

Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump

Rıza BÜYÜKZEREN^{1,*}  Ali KAHRAMAN²  Mehmet Numan KAYA^{2,*}  Halil İbrahim DAĞ³ 

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, 42005, Meram/KONYA

²Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 42000, Meram/KONYA

³Solimpeks Energy Industry and Trade INC., 42050, Selçuklu/KONYA

Graphical/Tabular Abstract

In this study, domestic hot water system with an air source heat pump system model in TRNSYS was validated by experimental data.

Article Info:

Research article
Received: 27.10.2021
Revision: 18.11.2021
Accepted: 23.11.2021

Highlights

- Air source heat pump model validation
- Domestic hot water system

Keywords

Air Source Heat Pump
TRNSYS
Renewable Energy
COP
Model Validation

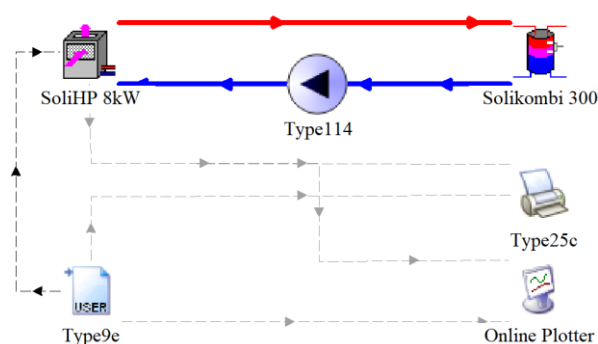


Figure A. System Model

Purpose: Recently, there has been renewed interest in water heating with renewable sources due to high price of energy. Air source heat pump is one of the way to heat water with supporting of the renewable energy such as solar. Some analysis programs and tools have been developed to identify potential of heat pumps and other components. In this study, air source heat pump model for domestic hot water system was developed and validated with experimental works.

Theory and Methods: A system was established for experimental validation of solar assisted heat pumps and the same system was modelled in TRNSYS software to validate the system. The capacity of the heat pump is 8 kW and the volume of the water tank is 270 litres. The temperature of the test chamber was reduced from 15°C to 0°C. The tank water temperature is heated from 30°C to 50°C to meet the lowest temperature that can be encountered in domestic hot water systems.

Results: In this study, the average maximum percentage deviation was calculated as 3.5%, indicating that the deviation rate of the model is quite low. With solar collectors to be added to the system, it allows simulations of solar or renewable sources supported heat pumps with high accuracy rates.

Conclusion: The selected ambient temperature and the temperature range for water heating can be used in autumn and winter seasons for many regions in the temperate climate zone, and the model developed in the study is a guide for many future studies.



Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump

Rıza BÜYÜKZEREN^{1,*} Ali KAHRAMAN² Mehmet Numan KAYA^{2,*} Halil İbrahim DAĞ³

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 42005, Meram/KONYA

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42000, Meram/KONYA

³Solimpex Enerji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, 42050, Selçuklu/KONYA

Abstract

Meeting the DHW (domestic hot water) requirement and the energy used for DHW has an important share in the energy sector today. Air-source heat pumps, one of the systems used to meet this requirement, can also be supported by various renewable energy sources. In such hybrid systems, it is extremely important to model the system and validate this model, since the tests in laboratory conditions are quite difficult. In this study, a system was established for the experimental validation of air source heat pumps used to meet the domestic hot water demand, and the same system was modelled using TRNSYS software to validate the system. The developed model is capable of being supported by renewable energy sources and is a guide for such studies. The heat pump capacity used in the study is 8 kW, and the experimental tests were carried out for temperatures between 0°C and 15°C. In this study, domestic hot water was continuously heated through a tank and its temperature was increased from 30°C to 45°C. For air source heat pumps, a model with the highest average percentage deviation of 3.5% was developed and validated with experimental data. The model is designed to be supported by renewable energy sources, and it is a source study for such hybrid models.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27.10.2021
Düzeltilme: 18.11.2021
Kabul: 23.11.2021

Keywords

Air Source Heat Pump
TRNSYS
Renewable Energy
COP
Model Validation

Anahtar Kelimeler

Hava Kaynaklı Isı
Pompası
TRNSYS
Yenilenebilir Enerji
COP
Model Doğrulama

Hava Kaynaklı Bir Isı Pompası Modelinin Performans Parametrelerinin Deneysel Validasyonu

Öz

Evsel sıcak su ihtiyacının karşılanması ve bunun için kullanılan enerji, günümüzde enerji sektöründe önemli bir paya sahiptir. Bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan sistemlerden bir tanesi olan hava destekli ısı pompaları çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da desteklenebilmektedir. Bu tarz hibrit sistemlerde, laboratuvar şartlarında testler oldukça zor olduğu için sistemlerin modellenmesi ve bu modelin doğrulanmasının yapılması son derece önemlidir. Bu çalışmada, evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan hava kaynaklı ısı pompalarının deneysel doğrulanması için bir sistem kurulmuş ve sistemin doğrulanması için TRNSYS programında aynı sistem modellenmiştir. Geliştirilen model, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenebilecek nitelikte olup, bu tarz çalışmalar için bir rehberdir. Çalışmada kullanılan ısı pompası kapasitesi 8 kW olup, deneysel testler 0°C ila 15°C arasındaki sıcaklıklar için yapılmıştır. Çalışmada evsel sıcak su, bir tank aracılığıyla devamlı surette ısıtılmış ve sıcaklığı 30°C'den 45°C'ye kadar yükseltilmiştir. Hava kaynaklı ısı pompaları için, en yüksek %3,5 ortalama sapma yüzdesiyle bir modelleme yapılmış ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Model, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da desteklenebilecek şekilde tasarlanmış olup, bu tarz hibrit modeller için bir kaynak çalışma niteliğindedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçtiğimiz yüzyılda, enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan kömür, yağ ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımında önemli derecede bir artış görülmektedir. Günlük sıcak su ihtiyacının karşılanması ve bunun için kullanılan enerji, bahsedilen sektörde önemli bir hacme sahiptir. Günlük enerji ihtiyacının

büyük bir bölümünü endüstri ve insanların yaşam alanları olan binalardaki tüketimleri oluşturmaktadır. Binalardaki evsel sıcak su ihtiyacı için kullanılan enerji, binaların ısınması, havalandırılması ve aydınlatmasından sonra gelen dördüncü en yüksek enerji tüketim kalemidir.

Avrupa'da ısı üretiminin, önemli bir bölümü sera gazı salınımını arttıran fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Tersine Carnot çevrimini kullanan Isı Pompası cihazları, yenilenebilir enerji kaynaklarını da kullanarak karbon salınımını azaltmaya yardım eden, evsel ve ticari ısı ihtiyaçlarını karşılayabilen makinelerdir. Son yıllarda, hava, güneş, toprak gibi kombinasyonlarla kullanılan ısı pompalarının, ısıtma ve soğutmada kullanımının artmaya başladığı görülmektedir [1-3].

Isı pompası sistemlerinin modellenmesinde, doğrulama yapılması son derece önemlidir. Özellikle, ısı pompası sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklendiği durumların laboratuvar ortamında simülasyonu oldukça zordur. Örneğin güneş, toprak ve jeotermal gibi kaynaklarla desteklenen sistemlerde ciddi verim artışları gözlemlenir fakat deneysel olarak sistemin oluşturulması ve sonuçlarını almak oldukça fazla zaman alır. Bu durumu, doğrulanmış bir modelle aşmak hem zaman hem de ekonomik olarak tasarruf anlamına gelir. Konuyla ilgili literatürde yer alan başlıca ve güncel çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Janusevic ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [4], güneş destekli bir hava kaynaklı ısı pompasının doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada, yazılım olarak TRNSYS ve Matlab programları kullanılmıştır. Oluşturulan model ile alınan sonuçlar ve deneysel veriler karşılaştırıldığında %11'lik kabul edilebilir bir sapma ile karşılaşılmıştır. Calvo ve arkadaşları, toprak kaynaklı bir ısı pompasının deneysel doğrulamalı bir modelini oluşturmuşlardır [5]. Oluşturulan modelde, bir binanın iklimlendirilmesi belirtilen model ile yıllık bazda TRNSYS'de simüle edilmiştir. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları arasında %10-13 arasında değişen sapmalar tespit edilmiştir. Huang ve arkadaşlarının çalışmasında [6], direkt genleşmeli güneş destekli bir ısı pompasının nümerik bir modelinin deneysel doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada ısı pompası, kış şartlarında bir iklim için mahal ısıtmasında kullanılmıştır. Oluşturulan nümerik model, deneysel verilerle karşılaştırıldığında, RMSD değeri %6'dan daha düşük olarak hesaplanmıştır ve oldukça kabul edilebilir bir değerdir. Rasheed ve arkadaşlarının geliştirdikleri hava kaynaklı ısı pompası modeli [7], bir seranın ısıtılması için kullanılmıştır. Sistem modeli TRNSYS programında kurgulanmış olup, sistem sonuçları farklı parametrelerle doğrulanmış ve kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir.

Del Amo ve arkadaşlarının çalışmaları [8], deneysel doğrulama yöntemi ile bir ısı pompasının performans analizini içermektedir. Sistem, fotovoltaiik-termal kolektörlerle desteklenmiştir. Doğrulama için, yılın dört günü seçilmiş ve bu günlerde elde edilen deneysel sonuçlar ve TRNSYS'de oluşturulan modelin simülasyon sonuçları irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, modelin kabul edilebilir bir doğrulamaya sahip olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışma [9] Dannemand ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada sistem, camsız bir hibrit fotovoltaiik-termal güneş kolektöründen ve çift depolama tankıyla desteklenmiş bir ısı pompasından oluşmaktadır. Deneysel olarak ölçülen ve simülasyon ile hesaplanan değerler arasında %4'ün altında sapma miktarları bulunmaktadır. Korichi ve arkadaşlarının sunduğu çalışmada ise [10], dikey toprak kaynaklı bir ısı pompasının Saharan iklimindeki bir binanın soğutulması için termo-ekonomik modellenmesi ve optimizasyonu konu alınmıştır. Çalışmada sistemin performans analizi yapılmış olup, simülasyon ve deneysel verilerin doğrulanmasında en yüksek %4,9 hata yüzdesiyle karşılaşılmıştır ve modelin doğruluğu oldukça yüksektir.

Literatürde yer alan çalışmalarda görüldüğü üzere, ısı pompası modellemede yaygın olarak kullanılan ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, kabul edilebilir sapma miktarlarına sahip olan program TRNSYS'dir. Bu çalışmada, güneş destekli ısı pompalarının modellenmesine yardımcı olmak üzere, hava kaynaklı bir ısı pompası modelinin, deneysel verilerle yapılan doğrulaması ele alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

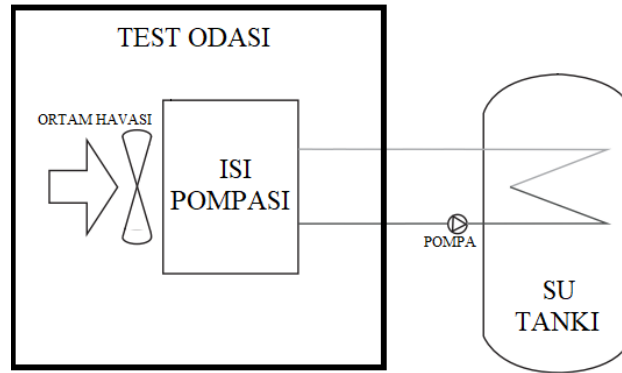
Isı pompaları ve güneş enerjisi sistemlerinin birlikte kullanılmalrı, günümüzde sıcak su elde etmek için kullanılan yaygın yöntemlerdendir. Bu metot ile çalışan sistemlerin temel problemi, kombine güneş enerjili sistemler için standart bir test metodunun olmayışdır. Diğer yandan, hem ısı pompası sistemleri için hem de güneş kolektörleri için birbirinden ayrı test standartları bulunmaktadır. Bu standartlar ele alındığında, ısı pompası standartları güneş kolektörlerini bileşen olarak kapsamamaktadır ve güneş kolektör standartları da

ısı pompalarını ek bir ısı kaynağı olarak içermemektedir. Güneş destekli ısı pompası sistemlerinin, bağımsız ısı pompası ve bağımsız güneş enerjisi ile su ısıtma sistemlerinden belli başlı farklılıkları vardır. Güneş destekli ısı pompası sistemleri, bağımsız su ısıtma sistemlerine göre daha karmaşıktır. Buna ek olarak, güneş destekli ısı pompası sistemleri ısı kaynağı olarak birden fazla kaynağı kullandığı için, daha karışık kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulur [11].

Güneş destekli ısı pompalarının testlerinin yapılabilmesi için iki ana yöntem önerilmektedir. Bunlardan birincisi, tüm sistem testi yöntemidir. Bu yöntemde, güneş kolektörleri, ısı pompası, borular, pompa gibi bileşenlerin tümü tek bir sistemmiş gibi düşünülür ve testler bu şekilde yapılır. İkinci yöntem ise, bileşen testi yöntemi olup, bu yöntemde ise, her bir bileşene ait testler birbirinden bağımsız yapılarak tüm sistem modellenir [12]. Eğer güneş destekli ısı pompasının, kolektörleri birden fazla ise ve kolektör montajı laboratuvar şartları için zor ise bu durumda; güneş kolektörleri haricindeki sistem bir bütün sistemmiş gibi düşünülerek, kolektörler model üzerinde sisteme dâhil edilir.

Bu çalışmada, güneş destekli ısı pompalarına yönelik deneysel doğrulama için bir sistem kurulmuş ve sistemin doğrulanması için TRNSYS programında aynı sistem modellenmiştir. Çalışma, yukarıda bahsedilen kolektör montajı zor olan güneş destekli ısı pompalarına yönelik yapılmıştır. Yani sistemde, kolektör haricindeki bütün bileşenler tek bir sistemmiş gibi düşünülmüştür.

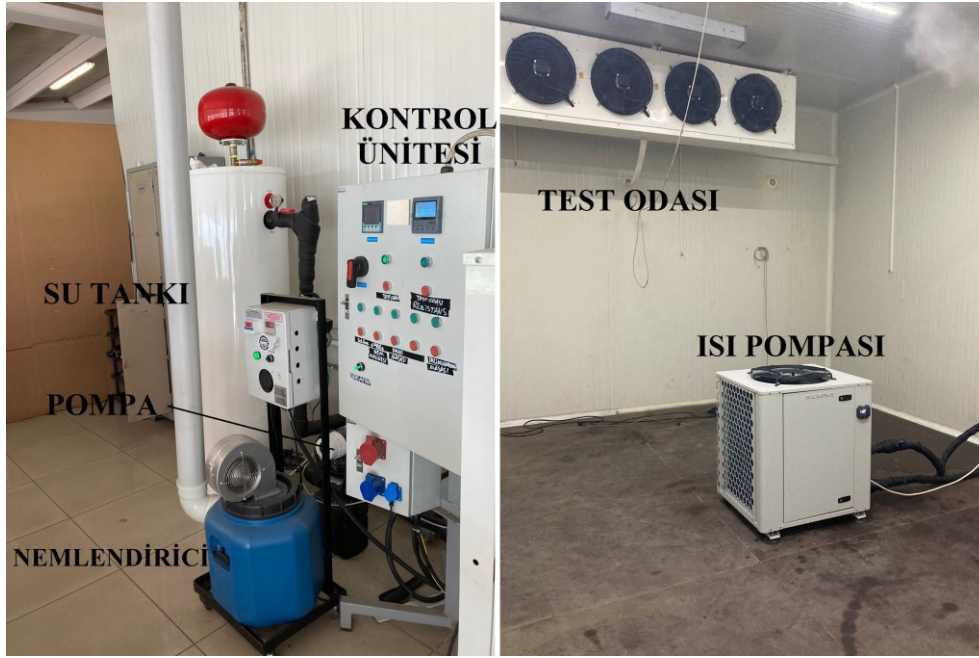
Çalışmada kullanılan deneysel sistem, sistem modeli ve performans doğrulama ayrı başlıklar altında aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel sistemin hidrolik şeması

2.1. Deneysel Sistem (Experimental System)

Deneysel sistem iklimlendirme odası, ısı pompası, su tankı ve pompadan oluşmaktadır ve sistemin hidrolik şeması Şekil 1’de verilmiştir. Kontrol ünitesi, bağlantı boruları, nemlendirici ve sıcaklık sensörleri gibi yardımcı elemanlar Şekil 2’de gösterilmiştir.

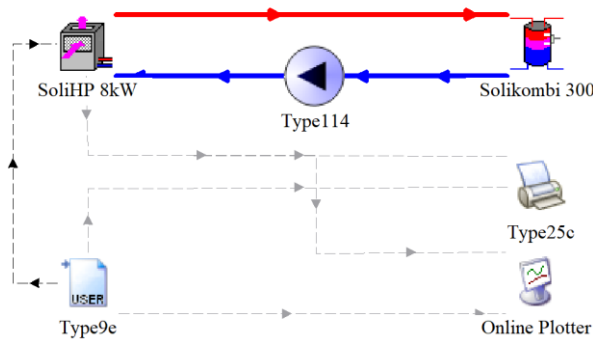


Şekil 2. Deneysel Sistem

Isı pompasının kapasitesi 8kW olup, bu değer standart şartlar olan ortam 7°C ve su 30°C'den 35°C'ye ısıtılırken geçerlidir. Su tankının hacmi 270 litre olup, iki farklı ısı kaynağından ve iki farklı ek ısıtıcı eklenebilecek şekilde tasarlanmıştır. Test odası -15°C ile 40°C arasında ve maksimum %5 nem oranı sapması ile ortamı iklimlendirebilmektedir. Testler boyunca ortam nemi %70-80 arasında sabit tutulmuştur. Sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı sensörlerin hassasiyeti 0,1'dir. Her bir test verisi 15sn aralıklarla alınmıştır. Performans doğrulama testleri için gerekli olan parametreler performans katsayısı ve dönüş suyu sıcaklığıdır. Performans katsayısı ısı pompası üzerinden, dönüş suyu sıcaklığı ise su tankı girişinden ölçülmüştür. Sisteme ait tüm borular cam yünü ile yalıtılmıştır.

2.2. Sistem Modeli (System Model)

Sistem modeli TRNSYS'de oluşturulmuştur ve Şekil 3'te verilmiştir. Kullanılan ısı pompası ve su tankının tüm parametreleri model üzerine girilmiştir. Su tankındaki sıcaklık, aşağıdan yukarıya doğru artış gösterir. Oluşturulan sistemde, pompa yardımı ile tankın aşağı kısmından su çekilmektedir ve ısı pompasına iletilmek üzere pompalanmaktadır. Isı pompası, ortamdaki havanın ısı ve kompresörün akışkana kazandırdığı enerjiyi de kullanarak akışkanın enerjisini yükseltmektedir.



Şekil 3. Sistem Modeli

Oluşturulan modelde kullanılan bileşenler Tablo 1’de verilmiştir. Isı pompası, nem etkisinin ihmal edildiği bir hava kaynaklı ısı pompasıdır. Ortam nemi sabit tutulduğu için modele de aynı değer tanımlanmıştır. Su tankı, bağımsız iki farklı ısıtıcı ve iki farklı ısı kaynağı da eklenebilen bir modeldir. Bu sayede istenilen kolektör tipi kolaylıkla sisteme eklenebilir. Seçilen hava verisi, deneysel şartların modele aktarılabilirdiği bir veri girişidir. Simülasyon şartları tanımlanırken, deneysel sistemde olduğu gibi modelde de 15 saniye veri aralığı seçilmiştir.

Tablo 1. Modelde kullanılan TRNSYS bileşenleri

Bileşen	Tip
Isı Pompası	Type941
Su Tankı	Type60c
Pompa	Type114
Hava Verisi	Type9e
Online Çizici	Type65d
Veri Çıktısı	Type25c

2.3. Performans Parametrelerinin Doğrulanması (Validation of Performance Parameters)

Sistem doğrulamasının ısı pompasının performans katsayısı ve tanka dönüş sıcaklığı üzerinden yapılacağı belirtilmişti. Hâlihazırda ısı pompasına ait performans katsayısının doğrulanması ile sisteme ait giren ısı, akışkana transfer edilen ısı, harcanan güç gibi birçok veri doğrulanmaktadır ve sistemin mevsimsel performans faktörü gibi tüm sistemle ilgili katsayıların doğru bir şekilde hesaplanmasının da önünü açmaktadır. Sistem dönüş sıcaklığının doğrulanması ise, su tankı içindeki sıcaklık dağılımının doğru bir şekilde sisteme tanımlandığının göstergesi niteliğindedir. Bu performans katsayılarını hesaplamak için, model tarafından kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcıdaki enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir [13].

$$\dot{q}_{yoğ} = \dot{q}_{buh} + \dot{p}_{komp} \quad 2.1$$

Havadaki nemin değişmediği kabul edildiğinden, buharlaştırıcıdan çıkan havanın entalpisi aşağıdaki gibi olur [13].

$$h_{hava,ç,ilk} = h_{hava,g} - \frac{\dot{q}_{buh}}{\dot{m}_{hava}} \quad 2.2$$

Buharlaştırıcıdaki fanın enerjisini de çıkan havanın entalpisine eklersek, havanın entalpisi aşağıdaki şekilde yazılabilir [13].

$$h_{hava,ç,ık} = h_{hava,ç,ık,ilk} + \frac{\dot{p}_{fan}}{\dot{m}_{hava}} \quad 2.3$$

Toplam enerji transferini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

$$\dot{q}_{top,hava} = \dot{m}_{hava}(h_{hava,ç,ık} - h_{hava,gir}) \quad 2.4$$

$$\dot{q}_{duy,hava} = \dot{m}_{hava}C_{p,hava}(T_{hava,ç} - h_{hava,g}) \quad 2.5$$

$$\dot{q}_{giz,hava} = \dot{q}_{top,hava} - \dot{q}_{duy,hava} \quad 2.6$$

$$\dot{q}_{sıvı,akışkan} = \dot{q}_{yoğ} \quad 2.7$$

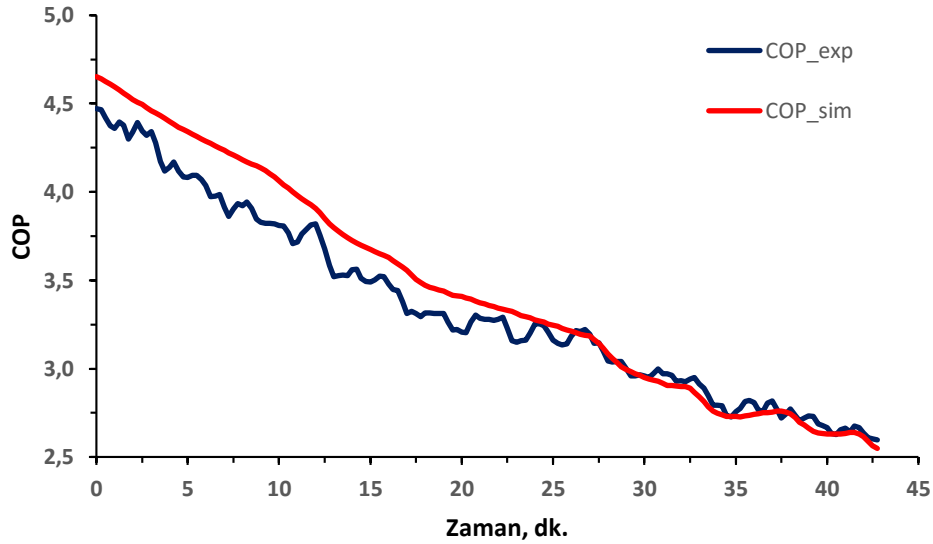
Isı pompasının ısıtma modu için performans katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir [14].

$$COP = \frac{\dot{q}_{yoğ}}{\dot{p}_{komp} + \dot{p}_{fan}} \quad 2.8$$

Performans katsayısını kısaca, sistemden elde etmek istediğimiz ısının sistemin harcadığı enerjiye oranı olarak tanımlayabiliriz. Soğutma sistemleri için ise, sistemin çekmesini amaçladığı ısı oranının sistemin harcadığı enerjiye oranı olarak tanımlanır.

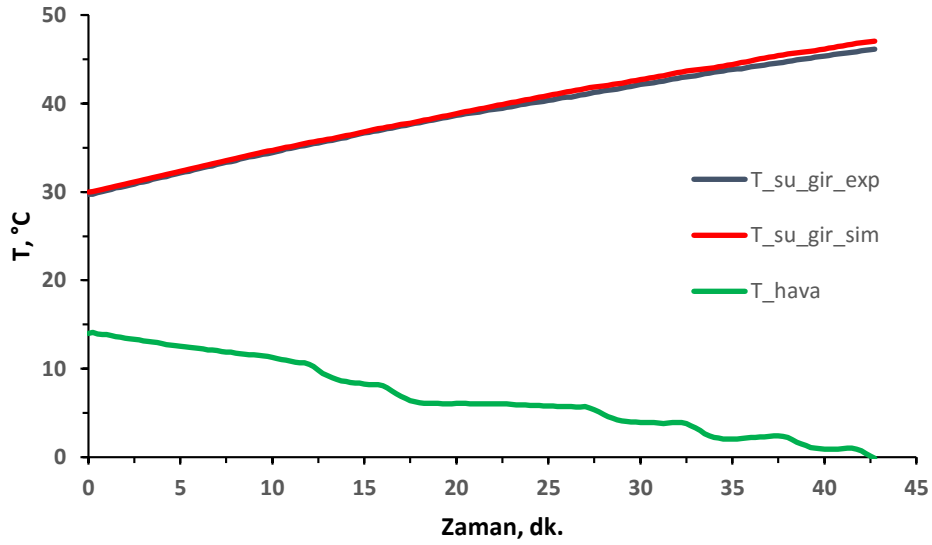
3. BULGULAR (RESULTS)

Test odasının sıcaklığı, ılıman iklim kuşağı için sonbahar ve kış mevsimlerindeki karşılaşılabilecek tüm sıcaklıkları simüle etmeye yönelik olarak 15°C'den başlatılarak, 0°C'ye kadar düşürülmüştür. Şekil 5'te hava sıcaklığının değişimi verilmiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere testler boyunca ortamdaki nem oranı, %70-80 arasında sabit tutulmuştur. Tank suyu sıcaklığı ise, evsel sıcak su sistemlerinde karşılaşılabilecek en düşük sıcaklığı karşılaması için 30°C'den 50°C'ye kadar ısıtılmıştır.



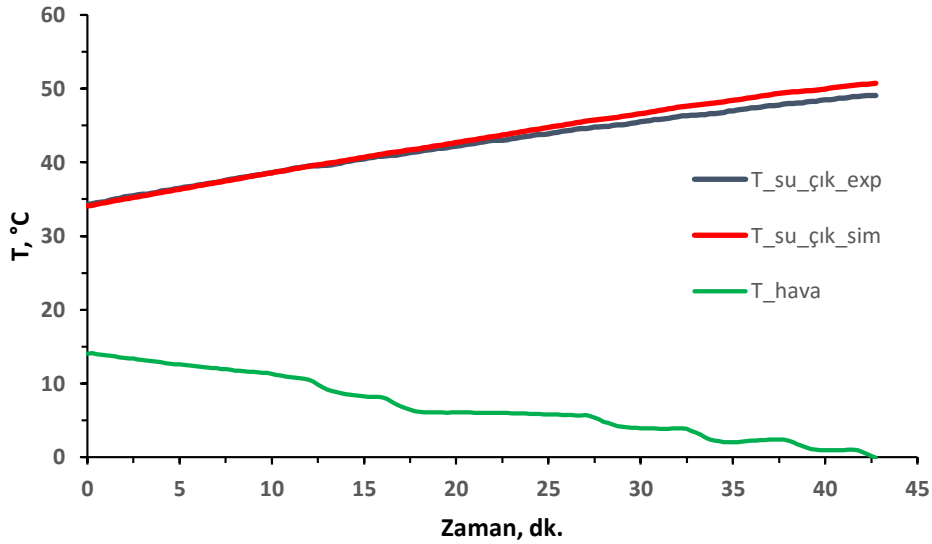
Şekil 4. COP_exp (deneysel) ve COP_sim (simülasyon) değerlerinin zaman göre değişimi

Deneysel toplamda 42 dk. sürmüş olup, 15'er sn. aralıklarla 172 veri alınmıştır. TRNSYS programında da aynı şekilde simüle edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere performans katsayısı, deneysel sonuçlarda 4,5'lerden başlayarak 2,5 değerine kadar düşmüştür. Simülasyonda da benzer sonuçların elde edildiği ve eğilimlerin benzerlikleri görülmektedir. Performans katsayısı için ortalama hata yüzdesi %3,5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. $T_{su_gir_exp}$ (deneysel) ve $T_{su_gir_sim}$ (simülasyon) su girişi, ve T_{hava} (ortam sıcaklığı) değerlerinin zamana göre değişimi

Isı pompasına giriş sıcaklıklarının deneysel ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında, benzer eğilimler gösterdiği Şekil 5'te görülmektedir. Sıcaklıklar ısı pompasına girmeden hemen önce ölçülmüştür ve sıcaklığın 30°C'den 45°C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Ortam hava sıcaklığı da 15°C'den 0°C'ye kadar düşürülmüştür ve bu değerler TRNSYS'e veri olarak girilmiştir. Isı pompası giriş sıcaklığı için ortalama hata yüzdesi %1,0 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. $T_{su_cik_exp}$ (deneysel) ve $T_{su_cik_sim}$ (simülasyon) su çıkışı, ve T_{hava} (ortam sıcaklığı) değerlerinin zamana göre değişimi

Isı pompasından çıkış sıcaklıklarının deneysel ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında, giriş sıcaklıklarında olduğu gibi benzer eğilimler gösterdiği Şekil 6'da görülmektedir. Sıcaklıklar ısı pompasından çıktıktan hemen sonra ölçülmüştür ve sıcaklığın 34°C'den 49°C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Ortam hava sıcaklığı da aynı şekilde simülasyon programına veri olarak girilmiştir. Isı pompası çıkış sıcaklığı için ortalama hata yüzdesi %1,5 olarak hesaplanmıştır.

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Yapılan bu çalışmada güneş destekli ısı pompalarının modellenmesine yardımcı olmak üzere, hava kaynaklı bir ısı pompası modelinin, deneysel verilerle yapılan doğrulaması ele alınmıştır. Çalışmada oldukça yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir. Çalışmanın giriş kısmında yer alan çalışmalar incelendiğinde, en yüksek oran %4,9 olarak görülmektedir. Bu çalışmadaki, ortalama en yüksek hata yüzdesi değeri ise %3,5 olarak hesaplanmıştır ve modelin sapma oranının oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Sisteme eklenecek güneş kolektörleriyle, güneş veya yenilenebilir kaynaklarla destekli ısı pompalarının simülasyonlarının yüksek doğruluk oranlarıyla yapılmasına fırsat verir.

Isı pompalarının ısıtma performans katsayısının, ortam hava sıcaklığı ile doğru orantılı, ısıtılan suyun sıcaklığı ile ters orantılı olması beklenir [14]. Çalışma, bu kapsamda değerlendirildiğinde performans katsayısı ve ilgili değerler tutarlılık göstermektedir.

Literatürdeki deneysel çalışmalarda veriler en düşük 1 dk. aralıklarla kaydedilmiştir. Bu çalışmada deneysel sonuçlar 15 sn. aralıklarla kaydedilmiştir ve bu da çalışmanın doğruluğuna olumlu yönde katkı yapmaktadır. Hata oranının belirgin şekilde düşük olmasının bir başka sebebi ise, sistemde yer alan boruların iyi bir şekilde yalıtılmış olmasıdır. Sıcaklık sensörlerinin de, deneylerden hemen önce kalibre edilmiş olması sonuçları olumlu etkilemiştir. Kayıpların daha fazla olması ve 1 dk. veri aralığı ile deneyler yapılıyor olsaydı, %5-8 arası bir hata payı ile karşılaşılabilirdi.

Seçilen hava sıcaklık aralığı ve suyun ısıtılmasındaki sıcaklık aralığı ılıman iklim kuşağındaki birçok bölge için sonbahar ve kış mevsimlerinde kullanılacak aralıklar olup, çalışmada geliştirilen model gelecekte yapılacak birçok çalışma için rehber niteliğindedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Geliştirilen model ile COP (performans katsayısı), T_{su_gir} (ısı pompası su giriş sıcaklığı) ve $T_{su_çık}$ (ısı pompası su çıkış sıcaklığı) değerleri sırasıyla %3,5, %1,0 ve %1,5 ortalama hata oranlarıyla ve 172 veri ile doğrulanmıştır.
- Deneysel çalışmalar için ortam sıcaklığı 0 ile 15°C arasında, ısıtma suyu sıcaklığı ise 30°C ile 45°C arasında yapılmıştır. Model, ılıman iklim kuşağında yer alan birçok bölgede sonbahar ve kış mevsimleri için kullanılacak niteliktedir.
- Model, 15 sn. aralıklarla doğrulandığı için oldukça hassas bir doğrulamaya sahiptir.
- Hava kaynaklı ısı pompaları için, en yüksek %3,5 ortalama sapma yüzdesiyle bir model oluşturulmuş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışmanın özgünlüğü, yüksek doğrulama oranı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenebilecek nitelikte olmasıdır. Bu tarz çalışmalar için bir rehberdir. Örneğin sistem hem jeotermal, hem de güneşle aynı anda desteklenebilecek şekilde tasarlanmıştır.
- Gelecekte, testlerin yapıldığı sıcaklık aralığı genişletilerek ısı pompasının daha geniş ölçekte çalışan bir modeli oluşturulabilir. Ayrıca, modele farklı tipte güneş kolektörleri eklenerek, ısıtma suyu için fotovoltaik ve termal güneş panelleri için bir optimizasyon çalışması yapılması önerilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Solimpeks Enerji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, ilk yazarın doktora çalışmasının bir bölümünden oluşmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, B. Cai, ve J. Huang, “Experimental research of an air-source heat pump water heater using water- PCM for heat storage”, *Appl. Energy*, c. 206, sayı January, ss. 784–792, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.209.
- [2] M. S. Buker ve S. B. Riffat, “Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications : A systematic review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 55, ss. 399–413, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.157.
- [3] S. Poppi, N. Sommerfeldt, C. Bales, H. Madani, ve P. Lundqvist, “Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 81, sayı July 2017, ss. 22–32, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.041.
- [4] V. M. Karolis Janusevicius, Giedre Streckiene, Juozas Bielskus, “Validation of unglazed transpired solar collector assisted air source heat pump simulation model”, c. 95, ss. 167–174, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.039.
- [5] F. Ruiz-calvo, C. Montagud, ve A. Cazorla-mar, “Development and Experimental Validation of a TRNSYS Dynamic Tool for Design and Energy Optimization of Ground Source Heat Pump Systems”, *Energies*, 2017, doi: 10.3390/en10101510.
- [6] W. Huang, T. Zhang, J. Ji, ve N. Xu, “Numerical study and experimental validation of a direct-expansion solar-assisted heat pump for space heating under frosting conditions”, *Energy Build.*, c. 185, ss. 224–238, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.12.033.
- [7] A. Rasheed, W. H. Na, J. W. Lee, H. T. Kim, ve H. W. Lee, “Development and validation of air-to- water heat pump model for greenhouse heating”, *Energies*, c. 14, sayı 15, ss. 1–22, 2021, doi: 10.3390/en14154714.
- [8] A. Del Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, ve M. Cañada, “Performance analysis and experimental validation of a solar-assisted heat pump fed by photovoltaic-thermal collectors”, *Energy*, c. 169, ss. 1214–1223, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.117.
- [9] M. Dannemand, I. Sifnaios, Z. Tian, ve S. Furbo, “Simulation and optimization of a hybrid unglazed solar photovoltaic-thermal collector and heat pump system with two storage tanks”, *Energy Convers. Manag.*, c. 206, sayı October 2019, s. 112429, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112429.
- [10] S. Korichi, B. Bouchekima, N. Naili, ve M. Azzouzi, “Performance analysis of horizontal ground source heat pump for building cooling in arid Saharan climate: thermal-economic modeling and optimization on TRNSYS”, *Renew. Energy Environ. Sustain.*, c. 6, s. 1, 2021, doi: 10.1051/rees/2020008.
- [11] I. Malenković, P. Pärish, J. B. Sara Eicher, ve M. Hartl, “Definition of Main System Boundaries and Performance Figures for Reporting on SHP Systems”, *IEA SHC Task 44 - Subtask B*, sayı Aralık, ss. 1–26, 2012.
- [12] M. Y. Haller *vd.*, “Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art”, *Energy Build.*, c. 66, ss. 667–677, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.052.
- [13] TESS, “TESSLibs 17 Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment”, 2014.
- [14] M. Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, *Thermodynamics_ an Engineering Approach. Ninth Edition.2019.* 2019.