



---

**Makale/Research Paper**

---

**Hava, Su ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Farklı Soğutucu Akışkanlar için Enerji ve Ekserji Analizi**

**Kemal BİLEN<sup>1a</sup>, Ozan DEMİR<sup>1b\*</sup>**

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye  
[ozan\\_6706@hotmail.com](mailto:ozan_6706@hotmail.com)

**Received/Geliş:** 21.01.2021

**Accepted/Kabul:** 14.03.2021

**Öz:** Bu teorik çalışmada; Ankara ilinin Gölbaşı ilçesinde konut ısıtması için kullanılacak hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Gölbaşı ilçesinde son on yıl içerisinde görülmüş olan en düşük hava ve toprak sıcaklığı Meteoroloji Genel Müdürlüğünden, son on yıl içerisinde görülmüş olan en düşük su sıcaklığı (Mogan Gölünde görülmüş olan en düşük sıcaklık) ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Isı pompası çevriminde iş akışkanı olarak R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanları seçilmiştir. Çalışmada; ısıtılacak ortam sıcaklığı, her bir ısı pompası için aynı seçilerek Gölbaşı şartlarında her bir ısı pompasının ısıtma tesir katsayısı ( $ITK \equiv COP$ ) ve ekserji verimi ( $\eta_{II}$ ) hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre; bu çalışmada iş akışkanı olarak kullanılan tüm soğutucu akışkanlar için Gölbaşı şartlarında, toprak kaynaklı ısı pompasının, hava ve su kaynaklı ısı pompalarına göre daha iyi bir ITK değerine sahip olduğu görülmüştür. Diğer taraftan hava kaynaklı ısı pompasının su ve toprak kaynaklı ısı pompalarına göre daha iyi bir  $\eta_{II}$  değerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca; tüm ısı pompası türleri için, R600a soğutucu akışkanının bu çalışmada kullanılan diğer soğutucu akışkanlara göre daha iyi bir performans sağladığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Isı pompası, IP, ITK, R1234yf, Ekserji analizi.

---

**Energy and Exergy Analysis of Air, Water and Ground Source Heat Pumps for Different Refrigerants**

**Abstract:** In this theoretical study, energy and exergy analysis of the air, water and ground source heat pumps used for residential heating in Gölbaşı district of Ankara were carried out. The lowest air and soil temperatures seen in the last ten years in the Gölbaşı district were provided from the Turkish State Meteorological Service and the lowest water temperature (the lowest temperature seen in Mogan Lake) seen in the last ten years was provided from General Directorate of State Hydraulic Works. In the heat pump cycle, R134a, R407a, R410a, R600a, and R1234yf refrigerants were chosen as the working fluid. In the study, the coefficient of performance (COP) and exergy efficiency ( $\eta_{II}$ ) of each heat pump were calculated and compared at Gölbaşı conditions by selecting the same ambient temperature for the residence to be heated for each heat pump. According to this, it was concluded that the ground source heat pump has a better COP value than the air and water source heat pumps and air source heat pump has a better  $\eta_{II}$  value than the water and ground source heat pumps for all refrigerants used as working fluid in this study at Gölbaşı conditions. In addition, it was observed that R600a refrigerant has a better performance than the other refrigerants for all type heat pumps.

**Keywords:** Heat pump, HP, COP, R1234yf, Exergy analysis.

---

*Bu makaleye atf yapmak için*

Bilen, K., Demir, O., "Hava, Su ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Farklı Soğutucu Akışkanlar için Enerji ve Ekserji Analizi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2021, 8 (2); 688-705.

*How to cite this article*

Bilen, K., Demir, O., "Energy and Exergy Analysis of Air, Water and Ground Source Heat Pumps for Different Refrigerants" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 688-705.

ORCID ID: <sup>a</sup>0000-0003-1775-7977; <sup>b</sup>0000-0001-5624-9559

## 1. Giriş

Dünya nüfusunun artmasının doğal bir neticesi olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Günümüzde enerji kaynağı olarak genellikle petrol, doğal gaz ve kömür kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalara göre; petrol, doğalgaz ve kömür rezervlerinin yakın bir gelecekte tükeneceği tahmin edilmektedir. Bu nedenle, dünya genelindeki enerji ihtiyacını karşılamak için yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı kaçınılmaz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece; bu konuyla ilgili, yani, alternatif enerji kaynakları alanında birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalar genel olarak; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi enerji çeşitleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu alternatif enerji kaynaklarından yararlanabilmek için ise, sırasıyla; güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, bölgesel jeotermal ısıtma sistemleri, dalga jeneratörleri ve biyogaz üreteçleri geliştirilmektedir. Bu enerji dönüşüm sistemlerinin yanı sıra ısı pompaları; düşük enerji tüketimi, yüksek performans katsayısı ve çevre dostu olmaları gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir.

Isı pompaları; hava, su ve toprak gibi enerji kaynaklarından yararlanan, ısıtma ve/veya soğutma amacıyla kullanılabilen makinelerdir. Toprak ve su kaynaklı ısı pompası, kışın yeryüzünün altında depolanmış ısıyı binaya, yazın ise bina içindeki ısıyı yeraltına taşır. Özetle yerin altı; kışın bir ısı kaynağı, yazın ise bir ısı kuyusu olarak davranır. Benzer durum, hava için de geçerlidir. Yani atmosfer, kışın bir ısı kaynağı, yazın ise bir ısı kuyusu gibi davranır. Isı pompası sisteminin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için bu kaynak veya kuyunun sıcaklığı, zamanla fazla değişmemelidir. Bunun yanı sıra bu kaynaklar, bol bulunabilir ve temiz olmalıdır. Dünyada ve ülkemizde ısı pompası kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Isı pompasının kullanıldığı ortamın coğrafi şartları, ısı pompasının etkinliği açısından oldukça önemlidir. Bu etkinlik ayrıca, ısı pompasının kullandığı kaynağa göre de değişim göstermektedir. Yani ısı pompasının etkinliği, ısı pompasının; hava, su veya toprak kaynaklı olmasına göre de değişim göstermektedir. Kullanılabilecek ısı kaynakları arasında yer alan hava, kolay elde edilebildiğinden dolayı en çok tercih edilen ısı kaynağıdır. Su, elde edilebildiği ortamlarda ısı kaynağı olarak kullanılabilir ve suyun havaya göre bazı üstünlükleri vardır. Toprak kaynaklı ısı pompaları ise günümüzde çok önemli projelerin konusudur ve Avrupa'da birçok toprak kaynaklı ısı pompası projesi gerçekleştirilmektedir [1]. Aynı iklim şartlarında toprak kaynaklı ısı pompaları, hava kaynaklı ısı pompalarına göre daha yüksek etkinlik değerlerine sahiptir [2]. Bunun nedeni; toprak sıcaklığının, hava sıcaklığına göre daha az değişkenlik göstermesidir. Kış aylarında hava sıcaklığının çok değişken ve genel olarak düşük seviyelerde olması, hava kaynaklı ısı pompalarının etkinliğini azaltmakta ve böylece enerji sarfiyatını artırmaktadır. Buna karşılık, yıl boyunca yer altının belirli derinliklerindeki toprak sıcaklığı ve yine belirli derinliklerindeki su sıcaklığı, fazla değişkenlik göstermemekte olup hava sıcaklığına göre daha yüksek değerlere sahiptir. Bununla birlikte; suyun her yerde bulunmaması ve toprak kaynaklı ısı pompalarının daha kolay kurulabilmeleri, toprak kaynaklı ısı pompalarının, su kaynaklı ısı pompalarına nazaran daha fazla tercih edilmelerine yol açmaktadır.

### 1.1. Literatür Özeti

Geçmişten günümüze kadar yapılan akademik çalışmalarda en çok incelenen ısı pompası türü, toprak kaynaklı ısı pompası olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna göre; Demir [2] tarafından yapılan sayısal ve deneysel bir çalışmada; toprak kaynaklı ısı pompası ve toprak ısı değiştiricilerinin optimizasyonu ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Alkan [3] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada ise; Isparta ili şartlarında konut ısıtması için toprak kaynaklı ısı pompasının, R22, R404A, R410A, R134a, R290 ve R600a gibi alternatif soğutucu akışkanlar kullanılarak termodinamik ve termoeconomik yönden incelemesi yapılmıştır. Elbir [4] tarafından yapılan teorik bir çalışmada ise, Göller Bölgesi (Antalya, Burdur ve Isparta yöresi) için toprak kaynaklı ısı pompasının ekserji analizi yapılmıştır. Emmi vd. [5] tarafından yapılan teorik bir çalışmada ise, soğuk iklimlerde toprak kaynaklı ısı pompasının güneş enerjisiyle desteklenmesi incelenmiştir.

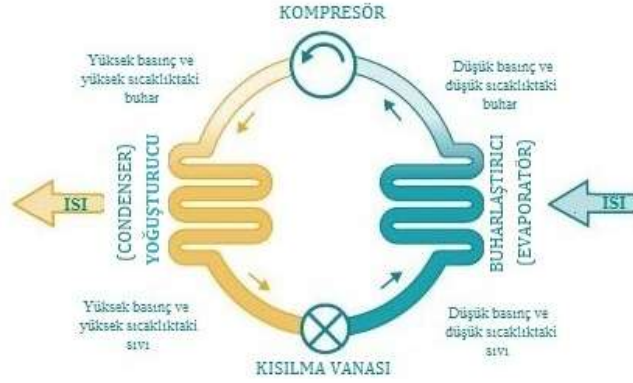
Sagia ve Rakopoulos [6] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada, toprak kaynaklı ısı pompası için alternatif soğutucu akışkanlar incelenmiştir. Menberg vd. [7] tarafından yapılan bir başka teorik çalışmada, ısıtma kazanı destekli ve toprak kaynaklı hibrit ısı pompasının ekserji analizi yapılmıştır. Al-Khalidi [8] tarafından yapılan bir çalışmada, ısıtma için çalışan farklı debilere sahip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin ısıtma performansı teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Toksöz vd. [9] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminin kış durumu için ekserji analizi yapılarak ekserji kayıpları belirlenmiştir. Wu ve Skye [10] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada ise; toprak kaynaklı ısı pompası için CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, su ve hidrokarbonlar gibi doğal soğutucu akışkanların etkisi incelenmiştir. Literatürde, hava veya su kaynaklı ısı pompalarına ilişkin çalışmalara da rastlanmaktadır. Buna göre; Wang vd. [11] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; R22, R134a ve R407C soğutucu akışkanlarının, hava kaynaklı ısı pompasının performansına etkisi incelenmiştir. Liu vd. [12] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada; hava kaynaklı ısı pompasında CO<sub>2</sub> kullanılarak, Çin'deki bir konutun ısıtılmasının enerji ve maliyet analizi yapılmıştır. Fei ve Pingfang [13] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada ise, yeraltı suyu kaynaklı ısı pompasında R22 soğutucu akışkanı kullanılarak ısıtma ve soğutma için enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Saçkan [14] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada ise, bir otelde bulunan deniz suyu kaynaklı ısı pompası sistemi incelenmiştir. Kaynaklarda; hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarına yönelik çalışmaların yanı sıra, bunların dışında bir ısı kaynağını kullanan veya ısı kaynağı belirtilmeden de yapılan çalışmalara da rastlamak mümkündür. Bu kapsamda; Chata vd. [15] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, doğrudan genleşmeli ve güneş enerjisi destekli bir ısı pompasının ısıl performansı; R12, R22, R134a, R404A, R407C ve R410A soğutucu akışkanları için analiz edilmiştir. Afshari vd. [16] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada ise; R22, R134a, R404A ve R407C soğutucu akışkanları kullanılarak, ısı pompaları ve soğutma makineleri arasındaki farklılıklar termodinamik açıdan incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür araştırmasından da anlaşılacağı üzere; literatürde yer alan çalışmaların birçoğunda, ısı pompası türlerinden sadece bir tanesi seçilmiştir. Bu teorik çalışmada ise; R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanları için, hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının, aynı şartlarda enerji analizi ve ekserji analizi yapılarak bir karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Böylece bu çalışmada; ısı kaynağı seçiminin coğrafi şartlara göre yapılmasının, ısı pompasının etkinliği açısından önemli olduğunu göstermek, Ankara ili için uygun ısı pompası kaynağını tespit etmek ve R1234yf soğutucu akışkanının ısı pompalarında kullanılabilirliğini araştırmak amaçlanmıştır.

## 1.2. Isı Pompası

Isı pompası; ısı enerjisini, düşük sıcaklıktaki bir ortamdan, daha yüksek sıcaklıktaki bir başka ortama taşıyan ve elektrikle beslenen bir makinedir. Bilindiği üzere, enerji vardan yok, yoktan var edilemez, sadece ya biçim değiştirir ya da bir yerden başka bir yere taşınır. Isı pompası da adını, ısı enerjisini bir ortamdan başka bir ortama pompalama ya da taşıma yeteneğinden alır. İlk ısı pompası uygulaması, 1927 yılında İskoçya'da bir evin ısıtılması amacıyla yapılmıştır. Bu uygulamada ısı kaynağı olarak hava kullanılmıştır. Avrupa'dan sonra Amerika'da da kullanılmaya başlanan ısı pompaları, 1960 yılına kadar hızla yayılmıştır. 1963 yılında ise Güney Amerika'da kullanılmaya başlanan ısı pompaları, soğuk bölgelerde kullanıldığında bazı problemler ortaya çıkmıştır. Bu durum, ısı pompası sistemlerinin güvenilirliğinin azalmasına neden olmuştur. 1973 yılında ısı pompası endüstrisinde büyük bir iyileşme olmuş ve ısı pompasına ilgi tekrar artmıştır. Amerika, Kanada ve Almanya gibi gelişmiş ülkelerde ısı pompaları, hem evsel hem de endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde 1990 yılında kullanılmaya başlanan ısı pompalarının, pek yaygın olduğu söylenemez ama son yıllarda ısı pompası uygulamaları giderek artmıştır [1].

Isıtma amacıyla kullanılan ısı pompasının çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir: İlk olarak, ısı kaynağı sayesinde, buharlaştırıcıdaki soğutucu akışkan ısınır ve buharlaşmaya başlar. Buharlaşan akışkan, kompresör tarafından çekilir ve sıkıştırılır. Sıkıştırılan akışkanın basıncı artar ve bu da sıcaklık artışına neden olur. Yüksek sıcaklık ve basınca sahip olan soğutucu akışkan, yoğuşturucuya gönderilir. Yoğuşturucu vasıtasıyla, ısıtılacak ortamın ısıtılmasında kullanılan hava ya da su ısıtılır. Böylece, ısıtılacak ortamın ihtiyacı olan ısı enerjisi karşılanmış olur. Yoğuşturucudan kısılma vanasına, basınç ve sıcaklığının düşürülmesi için gönderilen soğutucu akışkan, kısılma vanasından çıktıktan sonra, basınç ve sıcaklığı düşürülmüş olarak, yeni bir döngü için tekrar buharlaştırıcıya gönderilir. Bu çalışma prensibi; hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları için aynıdır. Isı pompası çevriminin şematik resmi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Isı pompası çevriminin şematik gösterimi [17]

Isı pompaları; bir ısı kaynağından çektikleri ısıyı, daha düşük sıcaklıktaki bir başka ortama aktaran makinelerdir. Bu yüzden ısı kaynaklarına göre ısı pompaları; hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompası olarak sınıflandırılır.

Hava, kolay bulunabilen bir ısı kaynağı olduğu için en çok kullanılan kaynaktır. Ayrıca, ilk yatırım maliyeti düşük ve bol bulunan bir ısı kaynağıdır. Hava kaynaklı ısı pompası, havadaki ısıyı alır ve çevrim başlar. Bu sistem, hava sıcaklığı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  olsa bile havadan ısı alabilir. Fakat karasal iklimlerde, özellikle kış aylarında, hava kararlı bir sıcaklığa sahip değildir. Havanın sıcaklığı gün içerisinde bile sık sık değişiklik gösterebilir. Buna bağlı olarak, ısı pompasında, performans ve ısı kapasitesi düşüklüğü olur. Bu durumda, geriye kalan ısı ihtiyacı başka bir ısı kaynağı tarafından karşılanabilir. Hava sıcaklığının çok değişken olması, projelendirme ve ekipman seçimini zorlaştırır. Hava kaynaklı ısı pompalarında bir başka problem ise, buharlaştırıcıda ısı geçişinin düşük olmasıdır. Bu nedenle ısı geçişini artırmak için genişletilmiş yüzeylerden (kanatçıklardan) ve fanlardan yararlanır [3]. Hava kaynaklı ısı pompası Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Hava kaynaklı ısı pompası [18]

Su kaynaklı ısı pompaları için ise mevcut su kütlelerinin çoğu enerji kaynağı olarak kullanılır. Coğrafi şartlar bakımından; deniz, göl, nehir, ırmak ve dere gibi büyük su kütlelerine yakın yerlerde genellikle su kaynaklı ısı pompası tercih edilir. Bu su kütlelerinin sıcaklığı, havaya göre daha karardır. Yani, zamanla daha az değişkenlik gösterir. Yer altındaki suyun, 10 m ve daha fazla derinliklerindeki sıcaklığının yıl boyunca çok az değişmesi, su kaynaklı ısı pompası için önemli bir üstünlüktür. Bu sistemin sakıncaları ise; sondaj ve bakım maliyetinin yüksek olması ve yeraltı suyunu kullanmak için resmi kurumlardan gerekli izinlerin alınması zorunluluğu olarak sayılabilir. Sistemin kurulumu için, ya buharlaştırıcı suya gömülmeli ya da sudan ısıyı çekebilmek için su içerisine boru sistemi döşenmelidir. Su kaynaklı ısı pompası Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Su kaynaklı ısı pompası [18]

Kolayca erişebildiğimiz diğer bir ısı kaynağı ise topraktır. Üstelik çok düşük hava sıcaklıklarında bile toprağın derinliklerindeki sıcaklık fazla değişkenlik göstermez. Bu husus, ısı pompasının performansı için önemlidir. Toprağın yoğunluğu, ısı iletim katsayısı, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği toprağa gömülecek ısı değiştiricisinin seçimi için önemlidir. Ayrıca; ısı pompası çalışmaya başladıktan sonra, toprağın sıcaklığı, nem miktarı vb. özellikleri zamanla değişebilir. Bu da projelendirme aşamasında güçlükler yol açar. Topraktan ısıyı çekebilmek için toprağa gömülen ısı değiştiricisinin boruları geniş alanlara yayılırsa bu etkiler azaltılmış olur. Topraęa gömülecek olan bu ısı değiştiricileri, yatay veya dikey şekilde yerleştirilebilir. Bu yüzden, toprak kaynaklı ısı pompaları; yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası ve dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası olmak üzere ikiye ayrılır. Yatay tip toprak kaynaklı ısı pompasının en verimli ısı çektiği toprak derinliği, 1 m ila 2 m arasındadır. Dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası için bu derinlik, 30 m ila 150 m arasındadır [19]. Yatay ve dikey tipteki toprak kaynaklı ısı pompaları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yatay ve dikey tipteki toprak kaynaklı ısı pompaları [18]

## 2. Teorik Analiz

Bu teorik çalışmada; Ankara ilinin Gölbaşı ilçesindeki ve 5 kW'lık ısıtmaya ihtiyacı olan bir ev için, kış mevsiminde ısıtma amacıyla kullanılacak olan hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Ankara ilinin Gölbaşı ilçesinde son 10 yılda görülen en düşük hava, su ve toprak sıcaklık değerleri, gerekli kurumlardan temin edilmiştir. Hava ve toprak kaynaklı ısı pompası için gerekli olan sıcaklık değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Su kaynaklı ısı pompası için gerekli olan sıcaklık değeri ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Bu verilere göre; son 10 yılda görülen en düşük hava sıcaklığı  $-18,5$  °C, görülen en düşük toprak sıcaklığı  $9,8$  °C ve görülen en düşük su sıcaklığı ise, Gölbaşı ilçesindeki Mogan gölü esas alınarak  $6,5$  °C olarak dikkate alınmıştır. Isı pompası sistemlerinde bakır boru kullanılmıştır. Her bir ısı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak ayrı ayrı R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf kullanılmış olup akışkanların kütleli debileri sırasıyla  $0,033$  kg/s,  $0,037$  kg/s,  $0,036$  kg/s,  $0,017$  kg/s ve  $0,041$  kg/s olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmaya konu olan hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının ısı hesaplamalarında şu kabuller yapılmıştır:

Bu kabuller:

- Isı pompası sisteminde dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisinin, ısı kaynağından bağımsız olarak sabit olduğu kabul edilmiştir.
- Sistemdeki tüm bağlantı boruları ve bağlantı elemanları ile dış ortam arasında ısı geçişi olmadığı kabul edilmiştir.
- Sistemdeki basınç düşümü ihmal edilmiştir.
- Kompresördeki sıkıştırma işleminin adiyabatik olarak (ısı geçişi olmadan) gerçekleştiği kabul edilmiştir.
- Kompresörün mekanik verimi %80 olarak kabul edilmiştir.
- Kaynak sıcaklığının zamanla değişmediği kabul edilmiştir.
- Toprak kaynaklı ısı pompası için nem ve toprak yoğunluğu gibi toprak özelliklerinin zamanla değişmediği kabul edilmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan soğutucu akışkanların tümünün kompresöre doymuş buhar olarak girdiği kabul edilmiştir.
- Akışkan ve kaynak türünden bağımsız olarak yoğuşturucuda ortama verilen ısı enerjisi  $5$  kW'tır.

Bu kabuller göz önüne alınarak tasarım parametrelerini belirten Tablo 1 oluşturulmuştur. Bu tabloda tasarım parametreleri olarak ısıtma/soğutma kapasitesi, yoğuşturucu sıcaklığı, buharlaştırıcı sıcaklığı ve ortam sıcaklığı dikkate alınmıştır [20].

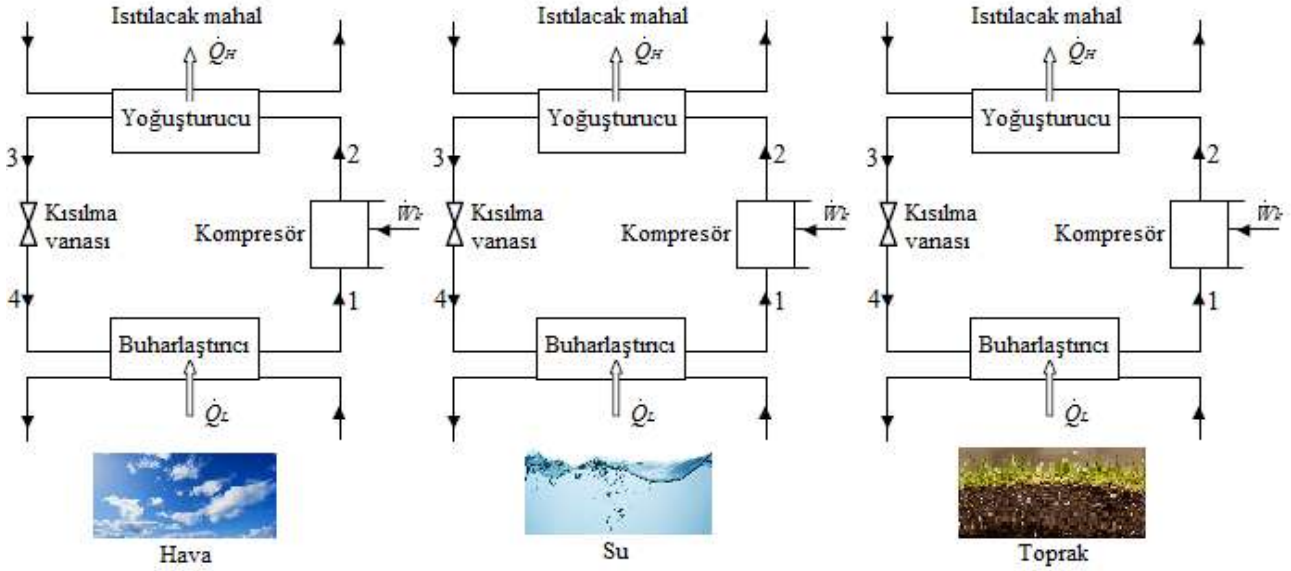
**Tablo 1.** Tasarım parametreleri

Parametre	Isı kaynağı türü		
	Hava	Su	Toprak
Isıtma kapasitesi, $\dot{Q}_y$	5 kW	5 kW	5 kW
Yoğuşturucu sıcaklığı, $T_y$	40 °C	40 °C	40 °C
Buharlaştırıcı sıcaklığı, $T_b$	-25 °C	1 °C	4 °C
Ortam sıcaklığı, $T_o$	25 °C	25 °C	25 °C

Bu kabuller ve parametreler göz önüne alınarak, Kandlikar'ın korelasyonu ile termodinamiğin birinci ve ikinci yasası kullanılarak ısı pompası sisteminin temel elemanları olan kompresör, yoğuşturucu, kısılma vanası ve buharlaştırıcı için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda, akışkanların termodinamik özellikleri için bazı tablolar kullanılmıştır. Bu tablolar için Genetron Properties programından yararlanılmıştır. Tüm bu hesaplamalar sonucunda ısı pompasının temel

elemanları için; sıcaklık, basınç, özgül entalpi, özgül entropi değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının ısıtma tesir katsayısı, ısı pompası sistemi temel elemanlarının ekserji kayıpları ve sistemin ikinci yasa verimi hesaplanmıştır. Bu değerler, her bir ısı pompasında (hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarında) R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının kullanılması durumu için ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Isı pompasının temel elemanlarının da yer aldığı ısı pompası çevriminin genelleştirilmiş gösterimi Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5. Genel bir ısı pompası çevriminin ısı kaynaklarına göre şematik gösterimi

Bu çalışmada, ısı pompalarının enerji ve ekserji analizi için kütle korunumu ilkesi, termodinamiğin birinci yasası ve termodinamiğin ikinci yasası uygulanmıştır. Kapalı sistemlerde, sistemin kütlesi hal değişimi sırasında tanım gereği sabit kaldığı için, kütle korunumu ilkesi üstü kapalı bir biçimde uygulanmaktadır. Diğer taraftan, açık sistemlerde, kontrol hacmi sınırlarından kütle geçişi olduğu için, kontrol hacmine giren ve çıkan kütlelerin hesabının yapılması gerekir [21]. Bu nedenle, birer açık sistem olan ısı pompası elemanlarında kütle korunumu için Eş. 1 kullanılır.

$$\Delta \dot{m}_{KH} = \sum \dot{m}_{giren} - \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (1)$$

Termodinamiğin birinci kanunu, enerjinin korunumu ilkesini ifade eder ve enerjinin, termodinamik ile ilgili bir özellik olduğunu vurgular. Enerjinin korunumu ilkesi; sisteme veya sistemden ısı veya iş olarak net enerji geçişinin, sistemin toplam enerjisindeki net artışa ya da azalışa eşit olduğunu ifade eder [21]. Hal değişimine uğrayan herhangi bir açık sistem için enerjinin korunumu, Eş. 2 ile ifade edilir:

$$\dot{Q}_{KH} + \dot{W}_{KH} = \Delta \dot{E} = \sum (\dot{m}h)_{çıkan} - \sum (\dot{m}h)_{giren} \quad (2)$$

Eş. 1 ve Eş. 2, ısı pompası çevrimine uygulanmış ve sistemin her bir elemanı için kütle ve enerji denklikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Buharlaştırıcıdaki ısı geçişi hesaplamaları için buharlaştırıcı tarafındaki ısı taşınım katsayısının bilinmesi gerektiğinden iki fazlı akışa ait korelasyonlar (ilgileşimler) kullanılmalıdır. Bu çalışmada yatay ve düşey borular bulunduğundan yalnızca bu tip borular için önerilen korelasyonlar incelenmiştir. Bu korelasyonlar incelendiğinde; Chen 1963 yılında, düşey tüplerde buharlaşma için akış kaynama korelasyonunu önermiştir. Shah tarafından 1982 yılında, düşey ve yatay borular için bir korelasyon önerilmiştir.

**Tablo 2.** Isı pompası sistemindeki temel elemanların enerji denklemleri [22]

Isı pompası elemanı	Enerjinin korunumu eşitliği
Kompresör	$\dot{W}_k = \dot{m}(h_2 - h_1)$
Yoğuşturucu	$\dot{Q}_y = \dot{m}(h_3 - h_2)$
Kısılma vanası	$h_3 = h_4$
Buharlaştırıcı	$\dot{Q}_b = \dot{m}(h_1 - h_4)$

Shah, iki fazlı ısı taşınım katsayısının, konvektif ve çekirdekli kaynama nedeniyle meydana geldiğini savunmuştur. 1983 yılında Kandlikar tarafından geliştirilen korelasyon, düşey ve yatay borular için hazırlanmış bir korelasyondur. Kandlikar denklemi iki fazlı akışın, konvektif kaynama ve çekirdekli kaynama denklemlerinin birlikte etkimesi sonucunda oluştuğunu ön görür. Kandlikar, konvektif kaynama ya da çekirdekli kaynama ısı taşınım katsayılarından büyük olanının iki fazlı ısı taşınım katsayısı olarak alınması gerektiğini önermiştir [23].

İki fazlı akış korelasyonları üzerine bir literatür taraması yapılmıştır ve korelasyonların birbirleriyle sapma değerleri incelenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada Kandlikar denklemleri kullanılmıştır. Bu korelasyon ve bu korelasyon ile ilgili olan bağıntılar literatürde [24], Eş. 3 ila Eş. 8'deki gibi verilir:

$$\frac{\bar{h}}{\bar{h}_l} = c_1 Co^{c_2} (25 Fr_{lo})^{c_5} + c_3 Bo^{c_4} F_{fl} \quad (3)$$

$$\bar{h}_l = 0,023 Re_l^{0,8} Pr_l^{0,4} \left( \frac{k_l}{d_i} \right) \quad (4)$$

$$Re_l = \frac{G d_i (1-x)}{\mu_l} \quad (5)$$

$$Co = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,8} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \quad (6)$$

$$Fr_{lo} = \frac{G^2}{g d_i \rho_l^2} \quad (7)$$

$$Bo = \frac{q''}{G h_{lv}} \quad (8)$$

Bu eşitlikler kullanılarak, buharlaştırıcıda soğutucu akışkan tarafındaki ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Bu katsayı kullanılarak da, ısı kaynağından çekilen ısının hesabı yapılmıştır. Bir ısı pompasının etkenliği, ısıtma tesir katsayısı (ITK) olarak ifade edilir. Amacı, bir ortamı ısıtmak olan ısı pompası, bu hedefini gerçekleştirmek için kompresörde enerji harcar. Yoğuşturucu vasıtasıyla  $\dot{Q}_y$  kadar bir ısıtma için kompresörde  $\dot{W}_k$  kadar enerji tüketimi olur. Böylece, ısı pompasının ITK değeri şu şekilde ifade edilir:



$$ITK = \frac{\text{Amaç}}{\text{Harcanan}} = \frac{\dot{Q}_{\text{yoğuşturucu}}}{\dot{W}_{\text{kompresör}}} = \frac{\dot{Q}_y}{\dot{W}_k} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_3)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

Belirli bir durumda bir sistemin ekserjisi, maksimum çalışma potansiyelini temsil eder [25]. Bir ısı pompasının ikinci yasa veya ekserji analizinin amacı, yapılacak iyileştirmelerle en fazla fayda sağlayabilecek bileşenleri belirlemektir. Bu amaca, ekserji kaybının en büyük olduğu yerler tespit edilerek ulaşılır. Bir bileşendeki ekserji kaybı aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir.

$$\dot{X}_{\text{kayıp}} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (10)$$

Burada,  $T_0$  çevre sıcaklığıdır. Eş. 10, ısı pompası çevrimindeki tüm elemanlara uygulanmış ve sistemin her bir elemanı için ekserji kaybı ve ekserji verimi (ikinci yasa verimi) ile ilgili eşitlikler Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Isı pompası sistemindeki temel elemanların ekserji kayıp ve ekserji verim denklemleri [26, 27]

Bileşen	Ekserji kaybı	Ekserji verimi
Kompresör	$\dot{X}_{\text{kayıp},1-2} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim},1-2} = \dot{m} T_0 (s_2 - s_1)$	$\eta_{\text{II},k} = \frac{\dot{m}[(h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)]}{\dot{m}(h_2 - h_1)}$
Yoğuşturucu	$\dot{X}_{\text{kayıp},2-3} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim},2-3} = T_0 \left[ \dot{m}(s_3 - s_2) + \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \right]$	$\eta_{\text{II},y} = \frac{\dot{Q}_H \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right)}{\dot{m}[(h_2 - h_3) - T_0(s_2 - s_3)]}$
Kısılma vanası	$\dot{X}_{\text{kayıp},3-4} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim},3-4} = \dot{m} T_0 (s_4 - s_3)$	$\eta_{\text{II},kv} = 1 - \frac{\dot{X}_3 - \dot{X}_4}{\dot{X}_3 - \dot{X}_4}$
Buharlaştırıcı	$\dot{X}_{\text{kayıp},4-1} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim},4-1} = T_0 \left[ \dot{m}(s_1 - s_4) - \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \right]$	$\eta_{\text{II},b} = \frac{\dot{Q}_L \left( \frac{T_0}{T_L} - 1 \right)}{\dot{m}[(h_4 - h_1) - T_0(s_4 - s_1)]}$

*Bo:* Kaynama sayısı (-),  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ : Sabit katsayılar (-), *Co:* Taşınım sayısı (-),  $c_p$ : Sabit basınçta özgül ısı (J/(kg·K)),  $d_i$ : Boru iç çapı (m), *Fr:* Froude sayısı (-),  $F_{\beta}$ : Sıvıya bağımlı bir sabit katsayı (-), *G:* Kütle akışı (kg/(m<sup>2</sup>·s)), *g:* Yerçekimi ivmesi (m/s<sup>2</sup>),  $\bar{h}$ : Ortalama ısı taşınım katsayısı (W/(m<sup>2</sup>·°C)), *h:* Özgül entalpi (kJ/kg), *k:* Isı iletim katsayısı (W/(m<sup>2</sup>·°C)), *l:* Sıvı (-),  $\dot{m}$ : Kütleli debi (kg/s), *P:* Basınç (kPa), *Pr:* Prandtl sayısı (-),  $Q_{KH}$ : Kontrol hacminin birim zamandaki net ısı alış-verişi (kW),  $\dot{Q}_b$ : Buharlaştırıcıdaki ısı (kW),  $\dot{Q}_y$ : Yoğuşturucu vasıtasıyla yapılan ısıtma (kW), *Re:* Reynolds sayısı (-), *s:* Özgül entropi (kJ/(kg·K)), *T:* Sıcaklık (°C),  $T_0$ : Çevre sıcaklığı (°C),  $T_b$ : Buharlaştırıcı sıcaklığı (°C),  $T_y$ : Yoğuşturucu sıcaklığı (°C), *v:* Buhar,  $\dot{W}_k$ : Kompresördeki enerji tüketimi (kW),  $\dot{W}_{KH}$ : Kontrol hacminin birim zamandaki net iş alış-verişini (kW), *x:* Kuruluk derecesi,  $\dot{X}_{\text{kayıp}}$ : Ekserji kaybı (kJ/s),  $\rho$ : Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>),  $\mu$ : Dinamik viskozite (N·s/m<sup>2</sup>),  $\Delta \dot{E}$ : Sistemin birim zamandaki toplam enerji değişimi (kW),  $\Delta \dot{m}_{KH}$ : Kontrol hacminde birim zamandaki kütle değişimi (kg/s),  $\Sigma \dot{m}_{\text{çıkan}}$ : Kontrol hacminden çıkan toplam kütleli debi (kg/s),  $\Sigma \dot{m}_{\text{giren}}$ : Kontrol hacmine giren toplam kütleli debi (kg/s)

### 3. Bulgular ve Bulguların Analizi

Bu çalışmada; Ankara ili Gölbaşı ilçesinin son 10 yılı içerisinde görülen en düşük hava, su ve toprak sıcaklıkları göz önüne alınarak, bir konutun ısıtılması için kullanılacak olan hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Hesaplamalarda öncelikle, her bir ısı pompasında çalışma akışkanı olarak kullanılan R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının buharlaşma sırasındaki ortalama ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompası için buharlaştırıcıda gerçekleşen ısı geçişi hesaplanmış ve ısı pompasının temel elemanları olan kompresör, yoğuşturucu, kısılma vanası ve buharlaştırıcı için kütleli korunumu, enerjinin korunumu, ekserji kaybı ve ekserji verimi denklemleri yazılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Tüm bu değerler kullanılarak; hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları için ITK ve  $\eta_{\text{II}}$  değerleri bulunmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 3'te bulunan eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalarda, Tablo 4'te yer alan termodinamik özellikler kullanılmıştır. Buna göre; ilgili hesaplamalar sonucunda, ısı pompası temel elemanlarının ve sistemin ekserji kayıpları bulunmuş ve sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir.

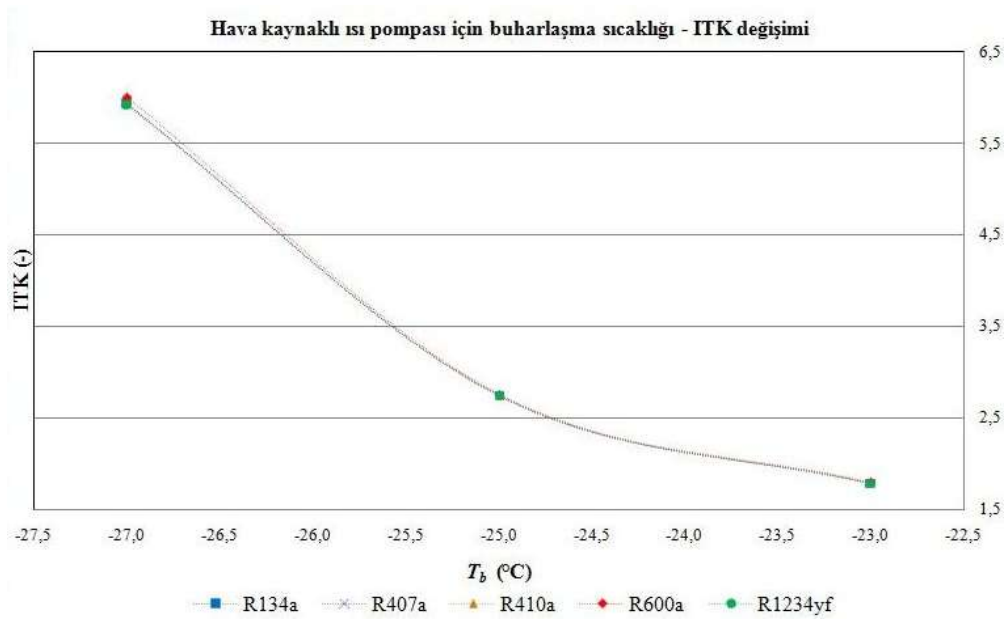
**Tablo 4.** Kullanılan soğutucu akışkanlar için sistemin termodinamik özellikleri

Isı kaynağı türü	Akışkan türü	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$
		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg·K)	(kJ/kg·K)	(kJ/kg·K)	(kJ/kg·K)
Hava	R134a	-25,00	57,70	40,00	-25,00	106,40	1016,60	1016,60	106,40	383,450	438,768	286,977	286,977	1,737	1,771	1,288	1,357
	R407a	-25,00	61,17	40,00	-25,00	244,60	1837,00	1837,00	244,60	383,870	433,248	297,784	297,784	1,817	1,847	1,421	1,474
	R410a	-25,00	65,58	40,00	-25,00	330,50	2425,60	2425,60	330,50	413,180	463,442	325,541	325,541	1,883	1,913	1,477	1,533
	R600a	-25,00	51,10	40,00	-25,00	58,40	531,20	531,20	58,40	520,990	629,218	330,532	330,532	2,320	2,388	1,436	1,537
	R1234yf	-25,00	43,50	40,00	-25,00	122,90	1018,40	1018,40	122,90	346,690	391,227	269,127	269,127	1,592	1,620	1,231	1,282
Su	R134a	1,00	62,10	40,00	1,00	303,60	1016,60	1016,60	303,60	399,200	443,452	291,661	291,661	1,759	1,785	1,303	1,334
	R407a	1,00	64,50	40,00	1,00	620,30	1837,00	1837,00	620,30	397,270	437,140	301,675	301,675	1,835	1,859	1,434	1,473
	R410a	1,00	65,30	40,00	1,00	826,50	2425,60	2425,60	826,50	422,820	463,123	325,222	325,222	1,888	1,912	1,476	1,523
	R600a	1,00	57,40	40,00	1,00	162,60	531,20	531,20	162,60	555,700	641,521	342,835	342,835	2,373	2,426	1,475	1,521
	R1234yf	1,00	51,40	40,00	1,00	326,70	1018,40	1018,40	326,70	363,940	400,242	278,142	278,142	1,626	1,648	1,259	1,285
Toprak	R134a	4,00	58,60	40,00	4,00	337,70	1016,60	1016,60	337,70	400,920	439,728	287,937	287,937	1,750	1,774	1,291	1,317
	R407a	4,00	62,00	40,00	4,00	682,20	1837,00	1837,00	682,20	398,700	434,165	298,700	298,700	1,828	1,849	1,424	1,458
	R410a	4,00	62,25	40,00	4,00	907,80	2426,00	2426,00	907,80	423,700	459,224	321,324	321,324	1,879	1,900	1,464	1,504
	R600a	4,00	53,80	40,00	4,00	180,40	531,20	531,20	180,40	559,700	634,466	335,780	335,780	2,358	2,404	1,452	1,490
	R1234yf	4,00	46,60	40,00	4,00	360,90	1018,00	1018,00	360,90	365,900	394,879	275,689	275,689	1,614	1,632	1,251	1,273

**Tablo 5.** Isı pompası temel elemanlarının ve sistemin ekserji kayıpları

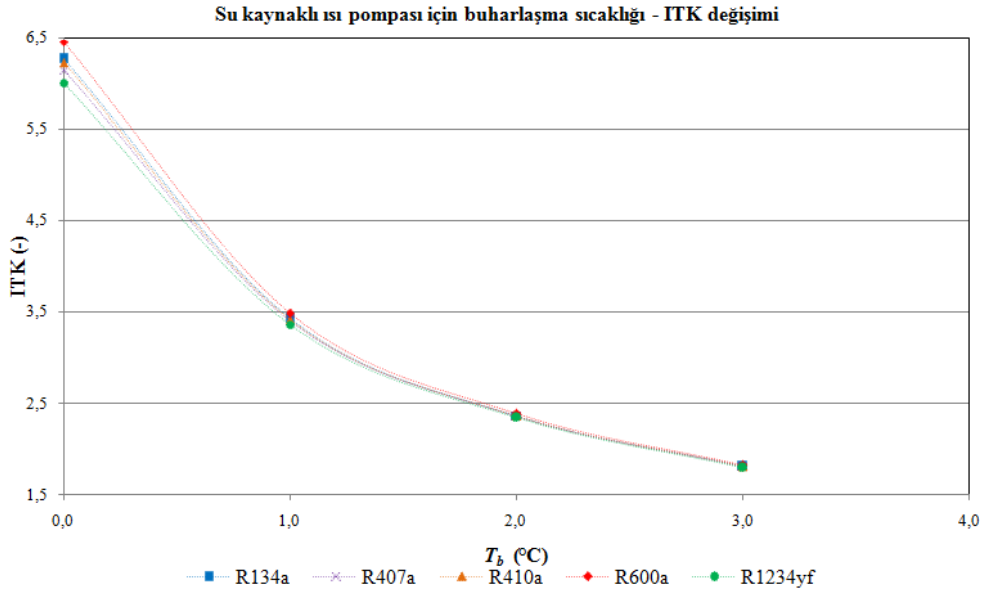
Isı kaynağı türü	Akışkan türü	Ekserji kaybı (kW)				
		Kompresör	Yoğuşturucu	Kısılma vanası	Buharlaştırıcı	Sistem
Hava	R134a	0,285	0,219	0,580	0,009	1,092
	R407a	0,282	0,270	0,493	0,049	1,093
	R410a	0,278	0,247	0,515	0,053	1,093
	R600a	0,289	0,211	0,434	0,149	1,082
	R1234yf	0,297	0,205	0,541	0,052	1,094
Su	R134a	0,245	0,248	0,288	0,366	1,147
	R407a	0,244	0,305	0,408	0,205	1,161
	R410a	0,243	0,270	0,478	0,159	1,151
	R600a	0,245	0,239	0,215	0,427	1,126
	R1234yf	0,259	0,234	0,294	0,389	1,176
Toprak	R134a	0,221	0,245	0,243	0,315	1,023
	R407a	0,223	0,302	0,351	0,161	1,038
	R410a	0,219	0,264	0,415	0,135	1,033
	R600a	0,216	0,238	0,178	0,364	0,997
	R1234yf	0,210	0,338	0,249	0,253	1,051

Isı pompası türüne ve soğutucu akışkan çeşidine göre, ısı pompası enerji ve ekserji analizi sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için grafik gösterimleri Şekil 6 ila Şekil 13'te verilmiştir.



**Şekil 6.** Hava kaynaklı ısı pompası için buharlaşma sıcaklığı - ITK değişim grafiği

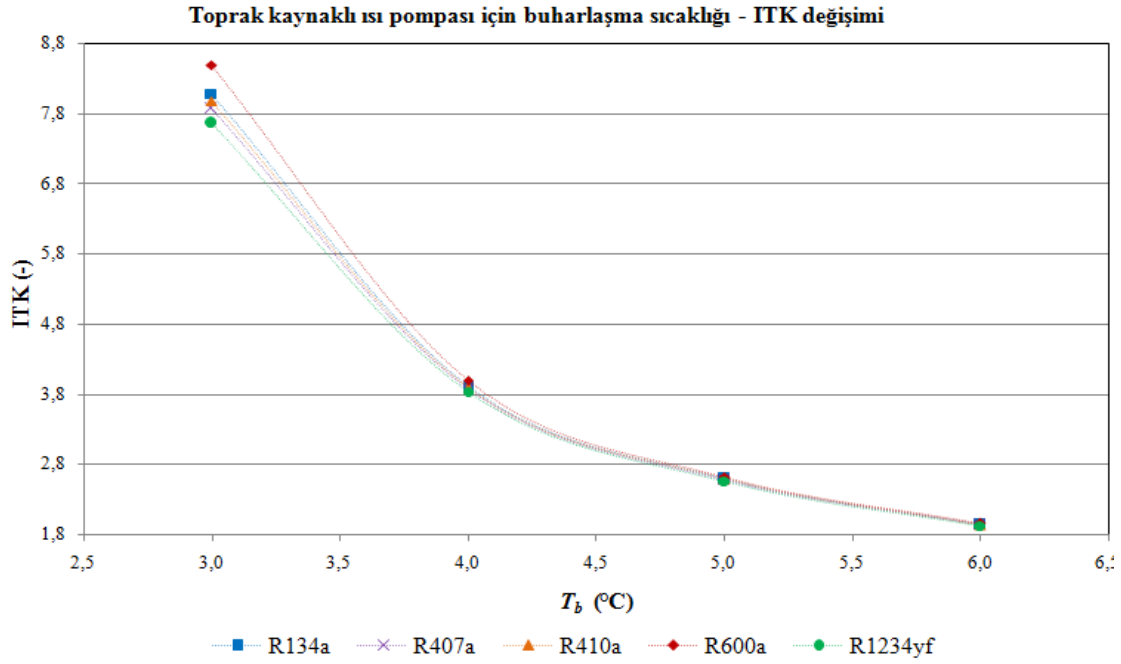
Hava kaynaklı ısı pompasında belirli soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığına göre ısıtma tesir katsayısının değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Grafikte, tüm buharlaşma sıcaklıklarında, hava kaynaklı ısı pompası sisteminde en yüksek ITK değerini R600a soğutucu akışkanı elde etmiştir. R600a akışkanını sırasıyla R134a, R410a, R407a ve R1234yf soğutucu akışkanları izlemiştir. Hava kaynaklı ısı pompası için ITK değeri en etkin olan R600a soğutucu akışkanının en az etkin olan R1234yf soğutucu akışkanına göre %0,656 daha etkin olduğu görülmüştür.



**Şekil 7.** Su kaynaklı ısı pompası için buharlaşma sıcaklığı - ITK değişim grafiği

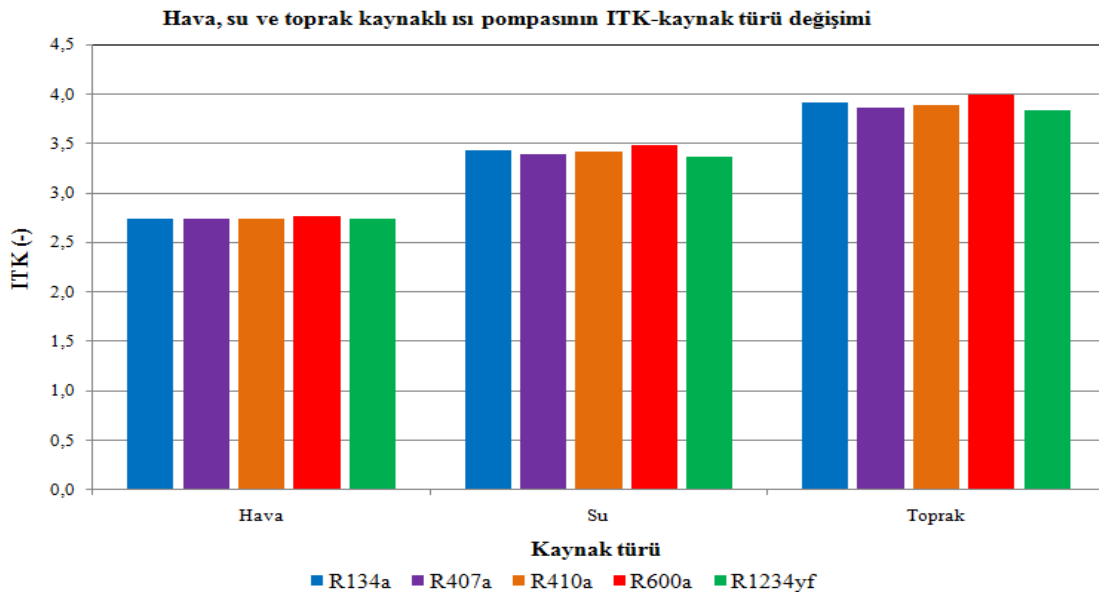
Su kaynaklı ısı pompasında belirli soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığına göre ısıtma tesir katsayısının değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Grafikte, tüm buharlaşma sıcaklıklarında, su kaynaklı ısı pompası sisteminde en yüksek ITK değerini R600a soğutucu akışkanı elde etmiştir. R600a akışkanını sırasıyla R134a, R410a, R407a ve R1234yf soğutucu akışkanları izlemiştir. Su

kaynaklı ısı pompası için ITK değeri yine en etkin olan R600a soğutucu akışkanının en az etkin olan R1234yf soğutucu akışkanına göre %3,479 daha etkin olduğu görülmüştür.



**Şekil 8.** Toprak kaynaklı ısı pompası için buharlaşma sıcaklığı - ITK değişim grafiği

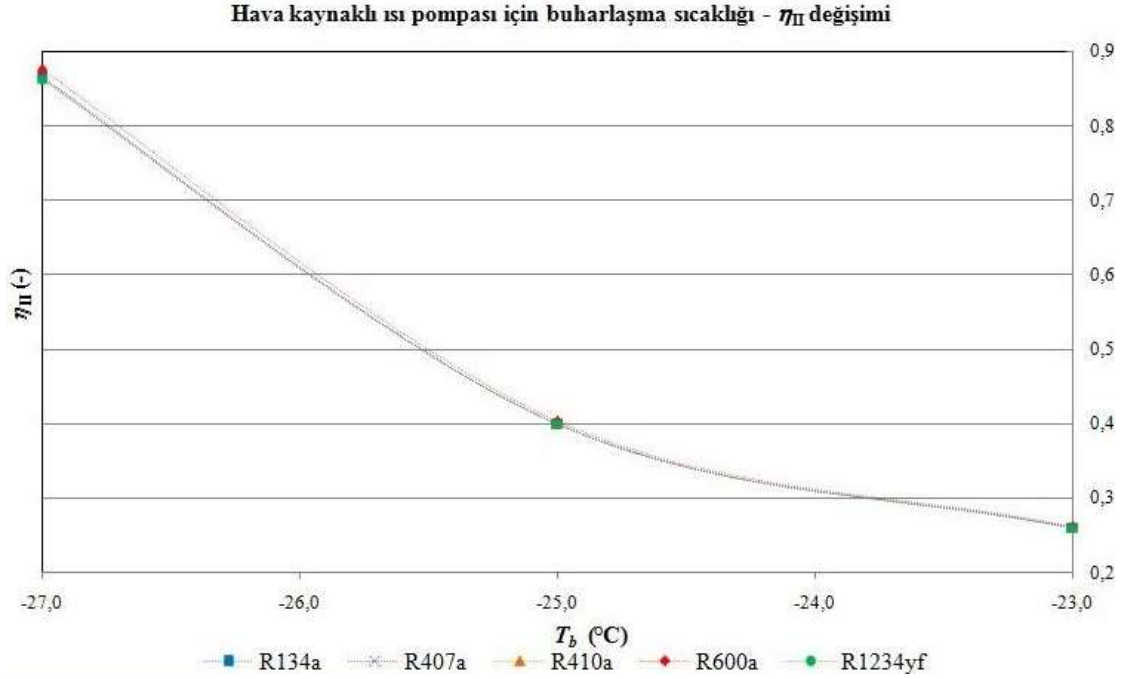
Toprak kaynaklı ısı pompasında belirli soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığına göre ısıtma tesir katsayısının değişimi Şekil 8’de gösterilmiştir. Grafikte, tüm buharlaşma sıcaklıklarında, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde en yüksek ITK değerini R600a soğutucu akışkanı elde etmiştir. R600a akışkanını sırasıyla R134a, R410a, R407a ve R1234yf soğutucu akışkanları izlemiştir.



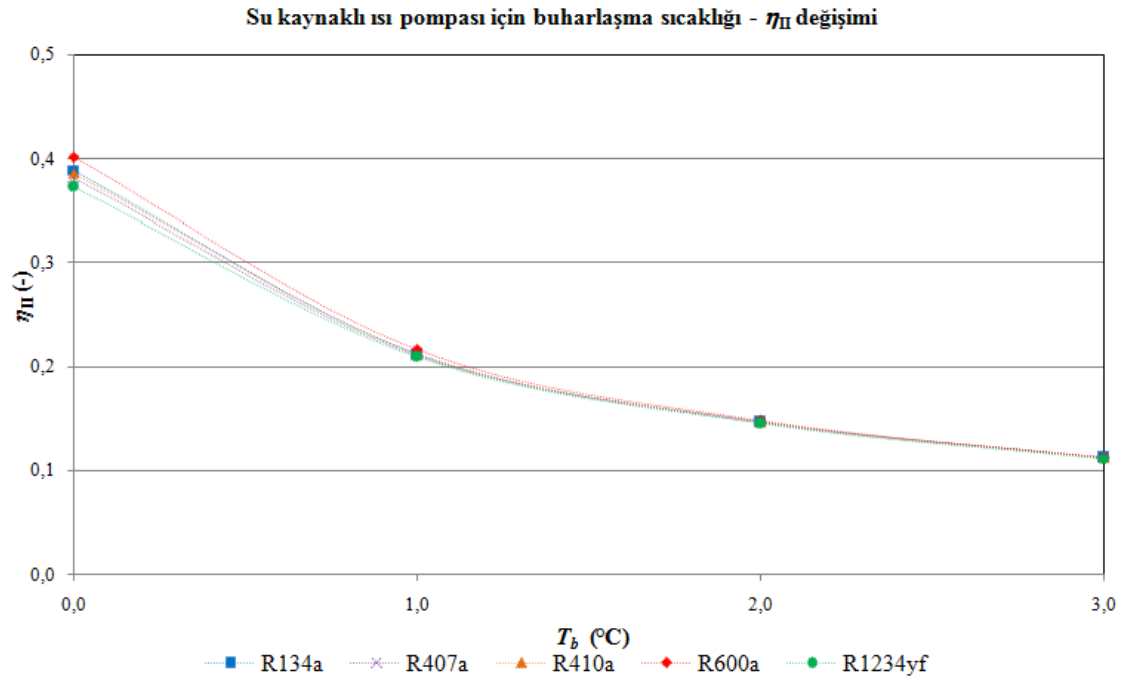
**Şekil 9.** Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının ITK - kaynak türü değişim grafiği

Toprak kaynaklı ısı pompası için ITK değeri yine en etkin olan R600a soğutucu akışkanının en az etkin olan R1234yf soğutucu akışkanına göre %4,335 daha etkin olduğu görülmüştür.

Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompası Gölbaşı ilçesi için karşılaştırma grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu grafiğe göre, Gölbaşı ilçesi için en yüksek ITK değerini toprak kaynaklı ısı pompası elde etmiştir.



**Şekil 10.** Hava kaynaklı ısı pompası için buharlaşma sıcaklığı -  $\eta_{II}$  değişim grafiği

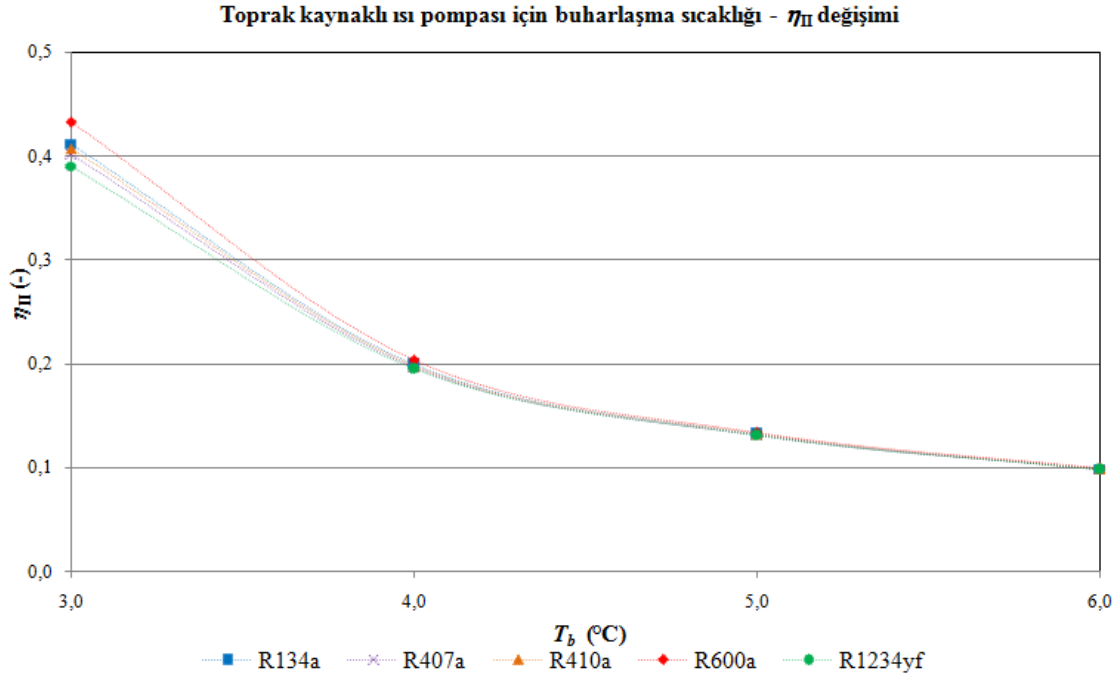


**Şekil 11.** Su kaynaklı ısı pompası için buharlaşma sıcaklığı -  $\eta_{II}$  değişim grafiği

Hava kaynaklı ısı pompasında belirli soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığına göre ekserji veriminin değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir. Grafikte, tüm buharlaşma sıcaklıklarında, hava kaynaklı ısı pompası sisteminde en yüksek  $\eta_{II}$  değerini R600a soğutucu akışkanı elde etmiştir. R600a akışkanını sırasıyla R134a, R410a, R407a ve R1234yf soğutucu akışkanları izlemiştir. Hava

kaynaklı ısı pompası için  $\eta_{II}$  değeri en etkin olan R600a soğutucu akışkanının en az etkin olan R1234yf soğutucu akışkanına göre %1,003 daha etkin olduğu görülmüştür.

Su kaynaklı ısı pompasında belirli soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığına göre ekserji veriminin değişimi Şekil 11’de gösterilmiştir. Grafikte, tüm buharlaşma sıcaklıklarında, su kaynaklı ısı pompası sisteminde en yüksek  $\eta_{II}$  değerini R600a soğutucu akışkanı elde etmiştir. R600a akışkanını sırasıyla R134a, R410a, R407a ve R1234yf soğutucu akışkanları izlemiştir. Su kaynaklı ısı pompası için  $\eta_{II}$  değeri yine en etkin olan R600a soğutucu akışkanının en az etkin olan R1234yf soğutucu akışkanına göre %3,349 daha etkin olduğu görülmüştür.

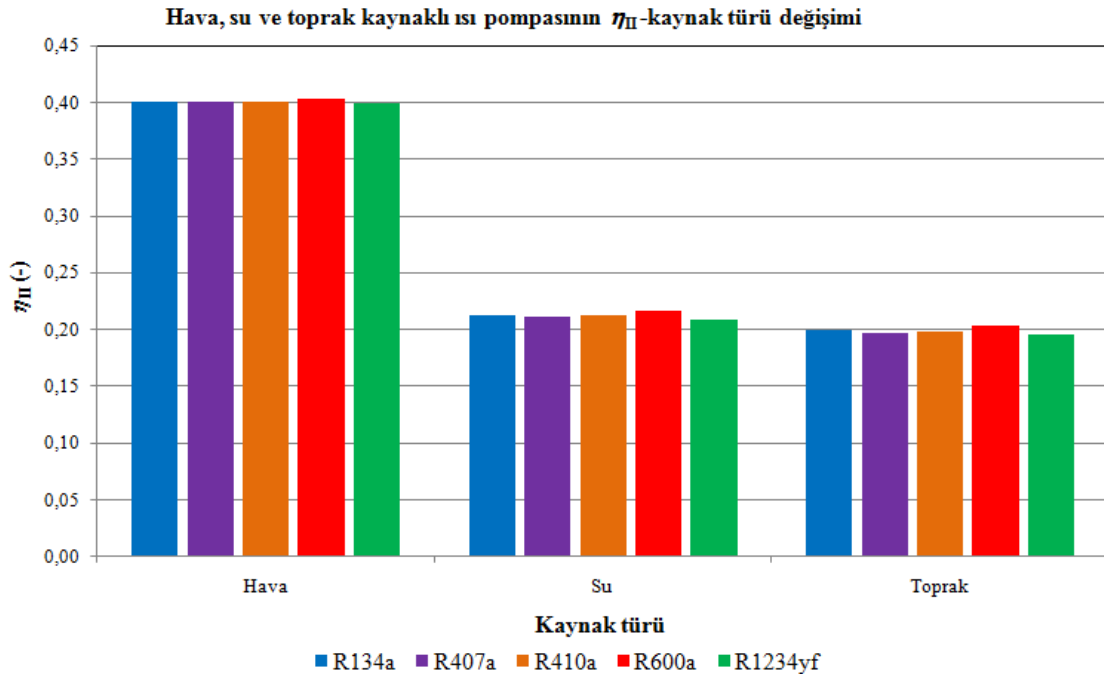


**Şekil 12.** Toprak kaynaklı ısı pompası için buharlaşma sıcaklığı -  $\eta_{II}$  değişim grafiği

Toprak kaynaklı ısı pompasında belirli soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığına göre ekserji veriminin değişimi Şekil 12’de gösterilmiştir. Grafikte, tüm buharlaşma sıcaklıklarında, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde en yüksek  $\eta_{II}$  değerini R600a soğutucu akışkanı elde etmiştir. R600a akışkanını sırasıyla R134a, R410a, R407a ve R1234yf soğutucu akışkanları izlemiştir. Toprak kaynaklı ısı pompası için  $\eta_{II}$  değeri yine en etkin olan R600a soğutucu akışkanının en az etkin olan R1234yf soğutucu akışkanına göre %4,615 daha etkin olduğu görülmüştür.

Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompası Gölbaşı ilçesi için karşılaştırma grafiği Şekil 13’te gösterilmiştir. Bu grafiğe göre, Gölbaşı ilçesi için en yüksek  $\eta_{II}$  değerini hava kaynaklı ısı pompası elde etmiştir.

Bu teorik çalışmada; hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları için ekonomik analiz de yapılmıştır. Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları için yapılan ekonomik analizde ısı pompasının sadece kompresörde harcadığı güç dikkate alınmıştır. Karşılaştırma yapılırken kullanılan elektrikli ısıtıcının ısıtma gücü, ısı pompasının ısıtma gücüyle aynı kabul edilmiştir. Hesaplamalar yapılırken ısıtıcıya ihtiyaç duyulacak süre 180 gün (6 ay) olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 13.** Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompasının  $\eta_{II}$  - kaynak türü değişim grafiği

Ayrıca her iki sistemin de günde 10 saat çalıştığı kabul edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan elektrik birim fiyatı 0,79 ₺/(kW·h) [28] olarak alınmıştır. Yapılan fiyat araştırmasında hava kaynaklı ısı pompasının işçilik ve borulama maliyetinin 1.000 ila 3.000 ₺ arasında olduğu, su ve toprak kaynaklı ısı pompasının işçilik ve borulama maliyetinin ise 150.000 ila 400.000 ₺ arasında olduğu öğrenilmiştir. Su ve toprak kaynaklı ısı pompasının kurulumunun yapılacağı suyun veya toprağın özellikleri (yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı gibi) ve ısı değiştiricilerinin yatay ya da dikey yerleştirilmesinin işçilik ve borulama maliyetini etkilediği görülmüştür. Burada proje alanı belli olmadığından net bir işçilik ve borulama fiyatlandırması yapılamamış olup yaklaşık bir maliyet verilmiştir. Ulaşılan bilgiler ve hesaplamaların sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.

**Tablo 6.** Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının elektrikli ısıtıcıya göre maliyet ve geri ödeme süreleri [29]

Isı pompası türü	Isıtma gücü (kW)	Makine ve teçhizat maliyeti (₺)	İşçilik ve borulama maliyeti (₺)	Isı pompasının yıllık enerji tüketim maliyeti (₺)	Elektrikli ısıtıcının yıllık enerji tüketim maliyeti (₺)	Geri ödeme süresi (Yıl)
Hava kaynaklı ısı pompası	8	62.767	1.000 - 3.000	2.774,32	11.376	7,42 - 7,65
	12	66.683	1.000 - 3.000	4.162,19	17.064	5,25 - 5,40
	16	79.833	1.000 - 3.000	5.291,26	22.752	4,63 - 4,74
Su veya toprak kaynaklı ısı pompası	6	80.567	150.000 - 400.000	1.551,40	8.532	33,02 - 68,84
	12	88.399	150.000 - 400.000	3.159,68	17.064	17,14 - 35,12
	16	92.604	150.000 - 400.000	5.881,39	22.752	13,03 - 26,46

Tablo 6 incelendiğinde, her bir ısı pompasının ısıtma gücü arttıkça geri ödeme süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca hava kaynaklı ısı pompasının işçilik ve borulama maliyeti su veya toprak

kaynaklı ısı pompalarının işçilik ve borulama maliyetine göre çok düşük olduğundan geri ödeme sürelerinin daha kısa olduğu görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Dünya nüfusunun artması enerji ihtiyacını da artırmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için günümüzde kullanılan fosil yakıtların kısa zamanda tükeneceği öngörülmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları incelendiğinde, ısı pompaları çevreci ve ekonomik olmalarıyla dikkat çekmektedir. Bu sebeple bu çalışmada; Ankara ili Gölbaşı ilçesi için hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının konut ısıtması için kullanılması teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada; R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf olmak üzere beş farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır. Burada R1234yf akışkanının yakın bir gelecekte popülerlik kazanması göz önünde bulundurulmuş ve ısı pompalarında kullanılmasının mümkün olup olmadığı incelenmiştir. Beş soğutucu akışkan kullanılarak her bir ısı pompasının enerji ve ekserji analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Teorik analizde, hava kaynaklı ısı pompası için; R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının ITK değerleri sırasıyla 2,744, 2,743, 2,744, 2,760 ve 2,742 bulunmuştur. Ayrıca,  $\eta_{II}$  değerleri sırasıyla 0,400, 0,400, 0,400, 0,403 ve 0,399 bulunmuştur. Su kaynaklı ısı pompası için; R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının ITK değerleri sırasıyla 3,430, 3,398, 3,422, 3,480 ve 3,363 bulunmuştur. Ayrıca,  $\eta_{II}$  değerleri sırasıyla 0,213, 0,211, 0,212, 0,216 ve 0,209 bulunmuştur. Toprak kaynaklı ısı pompası için; R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının ITK değerleri sırasıyla 3,911, 3,867, 3,882, 3,995 ve 3,829 bulunmuştur. Ayrıca,  $\eta_{II}$  değerleri sırasıyla 0,199, 0,197, 0,198, 0,204 ve 0,195 bulunmuştur.

Bu sonuçların karşılaştırılmasıyla:

- Gölbaşı ilçesinde kullanılacak ısı pompasında, iş akışkanı olarak R134a, R407a, R410a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının ayrı ayrı kullanılması durumunda, aynı şartlar altında R600a soğutucu akışkanı hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarında ITK ve  $\eta_{II}$  değerleri açısından daha etkin olduğu görülmektedir. Her üç ısı pompasında da R600a soğutucu akışkanının bu çalışmadaki diğer akışkanlara göre en etkin soğutucu akışkan olmasının nedeni bu akışkanın sahip olduğu termodinamik özelliklerden ileri gelmektedir.
- Ankara ilinin Gölbaşı ilçesinde kullanılabilecek hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları karşılaştırıldığında, aynı şartlar altında toprak kaynaklı ısı pompasının enerji verimliliği açısından diğerlerine göre daha etkin olduğu görülmektedir.
- Ankara ilinin Gölbaşı ilçesinde kullanılabilecek hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları karşılaştırıldığında, aynı şartlar altında hava kaynaklı ısı pompasının ekserji verimliliği açısından diğerlerine göre daha etkin olduğu görülmektedir.
- Isı pompası kaynak sıcaklığının yani hava, su veya toprak sıcaklığının, ısı pompasının verimini doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu sonuçtan hareketle, herhangi bir ısı pompasının kurulacağı bölge için doğru kaynak seçimine büyük özen gösterilmelidir.
- R1234yf soğutucu akışkanının ısı pompalarında kullanılması durumunda beklenen performans elde edilememiştir. Ancak günümüzde, R1234yf soğutucu akışkanı diğer akışkanlara göre daha çevreci olmasından dolayı tercih edilmektedir. Bu sebeple, bu soğutucu akışkan nanopartiküller ile birlikte kullanılırsa daha verimli olacağı öngörülmektedir. Böylece, R1234yf soğutucu akışkanına çeşitli nanopartiküllerin ilavesiyle elde edilecek yeni bir nanosoğutucunun ITK ve  $\eta_{II}$  değerleri diğer soğutucu akışkanlardan daha etkin olacaktır.
- Ekonomik analizde her bir ısı pompası için ısıtma gücü arttıkça geri ödeme süresinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca her ısıtma gücünde hava kaynaklı ısı pompasının geri ödeme sürelerinin su ve toprak kaynaklı ısı pompalarına göre daha kısa olduğu görülmektedir.



## Yazarların Katkıları

KB ve OD çalışmaları ve hesaplamaları yaptı ve birlikte makaleyi yazdı. Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

- [1]. Yamankaradeniz R., Horuz İ., Kaynaklı Ö., Coşkun S., Yamankaradeniz N., “Soğutma Tekniği ve Uygulamaları”, Dora Yayıncılık, Bursa, Türkiye, 2009.
- [2]. Demir H., “Toprak kaynaklı ısı pompası ve toprak ısı değiştiricilerinin optimizasyonu ve geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [3]. Alkan R., “Farklı soğutucu akışkanlar için toprak kaynaklı ısı pompasının termoeconomik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2014.
- [4]. Elbir A., “Toprak kaynaklı ısı pompasının termodinamik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2010.
- [5]. Emmi G., Zarrella A., Carli M.D., Galgaro A., “An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates”, Elsevier, Energy Conversion and Management, 2015, 106: 660-675.
- [6]. Sagia Z., Rakopoulos C., “Alternative refrigerants for the heat pump of a ground source heat pump system”, Elsevier, Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 768-774.
- [7]. Menberg K., Heo Y., Choi W., Ooka R., Choudhary R., Shukuya M., “Exergy analysis of a hybrid ground-source heat pump system”, Elsevier, Applied Energy, 2017, 204: 31-46.
- [8]. Al-Khalidi M.M.H., “Toprak kaynaklı ısı pompası ile ısparta şartlarında bir ısıtma uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018.
- [9]. Toksöz S., Soyhan H.S., Topaçoğlu Y., Taymaz İ., Büyükkaya E., “Toprak kaynaklı ısı pompasında ikinci yasa verimi”, Ulusal İklimlendirme Kongresi ve Fuarı, İklim 2011, Antalya, 2011. www.1.mmo.org.tr Erişim tarihi Ocak 12, 2020.
- [10]. Wu W., Skye H.M., “Progress in ground-source heat pumps using natural refrigerants”, Elsevier, International Journal of Refrigeration, 2018, 92: 70-85.
- [11]. Wang Z., Wang F., Ma Z., Song M., “Numerical study on the operating performances of a novel frost-free air-source heat pump unit using three different types of refrigerant”, Elsevier, Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 248-258.
- [12]. Liu S., Li Z., Dai B., Zhong Z., Li H., Song M., Sun Z., “Energetic, economic and environmental analysis of air source transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system for residential heating in China”, Elsevier, Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1425-1439.
- [13]. Fei L., Pingfang H., “Energy and exergy analysis of a ground water heat pump system”, Elsevier, Physics Procedia, 2012, 24: 169-175.
- [14]. Saçkan Ö., “Deniz suyu kaynaklı ısı pompası sisteminin termodinamik analizi: bir otel uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2018.
- [15]. Chata F.B., Chaturvedi S.K., Almogbel A., “Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants”, Elsevier, Energy Conservation and Management, 2005, 46: 2614-2624.

- [16]. Afshari F., Çomaklı Ö., Karagöz Ş., Zavaragh H.G., “A thermodynamic comparison between heat pump and refrigeration device using several refrigerants”, Elsevier, Energy&Buildings, 2018, 168: 272-283.
- [17]. Clean Energy Project Analysis, RETScreen® Engineering & Cases Textbook, “Ground-source heat pump project analysis”, Minister of Natural Resources Canada, Canada, M39-110/2005E-PDF, 2005.
- [18]. IncognitoHeatCo. “Heatpumps”. <https://www.incognitoheatco.com/heat-pumps-scotland>. Erişim tarihi Mart 21, 2020.
- [19]. Kıncay O., “Isı Pompaları”, Ders Notları (Yayımlanmamış), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [20]. Altinkaynak, M., Olgun, E., Şencan Şahin, A., “R22 ve Alternatifleri R407C, R410A ve R448A Soğutkanlarının Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistemlerindeki Enerji ve Ekserji Performanslarının Karşılaştırmalı İncelenmesi”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2019, 6(3); 659-667.
- [21]. Çengel Y.A., Boles M.A., “Termodinamik: Mühendislik Yaklaşımıyla”, Palme Yayıncılık, İzmir, Türkiye, 2008.
- [22]. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Sixth Edition, Wiley, USA, 2007.
- [23]. Turgut O.E., “Soğutucular için kaynama ısı transferi denklemlerinin irdelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2011.
- [24]. Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I., “Handbook of Heat Transfer”, Third Edition, McGraw-Hill, USA, 1998.
- [25]. Gomri R., Karoune N., Khellaf N., “Farklı Transkritik CO<sub>2</sub> Soğutma Çevrimlerinin Enerji ve Ekserji Analizleri”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 5(2); 547-555.
- [26]. Kotas T.J., “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Butterworths, Britain, 1985.
- [27]. Dincer İ., Rosen M.A., “Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development”, Elsevier, USA, 2007.
- [28]. Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi, “2021 Yılı Elektrik Tarifeleri”, <https://www.tedas.gov.tr/sx.web.docs/tedas/docs/elektriktarifeleri//2021OcakElektrikTarifeleri.pdf>. Erişim tarihi Mart 12, 2021.
- [29]. NIBE. <https://www.nibe.eu>. Erişim tarihi Mart 12, 2021.