



PV-T Kollektör kaynaklı bir ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi

Energy and exergy analysis of a PV-T collector welded heat pump system

Mehmet Altıncaynak^{1,*}, Recep Demirekin², Ali Kemal Yakut³

^{1,3} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Turkey

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü, 32260, Isparta Türkiye

Özet

Günümüzde düşük enerji girdisi ile yüksek ısı performansını sağlandığı ısı pompası sistemlerinde, sistemin kurulacağı bölge, jeolojik yapı, coğrafi konum ve mevsimsel şartlar dikkate alındığında bu sayılan gerekçeleri karşılamak amacıyla toprak kaynaklı ısı pompası, hava kaynaklı ısı pompası ve su kaynaklı ısı pompası çeşitlerine talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada toprak kaynaklı ısı pompasına destek amaçlı 72 hücreli, tek kristal silisyum modül hücre paneline sahip 190W nominal güç üreten bir PV-T kollektör hesaplama için kullanılmıştır. PV-T destekli ısı pompası sistemindeki her bir eleman için enerji ve ekserji analizleri EES (Engineering Equation Solver) programı yardımıyla yapılmıştır. Kullanılan PV-T hibrit sistemde toplam elektriksel güç 1422 W, toplam alınan ısı güç te 4397 W'dır. PV-T kollektörün ısı verimi %49.7, elektrik verimi %15.2 olarak hesaplanmıştır. PV-T kaynaklı ısı pompası sistemine kollektörlerin verim katkısı %67,9 olarak görülmüştür. Işınım şiddeti arttıkça toplam elektriksel gücün ve toplam alınan ısı gücün arttığı görülmüştür. Ayrıca yapılan bu çalışmada ısı pompası sisteminin COP si 4,41 olarak hesaplanmıştır. En yüksek ekserji yıkımının kondenserde olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: PV-T, Isı pompası, Enerji, Ekserji, COP

1 Giriş

Fosil yakıtların çevreyi kirletmesinden dolayı alternatif olarak en ön planda temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi bulunur. Yeryüzünün bir yılda aldığı güneş ışınım enerjisi, dünyadaki belirlenmiş tüm fosil yakıtın yaklaşık 160 katıdır. Ayrıca güneş; dünyadaki hidroelektrik, nükleer ve fosil yakıtlarla üretilebilecek enerjiden 15 bin kat daha fazla enerjiyi bizim kullanımımıza sunmaktadır. Dünyaya, güneşten saniyede 170 milyon MW enerji gelmektedir [1, 2].

Dünya'da güneş enerjisi tek başına ısı ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle bir enerji kaynağına ihtiyaç vardır. İnsanların bu tür gerekli ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kullanılan ısıtma sistemlerinin bir tanesi de ısı pompalarıdır. Isı pompaları; mekanik enerjiyi ısı enerjisine çeviren bir sistemdir.

Elektrikli ısıtma sistemlerine göre 4-5 kat daha iyi sonuçlar vermektedir. Aynı tesisat ile hem ısıtma hem de

Abstract

Today, demand for soil source heat pump, air source heat pump and water source heat pump types with low energy input and high temperature performance has been increasing considering the region where the system will be built, geological structure, geographical location and seasonal conditions. In this study, a PV-T collector which produces 190W rated power with 72 cell single crystal silicon module cell panel has been used for supporting the ground source heat pump. Energy and exergy analyzes for each element in the PV-T assisted heat pump system has been done with the help of EES (Engineering Equation Solver) program. In PV-T hybrid system, total electrical power is 1422 W and total thermal power is 4397 W. Thermal efficiency of PV-T collector has been calculated as 49.7% and electrical efficiency as 15.2%. The efficiency contribution of the collectors to the PV-T welded heat pump system has been 67.9%. It has been observed that the total electrical power and the total thermal power increases as the intensity of heat goes up. In this study, the COP of the heat pump system has been calculated as 4.41. The highest exergy destruction has been observed in the condenser

Keywords: PV-T, Heat pump, Energy, Exergy, COP

soğutma işlemi yapabilmektedir. Çevreye duyarlı bir sistem oldukları için tercih edilirler [3].

PV / T (fotovoltaik / termal) teknolojisi, güneş enerjisinin daha kapsamlı kullanımını sağlayan, verimliliğini artırabilen ve geniş bir uygulama beklentisine sahip olan PV modülü (fotovoltaik kullanım) ve toplayıcının (foto termal kullanım) bir kombinasyonudur. Literatürde PV panele ve PV-T kollektöre yönelik çok sayıda çalışma yapılmış olup genellikle PV-T kollektörlerin soğutulması amacıyla bu kısım evaporatör olarak dizayn edilmiştir. Yao vd.[4], PV-T kollektörünü evaporatör olarak kullandıkları ısı pompası sisteminde ortam ısıtması yapmak amacıyla faz değiştiren malzemeler ile de enerji depolama işlemi yapmışlardır. PV-T ısı pompası sisteminin matematiksel modelini oluşturmuşlardır. 20 m² PV-T panel modülü kullanarak yaptıkları çalışmada 600 W/m² güneş ışınımı için COP %5.79, ısı verimi % 55.76 ve sistem verimini ise % 75.49 olarak hesaplamışlardır. Özakin vd. [5], PV-T ve ısı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetaltıncaynak@sdu.edu.tr. (M. Altıncaynak)

Geliş / Received: 24.02.2020 Kabul / Accepted: 28.01.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.693384

pompasını birleştirerek kombine bir sistem oluşturmuşlardır. Çalışmalarında PV-T'yi evaporatör olarak kabul etmişler ve evaporatörün performans katsayısı ve ekserjetik verime olan etkisini fluent yardımıyla incelemişlerdir. Sonuçlara göre elektriksel verimin beklendiği şekilde arttığını görmüşlerdir. Sistemin COP değerinin 4.75 olduğunu, kombine sistemin ekserjetik veriminde soğutucu akışkanın 6 m/s akış hızında olduğu durumda % 55.5 olarak hesaplamışlardır. Ji vd. [6], PV destekli bir ısı pompası sistemini incelemiş ve yaptıkları deney setinde PV panel üzerine buharlaştırıcı yerleştirerek yeni bir dizayn ile hem elektrik hem de ısı enerji alabileceklerini ifade etmişlerdir. Verim olarak kıyaslandığında PV panel verimini %12, ısı verimi ise %50 civarında bulmuşlardır. Yaptıkları başka bir çalışmada, güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminde güneş enerjisini evaporatör olarak tasarlamışlar ve performans analizlerini incelemişlerdir. Yaptıkları analizlerde COP değerini 8.4 panel verimini ise %13.4 olarak hesaplamışlardır [7]. Yine yaptıkları diğer bir çalışmalarında, PV-T güneş kollektörünün performans analizini bir yıldan fazla deneysel olarak ölçümlerle incelemişlerdir. PV sistemlere göre PV-T sistemlerinde yüzey sıcaklığının soğutucu akışkan yardımıyla düşürülmesi ile daha verimli olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuçlarda ise, PV-T evaporatör sisteminde verimin %64-87 aralığında olduğunu, ısı veriminin de %53-64 ve son olarak da PV kollektörünün veriminin %12.4-14.5 arasında olduğunu deneysel olarak bulmuşlardır [8]. Fu vd. [9], güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminde üç farklı durum için modelleme yaparak analiz yapmışlardır. İlk önce ısı borusu, ikinci durumda güneş enerji destekli bir ısı pompasını, üçüncü durumda ise hava kaynaklı ısı pompası sistemini incelemişlerdir. Hong-Kong' da yaptıkları deneylerde enerji tasarrufu sağlamak üzere yeni bir tip üç mod da çalışabilen hibrit bir sistem önermişlerdir. Hibrit sistemin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Daghigh vd. [10], yaptıkları çalışmalarında PV-T kollektörlerdeki ısınmayı gidermek için su ve soğutucu akışkanlar kullanmayı tercih etmişlerdir. Su soğutmalı ve soğutucu akışkanlı hibrit fotovoltaik termal toplayıcı sistemlerin gelecekteki durumları üzerine yorumlar yapmışlardır. Bu çalışma ile doğrudan genleşmeli güneş destekli ısı pompası sistemi ile PV / T toplayıcının soğutma etkisi altında daha iyi sonuçlar elde ettiğini ortaya koymuştur. Tyagi vd. [11], yaptıkları derleme makalede güneş enerjisi sisteminin 30 yılını göz önüne almış ve son 30 yıldan bugüne güneş enerjisi sistemlerinin devamlı bir araştırma ve geliştirmeye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Verimli güneş enerjisi sistemleri için yeni nesil ekipman ve malzemelerle iyileştirmelerin olduğunu belirtmişlerdir. Tek bir cihazla PV-T kollektörleri ile hem elektrik enerjisi hem de ısı enerji elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca bu sistemler ile ısıtma, sudan tuzun ayrıştırılması, güneş serası, PV-T kollektör destekli ısı pompası son olarak ta soğutma yapılabileceğinin metodları hakkında bilgi vermişlerdir. Zhang vd. [12], Pekinde müstakil bir evin ısıtılması amacıyla, üç akışkanlı PV- T ısı pompası hibrit sistemi önermişlerdir. Ayrıca bu sistem için matematiksel bir model de ortaya koymuşlardır. Geleneksel tip hava kaynaklı bir ısı pompasına kıyasla, bu sistemde %13.2'lik bir enerji tasarrufu

sağladıklarını belirtmişlerdir. Geleneksel bir PV panele göre ise sistemde % 14.7'lik enerji üretimi sağlamışlardır. Shao vd. [13], bina çatısına yerleştirdikleri PV-T kollektör ısı pompası sisteminin farklı mevsimsel performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yaz aylarında, kış aylarına göre daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Deneylerdeki verilerin analizleri sonucunda elektriksel verimi %11.23, ısı verimi ise %64.25 olarak hesaplamışlardır. Tüm yıl için ortalama COP değerini 5.9 olarak bulmuşlardır. Zhou vd. [14], Çin'de yaptıkları teorik ve deneysel karşılaştırmalı çalışmada, mini kanallı PV-T kollektör ısı pompası modelini geliştirmişlerdir. Veriler ile modelleme ve simülasyon tekniklerini uygulayarak ölçüm sonuçları ve teorik sonuçları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda hata analizlerinde %4-9 arasında hata payı olduğunu bununla beraber mevsimsel olaylara dayalı olduğunu ifade etmişlerdir. Mini kanallı sistemden sonra yaptıkları bir diğer çalışmada, mikro kanallı PV-T kollektör ısı pompası modelini geliştirmişlerdir. Teorik ve deneysel karşılaştırmalı çalışmada, veriler ile modelleme ve simülasyon tekniklerini uygulayarak ölçüm sonuçları ve teorik sonuçları karşılaştırmışlardır. Yine yaptıkları hata analizlerinde % 7.2 arasında mevsimsel olaylara dayanan sapmaların olduğunu ifade etmişlerdir. PV / T modülünün deneysel ortalama elektrik, termal ve toplam verimliliği sırasıyla %13.1, %56.6 ve %69.7'dir. Sistemin ortalama deneysel ve simüle edilmiş COP değeri sırasıyla 4.7 ve 5.0'dır [15]. Ammar vd. [16], yaptıkları çalışmada farklı güneş ışınımı değerleri için PV-T kollektör destekli ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizlerini EES ve Hottel-Whillier denklem çözücülerini kullanarak hesaplamışlardır. R134a soğutucu akışkanını kullandıkları sistemde PV panel sıcaklığının maksimum 35.68 °C, elektriksel verimin 1000 W/m² de maksimum seviyede %11.56 olduğunu ifade etmişlerdir. Ortalama COP değerini 6.14 bulmuşlardır. Bellos ve Tzivanidis [17], yedi farklı akışkanı sabit durumda tamamen PV enerjisi ile çalıştırılan bir ısı pompası sisteminde incelemişlerdir. Optimum tasarım noktalarında R32 ve ona en yakın performans değerini gösteren R1234yf akışkanı olduğunu belirtmişlerdir. Optimum tasarım koşullarında 10 m² PV panel ile ısı pompasını besleyebilmişler ve ısıtımada 4.33 kW, elektrik üretiminde 0.53 kW net elektrik üretmişlerdir. Ayrıca günlük ortalama enerji verimliliğini %60.53, ekserji verimini ise %9.26 olarak hesaplamışlardır. Razali vd. [18], yaptıkları çalışmada PV-T kollektörde 0.012-0.255 kg/s debilerinde su akışlı bir sistemin deneysel analizini ele almışlardır. Farklı güneş ışınım şiddeti değerleri için güç üretimini incelemişlerdir. Ekserji oluşumu değerlerini ise 700 W/m² ve 900 W/m² ışınım şiddetleri için sırasıyla %22.48 ve %20.87 bulmuşlardır. Coventry, yapmış olduğu çalışmada, PV-T sistemin çalışma şartlarında ki verilerini göz önüne alarak analizler yapmışlardır. Analiz sonuçlarına bakıldığında, yoğunlaştırılmış PV/T modüllerinin ısı veriminin %58 civarında, elektriksel veriminin %11 civarında ve toplam verimin yaklaşık olarak %69 olduğunu bildirmiştir [19]. Yamaç yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, güneş enerjisi destekli bir ısı pompasını incelemiş, sistemde R-134a akışkanını kullanmıştır. Analizler sonunda işletmenin

günlük 5 ton suya ihtiyacının olduğunu ve bu suyun sıcaklığının yaklaşık 36°C'den ısıtılarak 50°C'ye çıkartılabilmesi için ısı pompasının ihtiyacı olan ısı yükünün ne kadarlık kısmının kolektör yardımıyla karşılandığını araştırmış ve sonuç olarak sistemin COP değerini 4.39 olarak bulmuştur [20]. Duran, Isparta ili için PV-T kolektör sistemini yüksek lisans tez çalışmasında deneysel olarak incelemiştir. Elektrik üretimim esnasında meydana gelen panel sıcaklığının artması ile düşen elektrik verimini paneli soğutarak artırmayı amaçlamıştır. PV panelin arka yüzüne yerleştirdiği borularla ile su akışını sağlayarak soğutmaya amaçlamış ve panelin soğuması ile hem fotovoltaiik termal (PV-T) sistemin verimini arttırmış hem de sıcak su elde etmiştir. Yürüttüğü çalışmada farklı panel açıları ve farklı soğutma suyu debileri kullanmıştır. Yaptığı çalışmanın sonucuna göre elektrik üretiminde yaklaşık %35'lik güç artışı ve %7'lik verim artışı elde etmiş ve ekserji analizi sonucuna göre ekserji verimi ortalamasını %21 olarak bulmuştur [21]. Fudholi vd. PV modülden imal edilen bir PV-T panelin performansını değerlendirmişlerdir Yaptıkları analiz sonucu 800 W/m² ışınım ve 0.041 kg/s su debisinde, %13 PV verimi ve %52 ısı verim elde etmişlerdir. Debinin artması ve azalması panel yüzeyinin soğumasını aynı zamanda sıcak suyun üretilmesini de etkilediğini belirtmişlerdir [22]. Benli, aynı koşullarda PV ve PV/T kolektörlerinin performanslarını deneysel olarak karşılaştırmıştır. Akışkan olarak iki sistem içinde su kullanmış ve ışınım, dış hava sıcaklığı, su giriş sıcaklığı, su debisi gibi farklı parametreler üzerinde çalışma yürütmüştür. Yaptığı çalışmada PV/T kolektörlerinin PV kolektörlere göre elektriksel ve termal verimin yüksek olduğu sonucuna varmıştır [23]. Caner, yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası sistemini Sivas koşulları için incelemiş, yerin 2.5 m altına 4 hattan oluşan, içinde su- antifriz karışımı bulunan ısı değiştiricileri kullanarak toplam uzunluğu 370 m olan sistemi kurmuştur. Çalışmasının sonucunda ısı pompası ve sistemin performans katsayılarını (COPPIP ve COPS) sırasıyla 2.3-1.96 ve 1.99-1.7 değerleri arasında olduğunu bulmuştur [24]. Al-Khaldi, Toprak kaynaklı ısı pompasının ısıtma performansını Isparta ili şartlarında bir ısıtma uygulaması üzerine farklı debilerde ve farklı karışım oranlarıyla irdelemiştir. Yaptığı çalışma toprak altı ve toprak üstü olmak üzere iki çevrimden oluşmakta ve en iyi sonuçları %5 karışım oranı, 21 L/dak hacimsel debi ile almıştır. Çalışmanın en yüksek COP 3.42 ve sıcaklığı ise 27.2°C olarak bulmuştur [25]. Horzum, Antalya'da bir meskende bulunan toprak kaynaklı ısı pompası sistemine ait verileri termodinamik açıdan yorumlamıştır. Termodinamik analiz sonucunda ısı pompasının ikinci yasa verimi ve COP değerleri sırasıyla 0.6649 ve 3.683 olarak bulmuştur [26].

Literatürde de görüldüğü gibi, PV / T sisteminden daha fazla güç ve ısı elde etmek için PV hücrelerini soğutmak ve sıcaklığını azaltmak gerekir. Bu durum sonucunda sistemin daha verimli olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla yüzeyin soğutulması amacıyla birçok çalışmada, PV-T kolektörü ısı pompası sisteminin evaporatörü olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada da bir ısı pompası sisteminin kompresörünün çalışabilmesi için gerekli olan elektrik enerjisi ile ısı pompasının evaporatör kısmının alabileceği

enerji miktarları üzerine bir sistem tasarımı, Isparta ilinin Eğridir ilçesinin güneyinde bulunan 2109 m yükseklikteki Bozburun dağının yamacında bulunan hali hazırdaki bir adet bağ evi için sistem tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Güneş enerjisi kullanım yöntemlerinden ısı pompasının ve bağlı olduğu sistemin elektrik enerjisi ihtiyacı fotovoltaiik panellerden karşılanırken, PV-T panellerdeki ısıtma suyunun bir ısı pompasına girdi olarak verilmesiyle sistemin mahal için gerekli olan ısıtma ihtiyacının da ısı pompasından sağlanması planlanmıştır

2 Materyal ve metot

Bu bölümde, termodinamik yasalara bağlı olarak bazı tanımlayıcı açıklamalar PV-T destekli ısı pompası sisteminin analizi için verilmiştir. Sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge denklemlerini kapsayan ilkeler sistemin iyileştirme potansiyelini araştırmak için incelenmiştir [27]. Kütle denge analizi, herhangi bir termodinamik sistemin analizinde kullanılan en temel bir kuraldır. Rejime sahip bir sistem için kütle dengesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (1)$$

Burada “g” giren akımı, “ç” alt indisi çıkan madde akımını göstermektedir. Enerjinin korunumu ilkesi gereğince kinetik ve potansiyel enerjinin ihmal edilmesiyle enerji denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılmıştır [28].

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (2)$$

Ekserji analizi, enerjinin kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. Endüstride üretimde ısıtmada soğutmada vb. endüstriyel uygulamalarda, enerji sistemlerinde sistemin termodinamik analizi için kullanılmaktadır. Bu sistemlere ait genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılmaktadır [27].

$$\sum_g \dot{m}_g ex_g + \dot{E}x_Q = \sum_\zeta \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \dot{E}x_W + \dot{E}x_Y \quad (3)$$

Burada ekserji transfer hızı, ısı transfer hızının ekserjisi ve iş ile alakalı ekserji transfer hızıdır. Ekserji yıkımı ile ifade edilmektedir. Prosesin spesifik ekserjisidir. Bu kavramlar aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \dot{Q}_g \quad (4)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (5)$$

$$ex = ex_{ke} + ex_{pe} + ex_{ph} + ex_{ch} \quad (6)$$

Burada ex_{ke} kinetik ekserjisi, ex_{pe} potansiyel ekserjisi, ex_{ph} fiziksel ekserjisi ve ex_{ch} da kimyasal ekserjisi ifade etmektedir. Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilebilir olduğundan, fiziksel ekserji aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$ex_{ph,i} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (7)$$

Kimyasal ekserji ise maddenin kimyasal dengesinden kimyasal yapısının uzaklığı ile bağlantılıdır. Yakıtların spesifik kimyasal ekserjileri molar kimyasal ekserji (ξ_i) ve ilgili yakıtın alt ısıl değeri (LHV_y) kullanılarak tanımlanır [29]

$$\dot{E}x_{km}^y = \xi_i LHV_y \quad (8)$$

İdeal gazların kimyasal ekserji içerikleri şu şekildedir;

$$ex_{ch} = ex_{ch}^o + R_u T_o \ln z_i \quad (9)$$

Burada z_i i numaralı bileşenin mol kesrini ve ex_{ch}^o verilen referans sıcaklık ve basınçta molar kimyasal ekserjidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$ex_{ch}^o = \frac{T_o}{T} ex_{o,i}^{ch} - \bar{h}_f^o \frac{T - T_o}{T} \quad (10)$$

Burada $ex_{o,i}^{ch}$, \bar{h}_f^o ve T sırasıyla “i” numaralı kimyasal bileşenin standart molar kimyasal ekserjisi, oluşum entalpisi ve gazlaştırma sıcaklığıdır. Materyal akışının ekserjisi aşağıda verildiği gibidir;

$$\dot{E}x_i = \dot{m} ex_i \quad (11)$$

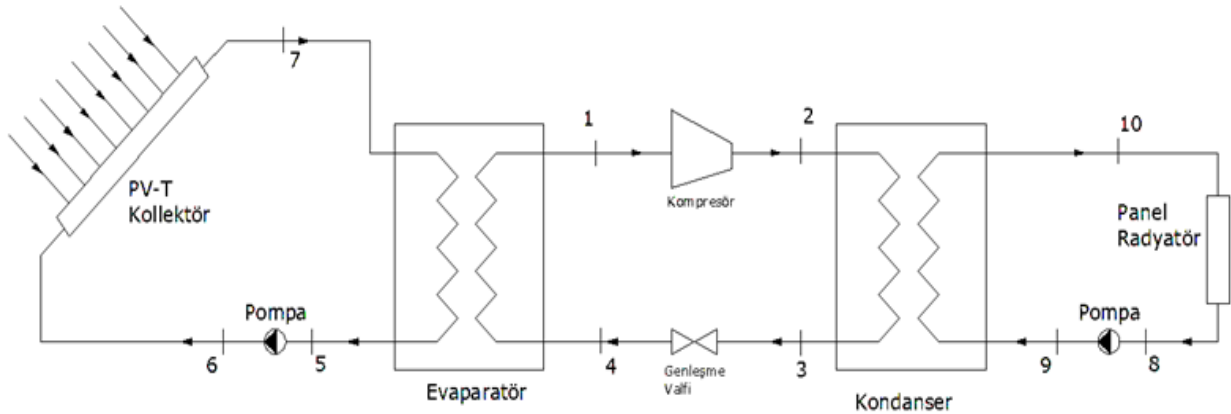
PV-T kolektörün enerjisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_{u,PV-T} = A_c F_R [(\tau\alpha)I_s - U_L(T_i - T_a)] \quad (12)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (13)$$

Burada F' kolektör verim faktörü olup aşağıdaki gibi yazılabilir [30].

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_f} \right]} \quad (14)$$



Şekil 1. Sistemin şematik gösterimi

Burada W ısı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk (m), D borunun iç çapı (m), F standart kanat verimi, C_b sınır ve iletkenliği h_f boruların içindeki ısı transfer katsayısını ifade etmektedir.

PV-T kolektörlerin enerji verimliliği aşağıdaki gibi verilir [31].

$$\eta_{PV-T} = \frac{Q_{u,PV-T}}{I_s x A_c} = \frac{F_R [(\tau\alpha)I_s - U_L(T_i - T_a)]}{I_s} \quad (15)$$

PV-T sisteminin ısı ekserjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Ex_{PV-T,thermal} = \left(1 - \frac{T_i}{T_a}\right) Q_{u,PV-T} \quad (16)$$

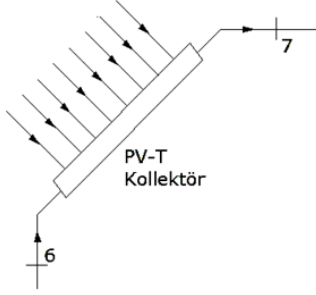
PV-T kolektörler aynı zamanda elektrik enerjisi ve gövdeden ısı enerji sağladığı için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Psi_{PV-T} = \frac{Ex_{PV-T}}{Ex_{güneş}} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_i}{T_a}\right) Q_{u,PV-T}}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) A_c I_s} \quad (17)$$

PV-T kolektör destekli ısı pompasına ait sistemin akış diyagramı Şekil 1. 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PV-T kolektör yüzeyinden geçirilen kapalı devre kolektör suyu, kolektör pompası ile PV-T kolektöre basılır. Buradan ısı alan su, ısı pompasının evaporatörüne gelir. Burada soğutucu akışkana, ısı değiştirici vasıtasıyla ısını bırakır. Isısını bırakan akışkan su tekrar ısı almak için kolektöre gönderilir. Isı alan soğutucu akışkan buharlaşır ve kompresör ekipmanı ile kondansere basılır. Kondanserde ısını radyatör ısıtma suyuna aktaran soğutucu akışkan, genleşme valfine gelerek soğutma çevrimini tamamlamış olur. Radyatör sistemine ait olan sirkülasyon pompası ile mahal ısıtma suyu kondansere basılarak burada ısı yüklemesi yapılır. Aldığı enerjiyi panel radyatör yoluyla ortama aktararak, ortamın ısıtılması sağlanmış olur.

PV-T kaynaklı ısı pompası sisteminin tüm bileşenlerinin kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri ayrı ayrı parçalanmış olarak aşağıda verilmiştir

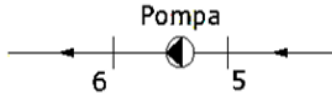
Sisteme ait ekipmanlardan PV-T kollektöre ait Şekil 2’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Kollektör

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} & (18a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} & (18b) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,Kond}} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{10} s_{10} & (18c) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{\text{yıkım,Kond}} & (18d) \end{aligned}$$

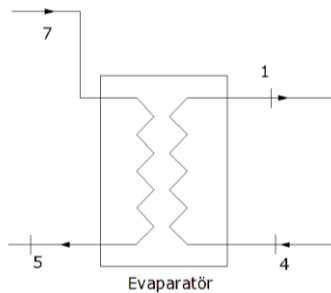
Sisteme ait ekipmanlardan PV-T kollektör ait pompa Şekil 3’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. Kollektöre ait pompa

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_5 = \dot{m}_6 & (19a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{PV-T,pompa} = \dot{m}_6 h_6 & (19a) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\text{üretim,PV-T,pompa}} = \dot{m}_6 s_6 & (19a) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_5 ex_5 + \dot{W}_{PV-T,pompa} = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{\text{yıkım,PV-T,pompa}} & (19a) \end{aligned}$$

Sisteme ait ekipmanlardan evaporatör Şekil 4’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4. Evaporatör

$$\text{Kütle} \quad \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} \quad (20a)$$

$$\text{Enerji} \quad \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} \quad (20b)$$

$$\text{Entropi} \quad \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,Kond}} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{10} s_{10} \quad (20c)$$

$$\text{Ekserji} \quad \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{\text{yıkım,Kond}} \quad (20d)$$

Sisteme ait ekipmanlardan genişleme valfi Şekil 5’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5. Genişleme valfi

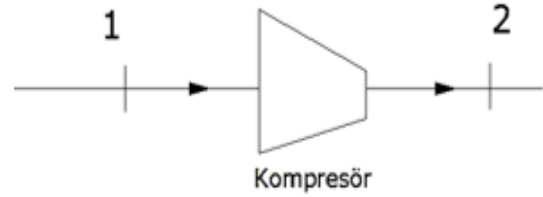
$$\text{Kütle} \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (21a)$$

$$\text{Enerji} \quad \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 \quad (21b)$$

$$\text{Entropi} \quad \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{\text{üretim,GV}} = \dot{m}_4 s_4 \quad (21c)$$

$$\text{Ekserji} \quad \dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{\text{yıkım,GV}} \quad (21d)$$

Sisteme ait ekipmanlardan kompresör Şekil 6’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. Kompresör

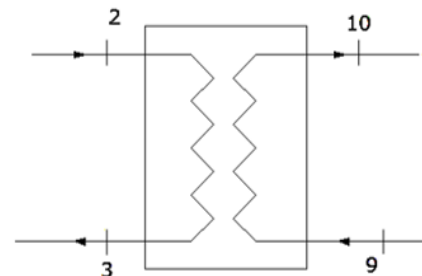
$$\text{Kütle} \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (22a)$$

$$\text{Enerji} \quad \dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{\text{Komp}} = \dot{m}_2 h_2 \quad (22b)$$

$$\text{Entropi} \quad \dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{\text{üretim,Komp}} = \dot{m}_2 s_2 \quad (22c)$$

$$\text{Ekserji} \quad \dot{m}_1 ex_1 + \dot{W}_{\text{Komp}} = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{E}x_{\text{yıkım,Komp}} \quad (22d)$$

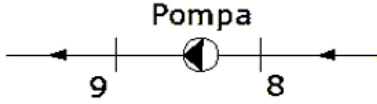
Sisteme ait ekipmanlardan kondenser Şekil 7’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 7. Kondenser

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} & (23a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} & (23b) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,Kond}} \\ & = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{10} s_{10} & (23c) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_9 s_9 \\ & = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{E}x_{\text{yıkım,Kond}} & (23d) \end{aligned}$$

Sisteme ait ekipmanlardan sirkülasyon pompası Şekil 8’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.

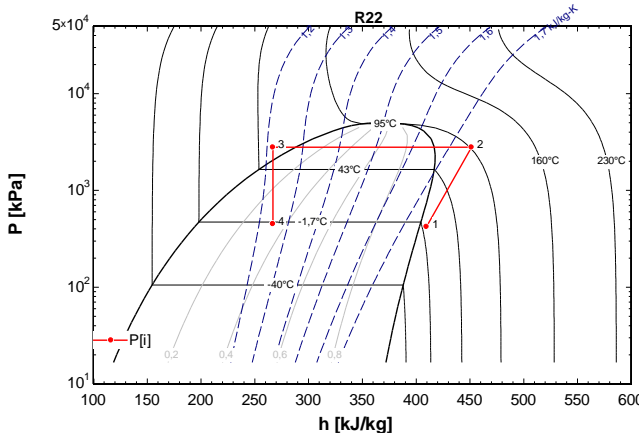


Şekil 8. Sirkülasyon pompası

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_8 = \dot{m}_9 & (24a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_8 h_8 + \dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{m}_9 h_9 & (24b) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{\text{üretim,pompa}} = \dot{m}_9 s_9 & (24c) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{\text{yıkım,pompa}} & (24d) \end{aligned}$$

3 Bulgular ve tartışma

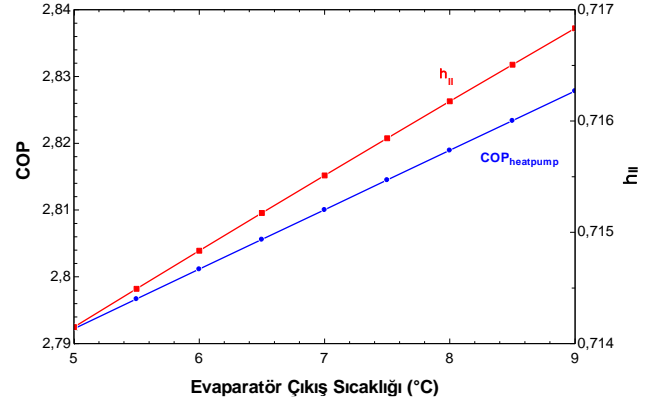
PV-T destekli ısı pompasında kullanılan R22 akışkanına ait P-h diyagramı Şekil 9’da verilmiştir



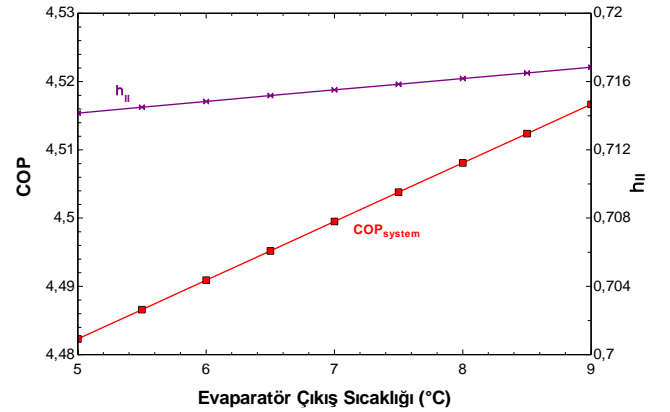
Şekil 9. R22 Soğutucu akışkan P-h diyagramı

Isı pompasının evaporator çıkış sıcaklığının değişimine bağlı olan COP ve I. Yasa verimi Şekil 10’da verilmiştir. Sistemin COP değerinin akışkanın evaporator sıcaklığına bağlı olarak değişim aralığı çok kısa olmaktadır. Bunun sebebi evaporator sıcaklığı aralığının 5 °C ile 9 °C arasında tutulmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 10’de görüldüğü gibi evaporator çıkış sıcaklığı arttıkça ısı pompasının COP’ si artmakta, dolayısıyla sistemin I. Yasa verimi de artmaktadır. Evaporator çıkış sıcaklığına bağlı olarak değişimin sistemin COP’ sine ve II. Yasa verimine etkisi Şekil 11’de aşağıda verilmiştir.



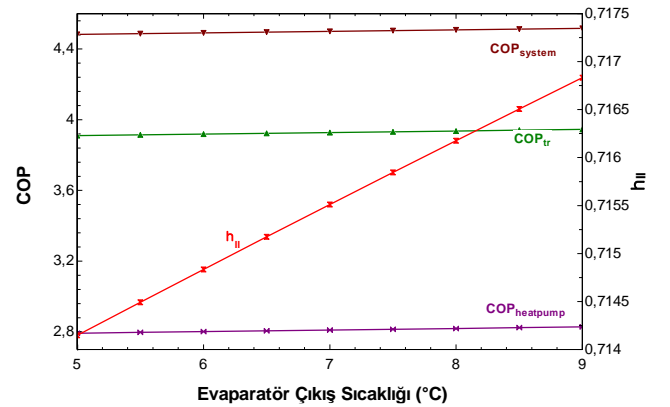
Şekil 10. Evaporator çıkış sıcaklığına bağlı COP değişimi



Şekil 11. Evaporator çıkış sıcaklığına bağlı sistem COP ve II. yasa verimi

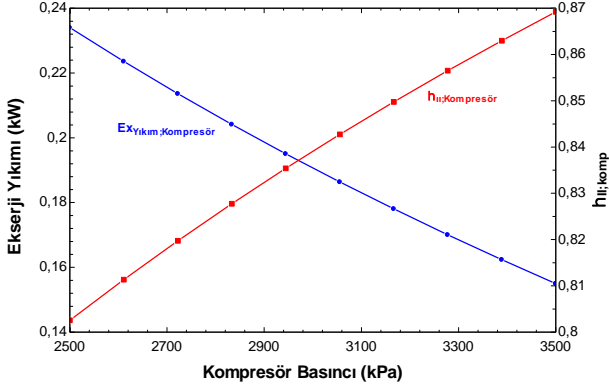
Şekil 11’de görüldüğü gibi evaporator çıkış sıcaklığının artması sistemin COP’ sini arttırmış ve doğal olarak bu artış sistemin ekserji veriminin de artmasına sebep olmuştur. Doğal olarak sistemin COP’si ısı pompasının COP’sinden büyük olmaktadır. Yapılan çoğu çalışmada sistem COP değerleri 3.5-5 aralığında çıktığı literatürde de görülmektedir.

Isı pompasının evaporatorünün çıkış sıcaklığının değişiminin sistemin ve ısı pompasının COP değişimine etkisi Şekil 12’de verilmiştir.



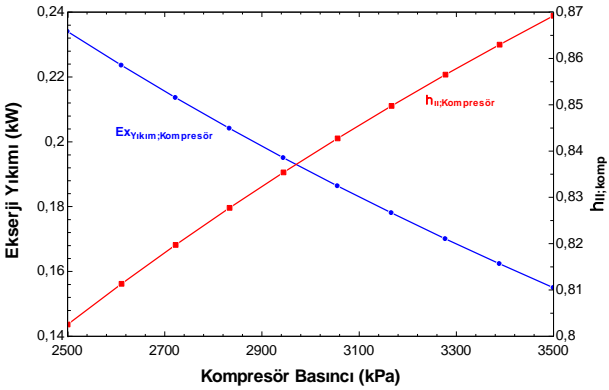
Şekil 12. Evaporator çıkış sıcaklığının COP değişimine etkisi

Evaporatörün çıkış sıcaklığının artması sistemin I. Yasa verimini görülür bir düzeyde artırırken sistemin COP' sini, ısı pompasının COP' sini ve COP_{tr} değerlerini çok az miktarda arttırdığı Şekil 12' de görülmektedir. Kompresör basıncı değişiminin ekserji yıkımı ve ekserji verimine etkisi Şekil 13' de verilmiştir.



Şekil 13. Kompresör basıncı değişiminin ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi

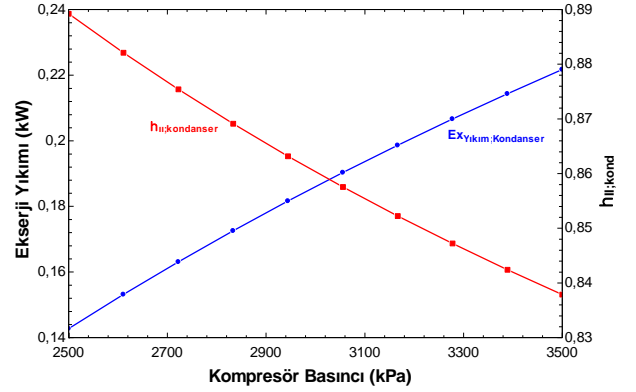
2500 kPa ile 3500 kPa aralığında değişen kompresör basıncının artması kompresördeki ekserji yıkımının azalmasına dolayısıyla II. Yasa veriminin diğer bir değişle ekserji veriminin artmasına sebep olmaktadır. Bu ekserji yıkımındaki azalma değeri 0.227 kW'dan 0.148 kW kadar düşmektedir. Evaporatör çıkış basıncının ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi Şekil 14' de verilmiştir.



Şekil 15. Evaporatör çıkış basıncının ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi

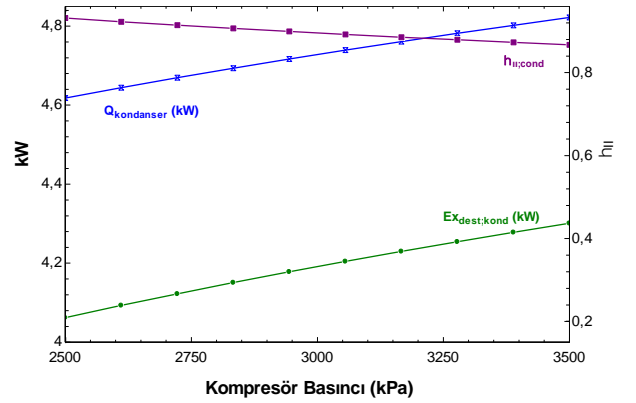
Isı pompasının evaporatör çıkış basıncının artırılması evaporatörün ekserji yıkımını azaltırken II. Yasa verimini arttırdığı Şekil 15' de görülmektedir. Evaporatör çıkış basıncının 500 kPa ile 550 kPa arasında değişimi, evaporatörün ekserji veriminin % 87.8'den % 91.7' ye artmasına sebep olmuştur.

Kompresör basıncı değişiminin kondenser ekserji yıkımına ve verimine etkisi Şekil 16' de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kompresör basıncı 2500 kPa'dan 3500 kPa çıkartıldığında, kondenserin ekserji yıkımı % 83.2'den % 87.9'a arttığı görülmüştür



Şekil 16. Kompresör basıncı değişiminin kondenser ekserji yıkımına ve verimine etkisi

Şekil 16'de görüldüğü gibi ısı pompasının kompresör basıncının artırılması kondenserdeki ekserji yıkımını arttırmakta ve kondenserin ekserji verimini azaltmaktadır. Kompresör basıncı değişiminin kondenserin ekserji yıkımına, ekserji verimine ve kondensere atılan ısı miktarına etkisi Şekil 17' de verilmiştir

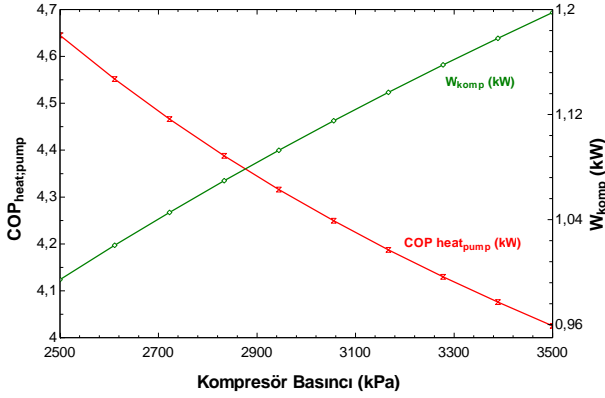


Şekil 17. Kompresör basıncı değişiminin kondenserin ekserji yıkımına ve verimine etkisi

Şekil 17' de görüldüğü gibi ısı pompasının kompresördeki basıncının artırılması kondensere atılan ısı enerjisi miktarını artırırken aynı zamanda kondenserin ekserji yıkımını da arttırmaktadır. Bundan dolayı ekserji yıkımının artması ekserji verimini azaltacağından kondenserdeki ekserji verimi de kompresör basıncının artmasıyla azalmıştır.

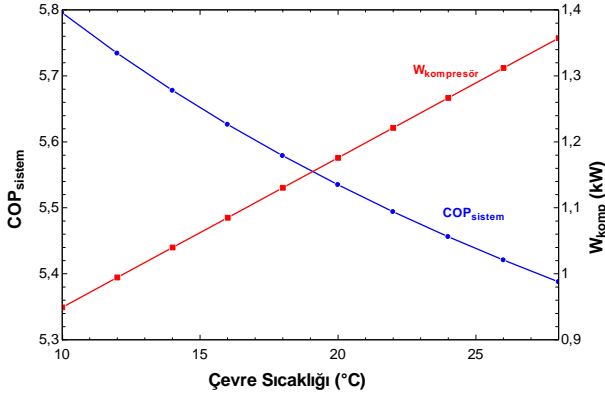
Kompresör basıncının değişiminin ısı pompasının COP' sine etkisi ve kompresörün çektiği güce etkisi Şekil 18' de aşağıdaki gibi verilmiştir.

Şekil 18' de ısı pompasının kompresör basıncının artırılması için daha fazla iş verilmesi gerektiği görülmektedir. Ayrıca yine Şekil 18' de ısı pompasının COP değişiminin kompresör basıncının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kompresör basıncının 2500 kPa ile 3500 kPa arasında değişiminin, ısı pompasının kompresörünün çektiği elektrik enerjisine 0.5 kW daha fazla yük çekmesine sebep olmuştur.



Şekil 18. Kompresör basıncının değişiminin COP ve harcanan işe etkisi

Isı pompası sisteminin çalıştığı dış ortam sıcaklığının değişiminin sistemin COP'sine etkisi ve kompresörün çalıştırılması için verilmesi gereken işe etkisi Şekil 19' da verilmiştir.



Şekil 19. Çevre sıcaklığının COP ve kompresör işine etkisi

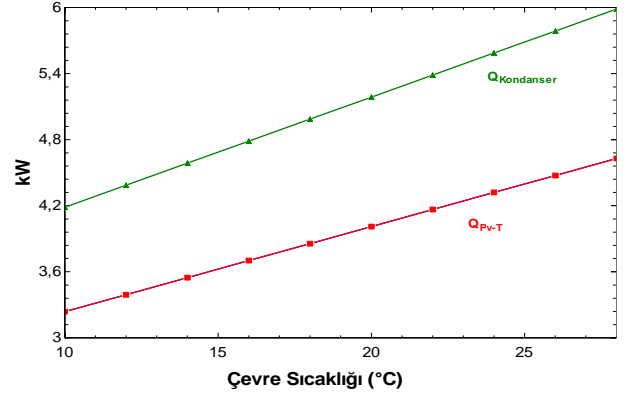
Şekil 19' da görüldüğü gibi çevre sıcaklığının artması sistemin COP değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Çevre sıcaklığının artması kompresör emişindeki havanın enerjisini arttıracığından dolayı aynı şartlarda çalıştırılan havanın kompresörde sıkıştırılması zorlaşacağından Şekil 19' da görüldüğü gibi hava sıcaklığının artması kompresörde harcanan işin artacağını ifade etmektedir. Çevre sıcaklığının artırılması, sistemin COP değerinin 5.8' den 5.35'e düşmesine sebep olmuştur.

Dış ortam sıcaklığının artması PV-T' den gelen ısıl enerjinin artmasına ve bu ısının ısı pompasına aktarıldıktan sonra kondensere atılmasının, çevre havası sıcaklığına bağlı değişim grafiği Şekil 21.' de verilmiştir.

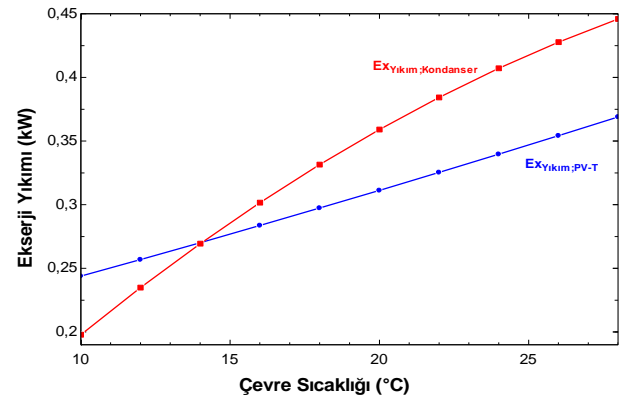
Şekil 20' de görüldüğü gibi çevre sıcaklığının artması PV-T' den gelen ısıl enerjisinin artmasına sebep olduğu görülmektedir. Isı pompasına destek olarak sağlanan bu PV-T kollektörden gelen ısıl enerjisi kondensere atılacağı için doğal olarak kondenser de ısıl enerjisinde artışa sebep olacaktır. Çevre sıcaklığının artması kondensere atılan ısısında artmasına sebep olmaktadır.

Dış ortam sıcaklığının artması PV-T arka yüzeyinde ve PV-T içerisinde dolaştırılan, ısı pompası kaynağına destek amaçlı kullanılan dolaşım suyunun sıcaklığı

arttıracığından dolayı PV-T deki ekserji yıkımı artmaktadır. Bu artış Şekil 21' de görülmektedir.



Şekil 20. Çevre sıcaklığının PV-T ve kondenser enerjisine etkisi



Şekil 21. Çevre sıcaklığının kondenser ve PV-T' nin ekserji yıkımına etkisi

Şekil 21' de görüldüğü gibi çevre sıcaklığının artması kondensere gelen ısıl yükü arttıracığından dolayı, çevre sıcaklığının artması kondensere ekserji yıkımının artmasına da sebep olacaktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada toprak kaynaklı ısı pompasına destek amaçlı 72 hücreli, tek kristal silisyum modül hücre paneline sahip 190W nominal güç üreten bir PV-T kollektör hesaplama için kullanılmıştır. PV-T kollektör yüzeyinden alınan ısı, ısı pompasına girdi olarak verilmiş ve aynı zamanda ısı pompası sisteminin çalışması için gerekli olan iş fotovoltaj kollektörden sağlanmıştır. Jeolojik yapının el vermediği ve elektrik hatlarının ulaştırılmadığı bölgelerde tasarlanması için bu sistem ele alınmıştır.

PV-T destekli ısı pompası sistemindeki her bir eleman için enerji ve ekserji analizleri EES (Engineering Equation Solver) programı yardımıyla yapılmıştır. Isı pompasının çalıştırılması için gerekli elektriksel güç 9 adet PV-T kollektörden sağlanmıştır. Ayrıca ısı pompası için gerekli olan ısıl enerjide bu 9 adet PV-T kollektörü yüzeyinden su ile dolaşım sağlanarak ısı pompasına aktarılması gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PV-T hibrit sistemde toplam elektriksel güç 1422 W, toplam alınan ısıl güçte 4397 W'dır.

PV-T kollektörün ısı verimi 49.7, elektrik verimi 15.2 olarak hesaplanmıştır. PV-T kaynaklı ısı pompası sistemine kollektörlerin dahil edilmeden önceki verim değerine, uygulandıktan sonraki verim değerine katkısı % 67.9 olarak görülmüştür. Işınım şiddeti arttıkça toplam elektriksel gücün ve toplam alınan ısı gücün arttığı görülmüştür. Ayrıca ortam sıcaklığına göre elektriksel verim ve ısı veriminin değişimi incelenmiş ortam sıcaklığı arttıkça elektriksel verimin düştüğü, ısı veriminin arttığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada ısı pompası sisteminin COP si 4.41 olarak hesaplanmıştır. En yüksek ekserji yıkımının kondenserde olduğu görülmüştür. Isıtma amaçlı yapılan PV-T destekli ısı pompası sisteminde ısı güç olarak toplam 4686 W radyatör ısı gücü alınmıştır. Ayrıca, literatürde belirtilen benzer çalışmalarla ilgili karşılaştırmalarda, ortak ve yakın değerler yapılan analizlerde görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] M. Ö. Ültanır, 21. Yüzyılım eşiğinde güneş enerjisi. Bilim ve Teknik, 340, 50-55, 1996
- [2] Z. Şen, Temiz Enerji ve Kaynakları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2002
- [3] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş enerjisi ve teknolojileri, www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- [4] J. Yao, H. Xu, Y. Dai and M. Huang, Performance analysis of solar assisted heat pump coupled with build in PCM heat storage based on PV/T panel. Solar Energy, 197, 279-291, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.002>
- [5] A. N. Ozakin, K. Yakut and M. N. Khalaji, Performance analysis of photovoltaic-heat pump (PV/T) combined systems: A comparative numerical study. Journal of Solar Energy Engineering, 142, 2, 021010, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4045313>
- [6] J. Ji, H. He, T. Chow, G. Pei, G. He, W. He and K. Liu, Distributed dynamic modelling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 1365-1373, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.017>
- [7] J. Ji, K. Liu, T. Chow, G. Pei, W. He and H. He, Performance analysis of a photovoltaic heat pump Applied Energy, 85, 680-693, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.01.003>
- [8] J. Ji, K. Liu, T. Chow, G. Pei and H. He, Thermal analysis of PV/T evaporator of a solar-assisted heat pump. International Journal of Energy Research, 31, 525-545, 2007. <https://doi.org/10.1002/er.1264>
- [9] H. D. Fu, G. Pei, J. Ji, H. Long, T. Zhang and T. T. Chow, Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat pump/heat-pipe system. Applied Thermal Engineering, 40, 343-350, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.036>

- [10] R. Daghigh, M. H. Ruslan and K. Sopian, Advances in liquid based photovoltaic/thermal(PV/T) collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15, 4156-4170, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.028>
- [11] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik and S. K. Tyagi, Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 1383-1398, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.013>
- [12] P. Zhang, X. Rong, X. Yang and D. Zhang, Design and performance simulation of a novel hybrid PV/T-air dual source heat pump system based on a three-fluid heat exchanger. Solar Energy, 191, 505-517, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.024>
- [13] N. Shao, L. Ma and J. Zhang, Experimental investigation on the performance of direct-expansion roof-PV/T heat pump system. Energy, 195, 116959, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116959>
- [14] J. Zhou, Z. Zhu, X. Zhao, Y. Yuan, Y. Fan and S. Myers, Theoretical and experimental study of a novel solar indirect-expansion heat pump system employing mini channel PV/T and thermal panels. Renewable Energy, 151, 674-686, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.054>
- [15] J. Zhou, X. Ma, X. Zhao, Y. Yuan, M. Yu and J. Li, Numerical simulation and experimental validation of a micro-channel PV/T modules based direct-expansion solar heat pump system. Renewable Energy, 145, 1992-2004, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.049>
- [16] A. A. Ammar, K. Sopian, M. A. Alghoul, B. Elhub and A. M. Elbreki, Performance study on photovoltaic/thermal solar-assisted heat pump system. Journal Thermal and Calorimetry, 136, 79-87, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7741-6>
- [17] B. Evangelos and T. Christos, Multi-objective optimization of a solar assisted heat pump-driven by hybrid PV. Applied Thermal Engineering, 149, 528-535, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.059>
- [18] N. F. N. Razali, A. Fudholi, M. H. Ruslan and K. Sopian, Experiment study of water based photovoltaic-thermal (PV/T) collector. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(1), 118-125, 2019. <http://doi.org/10.11591/ijece.v9i1.pp118-125>
- [19] S. C. Joe, Performance of a concentrating photovoltaic / thermal solar collector. Solar Energy, 78(2), 211-222, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.014>
- [20] Ö. Yamaç, Güneş enerjili destekli ısı pompalarının teorik incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, Türkiye, 2005.
- [21] F. Duran, PV/T Hibrit sistemlerin termodinamik ve performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2014.
- [22] A. Fudholi, K. Sopian, M. Yazdı, I. Ruslan and H. Kazem, Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. Energy Conversion and

- Management, 78, 641-651, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.017>
- [23] F. Benli, Fotovoltaik (PV) ve Fotovoltaik Termal (PV-T) kolektörlerinin deneysel olarak karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye, 2018.
- [24] M. Caner, Yatay tüp topraklı ısı pompası sisteminin Sivas şartlarında değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Türkiye, 2018.
- [25] M. Al-Khalıdı, Toprak kaynaklı ısı pompası ile Isparta şartlarında bir ısıtma uygulaması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2018.
- [26] F. Horzum, Bir turizm tesisinde toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin termodinamik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2018.
- [27] I. Dincer and M. A. Rosen, Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Newnes, Oxford, UK, 2012.
- [28] A. Bejan, G. Tsatsaronis and M. J. Moran, Thermal Design and Optimization. John Wiley and Sons, 1996.
- [29] J. Szargut, D. R. Morris and F. R. Steward, Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Springer-Verlag, Berlin. 1987.
- [30] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process. A Wiley-Interscience Publication, New York 2006.
- [31] B. J. Huang, T. H. Lin, W. C. Hung and F. S. Sun, Performance evaluation of solar photovoltaic thermal systems. Solar Energy, 70(Feb), 443-448, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-092x\(00\)00153-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092x(00)00153-5)

