

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

**FOTOVOLTAİK ELEKTRİK ÜRETİMİNDE PANEL SOĞUTULMASININ VE ATIK
ISININ DEĞERLENDİRİLMESİNİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

SALİH TÜRKEY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. HASAN HÜSEYİN ERDEM**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK ELEKTRİK ÜRETİMİNDE PANEL SOĞUTULMASININ VE ATIK
ISININ DEĞERLENDİRİLMESİNİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ**

Salih TÜRKAY tarafından hazırlanan tez çalışması 21.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şaban Pusat
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Yılmaz
Marmara Üniversitesi

Türkiye’de uzun yıllardır yaygınlığı bilinen güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin yanı sıra son dönemde elektrik üretiminde kullanılan PV teknoloji de talep görmektedir. Özellikle ekonomide dışa bağıllığın azaltılması noktasında, doğalgaz ve elektrik iletiminin mevcut olmadığı durumlarda bu tip yenilenebilir enerji teknolojileri büyük önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerjinin daha da yaygınlaşması, buradan üretilen enerjinin de mümkün olduğu kadar verimli kullanılmasıyla, ekonomik katkı ile beraber çevreye de karbon salımlarının azaltılması hususunda fayda sağlamaktadır.

Güneş enerjili su ısıtma sistemlerine göre çok daha maliyetli ve regülasyona tabii olan PV sistemlerinin, hem teknik hem de ekonomik açıdan detaylı değerlendirilmesi önemli bir husustur. Son yıllarda PV sistemlerinin maliyetleri düşmesine rağmen, halen yüksek yatırım maliyeti gerektirmektedir. Ayrıca bu yatırım maliyeti büyük oranda yabancı para birimlerine ve finansmana bağlıdır. Getiri yönünden ise sadece elektrik fiyatları ekonomik girdi oluşturmaktadır. Bu nedenlerle teknik değerlendirmenin yanında, güncel durumdaki göreceli yüksek faiz ve enflasyon ortamındaki ekonomik performansa da dikkat edilmelidir. Bu çalışmaya beraber, güncel durumda PV ve PV-T sistemlerinin teknik ve ekonomik değerlendirilmesi ve bu değerlendirmeler yöntem oluşturulması amaçlanmıştır.

Tez çalışmam için verdiği destekten ve ilgisinden dolayı, çalışmamın danışmanı Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM’ e teşekkür ederim. Ayrıca yine göstermiş olduğu ilgi ve destekten ötürü Doç. Dr. Şaban PUSAT’a da teşekkürlerimi sunarım.

Önceden Yıldız Teknik Üniversitesi’nde almış olduğum lisans ve akabindeki yüksek lisans eğitimiyle; çalıştığım sektörde oldukça faydalı ve değerli bir çalışan olarak katkı sağlıyorum. Bu yöndeki kazanımlarımdan dolayı bana iyi bir gelecek sağlayan öncelikle Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı ve öğretim görevlilerine; ardından bütün Yıldız Teknik Üniversitesi, öğretim görevlileri ve yetkililerine teşekkür ederim.

Mayıs, 2019

Salih TÜRKEY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	6
TEMEL KAVRAMLAR	6
2.1 Güneş Enerjisi ile Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemleri	7
2.2 Isıl Güneş Enerjisi Sistemleri	8
2.3 Hibrit (PV+Isıl) Enerji Sistemleri	8
2.3.1 Sıvı Akışkanlı Hibrit Sistemler	9
2.3.2 Gaz Akışkanlı Hibrit Sistemler	10
BÖLÜM 3	11
TEKNİK VE FİNANSAL DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ	11
3.1 Teknik Değerlendirme Yaklaşımları	11
3.2 Ekonomik Değerlendirme Yaklaşımları	14

BÖLÜM 4	16
ELEKTRİK VE ISIL ENERJİ ÜRETİMLERİNİN DENEYSEL ANALİZİ.....	16
4.1 Isıl Enerji Analizi	16
4.2 Elektrik Enerjisinin Analizi	24
BÖLÜM 5	28
UYGULAMAMA ALANLARINDA DEĞERLENDİRME	28
5.1 Büyük Kapasite için Uygulama Analizi	28
5.1.1 Uygulama Özeti.....	28
5.1.2 Teknik Analiz	29
5.1.3 Ekonomik Analiz.....	34
5.2 Orta Kapasite için Uygulama Analizi	38
5.2.1 Uygulama Özeti.....	39
5.2.2 Teknik Analiz	39
5.2.3 Ekonomik Analiz.....	42
5.3 Küçük Kapasite için Uygulama Analizi.....	46
5.3.1 Uygulama Özeti.....	46
5.3.2 Teknik Analiz	46
5.3.3 Ekonomik Analiz.....	49
5.4 Duyarlılık Analizi.....	53
BÖLÜM 6	56
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGE LİSTESİ

m^2	Metrekare
m	<i>Metre</i>
%	Yüzde
W	Watt
W_p	Watt peak
W_e	Watt elektrik enerjisi gücü
W_t	Watt ısı enerjisi gücü
kW	Kilo Watt
kWh	Kilo Wattsaat
MW	Mega Watt
€	Euro
$^{\circ}C$	Santigrad
E_d	Ortalama günlük elektrik üretimi
E_m	Ortalama yıllık elektrik üretimi
H_d	Modül tarafından alınan günlük ortalama ışıınım toplamı (kWh/m^2)
H_m	Modül tarafından alınan aylık ortalama ışıınım toplamı (kWh/m^2)
H	İşınımın enerjisi
$(^{\circ})$	Eğim açısı
r	İskonto oranı
T_c	Hücre çalışma sıcaklığı
T_a	Hava sıcaklığı
G	İşınım Gücü
η_p	Panel verimi
Y_f	Sistemin ürettiği elektrik enerjisi
Y_r	Sistemin referans elektrik üretimi
PR	Performans Rasyosu

KISALTMA LİSTESİ

ABEÜ	Aylık Brüt Elektrik Üretimi
DHW	Domestic Hot Water
EPDK	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
İGDAŞ	İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş.
IRR	Internal Rate of Return (İç karlılık Oranı)
kW _p	Kilo Watt pik elektrik gücü
kW _e	Kilo Watt elektrik enerjisi gücü
kW _t	Kilo Watt ısı enerjisi gücü
LCOE	Levelised Cost of Energy (Enerjinin maliyet seviyesi)
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature (Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı)
NPV	Net Present Value (Net Bugünkü Değer)
PR	Performans Rasyosu
PV	Photovoltaic (Fotovoltaik)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
PV-T	Photovoltaic-Thermal
TBEÜ	Toplam Brüt Elektrik Üretimi
TEP	Ton Petrol Eşdeğeri
TL	Türk Lirası
USD	Amerikan Doları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Dünya üzerindeki direk normal güneş ışınımı dağılımı.....	6
Şekil 2.2	Fotovoltaik sistemlerin içyapısı ve etki	7
Şekil 2.3	Hibrit PV ve sıcak su uygulaması.....	8
Şekil 2.4	Sıvı akışkanlı hibrit enerji sistemi.....	10
Şekil 2.5	Gaz akışkanlı hibrit enerji sistemi	10
Şekil 4.1	Örnek ısı tahliyesi az olan yapıştırma PV panel uygulaması	17
Şekil 4.2	2 kW _p gücündeki standart PV panel ölçümü 15/05/2016.....	18
Şekil 4.3	2 kW _p gücündeki yapıştırma PV panel 15/05/2016.....	18
Şekil 4.4	2 kW _p gücündeki standart PV panel ölçümü 7/05/2016	19
Şekil 4.5	2 kW _p gücündeki yapıştırma PV panel 7/05/2016.....	19
Şekil 4.6	2 kW _p gücündeki standart PV panel ölçümü 10/06/2016	20
Şekil 4.7	2 kW _p gücündeki yapıştırma PV panel 10/06/2016.....	20
Şekil 4.8	2 kW _p gücündeki ortalama PV panel ölçümü 8/06/2016	21
Şekil 4.9	2 kW _p gücündeki yapıştırma PV panel ortalama örneği 8/06/2016.....	21
Şekil 4.10	2 kW _p gücündeki standart PV panel ölçümü 12/07/2016.....	22
Şekil 4.11	2 kW _p gücündeki yapıştırma PV panel 12/07/2016	23
Şekil 4.12	2 kW _p gücündeki ortalama PV panel ölçümü 16/07/2016.....	23
Şekil 4.13	2 kW _p gücündeki yapıştırma PV panel ortalama örneği 16/07/2016	24
Şekil 4.14	2 kW _p sistem elektrik üretimlerinin mayıs ayı karşılaştırması.....	25
Şekil 4.15	2 kW _p sistem elektrik üretimlerinin haziran ayı karşılaştırması	26
Şekil 4.16	2 kW _p sistem elektrik üretimlerinin temmuz ayı karşılaştırması.....	26
Şekil 5.1	10 MW _e için aylık toplam ısınım ve elektrik üretim dağılımı.....	30
Şekil 5.2	10 MW _e için ısı etkisinden dolayı oluşan kayıpların göz önünde bulundurulduğu aylık elektrik üretim ve performans rasyosu dağılımı	30
Şekil 5.3	Sistemin aylık elektrik dağılımının normal elektrik üretimi ve soğutulmasıyla beraber oluşan farkı	32
Şekil 5.4	Aylık toplam ısınım ve ısı üretim dağılımı	33
Şekil 5.5	Proje ömrü boyunca PV sisteminin hesaplanan elektrik üretim değerleri.....	34
Şekil 5.6	Proje ömrü boyunca PV sistemi ve soğutma ile artan elektrik üretiminin dağılımı	35
Şekil 5.7	PV sisteminin proje ekonomik ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı	36
Şekil 5.8	PV-T sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı	37
Şekil 5.9	1 MW _e için aylık toplam ısınım ve elektrik üretim dağılımı	40

Şekil 5.10 1 MW _e için ısı etkisinden dolayı oluşan kayıpların göz önünde bulundurulduğu aylık elektrik üretim ve performans rasyosu dağılımı	40
Şekil 5.11 Sistemin aylık elektrik dağılımının normal elektrik üretimi ve soğutulmasıyla beraber oluşan farkı	41
Şekil 5.12 Aylık toplam ısıtım ve ısı üretim dağılımı	42
Şekil 5.13 Proje ömrü boyunca 1 MW _e PV sisteminin hesaplanan elektrik üretim değerleri	42
Şekil 5.14 Proje ömrü boyunca 1 MW _e PV sistemi ve soğutma ile artan elektrik üretiminin dağılımı	43
Şekil 5.15 1 MW _e PV sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı	44
Şekil 5.16 PV-T sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı	44
Şekil 5.17 2 kW _e sistem için aylık toplam ısıtım ve elektrik üretim dağılımı	47
Şekil 5.18 2 kW _e sistem için ısı etkisinden dolayı oluşan kayıpların göz önünde bulundurulduğu aylık elektrik üretim ve performans rasyosu dağılımı	48
Şekil 5.19 2 kW _e sistemin aylık elektrik dağılımının normal elektrik üretimi ve soğutulmasıyla beraber oluşan farkı	48
Şekil 5.20 2 kW _e sistemin aylık toplam ısıtım ve ısı üretim dağılımı	49
Şekil 5.21 Proje ömrü boyunca 2 kW _e PV sisteminin hesaplanan elektrik üretim değerleri	50
Şekil 5.22 Proje ömrü boyunca 2 kW _e PV sistemi ve soğutma ile artan elektrik üretiminin dağılımı	50
Şekil 5.23 2 kW _e PV sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı	51
Şekil 5.24 2 kW _e PV-T sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı	52

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 PVGIS verileri	12
Çizelge 5.1 10 MW _e için sistem parametreleri.....	29
Çizelge 5.2 Sıcaklık parametreleri	31
Çizelge 5.3 Ekonomik analizde kullanılan değerler	37
Çizelge 5.4 Ekonomik Sonuçlar	38
Çizelge 5.5 1 MW _e için sistem parametreleri.....	39
Çizelge 5.6 Ekonomik analizde kullanılan değerler	45
Çizelge 5.7 Ekonomik Sonuçlar	45
Çizelge 5.8 2 kW _e için sistem parametreleri	47
Çizelge 5.9 Ekonomik analizde kullanılan değerler	52
Çizelge 5.10 Ekonomik sonuçlar	53
Çizelge 5.11 10 MW _e PV için duyarlılık analizi sonuçları.....	54
Çizelge 5.12 1 MW _e PV için duyarlılık analizi sonuçları.....	54
Çizelge 5.13 2 kW _e PV için duyarlılık analizi sonuçları	55

FOTOVOLTAİK ELEKTRİK ÜRETİMİNDE PANEL SOĞUTULMASININ VE ATIK ISININ DEĞERLENDİRİLMESİNİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ

Salih TÜRKAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM

Bu çalışmada, literatürdeki araştırmalar ve alınan ölçümlerle beraber, PV ve PV-T yatırımlarının üç farklı kapasitede; teknik ve ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır. Kapsamda, bu değerlendirmeye beraber PV ve PV-T sistemlerinin karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Teknik ve ekonomik değerlendirmeler, tüm kapasiteler için PV-T sistemlerinin PV sistemlerine göre ekonomik bir avantaj sağlamadığını göstermiştir. PV-T sistemlerinin teknik açıdan kullanılabilirliğinin kısıtlı olmasının temel sebebi elde edilen ısının düşük sıcaklıklı olmasıdır. Ekonomik açıdan ise analize etki eden yine teknik parametreler ve yüksek maliyetlerdir. Bu durumların sonucu olarak, güneş kolektörlerinin ve PV sistemlerinin yaygın kullanımı varken; PV-T yatırımlarının çok azdır.

Değerlendirmelerde daha iyi sonuç veren PV yatırımları ise “İç Karlılık Oranı (IRR)” ve “Geri Ödeme Süresi” bakımından piyasada uygun olarak kabul edilen şartları sağlamasına rağmen; %20 iskonto oranı ve yıllık %5 enerji fiyat artışı şartlarında hesaplanan “Net Bugünkü Değer (NPV)” göstergesinin negatif sonuç vermesi dolayısıyla ekonomik açıdan yapılabilirlik göstermemektedir. Dolayısıyla bu durum, NPV hesabında kullanılan iskonto ve enerji fiyat artış oranlarının değişik varyasyonlarda olduğu duyarlılık analizi yapılarak incelenmiştir. Analiz, iskonto oranının %10-%20, yıllık enerji fiyat artışının %5 ile %15 arasındaki farklı seviyelerinde hesaplanmıştır. Her bir seçili kapasite

için 30 farklı NPV elde edilmiştir. Genel olarak iskonto oranının %10 seviyelerine, fiyat artış oranının da %15'e yakın olduğu varyasyonlarda sonuçlar haliyle ekonomik açıdan uygun olmaktadır. Teknik açıdan zaten uygun olan PV projelerinin, ekonomik açıdan da uygun olduğu varyasyonlar gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: PV, PV-T, PV panel soğutulması, PV panel atık ısının değerlendirilmesi, teknik değerlendirme, ekonomik değerlendirme ve analiz.

**TECHNICAL AND FINANCIAL ASSESSMENT OF MODULE COOLING AND
WASTE HEAT RECOVERY OF PV ELECTRICITY GENERATION**

Salih TÜRKAY

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ERDEM

In this study, along with the literature and measurement data; technical and financial assessments have been completed for three different capacities of PV and PV-T investments. In addition to the assessments, PV and PV-T systems were compared in the scope of the study. According to the all technical and financial assessments completed, the results of PV systems are better than PV-T systems. The PV-T systems technically are not viable, the main reason is due to low-grade heat attained from systems. Economic parameters of the analysis and high investment cost affect the performance of the PV-T systems for the financial evaluation. As a result of these circumstances; it is considered that PV-T investments are not widespread while PV and solar thermal projects are popular.

Although the Internal Rate of Return (IRR) and Simple Pay-back (SPB) values of the PV investments providing better results are in line with the market expectations; since the PV investments' Net Present Value (NPV), calculated with a 20% discount rate and a 5% annual energy price increment, is negative, the investments are not feasible for the economic perspective. Therefore, this situation of NPV has been evaluated with a sensitivity analysis consisting of the variable level of the discount rate and annual energy price increment, 10%-20% and 5%-15%, respectively. The NPV has been analyzed with these variables and 30 different results has been attained. Inherently, the NPV results are eligible where the discount rate and annual energy price increment are close to 10%

and 15%, respectively. The viability ranges of the NPV of the PV investments have been shown in the sensitivity analysis.

Keywords: PV, PV-T, PV module cooling, PV module waste heat recovery, technical assessment, financial assessment, economic analysis.

1.1 Literatür Özeti

Uzun yıllardır çalışmalara konu olan fotovoltaik etkiye dayalı elektrik üretim sistemleri için özellikle kullanılan fotovoltaik malzeme ve performansı üzerine çok fazla sayıda çalışma yapılmış olup, esas amaç aynı ısınım etkisinde daha fazla elektrik elde etmek olmuştur. Bu noktadaki verim unsuruna artan sıcaklığın olumsuz etkisinin de gözlemlenmesiyle beraber elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik panellerin soğutulmasıyla elde edilebilecek verim artışının değerlendirmesi konusunda çok fazla literatür çalışması bulunmakla beraber, bu soğutmanın sağladığı elektrik gücü ve ekonomik kazanç üzerine durulmamıştır. Fakat buradan kazanılan ısının kullanılmasına yönelik çalışma sayısı göreceli olarak oldukça azdır.

Ramos, Chatzopoulou, Guarracino, Freeman ve Markides tarafından [1] de verilen çalışmada hibrit PV-T sistemlerinin elektrik verimlerinin %15-20 olabileceği bununla beraber %50'ye varan mertebede elde edilen ısı enerjisiyle beraber, toplam verimin %70'e ulaşabileceğinden bahsedilmiştir. Çalışmada soğutma da dikkate alınmış olup trijenerasyon olarak da değerlendirme yapılmıştır. Kapsam; ısınım ve sıcaklık değerleri bu tez çalışması için benzerlik gösteren Madrid de dahil olmak üzere on adet farklı Avrupa şehri için genişletilmiştir. Bu şehir için sistemden üretilen ısı miktarı, elektrik miktarının yaklaşık üç katı olmaktadır. Çalışmada PV-T sistem maliyetinin PV yatırımına oranla %56 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Enerjinin maliyet seviyesi (LCOE) hesabı yapılmış olup, 0.06-0.12 €/kWh sonucuna varılmıştır. Çalışmada diğer kaynaklardan

alınan bilgiye göre bu sonuçlar PV sistemleri için 0.10-0.20 €/kWh seviyesinde olduğundan PV-T yatırımının daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Zimmerman ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan yayında [2] söz konusu PV-T sistemlerinin yoğunlaştırılmış durumdaki sonuçları verilmiştir. Çalışmada farklı panel sıcaklıklarında giriş-çıkış sıcaklıkları incelenmiş olup, 72 °C mertebesinde sıcaklıklara ulaşılmıştır. Çalışmada, toplam güneş enerjisinin %60'nın ısı ve elektrik olarak elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Hegazy, çalışmasında [3] dört ayrı modelde PV-T sistemi için değerlendirme yapmıştır. Bu dört modelde de elektrik enerjisiyle beraber ısı enerjisi (açıkça düşük kaliteli olduğuna değinerek) elde edildiğini belirtmiştir. Çalışma sonucunda genel verimin %32 ile %57 arasında olduğu görülmüş olup, iyi bir tasarım ile %50 mertebesinde ortalama verimlere ulaşılabileceği gözlemlenmiştir.

Barnwal ve Tiwari, yaptıkları çalışmada [4] PV-T sistemini bir seranın enerji ihtiyacını karşılamak üzere değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda görülmüştür ki sistem verimiyle ekserji analizi sonucunda büyük fark vardır. Sistemin ısı analizi yapıldığında ise mevsimsel olarak fark %7 mertebesinde çıkmaktadır.

Moradi ve çalışma arkadaşlarının yayınında [5] 23 tane ayrı yayından alınan çalışmalar değerlendirilmiş olup; farklı tipte ekipman, farklı soğutma yöntemi ve farklı ısıtım datalarıyla sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadaki sulu sistemlerde 30 °C mertebesindeki sıcaklıklara minimum olarak ulaşıldığı gözükmemektedir. Maksimum 85 °C çıkış sıcaklıklarına ulaşıldığı gözükse de ortalamada 70 °C maksimum sıcaklık gözükmemektedir. Bütün aşamalarda en yüksek verimlilik şartlarının yerine getirilmesi durumunda maksimum kojenerasyon veriminin %70 olabileceği belirtilmektedir. Ayrıca %8.1 mertebesinde daha fazla elektrik üretilebileceği belirtilmiştir. Yayında farklı panel tipleri ve kullanım alanları aynı alandaki diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak da farklı tip sistemlerin ve akışkanların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Popovici'nin dahil olduğu çalışmada [6] PV panellerin elektrik verimleri genel olarak %14-%17 arasında verilmektedir. Yapılan çalışmada soğutma yapılarak panellerden %6.97 ile %7.55 mertebesinde daha fazla güç elde edilebildiği analiz edilmiştir.

Herrando ve Markides [7] İngiltere özelinde yaptığı, su akışkanlı PV-T sisteminin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Elektrik enerjisi için verilen alım garantisiyle beraber PV-T sisteminin iskontolu geri ödeme süresi 11.2 yıl olurken, PV sisteminin 6.8 yıl olmaktadır. Bu sistem domestik amaca yönelik değerlendirilmiş olup, ısı enerjisi tarafında mevcutta kullanılan doğalgazlı kombiler, elektrikli ısıtıcılar ve ısı pompalarının ortalama değerleri dikkate alınmıştır. Çalışmada, model ev için tasarruf oranları hesaplanmıştır. Bu tasarruf oranlarıyla beraber ısıtma türüne bağlı olarak da karbon emisyonlarındaki salım azalımı da değerlendirilmiştir. PV-T sistemin maliyetinin, PV ve güneş kollektörü ayrı ayrı kullanılan yatırıma göre %10 daha az olacağı vurgulanmıştır.

Guarracino ve arkadaşları [8] PV-T sistemi için dinamik bir model üzerine çalışmışlardır. Elektrik üretiminin yanı sıra domestik olarak kullanılmak üzere elde edilen ısı ile sıcak su çıktısı iklim verileri üzerinden değerlendirilmiştir. Solar ışıınım ile gelen enerjinin %60-%70 mertebesinde ısıya dönüştüğü ve bu ısıyla 60 °C sıcaklıkta su elde edilebileceği belirtilmiştir.

Fortuin vd. [9] Almanya’da yaptığı araştırmada PV-T sistemlerin performansını arttıran faktörler üzerinde çalışmıştır. Yüzey kaplamalarıyla ilgili sonuçlar sunulmuş olup, PV-T panellerdeki ısı üretiminin, solar kollektörler seviyesinde olabileceği vurgulanmıştır. Bu doğrultuda uygulanan melez bir sistemin olumlu etkisi belirtilmiştir.

Matuska [10] yaptığı çalışmada PV, PV-T ve güneş kollektörlerini domestik sıcak su kullanımı için analiz etmiştir. Bu analizi yaparken benzer ışıınım ve çevre şartları kullanmıştır. Çalışmada Hibrit PV-T sisteminde ısı üretiminin elektrik üretimine göre birkaç kat fazla olabileceği vurgulanmıştır. Bununla beraber elde edilen sıcak suyun sıcaklığının 60 °C mertebelerinde olabileceği ve bu şekilde değerlendirilebileceği vurgulanmıştır. Domestik kullanımda özellikle göreceli olarak düşük sıcaklık olmasından dolayı havuz ısıtma gibi uygulamalar için uygunluğu üzerinde durulmuştur. Düşük sıcaklığın kısıtlayıcı etkisinden dolayı ön ısıtma veya ısı pompası çevrimlerinde faydalı olabileceğinden bahsedilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda elde edilen ısı enerjisi, elektrik enerjisinden 3.5-4 kat daha fazla olmuştur. Bu incelemelerin Almanya’daki enerji fiyatlarıyla yapılan ekonomik analizinde, PV-T sisteminin diğer konvansiyonel güneş enerjisi sistemlerinden daha maliyetli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Khelifa vd. [11] yaptığı çalışmada bilgisayar analizleri kullanarak PV-T panel üzerindeki sıcaklıkları göstermiştir. Analizde yaygın olarak 60 hücreden oluşan panelin her bir hücresinin sıcaklığının aynı seviyeye düşmediği gösterilmiştir. Bu analizden gözlemle, seri bağlı elektrik sisteminin verimli çalışması için PV hücrelerden meydana gelen panelin, her bir hücresinin aynı sıcaklıkta olmasına dikkat edilmesi gerektiğinden, hücreler arası homojen soğutmanın önemli olduğu görülmüştür.

Noro vd. [12], yapılan çalışmada, önemi artan yenilenebilir enerji sistemlerinin özellikle konutlardaki kullanımı üzerine durmuştur ve bu doğrultuda PV-T sistemleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, PV sistemlerinde sıcaklığın önemi vurgulanarak modül sıcaklığının ortam sıcaklığının 40 °C üzerine çıkabileceğinden bahsedilmiştir. Artan bu sıcaklıkla meydana gelen güç kaybının, sıcaklığın kontrolü ile azaltılabileceğine değinilmiştir. Dizilerde düşük sıcaklığın homojen olarak sağlanmasının, elektrik üretim performansı için kritik öneme sahip olduğuna dikkat çekilmiştir.

Liang vd. [13], 2017 yılında yayınlanan çalışma ile PV-T sisteminin teorik model ve deneysel performansını değerlendirmiştir. Çalışmada her 6 panel seri bağlanmış olup, toplamda 36 panelden oluşan sistem değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda sundukları model, ısı türündeki enerji verimini %3.6 fazla hesaplarken; elektrik veriminde, deneysel sonuçlar %5.8 daha fazla çıkmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı son yıllarda kullanımı yaygınlaşan PV güneş enerjisi sistemlerinin değerlendirmesinin yanı sıra; sıcaklığa bağlı üretim kayıplarını azaltarak, ısı enerjisi üretimine de imkân sağlayan ve bu PV panellerine soğutma sistemlerinin ilavesi ile elde edilen PV-T sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan farklı kapasitelerde değerlendirmesini gerçekleştirmektir.

1.3 Hipotez

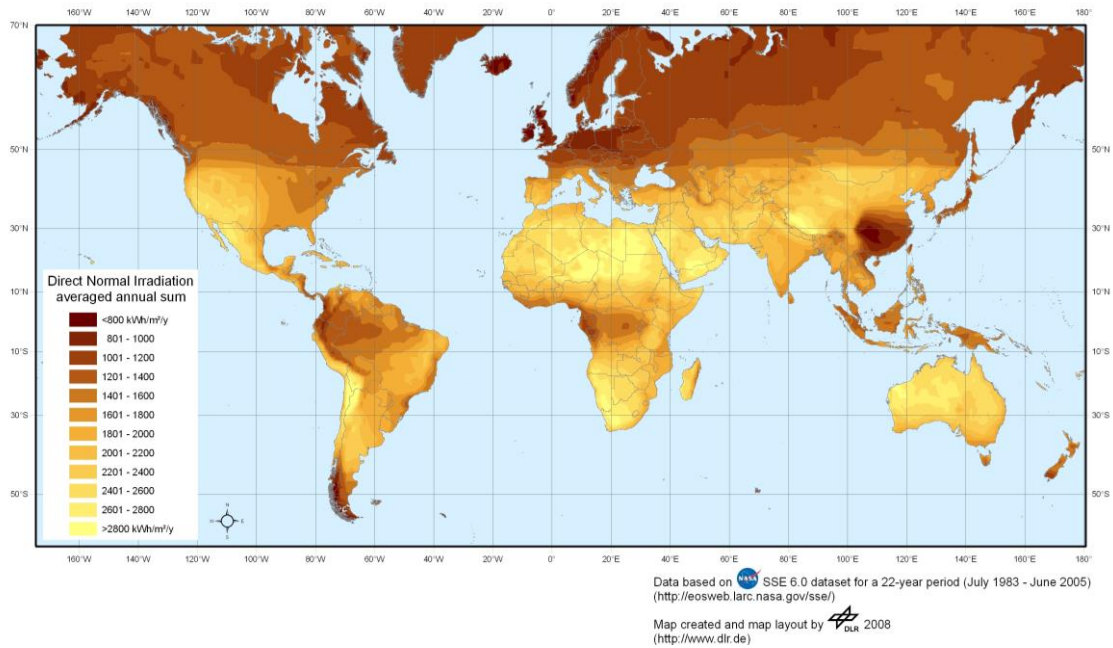
Çalışma konusu olan PV ve PV-T sistemlerinin, teknik ve ekonomik değerlendirmesinin yapılmasının ardından bu değerlendirme sonuçlarından ekonomik olarak üstün oldukları

şartlar belirlenir. Ekonomik değerlendirmedeki, geleceğe ait belirsizliklerin incelenmesi için etkin parametrelere bağlı duyarlılık analiz yapılarak analizler gerçekleştirilir.

BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR

Işınım yolu ile Dünya'ya ulaşan güneş enerjisi, Dünya üzerinde en yaygın olan, doğrudan veya dolaylı olarak en fazla kullanılan enerji türüdür. Güneş enerjisinin, sadece elektrik üretimi ve sıcak su elde edilmesi gibi alanlarda kısıtlı kullanımı olduğu düşünülmektedir; aslında yaşadığımız konutlar, ofisler gibi bulunduğumuz çevreye sağladığı ısı enerjisi göz ardı edilir. Dünya'ya ışıınım yolu ile gelen toplam güneş enerjisi yılda 19 trilyon TEP mertebesine ulaşmakta olup, Dünya üzerindeki diğer bütün enerji türlerinden daha fazladır [14]. Ayrıca yine bu enerji kaynağı rüzgar enerjisi gibi başka enerji kaynaklarının kısmi olarak da ana kaynağını oluşturmaktadır.

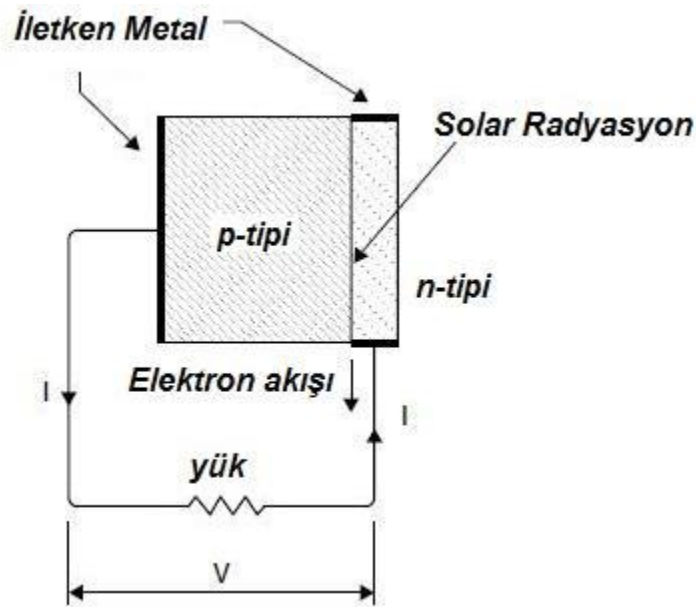


Şekil 2.1 Dünya üzerindeki direk normal güneş ışıını dağılımı

2.1 Güneş Enerjisi ile Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemleri

Fotovoltaik (PV) sistemler, ışıınım yoluyla güneşten gelen “foton” ve bu fotonlar ile elektriksel “voltaik” etki oluşturmaları dolayısıyla bu isimle tanımlanmıştır. Günümüzde kullanılan PV güneş enerjisi sistemlerinin geçmişı 19. yüzyılın başlarına dayanmakta olup, 1839 yılında Fransız fizikçi Edmond Becquerel (1820-1891) tarafından bulunmuştur [15].

Güneş ışıınımları ile yayılan fotonların, elektrik akımını ileten fotovoltaik materyal ile soğrularak ışıınımdan elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Aşağıdaki şekil bunula ilgili bir görsel sunmaktadır.



Şekil 2.2 Fotovoltaik sistemlerin içyapısı ve etki [16]

Bu sistemlerin performansı, fotovoltaik materyalin veriminin yanı sıra nem, sıcaklık gibi faktörlere bağlı olup; üretilebilecek elektrik miktarı, diğer başka nedenlerden ve oluşan kayıplardan dolayı azalabilmektedir. Özellikle daha fazla elektrik üretebilme arzusu ile daha fazla ışıının olduğu bölgelerde bu sistemlerin kurulması istenmektedir. Fakat daha fazla ışıınım olduğu yerde daha fazla enerji etkisi ve dolayısıyla daha fazla ısı ile yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Bu durum fotovoltaik sistemlerde performans düşüşüne neden olup, üretilebilecek enerji miktarında azalmaya yol açmaktadır. Dolayısıyla bu ısının uzaklaştırılarak, sıcaklıkların düşürölmesi sistem üretimini arttırarak, daha fazla elektrik kazanımı sağlaması için dikkate alınmalıdır.

2.2 Isıl Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneşten gelen ışınımının atmosferden dışarı yansıyan kısmı dışındaki enerji yeryüzü tarafından ısı enerji olarak soğurulmaktadır. İnsanoğlu, bu enerjiyi güneşten ısı enerji elde eden sistemler ile kendi amaçları doğrultusunda daha verimli kullanmayı amaçlamaktadır. Bunun için geliştirilen ısı enerji sistemleri, fotovoltaik sistemlere göre bölgeye bağlı olarak, ışınlama gelen enerjinin daha büyük bir kısmını ihtiyaca göre ısı enerjisine dönüştürebilmektedir.

2.3 Hibrit (PV+Isıl) Enerji Sistemleri

Güneş enerjisinden elektrik elde etme amacıyla yaygın bir şekilde kullanılan fotovoltaik panellerin ticari ürünlerinin verimleri %15-17 mertebelerinde iken, enerjinin kalan kısmı kaybolmaktadır. Ayrıca işletme sırasında artan sıcaklık değerlerinin üretilebilecek elektrik miktarını olumsuz etkilemesi dolayısıyla zaten düşük mertebelerde olan verimden ödün verilmektedir. Hem kaybolan enerjinin bir kısmını ısı enerji olarak kazanmak hem de sıcaklığı düşürerek üretilebilecek elektrik miktarını arttırmak amacıyla fotovoltaik paneller geliştirilerek, ısı enerji de sağlayan hibrit sistemlere dönüştürülmüştür.



Şekil 2.3 Hibrit PV ve sıcak su uygulaması

Bu sistemler ile, aynı diğer kojenerasyon sistemlerin de olduğu gibi elektrik üretilirken ısı enerjisi de üretilerek gelen enerjiden daha fazla yararlanma değerini gösteren toplam sistem veriminin artırılması amaçlanmıştır. Dolayısıyla yine diğer kojenerasyon uygulamalarında olduğu gibi, ısı enerjisi kullanılabiliriyorsa giren enerji ve elde edilen enerji karşılaştırılması yapıldığında sistemin toplam veriminin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bunun ötesinde diğer konvansiyonel kojenerasyonlara göre elektrik üretimini olumsuz etkileyen ısıyı uzaklaştırması nedeniyle sadece sistem verimini arttırmakla kalmayıp, elektrik üretimi açısından da avantaj sağlamaktadır. Diğer yandan mevcut alanı verimli kullanmak adına da önem arz etmektedir. Sıcak su ve elektrik üretiminin aynı sistem üstünde olması, bu hibrit uygulamalar ile kaplanan alan açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır. Ayrıca bu durum, iki ayrı sistem için ayrı ayrı kurulması gereken taşıyıcı sistem gereksiniminin de azaltılması anlamına gelmektedir. Taşıyıcı sistem gibi bazı ortak ekipmanların azaltılması, sadece toplam yatırım maliyetlerinin azaltılması anlamına gelmeyip; aynı zamanda özellikle kısıtlı çatı uygulamaları için avantaj sağlamaktadır.

2.3.1 Sıvı Akışkanlı Hibrit Sistemler

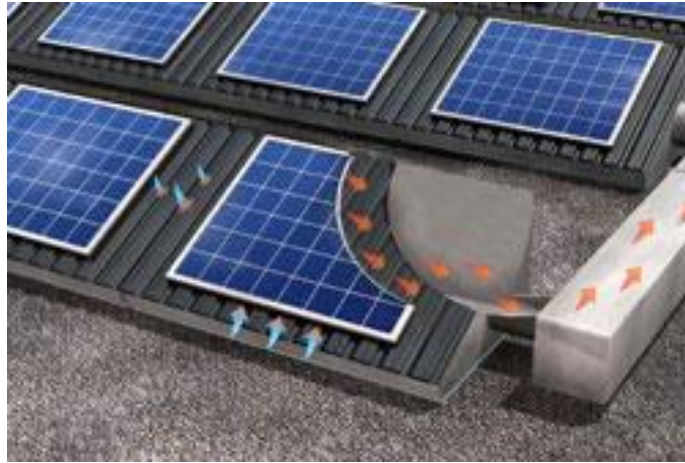
Bilindiği üzere fiziksel özellikleri dolayısıyla su gibi ısı iletiminde kullanılan akışkanların ısı enerjisi taşıma performansları, genel olarak havaya ve diğer gazlara göre daha yüksektir. Ayrıca su kolay ve ucuz bulunabilen işletmesi daha rahat bir akışkandır. Bu nedenle konutlarda, ticari binalarda ve sanayide sıcak su yaygın olarak ısı transfer aracı olarak kullanılır. Bu özellikleri ve doğrudan sıcak su kullanımı gerektiren yerlere direk hizmet edebilmesi dolayısıyla akışkan su olan sistemler tercih sebebi olmaktadır.



Şekil 2.4 Sıvı akışkanlı hibrit enerji sistemi

2.3.2 Gaz Akışkanlı Hibrit Sistemler

Hava ve gazların, sıvılara göre genelde ısı transfer akışkanı olarak kullanılması teknik olarak daha az tercih edilmektedir. Fakat konut veya ticari binalarda ortam havasını ısıtma ya da sanayide sıcaklığı arttırılmak istenen bir gazın araya başka bir ısı transfer aracı sokmadan sıcaklığının arttırılması, zaten hedefin nihai olarak o akışkan olması nedeniyle uygulanmaktadır. Bu durum yine hibrit güneş enerji sistemleri için de geçerli olup aynı “solarwall” uygulamalarında olduğu gibi burada da hava hibrit enerji döngüsündeki rolü üstlenebilir.



Şekil 2.5 Gaz akışkanlı hibrit enerji sistemi

TEKNİK VE FİNANSAL DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Çalışma konusu, hem teknik uygunluk hem de bu uygulamanın maddi olarak da yapılabilirliğini ortaya koyma açısından ekonomik uygunluk çerçevesinde birbiri ile bağlantılı iki yaklaşımla değerlendirilmiştir.

Birbirleriyle ilintili bu değerlendirmede kullanılan yaklaşımlar sırasıyla sonraki alt başlıklarda verilmiştir.

3.1 Teknik Değerlendirme Yaklaşımları

Tez konusu olan çalışmaların teknik olarak değerlendirmesinde, öncelikli olarak Bölüm 4'te yer alan çalışma ve bu çalışmadan elden edilen verilerin diğer kaynaklar ile örtüşüyor olduğunun tespiti amaçlanmaktadır. Özellikle ışıınım, sıcaklık ve enerji ile ilgili değerler değerlendirilip; öngörüler doğrultusunda çıkarılan ihtiyacı teknik olarak karşılayabilme durumu incelenmiştir. Enerji hesaplarının yapılmasında kullanılan güneş ışıınımı verileri, internetten hizmet veren Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) [17] üzerinden alınmıştır. Bu bilgi sistemi ışıınım verilerinin yanı sıra istenirse elektrik üretim bilgisini de sunmaktadır. Bu veriler de yine Bölüm 4'te yapılan ölçüm sonuçlarıyla ve Bölüm 5'te yapılan hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Elektrik üretim hesabı PVGIS sisteminden çıkarılan ışıınım verileri kullanılarak yapılmış ve sonuçlar her bir seçili kapasite için Bölüm 5'te verilmiştir. Isı enerjisi hesaplanmasında yine PVGIS üzerinden alınan ışıınım verileriyle, toplam güneş enerjisinin, %30'u mertebesinde ısı enerjisi elde edilebileceği yaklaşımı dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım Bölüm 1'de verilen literatür çalışmalarının sonuçlarına dayanmaktadır. Literatürde, ısı enerjisinin, sisteme ışıınım

yoluyla gelen toplam güneş enerjisinin %40'ının üzerinde olabileceği gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında tartışıldığı üzere %40 ve üzeri ısı enerji eldesinin zor olması dolayısıyla, bu değer bu tez çalışması kapsamında, daha temkinli bir değerlendirme amacıyla %30 olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen ısı enerji, toplam güneş enerjisinin %30'u olarak analizlerde yer almıştır. Bu analiz sonuçları, her bir kapasite için Bölüm 5'te verilmiştir.

Çizelge 3.1, PVGIS'ten alınan ışınlam ve sistemin kendi yaptığı elektrik üretim değerlerini göstermektedir.

Çizelge 3.1 PVGIS verileri

Ay	E_d kWh	E_m kWh	H_d kWh/m ²	H_m kWh/m ²
Ocak	1.86	57.7	2.32	72.0
Şubat	2.45	68.6	3.05	85.5
Mart	3.69	115	4.67	145
Nisan	4.25	127	5.52	166
Mayıs	5.00	155	6.65	206
Haziran	5.17	155	7.04	211
Temmuz	5.39	167	7.39	229
Ağustos	5.08	157	7.05	218
Eylül	4.26	128	5.81	174
Ekim	3.27	101	4.28	133
Kasım	2.48	74.3	3.16	94.8
Aralık	1.72	53.3	2.14	66.2
Yıllık Ortalama	3.72	113	4.93	150
Yıllık Toplam		1360		1800

Çizelge 3.1'de görülen, İstanbul bölgesi "40°57'12" Kuzey, 29°7'57" Doğu, 49m Yükseklik" lokasyonu için, Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS) üzerinden verilen ışınlam değerleri kaynak alınmıştır. PVGIS, tesis tasarım için analiz sonucu optimum açığı 31° olarak belirlemiştir. Bunun yanı sıra bu çalışmayla, harici yapılacak hesap dışında kendi üretim verilerini de yansıtmıştır. Bu değerler de E_d ve E_m sütunlarında örnek alınan 1 kW_e güç için gözükmeaktadır. H_d sütununda, modül tarafından alınan günlük ortalama ışınlam toplamı (kWh/m²) olarak gözükmeaktadır. Bu ışınlam değeriyle aylık toplam ışınlam değerleri hesaplanacak olup, modül verimi ve kayıplar dikkate alınarak net elektrik üretim değerleri hesaplanacaktır. H_m sütunu da ayrıca bu değerleri aylık olarak göstermektedir.

Isı enerjisinin çalışma kapsamında teknik olarak değerlendirilebilmesi için sıcaklık faktörü üzerinde durulmuştur. Bu önemli faktör olan panel çalışma sıcaklığının T_c hesaplanmasında; hava sıcaklığı T_a , G güneş ışınımının (kW/m^2) gücü, Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı (NOCT) ve bu sıcaklığın verildiği $20\text{ }^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığı ve 0.8 kW/m^2 ışınım şartları üzerinden bağıntı (3.1) kullanılmıştır.

$$T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{0.8} G \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}_2} \right) \quad (3.1)$$

Ortam sıcaklığını temsil eden T_a değeri için bölgenin gün doğumundan gün batımına gerçekleşen yıllık ortalama sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Bu sıcaklık değerleri ile beraber bağıntı (3.1) kullanılarak hesaplanan ortalama modül sıcaklıkları T_c Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Elektrik enerjisinin üretiminde doğrudan ışınım H değerinin toplam enerjisi üzerinden hesaplama yapılmıştır. Yaygın olarak kullanılan 250 W_p panellerin ortalama olarak η_p %15.2 verime sahip olduğu varsayımı ile bu değer üzerinden elde edilen ışınlama elektrik üretim değerinin dağılımı hesaplanmıştır. Çizelge 3.1’in H_m sütununda verilen H güneş ışınımının (kWh/m^2) aylık toplamı, ön görülen Performans Rasyosu (PR), 250 W_p panellerin verim ve 1.6 m^2 panel alanı A üzerinden Aylık Brüt Elektrik Üretim ($ABE\ddot{U}$) hesabı, bağıntı (3.2) ile yapılmıştır.

$$ABE\ddot{U}_i = H_i \times TA \times \eta_p \times PR_i \quad (3.2)$$

H_i : Işınım enerjisinin dağılımı

TA : Toplam panel alanı

η_p : Panel verimi

PR : Performans rasyosunun dağılımı

Performans Rasyosu (PR): Sistemin ürettiği elektrik enerjisinin Y_f , sistemin referans elektrik üretime Y_r oranı olmaktadır. Aralarındaki fark ise; kablo kaybı, uyumsuzluk kaybı, sıcaklık dolayısıyla olan kayıplar gibi kayıpların toplamıdır. Dolayısıyla PR kayıpların oranını belirten bir parametredir. Burada sıcaklık dolayısıyla oluşan güç kaybı 250 W_p paneller için yaygın görülen $-0.45\%/^\circ\text{C}$ katsayısı ile bağıntı (3.1)’den elde edilen değerler

üzerinden belirlenmiştir. PR'yi etkileyen diğer kayıplar ise toplamda %16 olarak öngörülmüştür. Bu değer çalışan sistemlerde oluşan ortalama kayıplar göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (3.3)$$

Daha sonra aylık değerlerin bağıntı (3.4)'te gösterildiği şekilde toplamaları alınmıştır.

$$TBE\ddot{U} = \sum_{i=1}^{12} ABE\ddot{U}_i \quad (3.4)$$

TBEÜ hesaplandıktan sonra varsa dağıtım, iletim ve dönüşümle ilgili kayıplar düşülerek net elektrik üretimi elde edilir.

3.2 Ekonomik Değerlendirme Yaklaşımları

Bölüm 3.1'de bahsedilen üretim değerlerinin hesaplanmasının ardından güncel elektrik fiyatları göz önünde bulundurularak yıllık brüt kazanç hesaplanmıştır. Bundan sonra mevcut kurulu santrallerin, işletme ve bakım maliyetleri toplamının gelirlerinin %10 mertebesinde olduğu yaklaşımıyla; bu maliyetler hesaplanıp, gelirlerinden düşülmüştür. Sistem maliyetlerinin öngörüsü, birçok kurulu tesisin olduğu bilinen maliyetleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Değerlendirme için ekonomik model oluşturulup, bu ekonomik model üzerinden ilerideki paragraflarda anlatılan göstergeler hesaplanmıştır.

Net Karın Bugünkü Değeri (NPV): Yaratılan projenin değerini ölçmekte kullanılır. Yeni projenin, yatırımcı açısından kendi sermaye maliyeti üzerinden, ne kadar değer yarattığını gösterir. Analiz nakit akışı üzerinden yapılır [18]. Net karın bugünkü değerinin pozitif olması projenin ekonomik açıdan uygun, negatif olması ise uygun olmadığını, "sıfır" olması ise beklenen kar oranının sermaye maliyetine eşit olduğunu gösterir.

İç Verim Oranı (IRR): Projenin karlılığını ölçmekte kullanılır. Analiz nakit akışı üzerinden yapılır. Değerlendirilen projenin nakit akışı negatif değer ile başlayıp sonrasında sürekli olarak pozitif devam edecek şekilde belirlendikten sonra hesaplanabilir. Bununla beraber bazı projelerde nakit akışı birden fazla defa negatif ve pozitif değerler arasında değişiyor olabilir. Bu durumda IRR hesabı yanlış sonuçlar verir. Böyle bir durumda

projenin sabit olarak pozitif nakit akışı yaratmaya başladığı döneme kadar olan nakit akışlarının sermaye maliyeti üzerinden o döneme kadarki gelecekteki değeri alınır. Bulunan değer o dönemin bugünkü değeri olarak kabul edilir ve bulunan yeni nakit akışının IRR değeri bulunur [18]. IRR değeri aynı zamanda projenin NPV değerini sıfır yapan iskonto oranıdır. Projenin IRR'si, piyasa faizlerinden yüksek ise sermayeyi banka mevduatında değerlendirmektense; projeye yatırım yapmanın ekonomik açıdan daha olumlu olduğu anlamına gelir.

Geri ödeme süresi (Pay-back period): Bu oran paranın zaman değerini de dikkate alan iskontolu ve standart iskontosuz olacak şekilde iki ayrı şekilde hesaplanır. Yatırımcı açısından projeye yapılan yatırımların, elde edilen gelirler ile eşitlendiği süreyi göstermektedir. Analiz nakit akışı üzerinden yapılır [18].

Ekonomik modelde değerlendirmeler yapılırken, piyasa koşulları göz önünde bulundurularak; yatırım tutarı, işletme gideri gibi değerler için mevcut tesislerin verileri dikkate alınmıştır. Proje ekonomik ömrü olan 25 yıl boyunca oluşacak nakit akışının NPV hesabında, piyasa şartları düşünülerek %20 iskonto oranı seçilmiştir.

ELEKTRİK VE ISIL ENERJİ ÜRETİMLERİNİN DENEYSEL ANALİZİ

Konu olan sistemlerin analizlerinin teknik olarak değerlendirmesinde, önceki ana başlıkta anlatılan yöntemlerin yanı sıra; sıcaklık ve elektrik ölçümlerinin alındığı, 2 farklı tipte panel kullanılan, Bölüm 5.3'teki kapasiteyle eş, 2 kW_p sistemin; 2016 yılı mayıs, haziran, temmuz aylarındaki ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerde açılı kurulum yapılmış, alt yüzeyi açık bırakılarak hava tahliyesi sağlanan “standart panel” ile 2° eğimli çatıya yapıştırılmış, alt yüzeyinde ısı tahliyesi kısıtlı olan “yapıştırma panel” kullanılmıştır. Her iki panel malzeme, teknoloji ve karakteristik olarak benzer özellikleri göstermektedir.

4.1 Isıl Enerji Analizi

Isıl enerji üretiminin hesaplanmasında literatür çalışması ön planda tutulmuştur, bu çalışmaların incelenmesi sonucunda %30 mertebesinde sistemden ısı enerjisinin kullanılabilir olarak elde edilebileceği temkinli bir seçimle yapılmıştır.

Sıcaklık, değerleri [2], [5], [8], [10] referanslarında belirtildiği şekilde, zaman zaman kısa süreli de olsa 70 °C'lerin üzerine çıkabilse de genel olarak ortalama maksimum değer 60 °C mertebesinde dir.

Ölçüm sonuçları 2 kW_e standart mono kristalin PV panel ile, bir sonraki görseldeki benzer, 2 kW_e alt yüzeyinden ısıyı rahat tahliye edemeyen yine aynı tip yapıştırma panel uygulamasıyla yapılmıştır.

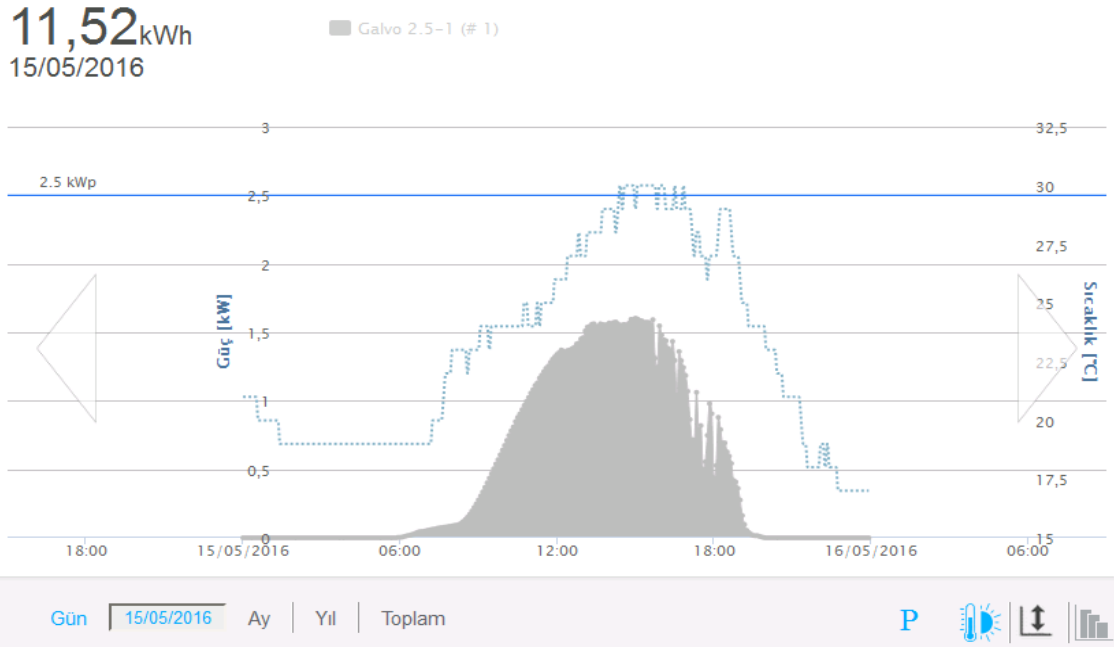


Şekil 4.1 Örnek ısı tahliyesi az olan yapıştırma PV panel uygulaması

Yukarıda gösterilen uygulama (Şekil 4.1), tek yüzeyinden ısıyı tahliye durumu daha az olması dolayısıyla PV-T uygulamasını benzer sıcaklık karakteristiği gösterdiği söylenebilir. Bu uygulamada ve PV-T uygulamalarında, sıcaklıklar benzer şekilde standart panellere göre daha yüksek olmaktadır.

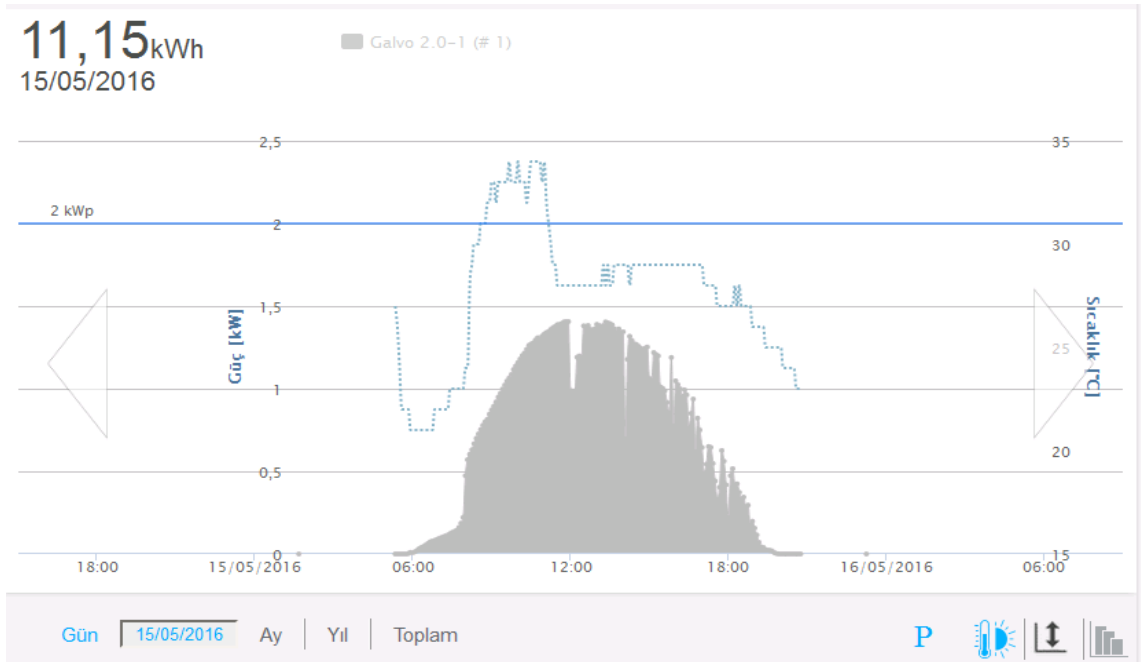
Her iki 2 kW_e sistemden sıcaklık ve elektrik ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümler, 2016 yılı mayıs, haziran ve temmuz aylarını kapsamaktadır.

Bir sonraki şekil (Şekil 4.2), üretimin mayıs ayı için en yüksek olduğu günlerden birinde (15/05/2016) standart panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.2 2 kW_p gücündeki standart PV panel ölçümü 15/05/2016

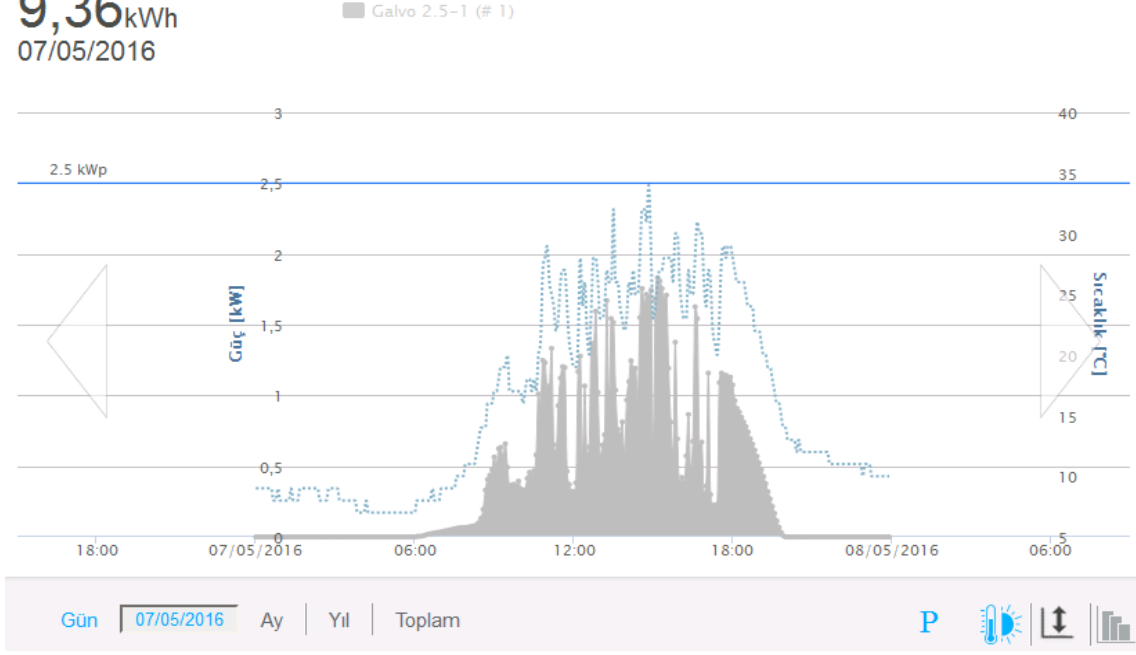
Şekil 4.3, ışıınımın mayıs ayı için en yüksek olduğu günlerden birinde (15/05/2016) yapıştırma panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.3 2 kW_p gücündeki yapıştırma PV panel 15/05/2016

Şekil 4.4, üretimin mayıs ayı için ortalama olduğu günlerden birinde (7/05/2016) standart panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.

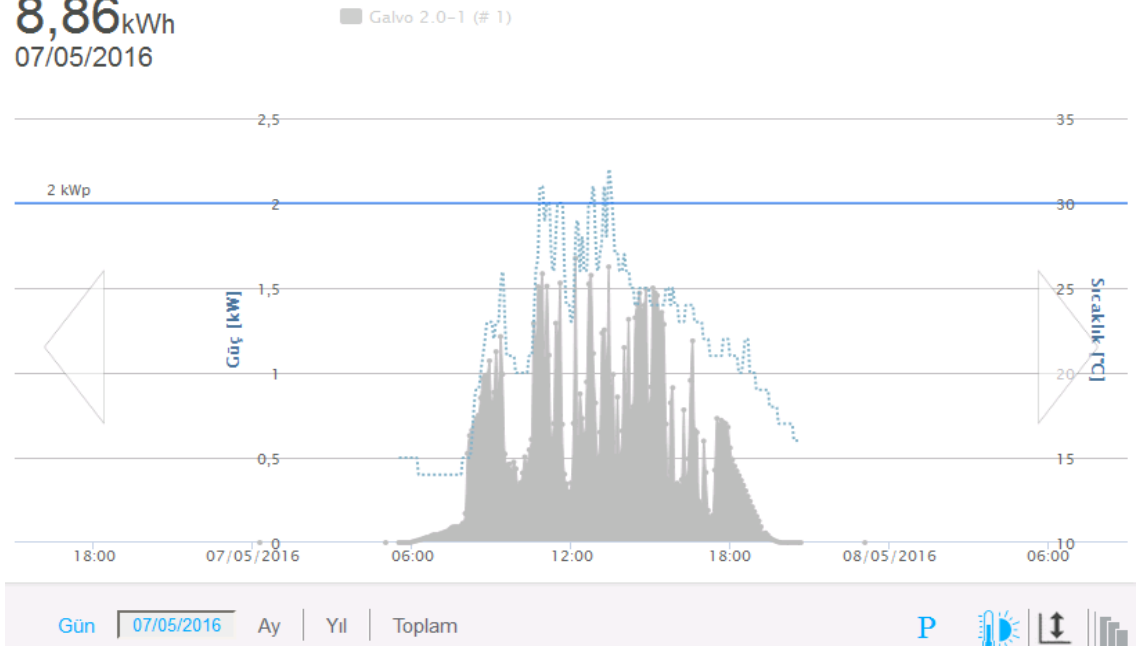
9,36kWh
07/05/2016



Şekil 4.4 2 kW_p gücündeki standart PV panel ölçümü 7/05/2016

Şekil 4.5, üretimin Mayıs ayı için ortalama olduğu günlerden birinde (7/05/2016) yapıştırma panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.

8,86kWh
07/05/2016

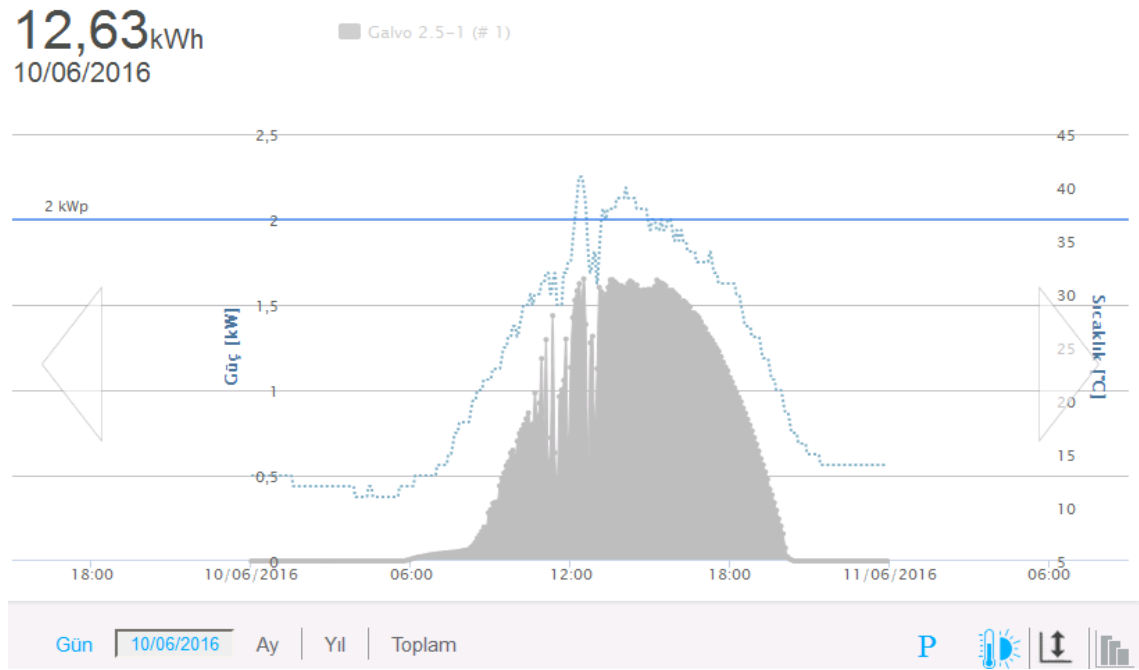


Şekil 4.5 2 kW_p gücündeki yapıştırma PV panel 7/05/2016

Önceki dört adet şekille (Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5) verilen Mayıs ayı ölçümleri değerlendirildiğinde ısıtım en iyi olduğu gün de bile ancak 30 °C sıcaklıklar

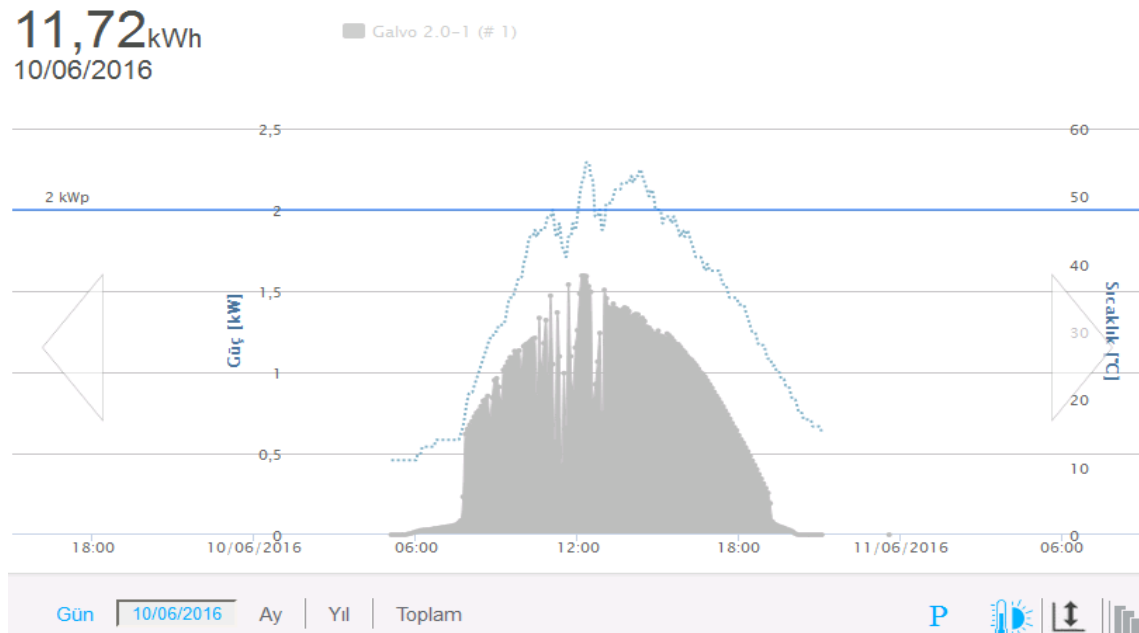
kesintili olarak elde edilmiştir. Şekiller ile verilen ölçümlerin dışından sadece yapıştırma panel bir iki gün için çok kısa süreliğine 50 °C mertebesine ulaşmıştır.

Şekil 4.6, üretimin haziran ayı için en yüksek olduğu günlerden birinde (10/06/2016) standart panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



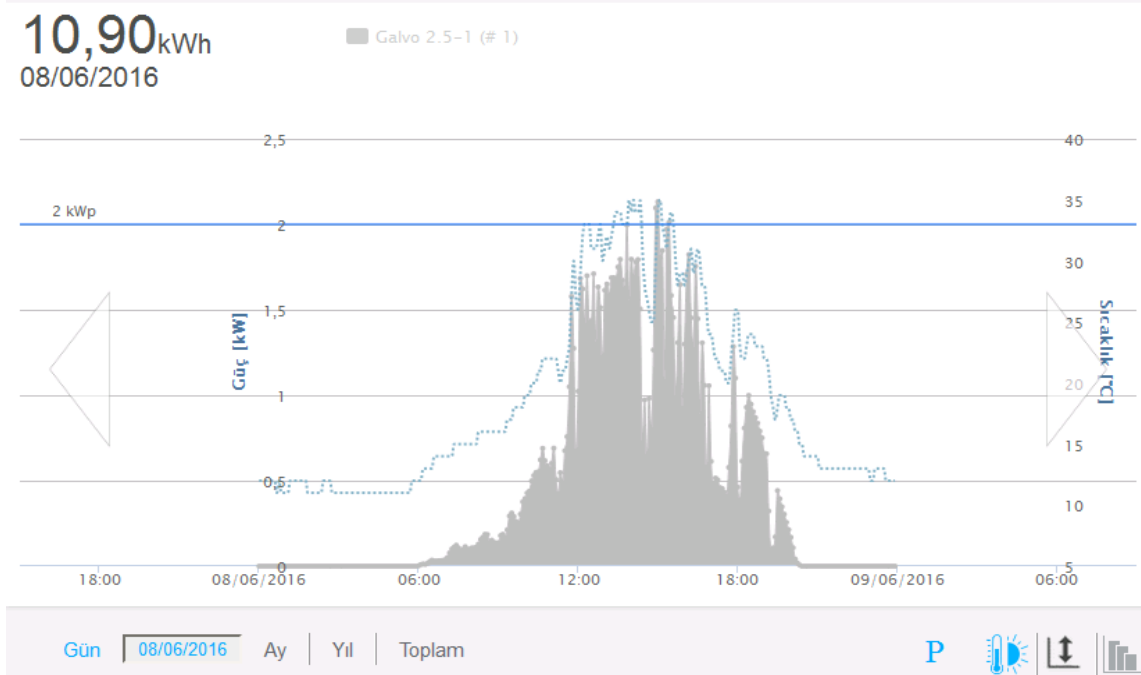
Şekil 4.6 2 kW_p gücündeki standart PV panel ölçümü 10/06/2016

Şekil 4.7, üretimin haziran ayı için en yüksek olduğu günlerden birinde (10/06/2016) yapıştırma panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



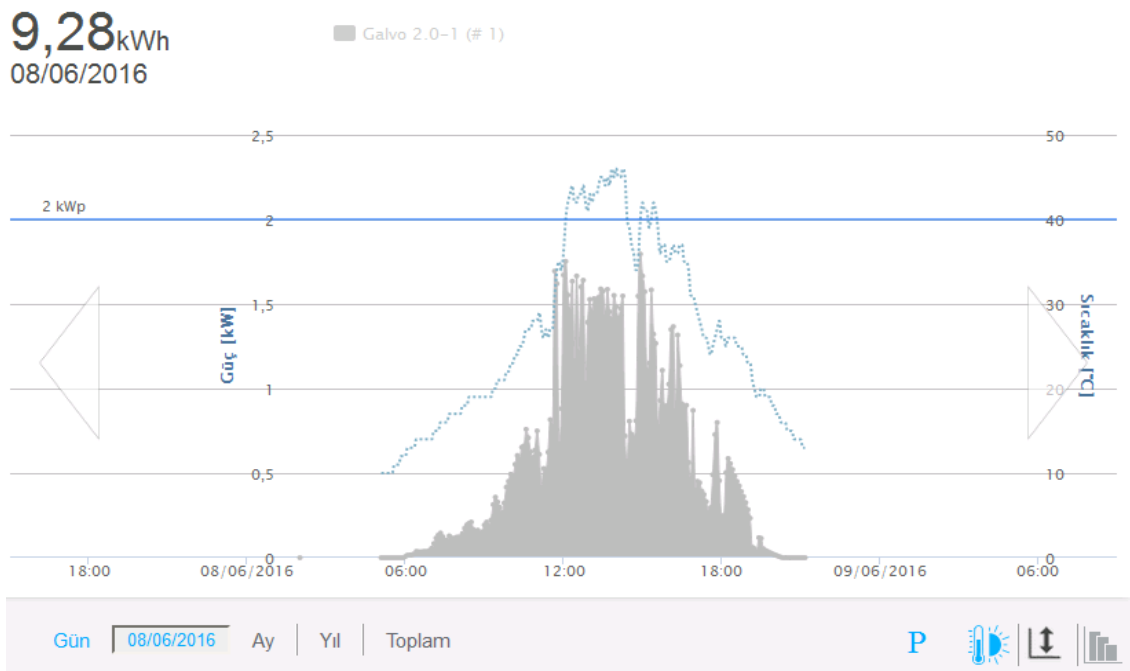
Şekil 4.7 2 kW_p gücündeki yapıştırma PV panel 10/06/2016

Şekil 4.8, üretimin haziran ayı için ortalama olduğu günlerden birinde (8/06/2016) standart panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.8 2 kW_p gücündeki ortalama PV panel ölçümü 8/06/2016

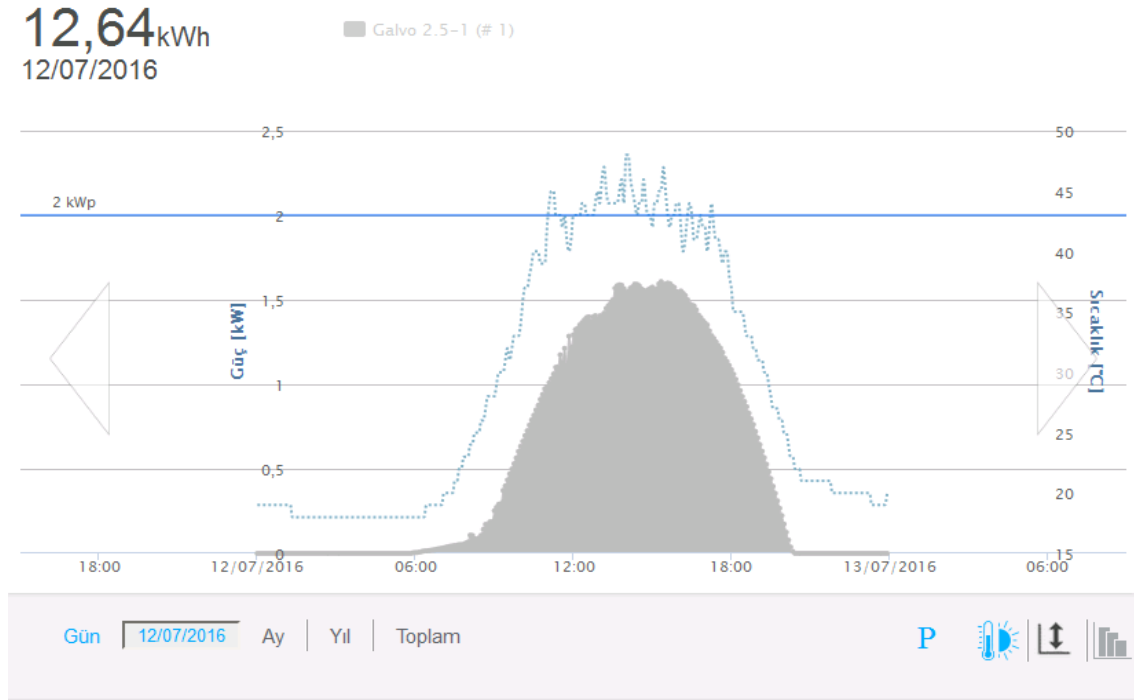
Şekil 4.9, üretimin haziran ayı için ortalama olduğu günlerden birinde (8/06/2016) yapıştırma panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.9 2 kW_p gücündeki yapıştırma PV panel ortalama örneği 8/06/2016

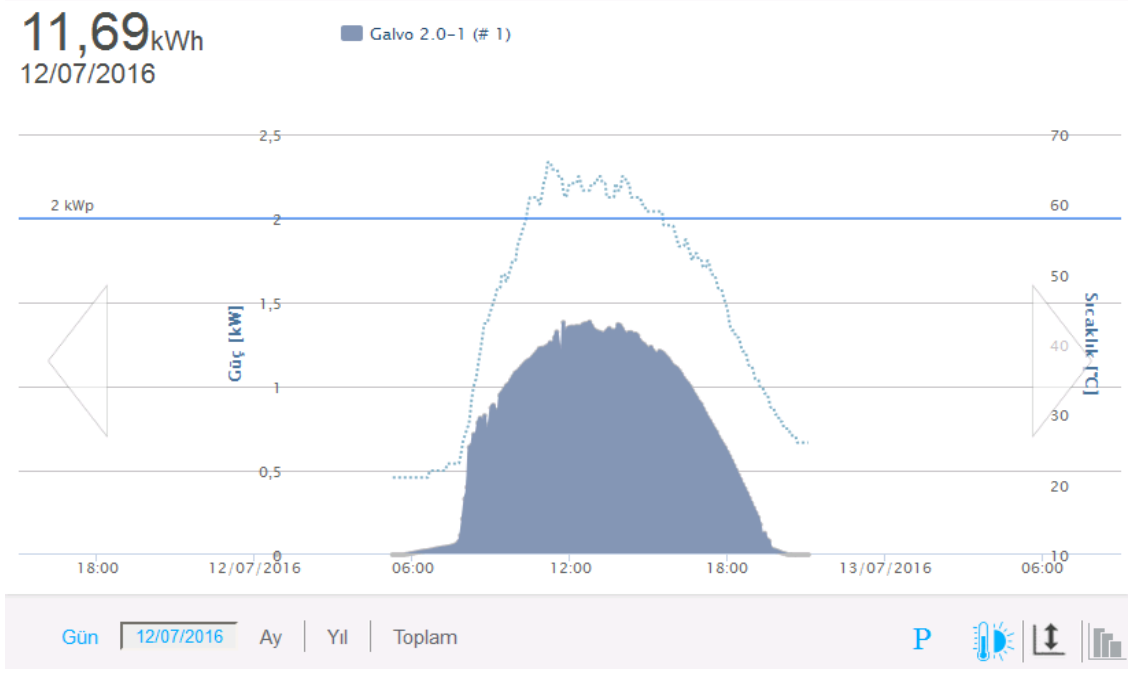
Önceki dört adet şekilde (Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9) verilen haziran ayı ölçümleri ve diğer ölçümler dikkate alındığında yapıştırma panel ile 60 °C sıcaklıklara ulaşılırken, standart panel kurulumunda 45 °C mertebesinden sıcaklara ulaşılmıştır. Bu ayda iki panel arasında operasyon sıcaklık farkı daha belirgin olmuştur.

Şekil 4.10, üretimin temmuz ayı için en yüksek olduğu günlerden birinde (12/07/2016) standart panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.10 2 kW_p gücündeki standart PV panel ölçümü 12/07/2016

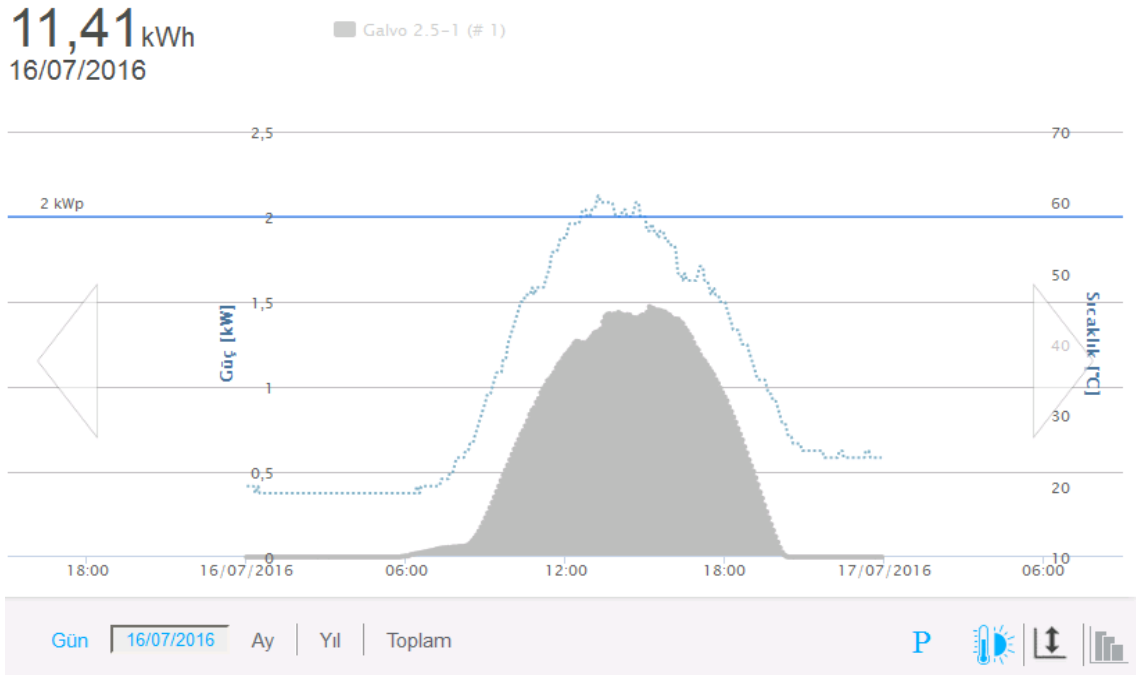
Şekil 4.11, üretimin temmuz ayı için en yüksek olduğu günlerden birinde (12/07/2016) yapıştırma panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.11 2 kW_p gücündeki yapıştırma PV panel 12/07/2016

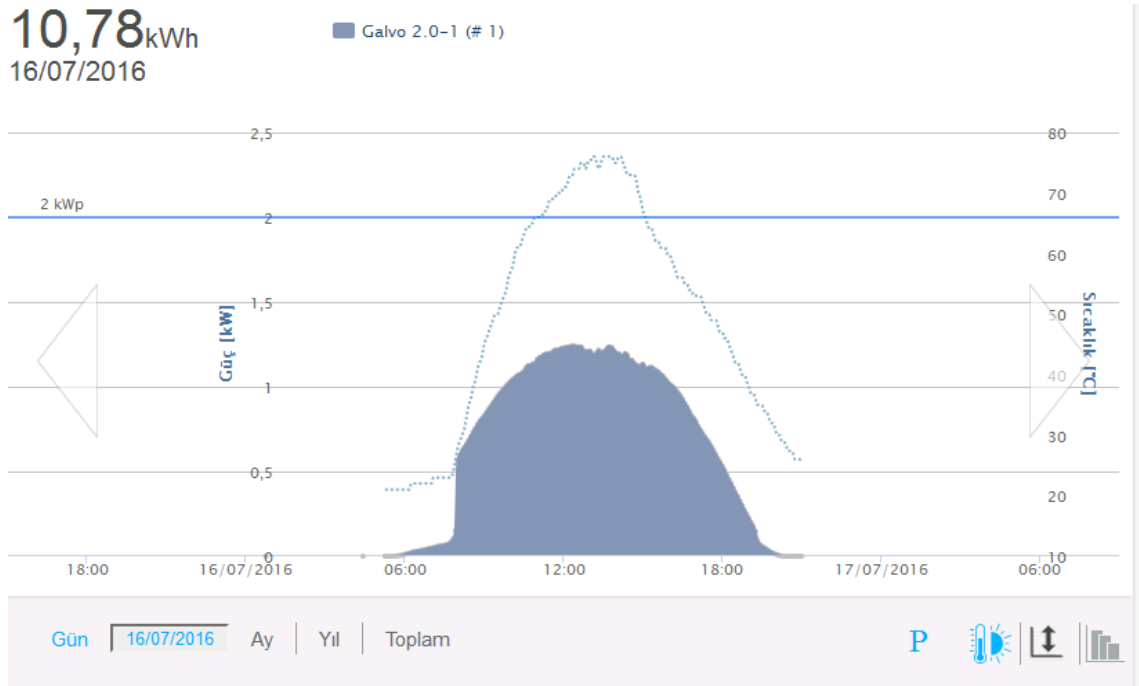
12 Temmuz 2016 tarihinde verilen iki ölçüm arasındaki panel sıcaklıkları farkı önemli ölçüde gözükmemektedir.

Şekil 4.12, üretimin temmuz ayı için ortalama olduğu günlerden birinde (16/07/2016) standart panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



Şekil 4.12 2 kW_p gücündeki ortalama PV panel ölçümü 16/07/2016

Şekil 4.13, üretimin temmuz ayı için ortalama olduğu günlerden birinde (16/07/2016) yapıştırma panel için ölçüm sonucunu göstermektedir.



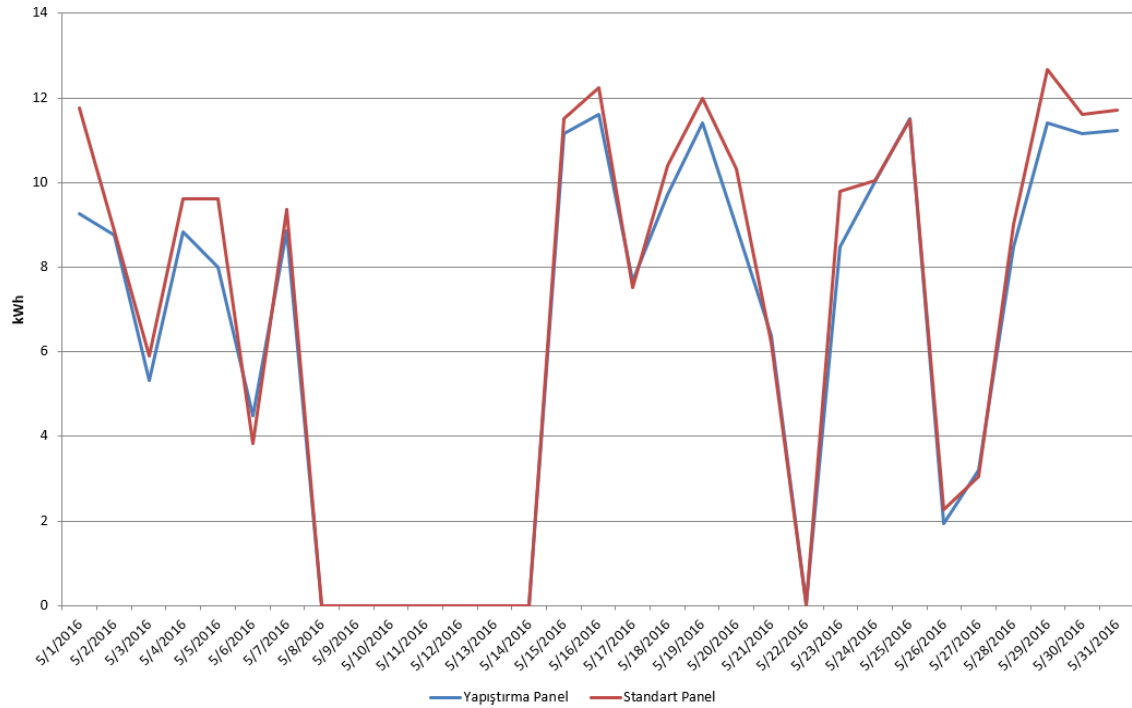
Şekil 4.13 2 kW_p gücündeki yapıştırma PV panel ortalama örneği 16/07/2016

Temmuz ayı ölçümlerinde standart panel kurulumu ile 60 °C sıcaklıklara kısa süreli olarak ulaşılabilmiş olup genel olarak 50 °C mertebesinde pik işletme sıcaklığı söz konusu olmaktadır. Bu durum yapıştırma panel için 75 °C mertebesi ulaşılabilir, fakat 60 °C' nin yaygın pik sıcaklık olduğudur. Bu ayın bazı günlerinde, aynı anda, her iki paneldeki sıcaklık farkı 20 °C olmuştur.

4.2 Elektrik Enerjisinin Analizi

Karşılaştırma amaçlı kurulan her iki 2 kW_e sistemin, kurulum açısı ve sıcaklıkla oluşan farktan dolayı elektrik üretim değerleri de değişmektedir. Bu karşılaştırmada oluşan sonuçların 2016 yılı mayıs, haziran ve temmuz ayları için elektrik üretim değerleri çıkartılmıştır. Bir önceki bölümde verilen şekillerde bazı seçilen örnek günlerdeki anlık elektrik güçleri görülebildiği gibi ay boyunca oluşan günlük elektrik üretimleri de ölçülmüştür.

Sonraki şekilde olan Şekil 4.14'te, mayıs 2016 için elektrik üretim karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 4.14 2 kW_p sistem elektrik üretimlerinin mayıs ayı karşılaştırması

Mayıs ayı için şekilde verilen ölçümler standart panelin, yapıştırma panele göre daha fazla elektrik ürettiğini göstermektedir. Ölçüm sırasında yedi gün data alınamamıştır. Alınamayan bu datalar için düzeltme yapıldığında; yapıştırma panelin mayıs ayında 256 kWh, standart panelin ise 272 kWh elektrik ürettiği hesaplanmaktadır.

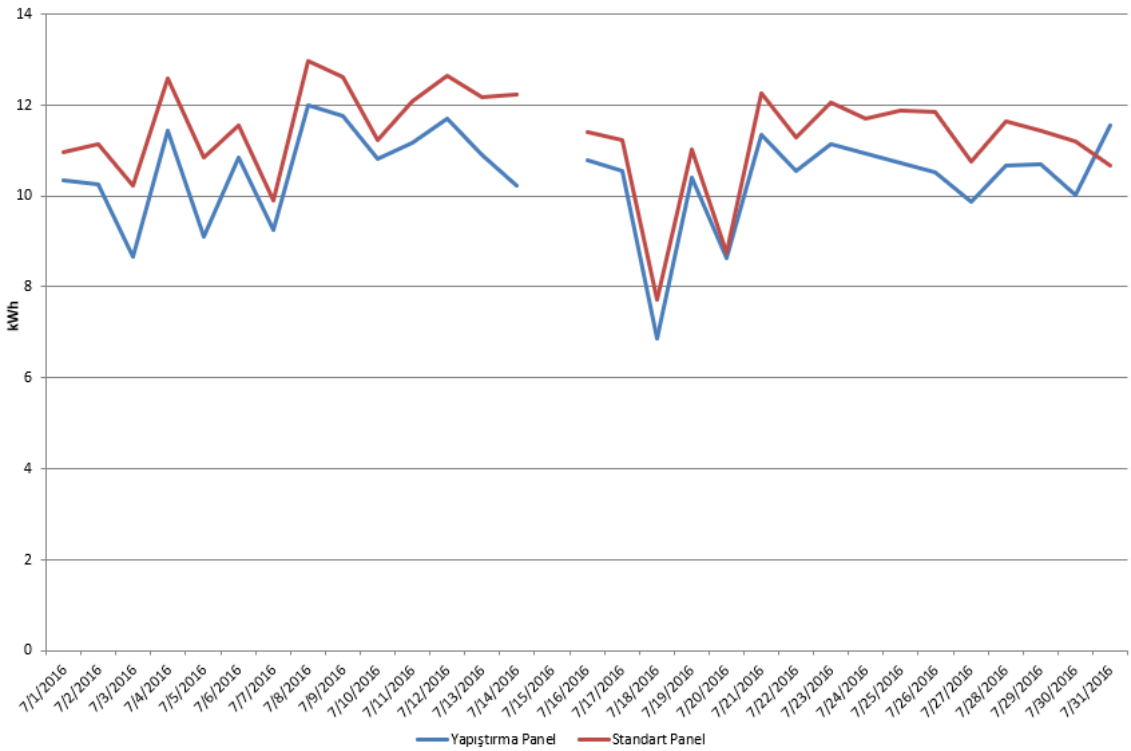
Şekil 4.15'te haziran 2016 için elektrik üretim karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 4.15 2 kW_p sistem elektrik üretimlerinin haziran ayı karşılaştırması

Ölçüm sırasında üç gün veri alınamamıştır. Alınamayan bu veriler için düzeltme yapıldığında; yapıştırma panelin temmuz ayında 312 kWh, standart panelin ise 330 kWh elektrik ürettiği hesaplanmaktadır.

Şekil 4.16'da temmuz 2016 için elektrik üretim karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 4.16 2 kW_p sistem elektrik üretimlerinin temmuz ayı karşılaştırması

Ölçüm sırasında sadece bir gün veri alınamamıştır. Alınamayan bu veri için düzeltme yapıldığında; yapıştırma panelin haziran ayı toplamında 324 kWh, standart panelin ise 351 kWh elektrik ürettiği hesaplanmaktadır. Temmuz ayı için az da olsa sıcaklık farkının artması kaynaklı, elektrik üretim farkı da her iki panel arasında artmaktadır.

UYGULAMAMA ALANLARINDA DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, bu çalışmanın konusu olan PV ve PV-T hibrit sistemleri soğutulması ve atık ısı kullanımı yönleriyle üç farklı kapasite özelinde değerlendirilecek olup elde edilen değerlendirme sonuçları verilecektir. Burada değerlendirmeler prosedürlerin elektrik tarafıyla ilgili işlemesi ve elektriğin daha değerli bir çıktı olması dolayısıyla önceliklendirilmesiyle yapılacaktır.

5.1 Büyük Kapasite için Uygulama Analizi

Büyük kapasitede uygulama değerlendirmesi için hem elektrik hem de ısı enerji ihtiyacı yoğun olan örnek uygulama alanları dikkate alınabilir. Bu uygulama alanları, yüksek sıcaklık elde edilebiliyorsa, trijenerasyon sistemlerinin avantajlı olduğu tüketim yerleri bile olabilir. Örnek olarak; büyük kapasiteli endüstriyel tesisler, otel, hastane gibi ticari binalar, kendi kendine yetebilen yerleşim alanları dikkate alınabilir.

5.1.1 Uygulama Özeti

Uygulama, elektrik ve ısı analizi için daha değerli bir enerji türü olan elektrik üzerinden seçilmiştir. Kullanılan PV sistemlerin öncelikli enerji türü olması dolayısıyla da 10 MW_p elektrik kurulu gücü baz alınarak sistem parametreleri ve çıktıları hesaplanmaktadır. 10 MW_p elektrik gücü göreceli “büyük kapasite” olarak dikkate alınmış olmasıyla beraber, daha büyük sistemler için girdilerin ve sonuçların doğrusal arttırılmasıyla, daha da büyük sistemlerin verileri elde edilebilir ve değerlendirmesi yapılabilir. Örneğin; 50 MW_p elektrik kurulu gücündeki bir uygulama için girdi parametreleri ve elde edilen sonuçların

birçoğu aynı oranda değişerek yaklaşık 5 katı mertebesinde olacaktır. Kendi kendine yetebilecek şekilde enerji profili şekillendirilecek, kalabalık nüfuslu bir yerleşim alanı projesi için kapasite daha da arttırılarak değerlendirme yapılabilir.

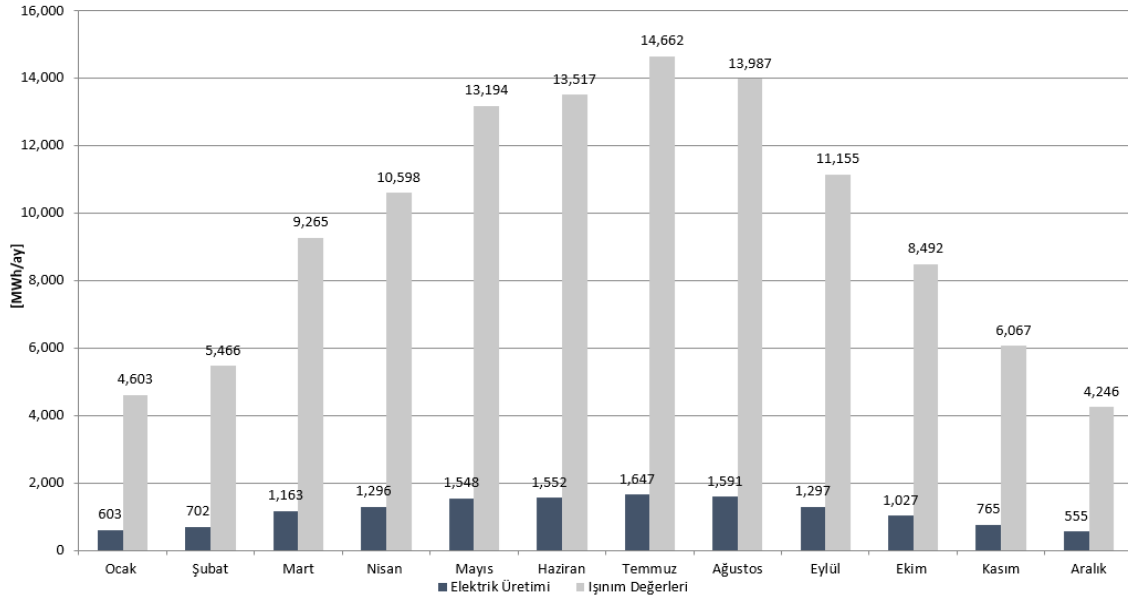
5.1.2 Teknik Analiz

Teknik analizde göreceli olarak büyük kapasiteli bir yatırımın değerlendirilmesi sistem parametreleri üzerinden yapılmıştır. Teknik analizde kullanılan ve hesaplanan önemli sistem parametreleri bir sonraki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.1 10 MW_e için sistem parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Arazi için gerekli uygulama alanı	m ²	192,000
Spesifik panel alanı	m ² /kW _e	6.4
Arazi kurulumu sistem eğimi	(°)	31
Panel gücü	W _p	250
Panel elektrik verimi	%	15.2
Panel sayısı	adet	40,000
Toplam kurulu güç	kW _e	10,000
Panel performans düşüşü (yıllık)	%	0.8
PV Net elektrik üretimi (yıl 1)	kWh/yıl	13,746,200
PV Kapasite faktörü	%	15.7
PV Spesifik üretim	kW _e h/kW _e	1,375

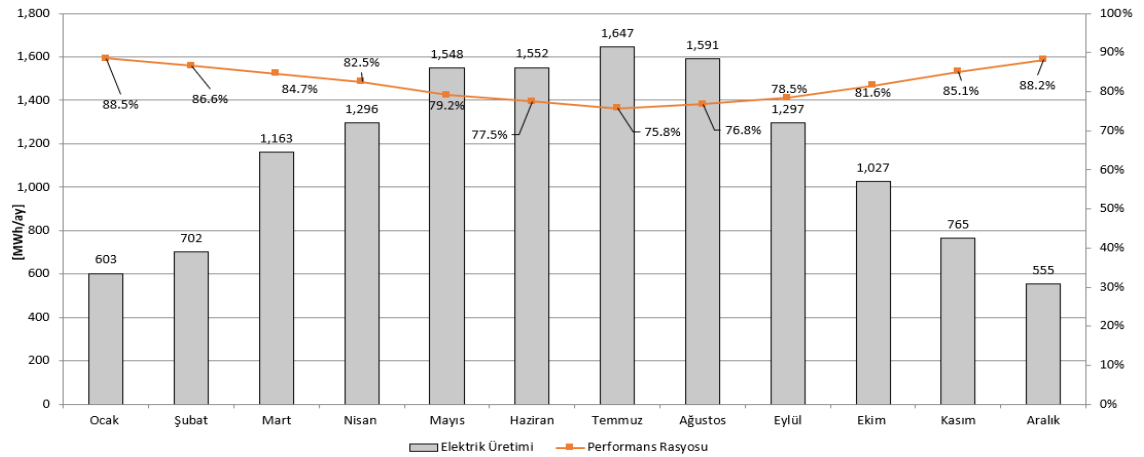
Kullanılan ışıınım değerleri ve sistem parametreleri ile değerler MWh olarak aylık bazda hesaplanmıştır. Aylık toplam ışıınım ve elektrik üretim dağılımı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 5.1 10 MW_e için aylık toplam ısıtım ve elektrik üretim dağılımı

Şekil 5.1, değerlendirilen sistemin elde edilen ısıtım ile ürettiği aylık elektrik miktarının dağılımını göstermektedir. Belirtilen aylık elektrik üretim değerleri, değerlendirilen sistemin ısı dolayısıyla oluşan kayıplarının da göz önünde bulundurulmasıyla hesaplanmıştır.

Şekil 5.2, bu ısı kayıplarının da göz önünde bulundurulduğu performans rasyosu değişimini ve elektrik üretimini aylık bazda göstermektedir.



Şekil 5.2 10 MW_e için ısı etkisinden dolayı oluşan kayıpların göz önünde bulundurulduğu aylık elektrik üretim ve performans rasyosu dağılımı

Yüksek sıcaklık dolayısıyla PV panellerdeki gerilimin olumsuz etkilenmesi sonucu elde edilen güç azalmaktadır. Sıcaklığın artması, elde edilen gücü ve elektrik üretim miktarını doğrusal olarak düşürmektedir.

Göz önünde bulundurulan diğer kayıpların aksine, sıcaklık dolayısıyla meydana gelen kayıplar doğası gereği mevsimlere bağlı değişkenlik göstermektedir. Sıcaklık farkı sistem tasarımının değerlendirildiği İstanbul bölgesi için yaz aylarında daha yüksek ve kış aylarında daha düşük olması nedeniyle sistemin performans rasyosu, aylık alınan sıcaklık değerlerine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu farklılık, bir önceki şekildeki performans rasyosu değişimiyle aylık bazda net bir şekilde gözükmemektedir.

Çizelge 5.2’de, MGM’ den alınan aylık sıcaklık değerleri ve buna bağlı olarak (3.1) ile hesaplanan modül sıcaklıkları gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Sıcaklık parametreleri

Ay	Ortalama Gün İçi Hava Sıcaklıkları , °C	Beklenen Ortalama Modül Sıcaklığı, °C
Ocak	6.0	15.1
Şubat	7.2	19.1
Mart	7.3	23.5
Nisan	11.1	28.4
Mayıs	18.4	35.7
Haziran	22.6	39.5
Temmuz	25.5	43.2
Ağustos	22.7	41.1
Eylül	20.8	37.3
Ekim	15.4	30.3
Kasım	10.2	22.5
Aralık	7.4	15.7
Ortalama	14.5	29.3

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere panellerin operasyonda olduğu gündüz saatlerinde yıllık ortalama ortam sıcaklığı 14.5 °C, yıllık ortalama modül sıcaklığı 29.3 °C olmaktadır. En yüksek ortalama modül sıcaklığı ise 43.2 °C ile temmuz ayında gerçekleşmektedir.

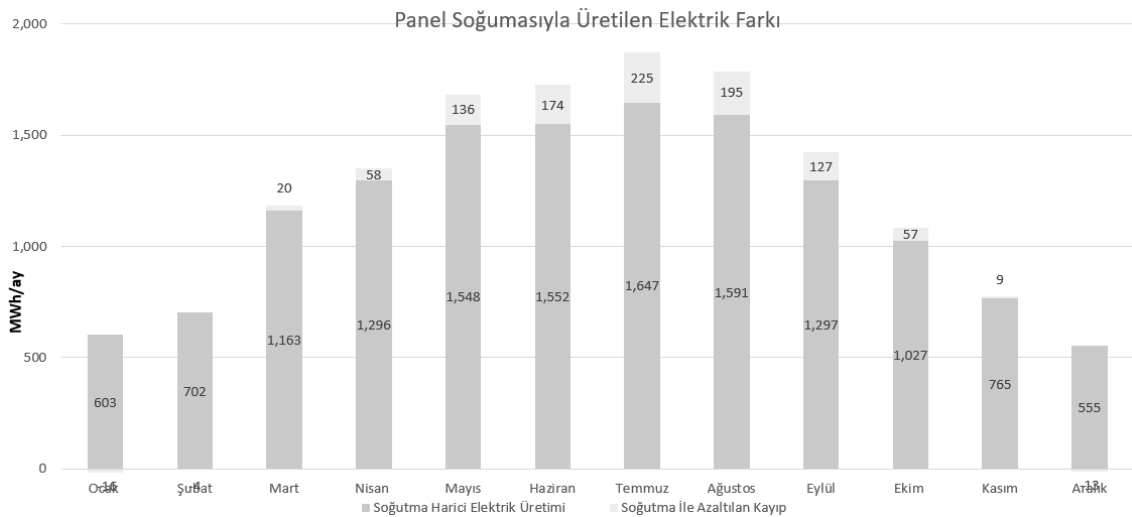
Burada yapılan panel sıcaklık hesaplarının, Bölüm 4’te verilen ölçüm değerleriyle oldukça örtüştüğü görülmektedir.

Ortam sıcaklığı ve ışıınım değerlerine bağlı olarak modül sıcaklığı değişkenlik göstermektedir. Modül sıcaklığı arttıkça üretililecek elektrik enerjisi miktarı

azalmaktadır. Dolayısıyla bu sıcaklığın düşürülmesiyle oluşan kayıp önlenabilir ve bu atık ısı geri kazanılarak, değerlendirilebilir.

Sıcaklığın panel tarafında soğutulup, daha yüksek olduğu durumlarda 25 °C'ye sabitlenmesiyle ve diğer kayıpların da aylık bazda değişiklik göstermemesi nedeniyle santralin performans rasyosu artacaktır. Bu değer diğer kayıpların aylık bazda sabit olması, bir diğer söylemle değişkenlik göstermemesi sebebiyle her ay için aynı olmaktadır.

Bir sonraki şekil, ısıl etki dolayısıyla oluşan kayıpların azaltılmasıyla beraber performans rasyosundaki artıştan dolayı meydana gelen elektrik üretim artışını ve toplam elektrik üretimini aylık olarak göstermektedir.



Şekil 5.3 Sistemin aylık elektrik dağılımının normal elektrik üretimi ve soğutulmasıyla beraber oluşan farkı

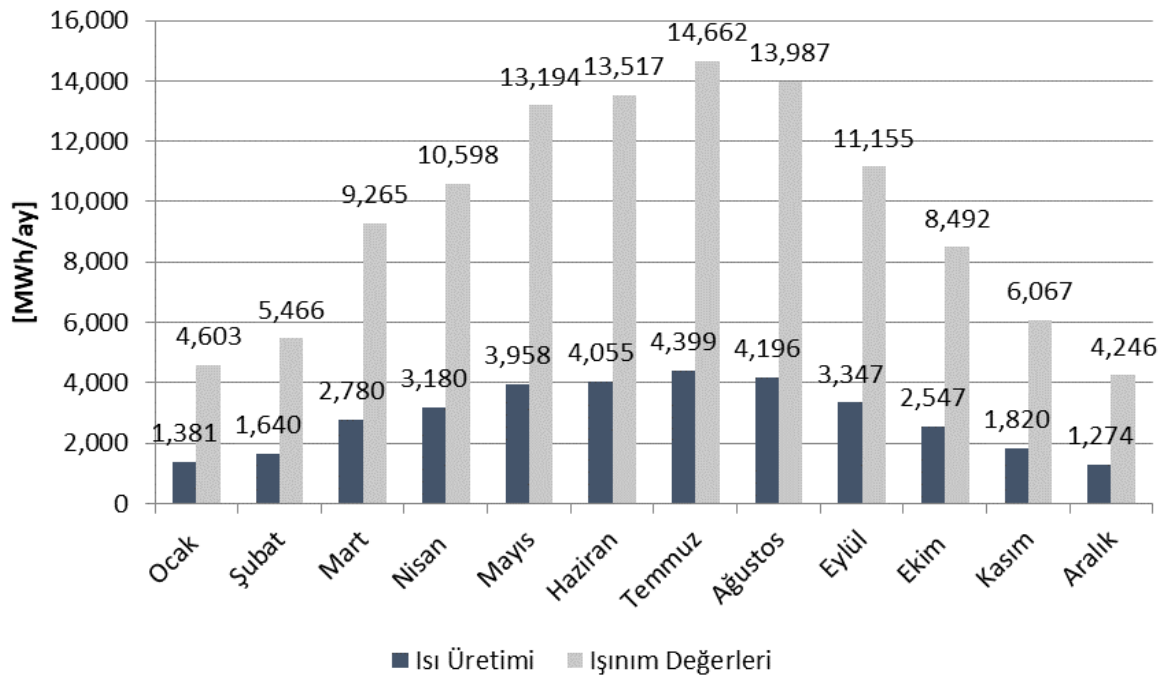
Şekil 5.3'te verilen soğuma sonucu Çizelge 5.1'de verilen net elektrik üretiminin üzerine, yıllık toplam 1,002 MW_eh daha fazla elektrik üretimi mümkün olacaktır. Şekil 5.3'te de görüleceği üzere kış aylarında bu fark az olmakta veya olmamaktadır. Sıcaklığın daha fazla olduğu yaz aylarında ise fark büyümektedir.

Elektrik üretiminin yanı sıra sisteminin ısı üretimi de söz konusu olacaktır. Üretilen ısı, elektriğe kıyasla çok daha fazla olmasına rağmen düşük sıcaklıklarda olacaktır. Bu sıcaklık, Bölüm 4'te verilen ölçüm değerleri ve [2], [5], [8], [10] referanslarında belirtildiği şekilde, zaman zaman kısa süreli de olsa 70 °C'lerin üzerine çıkabilse de genel olarak ortalama maksimum değer 60 °C mertebesinde düşünülebilir. Bu sıcaklık değeri elde

edilen enerjinin kullanım alanında kısıtlayıcı etki yaratmakta olup, özellikle düşük ısıtım ve soğuk iklim şartlarında daha da düşeceğinden değerlendirme imkânını zorlaştırmaktadır.

Üretilen ısı enerjisinin hesaplanmasında, sistemin iç enerjisinden bir kazanım elde edilmesi söz konusu olduğundan, literatürdeki deneysel çalışmaların sonuçlarından yola çıkılarak bir hesap yöntemi belirlenmiştir. Bu yöntem, Bölüm 4.2’ de bahsedilen şekilde, literatüre dayalı olarak, toplam güneş enerjisinin %30’u oranında -temkinli bir oran seçilerek- kazanım sağlanacağı düşünülerek hesaplanmıştır.

Bu değerlendirme sonucu elde edilen ısı enerjisinin dağılımı Şekil 5.4’te verilmiştir.



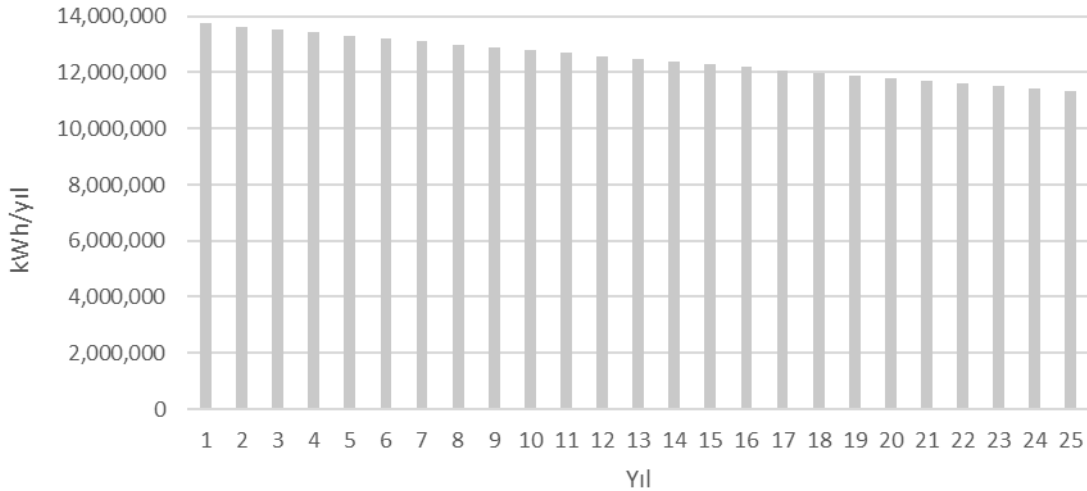
Şekil 5.4 Aylık toplam ısıtım ve ısı üretim dağılımı

Şekil 5.4’te görüldüğü üzere elektrik üretimin yanı sıra güneş enerjisinden yoğun olarak ısı enerjisi de elde edilmektedir. Şekilden görüleceği üzere bu ısı yaz aylarında çok daha fazla olmaktadır. Bunun da ötesinde daha önceden bahsedildiği üzere yaz aylarında elde edilen sıcaklıklar çok daha yüksek olacağı için bu dönemde önemli bir ekserji farkı da oluşacaktır. Yapılan hesaplara yıllık toplam ısı üretimi 34,575 MWh olmaktadır. Bu ısıyla beraber sistemin toplam verimi ise %42.8 olmaktadır. Özellikle ısı enerjisi tarafı için temkinli bir değerlendirme yapıldığından bu değer incelenen kaynaklardakilerin altında, daha ulaşılabilir olarak sonuçlanmaktadır.

5.1.3 Ekonomik Analiz

Sistemle ilgili ekonomik analiz, Bölüm 3.2’de belirtilen yaklaşımlar ve 25 yıl olarak öngörülen proje ekonomik ömrü üzerinden yapılmıştır. Bu proje ekonomik ömrü boyunca sistemin aynı koşullardaki PV sisteme göre ekonomik olarak karşılaştırılması yapılmaktadır. Karşılaştırılan iki sistem arasında; yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri, PV-T sisteminin ısı geliri ve panel soğuması sonucu üretilebilen elektriğin ekonomik getirisi sonuçları etkileyen faktörler olacaktır.

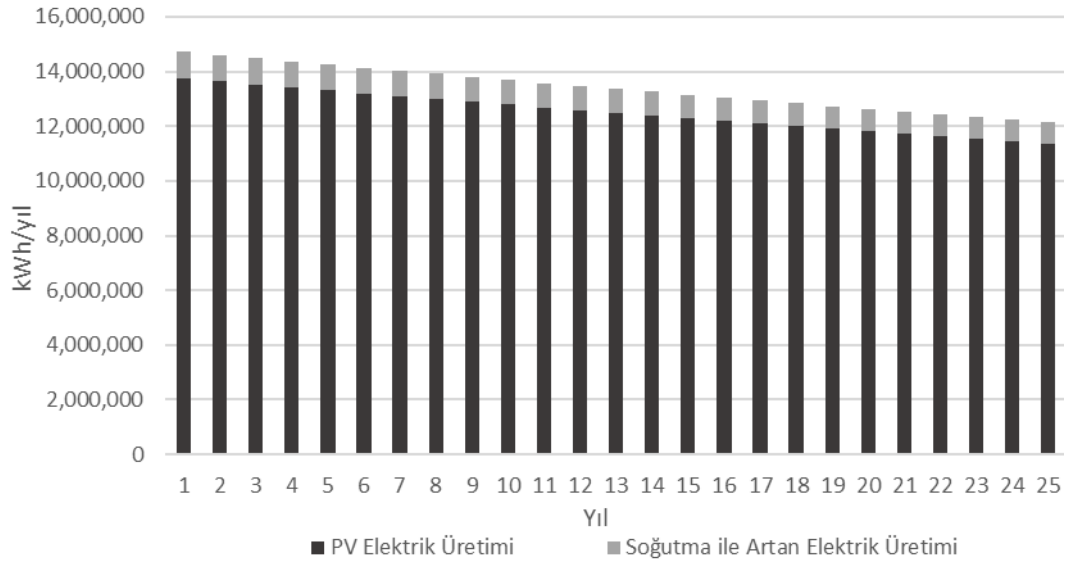
PV panel üreticileri, paneller hususunda 25 yıl ömür garantisi vermekle beraber, bu ömür boyunca panellerin performansı ile ilgili de garanti vermektedirler. Üreticiler tarafından, panel ömrü boyunca, panel üretim performansının yıllık en fazla %0.5-0.7 arasında düşeceği garanti edilmektedir. Proje ekonomik ömrü boyunca alınan 25 yılda ekonomik analiz yapılırken, panellerin performansını, daha temkinli bir değerlendirme adına, yıllık %0.8 azaldığı öngörüsü yapılmıştır. Buna bağlı olarak karşılaştırılan PV sisteminin, proje ömrü boyunca gelirleri de azalacaktır. Şekil 5.5, bu dağılımı yıllık olarak göstermektedir.



Şekil 5.5 Proje ömrü boyunca PV sisteminin hesaplanan elektrik üretim değerleri

Şekil 5.5’te görüldüğü üzere birinci yıl için hesaplanan 13,746 MW_eh elektrik üretimi her yıl düşmektedir.

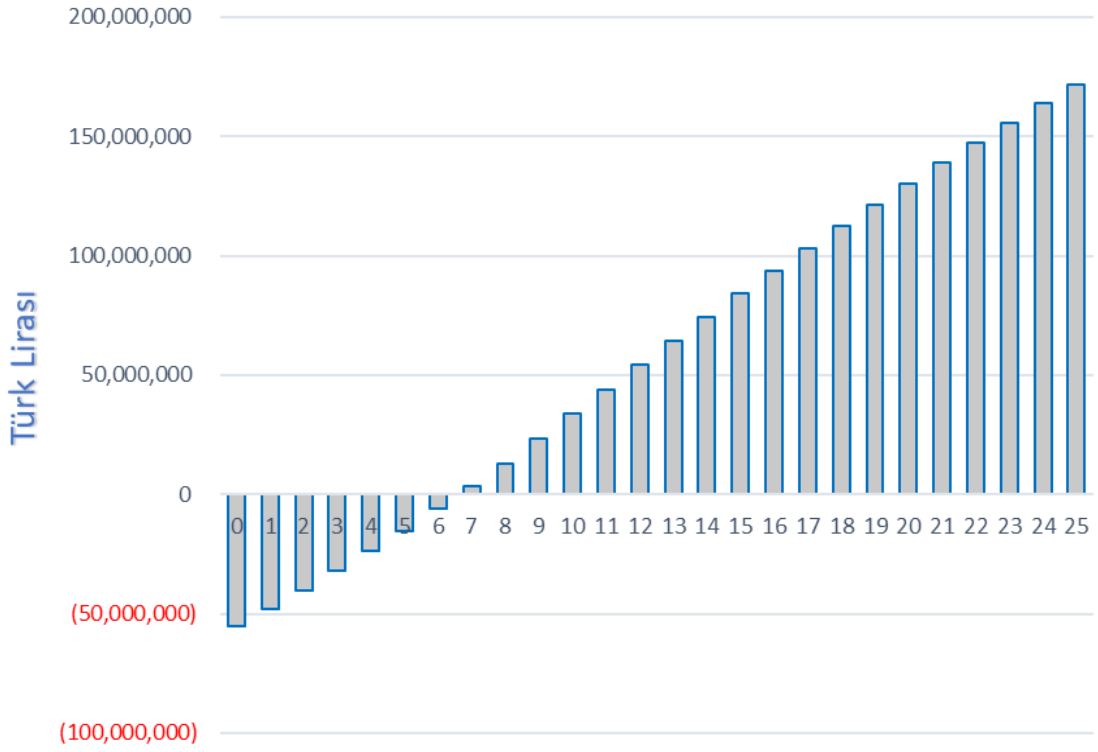
Şekil 5.6, proje ömrü boyunca soğutmadan dolayı artan elektrik miktarıyla beraber PV-T sisteminin elektrik üretimindeki performansını göstermektedir.



Şekil 5.6 Proje ömrü boyunca PV sistemi ve soğutma ile artan elektrik üretiminin dağılımı

Burada da birinci yıl için hesaplanan 14,748 MW_eh elektrik miktarının proje ömrü boyunca öngörülen dağılımı belirtilmiştir. Şekil 5.5’de verilen elektrik üretim değerleri, sıcaklık dolayısıyla oluşan kayıpları da kapsamaktadır. Bu kayıplar, soğutmayla kazanılarak Şekil 5.6’da gösterildiği gibi 1,002 MW_eh (1. yıl) daha fazla elektrik üretimi sağlayarak, toplamda 14,748 MW_eh değerine ulaşmıştır.

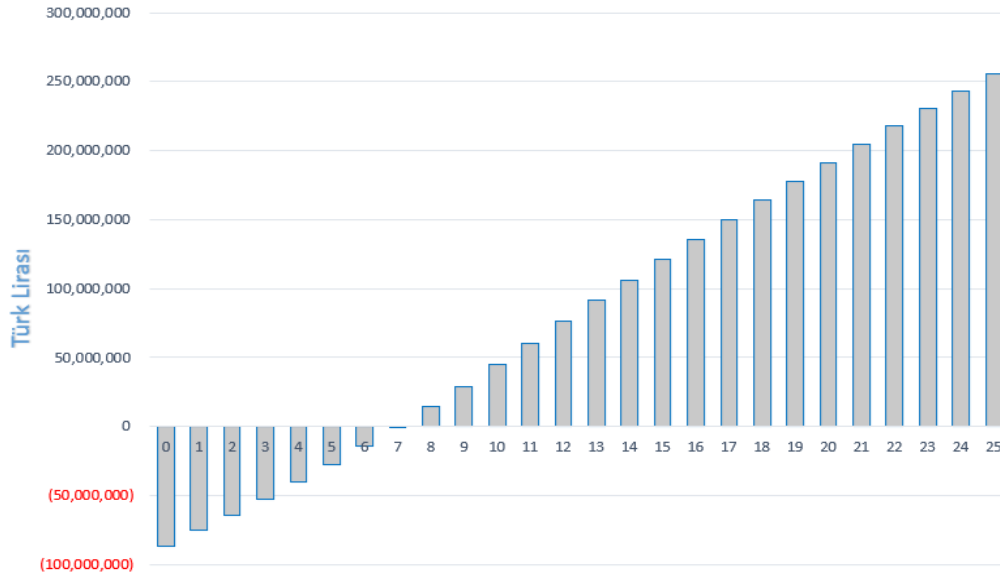
Şekil 5.7, aynı özellikteki sade PV yatırımının yapılan analizler sonucu çıkan toplam nakit akışı analizini göstermektedir.



Şekil 5.7 PV sisteminin proje ekonomik ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı

Şekil 5.7’de üretilen elektrikle beraber projenin toplam nakit akışının değişimi görülmektedir. Soğutma ile ilave elektrik kazancı olmadan yapılan değerlendirmede, yatırım şeklinde gözüken geri ödeme süresine kadar ekonomik olarak negatif konumdadır. Basit değerlendirmeyle, başa baş noktasından sonra pozitive geçen yatırımın, basit düzeydeki karlılığı açıkça görülmekte olup, tam bir kıyaslama yapmak için yeterli değildir.

Bir sonraki şekil olan Şekil 5.8, sistemin PV-T modeli ile çalıştırılması sonucu oluşan toplam nakit akışını göstermektedir.



Şekil 5.8 PV-T sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı

Şekil 5.8’de , PV-T sisteminin yüksek yatırım tutarı ile beraber hem ısı hem de elektrik tarafında daha fazla gelir elde ediyor oluşunun, toplam nakit akışına etkisi proje ömrü boyunca görülmektedir.

Çizelge 5.3, ekonomik analizde etkili bazı teknik bilgilerle beraber analizin özünde kullanılan etkili parametreleri göstermektedir.

Çizelge 5.3 Ekonomik analizde kullanılan değerler

Parametre	Birim	Değer (PV)	Değer (PV+Soğuma)	Değer (PV-T)
Yatırım Tutarı	USD	10,000,000	15,600,000	15,600,000
Döviz kuru ¹	USD/TL	5.5274		
Toplam kurulu güç (Elektrik)	kW _e	10,000	10,000	10,000
Panel performans düşüşü (yıllık)	%	0.8	0.8	0.8
Net elektrik üretimi (yıl 1)	MW _e /yıl	13,746	14,748	14,748
Net ısı durumu	kW _t /yıl	0	0	34,575,360
İşletme ve bakım maliyetleri (yıl 1)	TL/yıl	820,923	1,198,003	1,198,003
İskonto oranı	%	20	20	20
Elektrik fiyatı ²	TL/kWh	0.5972	0.5972	0.5972
Isı fiyatı ³ (%80 kazan verimi ile)	TL/kWh	-	-	0.13
Birim fiyat ve maliyetler artış oranı	%	5	5	5
Proje ömrü	Yıl	25	25	25

¹ TCMB 22.03.2019 tarihli döviz kuru

² EPDK Ekim 2018 mesken için elektrik fiyatı

³ İGDAŞ 2019 yılı gaz fiyatı ile yapılan hesaba göre

Teknik veriler sonucu her iki durumun ekonomik olarak proje ömrü boyunca karşılaştırması yapılmıştır. Ekonomik açıdan en kötü senaryo olacağı için ısının değerlendirilemediği, sadece soğutma yapılan bir yatırım dikkate alınmamıştır.

Karşılaştırma amaçlı yapılan ekonomik analizlerin sonuçları Çizelge 5.4 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.4 Ekonomik Sonuçlar

Parametre	Birim	Değer (PV)	Değer (PV-T)
İç Verim Oranı (IRR)	%	15.38	14.59
Net Bugünkü Değer (r=%20)	TL	-12,708,203	-23,296,929
Geri Ödeme Süresi	yıl	6.66	7.02

Ekonomik sonuçlar çizelgesinden görüldüğü üzere, yapılan ekonomik analizlere göre yatırımlar, “Geri Ödeme Süresi” ve “IRR” değeri açısından oldukça iyi olmalarına rağmen, yüksek iskonto oranı ile yapılan hesaba göre ekonomik açıdan uygun olmayan (-) NPV sonucu vermiştir. En iyi durum olan PV yatırımı için bile hesaplanan %15.38 IRR değeri projenin ekonomik açıdan bu değer ve altındaki iskonto oranlarında karlı bir yatırım olacağını göstermektedir. Bu durumda ısı kullanılsa da kullanılsa da PV-T yatırımının ekonomik olarak kabul görmeyeceği sonucu çıkmaktadır. Bununla beraber literatürde de belirtildiği şekilde; sisteme ek yapılan daha optimum kapasiteli ve ucuz bir solar kollektör yatırımı toplamda ekonomik ve teknik açıdan daha uygun sonuçlar verecektir.

5.2 Orta Kapasite için Uygulama Analizi

Kojenerasyon sistemleri, elektrik ve ısı türünde enerji tüketimleri özellikle günün 24 saatlik zaman dilimi ve yıl boyu bir düzen teşkil eden endüstriyel tesisler gibi kullanım noktaları için enerjiyi daha verimli değerlendirmesi dolayısıyla ön plana çıkmaktadırlar. Değerlendirilen PV-T sistemleri ile 24 saatlik döngüde olmasa da gündüz döngüleri baz alınarak enerji üretimi ve ihtiyacı karşılama söz konusu olabilir. Fakat ısı ihtiyacının çok olduğu kış ayları ve akşam şartlarında üretim düşük ya da “sıfır” iken; ihtiyacın az olduğu yaz ayları ve öğle saatlerinde ısı üretimi yüksek olmaktadır. Bu durum özellikle ısının kullanımında düşük sıcaklıkta olmasıyla beraber zorluk oluşturmaktadır.

5.2.1 Uygulama Özeti

Son durumdaki ilgili lisansız elektrik üretim yönetmeliklerinin de göz önünde bulundurulması dolayısıyla, mevcut şartlarda 1 MW_e elektrik gücündeki kurulu bir sistemin kapsamda değerlendirilmesine karar verilmiştir.

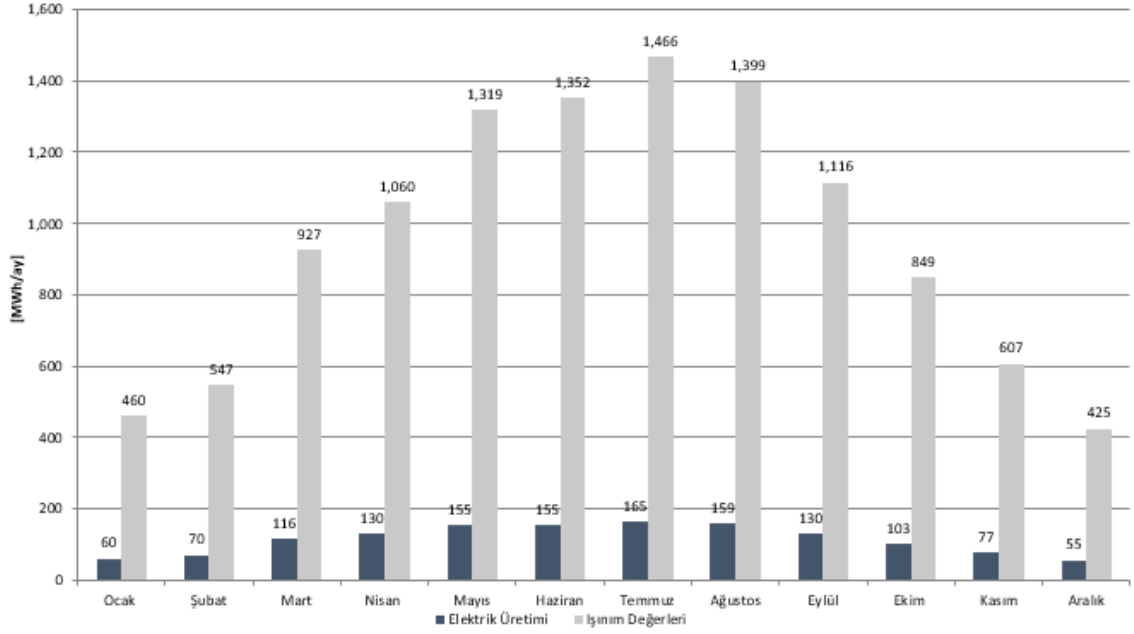
5.2.2 Teknik Analiz

Teknik analizde aynı parametreler dikkate alınarak orta kapasiteli bir yatırımın değerlendirilmesi yapılmıştır. Teknik analizde kullanılan ve hesaplanan önemli sistem parametreleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5 1 MW_e için sistem parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Arazi için gerekli uygulama alanı	m ²	19,200
Spesifik panel alanı	m ² /kW _e	6.4
Arazi kurulumu sistem eğimi	(°)	31
Panel gücü	W _p	250
Panel elektrik verimi	%	15.2
Panel sayısı	adet	4,000
Toplam kurulu güç	kW _e	1,000
Panel performans düşüşü (yıllık)	%	0.8
PV Net elektrik üretimi (Yıl 1)	kWh/yıl	1,374,620
PV Kapasite faktörü	%	15.7
PV Spesifik üretim	kW _e h/kW _e	1,375

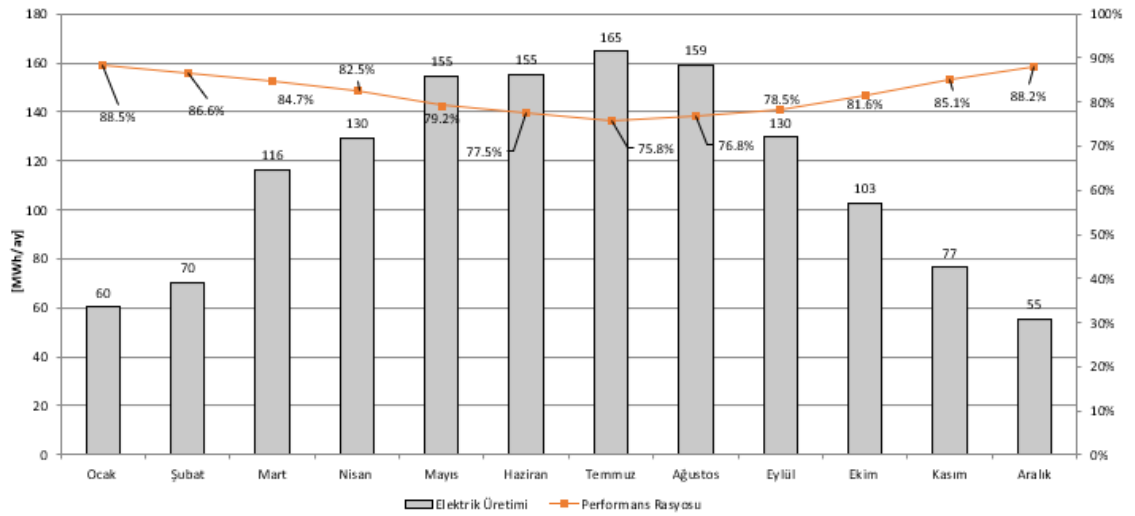
Kullanılan ışıınım değerleri ve sistem parametreleri ile değerler MW_eh olarak aylık bazda hesaplanmıştır. Aylık toplam ışıınım ve elektrik üretim dağılımı Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9 1 MW_e için aylık toplam ısıtım ve elektrik üretim dağılımı

Şekil 5.9, değerlendirilen sistemin elde edilen ısıtım ile ürettiği aylık elektrik miktarının dağılımını göstermektedir. Belirtilen aylık elektrik üretim değerleri gözleendiği üzere aynı parametreler kullanıldığından diğer aynı kapasitelerle örtüşmektedir. Bu değerler, sistemin ısı dolayısıyla oluşan kayıplarının da göz önünde bulundurulmasıyla hesaplanmıştır.

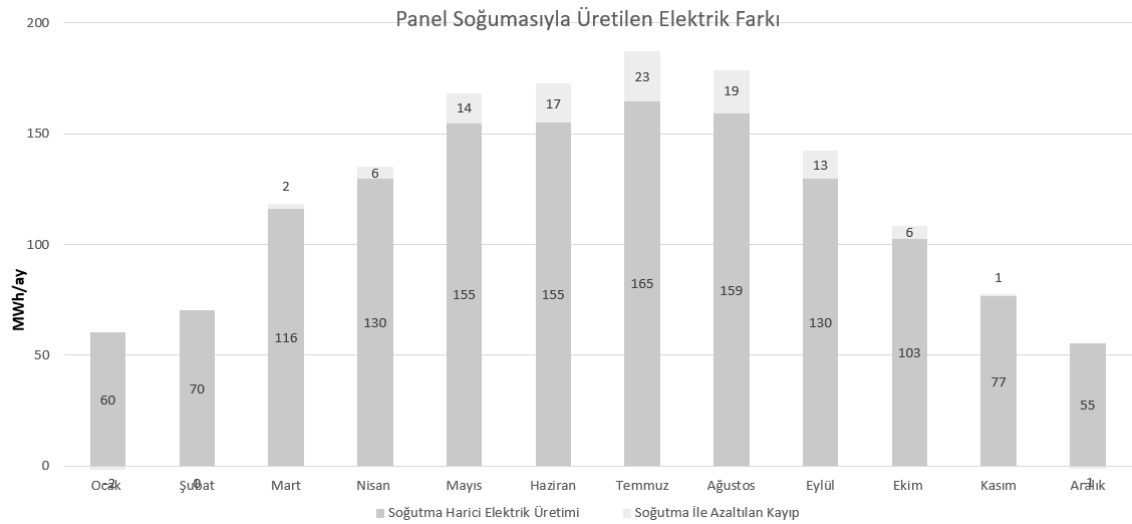
Şekil 5.10, bu ısı kayıplarının da göz önünde bulundurulduğu performans rasyosu değişimini ve elektrik üretimini aylık bazda göstermektedir.



Şekil 5.10 1 MW_e için ısı etkisinden dolayı oluşan kayıpların göz önünde bulundurulduğu aylık elektrik üretim ve performans rasyosu dağılımı

Bu şekilde de yine sonuçlar bir önceki değerlendirmedekiler ile sistemin doğası gereği paralellik göstermektedir.

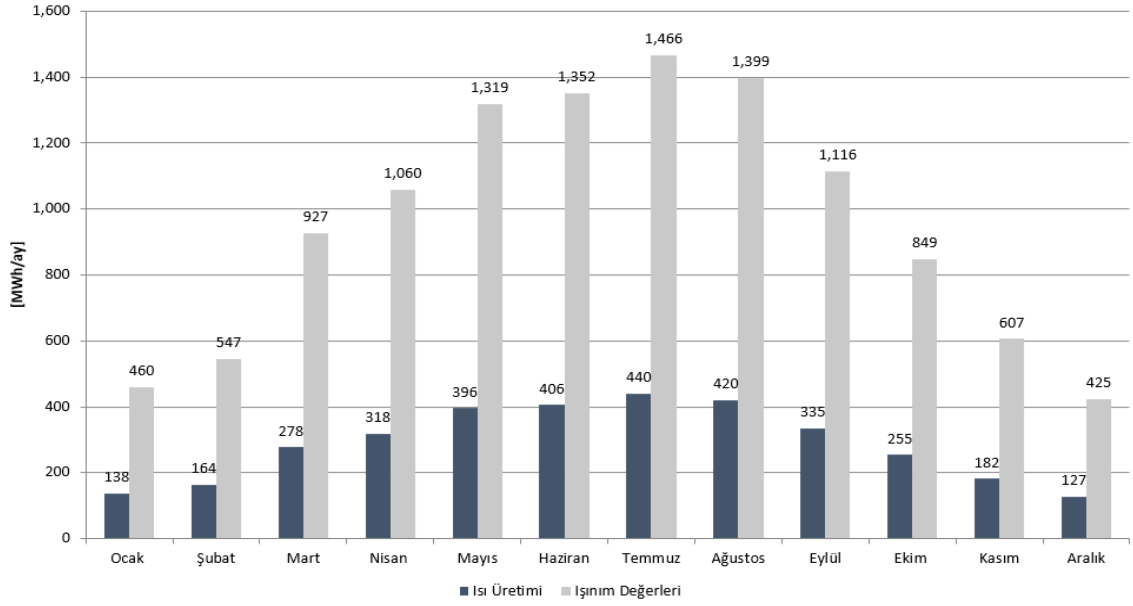
Şekil 5.11, yine 10 MW_e kapasitede olduğu gibi, ısı etki dolayısıyla oluşan kayıpların azaltılmasıyla beraber performans rasyosundaki artıştan dolayı meydana gelen elektrik üretim artışını ve toplam elektrik üretimini aylık olarak göstermektedir.



Şekil 5.11 Sistemin aylık elektrik dağılımının normal elektrik üretimi ve soğutulmasıyla beraber oluşan farkı

Şekil 5.11’de verilen soğuma sonucu Çizelge 5.5’te verilen net elektrik üretiminin üzerine yıllık toplam 100 MW_eh (1.yıl için) daha fazla elektrik üretimi mümkün olacaktır. Şekil 5.11’den de görüleceği üzere kış aylarında bu fark az olmakla beraber sıcaklığın daha fazla olduğu yaz aylarında fark çok daha fazla büyümektedir.

Bu değerlendirme sonucu elde edilen ısı enerjisinin dağılımı Şekil 5.12’de verilmiştir.

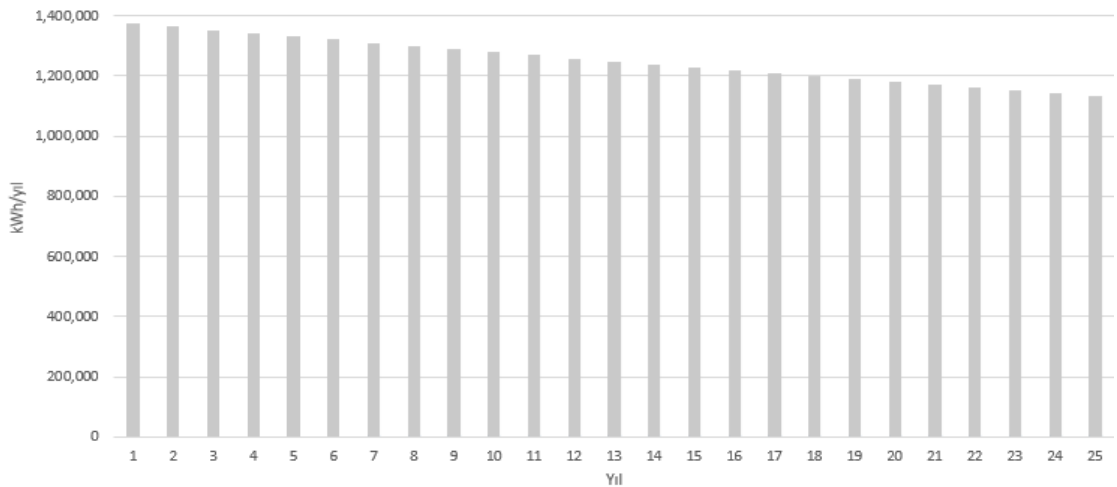


Şekil 5.12 Aylık toplam ışınlam ve ısı üretim dağılımı

Şekil 5.12’de görüldüğü üzere elektrik üretimin yanı sıra güneş enerjisinden yoğun olarak ısı enerjisi de elde edilmektedir. Yapılan hesaplara yıllık toplam ısı üretimi 3,458 MW_th olmaktadır. Bu ısıya beraber sistemin toplam veriminin %42.8 olduğu sonucuna varılmaktadır. Özellikle ısı enerji tarafı için temkinli bir değerlendirme yapıldığından bu değer incelenen kaynaklardakilerin altında, daha ulaşılabilir olarak sonuçlanmaktadır.

5.2.3 Ekonomik Analiz

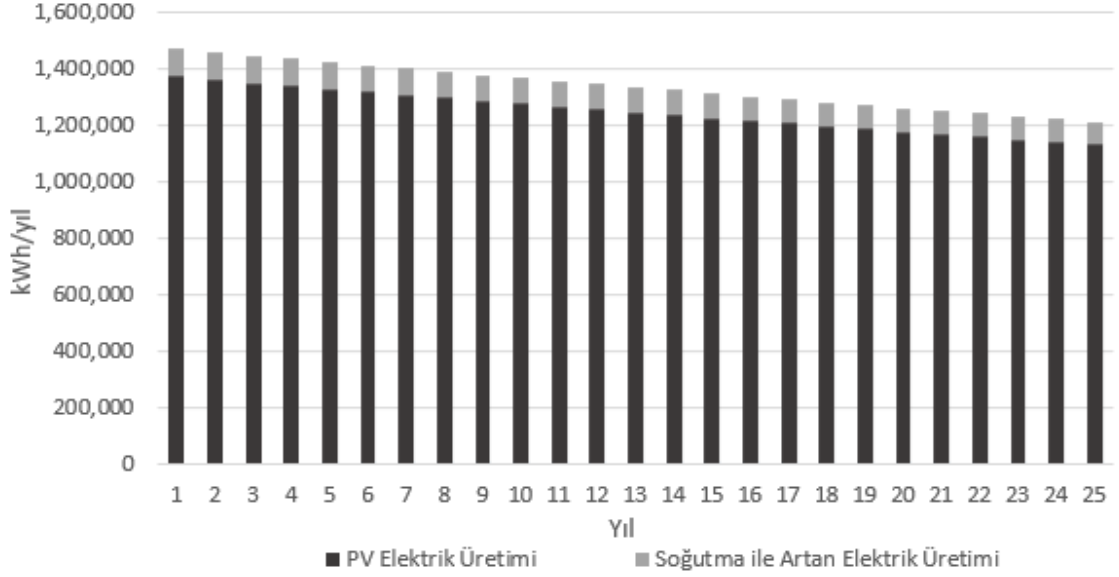
10 MW_e kapasitede olduğu gibi, projenin 25 yıllık ömrü boyunca yapılan ekonomik analizde kullanılan üretim değerleri Şekil 5.13’te verilmiştir.



Şekil 5.13 Proje ömrü boyunca 1 MW_e PV sisteminin hesaplanan elektrik üretim değerleri

Şekilde görüldüğü üzere birinci yıl için hesaplanan 1,375 MW_eh elektrik üretimi her yıl düşmektedir.

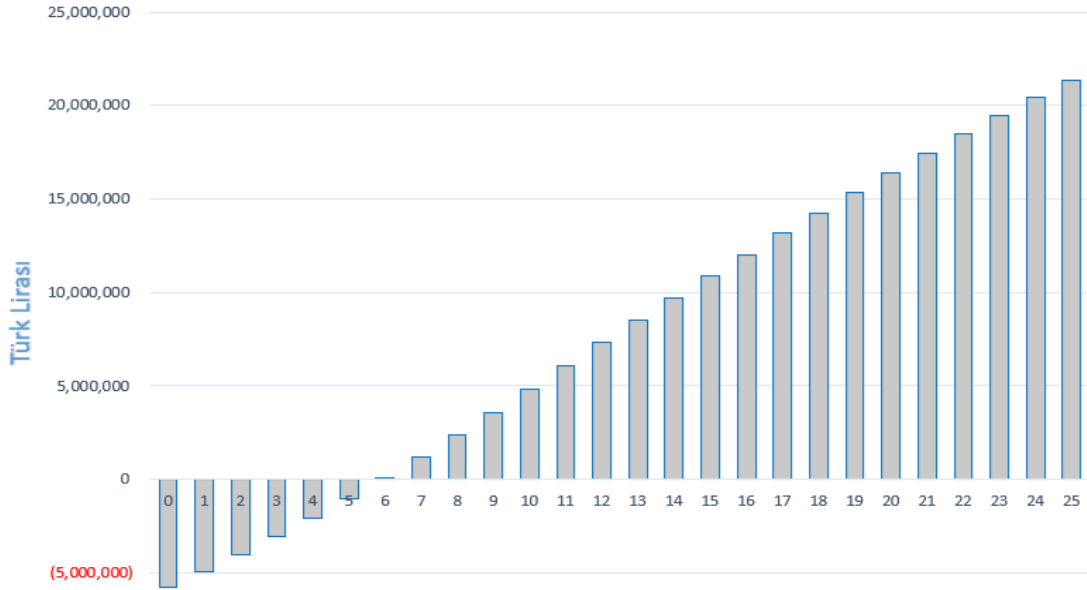
Şekil 5.14, proje ömrü boyunca soğutmadan dolayı artan elektrik miktarıyla beraber PV-T sisteminin performansını göstermektedir.



Şekil 5.14 Proje ömrü boyunca 1 MW_e PV sistemi ve soğutma ile artan elektrik üretiminin dağılımı

Burada da birinci yıl için hesaplanan 1,475 MW_eh elektrik miktarının proje ekonomik ömrü boyunca öngörülen dağılımı belirtilmiştir. Şekil 5.13'te verilen elektrik üretim değerleri, sıcaklık ile oluşan kaybı da kapsamaktadır. Bu kayıp, soğutmayla kazanılarak Şekil 5.14'te gösterildiği gibi 100 MW_eh (1. yıl) daha fazla elektrik üretimi sağlanarak, toplamda 1,475 MW_eh değerine ulaşılmıştır.

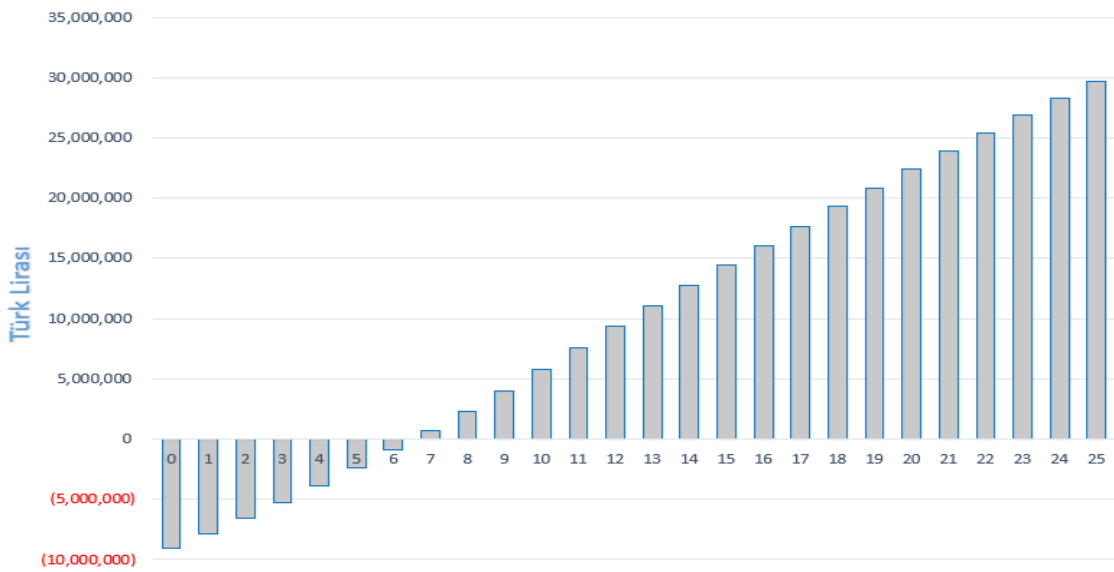
Bir sonraki şekil olan Şekil 5.15, aynı özellikteki sade PV yatırımının yapılan analizler sonucu çıkan toplam nakit akışı analizini göstermektedir.



Şekil 5.15 1 MW_e PV sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı

Yukarıdaki şekilde üretilen elektrikle beraber projenin toplam nakit akışının değişimi gözükmemektedir. Soğutma ile ilave elektrik kazancı olmadan yapılan değerlendirmede, yatırım şeklinde gözüken geri ödeme süresine kadar ekonomik olarak negatif konumdadır. Başa baş noktasından sonra ekonomik olarak pozitifte geçen yatırımın, basit düzeydeki karlılığı açıkça gözükmemekte olup, tam bir kıyaslama yapmak için yeterli değildir.

Şekil 5.16, sistemin PV-T modeli ile çalıştırılması sonucu oluşan toplam nakit akışını göstermektedir.



Şekil 5.16 PV-T sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı

Şekil 5.16’da, PV-T sisteminin yüksek yatırım tutarı ile beraber hem ısı hem de elektrik tarafında daha fazla gelir elde ediyor oluşunun, toplam nakit akışına etkisi proje ömrü boyunca görülmektedir.

Çizelge 5.6, ekonomik analizde etkili bazı teknik bilgilerle beraber analizin özünde kullanılan etkili parametreleri göstermektedir.

Çizelge 5.6 Ekonomik analizde kullanılan değerler

Parametre	Birim	Değer (PV)	Değer (PV+Soğuma)	Değer (PV-T)
Yatırım Tutarı	USD	1,050,000	1,638,000	1,638,000
Döviz kuru ¹	USD/TL	5.5274		
Toplam kurulu güç (Elektrik)	kW _e	1,000	1,000	1,000
Panel performans düşüşü (yıllık)	%	0.8	0.8	0.8
Net elektrik üretimi (yıl 1)	MWh/yıl	1,375	1,475	1,475
Net ısı durumu	kW _t /yıl	0	0	3,457,536
İşletme ve bakım maliyetleri (yıl 1)	TL/yıl	98,258	135,517	135,517
İskonto oranı	%	20	20	20
Elektrik fiyatı ²	TL/kWh	0.7148	0.7148	0.7148
Isı fiyatı ³ (%80 kazan verimi ile)	TL/kWh	-	-	0.13
Birim fiyat ve maliyetler artış oranı	%	5	5	5
Proje ömrü	Yıl	25	25	25

Teknik veriler sonucu her iki durumun ekonomik olarak proje ömrü boyunca karşılaştırması yapılmıştır. Ekonomik açıdan en kötü senaryo olacağı için ısının değerlendirilemediği bir PV-T yatırımı dikkate alınmamıştır.

Karşılaştırma amaçlı yapılan ekonomik analizlerin sonuçları Çizelge 5.7 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.7 Ekonomik Sonuçlar

Parametre	Birim	Değer (PV)	Değer (PV-T)
İç Verim Oranı (IRR)	%	17.58	15.77
Net Bugünkü Değer (r=%20)	TL	-708,989	-1,931,715
Geri Ödeme Süresi	yıl	5.93	6.57

¹ TCMB 22.03.2019 tarihli döviz kuru

² EPDK Ekim 2018 ticari kullanıcı için elektrik fiyatı

³ İGDAŞ 2019 yılı gaz fiyatı ile yapılan hesaba göre

Ekonomik sonuçlar çizelgesinden görüldüğü üzere, yapılan ekonomik analizlere göre yatırımlar, “Geri Ödeme Süresi” ve “IRR” değeri açısından oldukça iyi olmalarına rağmen, yüksek iskonto oranı ile yapılan hesaba göre ekonomik açıdan uygun olmayan (-) NPV sonucu vermiştir. Hesaplanan %17.58 IRR değeri projenin ekonomik açıdan bu değer ve altındaki iskonto oranlarında karlı bir yatırım olacağını göstermektedir. Büyük kapasitedeki ekonomik değerlendirmeye paralel olarak sade bir PV yatırımı, ısı kullanılsa da kullanılmasa da PV-T yatırımına göre avantajlı olmaktadır.

5.3 Küçük Kapasite için Uygulama Analizi

PV-T uygulamaları daha küçük mertebelerde özellikle şebeke bağlantılarının olmadığı, enerji ihtiyacını karşılama durumları için dikkate alınabilir. Şebeke bağlantısı olmayan noktalarda kullanımı ve enerji kesintilerindeki avantajlarının yanı sıra; küçük kapasitede yapılacak birçok uygulama, toplamda enerji arzı ve çevreye olan dolaylı katkısıyla ön plana çıkmaktadır. Bu kapasitedeki sistemler, sabit kurulumla uygulanabileceği gibi çeşitli deniz taşıtları veya geçici amaçla kurulan sistem ve yapılara mobil olarak enerji tedariki sağlayabilirler.

5.3.1 Uygulama Özeti

Çalışma konusu sistemlerin daha küçük kapasitelerde değerlendirilmesinde 2 kW_e elektrik kurulu gücündeki bir örnek sistem göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapasite belirlenirken mevcut yönetmeliklere uygunluk, kolaylığı ve küçük kapasitelerdeki ortalama enerji ihtiyacı dikkate alınarak ulaşılmıştır. Ayrıca Bölüm 4’te verilen ölçümler aynı kapasitede oluşu, oradan gelen ölçümlerle analizler arasında karşılaştırma yapma imkânı sunmaktadır.

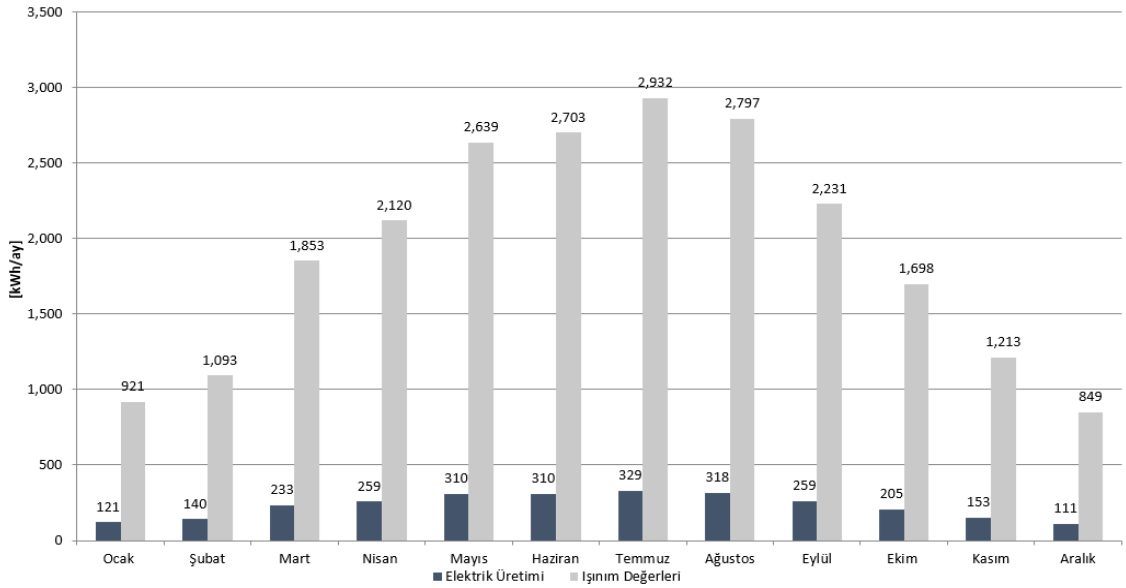
5.3.2 Teknik Analiz

Teknik analizde aynı parametreler dikkate alınarak küçük kapasiteli bir yatırımın değerlendirilmesi yapılmıştır. Teknik analizde kullanılan ve hesaplanan önemli sistem parametreleri bir sonraki çizelgede (Çizelge 5.8) verilmiştir.

Çizelge 5.8 2 kW_e için sistem parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Çatı için gerekli uygulama alanı	m ²	14
Spesifik panel alanı	m ² /kW _e	6.4
Optimum sistem eğimi	(°)	31
Panel gücü	W _p	250
Panel elektrik verimi	%	15.2
Panel sayısı	adet	8
Toplam kurulu güç	kW _e	2
Panel performans düşüşü (yıllık)	%	0.8
PV Net elektrik üretimi (Yıl 1)	kWh/yıl	2,749
PV Kapasite faktörü	%	15.7
PV Spesifik üretim	kW _e h/kW _e	1,375

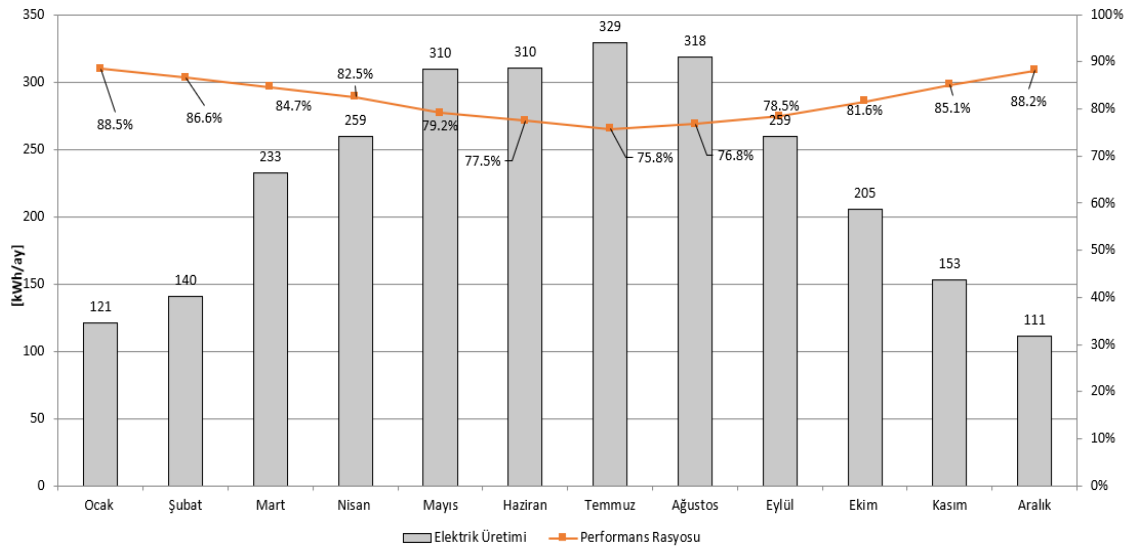
Kullanılan ışıınım değerleri ve sistem parametreleri ile değerler kWh olarak aylık bazda hesaplanmıştır. Aylık toplam ışıınım ve elektrik üretim dağılımı Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17 2 kW_e sistem için aylık toplam ışıınım ve elektrik üretim dağılımı

Şekil 5.17, değerlendirilen sistemin elde edilen ışıınım ile ürettiği aylık elektrik miktarının dağılımını göstermektedir. Belirtilen aylık elektrik üretim değerleri gözleendiği üzere aynı parametreler kullanıldığından, diğer kapasitelerle paralellik göstermektedir. Sistemin ısı dolayısıyla oluşan kayıplarının da göz önünde bulundurulmasıyla hesaplanmıştır. Burada mayıs, haziran ve temmuz ayları elektrik üretim değerleri; 310 kWh, 310 kWh ve 329 kWh’dir. Bu değerler Bölüm 4’teki, sırasıyla yine aynı aylar için olan 272 kWh, 330 kWh, 351 kWh değerleri ile oldukça yakınlık göstermektedir.

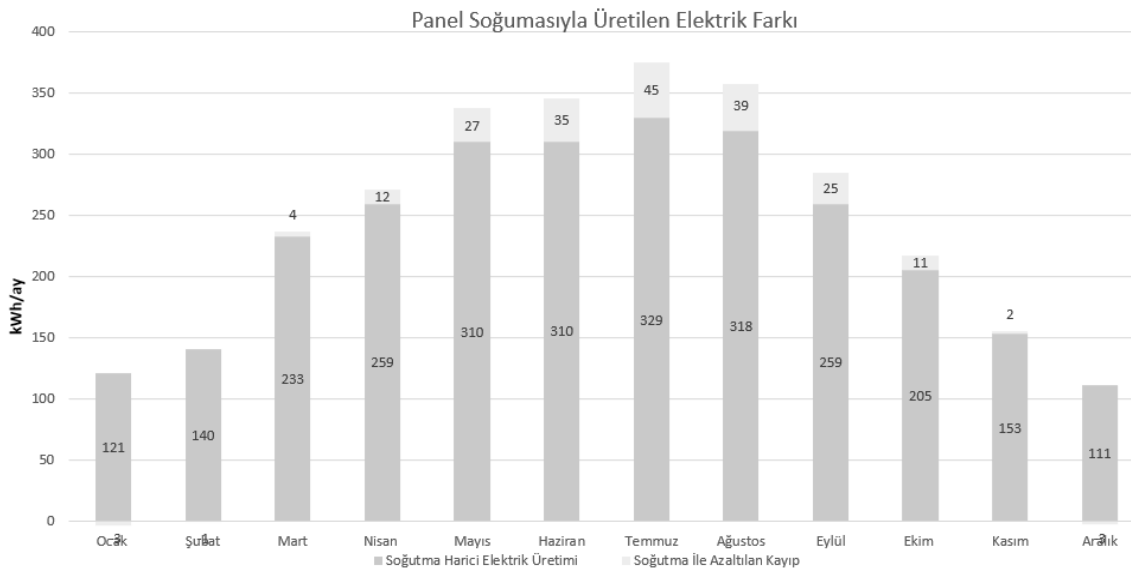
Şekil 5.18, ısı kayıplarının da göz önünde bulundurulduğu performans rasyosu değişimini ve elektrik üretimini aylık bazda göstermektedir.



Şekil 5.18 2 kW_e sistem için ısı etkisinden dolayı oluşan kayıpların göz önünde bulundurulduğu aylık elektrik üretim ve performans rasyosu dağılımı

Bu şekilde de yine sonuçlar bir önceki değerlendirmedekiler ile sistemin doğası gereği paralellik göstermektedir.

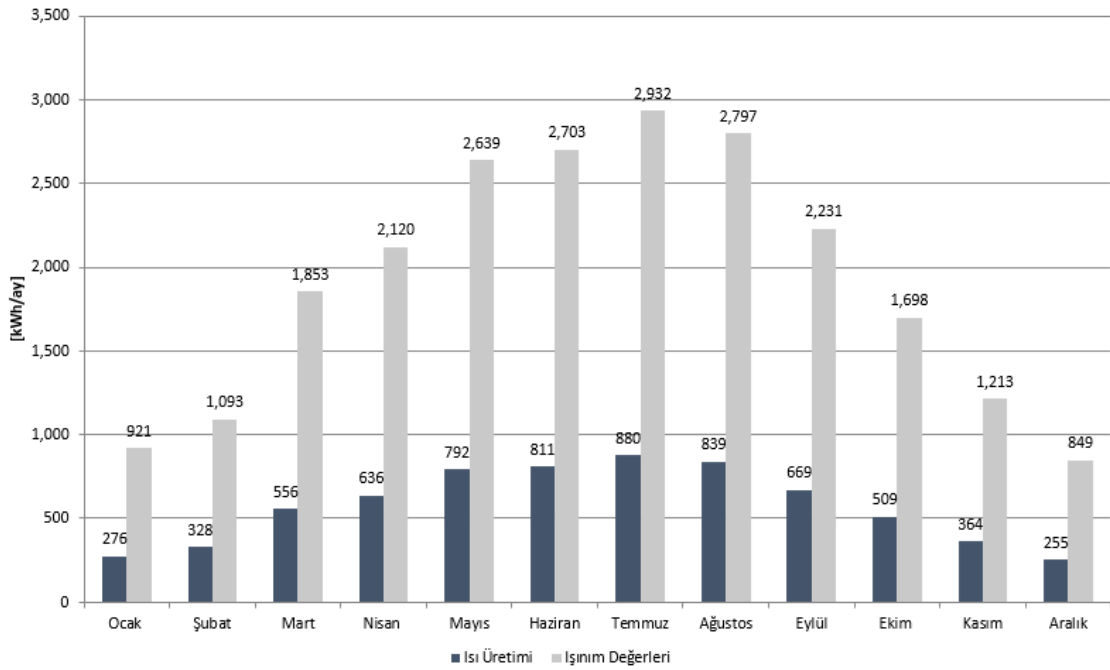
Şekil 5.19, 10 MW_e ve 1 MW_e kapasitede olduğu gibi, ısı etki dolayısıyla oluşan kayıpların azaltılmasıyla beraber performans rasyosundaki artıştan dolayı meydana gelen elektrik üretim artışını ve toplam elektrik üretimini aylık olarak göstermektedir.



Şekil 5.19 2 kW_e sistemin aylık elektrik dağılımının normal elektrik üretimi ve soğutulmasıyla beraber oluşan farkı

Şekil 5.19’da verilen soğuma sonucu Çizelge 5.8’de verilen net elektrik üretiminin üzerine yıllık toplam 200 kW_eh daha fazla elektrik üretimi mümkün olacaktır. Şekilden de görüldüğü üzere kış aylarında bu fark az olmakla beraber sıcaklığın daha fazla olduğu yaz aylarında fark çok daha fazla büyümektedir.

Bu değerlendirme sonucu elde edilen ısı enerjisinin dağılımı Şekil 5.20’de verilmiştir.

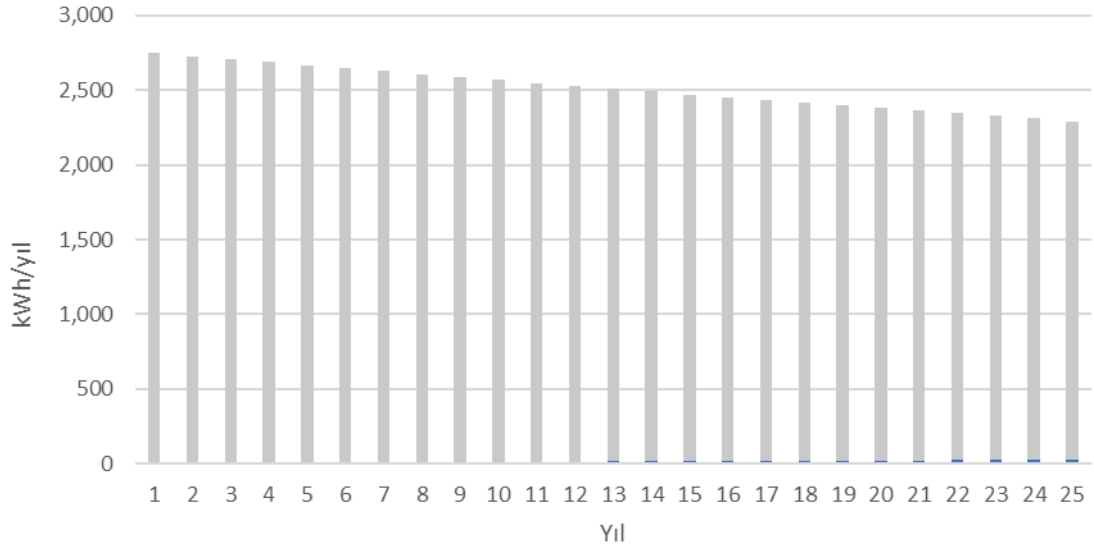


Şekil 5.20 2 kW_e sistemin aylık toplam ısıtım ve ısı üretim dağılımı

Şekil 5.20’de görüldüğü üzere elektrik üretimin yanı sıra güneş enerjisinden yoğun olarak ısı enerjisi de elde edilmektedir. Yapılan hesapla yıllık toplam ısı üretimi 6,915 kW_th olmaktadır. Bu ısıyla beraber sistemin toplam veriminin %42.8 olduğu hesaplanmaktadır. Özellikle ısı enerji tarafı için temkinli bir değerlendirme yapıldığından bu değer incelenen kaynaklardakilerin altında, daha ulaşılabilir olarak sonuçlanmaktadır.

5.3.3 Ekonomik Analiz

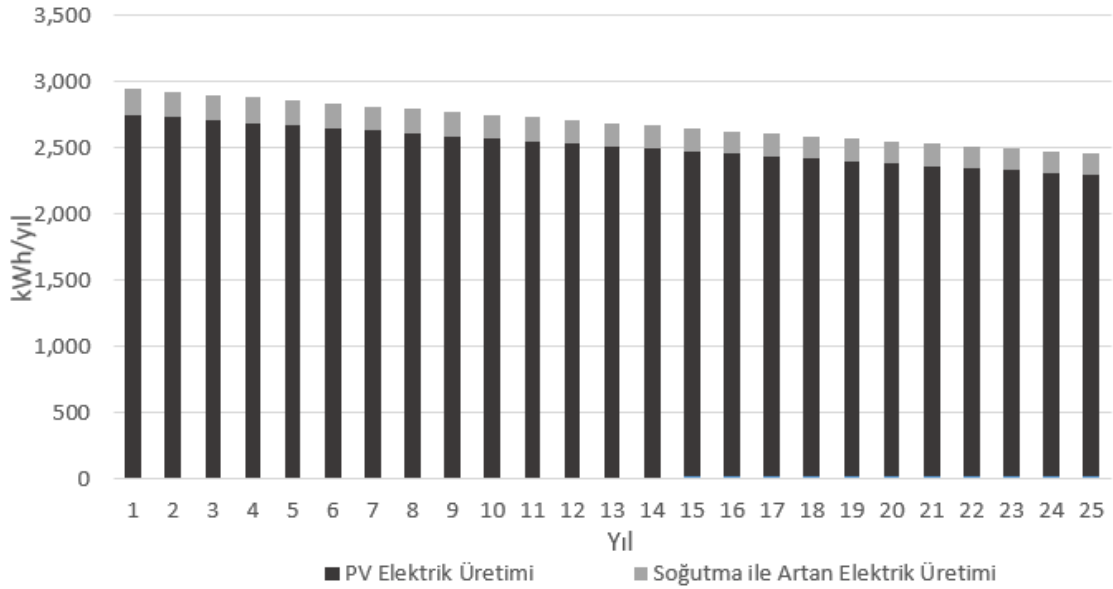
10 MW_e ve 1 MW_e kapasitelerinde olduğu gibi, projenin 25 yıllık ömrü boyunca yapılan ekonomik analizde kullanılan üretim değerleri Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Proje ömrü boyunca 2 kW_e PV sisteminin hesaplanan elektrik üretim değerleri

Şekilde görüldüğü üzere birinci yıl için hesaplanan 2,749 kW_eh elektrik üretimi her yıl düşmektedir.

Şekil 5.22, proje ömrü boyunca soğutmadan dolayı artan elektrik miktarıyla beraber PV-T sisteminin performansını göstermektedir.

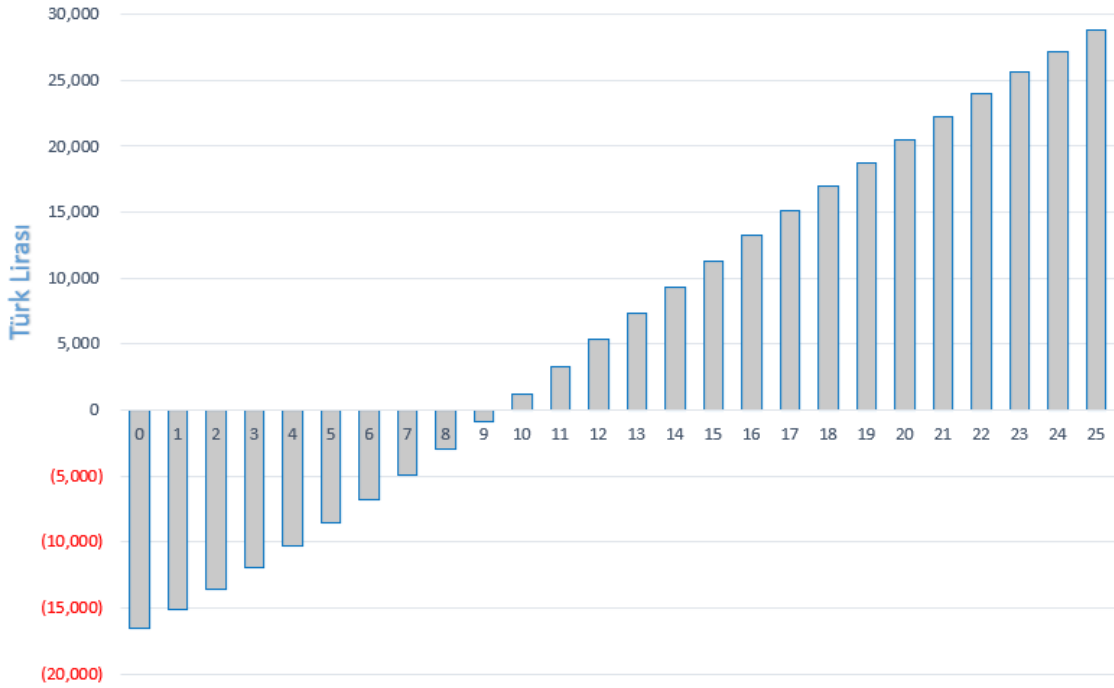


Şekil 5.22 Proje ömrü boyunca 2 kW_e PV sistemi ve soğutma ile artan elektrik üretiminin dağılımı

Burada da birinci yıl için hesaplanan 2,949 kW_eh elektrik miktarının proje ömrü boyunca öngörülen dağılımı belirtilmiştir. Şekil 5.21’de verilen elektrik üretim değerleri sıcaklık kayıplarını da kapsamaktadır. Bu kayıp, soğutmayla kazanılarak, Şekil 5.22’de gösterildiği

gibi 200 kW_eh (1. yıl) daha fazla elektrik üretimiyle toplamda 2,949 kW_eh değerine ulaşılmıştır. Bunun proje ömrü boyunca dağılımı Şekil 5.22’de gözükmemektedir.

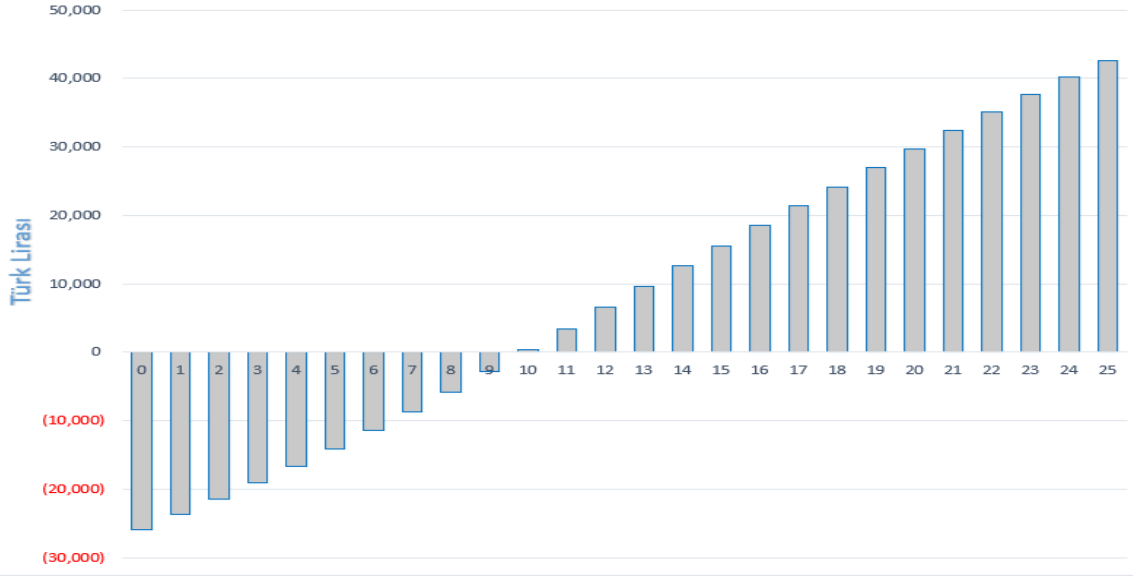
Şekil 5.23, aynı özellikteki sade PV yatırımının yapılan analizler sonucu çıkan toplam nakit akışı analizini göstermektedir.



Şekil 5.23 2 kW_e PV sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı

Şekil 5.23’de üretilen elektrikle beraber projenin toplam nakit akışının değişimi gözükmemektedir. Soğutma ile ilave elektrik kazancı olmadan yapılan değerlendirmede, yatırım şekilde gözüken geri ödeme süresine kadar ekonomik olarak negatif konumdadır. Başa baş noktasından sonra ekonomik olarak pozitif geçen yatırımın, basit düzeydeki karlılığı açıkça gözükmemekte olup, tam bir kıyaslama yapmak için yeterli değildir.

Şekil 5.24, sistemin PV-T modeli ile çalıştırılması sonucu oluşan toplam nakit akışını göstermektedir.



Şekil 5.24 2 kW_e PV-T sisteminin proje ömrü boyunca oluşan toplam nakit akışı

Şekil 5.24'te, PV-T sisteminin yüksek yatırım tutarı ile beraber hem ısı hem de elektrik tarafında daha fazla gelir elde ediyor oluşunun, toplam nakit akışına etkisi proje ömrü boyunca görülmektedir.

Çizelge 5.9, ekonomik analizde etkili bazı teknik bilgilerle beraber analizin özünde kullanılan etkili parametreleri göstermektedir.

Çizelge 5.9 Ekonomik analizde kullanılan değerler

Parametre	Birim	Değer (PV)	Değer (PV+Soğuma)	Değer (PV-T)
Yatırım Tutarı	USD	3,000	4,680	4,680
Döviz kuru ¹	USD/TL	5.5274		
Toplam kurulu güç (Elektrik)	kW _e	2	2	2
Panel performans düşüşü (yıllık)	%	0.8	0.8	0.8
Net elektrik üretimi (yıl 1)	kWh/yıl	2,749	2,949	2,949
Net ısı durumu	kWh/yıl	0	0	6,915
İşletme ve bakım maliyetleri (yıl 1)	TL/yıl	164	239	239
İskonto oranı	%	20	20	20
Elektrik fiyatı ²	TL/kWh	0.5972	0.5972	0.5972
Isı fiyatı ³ (%80 kazan verimi ile)	TL/kWh	-	-	0.13
Birim fiyat ve maliyetler artış oranı	%	5	5	5
Proje ömrü	Yıl	25	25	25

¹ TCMB 22.03.2019 tarihli döviz kuru

² EPDK Ekim 2018 mesken için elektrik fiyatı

³ İGDAŞ 2019 yılı gaz fiyatı ile yapılan hesaba göre

Teknik veriler sonucu her iki durumun ekonomik olarak proje ömrü boyunca karşılaştırması yapılmıştır. Ekonomik açıdan en kötü senaryo olacağı için ısının değerlendirilemediği bir yatırım dikkate alınmamıştır.

Karşılaştırma amaçlı yapılan ekonomik analizlerin sonuçları Çizelge 5.10 ile sunulmuştur.

Çizelge 5.10 Ekonomik sonuçlar

Parametre	Birim	Değer (PV)	Değer (PV-T)
İç Verim Oranı (IRR)	%	9.69	9.14
Net Bugünkü Değer (r=%20)	TL	-8,069	-13,300
Geri Ödeme Süresi	yıl	9.43	9.89

Ekonomik sonuçlar çizelgesinden görüldüğü üzere, yapılan ekonomik analizlere göre yatırımlar, “Geri Ödeme Süresi” ve “IRR” değeri açısından oldukça iyi olmalarına rağmen, yüksek iskonto oranı ile yapılan hesaba göre ekonomik açıdan uygun olmayan (-) NPV sonucu vermiştir. Hesaplanan %9.69 IRR değeri projenin ekonomik açıdan bu değer ve altındaki iskonto oranlarında karlı bir yatırım olacağını göstermektedir. Burada ekonomik açıdan yine PV-T ile ilgili bir uygunluk söz konusu olmamaktadır. Sadece çatı uygulamaları için hem ısı hem de elektrik üretmeye yeterli alan olmaması ve ısı ihtiyacı durumlarında, kısıtlı alanı verimli kullanmak adına tercih edilebilir.

5.4 Duyarlılık Analizi

Yapılan ekonomik analizlerde görülmektedir ki, özellikle PV projeleri, “IRR” ve “Geri Ödeme Süreleri” bakımından oldukça kabul edilebilir durumdadırlar. Fakat bu durum, NPV için söz konusu olmayıp değerlendirme sonuçlarına göre mevcut şartlarda (-) çıkmaktadır. Günümüzün yüksek faiz ortamında yapılan değerlendirmeden kaynaklı bu durum, en karlı PV değerlendirmeleri için bile bu şekildedir. Bu sonuç mevcut ekonomik kaynakların, yüksek faiz şartlarında, güneş enerjisi yatırımı yerine, banka da değerlendirilmesinin daha karlı olduğunu göstermektedir. Aslında bu durum da sonucun negatif çıkmasına sebep olan döngünün parçasıdır. Bu tez çalışmasının başlangıcından bitimine geçen sürede yatırım maliyetini etkileyen dövizde, geliri etkileyen elektrik fiyatlarında ve finansmanı etkileyen faizlerde çok büyük değişiklikler olmuştur. Bu

değişikliklerden dolayı en iyi performans sergileyen PV yatırımlarının, olumsuz neticelenen NPV değeri için bu değer uygunluk şartını irdeleyen bir analiz daha yapılmıştır. Analizde bu faktörü birincil olarak etkileyen ve son dönemde oldukça değişkenlik gösteren iskonto oranı (r) ve yine öngörülmesi zor olan enerji fiyatları dikkate alınmıştır. Her PV çalışması için oluşturulan sonuçlar çizelgeler halinde verilmiş olup, büyük kapasiteli PV yatırımı için durum Çizelge 5.11'deki gibidir.

Çizelge 5.11 10 MW_e PV için duyarlılık analizi sonuçları

NPV					
İskonto Oranı/ Elektrik Fiyat Artışı	%5	%7	%9	%12	%15
%10	25,593,300	36,499,414	48,876,369	70,610,199	96,787,493
%12	14,140,699	22,942,855	32,902,917	50,333,117	71,249,364
%14	5,131,106	12,330,808	20,453,251	34,617,825	51,550,494
%16	-2,069,130	3,892,623	10,598,059	22,249,850	36,124,332
%18	-7,908,276	-2,915,735	2,682,460	12,375,212	23,871,248
%20	-12,708,203	-8,484,023	-3,761,826	4,384,694	14,008,272

Çizelge 5.12 orta kapasiteli durum için olan sonuçları göstermektedir.

Çizelge 5.12 1 MW_e PV için duyarlılık analizi sonuçları

NPV					
İskonto Oranı/ Elektrik Fiyat Artışı	%5	%7	%9	%12	%15
%10	3,875,390	5,180,764	6,662,185	9,263,548	12,396,758
%12	2,504,607	3,558,154	4,750,292	6,836,546	9,340,051
%14	1,426,232	2,287,978	3,260,168	4,955,553	6,982,256
%16	564,422	1,277,995	2,080,582	3,475,207	5,135,870
%18	-134,477	463,090	1,133,149	2,293,292	3,669,275
%20	-708,989	-203,389	361,820	1,336,892	2,488,756

Çizelge 5.13 ise daha çok evsel çatı uygulamaları için geçerli olabilecek küçük uygulamanın sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 5.13 2 kW_e PV için duyarlılık analizi sonuçları

İskonto Oranı/ Elektrik Fiyat Artışı	NPV				
	%5	%7	%9	%12	%15
%10	-409	1,772	4,248	8,595	13,830
%12	-2,699	-939	1,053	4,539	8,722
%14	-4,501	-3,061	-1,437	1,396	4,783
%16	-5,941	-4,749	-3,408	-1,077	1,697
%18	-7,109	-6,111	-4,991	-3,052	-753
%20	-8,069	-7,224	-6,280	-4,650	-2,726

Çizelge 5.11, Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'te görüldüğü üzere iskonto oranları arttıkça yatırımların net bugünkü kazançları azalmaktadır. Bu durum “NPV sonucu (-)” ile gösterilen senaryolar için ilk değerlendirmelerde olduğu gibi olumsuz olmaktadır. NPV sonucunun (+) olduğu durumlar sistemin karlı olabildiği şartları göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; literatür araştırması, deneysel sonuçlar, pratik analiz ve iş deneyiminin harmanlanmasıyla son yıllarda gittikçe yaygınlaşan PV sistemlerin, PV-T uygulamasıyla kıyaslanarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

PV teknolojisinde elektrik üretiminin verimliliği güneş ışıını ile doğrudan ilgilidir. Bu ışıının, yerküre üzerinde daha yoğun olduğu bölgelerde genel olarak sıcaklıkla artmaktadır. Güneş ışıınının, elektrik üretimini arttırma da doğrudan önemli rolü olsa da buna bağlı artan sıcaklık, panellerde performans düşüşüne neden olmaktadır. Panel sıcaklığı arttıkça, elektrik üretim değeri olumsuz etkilenmektedir. Bu olumsuz etkiyi azaltmak için akademisyenler, üreticiler ve proje geliştiriciler sıcaklıkları göz önünde bulundurarak ilgili çalışmalarını yürütmüşlerdir. Yapılan hesaplamalar sonucu oluşabilecek kayıpların önlenmesi, sistem performansı ve kazanç noktasında önemli katkı sağlayacağından dikkate alınması gereken bir unsurdur. Günümüzde kurulu mevcut sistemlerde sıcaklık etkisiyle kayıp oluşurken, bunun tamamına yakını ya da tamamını önleyebilecek bir çözüm olarak PV-T sisteminden bahsedilmektedir. Bu çalışma ile sunulan PV-T sistemi ile elektrik tarafında olan bu kaybın kazanılması ve bu kazanım sağlanırken elde edilen ısıının kullanılması da; normal PV yatırımının yanında ek olarak değerlendirilmiştir. Sistem güneş ışıınına dayalı çalıştığından hem ısı hem de elektrik tarafında sağlanabilecek kazanımlar, bu ışıına, dolayısıyla da bu değerin değıştiğı mevsimlere bağlı farklılık göstermektedir. Örneğin; yaz aylarında üretilen elektrik, soğutma ile azaltılan elektrik kaybı ve elde edilen ısı enerjisi; kış ve bahar aylarına göre çok daha fazla olmaktadır.

Bu çalışma ile aşağıda sıralanan çıkarımlar yapılmıştır;

- PV-T sistemi ile üretilen ısıнын dikkat edilmesi gerek en önemli yönü düşük sıcaklıkta olmasıdır. Yapılan ölçüm sonuçları, literatüre dayalı çalışmalar ve analizler gösteriyor ki; elde edilen ısıнын sıcaklığının düşük olması kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Bu sıcaklıklar, kullanılabilir ısı elde etmeye tam olarak faydalı olamadığı gibi, absorpsiyonlu soğutma grubu uygulaması için de uygun değildir. Çok ideal bir ihtiyaç noktası olmadığı sürece, ancak ve ancak ısı destek mekanizması olarak ön ısıtma veya ısı pompası sistemlerinde kullanılabilir.
- Elde edilen ısı ve sıcaklıkla ilgili bir diğer faktör genel olarak ısı ihtiyacının daha düşük oldu yaz aylarında daha fazla; çok olduğu kış aylarında ise daha düşük olmasıdır. Bu durum üretim ve talep yoğunluklarının kısmi olarak eşleşebilmesine neden olmaktadır.
- PV-T panelin soğutulmasıyla önemli bir miktar elektrik üretiminde avantaj sağlanıyor olması çok önemli bir faktördür. Fakat elde edilen ısıdan bir kazanım söz konusu değilse yatırım kazançlı olmamaktadır. Aynı yatırım değeri ile %60 daha büyük kapasitede PV yatırımı yapıp, yine aynı mertebede daha fazla elektrik üretimi sağlanması daha uygundur. Bunların dışında, ısı kullanılmaz ise akışkanı soğutma konusunda oluşabilecek olumsuzluklar da dikkate alınması gerekmektedir. Bu durumlar PV-T sistemlerinin yaygınlaşmamasındaki temel teknik nedenler olarak göz önünde bulundurulabilir. Hayata geçen uygulamalar; villalarda elektrik üretirken, havuz ısıtma şeklinde olmaktadır.
- Bu tez çalışmasının hazırlanma süresinde teknik tarafı etkileyen çok önemli değişiklikler olmamakla beraber; ekonomik hususlarda daha önce bahsi geçen çok fazla değişiklik söz konusu olmuştur. Değerlendirilen sistemlerin geri ödeme süresi gibi ekonomik parametreleri, bu tip yatırımlar için uygun olmasına rağmen; son dönemde artan yüksek faizler projelerin NPV değerini negatif yapmaktadır. En iyi sonucu veren PV yatırım değerlendirmelerinde; büyük, orta ve küçük kapasiteler için; bu değeri başa baş yapan iskonto oranları; %15.38, %17.58 ve %9.69 olarak sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak bu oranların üzerinde

faiz şartları olması durumunda, ekonomik olarak yatırım tutarını banka mevzuatı üzerinden değerlendirmek daha karlı olmaktadır.

- En iyi sonuçları veren PV sistemleri, yüksek faiz ortamı ve yapılan elektrik fiyat artışı öngörüsü ile negatif sonuç veren NPV değerinden ötürü ekonomik açıdan uygun değildir. Bahsi geçtiği şekilde, son dönemde faiz ve elektrik fiyatlarında önemli değişkenlikler yaşanmıştır. Bundan ötürü en uygun sonuçları veren PV sistemleri için bu değişkenlere bağlı, olumsuz sonuç veren NPV için Bölüm 5.4'te verilen detaylı analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucu, hangi iskonto oranı ve enerji fiyat artış şartlarında yatırımların karlı olabileceği ve net bugünkü kazancın, ne kadar olabileceği belirlenmiştir. Buradaki analizlerde görülmektedir ki hesaplanan senaryoların çoğunluğu için olumsuz olan NPV değeri, olumlu hale gelebilir.

Yapılan hesaplar ile PV sistemi, genel olarak teknik ve ekonomik açıdan daha avantajlı görülmektedir. Bu durum elektrik tarafı için her zaman bir çözüm üretilebileceği için sorun teşkil etmemektedir. PV-T için hesaplanan teknik ve ekonomik sonuçların gerçekleşebilmesi için elde edilen ısıнын tamamının uygun şekilde kullanımı ve kullanım sonrası tekrar homojen soğutma işlemini yerine getirebilmesi için sisteme geri dönmesi gerekmektedir. Değerlendirme çıktıları ancak bu kullanıma izin veren çok uygun bir sistem dizaynı içinde doğrulanabilir. Böyle bir uygun kullanım noktası olsa bile; sistemin çalışmaması, yani ısı kullanımıyla ilgili bir düzensizlik, PV-T sisteminin ekonomik açıdan PV yatırımına göre geri planda kalmasına neden olur. Proje ömrü olarak belirlenen 25 yıl süresince üretilen ısıнын kullanılamamasına neden olabilecek herhangi bir durum, ısı enerjisi ile oluşabilecek gelirlerin yanında ayrıca elektrik tarafında üretilebilecek enerjide de kayba sebebiyet verebilir.

Yenilenebilir enerji PV-T sisteminden elde edilen ısı bir yakıt kullanılmadan, lokal olarak üretilebilmektedir. Buna rağmen yatırım maliyetinin yüksek oluşu dolayısıyla elde edilen ısı enerjisinin LCOE değeri yüksek olacaktır. Düşük sıcaklıktaki bu ısı, özellikle endüstriyel tesisler özelinde birçok farklı atık ısı kaynağını kullanılarak çok çok daha ucuza elde edilebilir. Üstelik elde edilen bu ısıнын varlığı ve devamlılığı güneş enerjisine kıyasla tesis özelinde daha da etkin olabilir. Bu nedenlerden ötürü soğutma ve ısı kullanımı için ek bir

yatırım yapılmadan PV özelinde yatırımlar ilerlemektedir. Bu sistemlerin kurulumunda sıcaklık etkisiyle oluşan kaybı azaltmak için, ayrı ek yatırım yapılmadan, ışıınımı iyi; yükselti, rüzgar etkisi ve iklim şartlarına bağlı doğal soğumaya izin veren bölgelerin seçilmesi çok daha uygun olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ramos, A., Chatzopoulou, M. A., Guarracino, I., Freeman, J. ve Markides, C. N., (2017). "Hybrid Photovoltaic-Thermal Solar Systems for Combined Heating, Cooling and Power Provision in the Urban Environment", *Energy Conversion and Management*, 838–850.
- [2] Zimmermann, S., (2015). "A High-efficiency Hybrid High-concentration Photovoltaic System ", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 514-521.
- [3] Hegazy, A. A., (1999). "Comparative Study of the Performances of Four Photovoltaic/Thermal Solar Air Collectors", *Energy Conversion & Management*, 861-881.
- [4] Barnwal, P., Tiwari, A., (2009). "Thermodynamic Performance Analysis of a Hybrid Photovoltaic-Thermal (PV/T) Integrated Greenhouse Air Heater and Dryer", *Int. J. Exergy*, Vol., 2460–2474.
- [5] Moradi, K., Ebadin M. A., Lin, C. X., (2013). "A Review of PV/T Technologies: Effects of Control Parameters", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64:483–500.
- [6] Popovici, C. G., Hudişteanu, V. G. Mateescu T. D. ve Cherecheş, N. Ç., (2105). "Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled Heat Sinks", *Energy Procedia*, 85:425 – 432.
- [7] Herrando, M., Markides, C. N., (2015). "Hybrid PV and Solar-Thermal Systems for Domestic Heat and Power Provision in the UK: Techno-Economic Considerations", *Applied Energy*, 161:512–532.
- [8] Guarracino, I., Mellor, A., Ekins-Daukes, N. J., Markides, C. N., (2016). "Dynamic Coupled Thermal-and-Electrical Modelling of Sheet-and-Tube Hybrid Photovoltaic/Thermal (PVT) Collectors", *Applied Thermal Engineering*, 101:778–795.
- [9] Fortuin, S., Hermann, M., Stryi-Hipp, G., Nitz, P., Platzer, W., (2014). "Hybrid PV-Thermal Collector Development: Concepts, Experiences, Results and Research Needs", *Energy Procedia*, 48:37 – 47.

- [10] Matuska, T., (2014). "Performance and Economic Analysis of Hybrid PVT Collectors in Solar DHW System", Energy Procedia, 48:150 – 156.
- [11] Khelifa, A., Touafek, K., Ben Moussa, H., Tabet, I., Ben Cheikh El Hocine, H. Ve Haloui, H., (2015). "Analysis of a Hybrid Solar Collector Photovoltaic Thermal (PVT)", Energy Procedia, 74:835 – 843.
- [12] Noro, M., Lazzarin, R. ve Bagarella, G., (2016). "Advancements in Hybrid Photovoltaic-Thermal Systems: Performance Evaluations and Applications", Energy Procedia, 101:496 – 503.
- [13] Liang, R., Zhou, C., Pan, Q. ve Zhang, J., (2017). "Performance Evaluation of Sheet-and-Tube Hybrid Photovoltaic/Thermal (PVT) Collectors Connected in Series" Procedia Engineering, 205:461–468.
- [14] Zhang, Y. ve Smith, S.J., (2008). "Long-Term Modeling of Solar Energy: Analysis of Concentrating Solar Power (CSP) and PV Technologies", U.S. Department of Energy, 1.
- [15] Özakin, A.N., (2016). "Hava Soğutmalı Fotovoltaik Termal (PVT) Sisteminin Termodinamik Analizi", Atatürk Üniversitesi, 10.
- [16] Kalogirou, S., (2009). "Solar Energy Engineering Processes and Systems", Elsevier Inc.
- [17] PVGIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, (Şubat, 2019).
- [18] Dinamo Consulting, Proje Finansmanı ve Ekonomik Fizibilite.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Salih TÜRKAY
Doğum Tarihi ve Yeri : 23/10/1986 İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : salihturkay@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	G.O.P Anadolu Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2014	MWH Global-Stantec Inc.	Enerji Mühendisi
2013	Escon Enerji	Satış Mühendisi
2013	Rota Mühendislik	İş Geliştirme Mühendisi