

YATAY TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN DENEYSEL UYGULAMASI

Hikmet ESEN

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü

Mustafa İNALLI

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

Mehmet ESEN

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü

Yer enerji sitemleri olarak da bilinen Toprak Kaynaklı Isı Pompası (TKIP) sistemleri son on yılda Türkiye' de yeni bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, bir test odasının ısıtılması için 2 m derinliğinde yatay ısı değiştiricili TKIP sisteminin performansı belirlenmiştir. TKIP sisteminin, Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde bulunan test odası için tasarımı ve imali yapılarak ısı pompası ünitesinin performansı (COPI) ve ısı pompası sisteminin performansı (COPS) bulunmuştur. Odanın ısıtma yükü, 2.55 kW'dır. Deneyler 2003 yılının Şubat ayında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, pis su rogarının salamura sıcaklıkları üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Anahtar sözcükler : Toprak kaynaklı ısı pompası, ısıtma etkinlik katsayısı

Ground source heat pump (TKIP) systems, also known, as geothermal heat pumps and earth energy systems are a promising new technology that has been used for the last decade in Turkey. In this study, the performance evaluation of a TKIP system with a horizontal heat exchanger (depth 2 m) used for heating a test room is presented. The TKIP system connected to a test room in the Technical Education Faculty at Fırat University, Elazığ, was designed and constructed to determine the COP of the heat pump unit and values COPs of the heat pump system. The heating load of the test room was 2.55 kW at design conditions. The experiments were performed in February 2003. In addition, the effect of sewage system on the brine temperatures has been investigated.

Keywords: Ground source heat pump, coefficient of performance for heating

GİRİŞ

Toprak Kaynaklı veya Jeotermal Isı Pompaları, toprağın içindeki sıcaklığın kararlı değişmesi ve soğuk iklimlerde performansını yüksek seviyede tutması nedeniyle enerjinin kullanımında daha etkili sonuçlar ortaya çıkarır. Bu sebeplerden dolayı birçok ülkede Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının (TKIP) kullanımı Isıtma - Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) endüstrisi tarafından desteklenmektedir. Günümüzde, TKIP'ların kullanımının düşük oranda olmasının nedeni, toprak ısı değiştiricisinin projelendirilme yönteminin henüz tam anlamıyla ortaya konulamamasından ve toprak ısı değiştiricisinin maliyetinin yüksek olmasıdır.

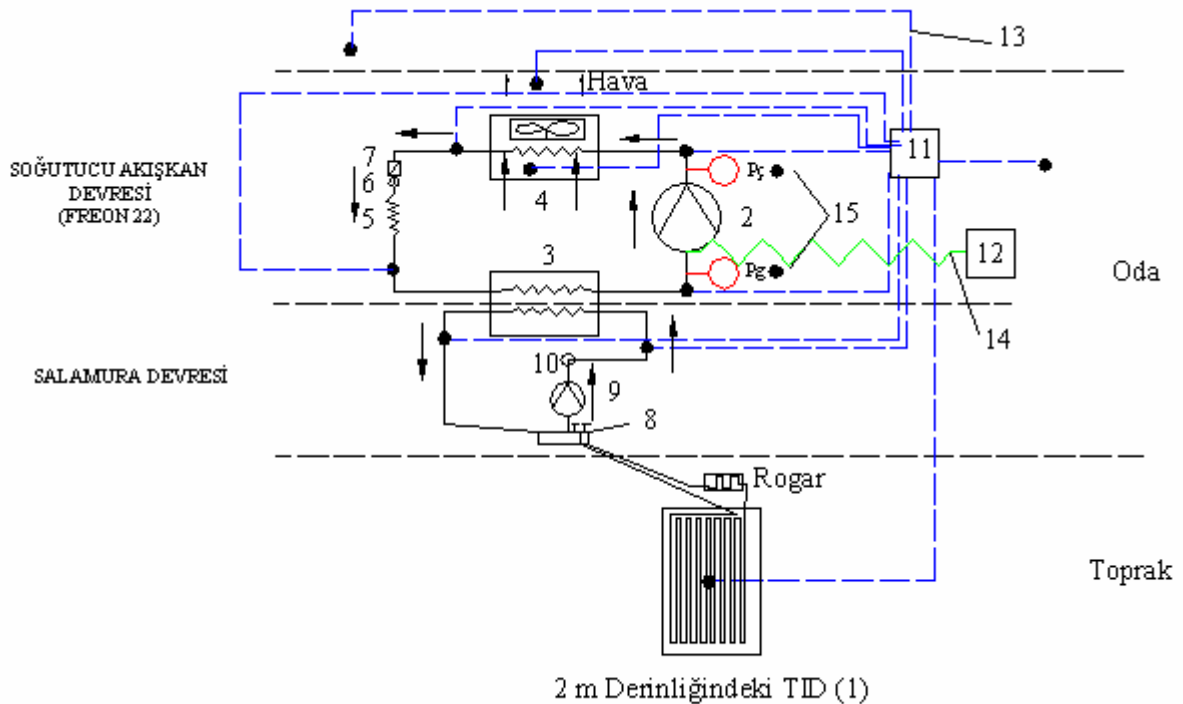
TKIP endüstrisi ülkemiz için oldukça yenidir. Son birkaç yıldır, bazı şirketler yurt dışından ithal ettikleri TKIP'ları ülkemizde kullanımlarını artırmak için yoğun çaba harcamaktadırlar. Bununla beraber, kurulan TKIP'ların sayısı, yurt dışında kurulanlarla kıyaslanmayacak ölçüde azdır. TKIP'lar, 1912 yılında ilk olarak İsviçre patenti ile tanıtılmıştır. Daha sonra, termodinamik açıdan önemi, ısı kaynağı olarak toprağa gömülen metal serpantinler içinde salamura dolaştırılarak, 1940'lı yıllarda çarpıcı şekilde gösterilmiştir. Serpantinlerin korozyon sorunu, toprak serpantinlerini kullanışsız kılmış ve Hava Kaynaklı Isı Pompası sistemlerinin gelişimini zorlamıştır. Daha sonraları, plastik borular kullanılarak, korozyon sorunlarının üstesinden gelinmiş ve TKIP'ların üzerine araştırmalar hızlanmıştır. Amerika'da ise TKIP teknolojisine olan ilgi, 1940 - 1950 yıllarında başlamıştır [1]. Partin [2], ısı pompaları için kapalı çevrimli toprak ısı değiştiricisinin boyutlandırılması üzerine bir çalışma yapmış ve göz önüne aldığı bir toprak kaynağı için toplam iletkenliğin ölçülmesiyle ilgili olarak bir yöntem vermiştir. Kavanaugh [3], güney iklimlerde toprak ve su kaynaklı ısı pompalarının tasarımına yönelik esasları vermiştir. Bu sistemlerin nasıl daha verimli ve güvenilir olacağı konusunda metotlar vermiştir. Mei ve Baxter [4], kurmuş olduğu deney düzeneğinde doğrudan genleşmeli toprak ısı değiştiricisinin bazı yarar ve sakıncalarını deneysel olarak belirlemişlerdir. Sulatisky ve Van der Kamp [5], Kanada' da (Saskatchewan) konutlar için beş TKIP' ı değerlendirmişlerdir. M. Bojic vd. [6], toprak içerisinde farklı iki malzemeden PVC ve çelikten yapılmış borulardan hava geçirerek hava - toprak ısı değiştiricisi düzeneğini tasarlamışlar, yaz ve kış şartlarında çalıştırmışlardır. Healy ve Uğursal [7], bir bilgisayar programı yaparak değişik sistem parametrelerinin, TKIP' ın performansına olan etkisinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. M. M. Salah El- Din [8], Arabistan'da toprak sıcaklığının derinliğe bağlı olarak periyodik değişimini tahmin ederek iki yaklaşım geliştirmiştir. Bunlar; Sinüs dalgası ve Fourier serisi yaklaşımıdır. W. H. Leong vd. [9], üç farklı toprak türü için beş değişik doyma derecesinde bilgisayar simülasyonu yapmışlardır. TKIP performansının büyük ölçüde toprağın nem içeriğine ve toprak türüne bağlı olduğunu, topraktaki nem azalışının TKIP' ın performansını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Phetteplace ve Sullivan [10], toprak ısı değiştiricisinin ve soğutma kulesinin birlikte kullanıldığı (böylece gerekli olan toprak ısı değiştiricisinin miktarının azaltıldığı) hibrit bir ısı pompasının performansını incelemişlerdir. Spilker [11], düşey toprak ısı değiştiricili (dört farklı delik çapı yerleşiminde) kullanılan farklı dolgu malzemesinin etkisi ve ısıl iletkenlik testini kullanarak, düşey toprak ısı değiştiricisinin tasarımı üzerine çalışmıştır. Kavanaugh [12], bilinen TKIP sistemleri için bağlantı elemanları ve boru hatlarındaki basınç kaybı ile ilgili diyagramları vererek, boru hattı tasarımını incelemiştir. M. Piechowski [13], yatay tip toprak ısı değiştiricisinin tasarımının daha doğru ve hesaplamalarının daha kolay olacağı simülasyonlar yapmıştır. Analitik çalışmada implicit (kapalı) ve explicit (açık) yöntemler kullanılmış ve bu iki yöntemin kıyaslanması yapılmıştır. Sonuçta implicit formülasyonun bu tür çalışmalarda daha iyi bir yöntem olduğunu göstermiştir. V. R. Tarnawski vd. [14], yüksek sıcaklıklardaki toprağın ısıl iletkenliğinin tahmini için iki yöntem geliştirmişlerdir. Michel A. Bernier [15], düşey toprak ısı değiştiricili TKIP sistemini kullanarak ısı pompasının yıllık performansını saatlik zaman dilimlerinde yapılan simülasyonlarla göstermeyi amaçlamıştır. Daha sonra uygun denklem çözümlerinin kullanılmasıyla toprak ısı transfer denklemleri çözülmüş ve ısı pompası performansı kısa süreli simülasyonlarla bulunmuştur. M. Singh Sodha [16], yer ve yer altı yapılar arasındaki dinamik ısı transferi için keyfi zaman aralıklarında simülasyon yapmıştır. Deneysel datalar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, yatay tip toprak ısı değiştiricisi şeklindeki TKIP sisteminde toprak ısı değiştiricisi serpantinleri 2 m derinliğinde toprağa gömülmüştür. Toprak ısı değiştiricisi boruları arasındaki

mesafe 0.3 m olup $3 \times 5 = 15 \text{ m}^2$ alandaki bölgeye toplam 50 m boru serilmiştir. TKIP sisteminin performans değerlerinin değişimi incelenmiştir. Ayrıca toprak ısı değiştiricisinin rogar ile bağlantısı yapılarak salamura sıcaklıklarının değişimi de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiklerle verilerle tartışılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Kurulan ısıtma amaçlı ısı pompası Şekil 1'de görülmektedir. Isıtma sistemi ile Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi zemin katında bulunan bir odanın ısıtılması hedeflenmiştir. Isıtılan oda 5.8 m boyunda 2.8 m eninde ve 3.4 m yüksekliğinde olup, fan kullanılarak ısı pompası ile ısıtılması tasarlanmıştır. Odanın ısıtma yükü 2.55 kW olarak hesaplanmıştır. Odanın ısıtılması için gerekli ısının tamamının, ısı kaynağı olan topraktan sağlanması düşünülmüştür. Kompresör seçimi için gerekli kompresör gücü, soğutma mevsimi için, 1.25 kW bulunmuştur. Bu sistem için, 2 HP (1.4 kW)'lık FH 5524 F tipi tek fazlı kompresör seçilmiştir. Buharlaştırıcının kapasitesi odanın soğutma yükü 3.18 kW'a göre, Bakır' dan imal edilen ve iç soğutucusu da Alüminyum olan TTE - 3 model numaralı, kapasitesi Freon 22 gazı ile çalıştığında 6.98 kW olan buharlaştırıcı seçilmiştir. Freon 22 gazı soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır. Hava soğutmalı HS 10 model, 10 m^2 'lik kapasitesi, 3.770 kW'lık yoğuşturucusu kullanılmıştır. Yoğuşturucu fanı 160 W gücünde olup, fanın debisi 0.6 kg/s'dir. Toprak ısı değiştiricisi içindeki salamurayı buharlaştırıcıya getirip buharlaştırıcıdan da tekrar toprak ısı değiştiricisine gitmesini sağlayan Alarko NPVO-26-P tipi üç hızlı pompa kullanılmıştır. 3/8" lik Carly firmasının DCY 083 tipi kurutucusu kullanılmıştır. Kılcal borular, küçük kapasiteli soğutma sistemlerinde termostatik genişleme valfinin yerine kullanılmaktadır ve bu çalışmada da kılcal boru kullanılmıştır. Şekil 1'de deney düzeneği ve ölçüm alınan noktaları görülmektedir.



- 1- 2 m derinliğindeki TID (1)
- 2- Kompresör
- 3- Buharlaştırıcı (ısıtma durumunda)
- 4- Yoğuşturucu (ısıtma durumunda)
- 5- Kılcal boru (çapı 1.5 mm)
- 6- Gözetleme camı
- 7- Kurutucu (Dryer)
- 8- Musluk kollektörü
- 9- Sirkülasyon pompası
- 10- Su saati
- 11- Sıcaklık ölçer
- 12- Güç ölçer
- 13- Bakır konstantan ısı çiftleri
- 14- Elektrik kablosu
- 15- Kompresör giriş ve çıkışındaki manometreler

Şekil 1. Deney Düzeneği Üzerindeki Ölçüm Noktaları

Şekil 2'de oda içerisinde kurulan sistem ve Şekil 3'de ise toprak ısı değiştiricisi görölmektedir. Görüldüğü gibi boruların pis su rogarına girmesi de sağlanmıştır.



Şekil 2. Deney Düzeneğinin Fotoğrafı



Şekil 3. Toprak Isı Değiştiricisinin Fotoğrafı

Kompresörün düşük ve yüksek basınç kısmına otomatik olarak kumanda edebilen presostat monte edilmiştir. Toprak ısı değiştiricisinde, ısı iletim katsayısı 0.35 W/mK olan ve Dizayn Grup tarafından üretilen 16x2 mm ebadında PX-b Cross Link (çapraz bağlı) boru kullanılmıştır. Topraktaki ısının ısı pompasına veya ısı pompasından toprağa taşınması toprak ısı değiştiricisinde dolaştırılan akışkan ile olur. Su, termodinamik ve ekonomik bakımdan oldukça uygun bir akışkandır. Ancak donma sıcaklığının 0 °C olması birçok uygulamada problem çıkarır. Özellikle toprak sıcaklığının düşük olduğu bölgelerde, donma problemine karşı donma sıcaklıkları daha yüksek olan akışkanlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan su % 25 antifirizlidir [17].

Deney sırasında ölçülen değerler, sıcaklık, basınç, debi ve güçtür. Deneyler süresince, sistemin çeşitli noktalarında soğutucu akışkan, salamura ve toprağın 2 m derinliğindeki sıcaklığı Bakır-Konstantan ısı çiftleri kullanılarak ölçülmüştür. Sistemde, Şekil 1'de gösterilen ölçüm yapılan noktaların verildiği yerlerde, sıcaklık ölçmek için bakır-konstantan ısı çiftleri kullanılarak Elimko firmasının üretmiş olduğu Elimko 6000 sıcaklık ölçer ile belirli zamanlarda değerler kaydedilmiştir. Sistemde kullanılan dijital termostatlı termometre, ısı pompası sisteminin devreye girip çıkmasını sağlayarak, odanın sıcaklığı istenilen seviyede tutulmuştur. XR20C 32x74 mm ölçülerinde, normal sıcaklıklarda soğutma uygulamaları için tasarımı yapılmış zamana göre defrost fonksiyonlu bir termostat olup dahili timer ile kompresörü durdurarak defrost yapar. Dış ortam sıcaklığı ise civalı termometre ile ölçülmüştür. Ayrıca yoğuşturucunun ön ve arka kısmına ısı çiftleri bağlanarak yoğuşturuya giren ve çıkan havanın sıcaklığı ölçülmüştür. Isı pompası sisteminde kompresörün emme ve basma hattına manometreler bağlanarak basınçlar ölçülmektedir. Toprak ısı değiştiricisinde dolaşan salamuranın kontrolü vanalı musluk kollektörü ile yapılmaktadır. Deney sırasında sistemde dolaşan salamuranın hacimsel debisini ölçmek için dolaşım pompasından sonra sisteme su saati yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerde sisteme akım, gerilim ve Cos ϕ ölçer bağlanarak sistemin çektiği toplam güç hesapla bulunmuştur [17].

BULGULAR ve DEĞERLENDİRME

Analizde, sırasıyla TKIP'in ısıtma etkinlik katsayısı (COPI) ile sistemin toplam etkinlik katsayısı (COPS), aşağıda verilen Eşitlik 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmıştır, COPI teorik bir değerdir, sadece kompresörün gücü hesaba katılarak hesaplanmıştır, COPS ise tüm sistemin ısıtma etkinlik katsayısıdır, sistemin şebekeden çektiği toplam güç göz önüne alınarak hesap yapılmıştır [18].

$$COPI = \frac{\dot{m}_{hava} C_{p,hava} (Th_2 - Th_1)}{W_3} \quad (1)$$

$$COPS = \frac{\dot{m}_{hava} C_{p,hava} (Th_2 - Th_1)}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (2)$$

Burada;

\dot{m}_{hava} - Yoğuşturucudan geçen havanın debisi, (kg/s)

$C_{p,hava}$ - Havanın özgül ısısı, 1.004, (kJ/kgK)

T_{h2} - Yoğuşturucu fanı tarafından odaya üflenen havanın sıcaklığı (K)

T_{h1} - Yoğuşturucu fanı tarafından odadan emilen havanın sıcaklığı (K)

W_1 - Yoğuşturucu fanının şebekeden çektiği güç (kW)

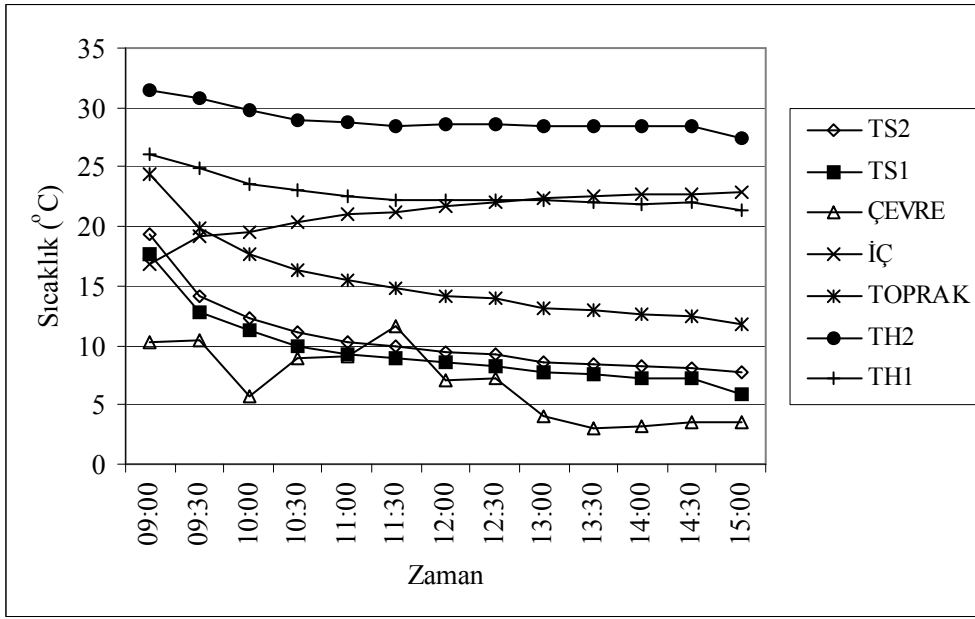
W_2 - Salamura sirkülasyon pompasının şebekeden çektiği güç (kW)

W_3 - Kompresörün şebekeden çektiği güç (1.1 kW) olarak tanımlanmaktadır.

Deneyler 2003 yılının Şubat ayının belirli günlerinde yapılmıştır. 09:00 - 15:00 saatleri arasında yapılan deneylerde kompresör, dolaşım pompası ve yoğuşturucu fanı sürekli çalışmıştır. Sistemin şebekeden çektiği toplam güç 1416 W, akım ise 7 A'dır. Odanın sıcaklığı belirli sıcaklıklar arasında tutulmamıştır. Şekil 4'de Şubat ayında ölçülen sıcaklıkların aylık ortalama değişimleri verilmiştir. Şekildeki TS2 salamuranın toprak ısı değiştiricisinden dönüş sıcaklığını, TS1 salamuranın toprak ısı değiştiricisine gidiş sıcaklığını, ÇEVRE dış ortam sıcaklığını, İÇ odanın sıcaklığını, TOPRAK toprağın 2 m derinliğindeki sıcaklığını, TH2 yoğuşturucudan odaya üflenen havanın sıcaklığını, TH1 yoğuşturucu tarafından odadan emilen havanın sıcaklığını göstermektedir.

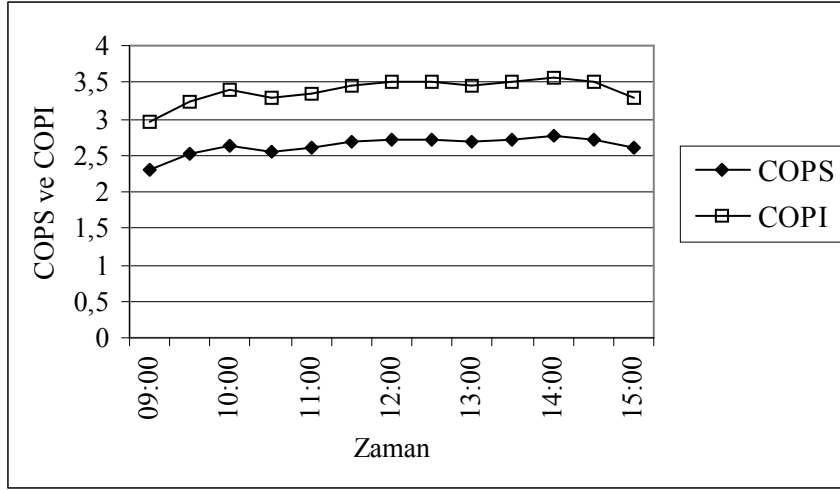
Deneylere başlanan saat 09:00'da ortalama iç ortam sıcaklığı 16.8 °C civarındayken deneylerin

bittiği saat 15:00' de 22.9 °C' ye ulaşmıştır. Yoğuşturucudan üflenen havanın sıcaklığı zamanla azalmıştır, çünkü yoğuşturucu fanı sürekli çalışmıştır. Toprakta ısıyı çekmeye yarayan salamuranın sıcaklığı da deney yapılan süre boyunca azalmıştır, çünkü topraktan ısı çekildiğinde toprak ısısını kaybeder ve buna bağlı olarak salamura sıcaklıkları da Şekil 4'den görüldüğü gibi azalır. Başlangıçta 24.4 °C olan toprak sıcaklığı 11.8 °C'ye düşmüştür. 12.6 °C düşüş gözlenmiştir. Dış hava sıcaklığı da 10.2 °C'den 3.6 °C'ye düşmüştür. Sıcaklık düşüşü 6.6 °C'dir. Topraktaki sıcaklık düşüşününün daha az olması gerekir, çünkü toprak havaya göre daha karardır, burada bu sonucun elde edilememesinin sebebi toprakta ölçüm yapan probun borulara yakın olması ve salamura sıcaklığından etkilenmesidir. Ancak deney yapılan süre boyunca ortalama toprak sıcaklığı 15.35 °C iken ortalama dış hava sıcaklığı 6.74 °C'dir. Buradan da toprağın daha iyi bir ısı kaynağı olduğu görülmektedir. Toprak sıcaklığı kararlı duruma gelirken dış hava sıcaklığı gelişigüzel bir değişim izlemektedir.



Şekil 4. 2003 Yılı Şubat Ayı Çeşitli Değerlerin Ortalama Sıcaklık Değişimleri

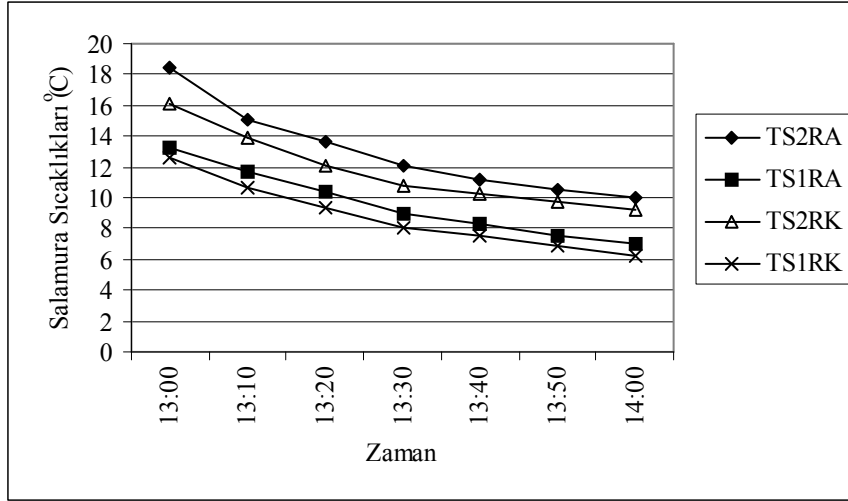
Şekil 5'de Şubat ayında Eşitlik 1 ve 2 ile hesaplanan ısı pompası ısıtma etkinlik katsayısı (COPI) ve ısı pompası sisteminin ısıtma etkinlik katsayısı değişimleri verilmiştir. Günlük ortalama COPI değeri 3.38, COPS değeri 2.62'dir, gün içinde bu değerler zamanla azalmıştır ve literatürdeki değerlerden düşüktür. Bunun sebebinin tasarımdaki hatalardan kaynaklandığı düşünülmelidir.



Şekil 5. COPI ve COPS'in Zamanla Değişimi

2003 yılının Ocak ayında toprak ısı değiştiricisinden çıkan boruların Teknik Eğitim Fakültesinin pis su rogarından geçirilerek ortaya çıkan değişiklik incelenmiştir. Topraktan çıkan boruların bir ucuna vana bağlanarak rogar kısmı istenildiği zaman devre dışı bırakılabilmektedir. Şekil 6' da toprak ısı değiştiricisinin rogara bağlantılı ve bağlantısız hallerinde salamura sıcaklıklarının bir saatlik değişimi verilmiştir. Şekilde TS2RA rogara bağlantı varken salamuranın topraktan dönüş sıcaklığını, TS1RA rogara bağlantı varken salamuranın toprağa gidiş sıcaklığını, TS2RK rogarla bağlantı yokken başka bir deyimle sadece toprak kısmından faydalandığımız durumdaki salamuranın topraktan dönüş sıcaklığını, TS1RK rogarla bağlantı olmaksızın salamuranın toprağa gidiş sıcaklığını göstermektedir.

Şekil 6'dan görüldüğü gibi rogara bağlantı yapıldığı durumda başka bir deyimle kapalı çevrimle borular içersinden geçen salamuranın sıcaklığının, sadece toprak bağlantılı durumdaki salamura sıcaklığından yüksek çıktığı görülmüştür. Sırasıyla 1 saatlik ortalama TS2RA, TS1RA, TS2RK ve TS1RK sıcaklıkları 12.98, 9.58, 11.72 ve 8.77 °C olarak ölçülmüştür. Rogar, topraktan çıkıldıktan sonra bir ısıtıcı gibi görev yapmıştır. Bu da fazla maliyet gerektirmeden ısı kaynağı sıcaklığının arttırılmasını sağlamıştır. Sistem uygun bir şekilde tasarlanıp kurulursa 3-4 yılda yatırım ve işletme maliyetini amorti eder.



Şekil 6. Salamura Sıcaklıklarının Toprak ve Rogara Bağlantı Durumundaki Değişimi

Sonuç olarak; toprağın, temiz bir enerji kaynağı olması ve yıl boyunca toprak sıcaklığının kararlı olması, ısı kaynağı olarak, ısı pompalarında kullanılmasını cazip hale getirmiştir. İlk maliyeti pahalı olmasına rağmen, yurt dışında çok yaygın olarak kullanılan toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerine, ülkemizde ve özellikle kışı sert geçen ilimizde de gereken önem verilmeli ve bu amaç için; maliyetlerin düşürülmesi ve performans değerlerinin iyileştirilmesi konusunda çalışmalar hızlandırılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı maddi bakımdan 616 nolu proje kapsamında destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Couvillion, R. J.**, "Field and Laboratory Simulation of Earth - Coupled Heat Pump Coils", Ashrae Transactions, 2b, 91, 1326-1334, 1985.
2. **Diz, T.**, "Minimum Enerjili Bina Tasarımı (Toprak enerjisiyle)", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-5, 2001.
3. **Kavanaugh, S.**, "Design Considerations for Ground and Water Source Heat Pumps in Southern Climates", Ashrae Transactions, 1, 95, 1139-1149, 1989.
4. **Mei, V.C.**, "Experimental Study of Direct-Expansion Ground Coil Heat Exchangers", Ashrae Transactions, 1, 96, 821-828, 1990.
5. **Sulatisky, M.T. and Van Der Kamp, G.**, "Ground-Source Heat Pumps in the Canadian Prairies", Ashrae Transactions, 1, 97, 374-385, 1991.
6. **Bojic, M., Papadakis, G. and Kyritris, S.**, "Energy From a Two Pipe, Earth-To-Air Exchanger", Energy J., 24, 519-523, 1999.
7. **Healy, P.F. and Ugursal, V.I.**, "Performance and Economic Feasibility of Ground Source Heat Pumps in Cold Climate", International Journal of Energy Research, 21, 857-870, 1997.
8. **Salah El-Din, M.M.**, "On the Heat Flow Into the Ground", Renewable Energy, 18, 473 - 490, 1999.
9. **Leong, W.H., Tarnawski, V.R. and Aittomaki, A.**, "Effect of Soil Type and Moisture Content on Ground Heat Pump Performance", Int. J. Refrig., 21, No. 8, 595-606, 1998.

10. **Phetteplace, G. and Sullivan, W.**, "Performance of a Hybrid Ground-Coupled Heat Pump System", *Ashrae Transactions*, 1b, 104, 763-770, 1998.
11. **Spilker, E.H.**, "Ground Coupled Heat Pump Loop Design Usign Thermal Conductivity Testing and the Effect of Different Backfill Material on Vertical Bore Length", *Ashrae Transactions*, 1b, 104, 775-779, 1998.
12. **Kavanaugh, S.**, "Development of Design Tools for Ground-Source Heat Pump Piping", *Ashrae Transactions*, 1b, 104, 1932-1937, 1998.
13. **Piechowski, M.**, "Heat and Mass Transfer Model of a Ground Heat Exchanger: Theoretical Development", *International Journal Of Energy Research*, 23, 571-588, 1999.
14. **Tarnawski, V.R., Gori F., Wagner, Buchan, G.D.**, "Modelling Approaches to Predicting Thermal Conductivity of Soils at High Temperatures", *International Journal Of Energy Research*, 24, 403-423, 2000.
15. **Michel A. Bernier**, "Ground-Coupled Heat Pump System Simulation", *Ashrae Transactions*, 1, 605-616, 2001.
16. **Sodha, M.S.**, "Simulation of Dynamic Heat Transfer Between Ground and Underground Structures", *International Journal of Energy Research*, 25, 1391-1394, 2001.
17. **Esen, H., İnallı, M.**, "Yatay Isı Değişiricili Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi", I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli, Mayıs, 2003, (baskıda).
18. **Hepbaslı, A., Akdemir, O. and Hancıoğlu, E.**, "Experimental Study of A Closed Loop Vertical Ground Source Heat Pump System", *Energy Conversion and Management*, 44, 527-548, 2003.