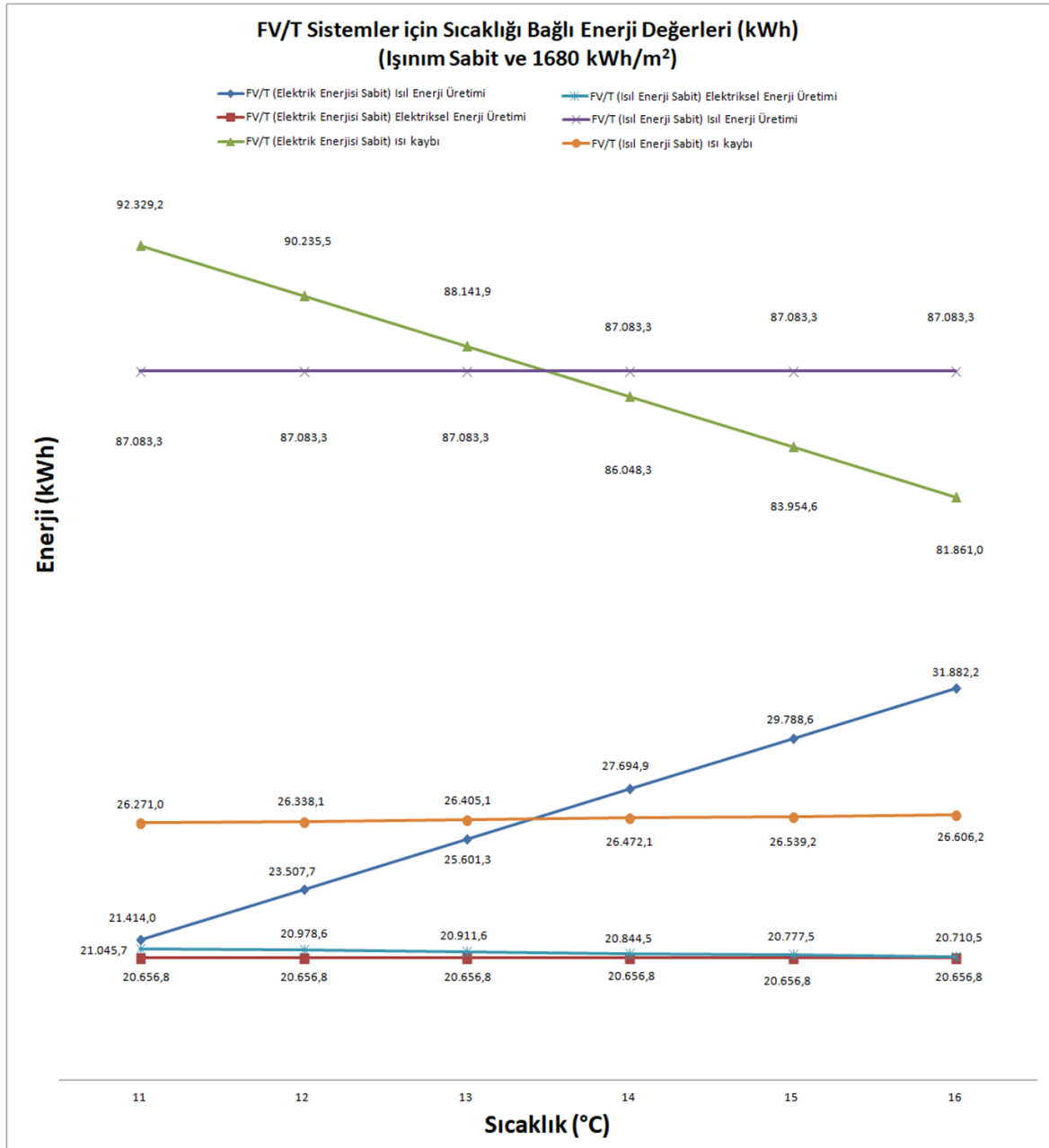
kısmı ısı kaybına dönüşmekte dolayısıyla elektrik ve ısı enerjisinin toplamı aynı seviyede artmamaktadır.

FV/T sistemlerden elde edilen ısı enerjisi ve elektrik enerjisindeki değişiminin ekonomik analizini gösterir grafik Şekil 4.13'te verilmiştir. Elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemde ışınım ile birlikte elde edilen ısı enerjisi getirisindeki artış, ısı enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemdeki elektriksel enerji getirisinden daha yüksektir.



Şekil 4.13 FV/T sistem alternatiflerinin ışınımına bağlı getirilerinin değişimi

Benzer şekilde ışınım sabit tutularak sıcaklık değiştirildiğinde üretim ve kayıp değerlerinin iki alternatif FV/T senaryosu için değişimi Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu grafikte, 1680 kWh/m<sup>2</sup> global yatay ışınımına sahip bir konumda çevre sıcaklığındaki 1°C değişim durumunun ısı enerjisi eldesi, elektriksel enerji eldesi ve ısı kayıplarındaki değişim görülmektedir.

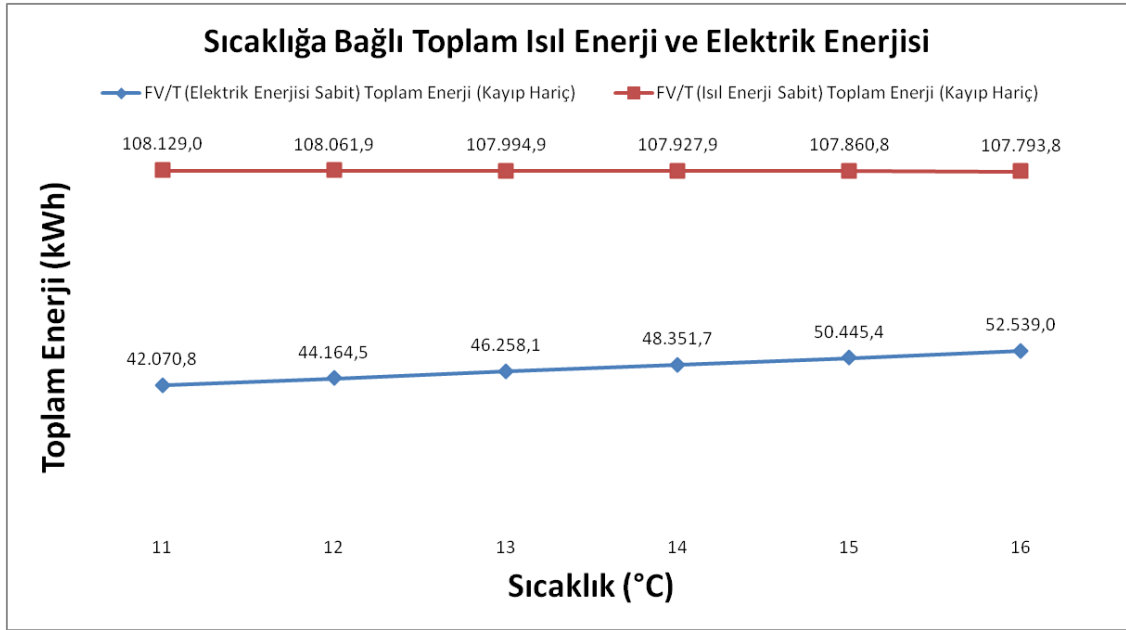


Şekil 4.14 FV/T sistemler için sıcaklığa bağlı enerji değerleri

Isıl enerjinin sabit tutulduğu FV/T sistemlerde, sabit ışınım değerinde, 1°C sıcaklık değişiminde, ısı kaybında yaklaşık 67 kWh'lik artış olmaktadır. Sıcaklığın artışıyla meydana gelen ısı kaybı, fotovoltaik sistemden kaynaklanmaktadır. Isıl enerji sabit tutulduğunda, ısı kayıplarındaki artışa bağlı olarak, FV/T sistemdeki elektrik üretimi düşmekte olup, bu değişimler her derece için yaklaşık 67 kWh olarak hesaplanmış, bunun ekonomik değeri ise yaklaşık 31 TL/yıl'dır. Elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemler senaryosunda ise sabit ışınımda sıcaklığın artışıyla

ısı kayıpları azalmakta bu enerji ısı enerjisiye dönüşmektedir. Değişim her bir derece için yaklaşık 2094 kWh olup, ısı enerjisiye dönüşen bu enerjinin ekonomik değeri 240 TL/yıl'dır.

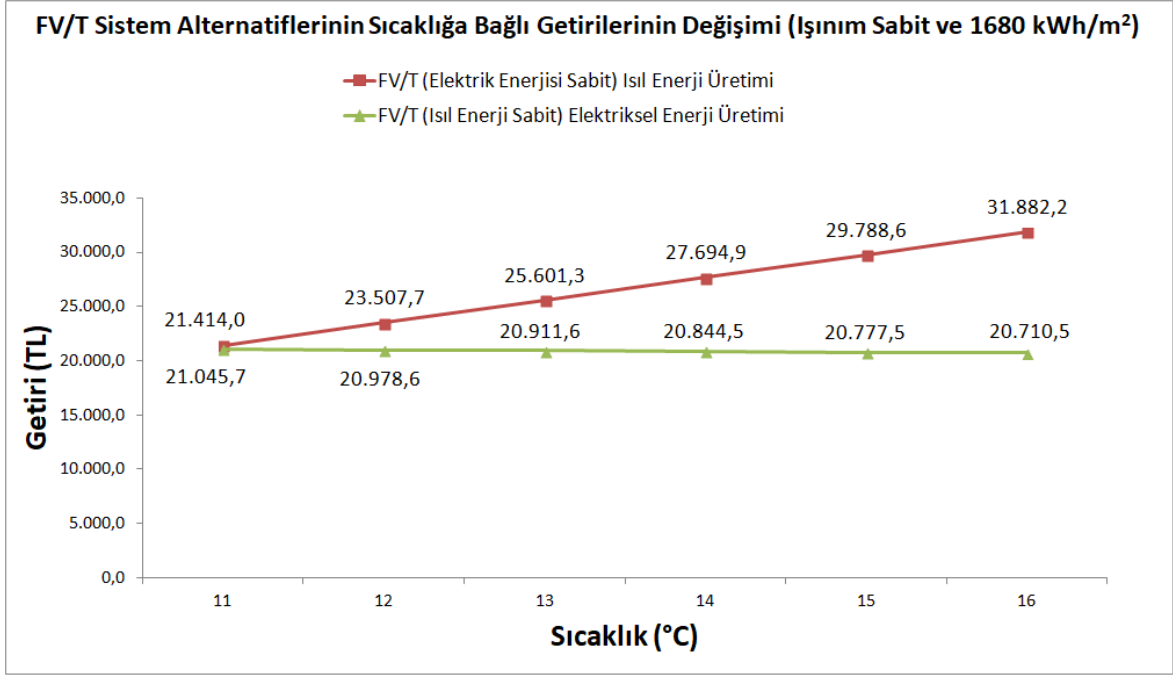
Sıcaklığa bağlı ısı enerjisi ve elektrik enerjisinin toplamının iki ayrı FV/T sistem senaryosundaki değişimi ise Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15 FV/T sistemler için sıcaklığa bağlı toplam enerji değişimleri

Grafikten gözlemlenebildiği gibi, sıcaklığın artışıyla elde edilen ısı ve elektrik enerjisinin toplamı elektrik enerjisinin sabit tutulduğu durumda artmakta, ısı enerjisinin sabit tutulduğu durumda ise azalmaktadır. Bunun sebebi ise elektrik enerjisinin sabit tutulduğu senaryoda FV/T sistemde artan sıcaklığın ısı enerjisine aktararak toplam enerjiyi arttırmasıdır. Isıl enerjisinin sabit olduğu durumda ise ısı sıcaklığın artışıyla FV sistemden kaynaklı ısı kaybına dönüşen enerji artmakta dolayısıyla elektrik ve ısı enerjisinin toplamı düşüş göstermektedir.

FV/T sistemlerin bu çalışmada incelenen alternatiflerinde elde edilen ısı enerjisi ve elektriksel enerji üretimlerindeki değişimin ekonomik analizini gösteren grafik ise Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 FV/T Sistem alternatiflerinin sıcaklığa bağlı getirilerinin değişimi

Sıcaklıkla birlikte ısı getiri artarken, elektrik enerjisi ise düşmektedir. Her 1°C artışla ısı getiri 2100 TL/yıl artarken, elektrikselsel enerji 67 TL/yıl azalmaktadır. Şekil 4.15'ten çıkarılacak bir diğer sonuç ise 11°C ve 1680 kWh/m<sup>2</sup> ışınım olan konumda elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemin ısı enerji üretimi ile ısı enerjisinin sabit tutulduğu FV/T'in elektrik enerji üretiminin eş seviyelerde olduğudur.

FV/T sistemlerin sıcaklık ve ışınımına bağlı üretimlerindeki değişimlerin izlenebilmesi, bu tür uygulamaların yaygın olarak kullanılacağı lokasyonların tespiti için de önemlidir. Simülasyon çalışmaları için örnek uygulama kapsamında ele alınan global yatay ışınımın 1650 kWh/m<sup>2</sup> (panel üzerindeki ışınım ise 1831,5 kWh/m<sup>2</sup>) değerinde; Türkiye'nin ortalama sıcaklığının ise 13,1°C'de olduğu konum Burdur ve çevresidir. Fotovoltaik getirisinin sabit tutulduğu FV/T sistem uygulaması ele alındığında daha fazla ısı getiri elde etmek için yüksek sıcaklık ve ışınımın olacağı lokasyonların tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu duruma en uygun lokasyon Mersin'in Mut, Silifke ve Gülnar ilçeleridir. Benzer şekilde FV/T sistem kurulup ısı getirisinin sabit tutulacağı bir yapıya ihtiyaç varsa bu durumda daha fazla elektrikselsel getiri eldesi için düşük sıcaklık ve yüksek ışınımına ihtiyaç olacağından Van ilinin Merkez ilçesi ve Güney'i tercih edilebilir.

## 5. SONUÇ

Çalışma kapsamında, FV ve termal ayırık melez sistemler ve bütünleşik melez sistemlerin incelenmesine yönelik olarak simülasyon aracı geliştirilmiştir. Bu geliştirilen simülasyon aracındaki bazı girdilerin tespiti için ise PVSYST uygulaması bu aracın alt modülü olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda bu tür sistemlerin farklı kombinasyonları ile kısıtlı alanda ve ihtiyaca yönelik simülasyon sonuçları incelenmiş ve optimum sistem tespiti yapılmıştır. Sonrasında ışınım ve sıcaklık faktörlerinin bu sistemlere etkilerine yer verilmiş, Türkiye'nin farklı lokasyonları için uygun çözümler belirlenmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen uygulama ile ayırık ve bütünleşik melez sistemlerin elektriksel ve ısı enerjisi eldesinin hesaplanmasına yönelik simülasyonlar yapılmıştır. Yaygın olarak kullanılan mevcut simülasyon araçları yalnız termal veya yalnız fotovoltaik sistemlerin simülasyonuna yönelik olup, bunlarla optimizasyon yapılamamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen uygulama sayesinde optimum sistem tasarımı da yapılabilmekte olup, geliştirilen simülasyon aracı bütünleşik ve ayırık melez sistemlerin ekonomik ve teknik analizlerini birlikte yapmaya da elverişlidir. Bu simülasyon aracı ortalama tüketici ihtiyaçlarına ve kullanılabilir alan kısıtlarına göre simülasyon yapılmasına olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda hane bazında ortalama tüketim değerlerine göre ihtiyacı karşılanabilecek aile sayısı tespiti de geliştirilen simülasyon aracı ile sağlanabilmektedir. Simülasyon aracı ile optimum melez sistem seçimi için sıcaklığa ve ışınımına bağlı olarak Türkiye'nin uygun bölgelerinin tespiti de yapılabilmektedir.

Simülasyon için seçilen örnek uygulama senaryosunda doğal eğimli veya konstrüksiyonla eğim kazandırılmış tek sehpa üst üste dizilim ele alınmıştır. Konstrüksiyon ile yükseltilmiş sistemlerde artan konstrüksiyon maliyetinin önemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca bu sistemlerde kazandırılan yükseklikten kaynaklı rüzgâra karşı direnç artacağından, statik konularında problem yaşamamak için rüzgar bariyerleri kullanılabileceğinin altı çizilmiştir. Ayrıca düz çatılarda sıralı sistemler için, yakın gölgeleme etkisi incelenmiş ve yakın gölgelemede etkili faktörlere değinilmiştir.

Kısıtlı alan için yapılan çalışmaların sonucunda, aynı alana kurulacak termal kolektörün sağladığı enerji, fotovoltaik sistemin sağladığı enerjinin yaklaşık 5 katıdır. Ekonomik yönden analiz edildiğinde ise termal sistemin ekonomik getirisi ise fotovoltaik sistemin getirisinin 1,3 katıdır. Sıcak su ihtiyacı karşılanan aile sayısı ise elektrik ihtiyacı karşılanan aile sayısının yaklaşık 2 katıdır. Aynı alana kurulacak olan FV/T modüllerden sağlanan getiri ise her zaman için en yüksek sonucu vermektedir. Bu durumda da ısıl getirisinin sabit tutulduğu fotovoltaik sistem, elektrik getirisinin sabit tutulduğu FV/T sistemden toplamda daha fazla enerji, dolayısıyla daha fazla ekonomik getiri sağlamaktadır. İhtiyacı karşılanan aile sayısı da benzer şekilde bu sistemde en üst rakama ulaşmıştır. Aynı anda hem elektrik hem de ısı ihtiyacı karşılanan aile sayısı da ısıl sistem getirisi sabit FV/T sistemde en yüksek seviyededir. Bu sistem 7 ailenin hem elektrik hem de ısı ihtiyacının karşılanmasını sağlarken aynı zamanda 4 ailenin ek olarak ısı ihtiyacını da karşılamaktadır. Elektriksel getirisinin sabit tutulduğu FV/T sistemde ise elektrik ve ısı ihtiyacı karşılanan aile sayısı birbirine eşit ve 6 olarak bulunmuştur.

Bu kısımda gerçekleştirilen bir diğer analizde ise aynı çatının izdüşümü olan düz bir çatı ele alınarak bu çatıda kullanılabilir alan kısım için benzer analizler yapıldı. Eğim açısı sıfırlandığından transpozisyon faktörü %100 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda net ışınım global yatay ışınımına eşitlenmiştir. Hem alanın hem de ışınımın düşmesinden kaynaklı sistemlerin getirileri de düşmüştür. Verimlerde ise FV sistem dışında değişim gözlemlenmemiştir. FV sistemin veriminin %14,1'den %14,3'e yükselmesinin sebebi ise ışınımın düşmesiyle hücre sıcaklığının düşmesi, dolayısıyla verimin artmasıdır. Güneşten gelen toplam enerjinin yaklaşık %19'lük düşüşüyle birlikte fotovoltaik sistem dışındaki sistemlerde de benzer oranlarda düşüşler gözlemlenmiştir. Fotovoltaik sistemde ise bu oran %18'de kalmıştır. Üretilen ısıl enerji ve elektrik enerjisinin düşüşünden kaynaklı getiriler ve ihtiyacı karşılanan aile sayılarında da düşüşler gözlemlenmiştir. Sadece ısıl sistem uygulandığında ihtiyacı karşılanan aile sayısı 11'den 9'a düşmüş, sadece fotovoltaik sistem uygulandığında ihtiyacı karşılanan aile sayısı ise 6'dan 5'e düşmüştür. FV/T sistemlerden elektrik enerjisinin sabit tutulduğu senaryoda aile sayısı 6'dan 5'e düşerken, ısıl enerji getirisinin sabit tutulduğu durumda ise 7 ailenin tüm ihtiyaçları yerine 6 ailenin tüm enerji ihtiyaçları karşılanmıştır.



Elektriksel getirinin sabit tutulduğu FV/T sistemlerde benzer şekilde fazladan sıcak su ihtiyacı karşılanan aile sayısı 4'ten 3'e düşmüştür.

İhtiyaca yönelik yapılan simülasyon çalışması sonucunda, belirli bir alana kurulabilen, maksimum eş sayıdaki ailenin ihtiyacını karşılayabilecek sistemdeki ayrık ısı ve fotovoltaik sistem oranları belirlenmiştir. Ayrık melez sistemlerde 80 m<sup>2</sup>'lik bir alanın %59'u FV, %41'i ise ısı sistem kurulumuna kullanıldığında 4 ailenin ısı ve elektrik ihtiyacı birlikte karşılanmaktadır. Bu alana kurulacak termal getirinin sabit tutulduğu FV/T sistem ile 7 ailenin hem elektrik hem sıcak su ihtiyacı karşılanmakta olup, elektriksel getirinin sabit tutulduğu FV/T sistemde ise bu değer 6 olarak hesaplanmıştır. Isıl getirisi sabit bir FV/T sistemin ekonomik getirisi, ayrık melez sistem getirisinin yaklaşık 2,3 katıdır. Isıl getirisi sabit FV/T sistem ile donatılan yaklaşık 40 m<sup>2</sup> alandaki çatı sayesinde ayrık melez sistemle eş sayıda ailenin tüketimi karşılanabilmekte olup, 4 ailenin ihtiyacına ek olarak 2 ailenin sıcak suyu da bütünleşik melez sistem sayesinde fazladan karşılanabilmektedir. Bu durumda ekonomik getiri, ayrık melez sistemin getirisinden %13 fazla bulunmuştur.

Sistem yatırım maliyetlerinin geri dönüş süreleri hesaplandığında FV/T sistemler daha avantajlıdır. Benzer şekilde 4 ailenin elektrik ve ısı ihtiyacının birlikte karşılandığı uygulamalarda, 80 m<sup>2</sup>'lik alanın %59'u FV, %41'i ise termal sistem için ayrıldığındaki ayrık melez sistem toplam maliyeti, yaklaşık yarı alanda kurulan bütünleşik melez sistemin maliyetinin 1,4 katıdır. Bütünleşik melez sistemin geri dönüş süresi ayrık melez sistemin geri dönüş süresinin %80'i olup, geri dönüş süreleri hesabında FV/T sistemde fazladan üretilen enerjinin de bedeli yıllık getiriden düşülmüştür. Bütünleşik FV/T sistemin yıllık ekonomik getirisi daha düşük olsa da yatırım maliyetinin de düşük olması sebebiyle ayrık melez sistemden 2 yıl daha kısa sürede yatırımın kendisini geri ödemekte olduğu bulunmuştur.

Isıl enerjinin sabit tutulduğu FV/T sistemler incelendiğinde; Şekil 4.9'dan faydalanılarak elde edilen değerlerde, 1387 kWh/m<sup>2</sup> ışınlam ve 20°C dış ortam sıcaklığında (minimum ışınlam ve maksimum sıcaklık senaryosu) elektriksel getiri 17.423 kWh iken, 1972 kWh/m<sup>2</sup> ışınlam ve 4°C dış ortam sıcaklığında, elektriksel enerji değeri 24.418 kWh ile en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Dolayısıyla, termal

getirinin sabit tutulduğu FV/T sistemde daha fazla elektrik getirisi amaçlandığında, düşük dış ortam sıcaklık ve yüksek ışıınımı sağlayan bölgeler tercih edilmelidir. Elektrik getirisinin sabit tutulduğu senaryoda ise 1972 kWh/m<sup>2</sup> ışıınım ve 20°C dış ortam sıcaklığında, ısııl enerji değeri 63.617 kWh ile en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Bu durumda, ısııl enerjinin en yüksek seviyede istendiği elektriksel enerjinin sabit tutulduğu FV/T için yüksek dış ortam sıcaklığı ve yüksek ışıınımın olduğu bölgeler tercih edilmelidir.

Sıcaklık ve ışıınımın FV/T sistemlere etkisi incelenirken ışıınımın sabit olduğu değeri olan ve aynı zamanda teknik ve ekonomik kabul edilebilirliğin yaklaşık sınırı 1680 kWh/m<sup>2</sup>'de de analizler yapılmıştır. Isıl enerjinin sabit tutulduğu FV/T sistemlerde sabit ışıınım için sıcaklık artışıyla elektrik üretiminin azalması beklenmektedir. Çünkü güneşten gelen enerji değışmemesine rağmen ortam sıcaklığı arttıkça fotovoltaik sisteme ait verim düşerek bu sistemden elde edilen elektriksel enerjinin de düşüşü gerçekleşmektedir. Her 1°C'lik artış için elektriksel enerjideki bu düşüş 67 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu sayede sıcaklık artışının fotovoltaik sistemler üzerindeki negatif etkisi de sayısal olarak ispat edilmiştir. Elektrik enerjisinin sabit tutulduğu FV/T sistemler senaryosunda ise sabit ışıınımda sıcaklığın değışimiyle güneşten gelen ışıınımın önemli bir kısmı ısııl enerjiye dönüşmekte dolayısıyla da ısı kayıpları azalmaktadır. Bu durumda 1°C'lik artış için ısııl enerjideki artış yaklaşık 2094 kWh olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak fotovoltaik ve termal sistemlerin kombinasyonu ve bunların melez olarak kurulduğu yapıların kıyaslamasına yer verilmiş ve optimum dizayn durumunda bile kısıtlı alan için FV/T sistemlerin daha yüksek performanslı ürünler olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede geliştirilen simülasyon aracı ile elektrik ve sıcak su ihtiyacına göre çatı alanının optimum seviyede kullanımını sağlayacak yapı oluşturulmuştur. Sistem toplam verimleri göz önünde bulundurulduğunda sadece ısııl sistem kurulduğunda verim %73,7 olurken, sadece fotovoltaik sistemin verimi %14,1 olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan bütünleşik melez FV/T sistemlerden elektriksel getirinin sabit tutulduğu durumdaki toplam verim %57,1 değerine ulaşırken ısııl getirinin sabit tutulduğu durumdaki toplam verimin %88,9 olarak en yüksek değere ulaştığı tespit edilmiştir. Sistem toplam verimlerindeki bu

sonuçlar, ısıll getirinin sabit tutulduğu btnleğik melez FV/T sistemin en yüksek performansla alığtığını kanıtlamaktadır.

İleride bu konuda yapılacak alığmalarda gerek ısıll gerekse fotovolttaik sistemlere ait, bu alığmalarda analizlere dahil edilmeyen parametrelerin sistem verimi üzerindeki etkilerine de yer verilmesiyle yapılacak analizlerde daha hassas sonuçlar elde edilebilecektir. Diğer yandan seçilen sistemlerde gneğ kolektörleri ve panelleri dığındaki kazan, inverter vb. dığ tesisatlara ait kayıpların ve maliyetlerin simülasyona dahil edilmesi, fizibilite alığmalarındaki geri ödeme sürelerinin hesabının daha doğru yapılmasını sağlayabilecektir.

Son olarak, bu alığma kapsamındaki analizlerde kullanılan yıllık ortalama gneğ ığınımı değerleri yerine mevsimsel hatta aylık ığınım değerleri dikkate alınarak analizlerin yapılması, bu alığmada geliğtirilen simülasyon aracının daha doğru sonuçlar vermesini sağlayabilecektir. Çünkü geiğ rejimlerinde, aylara bağlı kalınarak sistemde devreye girecek diğer destek sistemlerinin (kazan, inverter, vs.) verimleri, sistemin performansı üzerinde büyük etki doğuracaktır.

## KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] DUMAN, Fatma, Güneş pili-termal (PV-T) hibrit sistemin optimizasyonunun deneysel olarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, s.37-52, 2014.
- [2] ENGİN, D., ÇOLAK M., Modeling and performance optimization of photovoltaic and thermal collector hybrid system, Turk J Elec Eng & Comp Sci., vol. 24, s.3524 – 3542, 2015.
- [3] MUTLUAY, Benan, Bir fotovoltaik güç santrali tasarımının sistem simülasyonu ve teknoekonomik fizibilitesi, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s.42-62, 2016.
- [4] GÜLTUNA, Kıvılcım M., Gürsu-Bursa Fotovoltaik Güç Santrali'nin Simülasyonu; tekno-ekonomik ve çevresel optimizasyonu, Yüksek lisans tezi, Başkent Üniversitesi, Ankara, s.3-12, 2015.
- [5] PATHAK, M.J.M., SANDERS, P.G., PEARCE, J.M , Optimizing limited solar roof access by exergy analysis of solar thermal, photovoltaic, and hybrid photovoltaic thermal systems, Applied Energy, no.120, s.115-124, 2014.
- [6] HERRANDO, M., CHRISTOS, N. M., KLAUS H., A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance, Applied Energy, no.122, s.288–309, 2014.
- [7] HERRANDO, M., MARKIDES, Christos N., Hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heat and power provision in the UK: Techno-economic considerations, Applied Energy, no.161, s.512–532, 2016.
- [8] GOOD, C., CHEN, J., DAI, Y., HESTNES, Anne G., Hybrid photovoltaic-thermal systems in buildings – a review, Energy Procedia, no.70, s.683-690, 2015.

- [9] DUPEYRAT, P., MENEZO, C., ROMMEL, M., HENNING, Hans M., Efficient single glazed flat plate photovoltaic–thermal hybrid collector for domestic hot water system, *Solar Energy*, no.85, s.1457–1468, 2011.
- [10] DAGHIGH, R., RUSLAN, Mohd H., ZAHARIM, A., SOPIAN, K., Monthly performance of a photovoltaic thermal (PV/T) water heating System, *Recent Researches in Energy & Environment*, s.298-303, 2011.
- [11] BUONOMANO, A., CALISE, F., VICIDOMINI, M., Design, simulation and experimental investigation of a solar system based on PV panels and PVT collectors, *Energies*, no.497, s.2-17, 2016.
- [12] BABATUNDE, Akinola .A., ABBASOĞLU, S., Evaluation of field data and simulation results of a photovoltaic system in countries with high solar radiation, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, no.23, s. 1608-1618, 2015.
- [13] ÖNER, İlhan V., YEŞİLYURT, Muhammet K., YILMAZ, Efe Ç., ÖMEROĞLU, G., Photovoltaic thermal (PVT) solar panels, *IJNTR*, vol.2, no.12, s. 13-16, 2016.
- [14] SHARMA, S., RABIA, S., CHUAHAN, A., PATHAK, A.K., Photovoltaic thermal (PV/T) and its recent developments, *IJSTA*, vol.2, 4, s.27-32, 2016.
- [15] RAMOLIYA, Jaydeep V., Performance of grid-connected solar photovoltaic plant using PVSYST Software, *JETIR*, vol.2, no.2, s.372-378 , 2015.
- [16] SAUER, Kenneth J., ROESSLER, T., HANSEN, CLIFFORD W., Modeling the irradiance and temperature dependence of photovoltaic modules in PVsyst, *IEEE Journal of Photovoltaics*, no.5, s.152-158, 2015.
- [17] TURKAY, Y., ACAR, Halil İ., A Solar domestic hot water system simulation study in Sivas, Turkey, *Politeknik Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1, s.37-43, 2004.
- [18] CANAN, F., Mimaride Fotovoltaik Panel Uygulamaları, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Ekim 2003, Kayseri, Bildiriler Kitabı, no.330, s. 43-52, 2003

- [19] Efficiency enhancements to define solar photovoltaic technology roadmap for the next five years, <https://www.evwind.es/2014/10/13/efficiency-enhancements-to-define-solar-photovoltaic-technology-roadmap-for-the-next-five-years/48049>, (Erişim: 03.02.2017)
- [20] Top-10 solar module suppliers in 2016, <https://www.pv-tech.org/editors-blog/top-10-solar-module-suppliers-in-2016> (Erişim: 18.02.2017)
- [21] Güneş Enerjisi Isıl Uygulamalar,  
<http://eng.harran.edu.tr/~hbulut/Gunes1.pdf> (Erişim: 08.01.2018)
- [22] Solar Hot Water Heating,  
<https://tr.pinterest.com/pin/333618284890807073/> (Erişim: 16.07.2017)
- [23] Canadian Solar Module Datasheet - CS6K- 275 |280 |285 M ,  
[https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/v5.5/Canadian\\_Solar-Datasheets-CS6K-M-v5.52en.pdf](https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/v5.5/Canadian_Solar-Datasheets-CS6K-M-v5.52en.pdf) (Erişim: 22.12.2017)
- [24] Solimpeks Powervolt,  
<http://www.solimpeks.com/product/volther-powervolt/> (Erişim: 04.11.2017)
- [25] ÇAKIR, G., KILKIş, B., BIYIKOĞLU, A., PV/T Sistemlerinin Performans Deneyleri İçin Standart Geliştirilmesi, ULİBTK17, s. 3, 2017.
- [26] PVSYST Uygulaması, <http://www.pvsyst.com/en/>, (Erişim: 03.01.2017)
- [27] Jinko Solar Module Datasheet - JKM270P-60,  
[https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM270P-60\(4BB\).pdf](https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM270P-60(4BB).pdf)  
(Erişim: 22.12.2017)
- [28] KINAY, Olcay, Güneş Enerjisi Ders Notları, 2014
- [29] SARHADDI, F., FARAHAT, S., AJAM, H., BEHZADMEHR, A., ADELI MAHDAVI, M., An Improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, Applied Energy 87, s. 2328-2339, 2010.

- [30] MUZATHIK, A. M., Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation, International Journal of Energy Engineering, Vol. 4, s. 151-158, 2014.
- [31] Heat Transfer,  
<http://calliope.dem.uniud.it/CLASS/DES-IND-PLA1/CRHT.pdf>  
(Erişim: 04.03.2018)
- [32] Dört Kişilik Ailenin Elektrik Tüketimi Araştırması,  
<https://gazelektrik.com/faydali-bilgiler/elektrik-tuketimi> (Erişim: 02.02. 2018)
- [33] EPDK - Elektrik Piyasası Tarifeler Listesi,  
<https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-1/tarifeler>  
(Erişim: 23.04.2018)
- [34] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) Belediye Su İstatistikleri – 2010,  
<https://www.haberler.com/turkiye-de-gunluk-su-tuketimi-kisi-basina-217-3390678-haberi/> (Erişim: 23.04.2018)
- [35] 1 m<sup>3</sup> doğal gazdan kaç kWh enerji elde edilir?,  
<https://gazelektrik.com/s-s-s/dogalgaz-metrekup-fiyati>  
(Erişim: 24.04.2018)
- [36] Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları,  
<http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/doviz+kurlari/gosterge+niteligindeki+merkez+bankasi+kurlarii>  
(Erişim: 01.06.2018)
- [37] Solimpeks 2017 Fiyat Listesi,  
[https://www.isiburada.com/ckfinder/userfiles/files/SOLI%CC%87MPEKS%202017-1%20FI%CC%87YAT%20LI%CC%87STESI%CC%87%20\(1\).pdf](https://www.isiburada.com/ckfinder/userfiles/files/SOLI%CC%87MPEKS%202017-1%20FI%CC%87YAT%20LI%CC%87STESI%CC%87%20(1).pdf)  
(Erişim: 03.06.2018)
- [38] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı – Bilgi Merkezi,  
<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> (Erişim: 03.01.2018)

- [39] SOLARGIS, <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview/>  
(Erişim: 02.02.2018)
- [40] Meteoroloji Genel M¼d¼rl¼ę¼ – Resmi İstatistikler,  
<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx>  
(Erişim: 02.02.2018)
- [41] T¼rkiye’de G¼neř Santrali Kurulabilecek Alanlar,  
<http://www.limitsizenerji.com/gunes-santrali-tarlası/>, (Erişim: 04.01.2017)





## EK-2: Düz Çatı Simülasyon Sonuçları Çıktı Ekranları

Tüm çatının düz kolektör ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı

Kurulabilecek Alan:	72 m <sup>2</sup>
Talep Edilen Su Sıcaklığı:	65 °C
Giriş Suyu Sıcaklığı:	15 °C
Yıllık Işınım:	1.650,0 kWh/m <sup>2</sup>
Güneşten Gelen Toplam Enerji:	118.800 kWh
Solar Kolektörün Kullandığı Verimli Enerji:	87.556 kWh
Solar Kolektörün Kullandığı Verimli Enerji:	315.200.160 kJ
Yıllık Sağlanabilecek Sıcak Su Miktarı:	1.508.135 litre (kg)
Bu Enerjiyi Sağlayacak Toplam Doğalgaz Miktarı:	8.228,9 m <sup>3</sup>
Toplam Doğalgaz Bedeli:	10.039,3 TL
Sıcak Suyu Karşılacak Toplam Aile Sayısı:	9,5

Tüm çatının FV panel ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı

Kullanılabilir Alan:	72 m <sup>2</sup>
Ortam Sıcaklığı:	25 °C
Yıllık Gelen Işınım:	1.650,0 kWh/m <sup>2</sup>
Rüzgar Hızı:	3,0 m/s
Hücre Sıcaklığı:	51,5 °C
Referans Sıcaklık:	25,0 °C
Modül Sıcaklık Katsayısı:	0,32 %/°C
Modül Referans Verim:	15,6 %
Fotovoltaik Panel Verimi:	14,3 %
Toplam Karşılacak Elektrik İhtiyacı:	16.960,1 kWh
Toplam Elektrik İhtiyacı Karşılacak Aile Sayısı:	5,6
Karşılacak Elektrik Şebekeden Alınması Durumunda Değeri:	7.822,0 TL

Tüm çatının FV/T ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı  
(ısı getiri sabit)

Ortam Sıcaklığı:	25 °C
Yıllık Gelen Işınım:	1.650,0 kWh/m <sup>2</sup>
Rüzgar Hızı:	3,0 m/s
Hücre Sıcaklığı:	51,5 °C
Referans Sıcaklık:	25,0 °C
Modül Sıcaklık Katsayısı:	0,32 %/°C
Modül Referans Verim:	15,6 %
Fotovoltaik Panel Verimi:	14,3 %
Elektrik Enerjisi:	16.960,1 kWh
Yüzey Alanı:	72,0 m <sup>2</sup>
Güneşten Gelen Toplam Enerji:	118.800,0 kWh
Kayıp Enerji:	101.839,9 kWh
Isı Transfer Katsayısı:	53,34 W/m <sup>2</sup> - K
Yeni Isı Transfer Katsayısı (FV/T):	26,67 W/m <sup>2</sup> - K

Toplam Isı Enerji İhtiyacı:	315.200.160 kJ
Toplam Isı Enerji İhtiyacı:	87.555,6 kWh
FV + Kayıp Enerji:	31.244,4 kWh
Hücre Sıcaklığı:	31,8 °C
Elektrik Enerjisi:	18.127,7 kWh
Kayıp Enerji:	13.116,7 kWh
FV + Kayıp Enerji:	31.244,4 kWh
Toplam Elektrik İhtiyacı Karşılacak Aile Sayısı:	6,0
Karşılacak Elektrik Şebekeden Alınması Durumunda Değeri:	8.360,5 TL
Termal Enerji:	87.555,6 kWh
Toplam Doğalgaz Bedeli:	10.039,3 TL
Sıcak Suyu Karşılacak Toplam Aile Sayısı:	9,5

Tüm çatının FV/T ile kaplanması durumundaki çıktı ekranı  
(elektrik getiri sabit)

Ortam Sıcaklığı:	25 °C
Yıllık Gelen Işınım:	1.650,0 kWh/m <sup>2</sup>
Rüzgar Hızı:	3,0 m/s
Hücre Sıcaklığı:	51,5 °C
Referans Sıcaklık:	25,0 °C
Modül Sıcaklık Katsayısı:	0,32 %/°C
Modül Referans Verim:	15,6 %
Fotovoltaik Panel Verimi:	14,3 %
Elektrik Enerjisi:	16.960,1 kWh
Yüzey Alanı:	72,0 m <sup>2</sup>
Güneşten Gelen Toplam Enerji:	118.800,0 kWh
Kayıp Enerji:	101.839,9 kWh
Isı Transfer Katsayısı:	53,34 W/m <sup>2</sup> - K
Yeni Isı Transfer Katsayısı (FV/T):	26,67 W/m <sup>2</sup> - K

Toplam Elektrik İhtiyacı:	16.960,0 kWh
Hücre Sıcaklığı:	51,5 °C
Ortam Sıcaklığı:	25 °C
Yıllık Gelen Işınım:	1.650,0 kWh/m <sup>2</sup>
Yüzey Alanı:	72,0 m <sup>2</sup>
Güneşten Gelen Toplam Enerji:	118.800,0 kWh
Kayıp:	50.920,0 kWh
Termal:	50.920,0 kWh
Elektrik Enerjisi:	16.960,0 kWh
Toplam Elektrik İhtiyacı Karşılacak Aile Sayısı:	5,6
Karşılacak Elektrik Şebekeden Alınması Durumunda Değeri:	7.822,0 TL
Termal Enerji:	50.920,0 kWh
Toplam Doğalgaz Bedeli:	5.838,6 TL
Sıcak Suyu Karşılacak Toplam Aile Sayısı:	5,5