



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERLE BÜTÜNLEŞTİRİLEN FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMLERİN (PVT) TERMODİNAMİK VE EKONOMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

CANAN KANDİLLİ
UŞAK ÜNİVERSİTESİ



FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERLE BÜTÜNLEŞTİRİLEN FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMLERİN (PVT) TERMODİNAMİK VE EKONOMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Investigation of Thermodynamic and Economical Performance of Photovoltaic Thermal Systems (PVTs) Integrated with Phase Change Materials

Canan KANDİLLİ

ÖZET

Bu çalışmada, faz değiştiren malzemeli fotovoltaik termal sistem (PVT) tasarlanmış, kurulmuş, sistem bileşenleri açıklanmış, sistemin birinci ve ikinci yasayı kapsayan termodinamik modellemesi ortaya konmuş olup, Uşak Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yürütülen 214M615 numaralı TÜBİTAK projesi çerçevesinde gerçekleştirilen deneylerle elde edilen veriler ışığında performansı değerlendirilmiş, performansına etki eden parametreler araştırılmış, enerji ve ekserji verimleri ortaya konmuş, ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, her bir malzeme ile test edilen PVT sistem performansı konvansiyonel PVT sistem ile karşılaştırılmıştır. PVT deneylerinde ulaşılabilen en yüksek toplam verim, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile %40; %39; %34 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda en yüksek toplam verimin elde edildiği sistemin %40 ile parafinli sistem olduğu anlaşılmaktadır. Net Bugünkü Değer (NPV) yöntemine göre gerçekleştirilen ekonomik analizde, geri ödeme süreleri, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile 10; 9; 9 yıl olarak ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzemeler, PVT, Enerji-ekserji analizi, ekonomik analiz

ABSTRACT

In this project, Photovoltaic Thermal Systems (PVT) integrated with phase change materials were designed, the components of the system were explained, the thermodynamical modeling including the first and the second laws was presented, the system performance was evaluated by the experiments carried out in Uşak University, Department of Mechanical Engineering under the cover the TUBITAK Project 214M615, performance parameters were investigated, energy and exergy efficiencies were determined and economical analysis was performed. Besides, the performance of the conventional PVT system was compared to each PVT system. The maximum total energy efficiency values of the PVT system with paraffin, stearic acid and conventional PVT were calculated as 40%; 39%; 34% respectively. It is concluded that the paraffin PVT system has the maximum total energy efficiency. The payback period of the PVT system with paraffin, stearic acid and conventional PVT were calculated by Net Present Value (NPV) method as 10; 9; 9 years, respectively.

Key Words: Phase change materials; photovoltaic thermal system (PVT); energy-exergy analysis, economical analysis

1.GİRİŞ

Gün geçtikçe güneş enerjisinden yararlanmanın en uygulanabilir yolu olarak fotovoltaik (PV) sistemler yaygınlaşmakta, daha verimli güneş hücresi malzemelerinin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Ancak, PV güneş hücrelerinin yapıldığı malzemelerin türüne bağlı olarak spektral cevap aralıkları farklıdır. 200 ile 2500 nm arasında çok geniş bir dalgaboyuna sahip olan güneş ışınımı spektrumu, her bir tür PV hücre tarafından spektral cevap aralıklarına bağlı olarak sınırlı bir şekilde elektrik enerjisine çevrilebilirler. Örneğin monokristal bir silisyum güneş hücresi bu geniş spektrumda yalnızca 400-800 nm aralığındaki ışınımı elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Geri kalan ışınım enerjisi ise madde ile etkileştiğinde ısı enerjisine dönüşmekte olup bu enerji aşırı ısı yükü şeklinde PV malzemenin hem anlık hem de uzun vadede yapısı bozabilmektedir. Bu aşırı ısı, artan sıcaklıkla malzemenin iç direncini artırmakta, elektriksel dönüşüm verimini düşürmektedir. İşte 1970 li yıllardan bu yana PV de biriken ısı yükünü uzaklaştırmak ve bu ısı enerjiden yararlanmak için fotovoltaik termal sistemler geliştirilmiştir. Ancak konvansiyonel PVT sistemler, gün boyunca geniş bir aralıkta değişen sıcaklıklarda kararsız bir ısı enerjisi vermektedir. PVT lerden elde edilen ısı enerjinin sabit sıcaklıkta faz değiştiren faz değiştiren malzemelerle ya da ısı depolama malzemeleri ile bütünleştirilmesi, böylece hem verimlerinin artırılması, hem de sabit sıcaklıkta kararlı bir ısı enerjisi elde edilmesi mümkündür. Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan depolama maddelerine faz değiştiren maddeler (FDM) denmektedir. Gizli ısı depolama maddeleri enerjisi, sabit bir sıcaklıkta faz değiştirerek depolarlar. Sabit sıcaklıkta faz değiştiren maddelerin kullanımı ile güneş enerjili sistemlerin daha düzenli bir rejimde çalışmaları sağlanabilmektedir.

Kristal silisyum PV güneş hücreleri için, hücrenin açık devre gerilim değeri sıcaklığa bağlı olduğundan, her 1 °C sıcaklık artışı için %0.5 lik bir güç düşüşü kaydedilmektedir [1]. PVT sistemler, PV yüzeyindeki bu ısıyı almak için mükemmel bir çözüm getirmektedir. Erime-katılma sürecinde, FDM ler büyük miktarda gizli ısı transfer edebilmektedirler. Sıcaklık bu süreç boyunca sabit kalmaktadır. Bu nedenle FDM ler PVT ler için umut veren malzemelerdir. Son on yıl içinde FDM li PVT ler üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Huang ve ark. (2006, 2011) FDM ile PV de sıcaklık düşüşü üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. PV modülün boyutları, FDM tipi, erime sıcaklığı, FDM kalınlığı gibi parametreleri CFD simülasyonlarla modellemiş ve deneysel olarak test etmişlerdir[2,3]. Dış hava sıcaklığı, rüzgar hızı ve güneş ışınımı gibi dış faktörler, karmaşık ve sürekli değişen parametreler olarak karşımıza çıkmakta ve erime sıcaklığı ve termal kapasite belirlemede optimizasyonu zorlaştırmaktadırlar. Kim ve ark. (2014) erime sıcaklığı, FDM kalınlığı ve yıllık elektrik üretimi ile ilgili bir simülasyon ortaya koymuşlardır. PV modülün %3 oranında daha fazla güç ürettiğini hesaplamışlardır. Optimum erime sıcaklığının 298 K olduğunu belirlemişlerdir [4]. Ho ve ark. (2014) PV modülün arkasında mikrokapsüllenmiş FDM denemişlerdir [5]. Hasan ve ark. (2014) parafin, tuz hidrat ve yağ asitlerinin PVT lerde FDM olarak termodinamik olarak değerlendirmişlerdir. Sistematik bir FDM seçiminin tüm istenen parametreleri karşılayamadığı için belirlenmesinin zor olduğunu ifade etmişlerdir[6]. Ho ve ark. (2012) binalarla bütünleştirme uygulamasında erime sıcaklığı 26 °C olan mikrokapsüllenmiş FDM nin, yaz periyodunda 49 °C den 47 °C ye, kış periyodunda ise 35 °C den 30.5 °C ye az miktarda bir düşüş sağladığını ortaya koymuşlardır [7]. Z. Ma ve ark. (2014) çalışmalarında, FDM li bir PVT tavan havalandırma sistemini ele almışlardır. Çalışmalarının sonucunda, önerilen sistemin pasif bir bina için iç termal konforu önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtmişlerdir [8].

Fotovoltaik güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimi oldukça düşüktür. Güneş ışınımının yaklaşık yarısı ısıya dönüşmekte ve çevreye kaybolmaktadır. PV modüllerde verimi artırmanın yolu kojenerasyondur, yani bu atık ısının değerlendirilmesidir. FDM ve diğer alternatif ısı depolama malzemeleri sabit, kararlı ve düzenli bir ısı enerjisi sağlama potansiyeli bakımından gelecek vadede sistemlerdir. Bu çalışmada, PVT sistemlerin üzerinde biriken ısı yükünün uzaklaştırılması ve bu ısı enerjiden yararlanılabilmesi için farklı malzemelerin incelenmesi ve bu malzemelerin PVT de kullanımının sistemin termodinamik performansına etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. PVT de biriken ısı yükünün daha düzenli ve kararlı biçimde ısı enerjisi olarak yararlanılabilmesi için farklı FDM lerin kullanımı değerlendirilmiştir. FDM lerde depolanan ısı enerjisi, termal akışkan olarak suya aktarılmış, böylece kararlı, sürekli ve düzenli bir şekilde tek bir modülden hem ısı hem de elektrik enerjisi elde edilebilmiştir. Çalışmada, farklı erime sıcaklığı ve entalpi değerlerine sahip FDM lerin, sistemle bütünleştirilerek biriken ısı yükünün düzenli ve kararlı bir şekilde uzaklaştırılması sağlanmıştır. Konvansiyonel PVT ve FDM li PVT deneysel olarak test edilerek termodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerle, sistemlerin enerji-

ekserji ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş, optimum yarar için en uygun sistem ve tasarım araştırılmıştır.

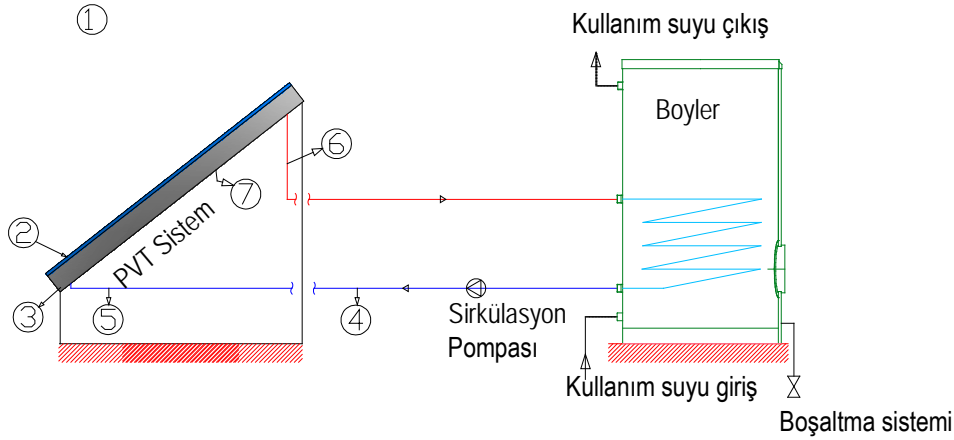
2.KURAMSAL ANALİZ

Çalışmada, Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binası terasında kurulan ve test edilen FDM li PVT sistemler değerlendirilmiştir.. PVT sistem, farklı FDM ve ısı depolama malzemeleri ile bütünleştirilerek üzerinde biriken ısı yükü alınmış ve bu ısı su ısıtma amaçlı olarak kullanılmıştır. Sistem performansı farklı malzemeler için test edilmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerle, her bir durum ve kullanılan malzeme için PVT sistemin termodinamik analizi gerçekleştirilecek, enerji ve ekserji analizlerini içeren I ve II. yasa incelemeleri tamamlanmış, ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş, böylece en verimli sistem araştırılmıştır.

İster konvansiyonel, ister FDM li olsun PVT sistemlerin termodinamik analizinin gerçekleşmesi, bunun yanı sıra ısı transferi mekanizmasının ortaya konması önemlidir. Bu amaçla termodinamik analiz sırasında aşağıda listelenen kabuller dikkate alınmıştır:

1. Sistem sürekli akışlı açık sistem olarak kabul edilmektedir.
2. Akışkan kanalının iç yüzeyi düzgündür, pürüzsüzdür.
3. Akışkan kanalının termal direnci ve dış ışıyım kayıpları ihmal edilmiştir.
4. Atmosfer basıncı $p_a = 1 \text{ atm}$ olarak kabul edilmektedir.
5. PVT nin yan ve alt yüzeylerindeki ısı kayıpları, yalıtım tabakası nedeni ile ihmal edilmiştir.

Çalışma için deney şeması Şekil 2.1 'de verilmektedir:



Şekil 2.1 Deney Şeması

Şekil 2.1 'de numaralandırılan ölçümler aşağıda listelenmiştir:

1. Yatay güneş ışıyımı, dış sıcaklık, rüzgar hızı (meteoroloji istasyonundan)
2. PV modül üzerine düşen güneş ışıyımı.
3. PVT farklı katmanlarının sıcaklık ölçümleri.
4. Çalışma akışkanının debisi.
5. Çalışma akışkanının PVT sisteme giriş sıcaklığı.
6. Akışkanının PVT sistemden çıkış sıcaklığı.
7. Elektriksel ölçümler (akım ve gerilim)

PV nin yüzeyine gelen güneş ışınımı I (W/m^2), özellikle PV üst yüzeyinde ve PV tabakalarında kayıplara uğrayacaktır ve güneş ışınımının spectral cevap aralığı uygun dalga boylu ışınımı PV tarafından elektrik enerjisine dönüştürülecektir. Enerjinin korunumundan aşağıdaki denklik yazılabilir:

$$I = W_{PV} + Q_{kayıp} + Q_{PV,kayıp} + Q_{absorber} \quad (1)$$

Burada ; W_{PV} = Üretilen elektriksel güç , $Q_{kayıp}$ = Yüzeydeki ışınım ve taşınım kayıplar, $Q_{PV,kayıp}$ = PV tabakalarındaki iletim kayıpları, $Q_{absorber}$ = Absorber 'a gelen güç

$$W_{PV} = \eta_{PV,modül} \times I \quad (2)$$

Burada ; $\eta_{PV,modül}$ = PV modülün elektriksel dönüşüm verimi, I = Güneş ışınımı

$$Q_{kayıp} = Q_{taşınım} + Q_{ışınım} \quad (3)$$

$$Q_{kayıp} = h_w A(T_s - T_a) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_a^4) \quad (4)$$

Burada ;

$Q_{taşınım}$ = Taşınım ile oluşan ısı kayıpları, $Q_{ışınım}$ = Işınım ile oluşan ısı kayıpları, h_w = Rüzgarla taşınım ısı transfer katsayısı, A = PV modülün yüzey alanı, T_s = Yüzey sıcaklığı, T_a = Dış sıcaklık, ε = Yayıma katsayısı

$$h_w = (8,38 \times v_{rüzgar}) + 1,76 (W/m^2K) \quad (5)$$

$$Q_{yararlı,ısı} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

$$\eta_{ısı} = \frac{Q_{yararlı,ısı}}{I \times A} \quad (7)$$

$$\eta_{PV} = \frac{W_{PV}}{I \times A} \quad (8)$$

Burada ; $\eta_{ısı}$ Isıl verim, η_{PV} elektriksel verim, A PV modülün yüzey alanı ve I güneş ışınımı olarak verilmektedir

PVT sistemin II. Yasa (ekserji) analizi için aşağıda yöntem önerilmektedir:

Sürekli açık bir sistemde, sisteme giren ekserji ile çıkan ekserji arasındaki fark yıkılan ekserjiye eşittir:

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest} \quad (9)$$

Mevcut çalışmada, sisteme giren ekserji ($\dot{E}x_{in}$) güneş ışınımının sağladığı ekserji ile sisteme giren çalışma akışkanının ekserjisinden oluşmaktadır:



$$\dot{E}x_{in} = \dot{E}x_{solar} + \dot{E}x_{mass,in} \quad (10)$$

Sistemden elde edilen ekserji ise PVT sistemden çıkan çalışma akışkanının ekserjisi ile PV den alınan elektriksel ekserjiden oluşmaktadır:

$$\dot{E}x_{out} = \dot{E}x_{mass,out} + \dot{E}x_{pv} \quad (11)$$

Güneş ışınımından alınan ekserji:

$$\dot{E}x_{solar} = \phi_{solar} I_t A_{pv} \quad (12)$$

Maksimum verim oranı ϕ solar , aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\phi_{solar} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{T_0}{T} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (13)$$

Burada T 6000 K olarak kabul edilen güneş eş değer sıcaklığı, T_0 ise, dış ortam sıcaklığıdır.

Kütle ile sisteme giren ve çıkan ekserji akışları aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\dot{E}x_{mass,in} = \dot{m}_{in} \psi_{in} \quad (14)$$

$$\dot{E}x_{mass,out} = \dot{m}_{out} \psi_{out} \quad (15)$$

Burada ψ_{in} ve ψ_{out} özgül ekserji değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\psi_{in} = (h_{in} - h_0) - T_0(S_{in} - S_0) \quad (16)$$

$$\psi_{out} = (h_{out} - h_0) - T_0(S_{out} - S_0) \quad (17)$$

Elektriksel ekserji akışı, tamamı kullanılabilir enerji olup, üretilen elektriksel güce eşittir:

$$\dot{E}x_{pv} = \dot{W} = \eta_{pv} I_t A \quad (18)$$

İkinci Yasa verimi aşağıdaki gibi bulunur:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}x_{output}}{\dot{E}x_{input}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{dest}}{\dot{E}x_{input}} \quad (19)$$

Ekonomik analiz yöntemlerinden net şimdiki değer yöntemi, bir projenin ömrü boyunca tüm yıllık sermaye giderleri ve tasarrufların bugünkü değerini hesaplamayı mümkün kılmaktadır. Net şimdiki değer (NPV), tüm şimdiki değerlerin toplanmasıyla (giderler, negatif; net tasarruflar pozitif olarak gösterilir) elde edilir. Net şimdiki değer pozitif ise proje kabul edilir, aksi takdirde projenin uygulanması uygun görülmez. a; Net şimdiki değer faktörü, B; kazanç, C; masraf, p; periyot, i; iskonto oranı olmak üzere Net şimdiki değer aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır:

$$NPV = \sum_1^p (B - C)_i a_i \quad (20)$$

$$a = \frac{1}{(1+i)^P}$$

(21)

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, projede tasarlanan ve kurulan sistemin performans değerlendirmesine yönelik veriler değerlendirilmiştir. Bu bölümde, farklı FDM li ve konvansiyonel PVT farklı meteorolojik koşullarda test edilmiş, deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü binası terasında gerçekleştirilmiştir. Bilindiği üzere Uşak, İç Ege Bölgesi'nde yer alan (38.41 °N enlem, 29.25 °E boylam) 906 m rakıma sahip, Akdeniz iklimi ile kara iklimi arasında bir geçiş bölgesinde bulunan bir ilimizdir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre, yıllık 2789 saat güneşlenmeye ve 1540 kWh/m²yıl yıllık güneşlenme miktarına sahiptir. Deneyler, meteorolojik koşulların uygun olduğu günlerde, Nisan-Mayıs ve Haziran 2016 periyodunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ele alınan sistemlerin Net Bugünkü Değer yöntemine göre ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Ancak burada, her bir malzeme için yapılan birer deney günü sonuçları paylaşılmış, "Sonuçlar ve Öneriler" kısmında ise tüm deneylerden elde edilen ortalamalar sunulmuştur.



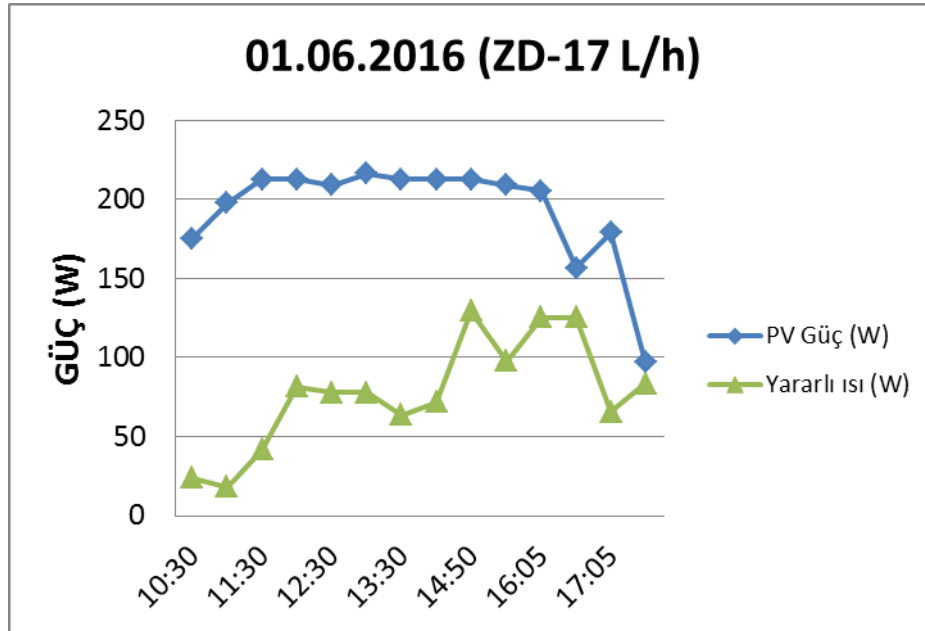
Şekil 3.1 PVT arka yüzeyi ve akışkan boruları

Şekil 3.1 'de PVT arka yüzeyi ve akışkan boruları görülmektedir. PV modulün arka yüzeyine, akışkan borularına ısının daha iyi transfer edilmesi için ince bir bakır plaka yerleştirilmiştir. Akışkanın içinden geçtiği borular ise yine yüksek ısı iletimi nedeni ile bakırdan seçilmiş, bakır levhaya kaynakla birleştirilmiştir. Yüzey alanın maksimum olabilmesi için tüm yüzey akışkan boruları ile mümkün olduğunca kaplanmaya çalışılmıştır. Ancak burada önemli olan nokta şudur: PV tabakaları dikkate alındığında, üstten aşağıya doğru, Cam-EVA-PV güneş hücresi-EVA-Tedlar tabakaları yer almaktadır. Tedların ısı iletkenliği oldukça düşük, ısı direnci çok yüksektir. Tedlar tabakası çok ince bir tabaka olup, mekanik olarak çıkarmak mümkün değildir. Kimyasal yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. FDM li bir PVT üretilirken, PV modulün üretimi aşamasında bu Tedlar tabakasının yerleştirilmemesi uygun olacak, ısı transferini ciddi oranda iyileştirecektir.



Şekil 3.2 PVT deney sistemi ve ölçüm cihazları

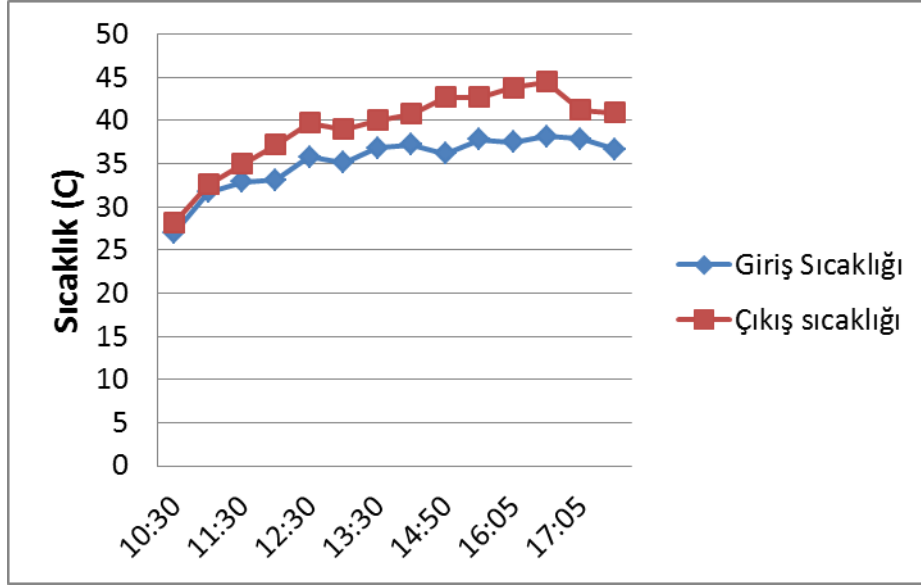
Şekil 3.2 'de PVT deney sistemi ve ölçüm cihazları sunulmaktadır. PVT sistem su giriş ve çıkışları boylere bağlanmıştır. Ölçüm cihazları önceki projeden edinilen data logger cihazına bağlanmıştır. Ölçümler saatlik olarak alınmıştır. PVT arka yüzey sıcaklıkları, su giriş-çıkış sıcaklıkları, debi, PVT yüzey güneş ışınımı, dış sıcaklık, rüzgar hızı ölçümleri her bir sistem için kaydedilmiştir.



Şekil 3.3 PVT den elde edilen elektriksel ve ısı güç (1 Haziran-parafin)

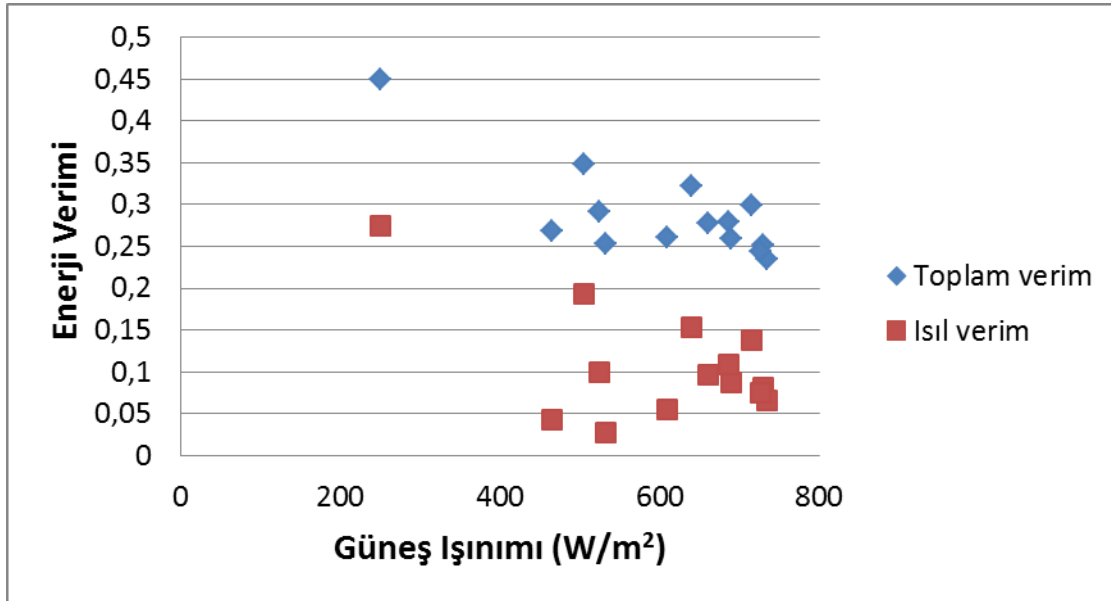
Şekil 3.3 'de 01 Haziran 2016 tarihli zorlanmış dolaşım ile, parafinli PVT panelden 17 L/h debide elde edilen verilerden hesaplanan elde edilen yararlı güç (W) ve PV panelden alınan elektriksel güç (W) değerleri yer almaktadır. Dış ortam sıcaklığı 21.4 ile 27.3 °C arasında değişirken, panel yüzeyinde ölçülen toplam güneş ışınımı 465-734 W/m² değerleri arasında değişmektedir. Bu koşullar altında, PV

panelde elde edilen elektriksel güç 175-212 W, yararlı ısı ise 17-129 W arasında değişiklik göstermektedir.



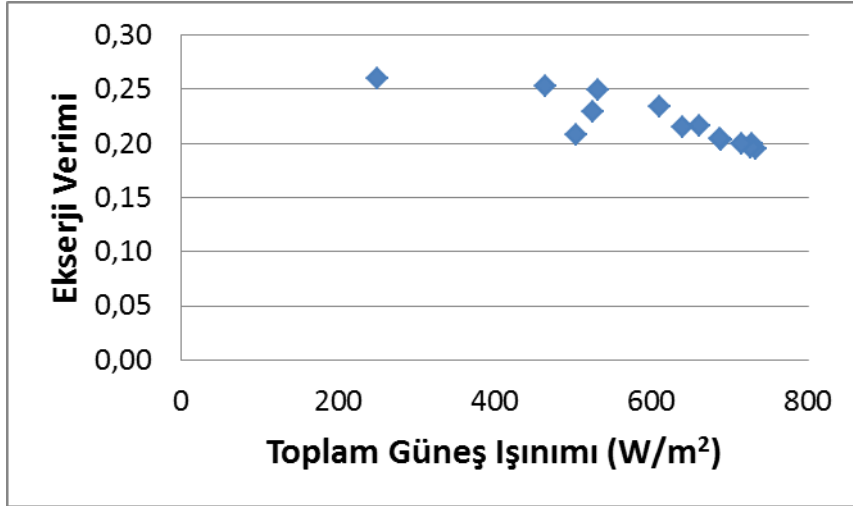
Şekil 3.4 PVT giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının değişimi (1 Haziran-parafin)

Şekil 3.4'te parafinli PVT giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının değişimi yer almaktadır. 1 Haziran 2016 günü deneylerinde, dış ortam sıcaklığının maksimum 27.3 °C olduğu koşullarda, panel çıkış suyu sıcaklığı 44.5 °C ye ulaşmıştır.



Şekil 3.5 PVT ısıl ve toplam veriminin güneş ışınımına bağlı değişimi (1 Haziran-parafin)

Şekil 3.5 'te görüleceği gibi, yapılan hesaplamalar sonucunda, panel yüzeyine gelen ışınım gün boyunca 465-734 W/m² değerleri arasında değişirken, panelin ısıl verimi, %2-27 arasında değişkenlik göstermektedir. Toplam verim ise, ilgili koşullarda, %25-44 arasında değişmekte olup, ortalama toplam verim %32 olarak belirlenmiştir.

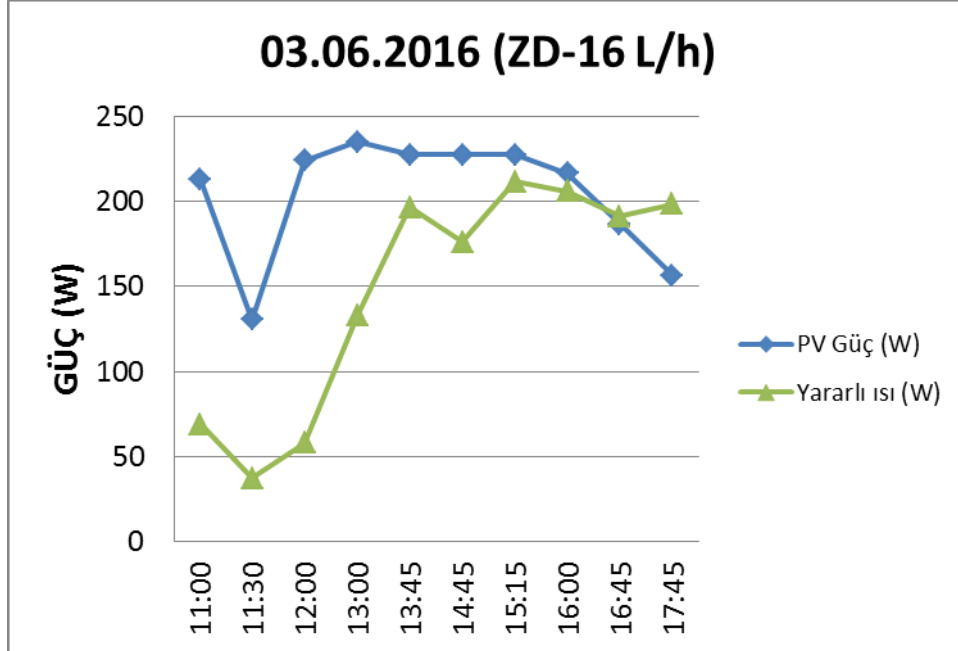


Şekil 3.6 PVT ekserji veriminin güneş ışınımına bağlı değişimi (1 Haziran-parafin)

Elde edilen sonuçlara göre, panel yüzeyine gelen ışınım gün boyunca 465-734 W/m² değerleri arasında değişirken, ekserji verimi %19-26 arasında değerler almakta olup, ortalaması %22 olarak bulunmuştur.

Parafinle yapılan tekrar deneylerinin ardından asit türüne giren FDM lerden erime sıcaklığı 69 °C olan Stearik asit deneylerine geçilmiştir.

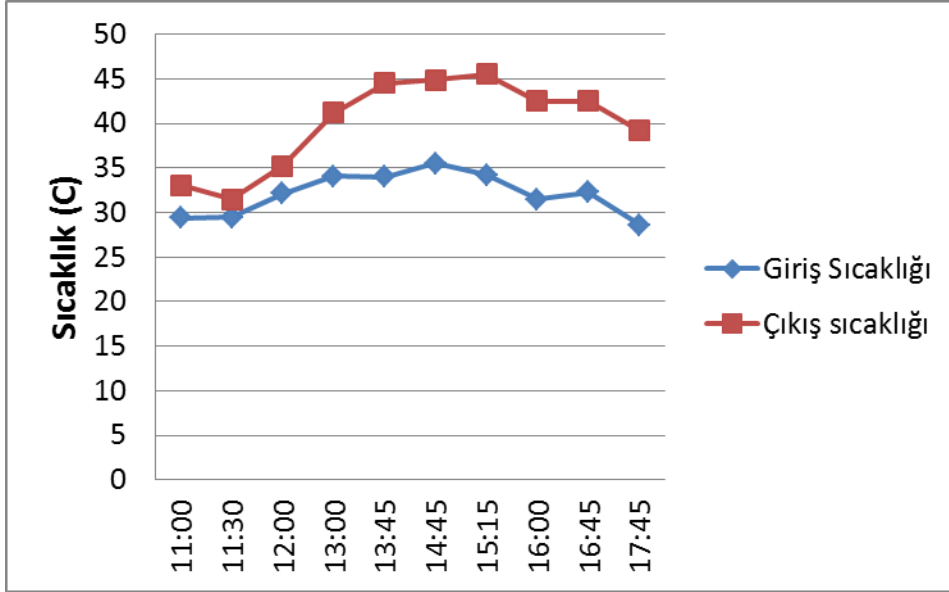
03 Haziran 2016 tarihinde stearik asit ile zorlanmış dolaşım ile 16 L/h debide yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:



Şekil 3.7 PVT den elde edilen elektriksel ve ısı güç (3 Haziran-stearik asit)

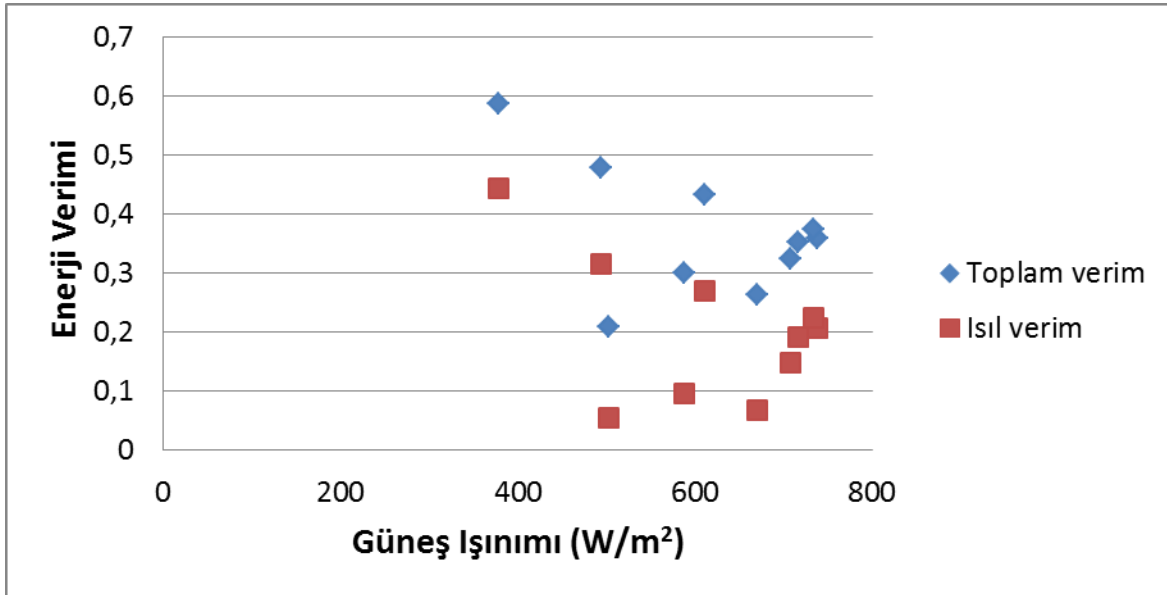
Şekil 3.7'de 03 Haziran 2016 tarihli zorlanmış dolaşım ile, stearik asitli PVT panelden 16 L/h debide elde edilen verilerden hesaplanan elde edilen yararlı güç (W) ve PV panelden alınan elektriksel güç (W) değerleri yer almaktadır. Dış ortam sıcaklığı 20,7 ile 26,8 °C arasında değişirken, panel yüzeyinde ölçülen toplam güneş ışınımı 378-738 W/m² değerleri arasında değişmektedir. Bu koşullar

altında, PV panelde elde edilen elektriksel güç 130-234 W, yararlı ısı ise 37-211 W arasında değişiklik göstermektedir.



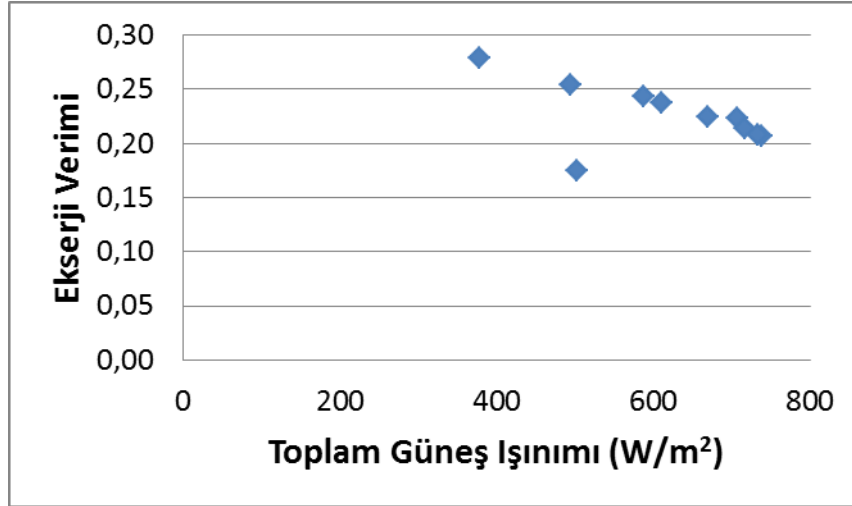
Şekil 3.8 PVT giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının değişimi (3 Haziran-stearik asit)

3 Haziran 2016 günü deneylerinde, dış ortam sıcaklığının maksimum 26.8 °C olduğu koşullarda, panel çıkış suyu sıcaklığı 45.5 °C ye ulaşmıştır.



Şekil 3.9 PVT ısı ve toplam veriminin güneş ışınımına bağlı değişimi (3 Haziran-stearik asit)

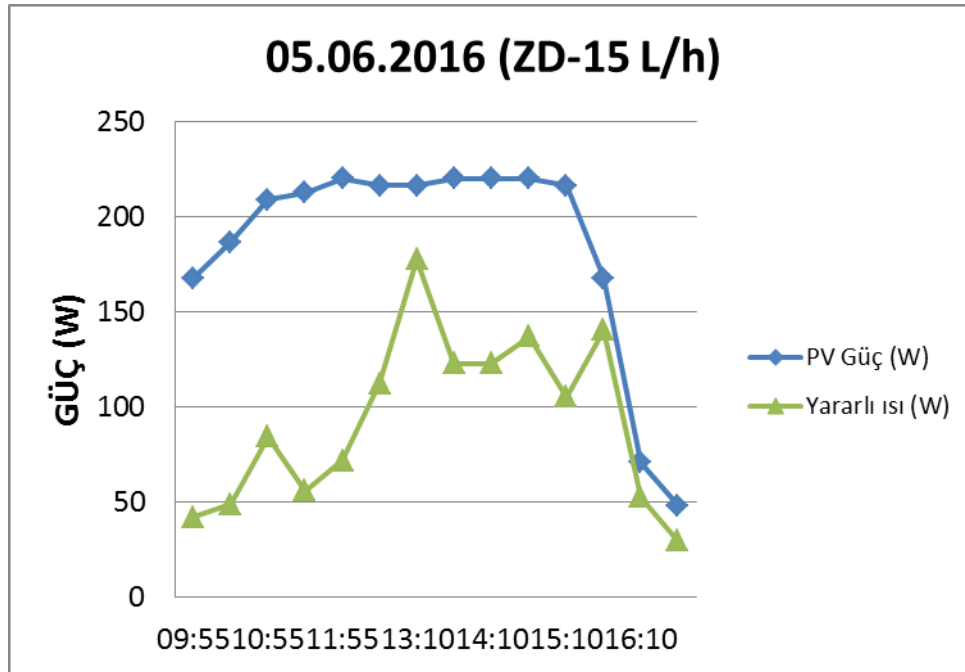
Yapılan hesaplamalar sonucunda, panel yüzeyine gelen ışınım gün boyunca 378-738 W/m² değerleri arasında değişirken, panelin ısı verimi, %5-44 arasında değişkenlik göstermektedir. Toplam verim ise, ilgili koşullarda, %26-58 arasında değişmekte olup, ortalama toplam verim %37 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10 PVT ekserji veriminin güneş ışınımına bağlı değişimi (3 Haziran-stearik asit)

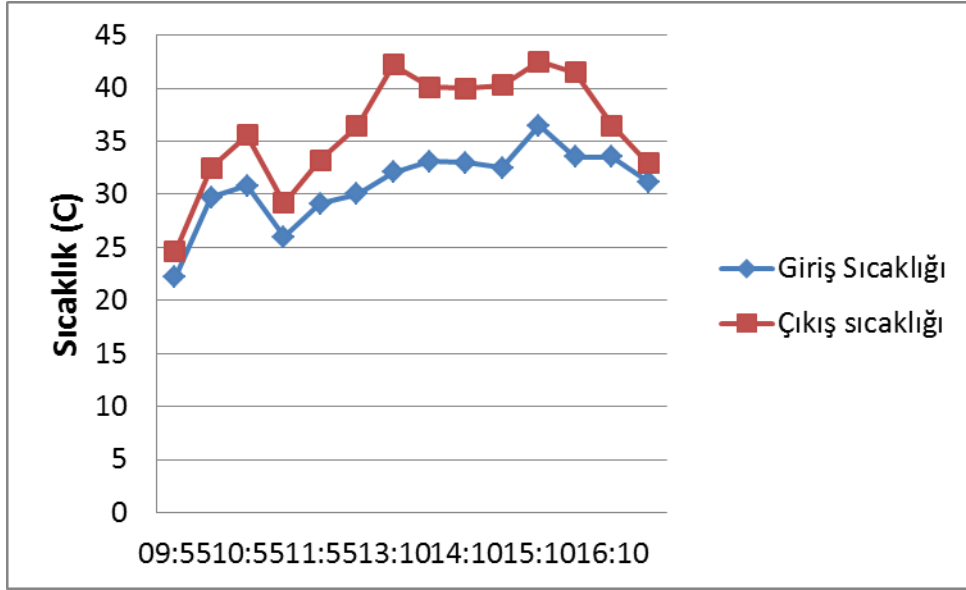
Elde edilen sonuçlara göre, panel yüzeyine gelen ışınım gün boyunca 378-738 W/m² değerleri arasında değişirken, ekserji verimi %17-28 arasında değerler almakta olup, ortalaması %23 olarak bulunmuştur.

05 Haziran 2016 tarihinde konvansiyonel PVT ile zorlanmış dolaşım ile 15 L/h debide yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:



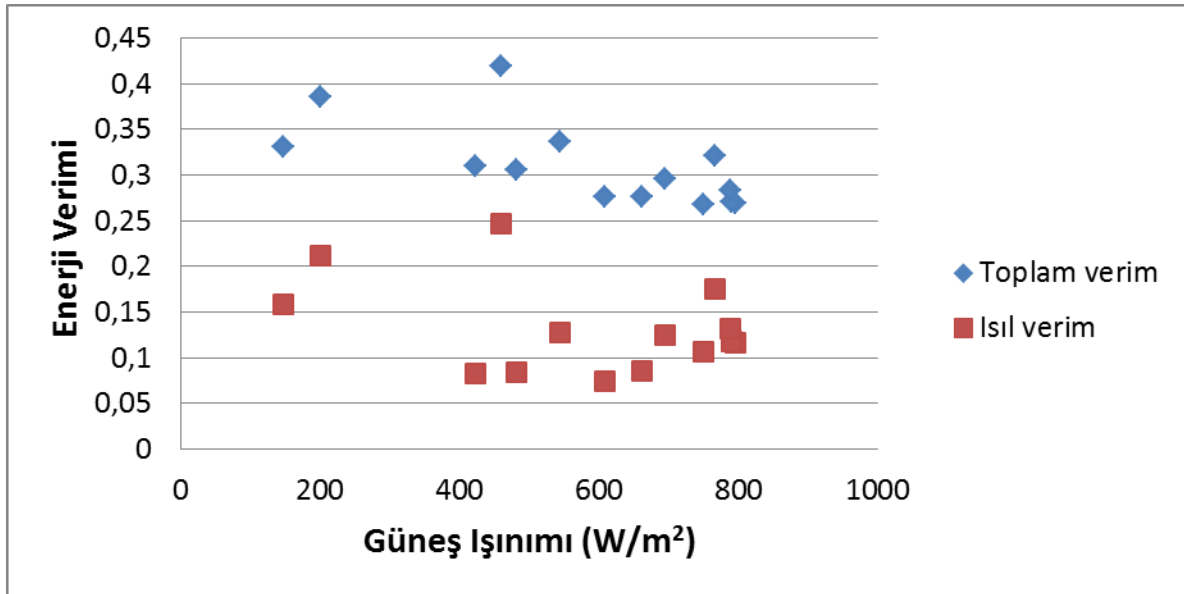
Şekil 3.11 Konvansiyonel PVT den elde edilen elektriksel ve ısı gücü (5 Haziran)

Şekil 3.11'de 05 Haziran 2016 tarihli zorlanmış dolaşım ile, konvansiyonel PVT panelden 15 L/h debide elde edilen verilerden hesaplanan elde edilen yararlı güç (W) ve PV panelden alınan elektriksel güç (W) değerleri yer almaktadır. Dış ortam sıcaklığı 24 ile 27 °C arasında değişirken, panel yüzeyinde ölçülen toplam güneş ışınımı 148-796 W/m² değerleri arasında değişmektedir. Bu koşullar altında, PV panelde elde edilen elektriksel güç 48-220 W, yararlı ısı ise 29-127 W arasında değişiklik göstermektedir.



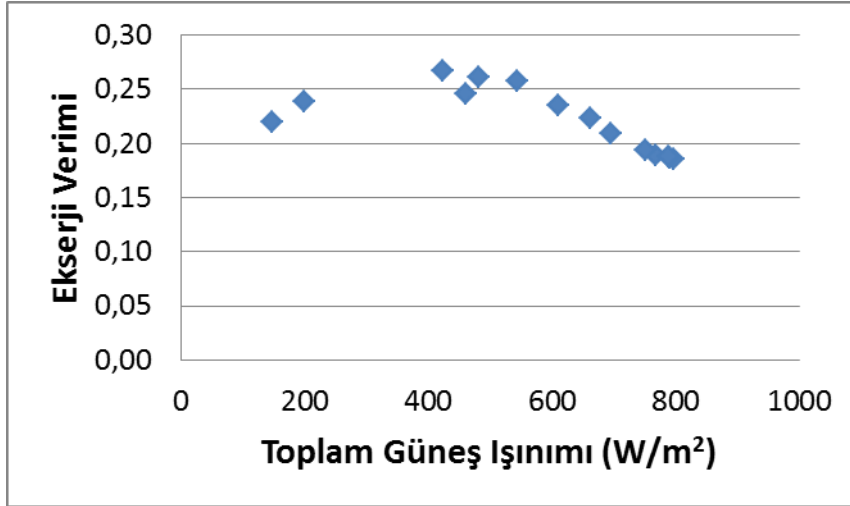
Şekil 3.12 Konvansiyonel PVT giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının değişimi (5 Haziran)

5 Haziran 2016 günü deneylerinde, dış ortam sıcaklığının maksimum 27 °C olduğu koşullarda, panel çıkış suyu sıcaklığı 42.5 °C'ye ulaşmıştır.



Şekil 3.13 Konvansiyonel PVT ısıl ve toplam veriminin güneş ışınımına bağlı değişimi (5 Haziran)

Yapılan hesaplamalar sonucunda, panel yüzeyine gelen ışınım gün boyunca 148-796 W/m² değerleri arasında değişirken, panelin ısıl verimi, %8-24 arasında değişkenlik göstermektedir. Toplam verim ise, ilgili koşullarda, %26-41 arasında değişmekte olup, ortalama toplam verim %31 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.14 Konvansiyonel PVT ekserji veriminin güneş ışınımına bağlı değişimi (5 Haziran)

Elde edilen sonuçlara göre, panel yüzeyine gelen ışınım gün boyunca 148-796 W/m² değerleri arasında değişirken, ekserji verimi %19-27 arasında değerler almakta olup, ortalaması %22 olarak bulunmuştur.

PVT sistem için kullanılan 2 farklı malzeme, parafin ve stearik asit için ayrıca konvansiyonel PVT sistem için hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamada, deney günlerinden elde edilen ortalama enerji verimleri dikkate alınmıştır. Tablo 3.1 de, her bir sistem için ortalama verim, ürettiği enerji ve yıllık getirisi listelenmiştir. Bu ortalama enerji verimleri, parafin, stearik asit ve konvansiyonel PVT için sırası ile %34, %38, %36 ve %32,5 olarak ortaya konmuştur. Uşak ili için yıllık güneşlenme süresi 2789 saat ve güneşlenme miktarı 1540 kWh/m²yıl olarak verilmektedir. Kabul edilen ortalama verimler üzerinden, üretilen enerji miktarı ve yıllık getirileri tabloda verilmektedir. Her bir sistemin ortalama maliyeti yalnızca sistemde kullanılan ek malzeme maliyeti nedeni ile değişmektedir. Projede, malzemelerin sisteme getirdiği ek malzemeler parafin ve stearik asit için sırası ile 300 ve 150 TL olmuştur.

Tablo 3.1 Her bir PVT sistemin ortalama verim, ürettiği enerji ve yıllık getirisi

Sistem (PVT)	Ortalama Verim (%)	Ürettiği Enerji (kWh/yıl)	Yıllık Getiri (TL)	Ortalama Maliyet(TL)
Parafinli	34	838	377	3300
Stearik asitli	36	887	399	3150
Konvansiyonel	32,5	801	360	3000

Diğer yandan enerji verimleri hesaplanırken, ısı verim hesaplamasında giriş suyu sıcaklıklarının şebeke suyu sıcaklığına eşit alınmamış, sistem sınırları içerisinde ölçülen gerçek değer dikkate alınmıştır. Eğer şebeke suyu sıcaklığı giriş suyu sıcaklığına eşit alınsaydı, çok daha büyük ısı verimleri elde edilebilecek, üretilen enerji miktarı ve dolayısı ile yıllık verim artacaktı. Bu önemli ayrıntı mutlaka dikkate alınmalı, test edilen sistemlerin çok daha yüksek enerji verimine sahip olacağı hatırdan çıkarılmamalıdır. Aşağıdaki tablolarda sırası ile bu yıllık getirilerden yola çıkarak NPV yöntemine göre ekonomik analizleri verilmektedir:

Tablo 3.2 Parafinli PVT NPV ekonomik analizi

Periyot (Yıl)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yatırım maliyeti	-3300.00										
Yıllık Getiri		376.99	376.99	376.99	376.99	376.99	376.99	376.99	376.99	376.99	376.99
gider		-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11
faiz oranı	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
bakım onarım											
net nakit akış		376.88	376.88	376.88	376.88	376.88	376.88	376.88	376.88	376.88	376.88
a	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.91
NPV		373.15	369.45	365.79	362.17	358.59	355.04	351.52	348.04	344.59	341.18
		-2926.85	-2557.40	-2191.61	-1829.44	-1470.85	-1115.82	-764.30	-416.26	-71.66	269.52

Tablo 3.2’de, parafinli PVT NPV ekonomik analizi yer almaktadır. Daha önce de ifade edildiği üzere, NPV değerinin pozitif olduğu sürede sistem kendini geri ödemiş sayılmakta, bundan sonraki periyotta kara geçmektedir. Buna göre parafinli PVT sistemin geri ödeme süresi 10 yıl olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 3.3 Stearik asitli PVT NPV ekonomik analizi

periyot (Yıl)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yatırım maliyeti	-3150.00										
Yıllık Getiri		399.00	399.00	399.00	399.00	399.00	399.00	399.00	399.00	399.00	399.00
gider		-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11
faiz oranı	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
bakım onarım											
net nakit akış		398.89	398.89	398.89	398.89	398.89	398.89	398.89	398.89	398.89	398.89
a	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.91
NPV		394.94	391.03	387.16	383.32	379.53	375.77	372.05	368.37	364.72	361.11
		-2755.06	-2364.03	-1976.88	-1593.56	-1214.03	-838.26	-466.21	-97.84	266.87	627.98

Tablo 3.3’de, stearik asitli PVT NPV ekonomik analizi yer almaktadır. Buna göre stearik asitli PVT sistemin geri ödeme süresi 9 yıl olarak hesaplanmaktadır.

Tablo 3.4 Konvansiyonel PVT NPV ekonomik analizi

periyot (Yıl)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yatırım maliyeti	-3000.00										
Yıllık Getiri		360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00
gider		-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11
faiz oranı	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
bakım onarım											
net nakit akış		359.89	359.89	359.89	359.89	359.89	359.89	359.89	359.89	359.89	359.89
a	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.91
NPV		356.32	352.80	349.30	345.84	342.42	339.03	335.67	332.35	329.06	325.80
		-2643.68	-2290.88	1941.58	1595.73	1253.31	-914.28	-578.61	-246.26	82.80	408.60

Tablo 3.4’de, konvansiyonel PVT NPV ekonomik analizi yer almaktadır. Buna göre konvansiyonel PVT sistemin geri ödeme süresi 9 yıl olarak hesaplanmaktadır.

4.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde farklı FDM ile bütünleştirilmiş PVT sistem performansına etki eden parametreler ve deneysel veriler ışığında gerçekleştirilen termodinamik ve ekonomik analizlerinden ulaşılan sonuçlar listelenmiş, ardından sistemin daha verimli çalıştırılabilmesi ve geliştirilebilmesi için öneriler sunulmuştur.

- PVT deneylerinde ulaşılabilen en yüksek çıkış sıcaklığı, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile 47.6 °C; 45.5 °C ve 42.5 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda en yüksek çıkış sıcaklığının elde edildiği sistemin parafinli sistem olduğu anlaşılmaktadır.
- PVT deneylerinde ulaşılabilen en yüksek ortalama ısıl verim, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile %22; %23; %17 olarak hesaplanmıştır.
- PVT deneylerinde ulaşılabilen en yüksek toplam verim, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile %40; %39; %34 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda en yüksek toplam verimin elde edildiği sistemin %40 parafinli sistem olduğu anlaşılmaktadır.
- PVT deneylerinde ulaşılabilen en yüksek ekserji verimi, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile %26; %23; %23 olarak hesaplanmıştır.
- NPV yöntemine göre gerçekleştirilen ekonomik analizde, geri ödeme süreleri, parafinli, stearik asitli ve konvansiyonel PVT sistemler için sırası ile 10; 9; 9 yıl olarak ortaya konmuştur.

Bu sonuçlarla birlikte deneyler sırasında karşılaşılan bazı önemli gözlemlere ve önerilere yer vermek gelecekteki çalışmalara yön verecektir:

- Sistemin boylerli ve düşük debideki hali, pompasız-doğal dolaşimli çalışan durumundan daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak boylerin daha iyi seçilip alınan ısıyı daha iyi aktarması sağlanabilir.
- Parafin, faz değiştirme özelliğinden dolayı daha dengeli sıcaklık sonuçları sağlamaktadır. Uşak koşulları için 40-45 °C erime sıcaklığına sahip FDM li PVT nin faz değişimi sağlayabileceğinden daha verimli sonuçlar sunacağı tahmin edilmektedir.
- Parafini yerleştirmek için eritmek ve küçük parçalara ayırmak gerekmektedir. Yine parafini PVT sistemden boşaltırken de sıcak bir şekilde iken hızlıca ayırmak gerekmektedir.
- Deneyler sırasında 4 cm lik PVT arka tabakasında, parafinin ancak 2 cm lik bir kısmı eritilebilmiştir. 56 °C lik erime sıcaklığına sahip parafinli PVT sistem, Uşak iklim koşullarına uygun değildir. Sonraki araştırmalarda, farklı derece-gün bölgelerine ya da meteorolojik özelliklere sahip bölgeler için farklı erime sıcaklığına sahip parafinlerin test edilmesi mümkündür. Gerçekleştirilen deneylerde, FDM tam olarak eritilemediğinden dolayı parafinin performansı tam olarak değerlendirilememiştir. Oysaki tamamen eritilen bir parafin, akşam saatlerinde de ısıl enerji vermeye devam edecektir.
- Benzer şekilde 69 °C erime sıcaklığına sahip Stearik asit Uşak meteorolojik koşullarında eritilememiştir. Ancak bu yüksek erime sıcaklığına sahip FDM ler, ısıl iletimi iyileştirilmiş bir PVT de, sıcak iklim bölgelerinde, örneğin 1. Derece gün bölgelerinde test edilebilir. Uşak 3. Derece-gün bölgesinde yer alan bir şehrimizdir. Burada elde edilen sonuçlara göre, FDM li bir PVT için erime sıcaklığı yaklaşık 45 °C olan bir FDM seçilmesi uygun olacaktır.
- FDM lerin PVT sistemde sızdırmazlıklarının çok iyi bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Bu sızdırmazlık hem PVT sistemin bütününden dışarıya sızıntıların önlenmesi, hem de FDM nin boru içindeki suya karışmaması açısından önemlidir.

Küresel ısınmanın etkilerinin sürekli olarak hissettiğimiz şu günlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve bu kaynakların verimlerinin artırılması gittikçe önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarımızın en önemlisi olan güneşin verimli şekilde kullanılması için birçok çalışma yapılmaktadır. Çalışmamızda konu edilen FDM li ve ısı depolamalı PVT sistemler kullanarak güneş enerjisinden en etkin şekilde yararlanma amaçlanmıştır. Bu çalışmanın, benzer birçok yeni konuya ve çalışma alanına uygulanabileceği ümit edilmektedir.

Enerji sektöründeki dışa bağımlılığımız düşünülürken, ülkemizin sahip olduğu güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının geliştirilmesi, enerji tasarrufu bakımından önemli bir potansiyel olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel enerji politikaları, enerji arz güvenliği ve artan nüfusumuz, bizleri yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Enerji gereksinimini



karşılatabilen bir ülke olmak için, var olan tüm doğal kaynaklardan en etkin biçimde yararlanılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 214M615 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. Huang B.J., P.E Yang, Y.P Lin, B.Y Lin, H.J Chen, R.C Lai, “Solar cell junction temperature measurement of PV module”, Solar Energy ,85:388–92, 2011.
- [2]. Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B., “Phase change materials for limiting temperature rise in building-integrated photovoltaics”. Solar Energy 80, 1121–113, 2006.
- [3]. Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B., Hewitt, N.J., “Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics”. Solar Energy Material and Solar Cells 95, 1598–1603,2011.
- [4]. Jungwoo P., Taeyeon K., Seung-Bok L., “Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions”, Solar Energy 105,561–574,2014.
- [5]. Ho C.J., Chou Wei-Len, Lai Chi-Ming. “Application of a water-saturated MEPCM-PV for reducing winter chilling damage on aqua farms”, Solar Energy 108 135–145, 2014
- [6]. Hasan , S.J. McCormack, M.J. Huang, B. Norton, “Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method”, Energy Conversion and Management 81, 322–329, 2014.
- [7]. Ho CJ, Tanuwijava AO, Lai CM, “Thermal and electrical performance of a BIPV integrated with a microencapsulated phase change material layer”. Energy and Building; 50:331–8,2012.
- [8]. Wenye Lin, Zhenjun Ma, M. Imroz Sohel, Paul Cooper, “Development and evaluation of a ceiling ventilation system enhanced by solar photovoltaic thermal collectors and phase change materials”, Energy Convers Manag 88, 218–230, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Canan Kandilli

1978 yılı Karabük doğumludur. Doktora öğrenimini Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde 2007 yılında tamamlamıştır. 2014 yılında Makine Mühendisliği alanında Doçentlik unvanını almıştır. Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda öğretim üyeliği ve anabilim dalı başkanlığı yapmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği ve yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri, fotovoltaik termal sistemler konularında çalışmakta olup, evli ve iki çocuk annesidir.