

**TOPRAK KAYNAKLI
ISI POMPASI SİSTEMİNİN
EKONOMİK ANALİZİ**

Sedat DUMLU

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doç. Dr. Kadir BAKIRCI
2012
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN
EKONOMİK ANALİZİ**

Sedat DUMLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2012**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN EKONOMİK
ANALİZİ

Doç. Dr. Kadir BAKIRCI danışmanlığında, **Sedat DURLU** tarafından hazırlanan bu çalışma 10/09/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oy birliği (3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Kadir BAKIRCI

İmza :

Üye : Doç. Dr. Kemal ÇOMAKLI

İmza :

Üye : Doç. Dr. Süleyman KARSLI

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI SİSTEMİNİN EKONOMİK ANALİZİ

Sedat DUMLU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kadir BAKIRCI

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve avantajları her geçen gün artmaktadır. Geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine alternatif olan ısı pompası sistemleri, son yıllarda en çok rağbet gören sistemler arasındadır. Isı pompası sistemlerinin konut ısıtılması ve soğutulmasında kullanımı, doğal kaynakları korumak ve çevre kirliliğini azaltmak için önemlidir. Ayrıca, ısı pompaları geleneksel sistemlere kıyasla ısı enerjisi giderini azaltmaktadır. Türkiye'deki ısı pompası sektöründeki gelişmeler ile enerji ihtiyacımızın yerli kaynaklardan sağlanabileceği bir gerçektir. Böylelikle ülkemiz ekonomisine önemli bir etki sağlanabilir.

Bu çalışmada, Erzurum ilindeki bir konutun TS 825'e göre ısı kayıpları hesaplanmış ve ısıtma sezonunda toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) sistemleri ve mevcut sistemler ile ısıtılması halinde bu konutun ekonomik analizi yapılmıştır. Ayrıca, fosil kökenli yakıtların kullanılması durumundaki emisyon (CO₂) değerleri hesaplanmıştır.

2012, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, toprak kaynaklı ısı pompası, ekonomik analiz, soğuk iklim bölgesi

ABSTRACT

MS Thesis

THE ECONOMIC ANALYSIS OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM

Sedat DUMLU

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

The importance of renewable energy researches and their advantages is increasing every day. The heat pump systems which are an alternative to traditional heating and cooling systems are among the most popular systems in recent years. Using in residential heating and cooling to the heat pump system is important to conserve natural resources and reduce environmental pollution. Also, the heat pumps are reducing the heating energy cost in comparison with conventional systems. It is reality that our energy demand can be supplied from native resources to with development in the heat pump industry in Turkey. Therefore, an important effect for the economy of our country can be delivered.

In this study, the heat losses of a house in the province of Erzurum according to TS 825 are calculated and the economic analysis of this house is performed when it is heated with ground source heat pump and conventional systems in heating season is performed. Additional, the value of emission (CO₂) delivering when fossil oils are used are computed.

2012, 66 pages

Keywords: Renewable energy sources, ground source heat pump, economic analysis, cold climate region

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırladığım ve sonuçlandırdığım bu çalışmada, başlangıçtan nihayi aşamaya gelene kadar sonsuz katkıları ve her zaman teşvik edici destekleri olan, araştırmalarımı sabırla yönlendiren, bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Kadir BAKIRCI'ya, sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü öğretim görevlilerinden hocalarım, Sayın Doç. Dr. Kemal ÇOMAKLI ve Sayın Doç. Dr. Süleyman KARSLI'ya, eksiklerin tamamlanması konusundaki yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Votek San. Tic.'ten, Makine Mühendisi Sayın Bünyamin TUTAŐ'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi çalışmalarım süresince de göstermiş oldukları büyük sabır ve özveriyle bana her konuda destek olan değerli ailemin tüm fertlerine teşekkürü bir borç bilirim.

Sedat DURLU

Ağustos 2012

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

BD	Bugünkü değer
COP ₁	Isı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı
COP _s	Isı pompası sistemi ısıtma tesir (performans) katsayısı
F ₁	Isıtma çalışma faktörü
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
i	İndirim veya banka faiz oranı
İM	İşletme maliyeti
İYM	İlk yatırım maliyeti
K _{top}	Toplam ısı transfer katsayısı (W/°C)
L	kW başına gerekli olan boru uzunluğu (m/kW)
n	Yıl
R _b	Boru direnci (m°C/W)
R _t	Toprak direnci (m°C/W)
T	Sıcaklık (°C)
T ₁	Yılın en düşük toprak sıcaklığı (°C)
T _{min}	Üniteye (evaporatöre) giren minimum akışkan sıcaklığı (°C)

Kısaltmalar

D.M.İ.G.M.	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
E.İ.E.İ.G.M.	Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü
HVAC	Isıtma-havalandırma ve iklimlendirme sistemleri
JKIP	Jeotermal kaynaklı ısı pompaları
KTKIP	Kurulum toprak kaynaklı ısı pompası
LPG	Likit petrol gazı
TİD	Toprak ısı değiştiricisi
TKIP	Toprak kaynaklı ısı pompası

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları	2
2. KURAMSAL TEMELLER	11
2.1. Enerji Kaynakları	11
2.1.1. Güneş	11
2.1.2. Toprak	12
2.1.3 Erzurum'un toprak grupları açısından yapısı	14
2.1.4. Erzurum'da toprak sıcaklığı	14
2.2. Toprak Isı Değiştiricisinin Tasarımı	17
2.3. Isı Pompaları	18
2.3.1 Buhar sıkıştırırmalı ısı pompaları	21
2.4. Soğutucu Akışkanlar (Soğutkanlar)	25
2.5. Buhar Sıkıştırırmalı Isı Pompasının Termodinamiği	26
2.6. Isı Pompası Uygulamaları	31
2.7. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sistemlerinin Uygulama Alanları	33
2.8. Ekonomik Analiz	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM	38
3.1. Toprak Isı Değiştiricisi	39
3.2. Isı Pompası	39
3.3. Isıtma Ünitesi	40
3.4. Örnek Bina ve Isı Kayıplarının Hesaplanması	40
3.4.1. Bin yöntemi	40
3.4.2. Örnek bina ısı kayıpları	43

3.5. Toprak Isı Değiştiricisinin Uzunluğunun Hesaplanması.....	43
3.6. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Tasarımında Önemli Noktalar	47
3.7. Maliyete Etki Eden Faktörler	48
3.7.1. Boru cinsi	48
3.7.2. Boru çapı	48
3.7.3. Salmura cinsi	48
3.7.4. Toprak dolgu malzemesi	49
3.7.5. Borular arası mesafe	49
3.7.6. Gömme derinliği.....	49
3.8. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	50
3.9. Bugünkü Değer (BD)	51
3.10. Birim Isıtma Enerjisi için Yakıtların Yıllık Maliyet Analizi	51
4. ARAşTIRMA BULGULARI ve TARTIşMA.....	55
4.1. Ekonomik Analiz Sonuçları	55
4.2. Emisyon Analizi	57
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİş	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Ters Carnot çevrimli ısı pompasının T-s diyagramı	27
Şekil 2.2. İdeal buhar sıkıştırırmalı çevrimin şematik resmi ve T-s diyagramı	28
Şekil 2.3. İdeal buhar sıkıştırırmalı çevrimin P-h diyagramı	29
Şekil 2.4. Gerçek buhar sıkıştırırmalı çevrimin P-h diyagramı ve hal değişim noktaları	30
Şekil 3.1. Toprak kaynaklı ısı pompasının şematik gösterimi	39
Şekil 3.2. Dikey toprak kaynaklı ısı pompası sistemi boru yerleşimi.....	46
Şekil 3.3. Birim enerji maliyet analizi	53
Şekil 4.1. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ve diğer ısıtma sistemleri için emisyon değerlerinin karşılaştırılması.....	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Erzurum iline ait güneşlenme süresi ve güneş ışınımı miktarları.....	12
Çizelge 2.2. Türkiye’de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli.....	12
Çizelge 2.3. Toprak cinsine bağlı olarak ısı çekme (veya soğutma) kapasitesi.....	13
Çizelge 2.4. Erzurum merkez ilçedeki toprak gruplarının dağılımı.....	15
Çizelge 2.5. Erzurum için 5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinlikteki toprak sıcaklıkları	16
Çizelge 3.1. Bina yapı malzemelerinin ısı ve fiziksel özellikleri	41
Çizelge 3.2. Erzurum için aylık ve yıllık toplam N_{bin} değerleri.....	42
Çizelge 3.3. Isıtma için çalışma faktörünün (F_I) hesabı (ısıtma denge noktası sıcaklığı= $18^{\circ}C$)	44
Çizelge 3.4. Toprak direncinin toprak şartları ve boru çapına göre değişimi.....	45
Çizelge 3.5. Boru çapına bağlı olarak boru dirençleri	45
Çizelge 3.6. Dikey toprak kaynaklı ısı pompasında boru boyu hesabı.....	46
Çizelge 3.7. Yakıtlara göre ısıtma maliyet karşılaştırması tablosu.....	52
Çizelge 4.1. Bugünkü değer yöntemi kullanılarak ısı pompası ve geleneksel sistemlerin örnek bir bina için 20 yıllık ekonomik analizi ($i=0,0125$).....	56

1. GİRİŞ

Enerji, geçmişten günümüze insanoğlu için önemini korumuştur. Fosil kökenli yakıt rezervleri için öngörülen sürelerin azaldığı, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının önem kazandığı günümüzde insanoğlu artık enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere ısı pompaları, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi gibi farklı kaynaklardan yararlanma yoluna gitmiştir. Bunlar içerisinde yer alan ısı pompası sistemleri, yenilenebilir enerji kaynağı olarak toprak, hava, su ve güneşi kullanabilmekte, ısıtma ve soğutma sistemlerinde uygulama ve kullanımı giderek artmaktadır.

Dünya nüfusunun artışına paralel olarak enerji ihtiyacının hızla arttığı günümüzde, mevcut olan enerjinin daha ekonomik olarak kullanılması ve atılan enerjinin yeniden kazanılmasında tercih edilen en önemli sistemlerin başında ısı pompası sistemleri gelmektedir. Isı pompaları, elektrikli ısıtmaya göre 2-6 kat daha avantajlı olmaları, çevre kirliliğine sebep olmamaları, aynı sistemde hem ısıtma hem de soğutma yapabilmeleri nedeniyle günümüzde yaygın bir kullanımı sözkonusudur.

Isı pompaları, sürekli gelişmekte olan enerji tasarruf sistemleri olarak bilinirler. Isı pompalarının, endüstride birçok uygulamalarının olmasına ve atık ısıyı kullanarak enerji ekonomisine katkı sağlamalarına rağmen, kazançlı görünen bu sistemlerin uygulamaya sokulmasında birtakım aksaklıklar yaşanmaktadır. Enerji maliyetlerinin artışı, verimli enerji üretimi için avantajlı sistemler olan ısı pompalarının önemini artırmıştır. Klasik enerji kaynakları fiyatları arttığı sürece, ekonomik alternatif enerji kaynağı olarak ısı pompalarının büyük ölçüde rağbet göreceği açıktır (Bakırcı vd 2007b).

Isı pompaları çevreden aldıkları yenilenebilir enerjiyi kullanılırlar. Yıl boyunca toprak altında, yeraltı sularında ve havada depolanan güneş enerjisi, elektrik enerjisi yardımı ile ısıtma enerjisine dönüştürülür. Isı pompaları tüm yıl ısıtma sağlayacak verime sahiptir (Viessmann 2009).

Jeotermal kaynaklı ısı pompaları (JKIP) olarak da bilinen toprak kaynaklı ısı pompaları (TKIP), daha yüksek enerji kullanım verimleri nedeniyle, geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine karşın tercih edilmektedirler.

1.1. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

Bu bölümde ısı pompası uygulamalarına yönelik yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler ve çalışmanın amacı doğrultusunda bu çalışmalardan çıkarılan sonuçlar yer almaktadır.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerin topraktan çekilen ısı enerjisi kullanılarak ısı pompalarına kaynak sağlanması prensibine dayanır.

Toprak kaynaklı ısı pompaları (TKIP), 1912 yılında ilk olarak İsviçre patenti ile tanıtılmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompaları 1950 yılında İngiltere ve ABD'de mahal ısıtılmasında kullanılmaya başlanmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompalarının kullanımı, Amerika'da ve Avrupa'da artmış, dünyada toplam olarak yaklaşık 500.000 adete ulaşmıştır. Ülkemizde ise, yaklaşık olarak son birkaç yıl içerisinde, özellikle konutların ve kısmen de ticari yapıların ısıtılması/soğutulmasında kullanılmaya başlanmıştır (Bakırcı vd 2007b).

Toprak kaynaklı veya jeotermal kaynaklı ısı 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 ısı pompalarının (TKIP) kullanımı ısıtma-havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) endüstrisi tarafından desteklenmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompaları ülkemizde bazı bölgelerde mahal ısıtılması-soğutulması ve sıcak su elde edilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle Marmara Bölgesinde, bu sistemler; birçok konutta ve ticari yapıda ısıtma/soğutma amaçlı olarak uygulamaya sokulmuştur.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri topraktaki enerjiyi kullanarak yaşam mahallerine ihtiyaca göre ısıtma veya soğutma enerjisi olarak aktarır. Yaz şartlarında mahaldeki sıcak hava ısı pompası vasıtasıyla daha soğuk olan toprağa atılır. Kışın toprak sıcaklığı dış ortam sıcaklığından yüksek olduğu için topraktaki ısıyı çeker. Toprak ısısının kışın dış havadan çok daha sıcak olması nedeniyle, sistem yüksek performans katsayısı (COPs) ile çalışır.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri, elektrik enerjisi ile ısıtma ve soğutma yapılmasını sağlayan sistemler olduklarından çevre dostu bir sistem olarak, özellikle ABD, Kanada, Almanya ve başta İsveç olmak üzere İskandinav ülkelerinde uzun zamandır kullanılmaktadır. Toprak kaynaklı ısı pompaları, toprağın içindeki sıcaklığın kararlı değişmesi ve soğuk iklimlerde performansını yüksek seviyede tutması nedeniyle enerjinin kullanımında daha etkili sonuçlar ortaya çıkarır (Şahin vd 2007).

Bu konuda literatürde farklı bölgeler için yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Kavanaugh (1989), Amerikanın güney iklimlerinde düşey toprak kaynaklı ısı pompalarının kabul edilebilirliğini ve işletme karakteristiklerini belirlemek üzere çalışmalarda bulunmuştur. Bu amaçla Alabama'daki 150 m²'lik bir konutta kurulan bir ısı pompasının soğutma ve ısıtma performansı araştırılmıştır.

Ataman (1991), toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminin tasarımı ve optimizasyonu konusunda bir çalışma yaparak, İstanbul Göztepe'de inşa edilen bir konutun toprak kaynaklı bir ısı pompası ile ısıtılmasını ele almıştır.

Healy and Ugursal (1997), tarafından, soğuk iklimlerde toprak kaynaklı ısı pompalarının ekonomik fizibilitesi ve performansı konusunda bir çalışma yapılmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompalarının yüksek enerji kullanım verimlerinden dolayı, bilinen ısıtma ve soğutma sistemlerine göre bir alternatif sistem olarak gösterilebileceğini ifade

etmişlerdir. Çalışmalarında toprak kaynaklı ısı pompalarının performansı üzerindeki çeşitli sistem parametrelerinin etkisi, bir bilgisayar modeli kullanılarak incelenmiştir. Sonuçta, sistem parametrelerinin performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve ekonomik olarak toprak kaynaklı ısı pompalarının bilinen sistemlere göre tercih edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir.

Abou-Ziyan vd (1997), düşük sıcaklık uygulamaları için güneş destekli R22 ve R134a ısı pompası sistemleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bilinen bir ısı pompası, güneşli bir hava ısıtıcısı ve iki seri bağlı güneş destekli ısı pompası sistemleri için simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

Petit and Meyer (1998), Johannesburg iklim şartlarında düşey toprak ısı değiştiricili (TID) toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) ile hava kaynaklı ısı pompasının (HKIP) ekonomik açıdan mukayesesini yapmışlardır. Ayrıca optimum sondaj derinliğini hesaplamışlardır. İşletme maliyetlerini çıkarmak için, aylık ısıtma-soğutma kapasitelerini ve performans değerlerini hesaplayarak, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, hava kaynaklı ısı pompası sisteminden daha ekonomik olduğunu bulmuşlardır.

Oerder and Meyer (1998), resmi bir kurumda kurulu olan toprak kaynaklı ısı pompasının bilinen hava kaynaklı ısı pompasına göre avantajlarını ortaya koymuşlardır.

Spilker (1998) yaptığı çalışmada, sondaj genişliği ve toprak dolgusunun, ısı değiştirici boyuna etkisini incelemiştir.

Phetteplace and Sullivan (1998), toprak ısı değiştiricisinin ve soğutma kulesinin birlikte kullanıldığı (böylece gerekli olan toprak ısı değiştiricisinin miktarının azaltıldığı) karma bir ısı pompasının ısıtma ve soğutma mevsimlerinde performansını incelemişlerdir.

Ersöz (2000) tarafından İzmir’de toprak kaynaklı bir ısı pompası sistemi ile bir hacmin soğutulması konusunda bir çalışma yapılmıştır.

Hepbaşı vd (2003), İzmir’de 50 m sondajla açılmış toprak kuyusuna gömülü U-tipi toprak ısı değiştiricili bir ısı pompasının ısıtma performans katsayısını incelemişlerdir. Ayrıca sistemin performansını ve kurulma maliyetini etkileyen parametreleri belirlemişlerdir.

İnallı ve Esen (2004), alan ısıtma için kullanılan yatay toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminin performansı üzerine, toprak ısı değiştiricisinin yüzeyden derinliği, topraktan ısı çeken akışkanın (salamuranın) debisi gibi parametrelerin etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışma, 2002-2003 ısıtma sezonunda Kasım-Nisan aylarında yapılmıştır. Yüzeyden 1 ve 2 m derinliklerdeki yatay toprak ısı değiştiricileri için sistemin ortalama performans katsayısı sırasıyla 2,66 ve 2,81 olarak hesaplanmıştır.

Bakırcı (2004), Erzurum’da kurmuş olduğu güneş destekli ve duylur ısı depolu ısı pompası sisteminin performansını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Isı pompası ve sistemin performans katsayıları sırasıyla 2-4 ve 2-3 aralıklarında bulunmuştur. Ayrıca güneş destekli ve enerji depolu ısı pompası sisteminin dinamik simülasyon modeli geliştirilmiş ve simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak soğuk iklime sahip olan Erzurum ilinde güneş destekli ve enerji depolu ısı pompası sisteminin kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Dikici vd (2006) tarafından, konutların ısıtılması amacıyla kurulan güneş, hava ve toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin performans karakteristikleri, enerji ve ekserji analizleri araştırılmıştır. Deney seti Elazığ’daki Fırat Üniversitesi’nde 60 m²’lik bir deney odasına kurulmuştur. Deneyler, 2002 ve 2003 yılları arasındaki Aralık’tan Mart ayına kadar olan ısıtma sezonunda yapılmıştır. Çalışmada güneş, hava ve toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin her bir bileşeni için ısıtma performans katsayıları, enerji ve ekserji analizleri hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Esen vd (2006) tarafından, Elazığ'da yatay toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminin performans deneyleri ve ekonomik analizi yapılmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi, elektrik, fuel-oil, sıvı petrol gazı, kömür, petrol ve doğalgaz gibi bilinen ısıtma sistemleri ile karşılaştırıldı. Sonuçta, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin bilinen ilk beş ısıtma metodundan ekonomik olarak daha avantajlı olduğu, ancak doğalgazlı bir sistem için alternatif olmadığı belirtilmiştir.

Esen vd (2007) tarafından, Elazığ'da yatay toprak ısı değiştiricili bir ısı pompası sistemi kurulmuş ve test odasında deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca sistemin bir de sayısal analizini yapmışlardır.

Akpınar ve Hepbaşlı (2007) yaptıkları çalışmada, gerçek işletme verilerine dayanan iki tip toprak kaynaklı ısı pompasının (düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynakları araştırmak için toprak kaynaklı ısı pompalarının kullanılması) ekserji analizini yapmışlardır.

Bakırcı vd. (2007b), soğuk iklim bölgesinde güneş ve toprak kaynaklı ısı pompasının performansını incelemek amacıyla bir deneysel sistem kurmuşlardır. Bu çalışmada, ısı pompasının buharlaştırıcısı, gündüzleri güneş, geceleri toprak olmak üzere iki ayrı kaynaktan ısı çekerek beslenmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, ısı pompası (COP_1) ve sistemin (COP_s) performans katsayısını hesaplamak için kullanılmıştır.

Nam *et al.* (2008), toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri'nde için ısı değiştirici büyüklüğünü önceden belirleyebilmek için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin geleneksel hava kaynaklı ısı pompalarından daha yüksek bir performans katsayısına sahip olabileceklerine değinmişlerdir. Bunun için geliştirmiş oldukları sayısal model, ısı değiştiriciyi de içeren bir akış modelinden oluşturulmuştur. Sonuç olarak tasarlanan bu model, Japonya'daki mevcut işyeri binalarında, ısı değiştirici boyutunu önceden belirleyebilmek için kullanılmıştır.

Omer (2008), toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ve uygulamaları hakkında yapmış olduğu çalışmada, toprak veya jeotermal kaynaklı ısı pompası sistemlerinin, mahallerin ısıtılması ve soğutulması için yüksek verimli yenilenebilir enerji teknolojileri olduğunu ifade etmiştir. Dünya yüzeyinin, kışın havadan daha sıcak, yazın ise havadan daha soğuk olması sebebiyle, nispeten sabit bir sıcaklığa sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca toprak kaynaklı ısı pompaları hakkında temel literatür bilgileri, kısaca uygulamalar, maliyetler ve sistemlerin yararları hakkında bilgilere de yer verilmiştir.

Esen ve İnallı (2009), Elazığ'daki toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, yer açısından termal davranışlarını test etmişlerdir. Toprak yüzeyinden 60 m ve 90 m olarak belirlenen iki derinlik için ısı iletkenlik katsayıları (λ), 1,70/1,70 W/mK ve ısı dirençleri (R_b), 0,05/0,03 K/W olarak belirlenmiştir.

Pulat vd (2009), Türkiye'nin yumuşak iklim koşullarında kullanılan yatay toprak kaynaklı ısı pompasının performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, testler Bursa'da, Aralık 2004 ve Mart 2005 ayları arasındaki ısıtma sezonu için laboratuvar koşulları altında yapılmıştır. Sistemin (COPs) ve ısı pompası (COP_1) performans katsayıları sırasıyla 2,46-2,58 ve 4,03-4,18 arasında yer almıştır. Araştırmanın sonucunda toprak kaynaklı ısı pompası sistemi, klasik ısıtma sistemleriyle ekonomik açıdan karşılaştırılmış ve toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin maliyetlerinin diğer klasik ısıtma sistemlerine göre daha iyi oldukları görülmüştür.

Tarnawski *et al.* (2009), Japonya'nın kuzey bölgeleri için, yatay toprak ısı değiştiricili, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin analizini yapmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin mahallerin ısıtılmasında, yüksek elektrik tüketimlerine rağmen, petrol türevli ve elektrikli diğer ısıtma sistemlerine göre daha yararlı olduğuna değinmişlerdir. Japonya'nın kuzeyinde, özellikle çiftlik alanlarında kullanımının daha uygun olduğu ve bunun yanısıra yeni ve eski yerleşim yerlerinde de yatay uygulamaların kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Jenkins *et al.* (2009), İngiltere’de ev tipi toprak kaynaklı bir ısı pompasını modelleyerek, sistemin termal potansiyelini araştırmışlardır.

Bakırcı (2010), Türkiye’nin soğuk iklim bölgesinde yer alan Erzurum’da dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin performansını incelemiştir. Deneysel, 2008-2009 ısıtma sezonunda Ekim ile Mayıs ayları arasında yapılmıştır. Ortalama ısı pompası (COP_1) ve sistemin (COP_s) performans katsayısının yaklaşık olarak 3,0 ve 2,6 olarak bulunmuştur. Aynı zamanda bu çalışma, ısı pompası sistemlerinin, Türkiye’nin soğuk iklim bölgesinde konut ısıtılmasında kullanılabileceğini göstermiştir.

Yang *et al.* (2010), Çin’deki toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin durumu hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çin hükümetinin destekleriyle araştırmacıların, birkaç yeni ısı transfer modeli ve iki yeni toprak kaynaklı ısı pompası sistemini geliştirdiklerini belirtmişlerdir.

Bakırcı vd (2011), Güneş-toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin enerji analizini yapmışlardır. Bu amaçla soğuk iklime sahip olan Erzurum’da deneysel bir sistem kurmuşlardır. Deneysel sonuçlar, 2008-Ekim ve 2009-Mayıs ayları arasında yapılmıştır. Isı pompası (COP_1) ve sistemin (COP_s) performans katsayıları sırasıyla 3,0-3,4 ve 2,7-3,0 arasında bulunmuştur.

Blum *et al.* (2011), Almanya’daki dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin ekonomik analizini yapmışlardır. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin ortalama maliyetlerinin 23500 € ÷ 6800 € arasında olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuçları Amerika, Avusturya, Norveç, İngiltere, İsveç ve İsviçre ile kıyaslamışlar ve en büyük maliyetin Almanya ile İsviçre’de olduğunu ifade etmişlerdir.

Özyurt ve Ekinci (2011), dikey tip toprak kaynaklı ısı pompasının, Türkiye’nin soğuk iklim bölgesindeki performansının hesaplanması için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla Atatürk Üniversitesi kampüsünde yer alan enerji laboratuvarında deneysel

sistem kurmuşlardır. Çalışma, 2007 yılının ısıtma sezonunda (Ocak ve Mayıs ayları arasında) laboratuvar koşulları altında yapılmıştır. Sonuç olarak, ısı pompası performans katsayısının (COP_1) 2,43-3,55 ve sistemin performans katsayısının (COPs) 2,07-3,04 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Montagud *et al.* (2011), Avrupa Birliği projesi olarak oluşturulan toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, beş yıllık bir çalışma süresinden sonraki enerji performans analizini yapmışlardır. Deneysel sonuçların analizi, toprağın termal davranışının sistemin kurulduğundan yıllar sonra bile değişmediği ve sistemin enerji performansını koruduğu görülmüştür.

Karabacak vd (2011) yaptıkları çalışmada, Denizli’de kurulu toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin, soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, Pamukkale Üniversitesi’nde toprak kaynaklı ısı pompası sistemi kurmuşlardır. Sistemin boru boyu uzunluğu 225 m’dir ve 110 m derinliğinde toprağa gömülmüştür. 2008 yılının soğutma sezonunda ısı pompası performans katsayısı (COP_1) 3,1-4,8 ve sistemin (COPs) performans katsayısı 2,1-3,1 arasında hesaplanmıştır.

Wood *et al.* (2012), toprak kaynaklı ısı pompası sistemi dizaynında kullanılan U-tipi ve eşeksenli boru performansını karşılaştırmışlardır. Bunun için 72 m uzunluğunda 40 mm çaplı eşeksenli ve 20 mm çaplı U-tipi boruların analizlerini yapmışlardır.

Aikins and Choi (2012), Kore Cumhuriyeti’nde bulunan toprak kaynaklı ısı pompası ünitelerinin performans durumları hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin kullanılabilmesi ve sistemin soğutma kapasitelerinin 280 kW’den fazla olduğu ifade edilmiştir.

Zhai *et al.* (2012), Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin, farklı dış ortam sıcaklık değerlerindeki optimizasyonunu ve deneysel incelemesini yapmışlardır. Isı değiştirici ve

toprak arasındaki ısı transferinin, dış ortam sıcaklık değişimlerinden kesin olarak etkilendiği ifade edilmiştir.

Bakırcı ve olak (2012), Türkiye'nin soğuk iklim bölgesi olan Erzurum'da aşırı kızdırma ve aşırı soğutma ısı değiştiricilerinin, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin performansına etkilerini incelemiştir. Deneysel sonuçlar, 2010 yılının Ocak ve Şubat aylarında alınmıştır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan Erzurum'da örnek bir binanın (480 m²) ısıtılması amacıyla, dikey toprak kaynaklı bir ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Öncelikle TS 825'e (Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği'ne) göre binanın toplam ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Bin yöntemi kullanılarak binanın toplam ısı kaybı bulunduğundan sonra ısıtma çalışma faktörü hesaplanarak, sondaj uzunluğu ve maliyetleri hesaplanmıştır. Çalışma, bu binanın ısıtılmasında, ısı pompası ve mevcut sistemlerin kullanılması durumunda mukayeseli ekonomik analizin yapılması ile sonuçlandırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, ısı pompasının buharlaştırıcısına topraktan sağlanan enerji kaynağı, ısı pompasının termodinamiği, sistem elemanları ve görevleri, yapılan enerji ve ekonomik analizler hakkında bilgiler verilmiştir.

2.1. Enerji Kaynakları

Toprak, yeraltı ve yerüstü suları, çevre havası veya atık ısı enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Hangi enerji kaynağının kullanılacağı ısıtılacak mahallin yerleşimine, kaynağın elverişliliğine, bulunabilirliğine ve sürekliliğine bağlıdır. Aşağıdaki kural her zaman geçerlidir: Enerji kaynağı ile ısıtma sistemi arasındaki sıcaklık farkı ne kadar düşük olursa, kompresörü tahrik etmek için gerekli güç o kadar düşük dolayısıyla tesir katsayısı o kadar yüksek olur. Bu da kaynağın sıcaklık seviyesinin yüksek olmasının olumlu etkilerinin, ısı pompasının verimine yansımaları anlamına gelir.

2.1.1 Güneş

Güneş ışınımının yeryüzüne dağılımı ülkelere göre büyük farklılıklar göstermektedir. Türkiye'nin bir bölümü güneş kuşağı adı verilen bölgede bulunmaktadır ve güneş enerjisi bakımından orta zenginliktedir.

Güneşlenme süresi ve şiddeti enleme dayalı parametrelerdir. Erzurum için güneşlenme süresi ve şiddetini içeren güneş enerjisi potansiyeli değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Erzurum için verilen değerlere bakıldığında, ilin önemli derecede güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Aylık ortalama güneşlenme süresi için maksimum değerlerin Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında, güneş ışınımı için maksimum değerlerin ise Haziran ve Temmuz aylarında olduğu görülmektedir (Bakırcı

vd 2006b). Türkiye'de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli ise Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Erzurum iline ait güneşlenme süresi ve güneş ışınımı miktarları (D.M.İ.G.M. 2006)

Aylar	Günlük ortalama güneşlenme süresi (saat)	Günlük ortalama güneş ışınım miktarı (MJ/m ² gün)
Ocak	02.95	08.86
Şubat	03.82	12.58
Mart	04.39	15.97
Nisan	05.89	16.95
Mayıs	07.56	19.89
Haziran	09.92	23.17
Temmuz	10.75	23.19
Ağustos	10.54	21.21
Eylül	08.31	17.25
Ekim	06.28	12.57
Kasım	04.26	08.79
Aralık	02.31	07.03

Çizelge 2.2. Türkiye'de bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli (E.İ.E.İ.G.M. 2009)

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
G.Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

2.1.2. Toprak

Dünyamızın kara alanlarını saran çeşitli bileşim ve renkte bulunan kayalar, dış etkenlerin tesiri ile ayrışmaya, çözülmeye uğramaktadır. İşte bu çeşitli süreçler

tarafından kaya veya pekişmemiş çökeller üzerinde çözülen yerli zona toprak tabakası denir (Bakırcı vd 2006b).

2 m'lik bir derinlikte toprak tüm yıl boyunca 7 ile 13°C arasında sabit bir sıcaklık aralığına sahiptir. Yatay toprak kolektörleri veya dikey sondajlar bu depolanan enerjiyi antifriz-su karışımı ile ısı pompasının buharlaştırıcısına getirirler. Isıtılacak bina yakınındaki alanda bulunan ısı değiştiricisi yardımı ile enerji transfer edilir. Daha derin tabakalardaki enerji akımı 0,063 ile 0,1 W/m² arasındadır. Bu değer ihmal edilebilir. Toprak, yüzeyindeki yağmur, güneş ışığı gibi kaynaklardan ısınısını alır.

Toprak kaynaklı ısı pompalarında ısı kaynağı olarak toprağın kullanılması durumunda; hem gerekli ısı ihtiyacının karşılanabilmesi için toprağın uygun değerde olması hem de ısıtma tesir katsayısının yüksek olması verimin artmasına sebep olmaktadır.

Toprak yüzeyinden 5 m derine kadar olan tabaka ısı kaynağı olarak kabul edilir. Topraktan kazanılan ısı miktarı bazı faktörlere bağlıdır. Özellikle toprağın cinsi çok önemlidir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Toprak cinsine bağlı olarak ısı çekme (veya soğutma) kapasitesi

Toprak cinsi	Isı çekme (veya soğutma) kapasitesi-q _E
Kumlu kuru toprak	10 - 15 W/m ²
Kumlu yaş toprak	15 - 20 W/m ²
Killi kuru toprak	20 - 25 W/m ²
Killi ıslak toprak	25 - 30 W/m ²
Yeraltı suyu olan toprak	30 - 35 W/m ²

Çizelge 2.3'e göre bol sulu killi toprak ısı kaynağı olarak elverişlidir. Tecrübelerle dayanılarak verilen ısı çekme kapasitesi (soğutma kapasitesi) her m² toprak alanı için 10 ile 35 W arasındadır. Serme yöntemi için büyük miktarlarda toprak kazılması gerekmektedir.

2.1.3. Erzurum'un toprak grupları açısından yapısı

Bir ısı pompasının teknik ve ekonomik performansı, kullanılan ısı kaynağının karakteristikleriyle yakından ilgilidir. Isı kaynağı seçimi yapılırken coğrafik durum, iklim şartları, ilk maliyet ve uygunluk faktörleri dikkate alınmalıdır (Bakırcı vd 2007c)

İklim, topografya ve ana madde farklılıkları nedeniyle Erzurum da çeşitli büyük toprak grupları oluşmuştur: Alüvyal topraklar, hidromorfik alüvyal topraklar, kolüvyal topraklar, organik (ıslak turba) topraklar, kahverengi orman toprakları, kireçsiz kahverengi orman toprakları, kestane rengi topraklar, kırmızı kestane rengi topraklar, kahverengi topraklar, kireçsiz kahverengi topraklar, yüksek dağ-çayır toprakları ve bazaltik topraklar. Büyük toprak gruplarının yanı sıra toprak örtüsünden yoksun bazı arazi tipleri de görülmektedir: Çıplak kaya ve molozlar ile ırmak taşkın yatakları (EİAV 2000).

Erzurum şehir merkezinin jeolojik bakımdan toprak yapısı incelendiğinde, yüzeyden 1 km kalınlığına kadar alüvyonlu yapının hakim olduğu görülür. Şehir merkezinin toprak yapısının “çakıl, kum ve çok az kil”, Palandöken mevkiinin “bazalt (proklast) parçalarından oluşan volkanik kaya parçaları”, Sanayi mevkiinin “Kum, ince çakıl ve bazen çok az kil”, Dadaşkent mevkiinin ise “ince kum ve kil” şeklinde olduğu görülür.

2.1.4. Erzurum'da toprak sıcaklığı

Toprakta bitkilerin yetişmesi, mikroorganizmaların faaliyeti, organik maddenin parçalanması ve mineralizasyonu ile topraktaki kimyasal olayların devam etmesi için toprak sıcaklığı önemlidir. Ayrıca toprak sıcaklığı enerji ve enerji teknolojisi açısından da önemlidir.

Çizelge 2.4. Erzurum merkez ilçedeki toprak gruplarının dağılımı (EİAV 2000)

Toprak Grupları	Yüzölçümü (Hektar)
Alüvyal	23168
Hidromorfik Alüvyal	-
Kolüvyal	48236
Organik	-
Kahverengi Orman	-
Kireçsiz Kahverengi Orman	-
Kestane Rengi Orman	95683
Kırmızı Kestane Rengi	-
Kahverengi	513
Kireçsiz Kahverengi	-
Yüksek Dağ Çayır	-
Bazaltik	115.878
Irmak Yatağı	480
Çıplak	1784
Su Yüzeyi	-
Yoğun Yerleşim	5190
TOPLAM	290.932

Çizelge 2.4'te Erzurum merkez ilçedeki büyük toprak gruplarının dağılımı gösterilmiştir.

Toprağın sıcaklık bilânçosu, güneşten gelen enerjinin tutulması veya ısıtılmasına bağlıdır. Koyu renkli topraklar gelen enerjinin %80'ini, açık renkli kuvars kumları ise %30'unu tutmaktadır. Toprakta tutulan sıcaklık suyun buharlaşması, toprak yüzeyindeki havanın ısıtılması, toprağın ısıtılması ve uzun dalga ışınlar halinde tekrar atmosfere dönmesi halinde harcanır. Toprağın ısınma ve soğuma kapasitesi, toprakta bulunan su miktarına, toprağın yüzeyini örten organik madde ve bitki örtüsüne bağlıdır (Bakırcı vd 2006b).

Meteoroloji istasyonları tarafından 5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinliklerde toprak sıcaklığı ölçülmektedir (Çizelge 2.5). Erzurum için uzun yıllar ortalamalarına göre 5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinliklerde ölçülen aylık ortalama toprak sıcaklıkları Çizelge 2.5'te verilmiştir. Yıllık ortalama toprak sıcaklığı değerleri 5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinliklerde sırasıyla 8,81, 8,70, 8,57, 9,00 ve 9,57°C'dir. Toprak sıcaklığının en düşük olduğu aylar Ocak ve Şubat ayları, en yüksek olduğu aylar ise Temmuz ve Ağustos aylarıdır.

Çizelge 2.5. Erzurum için 5, 10, 20, 50 ve 100 cm derinlikteki toprak sıcaklıkları (D.M.İ.G.M. 2006)

Aylar	5 cm (°C)	10 cm (°C)	20 cm (°C)	50 cm (°C)	100 cm (°C)
Ocak	-5,65	-5,29	-4,39	-0,74	3,29
Şubat	-4,98	-4,56	-4,56	-2,03	1,66
Mart	0,03	0,04	-0,39	-0,43	1,54
Nisan	7,32	7,00	6,11	4,45	3,88
Mayıs	13,65	13,18	12,30	10,52	8,49
Haziran	19,84	19,13	18,00	15,71	12,81
Temmuz	24,15	23,36	22,19	19,75	16,49
Ağustos	24,01	23,45	22,67	21,03	18,51
Eylül	18,08	17,91	17,95	18,20	17,69
Ekim	10,12	10,33	11,03	12,86	14,48
Kasım	1,98	2,43	3,40	6,61	10,04
Aralık	-2,86	-2,53	-1,42	2,08	5,99

En düşük toprak sıcaklıkları 5 cm'de -5,65°C olarak Ocak ayında, 10 cm'de -5,29°C olarak yine Ocak ayında ölçülmüştür. 5 cm derinlikte ortalama toprak sıcaklığının +5,0°C'nin altına düştüğü aylar Kasım (1,98°C), Aralık (-2,86°C), Ocak (-5,65°C), Şubat (-4,98°C) ve Mart (0,03°C) aylarıdır. 10 cm derinlikte ortalama toprak sıcaklığının +5,0°C'nin altına düştüğü aylar yine Kasım (2,43°C), Aralık (-2,53°C), Ocak (-5,29°C), Şubat (-4,56°C) ve Mart (0,04°C) aylarıdır.

2.2. Toprak Isı Değiştiricisinin Tasarımı

Toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) tasarımının en önemli kısmı toprak ısı değiştiricisini boyutlandırmak ve uygulamaktır. Düzgün toprak ve hava analizleri, doğru yapılmış bir hesaplama, uygun seçim ve boyutlandırma toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri için önem teşkil eden parametrelerdir. Bu konuda yapılacak bir hata direkt olarak sistem verimini etkileyeceğinden, sistemin kendini geri ödeme süresi uzamaktadır. İhtiyacımız olan enerjiyi alabilmek ve verebilmek için ısı değiştiricinin kullanacağı bir kaynak olmalıdır. Bu, toprak, deniz, göl, akarsu veya yeraltı su kaynakları olabilir. Bu kaynak ısı değiştiricisinin uygulama yöntemini belirlemektedir. Eğer kaynak olarak toprağı kullanacaksak kapalı bir sisteme ihtiyacımız vardır. Sistemin toprak altına nasıl uygulanacağı ise uygulamanın yapılacağı yerdeki serbest toprak kullanım alanına bağlıdır. Eğer ısı değiştiricisinin ihtiyaç duyduğu alan proje sahasında bulunuyorsa, yatay serme yöntemi uygulanır. Bu uygulamada borular toprağın belli bir derinliğine yatay olarak serilir. Eğer proje sahasında ihtiyaç duyulan alandan daha az bir alan varsa dikey serme (sondajlı uygulama) gerekir. İki uygulama maliyetleri arasında ciddi farklar vardır. Yatay serme yönteminde saatlik ücretlerle çeşitli iş makineleri kullanılarak çözülebilirken, sondaj uygulamasında metre başına yaklaşık 50 TL ile 100 TL arasında fiyatlar ödenmektedir. Yeni kurulmakta olan binalar için bu maliyetler, zaten mevcut bir inşaat şantiyesi, inşaat makineleri bulunduğu için daha aşağılara çekilebilmektedir. Dolayısıyla yeni kurulmakta olan bir bina için sondaj uygulaması metre başına 50 TL olabilirken, eski binalarda bu fiyat 75-100 TL seviyelerine çıkmaktadır.

Plastik borular (polietilen) bölgenin özelliklerine göre 1-2 m derinlikte döşenir. Boru uzunlukları 100 m'yi geçmemelidir. Çünkü daha uzun boru boylarında basınç düşer ve daha yüksek kapasiteli pompa seğilmesi gerekir. Tüm boru döngüleri aynı mesafede olmalıdır. Çünkü her boru döngüsünde aynı basınç düşümü dolayısıyla aynı debi özellikleri elde edilmesi gerekmektedir. Böylece topraktan eşit olarak ısı çekilebilecektir. Boruların uçları birer gidiş ve dönüş kolektörüne bağlanmıştır. Bu kolektörler borulardan biraz daha yükseğe monte edilerek boru sisteminin havasının

atılması sağlanmalı ve her hat kontrollü bir şekilde kapatılabilmelidir. Bir sirkülasyon pompası, topraktan ısı çeken akışkanı (genellikle antifriz-su karışımını) sistemde sirküle etmektedir.

Isı pompası sistemlerini, doğalgazlı sistemlerle karşılaştırdığımızda, toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin yalnızca ısıtmada kullanılması durumunda amortisman süresi uzun olmaktadır. Güncel fiyatlar üzerinden bir karşılaştırma yapmak gerekirse, (COPs) değerinin 4, 5 ve 6 olması durumunda, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin işletme maliyeti, doğalgaz kullanımına göre daha ekonomik olmaktadır.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi tasarımında en önemli işlem toprak ısı değiştiricisinin boyutu ve uygulanması ile ilgili hesaplardır. Uygulamalar ilgili bölgenin coğrafik ve meteorolojik özelliklerine göre farklılık gösterebilir. Toprak ısı değiştiricisi maliyetleri ilk yatırımda oldukça yüksektir. Dikey tip uygulama, alan sınırlamasının olduğu yerlerde tercih edildiği gibi, soğuk iklim bölgelerinde yüzeyden belirli derinliklere (80 santimetreye kadar) kadar toprağın donmasından dolayı da tercih edilmektedir. Bu bakımdan Türkiye'nin soğuk iklim bölgesi Erzurum için yapılan bu tez kapsamında dikey tip uygulama seçilmiştir.

2.3. Isı Pompaları

Çevreye duyarlılığın artması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilgi artmıştır. Bugün ısı pompaları ile çevre dostu, güvenilir ve ekonomik ısıtma sistemleri elde edilmektedir (Viessmann 2009).

Günümüzde İsviçre'de her üç yeni binadan biri elektrik tahrikli ısı pompasına sahiptir. İsveç'te bu rakam her 10 yeni binanın 7'si şeklindedir. Almanya'da, toprak, hava ve su kaynaklı ısı pompaları içerisinde özellikle toprak kaynaklı ısı pompalarının kullanımında artış gözlenmektedir (Viessmann 2009).

Isı pompası çevriminin termodinamik temeli, sıcaklığı düşük bir ortamdan ısı çekilerek, daha yüksek sıcaklıkta ortama ısı verilmesi ve bu işlemin gerçekleşmesi içinde sisteme dışarıdan iş verilmesidir. Bu amacı gerçekleştirmek için geliştirilen sistem, bir yerin çevre sıcaklığı altında tutulması için kullanılıyorsa soğutma makinesi, bir yerin çevre sıcaklığı üzerinde tutulması için kullanılıyorsa ısı pompası adını alır.

Genel olarak ısı pompaları, ortamın sıcaklığını arttırmak için ilave bir enerji kullanan ekipmanlar olarak da tanımlanabilir. Isı pompalarının çalışma prensibi, ısı taşıyan akışkanı sıkıştırıp genişletmek suretiyle açığa çıkan enerjisini ortamın sıcaklığını arttırmak için kullanılmasına dayanır (Viessmann 2009).

Isı makinesinin teorik veya ideal çevrimi olan Carnot çevriminin tersi olan çevrim, soğutma çevrimi için ideal çevrim olarak alınır. Isı pompası da bu çevrime dayanır. Teorik olarak, bir ısı pompasında üretilen ısı, evaporatörden alınan ısı ile sistemi çalıştıran kompresör gücünün toplamına eşittir.

Buhar sıkıştırma esasına göre çalışan ısı pompaları, dışarıdan kendisine iş verilen kompresörlerin tahrikinde kullanılan kuvvet makinelerine göre adlandırılabilir. Bunlar sırasıyla:

1. Elektrik ısı pompaları
2. Gaz ısı pompaları
3. Diesel ısı pompaları şeklinde sıralanabilir.

Ayrıca ısı pompaları aşağıdaki gibi de sınıflandırılabilir:

Isı kaynaklarına göre:

1. Hava kaynaklı ısı pompaları

2. Toprak kaynaklı ısı pompaları
3. Yerüstü su kaynaklı ısı pompaları
4. Yeraltı su kaynaklı ısı pompaları
5. Güneş enerjisi kaynaklı ısı pompaları
6. Jeotermal enerji kaynaklı ısı pompaları
7. Atık ısı kaynaklı ısı pompalarıdır.

İşletme çevrimlerine göre:

1. Hava-hava kaynaklı ısı pompaları
2. Hava-sıvı kaynaklı ısı pompaları
3. Sıvı-hava kaynaklı ısı pompaları
4. Sıvı-sıvı kaynaklı ısı pompalarıdır.

Hava kaynaklı ısı pompalarında sıcaklık kaynaklarından biri ısıtılmak veya soğutulmak istenen mahallin havası, diğeri ise dış havadır. Yani ısı kaynağı olarak dış hava kullanılmaktadır. Ancak dış hava koşullarının, yıl içinde mevsimler, aylar, hatta saatler boyunca değişmesi nedeniyle bu ısı pompalarının (COPs) değerleri oldukça değişkendir ve kararlı değildir (Kıncay vd 2009).

Türkiye’de, Akdeniz, Ege ve Marmara bölgelerimizde ısı pompaları sistemleri için kaynak olarak havanın kullanılabilmesi uygun bir seçenek oluşturmaktadır. Hava sıcaklıklarının düşük değerlerde seyrettiği Doğu Anadolu, İç Anadolu gibi bölgelerimizde ise ısı pompaları sisteminin yanında kullanılacak yardımcı bir ısıtma sistemiyle bu problemi ortadan kaldırabilmek mümkündür. Buradan da ısı pompaları sistemlerinin kullanılacağı bölgenin meteorolojik özelliklerinin önemli bir faktör olacağı görülmektedir.

Yeni sistemlerin büyük kısmı antifriz/su ısı pompaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Antifriz/su ısı pompası topraktan çektiği ısı enerjisi ile yıl boyunca ilave bir ısı

kaynağına ihtiyaç duymadan (tek enerjili işletme türü veya monovalent işletme) ısıtma sağlayabilmektedir. Diğer taraftan endüstride hava/su ısı pompalarına farkedilir bir talep oluşmaktadır. Bu cihazların montajı daha ekonomik ve kolaydır. İsviçre'deki yeni montajların %60'ı bu tip ısı pompaları ile gerçekleştirilmektedir (Viessmann 2009).

Isı pompaları doğalgaz, dizel veya fuel-oil yakıtlar ile işletilebilir. Bu durumda kompresör içten yanmalı bir motor ile tahrik edilir (Viessmann 2009).

Termodinamik çevrimlerine göre:

1. Absorpsiyonlu ısı pompaları
2. Adsorpsiyonlu ısı pompaları
3. Resorpsiyonlu ısı pompaları
4. Buhar sıkıştırımlı ısı pompaları
5. Jet buhar püskürtmeli ısı pompaları
6. Joule (gaz) çevrimli ısı pompaları
7. Stirling çevrimli ısı pompaları
8. Termoelektrik ısı pompalarıdır.

Isı pompası çalışmaları, sistemin işletme ve termodinamik özelliklerinden çok ısı kaynakları tipine göre ısı pompasının performansı üzerine yoğunlaşmıştır.

2.3.1. Buhar sıkıştırımlı ısı pompaları

Buhar sıkıştırımlı ısı pompaları temel olarak 4 ana elemandan oluşurlar. Bunlar; kompresör, kondenser (yoğuşturucu), evaporatör (buharlaştırıcı) ve genişleme vanası'dır.

Kompresörler: Sıcaklık seviyesini enerji kaynağından ısıtma devresine yükselten en önemli ısı pompası bileşenidir (Viessmann 2009). Evaporatörden emiş borusuna gelen

gaz haldeki soğutkanı emerek sıkıştırır ve sıkışmış olan soğutkanı basma hattı (yüksek basınç) borusu vasıtasıyla kondensere gönderir. Buradaki amaç, evaporatördeki ısı yüklü soğutucu akışkanı buradan uzaklaştırmak ve kompresöre gelen ısı yüklenmemiş akışkana yer temin ederek akışın sürekliliğini sağlamaktır. Böylece buhar haldeki soğutucu akışkanın basıncı kondenserdeki yoğuşma basıncına çıkarılmış olmaktadır. Uygulamada kullanılan birçok kompresör tiplerinden en önemlileri şunlardır: Açık tip kompresörler, yarı hermetik tip kompresörler, hermetik tip kompresörler, döner tip kompresörler, scroll kompresörler ve vidalı tip kompresörlerdir.

Isı pompalarında kullanılan pistonlu kompresörlerin yerini günümüzde sessiz çalışan ve uzun ömürlü scroll kompresörler almıştır. Scroll kompresörler, Avrupa, Japonya ve ABD’de 12 milyon adedin üzerinde kullanılmaktadır. Hermetik scroll kompresörler uzun yıllar bakım gerektirmeden çalışabilir (Viessmann 2009).

İdeal bir kompresörde genel olarak şu karakteristikler aranır:

- İlk çalışmada hareket için gerekli olan dönme momentinin mümkün olduğunca az olması
- Verimlerinin yüksek olması ve kısmi yüklerde düşmemesi
- Değişik çalışma şartlarında emniyet ve güvenilirliği muhafaza etmesi
- Titreşim ve gürültü seviyelerinin belirli seviyenin üstüne çıkmaması
- Ömrünün uzun olması ve arızasız çalışması
- Daha az güç harcayarak işlevini yerine getirmesi
- Maliyetinin mümkün olduğu kadar düşük olması

Uygulamadaki şartlara göre yukarıdaki karakteristikleri maksimum derecede sağlayabilen kompresör tercih edilmelidir (Özko1 1999).

Kondenserler: Kompresörden çıkan gaz fazındaki bastığı yüksek basınç ve sıcaklıktaki soğutkanın yoğuşturulmasını sağlar. Bunun için genellikle görevi bir motor ve fan

yardımıyla lamelleri arasından hava geçirerek yapan kondenserlere hava soğutmalı kondenserler kullanılır. Kapalı bir tüp içinde bulunan bakır boruların içinden su, dışından soğutkan geçirilerek çalışan tiplere su soğutmalı kondenser denir. Ayrıca hem hava ve hem de su kullanarak çalışan evaporatif kondenserler de mevcuttur. Kondenserlerde ısı alışverişi, kızgınlığın alınması, soğutucu akışkanın yoğunlaştırılması ve aşırı soğutma olmak üzere üç safhada gerçekleşmektedir.

Kondenser dizaynına göre aşırı soğutma, kondenser alanının yaklaşık %0-10'luk kısmında gerçekleşir. Kızgınlığın alınması için kondenser alanının yaklaşık %5'i yeterlidir. Bu üç değişik ısı transferi şekline göre kondenserdeki ısı geçirme katsayıları ve sıcaklık aralıkları da farklı olmaktadır. Ancak kızgınlığın alınması safhasında daha fazla ortalama sıcaklık aralığına karşın daha düşük ısı transfer katsayısı olmaktadır. Fakat aşırı soğutma esnasında bunun aksine sıcaklık aralığı daha az ve ısı geçirme katsayısı daha fazla olmaktadır. Yapılan deneylerde ısı transfer katsayısının artması karşısında sıcaklık farkının azalması veya bunun tersi durumunda yaklaşık olarak aynı çarpım sonucunu vermektedir ve bu değerlerin ortalaması kullanılabilir. Hesaplamalarda sağladığı kolaylık da göz önünde bulundurularak, kondenserin hesabında tek bir ısı geçirme katsayısı ile ortalama sıcaklık aralığı değerleri kullanılmaktadır (Özko1 1999).

Genleşme vanaları: Soğutucu akışkanın evaporatörde buharlaşarak ısı çekebilmesi için basıncın, evaporasyon sıcaklığına düşürülmesi gerekmektedir. Genleşme vanası bu görevi yerine getirerek, evaporatöre giren sıvının buharlaşması için gerekli basınç düşümünü sağlar ve sıvı soğutkan akışını kontrol eder. Bu işi otomatik olarak yapabilmesi için, emiş devresi üzerine montajı yapılmış bir hissedici bir proba sahiptir. Isı pompası sistemlerinde kullanılan değişik tipte genleşme vanaları vardır. Bunlar; otomatik, termostatik ve şamandıralı genleşme vanası tipleridir. Günümüzde en çok kullanılan tipi ise termostatik tip genleşme vanasıdır.

Evaporatörler: Genleşme vanasından basıncı düşerek geçen çoğunluğu sıvı (sıvı+buhar) soğutkan evaporatöre girer. Basıncı düşmüş olan sıvı soğutkan,

evaporatörde çevresindeki akışkandan ısı çekerek buharlaşır. Dolayısıyla ortamın soğumasına sebep olur. Soğutulacak cisimlerin ısıları, hava veya direkt temas yoluyla evaporatör içindeki soğutkana geçerek onun buharlaşmasına sebep olur. Buharlaşan soğutkan, evaporatörden kompresör yardımıyla emilerek dolaşıma devam eder.

Evaporatöre, sıvı-buhar karışımı şeklinde giren soğutkanın büyük bir kısmı sıvı haldedir. Evaporatörde ısı alarak buharlaşan soğutucu akışkana emiş tarafına geçmeden önce bir miktar daha ısı verilmesi ve 3-8°C arasında kızgınlık verilerek kızgın buhar durumuna gelmesinin birçok faydası vardır. Evaporatörlerde soğutkan basıncı, kondenser tarafındaki basınçtan çok daha düşüktür. Bu nedenle evaporatör tarafı, sistemin alçak basınç tarafı olarak adlandırılır.

Evaporatörün yapısı, soğutkanın iyi ve çabuk buharlaşmasını sağlayacak, soğutulan maddenin ısını iyi bir ısı geçişi sağlayarak, yüksek bir verimle alacak ve soğutkanın giriş ve çıkıştaki basınç kayıplarını minimum seviyede tutacak tarzda dizayn edilmelidir. Evaporatör tipleri uygulamanın özelliklerine göre gaz (genellikle hava), sıvı (su, salamura, antifriz, vs.) ve katı (buz, metaller, vs.) haldeki maddeleri soğutmak için kullanılan evaporatörler olmak üzere üç ana grupta toplanabilirler (Özko1 1999).

Yardımcı Elemanlar: Isı pompası veya soğutma sistemlerinde bu dört ana eleman dışında, değişik maksatlarla kullanılan yardımcı elemanlardan bazıları, sıvı deposu, filtre, gözetleme camı, selenoid valf, alçak-yüksek basınç preostatı, açma-kapama vanaları, elektrik kumanda panosu, vs. şeklinde sıralanabilir. Yardımcı elemanlar; sistemde bakım, tamir ve soğutkan dolun-boşaltım sırasında açıp kapatmak, emniyeti sağlamak, çıkabilecek tehlikelere karşı sistemi önceden korumak ve sistemi daha verimli çalıştırmak maksadıyla kullanılır.

2.4. Soğutucu Akışkanlar (Soğutkanlar)

Isı pompalarında iş yapan akışkanlar olup, “soğutkan” ya da “soğutucu” terimleriyle adlandırılırlar. Buhar sıkıştırma çevrimi esasına göre çalışan soğutma sistemlerinde, ısının taşınması görevini yapan aracı akışkanlardır. Günümüzde kullanılan ısı pompası yada soğutma makinelerinin büyük bir kısmı, bir sıvının buharlaşması esnasında çevresinden aldığı gizli ısıdan hareketle çalışmaktadır.

Bir soğutma çevriminde soğutucu akışkanlar, ısı alışverişini genellikle sıvı halden buhar haline (evaporatör devresinde) ve buhar halden sıvı haline (kondenser devresinde) dönüşerek sağlarlar. Bu durum özellikle buhar sıkıştırma çevrimlerinde geçerlidir. Genel olarak soğutucu akışkanlarda bulunması gereken özellikler aşağıda sıralanmıştır (Özko1 1999):

- Daha az enerji sarfiyatı ile daha çok soğutma elde edebilmeli,
- Buharlaşma ısısı yüksek olmalı (daha az soğutkan akışı),
- Evaporatörde basıncı yüksek, kondenserde ise düşük olmalı,
- Viskozitesi düşük, yüzey gerilimi (kılcallığı) az olmalı,
- Çevreye ve diğer canlılara zarar vermemelidir.

Saf soğutkanlar, düşük sıcaklıktaki uygulamalarda kullanılan akışkanlar olarak göz önünde bulundurulurlar. Fakat bazen yüksek sıcaklıklarla ilgili tesislerde de kullanılabilirler.

Bugün kullanılmakta olan ısı pompası ya da soğutma makinelerinin birçoğu, bir sıvının buharlaşması esnasında çevresinden aldığı gizli ısıdan yararlanmaktadır. Yeterli derecede düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen bir sıvı, soğutma maksadıyla kullanılabilir.

En çok kullanılan soğutkan grupları şunlardır: İnorganik bileşikler, hidrokarbonlar, halojenli hidrokarbonlar, bunların yanı sıra alkoller, esterler ve az önemli olan başka akışkanlar da vardır. Ancak florlu-karbonlu soğutkanların ozon tabakasına zarar vermeleri ve sera etkisi yapmalarından dolayı uluslararası kuruluşlarca bu soğutkanlar yasaklanmıştır. Bu soğutkanların yerine çevre dostu yeni alternatif soğutkanlar kullanılmaktadır.

Günümüzde ısı pompası sistemlerinde çevre dostu olan yeni alternatif soğutkanlar olarak R-407C, R-410A, R-404 ve R-134 çok sık kullanılmaktadır.

2.5. Buhar Sıkıştırılmalı Isı Pompasının Termodinamiği

İdeal ısı pompası, ideal bir motor çevriminde olduğu gibi, içten ve dıştan tersinirdir. Bu şekilde birçok teorik çevrim vardır, fakat Ters Carnot Çevriminin iyi bilinmesi gereklidir. Ters Carnot Çevrimli ısı pompasının T-s diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir. Şekil 2.1 incelendiğinde, yüksek sıcaklık bölgesine aktarılan ısı transferi,

$$Q_H = T_H (s_2 - s_3) \quad (2.1)$$

şeklinde olup, düşük sıcaklık bölgesinden çekilen ısı transferi,

$$Q_L = T_L (s_1 - s_4) = T_L (s_2 - s_3) \quad (2.2)$$

denklemleri ifade edilir. Termodinamiğin birinci kanunundan iş girişi ise,

$$W = Q_H - Q_L \quad (2.3)$$

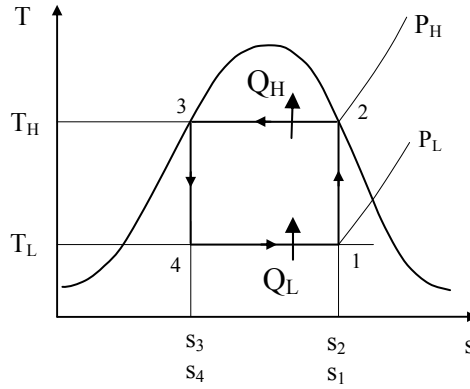
$$Q_H - Q_L = (T_H - T_L)(s_2 - s_3) \quad (2.4)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bir ısı pompasında, I. Kanun verimine göre “atılan ısı/giren iş (elde edilen/harcanan)” oran performans katsayısı (COP) olarak adlandırılır.

Entropi tanımı ve termodinamik kanunlar kullanılarak, Carnot performans katsayısı (COP_C),

$$COP_C = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (2.5)$$

denklemleriyle hesaplanır. Tersinir işlemler yapılabilirse de aşağıdaki sebeplerden dolayı Ters Carnot Çevrimi'nin uygulanabilirliği zordur.



Şekil 2.1. Ters Carnot çevrimli ısı pompasının T-s diyagramı

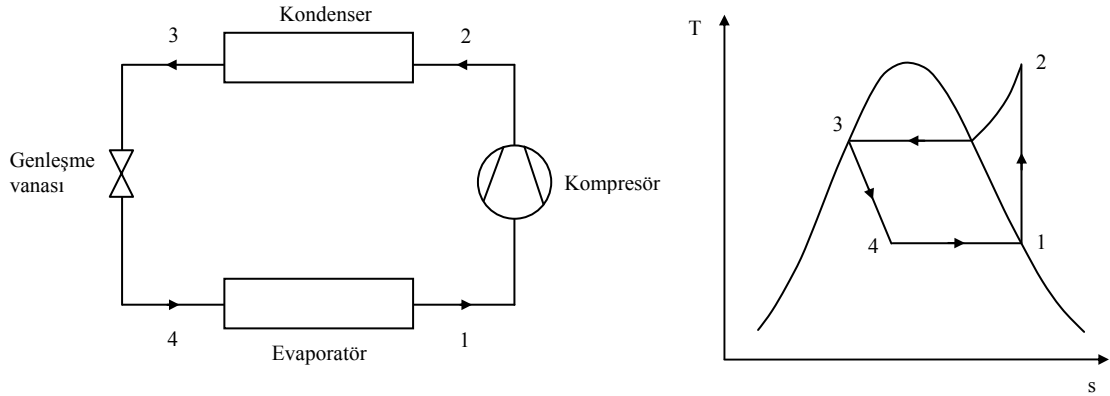
- Islak bölgedeki sıkıştırma işleminde birçok uygulama problemi vardır.
- Yüksek basınçlı sıvının düşük basınçlı ıslak buhara genişlemesinde de uygulamada problemler vardır.
- Ayrıca genişlemeden dolayı ortaya çıkan küçük bir iş, çevrime giren net işte önemsiz derecede bir azalmaya sebebiyet verir.

Carnot Çevriminde, hemen hemen izotermal şartlar altında gerçekleşen ısı girişi ve çıkışı sağlamak gerekir. Bunu gerçekleştirmek için, seçilmiş olan akışkan istenen sıcaklık ve basınçlarda faz değiştirecektir. Buharlaştırırken ısı çekecek ve yoğuşurken ısı atacaktır. Bu prosesler, çevrimin izotermal işlemlerinde gerçekleşir. Çoğunlukla

kompresör tiplerinin mekaniksel sınırlamalarından dolayı, normalde çevrimin sıkıştırma işlemi kuru buharda gerçekleşir (Özyurt 2002).

Ters Carnot çevriminin uygulanmasındaki güçlükler, buharı sıkıştırmadan önce tamamen buharlaştırarak ve sıvı oranı yüksek bir karışımın genişlemesini kısılma işlemiyle gerçekleştirerek aşılabılır. Kısılma işlemi, sıvıyı bir genişleme vanasından veya kılcal borulardan geçirerek yapılabilir. Bu şekilde elde edilen çevrim, ideal buhar sıkıştırmalı çevrim diye bilinir (Çengel ve Boles 1989).

İdeal buhar sıkıştırmalı çevrimin şematik resmi ve T-s diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. İdeal buhar sıkıştırmalı çevrimin şematik resmi ve T-s diyagramı

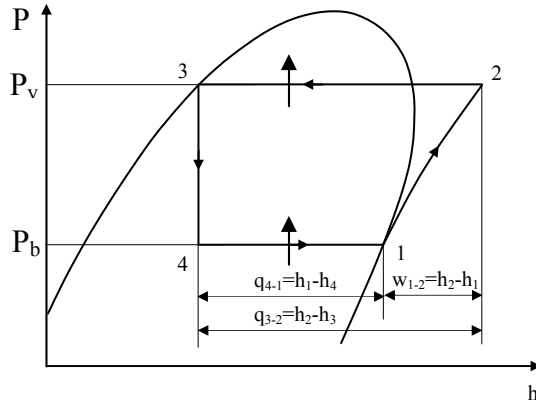
Bu çevrimdeki hal değişimleri aşağıdaki gibi gerçekleşir:

- 1-2 Kompresörde sabit entropide (izentropik) sıkıştırma
- 2-3 Kondenserde çevreye sabit basınçta ısı geçişi (yoğuşma işlemi)
- 3-4 Genleşme vanasında sabit entalpide (izentalpik) genişleme
- 4-1 Evaporatörde soğutucu akışkana sabit basınçta ısı geçişi (buharlaşma işlemi)'dir.

İdeal buhar sıkıştırmalı çevrimde, soğutucu akışkan kompresöre 1 noktasında doymuş buhar olarak girer ve izentropik olarak kondenser basıncına sıkıştırılır. Soğutucu

akışkan 2 noktasında kızgın buhar halinde kondensere girer ve sabit basınçta yoğuşarak 3 noktasında kondenserden doymuş sıvı olarak çıkar. Yoğuşma sırasında soğutucu akışkandan çevreye ısı geçişi olur. Doymuş sıvı haldeki soğutucu akışkan, genişleme vanasından geçirilir ve basıncı evaporatör basıncına düşürülür. Bu süreç, 3-4 noktaları arasında sabit entalpide gerçekleşir (Şekil 2.3). Bu hal değişimi esnasında soğutucu akışkan sıcaklığı, soğutulan ortam sıcaklığının altına düşer. Soğutucu akışkan 4 noktasında evaporatöre girer ve sabit basınçta soğutulan ortamdan ısı alarak buharlaşır. Soğutucu akışkan, evaporatörden doymuş buhar olarak çıkar ve 1 noktasında tekrar kompresöre girerek çevrimi tamamlamış olur.

Şekil 2.3'te gösterilen ideal buhar sıkıştırımlı çevrimin P-h diyagramından da görüldüğü gibi, enerji transferleri ve performans katsayısı (COP) aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.



Şekil 2.3. İdeal buhar sıkıştırımlı çevrimin P-h diyagramı

$$w_{1-2} = h_2 - h_1 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.6)$$

$$q_{3-2} = h_2 - h_3 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.7)$$

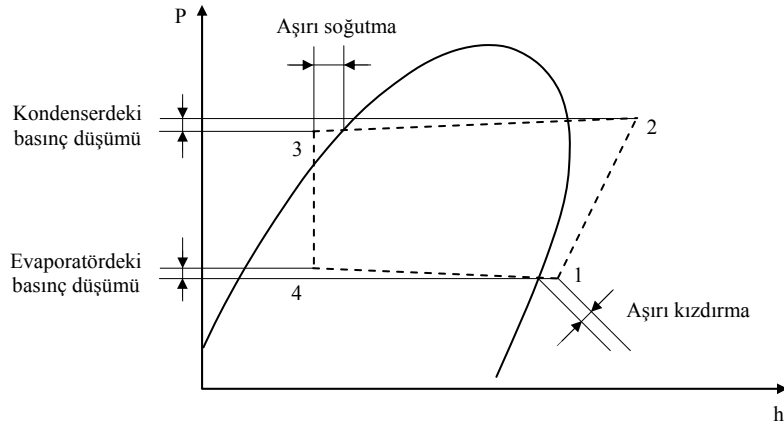
$$h_3 = h_4 \quad (\text{kısılma işlemi}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.8)$$

$$q_{4-1} = h_1 - h_4 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.9)$$

$$\text{COP} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (2.10)$$

Gerçek buhar sıkıştırımlı çevrimin P-h diyagramı ve hal değişim noktaları Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Gerçek çevrimin ideal çevrimden farkları şunlardır:

- Sıkıştırma, ne tersinir ne de adyabatiktir (izentropik değildir). Bunun sebebi kompresörde hem ısı transferi, hem de sürtünme etkisinin olmasıdır.
- Kondenserden geçen akışkan için küçük bir basınç düşüşü vardır. Aynı zamanda sıvının bir miktar aşırı soğutulması gerekir.



Şekil 2.4. Gerçek buhar sıkıştırımlı çevrimin P-h diyagramı ve hal değişim noktaları

- Kısılma işlemi adyabatik değildir.
- Uygulama (pratik) nedenlerinden dolayı evaporatörde küçük bir basınç düşüşü vardır ve aynı zamanda kompresör emişinde bir miktar aşırı kızdırmanın sağlanması normaldir.

Diğer taraftan, şayet iş girişi, bir elektrik motorunu çalıştırmak için gerekli elektrik girişi olarak verilirse, (COPs) değeri motorun verimine bağlı olarak azalacaktır. Elektrikle çalışan bir gerçek ısı pompasının (COPs) değeri, ters Carnot çevrimin (COPc) değerinin yaklaşık 0,5'ine eşittir.

Bilindiği üzere soğutma makinalarında soğutulacak ortamdan alınan ısı ile kompresöre verilen enerji, yoğuşturucudan (kondenserden) dış ortama atılmaktadır. Yani soğutma devresinde soğutma işlemi, buharlaştırıcının (evaporatörün) bulunduğu yerde sağlanmaktadır. Isı pompalarında ise, dışarıya atılan ısı enerjisinden faydalanılmaktadır. Isı pompasında ısıtma işlemi, kondenserin bulunduğu yerde sağlanmakta olup, soğutma devresinden tek farkı amacın başka elemanlarla gerçekleştirilmesidir (Dağsöz 1981).

2.6. Isı Pompası Uygulamaları

Isı pompaları günümüzde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Isı pompası uygulamaları temel olarak aşağıdaki üç grupta toplanabilir:

1. Isıtma uygulamaları:

Isı pompaları, konut ısıtmasında ve sıcak su üretiminde kullanılabilir.

Isı pompaları, müstakil evler, apartmanlar, oteller, iş merkezleri, okullar, hastaneler gibi yeni ve mevcut binaların ısıtılması için uygundur. Düşük enerji evleri için ısı pompası sistemleri talepleri karşıladığı için kaçınılmazdır. Diğer tüm ısıtma sistemleri gibi ısı pompaları da hemen hemen tüm uygulamalar için elverişlidir (Viessmann 2009).

1990'lı yılların başından itibaren Almanya'da gelişmeye başlayan ısı pompası pazarında taleplerin hemen hemen tamamı düşük kapasiteler üzerineydi. Genellikle müstakil evlerde tercih ediliyordu. Bu da ısı pompalarının sadece düşük kapasiteler için uygun bir seçim olduğu izlenimi veriyordu. Öte yandan uygun bir projelendirme ile ısı pompaları çok daha büyük kapasiteleri de karşılayabilmektedir. Özellikle toprak

kaynaklı ısı pompaları hastane, otel gibi endüstriyel binaların ısıtması ve kullanma suyu için tercih edilmektedir (Viessmann 2009).

Büyük binalarda orta güçteki yani 20-200 kW kapasite aralığındaki ısı pompaları kullanılmaktadır. Almanya'da 20 kW'lık kapasitedeki ısı pompaları orta güçte diye adlandırılmasına rağmen İsviçre ve İsveç gibi ülkelerde 50 kW düşük kapasite olarak kabul edilmektedir (Viessmann 2009).

İsveç gibi İskandinav ülkelerinde 100 kW kapasitenin üzeri orta güç olarak kabul edilmektedir. Bu ülkelerde megawatt mertebelerinde ısı pompaları monte edilmektedir (Viessmann 2009).

Yüksek kapasite gerektiren büyük mahallerde kurulacak ısı pompası muhtemelen küçük kapasiteli bir tesise göre daha ekonomiktir. Sistemin kapasitesi seçimde önemlidir. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin ilk maliyetinde en büyük pay ısı değiştirgecinin maliyetidir. Dolayısıyla ısı değiştirgecinin toprağa döşenme şekli, borunun tipi, çapı ve döşenecek uzunluk, bu maliyeti önemli ölçüde etkiler. Bu maliyetlerin belirlenmesinden önce ısıtma ve soğutma yükleri hesaplanmalı daha sonra toprak bağlantı sisteminin tahmini boyu yerleştirme şekli ve tanzimi göz önüne alınmalıdır. Dikey veya yatay şekil, seri veya paralel tanzim, çap ve boru tipi seçimlerinin hepsi maliyet üzerinde etkilidir (Ekinci 2007).

Isı pompasının performansı, değişik faktörlerden etkilenir. Bu yüzden, seçim her kurulan sistemin karakteristiklerine göre belirlenmelidir. İmalatçıların verisi, istenilen koşullarda mevcut olmalıdır. Kritik olan koşullar, su giriş sıcaklığı ve mevcut sistemin debisidir (Kavanaugh 1989).

2. Kombine uygulamalar:

Isı pompaları kışın ısıtma, yazın sıcak su üretimi veya soğutma sistemi olarak da kullanılabilir.

3. Endüstriyel uygulamalar:

Isı pompaları, buharlaşma, damıtma, süt pastörizasyon ve kurutma işlemleri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır.

2.7. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sistemlerinin Uygulama Alanları

Toprak kaynaklı ısı pompaları, genellikle, klima ve ısıtma sistemlerine uygulanır. Bununla beraber, diğer soğutma uygulamalarında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Toprak kaynaklı ısı pompalarını kullanımı için, öncelikle ekonomik boyut dikkate alınmalıdır. Hemen hemen, herhangi bir HVAC sistemi (ısıtma-havalandırma ve iklimlendirme sistemleri), toprak kaynaklı ısı pompası kullanılarak tasarlanmaktadır. İlk teknik sınırlama, toprak serpantin sistemi için uygun bir yerdir. Toprak kaynaklı ısı pompalarının en iyi uygulamaları ana başlıklar ile aşağıda verilmektedir (FTA 2001):

- Toprak kaynaklı ısı pompaları yeni yapılarda gider bakımından etkindir. Yararlı ömrün sonunda mevcut bir sistemin yerine kullanmak için gider bakımından etkin olabilir.
- Ya soğuk-kış yada sıcak-yaz iklimlerde, toprak kaynaklı ısı pompaları, hava kaynaklı ısı pompaları veya diğer klima sistemlerinden çok daha etkili bir şekilde kullanılabilir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, diğer elektrikli ısıtma sistemlerinden daha iyi bir performansa sahiptir. Isıtma yakıt maliyetine bağımlı olarak, diğer ısıtma sistemlerinden işletme giderleri bakımından daha ucuzdur.

Günlük sıcaklık değişimleri yüksek olan iklimlerde, toprak kaynaklı ısı pompaları yüksek etkinlik gösterir. Ayrıca, günlük sıcaklık dalgalanması büyük olan iklimlerde, toprak serpantin sistemi, ısı depolama yeteneği ile daha yüksek bir performans sağlamaktadır.

Doğalgazın olmadığı veya doğalgaz maliyetinin diğer yakıt türlerine göre paylaşımının yüksek olduğu bölgelerde, toprak kaynaklı ısı pompaları ekonomik bir işletim sağlar. Isıtma etkinliği %80-90 arasında olan geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında, ısıtma etki katsayısı 3-4,5 arasında değişir. Böylece, elektrik maliyeti, geleneksel ısıtma yakıtından 3,5 kez daha az olduğu zaman, toprak kaynaklı ısı pompaları, daha düşük elektrik maliyeti ile işletilir.

Doğalgazın (veya fuel-oil) yüksek maliyeti, klasik gaz (veya fuel-oil) ısıtma sistemleri yerine toprak kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesine neden olmaktadır. Elektrik maliyetlerinin yüksek olması, hava-kaynaklı ısı pompası yerine toprak kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesine yol açmaktadır.

Çoklu sıcaklık veya tek yük kontrolünün yararlı olduğu tesislerde, toprak kaynaklı ısı pompaları, tek bölge sıcaklık kontrolü için büyük avantaj sağlar. Çünkü, çoklu bireysel sistemler tasarlanarak kullanım imkanı vardır.

Özellikle sondaj maliyetlerinin düşük olduğu alanlarda, düşey toprak ısı değiştiricili sistemler, daha avantajlıdır. Nem içeriği yüksek olan topraklarda veya yeraltı suyu yüksek seviyeli alanlarda toprak serpantin sisteminin boyutunu azaltarak, ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır.

Toprak kaynaklı ısı pompaları genel olarak, aşağıda belirtilen avantajlara sahiptirler (Hepbaşlı ve Günerhan 2000):

Etki katsayısının yüksek ve kapasitesinin kararlı olması: Toprak kaynaklı ısı pompaları uygun bir şekilde tasarlandığı zaman, çevrimdeki sıvı sıcaklığı, ekipmanın, alışagelmiş hava kaynaklı ısı pompası ve fosil yakıtlı sistemlerden daha fazla yüksek bir performansa ve daha ekonomik işletim şartlarına sahiptirler. Soğuk su, sıcak hava yerine kondenserde beslenir, böylece kompresöre daha düşük güç ihtiyacı gerekir ve kompresör giriş/çıkış basınç farkı da azaltılmış olur. Isıtma modunda ise, dış havadan

daha yüksek sıcaklığa sahip sıvı soğutkanların ısısı, evaporatörde (buharlaştırıcıda) kaynak ısısı olarak kullanılır. Bu ise; daha yüksek kapasite ve hava sıcaklığı sağlar. Çevrim sıcaklıkları, dış hava sıcaklıklarıyla çok az değişir. Bu yüzden kapasitesi kararlıdır. Toprak kaynaklı ısı pompaları, aynı zamanda, daha büyük yapılarda yaygın olarak kullanılan merkezi ve değişken-hava debili sistemlere kıyasla, çok daha küçük fan ve pompa gücü gerektirir.

Bakım giderinin az olması: Toprak kaynaklı ısı pompaları, dış ünite olmadan kurulabilirler. Böylece, korozyon ve dış hava etkisiyle oluşan oksidasyon gibi sorunlar en aza indirilmiştir. Tüm ısı pompası ekipmanı, iç ünite şeklindedir. Ekipman için, klasik ekipmanlarda ortaya çıkan yüksek veya düşük soğutkan basınçları söz konusu değildir.

Çevre dostu olması: EPA (Amerikan Çevre Koruma Acentesi) raporuna göre, Toprak kaynaklı ısı pompaları; “analiz edilen tüm teknolojilerin en düşük CO₂ emisyonları ve en düşük toplam çevre giderleri” olan sistemler olarak tanıtılmaktadır. İyi tasarlanan ve kurulan Toprak kaynaklı ısı pompalarının etkinliğinin artması, gerekli olan enerji miktarını azaltır. Böylece, sistemden çevreye atılan kirleticiler ve diğer emisyonlar azaltılmış olur.

2.8. Ekonomik Analiz

Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması son yıllarda giderek daha geniş kesimlerce anlaşılması, ülkelerin enerji bilançolarını yeniden gözden geçirmeye ve enerji savurganlığının ortadan kaldırmaya yöneltmiştir. Gerek devletlerin ve gerekse büyük ulusal firmaların özellikle 2000’li yıllarda ön plana çıkan enerji ve üretim politikaları, kısaca şu şekilde özetlenebilir: Bir yandan enerji güvencesi sağlanacak, diğer yandan ekonomik gelişme elde edilecek ve bunun yanı sıra da çevre korunacaktır (Ekinci 2007).

Bizim gibi gelişmekte olan ülkelerde sanayi ürünlerinin gayri safi milli hasıla içindeki payının artırılması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, sanayide kullanılan enerji maliyetinin düşürülmesi, imalatçının bol ve ucuz üretim yapmasına fırsat tanıyacaktır. Bu durumda iki seçenek vardır. Dışa bağımlı pahalı yatırımlarla ve yepyeni bir teknoloji ile enerji elde etmek veya enerji tasarrufu ile birlikte ucuz enerji kaynaklarını devreye sokmak. Günümüzde ikinci tercihin kabul edilmesi, gelişme yolunda olan ülkemiz için daha akılcı olacaktır (Pala ve Devres 1987).

Fosil yakıt kaynaklarının azalması ve aynı zamanda maliyetlerindeki artış, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmıştır. Ülkemizin de içinde bulunduğu, enerji ihtiyacını ithalat yolu ile karşılayan ülkeler bu konuyu acil olarak gündeme almışlardır. Bu bağlamda, fosil yakıt kullanımını azaltmak ve çevresel problemleri en aza indirmek amacıyla, yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeline sahip ülkelerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmaktadır (Kıncay vd 2009).

Enerji sistemlerinin seçiminde verimliliğin yanında diğer önemli kriter ekonomiktir. Hangi sistemin seçileceği iyi bir ekonomik analiz yapılarak belirlenir. Isıtma sistemlerinde de maliyet analizi çok önemlidir. Çünkü soğuk iklimlerde ısınma giderleri ciddi bir bütçe payına sahiptir. Isıtma sistemlerinin; kullanılan yakıtın cinsi-maliyeti-kullanım kolaylığı-çevreye etkisi-güvenliği gibi etkileri de göz önünde bulundurularak optimum maliyet analizi yapılmalı ve bu doğrultuda yatırım gerçekleştirilmelidir.

Bir sistemin ekonomik değerinin ölçümü ve alternatif yatırımların mukayesesi için birçok metot vardır. Bunlardan bazıları:

- Şimdiki değer metodu
- Yıllık eşdeğer metodu
- Gelecek değer metodu
- Geri ödeme oranı metodu

- Kar/yatırım oranı metodudur.

Bu metotların hepsi eşdeğerdir. Bu nedenle bir enerji sistemin analizinde hangisi kullanılırsa kullanılsın benzer alternatif sonuç elde edilmektedir.

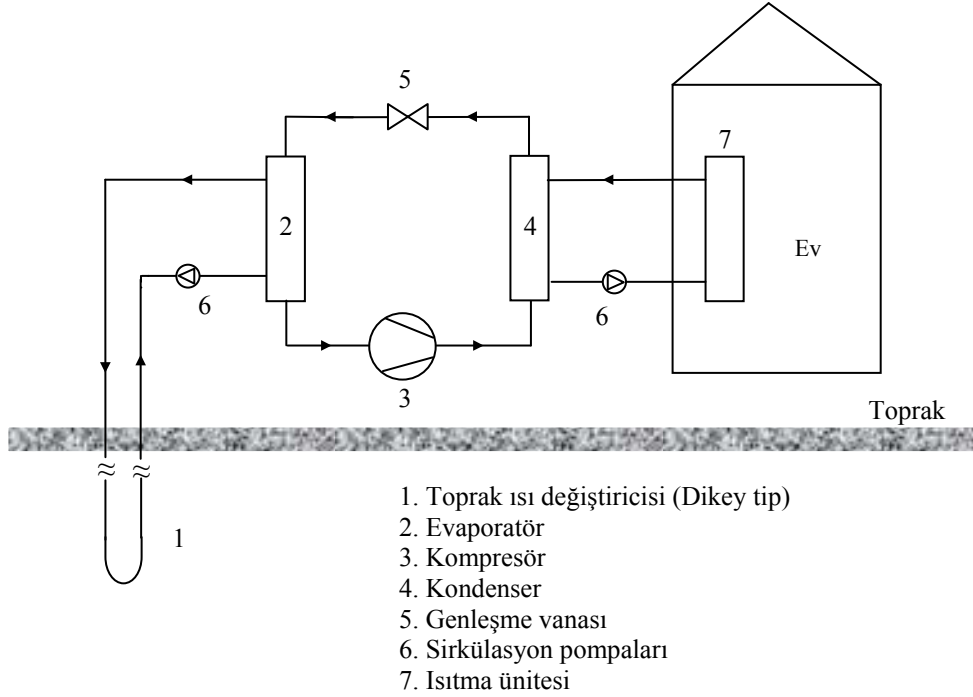
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde; örnek bina ısı kayıpları ve toprak ısı değiştirici hesapları yapılmış, maliyete etki eden faktörlerden, toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Son bölümde ise ekonomik analizin yapılacağı “Bugünkü Değer Yöntemi” hakkında bilgi verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında sırasıyla aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır:

- Seçilmiş olan örnek bir binanın, TS 825’e göre (Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği’ne) göre toplam ısı transfer katsayısı (K_{top}) hesaplanmıştır.
- Bin yöntemi kullanılarak, binanın yıllık toplam ısı kaybı bulunmuştur. Isıtma için çalışma faktörü (F_i) hesabı yapılmıştır.
- Toprak ısı değiştiricisi boru boyu, gerekli sondaj uzunluğu ve ısı pompasının ilk yatırım maliyetleri hesaplanmıştır.
- Birim ısıtma enerjisi için güncel fiyatlarla yakıtların yıllık maliyet analizi yapılmıştır.
- Mervcut ısıtma sistemlerinde kullanılan yakıtlar için emisyon değerleri hesaplanmıştır ve karşılaştırılması yapılmıştır.
- Bugünkü değer yöntemi kullanılarak, ısı pompası ve diğer ısıtma sistemlerinin ekonomik karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi toprak ısı kaynaklı ısı pompası sistemi, toprak ısı değiştiricisi, ısı pompası ve ısıtma ünitesi olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır:



Şekil 3.1. Toprak kaynaklı ısı pompasının şematik resmi

3.1. Toprak Isı Değiştiricisi

Topraktan ısı enerjisini çekip, ısı pompasının evaporatörüne kaynak sağladığı elemandır. Yüzeiden belirli derinliklerde toprak, ısı kaynağı bakımından özellikle kış aylarında dış ortam sıcaklığına göre önemli derecede enerji potansiyeline sahiptir. Bu enerji yüzeiden derinliklere inildikçe artmaktadır. Kış aylarında dış ortam sıcaklıklarının -20 ile -30°C 'lere ulaştığı soğuk iklim bölgelerinde, yaklaşık 50 m derinliklerdeki toprağın buldukları iklim kuşaklarına göre 10 ile 17°C arasında değişen sıcaklık değerlerine sahip oldukları bilinmektedir. Kullanılabilirlik bakımından bu değerler önemli değerlerdir. Yerkürenin derinliklerinde var olan bu ısı kaynakları, ısı pompaları vasıtasıyla ısıtma sezonlarında faydalı hale getirmek mümkün olabilmektedir.

3.2. Isı Pompası

Düşük sıcaklıktaki enerji kaynağından ısı çekerek, daha nitelikli yüksek sıcaklıktaki ısı enerjisinin elde edildiği kısmı oluşturur.

Isı pompası temel olarak, gaz devresi, su devreleri ile ölçüm ve kontrol elemanları olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

3.3. Isıtma Ünitesi

Isı pompasının kondenserinden alınan ısı enerjisi, radyatörler vasıtasıyla ısıtma mahalline aktarılır.

3.4. Örnek Bina ve Isı Kayıplarının Hesaplanması

Erzurum'daki örnek bir bina için TS 825'e göre ısı kayıpları hesaplanmış (Çizelge 3.1.) ve bu binayı ısıtmak için kullanılacak ısı pompası ve diğer sistemler buna göre boyutlandırılmış ve sistemlerin ekonomik analizi yapılmıştır. Bina ısı kayıplarının hesaplanmasında aşağıda açıklanan "bin yöntemi" kullanılmıştır.

3.4.1. Bin yöntemi

Bin metodu ısıtma ve soğutma için gereksinim duyulan enerji miktarını tahmin etmek için kullanılır. Bin değerleri; bir sıcaklık aralığının, belli bir zaman periyodundaki görüldüğü saatlerin sayısı olarak tanımlanır. Bin yönteminde sıcaklık ve zaman aralıkları ayrı ayrı değerlendirilerek gerek aylık, gerekse yıllık enerji sarfiyatı kolaylıkla belirlenebilir. Bin metodunda anlık enerji hesaplamaları farklı dış ortam kuru termometre sıcaklık şartlarında gerçekleştirilir. Bin yöntemi günlük ortalama sıcaklık değerleri yerine saatlik iklim değerlerine bağlı olduğundan derece gün yönteminden çok daha hassas sonuçlar verir (Bulut vd 2003).

Bin yöntemi ısıtma veya soğutma sistemlerinin kısmi-yük performanslarının belirlenmesinde ve ısı pompası sistemlerinin analizi için de özel olarak kullanılabilir.

Çizelge 3.1. Bina yapı malzemelerinin ısı ve fiziksel özellikleri

Yapı Elemanı	Malzeme	Kalınlık (m)	Isı iletim katsayısı (W/m ² °C)	R (m ² K/W)	U (W/m ² °C)	Alan (m ²)	UA [W/°C]
Duvar-1:Dış Havaya Açık	1/α _i			0,130	0,363	537,00	194,88
	Alçı harcı, kireçli alçı harcı	0,020	0,700	0,029			
	Yatay delikli tuğla	0,019	0,360	0,528			
	Çimento harcı	0,020	1,600	0,013			
	Ekstrüde polistren köpüğü	0,060	0,030	2,000			
	Anorganik esaslı hafif agrega	0,005	0,300	0,017			
	1/α _d			0,040			
Duvar-2:Dış Havaya Açık	1/α _i			0,130	0,430	167,40	71,92
	Alçı harcı, kireçli alçı harcı	0,020	0,700	0,029			
	Donatılı	0,250	2,500	0,100			
	Çimento harcı	0,020	1,600	0,013			
	Ekstrüde polistren köpüğü	0,060	0,030	2,000			
	Anorganik esaslı hafif agrega	0,005	0,300	0,017			
	1/α _d			0,040			
Tavan:Çatılı kullanılan tavan	1/α _i			0,130	0,307	372,00	114,16
	Alçı harcı, kireçli alçı harcı	0,020	0,700	0,029			
	Donatılı	0,150	2,500	0,060			
	Mineral ve bitki lifli ısı yalıtım	0,120	0,040	3,000			
	1/α _d			0,040			
Taban:Toprak temaslı taban	1/α _i			0,170	0,297	372,00	55,18
	Granit	0,009	2,800	0,003			
	Çimento harçlı şap	0,030	1,400	0,021			
	Gözenekli hafif agrega	0,100	0,390	0,256			
	Ekstrüde polistren köpüğü	0,040	0,030	1,333			
	Donatısız	0,050	1,650	0,030			
	Kum,Çakıl, Kırmataş(mıcır)	0,900	0,700	1,286			
	Donatılı	0,500	2,500	0,200			
	Donatısız	0,050	1,650	0,030			
	Donatılı	0,100	2,500	0,040			
1/α _d			0,000				
Dış Pencere					3	62,4	187,2
Dış Kapı					4	5,95	23,8
Isıtılan İç Ortam Kapısı				0,5 X A X U	5,5	6,6	18,15

Çizelge 3.1. (devam)

Binanın Boyutları	30 X 16 X 9 m
Havalandırma	1056 W/°C
İletim yolu ile gerçekleşen ısı kaybı	642,7 W/°C
Toplam ısı transfer katsayısı	1698,7 W/°C

Erzurum için aylık ve yıllık toplam N_{bin} değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Erzurum için aylık ve yıllık toplam N_{bin} değerleri (Bakırcı vd 2006b)

Aylar	Sıcaklık aralığı (°C)																		
	-21/ -18	-18/ -15	-15/ -12	-12/ -9	-9/ -6	-6/ -3	-3/ 0	0/ 3	3/ 6	6/ 9	9/ 12	12/ 15	15/ 18	18/ 21	21/ 24	24/ 27	27/ 30	30/ 33	33/ 36
Ocak	9	76	180	187	194	85	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Şubat	8	57	127	211	153	99	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mart	0	0	4	85	127	90	209	97	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nisan	0	0	0	0	0	2	68	176	174	149	134	17	0	0	0	0	0	0	0
Mayıs	0	0	0	0	0	0	0	25	137	159	149	147	107	20	0	0	0	0	0
Haziran	0	0	0	0	0	0	0	0	21	131	121	117	121	127	82	0	0	0	0
Temmuz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	84	129	124	101	124	146	25	0	0
Ağustos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	96	123	114	97	91	169	39	0	0
Eylül	0	0	0	0	0	0	0	13	86	118	95	97	82	129	83	17	0	0	0
Ekim	0	0	0	0	0	0	21	161	163	107	114	80	86	12	0	0	0	0	0
Kasım	0	0	0	3	66	143	206	129	102	53	18	0	0	0	0	0	0	0	0
Aralık	0	10	55	181	254	165	68	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Yıllık	17	143	366	667	794	684	602	612	715	743	811	710	634	486	380	332	64	0	0

Bin yönteminde, belirli bir döneme ait (ay, yıl) dış hava sıcaklıklarının (T_o) ele alınan belirli aralıklarında (bin) kaç saat (N_{bin}) oluştuğu tespit edilir. Bu sıcaklık değerinin oluşma süresine (saatine) göre enerji miktarı tespit edilir. Toplam enerji sarfiyatı, bütün sıcaklık aralıklarındaki enerji sarfiyatları toplanarak bulunur (Bulut vd 2003).

$$Q_{\text{bin}} = N_{\text{bin}} \frac{K_{\text{top}}}{\eta_h} (T_{\text{den}} - T_o)^{\pm} \quad (3.1)$$

Burada K_{top} ($W/^{\circ}C$) ve η sırasıyla binanın toplam ısı transfer katsayısı ve ısıtma veya soğutma sisteminin (HVAC) verimidir. N_{bin} (h) belirli bir sıcaklık aralığında tekrarlanan saat sayısı, T_o sıcaklık aralığının orta noktası, T_{den} ise denge noktası sıcaklığıdır.

Denge noktası sıcaklığı, ısıtma ve soğutmanın gerekli olduğu dış ortam sıcaklığının alt ve üst değeridir. Bu değer ısıtmada genellikle $18^{\circ}C$ alınır. Eşitlik (3.1)'de parantez üzerindeki işaret (\pm), ısıtma için pozitif değerlerin soğutma için ise negatif değerlerin hesaba katılacağını gösterir.

3.4.2 Örnek bina ısı kayıpları

Erzurum ili, Aziziye İlçesinde bulunan örnek binada bulunan yapı malzemelerinin ısı ve fiziksel özellikleri için, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği hesap programı kullanılarak, toplam ısı transfer katsayısı K_{top} ($W/^{\circ}C$) hesaplanmış (Çizelge 3.1) ve bu değer eşitlik (3.2)'de kullanılarak binanın Q_{bin} değeri bulunmuştur.

3.5. Toprak Isı Değiştiricisinin Uzunluğunun Hesaplanması

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde toprak ısı değiştiricisinin uzunluğu eşitlik (3.2)'de verilen bağıntıyla hesaplanabilir.

$$L = \frac{572 \frac{COP_I - 1}{COP_I} [R_b + (R_t \times F_t)]}{(T_l - T_{\text{min}})} \quad (3.2)$$

Burada:

L : kW başına gerekli olan boru uzunluğu (m/kW)

COP_1 : Isı pompası ısıtma tesir (performans) katsayısı

R_t : Toprak direnci ($m^{\circ}C/W$)

R_b : Boru direnci ($m^{\circ}C/W$)

T_1 : Yılın en düşük toprak sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_{min} : Üniteye (evaporatöre) giren minimum akışkan sıcaklığı ($^{\circ}C$)

F_1 : Isıtma çalışma faktörü

Toprak ısı değiştiricisi boru boyu hesabı için gerekli olan çalışma faktörünün hesaplanması Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. $\Sigma(B)$ sütunu eşitlik 3.1'den hesaplanmıştır.

Çizelge 3.3. Isıtma için çalışma faktörünün (F_1) hesabı (ısıtma denge noktası sıcaklığı= $18^{\circ}C$)



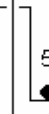




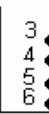



Sıcaklık aralığı ($^{\circ}C$)	(A) Hava verisi (h/yıl)	(B) Toplam ısı kaybı (kWh/yıl)	ISITMA
-21 / -18	17	1094	(C) Toplam ısı kaybı
-18 / -15	143	8465	$\Sigma(B) = 208.075$ kWh/yıl
-15 / -12	366	19782	
-12 / -9	667	32618	(D) Toplam saat
-9 / -6	794	34741	$\Sigma(A) = 7498$ h/yıl
-6 / -3	684	26407	
-3 / 0	602	20142	(E) Ortalama
0 / 3	612	17327	$C/D = 27,75$ kW/h
3 / 6	715	16562	
6 / 9	743	13386	(F) Cihazın ısıtma kapasitesi:
9 / 12	811	10437	43 kW
12 / 15	710	5482	
15 / 18	634	1632	
Toplam	7498	208.075	$F_1 = (E) / (F) = 0,645$

Toprak direnci, ısı akışının toprakta ilerleme hızını ifade eder. Isı geçişine karşı koyan güç toprak ısı direncidir. Hafif kuru bir toprağın taşıdığı ısı enerjisi, yoğun nemli bir toprağa nazaran daha az hızlıdır. Yani nemli toprağın ısı direnci kuru toprağa göre daha düşüktür. Bunun dışında, toprağın yüzeyden itibaren derinliği, boruların birbirleri

arasındaki mesafeleri, boru çapı ve adedi toprak direncini etkileyen faktörlerdir (Miles 1994).

Toprak tipine bağlı olarak toprak dirençleri (R_t), Çizelge 3.4'te verilmiştir. Çizelge 3.4'ten toprağın yoğun nemli, ağır, kuru ve hafif nemli olması durumunda 3/4" ile 2" arası boruların, yatay ve düşey, tekli ve çoklu olma durumları göz önüne alınarak toprak dirençleri okunabilir.

Çizelge 3.4. Toprak direncinin toprak şartları ve boru çapına göre değişimi (Hepbaşlı ve Hancıoğlu 2001)

		R_t (AĞIR TOPRAK-NEMLİ)										R_t (KAYA)
		R_t (AĞIR TOPRAK-KURU VEYA HAFİF TOPRAK-NEMLİ)										R_t (AT-NEMLİ)
												
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
BORU ÖLÇÜSÜ	3/4"	1.02	1.06	1.09	1.11	1.31	1.37	2.05	2.15	2.11	1.88	0.6
		1.38	1.44	1.47	1.49	1.77	1.84	2.75	2.86	2.85	2.53	1.06
	1"	0.97	1.02	1.04	1.06	1.26	1.32	2	2.1	2.07	1.84	0.57
		1.32	1.37	1.4	1.42	1.7	1.77	2.88	2.79	2.78	2.47	1.01
	1_1/4"	0.92	0.97	0.99	1.01	1.22	1.27	1.96	2.05	2.02	1.79	0.54
		1.25	1.31	1.34	1.36	1.63	1.7	2.61	2.72	2.71	2.4	0.96
	1_1/2"	0.89	0.94	0.97	0.98	1.19	1.25	1.92	2.02	1.99	1.76	0.53
		1.21	1.27	1.3	1.32	1.59	1.66	2.57	2.68	2.67	2.36	0.94
	2"	0.85	0.89	0.92	0.94	1.14	1.2	1.88	1.98	1.94	1.71	0.5
		1.15	1.2	1.24	1.26	1.53	1.6	2.51	2.62	2.61	2.29	0.89

Boru özelliğine bağlı olarak boru dirençleri (R_b), Çizelge 3.5'ten alınabilir;

Çizelge 3.5. Boru çapına bağlı olarak boru dirençleri

R_b (yatay) / R_b (düşey)				
Boru çapı	PE SCH-40	PE SDR-11	PE SDR-17	PE SDR-13,5
3/4"	0,17/0,116	0,144/0,096	0,16/0,11	0,20/0,14
1"	0,159/0,109	0,144/0,096	0,16/0,11	0,20/0,14
1 1/4"	0,130/0,089	0,144/0,096	0,16/0,11	0,20/0,14
1 1/2"	0,117/0,080	0,144/0,096	0,16/0,11	0,20/0,14
2"	0,098/0,068	0,144/0,096	0,16/0,11	0,20/0,14

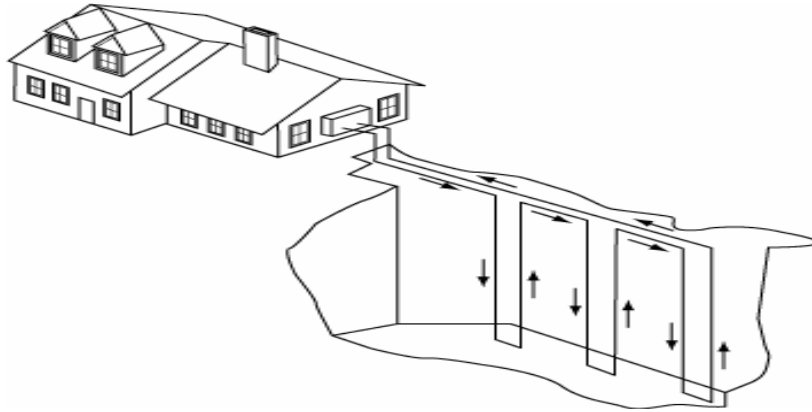
Çizelge 3.6’da dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası için boru boyu hesabı verilmiştir. Çizelge 3.6 incelendiğinde, Erzurum’da ısı yükü; zemin kat için 14080 Watt, 1.kat için 14080 Watt, 2.kat için 14510 Watt olan ve buradan toplam ısı kaybı 43 kW civarında olan örnek bir binanın toprak kaynaklı ısı pompası ile ısıtılması durumunda gerekli boru uzunluğu; boru çapı 1 1/2", $COP_1=5$ ve $COP_1=6$ olması durumlarında sırasıyla 1445 m ve 1505 m olarak hesaplanmıştır. Burada hesaplanan boru uzunluğu, birinci derecede bölgenin toprak yapısı ve binanın gerekli ısı yüküyle ilişkilidir. Toprak yapısına bağlı olarak boru uzunluğunun artması, kullanılacak boru ve sondaj maliyetini direkt etkileyeceğinden, bu durum sistemin ilk yatırım maliyetini de etkileyecektir.

Eşitlik 3.2’de geçen ifadelerin değerleri ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Dikey toprak kaynaklı ısı pompasında boru boyu hesabı

Boru uzunluğu L (m)	Kapasite (kW)	COP_1	R_b ($m^{\circ}C/W$)	R_t ($m^{\circ}C/W$)	F_1	T_1 ($^{\circ}C$)	T_{min} ($^{\circ}C$)	Boru çapı (İnç)	Sondaj sayısı (Adet)
1445	43	5,00	0,080	1,210	0,645	11,80	0	1 1/2"	10 (75m)
1505	43	6,00	0,080	1,210	0,645	11,80	0	1 1/2"	10 (75m)

Şekil 3.2’de ise, dikey tip toprak kaynaklı ısı pompası için boru yerleşim şekli görülmektedir.



Şekil 3.2. Dikey toprak kaynaklı ısı pompası sistemi boru yerleşimi (Hepbaşlı ve Ertöz 1999)

3.6. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Tasarımında Önemli Noktalar

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken bazı konular ve öneriler aşağıda verilmiştir (Hepbaşlı ve Hancıoğlu 2001):

- Toprak çevrimini tasarlamadan önce, alanda jeoteknik bir araştırma yapılmalıdır. Sığ derinliklerdeki (3 m'den 12 m'ye kadar) örnekleme, elek analizi ve nem içeriği dahil edilmelidir. Toprak tipi (kum, kaya, kil, çakıl vs.), statik yer suyu seviyesi, delme zorluğu ve dikey bir U-tüp ısı değiştirici yerleştirme zorluğu belirlenmelidir.
- Toprak ısı değiştiricisi olarak, ısıl fizyonla birleştirilmiş yüksek yoğunluklu polietilen boruların kullanılması önerilmektedir. Bu boru, sağlam, güvenli, metal borudan daha ekonomik ve su çevriminde inhibitör ihtiyacı gerekmemektedir.
- Toprak kaynaklı ısı pompasında ısı iletim katsayısı düşük olan akışkan kullanımından sakınılmalıdır. Bu sıvılar sistemin maliyetini iki şekilde etkilerler:
 1. Pahalıdır ve çevrimin etkisini azaltır, dolayısıyla daha çok uzunluk gerektirir.
 2. Boru delik çapları, sıvı maliyetini ve termal hatayı azaltmak için minimize edilmelidir.
- Deneyimli toprak-çevrim uzmanlarına danışılmalıdır. İyi uzmanlar, U-tüp yerleştirme ve toprak başlıklarındaki borulama metotlarını yaparlar ve kolayca hava, kir ve enkazı temizleyebilirler.
- Tam ve dikkatli bir ısı kazancı ve kaybı çalışması yapılmalıdır. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinde ilk yatırım maliyeti fazladır.
- Daha uzun çevrim ile dengelenen uzun-dönem ısı depolama etkilerini minimize etmek için, dikey sistem boruları ayrılmalıdır. Tasarım programlarıyla boru ayırma uzaklıklarının etkileri mühendislerce incelenebilmesine rağmen, minimum önerilen borular arası mesafe 6 m olmalıdır.

Özellikle soğuk iklimlerde kurulacak toprak kaynaklı ısı pompalarında toprağın kış aylarında donma olasılığı da göz ardı edilmemelidir. Bu tip yerlerde toprak ısı değiştirgecinde kullanılan ısı taşıyan akışkan donmaya karşı dirençli olmalıdır.

3.7. Maliyete Etki Eden Faktörler

Toprak kaynaklı ısı pompalarının maliyetini etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar; boru cinsi, boru çapı, akışkanın özellikleri, toprak dolgu malzemelerinin kullanılıp kullanılmayacağı, yatay veya dikey olarak seçilmelerine göre gömme derinliği, delikler arası mesafe, ısı pompası ve gerekli elektrik enerjisi maliyetleridir. Bu parametrelerden bazılarının maliyetlere etkileri şöyledir (Hepbaşlı ve Hancıoğlu 2001):

3.7.1. Boru cinsi

Isı iletkenliği yüksek borular, toprak ısı değiştiricilerinin performansını artırır. Ancak toprak direncinin yanında boru direncinin etkisi küçük olduğundan boru malzemesi seçilirken, korozif ve ısıl mukavemet değerleri daha önemli rol oynar.

3.7.2 Boru çapı

Boru çapı arttıkça toprak direnci azalır. Aynı şekilde sürtünme kayıpları da azalacağından sirkülasyon pompasının gücü de düşer. Böylece daha büyük boru çapının seçilmesiyle işletme maliyetleri düşerken, ilk yatırım maliyeti artmış olur.

3.7.3. Akışkanın Özellikleri

Akışkan fiyatları faydaları ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Ancak akışkan seçiminde de ilk kriterimiz, maliyetten önce donma noktası, korozif özellikler, zehirlilik gibi sistemin ve çevrenin zarar görmesini önleyici faktörler olmalıdır.

3.7.4. Toprak dolgu malzemesi

Toprak dolgu malzemesinin cinsinden çok, kullanılıp kullanılmayacağına karar vermek daha önemlidir. Isıl özellikleri zaten iyi olan topraklarda, pahalı olan dolgu malzemelerinin kullanımı ekonomik değildir.

3.7.5. Borular arası mesafe

Borular arası mesafeyi, dikey değiştiricilerde, delikler arası mesafe; yatay değiştiricilerde ise hendek genişliği, hendekler arası mesafe ve birkaç kat boru dōřendiđinde kot farkı belirler. Bu faktörlerin hepsi maliyetleri direkt olarak etkilemekle beraber, ilk üçünün seçimi, ekonomik analizden önce, dōřeme yapılacak alan miktarı tarafından sınırlanmıştır. Kot farkının belirlenmesi ise gömme derinliği ile birlikte düşünölmelidir.

3.7.6. Gömme derinliği

Gömme derinliği arttıkça toprak direnci azalır. Böylece, derine gömülen ısı değiştiriciler hafriyat masraflarını arttırmakla beraber, işletme maliyetlerini düşürürler. Tam tersi olarak, yüzeye yakın dōřenen borular da, ilk yatırım maliyetini düşürecek; ancak düşük performans nedeniyle işletme maliyetlerini arttıracaklardır.

Maliyetleri etkileyen en önemli faktörler boru çapı, gömme derinliği ve yeteri kadar büyük dōřeme alanının varlığında borular arası mesafelerdir. Dolayısıyla, ekonomik analiz yapılırken, boru ve hafriyat fiyatları ile işçilik ücretleri iyi araştırılmalıdır. Ayrıca, ısı değiştiricilerinin performansları ısı pompasının seçimini etkileyeceğinden, çeşitli firmaların değişik kapasitelerdeki ısı pompalarının fiyatlarını da bilmek gerekir. İşletme maliyetlerinin hesabı içinse, elektrik fiyatının yıllık artış oranı ve enflasyon oranı iyi tahmin edilmelidir.

3.8. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Motorin ve doğalgaz gibi fosil yakıtların ömrü sınırlıdır. Bu gerçek nedeniyle bilim dünyası bizleri ısıtma sistemleri için yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir.

Bu kaynakların en önemlilerinden biri olan toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin avantaj ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

Avantajları:

- Baca ve yakıt deposu gibi elemanlara gerek kalmaması.
- Sessiz çalışma ve estetik dizayn sebebiyle yerleştirme konusunda sınırsız seçenek bulunması
- Yüksek konfor sunması
- Aynı cihazla hem ısıtma hem de soğutma yapabilme kabiliyeti
- Ekonomik, sorunsuz ve çevre dostu ısıtma sistemi
- En düşük işletme maliyetine sahip olması
- Yüksek verim ve kararlı çalışma
- Basit kontrol ekipmanları
- Düşük bakım maliyeti
- Yardımcı ısıtmaya ihtiyaç yoktur
- Düşük kullanma sıcak suyu ısıtma maliyeti
- Dış ünitelerde ekipman olmaması
- Uzun ömür ve yeterli döngü maliyeti

Dezavantajları:

- Yüksek ilk yatırım maliyeti
- Toprak altı borularının iyi bir tasarım gerektirmesi
- Bu kapsamda uzman sayısının yetersiz olması

3.9. Bugünkü Değer (BD)

Binanın ısıtma ihtiyacını karşılayacak sistemlerin ekonomik analizlerinin yapılmasında “Bugünkü Değer Yöntemi” kullanılmıştır. Bu yöntem, ısıtma sisteminin ömrü boyunca yakıt giderlerinin ve montajın şimdiki değerine dayanır ve Eşitlik 3.3’teki bağıntı yardımıyla hesaplanır (Okka 2006).

$$BD = İYM + \frac{İM(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (3.3)$$

Burada:

BD : Bugünkü değer

i : İndirim veya banka faiz oranı

n : Yıl

İYM : İlk yatırım maliyeti

İM : İşletme maliyeti

Bugünkü değer kullanılarak, 20 yıl boyunca yapılacak bütün masraflar bulunur. İşletme giderleri hesaplanırken cihazların ısıtma sezonunda 16 saat, 180 gün çalışacağı düşünülmüştür. Ev içi tesisat toplam binanın döşemeden ısıtma elemanlarının tesisat malzeme ve işçilik ücretlerini kapsamaktadır. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ile doğal gaz, fuel-oil, motorin, LPG ve kömür ile ısıtma sistemlerinin maliyetleri Çizelge 3.7’de belirtilmiştir.

3.10. Birim Isıtma Enerjisi için Yakıtların Yıllık Maliyet Analizi

Yakıtlara göre ısıtma maliyet karşılaştırması tablosu Çizelge 3.8.’de verilmiştir. Çizelge 3.7 incelendiği zaman: Elektrik için 0,338390 TL/kWh’lik bir fiyat, 03 Temmuz 2012

tarihinde belirlenmiş KDV dahil birim fiyattır ve 6 gibi bir COP_s (tesir katsayısı) ile kWh başına 0,057 TL'lik bir ısıtma elde edilmiştir. Bu rakam mevcut ısıtma sistemlerinin işletim maliyetlerinden daha düşüktür (fuel-oil: yaklaşık 0,273 TL/kWh; doğalgaz: yaklaşık 0,096 TL/kWh). İlave olarak servis ve bakım masrafları daha düşüktür.

Çizelge 3.7. Yakıtlara göre ısıtma maliyet karşılaştırması tablosu

Yakıt Cinsi	Birim Fiyat	Yakıt ısı değeri	Verim	Isıtma enerjisi	Maliyet (saat)	Maliyet (Yıl)
Doğalgaz	0,983950 TL/m ³	8250 kcal/m ³	1,07	1 kWh	0,096 TL	276,074 TL
Fuel-oil	2,510000 TL/kg	9875 kcal/kg	0,80	1 kWh	0,273 TL	786,933 TL
Motorin	4,366860 TL/kg	10256 kcal/kg	0,84	1 kWh	0,436 TL	1255,460 TL
LPG-Propan	4,142070 TL/kg	11100 kcal/kg	0,92	1 kWh	0,349 TL	1004,610 TL
İthal kömür	0,780000 TL/kg	7000 kcal/kg	0,65	1 kWh	0,147 TL	424,594 TL
Elektrik	0,338390 TL/ kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,342 TL	984,407 TL
TKIP ($COP_s=3$)	0,112797 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,114 TL	328,136 TL
TKIP($COP_s=4$)	0,084598 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,085 TL	246,102 TL
TKIP ($COP_s=5$)	0,067678 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,068 TL	196,881 TL
TKIP ($COP_s=6$)	0,056398 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,057 TL	164,068 TL
Kurulum Isı Pompası ($COP_s=4$)	0,084598 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,085 TL	246,102 TL
Kurulum Isı Pompası ($COP_s=5$)	0,067678 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,068 TL	196,881 TL
Kurulum Isı Pompası ($COP_s=6$)	0,056398 TL/kWh	860 kcal/kWh	0,99	1 kWh	0,057 TL	164,058 TL
Yıllık çalışma saati = 180 gün × 16 saat = 2880 saat için						

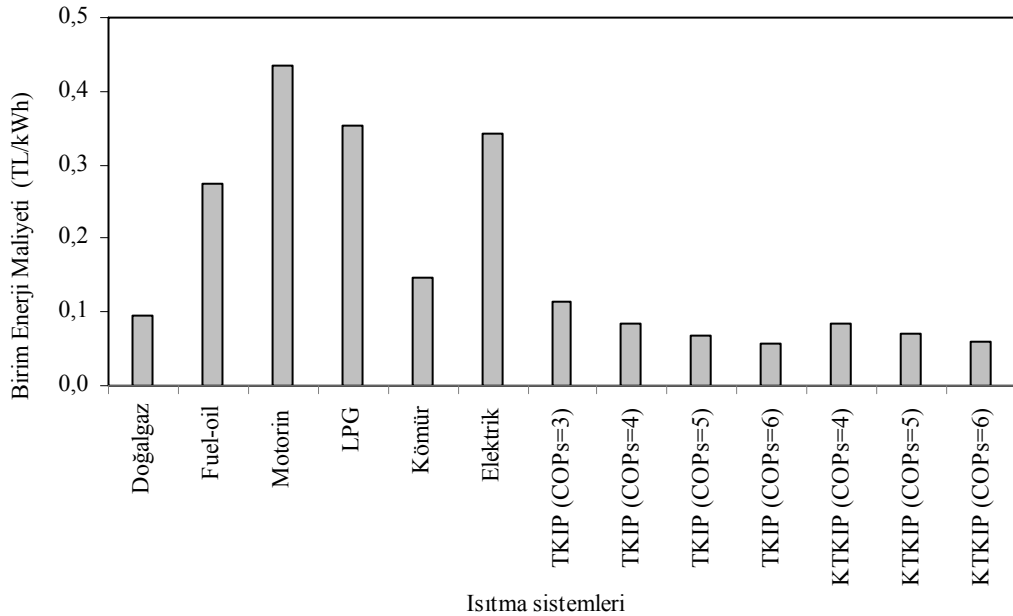
Bazı durumlarda düşük tarifeler kullanılarak daha fazla tasarruf edilebilir. Bu durumda güç sarfiyatı için normal elektrik giderleri dikkate alınabilir. Bilinen ısıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında ve baca, yakıt deposu, gaz bağlantısı gibi yapısal tasarruflar da göz önüne alındığında ısı pompası sistemlerinin yatırım maliyetleri 5000-6000 € daha fazladır. Buna karşılık, ısı pompası sistemleri ekolojik bakımdan daha avantajlı sistemlerdir. Elektrik enerjisi kullanmaları bakımından en düşük primer enerji kullanan yine ısı pompalarıdır (Viessmann 2009).

Yeni binalarda enerji tasarrufu için binanın izolasyonu artırılır (ısı ihtiyacının azaltılması) ve/veya ısıtma sistemi teknolojisinin iyileştirilmesi (enerji giderlerinin düşürülmesi) çalışmaları yapılmalıdır.

Düşük sıcaklık veya yoğuşma teknolojisine göre ısı pompaları enerji giderleri bakımından daha tasarrufludur. Çünkü enerjinin büyük kısmı tabiattan karşılanmaktadır.

Enerji açısından bakılacak olursa, ısı pompalarının büyük avantajları vardır. Toplam ısı ihtiyacının minimum %70'i yenilenebilir ısı kaynağı tarafından karşılanmalıdır. Yani kullanılacak enerjinin %30'dan daha fazla güç sarfıyatı olmamalıdır (Viessmann 2009).

Toprak kaynaklı ısı pompası ve diğer sistemler için birim enerji maliyet analizinin yapılmış olduğu grafik ise Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Birim enerji maliyet analizi

Birim enerji maliyetine göre, ısıtma sistemleri içerisinde motorin en pahalı yakıt olmaktadır. Performans katsayıları (COP_s), 4, 5 ve 6 olan ısı pompası sistemleri ise en ekonomik ısıtma sistemleri olmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Birim ısıtma enerjisi için yakıtların yıllık maliyet analizleri yapılmış, bugünkü değer yöntemi kullanılarak toprak kaynaklı ısı pompası ve diğer bilinen sistemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca toprak kaynaklı ısı pompası ve diğer ısıtma sistemlerinin emisyon analizlerine de yer verilmiştir.

4.1. Ekonomik Analiz Sonuçları

Bu çalışma kapsamında sistemin ekonomik analizi için, ısı kaybı 43 kW olan bir konut üzerinde uygulama yapılmıştır. Isı ihtiyacına göre, kullanılacak olan ısı pompası için toprak altına gömülecek olan boru boylarının belirlenmesi ve sistemin maliyeti bulunmuştur. Çıkan sonuçlar doğrultusunda ekonomik analizler yapılmış, sistemin amortisman süresi bulunarak geleneksel sistemlerle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.1).

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ve alternatif ısıtma/soğutma sistemlerinin bakım giderleri yaklaşık olarak eşit alınmış ve bugünkü değer kıyaslamalarında hesaba katılmamıştır. Tüm sistemlerin ömürleri 20 yıl olarak alınmıştır.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri kurulumu için iki alternatif düşünülmüştür:

İlk alternatif olarak, hesaplanmış değerlere uygun olan, piyasada tüm ekipmanlarının hazır kurulu olduğu ısı pompasının alınması düşünülmüştür. Bu ısı pompası sistemleri, doğalgazlı ısıtma sistemine göre ilk 10 yıl ekonomik olmamakta, 11.yıldan itibaren toprak kaynaklı ısı pompası en ekonomik ısıtma sistemleri olmaktadır. Diğer ısıtma sistemleri ile karşılaştırılacak olursak, motorin ve LPG sistemleri için 1 yıl, fuel-oil'li sistem için 2 yıl, kömürlü sistem için 5 yıl sonra bu hazır toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olmaktadır. İkinci alternatif olarak, toprak kaynaklı ısı pompası ekipmanlarının piyasadan tek tek alınıp, kurulumunun kendi

tarafımızdan yapılacağı düşünülmüştür. Bu kurulumu yapılması düşünülen ısı pompası sistemini, doğalgazlı sistemle karşılaştıracak olursak, ilk 5 yıl doğalgazlı sistemler en ekonomik ısıtma sistemi olurken, 6.yıldan sonra kurulumu yapılan ısı pompası sistemi en ekonomik ısıtma sistemi olmaktadır.

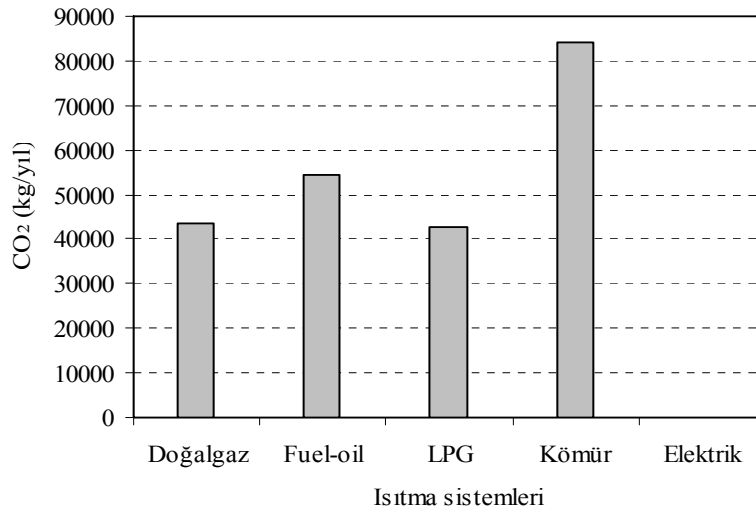
Çizelge 4.1. Bugünkü değer yöntemi kullanılarak ısı pompası ve geleneksel sistemlerin örnek bir bina için 20 yıllık ekonomik analizi ($i=0,0125$)

YAKIT CİNSİ	İYM (€)	İM (€)	1 yıl	2 yıl	3 yıl	4 yıl	5 yıl	6 yıl	7 yıl	8 yıl	9 yıl	10 yıl
Doğalgaz	11984	5230	17112	22139	27068	31900	36637	41281	45834	50298	54675	58966
Fuel-oil	15421	14909	30037	44367	58416	72189	85692	98931	111909	124634	137109	149339
Motorin	14760	23785	38079	60940	83353	105327	126870	147990	168696	188996	208899	228411
LPG	18725	19033	37384	55678	73613	91196	108434	125335	141904	158148	174073	189687
İthal kömür	11455	8044	19341	27073	34653	42085	49370	56513	63516	70381	77112	83711
Elektrik	11235	18650	29519	47445	65019	82248	99140	115701	131937	147854	163459	178759
TKIP COP _s =3	32428	6217	38523	44498	50356	56099	61730	67250	72662	77968	83169	88269
TKIP COP _s =4	32428	4662	36999	41480	45874	50181	54404	58544	62603	66583	70484	74309
TKIP COP _s =5	32428	3730	36085	39670	43185	46631	50009	53321	56568	59752	62873	65933
TKIP COP _s =6	32428	3108	35475	38463	41392	44264	47079	49839	52545	55198	57799	60349
KTKIP COP _s =4	23728	4662	28299	32780	37174	41481	45704	49844	53903	57883	61784	65609
KTKIP COP _s =5	23728	3730	27385	30970	34485	37931	41309	44621	47868	51052	54173	57233
KTKIP COP _s =6	23728	3108	26775	29763	32692	35564	38379	41139	43845	46498	49099	51649
YAKIT CİNSİ	İYM (€)	İM (€)	11 yıl	12 yıl	13 yıl	14 yıl	15 yıl	16 yıl	17 yıl	18 yıl	19 yıl	20 yıl
Doğalgaz	11984	5230	63172	67296	71339	75303	79189	82999	86735	90397	93987	97507
Fuel-oil	15421	14909	161329	173085	184610	195909	206986	217846	228493	238932	249165	259198
Motorin	14760	23785	247540	266294	284681	302707	320380	337706	354692	371345	387672	403679
LPG	18725	19033	204994	220001	234714	249138	263280	277144	290736	304062	317126	329935
İthal kömür	11455	8044	90181	96523	102742	108838	114815	120675	126419	132051	137573	142987
Elektrik	11235	18650	193758	208463	222880	237014	250872	264457	277776	290834	303636	316186
TKIP COP _s =3	32428	6217	93269	98171	102976	107688	112307	116835	121275	125628	129895	134078
TKIP COP _s =4	32428	4662	78059	81735	85339	88873	92337	95733	99063	102328	105528	108666
TKIP COP _s =5	32428	3730	68933	71874	74757	77584	80355	83072	85736	88348	90908	93418
TKIP COP _s =6	32428	3108	62849	65299	67702	70058	72367	74632	76851	79028	81161	83253
KTKIP COP _s =4	23728	4662	69359	73035	76639	80173	83637	87033	90363	93628	96828	99966
KTKIP COP _s =5	23728	3730	60233	63174	66057	68884	71655	74372	77036	79648	82208	84718
KTKIP COP _s =6	23728	3108	54149	56599	59002	61358	63667	65932	68151	70328	72461	74553

4.2. Emisyon Analizi

Avrupa'da çevre duyarlılığına paralel olarak fosil yakıtlara karşı güçlü politikalar bulunmaktadır. Sınırlı yakıt rezervlerinin yanı sıra, iklim değişikliğinin önlenmesi de ısı pompası sistemlerinin tercih edilmesinde önemli bir role sahiptir. CO₂ emisyonlarının düşürülmesi, iklim değişikliğinin önlenmesi için mutlaka gerçekleştirilmelidir (Viessmann 2009).

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin en önemli özelliklerinden biri de çok düşük CO₂ emisyon değerlerine sahip olmalarıdır. Bu sebeple diğer ısıtma sistemlerinin çevreye yaymış oldukları zararlı emisyonlar yanında toprak kaynaklı ısı pompaları bu özellikleri sebebiyle tercih edilen ısıtma sistemleri olmaktadır. Çalışmanın bu kısmında, toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ile diğer ısıtma sistemlerinin yaymış oldukları zararlı emisyonların karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ve diğer ısıtma sistemleri için emisyon değerlerinin karşılaştırılması

Çıkan sonuçlara göre tüm ısıtma sistemleri içinde en çok CO₂ salınımı kömür için 84099 kg/yıl şeklinde gözlenmektedir. Ardından, Fuel-oil 54511 kg/yıl, Doğalgaz 43440 kg/yıl ve LPG 42665 kg/yıl şeklinde sıralanmaktadır.

Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan ısı pompası sistemleri, güneş enerjisi sistemleri dışında sıfır CO₂ emisyonu üreten tek ısıtma sistemleri olmaktadır.

Tüm bu ekonomik ve emisyon analiz sonuçları yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını desteklemektedir. Isı pompaları, ısıtma sistemleri ve kullanma suyu ısıtması için enerji tasarrufu açısından verimli olanaklar sunmaktadırlar.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Enerjiye olan gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Böylelikle ısıtma ve soğutma sistemlerine kaynak sağlayacak, yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı olan ısı pompası sistemleri, son dönemlerde önemini artırmaktadır. Fosil kökenli yakıt kaynaklı ısıtma sistemlerinin kolaylıkla kullanılmadığı, merkezden uzaktaki yerleşim yerlerinde, villa tipi alanlarda, iş yerleri, sanayi merkezlerinde kullanım kolaylığı açısından ısı pompası sistemleri önemli bir yere sahiptir. Isı pompası sistemleri diğer ısıtma sistemlerine göre daha az elektrik enerjisi kullandığı için de önümüzdeki yıllarda daha geniş bir kullanım alanı bulacaktır.

Çevreye olan zararlı emisyonlar açısından bakacak olursak, ısı pompalarının kullanım alanlarının artmasıyla, özellikle fosil kökenli yakıtlara dayanan ısıtma sistemleriyle birlikte tüm ısıtma sistemlerinin kullanımı azalacak böylece çevreye olan zararlı emisyonlar azaltılabilecektir. Isı pompası üretimi konusunda her geçen gün yeni gelişmeler kaydedilmekte ve talepler artmaktadır. Düşük enerji sarfiyatlarına sahip olmaları, çevreye zararlı etkilerinin olmaması, konforlu bir ısıtma sistemi sağlamaları sebebiyle ısı pompaları tercih edilen uygulamalar olmaktadır.

Almanya'da yeni ve modern binalarda güneş enerjisi ve ısı pompası sistemleri gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için çok sayıda teşvik programı bulunmaktadır. Fosil kökenli yakıtları ithal eden ülkeler arasında yer alan Türkiye'de de, ilerleyen yıllarda verilecek teşviklerle, ısı pompası sistemleri ekonomik kalkınma sürecimize büyük katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin soğuk iklim bölgesinde yer alan Erzurum ilinin, Aziziye ilçesinde bulunan bir villanın, ısıtma sezonu içerisinde ısıtılması için, toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri ve diğer geleneksel ısıtma sistemleri kullanılması durumunda ortaya çıkacak maliyetin belirlenmesi için ekonomik analiz ve tüm sistemlerin çevreye olan etkilerinin belirlenmesi için emisyon analizi de yapılmıştır.

Çalışmadan elde edilen verilerin değerlendirilmesi neticesinde çıkarılan sonuç ve öneriler şu şekildedir:

Toprak kaynaklı ısı pompalarının ilk yatırım maliyetleri diğer ısıtma sistemlerine göre fazladır. Fakat tüm ısıtma sistemlerinin 20 yıllık ekonomik analiz sonuçlarına bakıldığında toprak kaynaklı ısı pompaları ön plana çıkmaktadır.

Kurulu şekilde alınmış olan toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerini doğalgazlı sistemler ile kıyasladığımızda, ilk 10 yıl doğalgazlı ısıtma sistemleri en ekonomik sistemler olmaktadır. 11. yıldan itibaren ise toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olmaktadır.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemini kurulu olarak almayı, sistemi kendimiz kurduğumuz vakit, ilk 5 yıl doğalgazlı sistemler en ekonomik ısıtma sistemleri olmakta, 6. yıldan sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olarak görülmektedir.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerini doğalgazlı sistemler dışındaki diğer geleneksel sistemlerle karşılaştırdığımızda amortisman yılları,

i) Paket sistem olarak alınan toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde, tüm sistem (COPs) değerinin 3 olması durumunda, motorin ve LPG sistemleri için 2 yıl, fuel-oil'li sistem için 3 yıl ve kömürlü sistem için 14 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olmaktadır.

ii) Kurulu sistem olarak alınan toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde tüm sistem (COPs) değerinin 4 olması durumunda, motorin ve LPG sistemleri için 1 yıl, fuel-oil'li sistem için 2 yıl ve kömürlü sistem için 7 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olarak görülmektedir.

iii) Kurulmuş sistem olarak alınan toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde tüm sistem (COPs) değerinin 5 olması durumunda, motorin ve LPG sistemleri için 1 yıl, fuel-oil'li sistem için 2 yıl ve kömürlü sistem için 5 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olmaktadır.

iv) Yine kurulu sistem olarak alınan toprak kaynaklı ısı pompası sisteminde tüm sistem (COPs) değerinin 6 olması durumunda ise, motorin ve LPG sistemler için 1 yıl, fuel-oil'li sistem için 2 yıl ve kömürlü sistem için 5 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

v) Kendi kuracağımız toprak kaynaklı ısı pompası sistemini dikkate alacak olursak,

(COPs) değerinin 4 olması durumunda;

Motorin, LPG ve fuel-oil'li sistemler için 1 yıl, kömürlü sistem için 4 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olmakta,

(COPs) değerinin 5 olması durumunda;

Motorin, LPG ve fuel-oil'li sistemler için 1 yıl, kömürlü sistem için 3 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olmakta,

ve (COPs) değerinin 6 olması durumunda ise;

Motorin, LPG ve fuel-oil'li sistemler için 1 yıl, kömürlü sistem için 3 yıl sonra toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri en ekonomik ısıtma sistemleri olarak görülmektedir.

Sonuç olarak elde edilen veriler, önümüzdeki yıllarda daha da artacak olan enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacın karşılanmasında zorluk çekilmesinin beklendiği dünyamız ve Türkiye coğrafyasında, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının ülke ekonomisine kazandıracığı katkının önemli boyutlarda olacağını göstermiştir.

Yurdumuzda ısı pompaları üretimi ve kullanımına verilecek destek ve teşviklerin de, hem ülke ekonomimiz hem de çevresel boyutta sağlayacağı faydalar göz ardı edilmemelidir. Toprak kaynaklı ısı pompalarının, ısıtmanın yanında soğutma yapabilme özelliklerinin de olması sebebiyle, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ayrı bir yerinin olması gerektiği aşikardır. Ayrıca toprak kaynaklı ısı pompalarının kullandıkları kaynakları sebebiyle temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olduğu unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- Abou-Ziyan, H.Z., Ahmed M.F., Metwally M.N., Abd El-Hameed H.M., 1997. Solar-assisted R22 and R134a heat pump systems for low-temperature applications. *Applied Thermal Engineering*, 17(5), 455-469.
- Aikins, K.A. and Choi M.J., 2012. Current status of the performance of GSHP (ground sources heat pump units in the Republic of Korea. *Energy*, In Press, Corrected Proof.
- Akpınar, E.K. ve Hepbaşı A., 2007. A pomparative study on exergetic assessmant of two ground-sources (geothermal) heat pump systems for residential applications. *Building and Environment*, 42, 2004-2013.
- Ataman, H., 1991. Toprak kaynaklı bir ısı pompası tesisinin tasarımı ve optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Bakırcı, K., 2004. Erzurum İlinde Güneş Destekli ve Enerji Depolu Isı Pompası Sisteminin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bakırcı, K. ve Yüksel B., 2006a. Güneş enerjisiyle çalışan ısı pompasının deneysel incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 26(2), 23-28.
- Bakırcı, K., Özyurt Ö., Yılmaz M., Erdoğan S., 2006b. Erzurum ili enerji çalışmaları için iklim ve meteoroloji verileri. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 95, 19-26.
- Bakırcı, K., Özyurt Ö., Yılmaz M., Çomaklı K., 2007a. Güneş-toprak kaynaklı ısı pompaları (1 ve 2. Bölüm). *Termodinamik Dergisi*, 182-183, 86-92/72-80.
- Bakırcı, K., Özyurt Ö., Çomaklı Ö. ve Şahin B., 2007b. Soğuk iklim bölgesinde güneş ve toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin deneysel incelenmesi. 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Kayseri, pp: 1058-1062.
- Bakırcı, K., Özyurt Ö., Çomaklı Ö., Yüksel B., 2007c. Güneş-toprak kaynaklı ısı pompasının deneysel incelenmesi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 100, 48-53.
- Bakırcı, K., 2010. Evaluation of the performance of a ground-source heat pump system with series GHE (ground heat exchanger) in the cold climate region. *Energy*, 35(7), 3088-3096.
- Bakırcı, K., Özyurt Ö., Çomaklı K., Çomaklı Ö., 2011. Energy analysis of a solar-ground source heat pump system with vertical closed loop for heating applications. *Energy*, 36(5), 3224-3232.
- Bakırcı, K. ve Çolak D., 2012. Effect of a superheating and sub-cooling heat exchangerto the performance of a ground-source heat pump system. *Energy*, 44(1), 996-1004.
- Blum, P., Campillo G., Kölbel T., 2011. Techno-economic and spatial analysis of vertical ground-source heat pump systems in Turkey. *Energy*, 36(5), 3002-3011.
- Bulut, H., Büyükalaca O., Yılmaz T., 2003. Binalarda enerji tüketiminin sıcaklık aralığı (bin) yöntemi ile belirlenmesi. II. Doğalgaz ve Enerji Yönetimi Kongre ve Sergisi, Gaziantep.
- Çengel, Y.A. and Boles A.M., 1989. *Thermodynamics an Engineering Approach*. McGraw-Hill, 867, Usa.
- Dağsöz, A.K., 1981. *Soğutma Tekniği*, Arpaz Matbaacılık Tesisleri, 207, İstanbul.

- Dikici, A., Akbulut A. Gülçimen F., 2006. Güneş, hava ve toprak enerjisi kaynaklı ısı pompalarının Elazığ şartlarında kullanımının deneysel olarak araştırılması ve enerji ve ekserji analizleri. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 25(2), 49-61.
- D.M.G.İ.M. (Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü), 2006. Erzurum Bölge Müdürlüğü, Erzurum İli Meteorolojik Değerleri.
- EİAV (Erzurum İli Arazi Varlığı), 2000. T.C. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Yayınları, İl Rapor No: 25, Ankara.
- E.İ.E.İ.G.M. (Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü), 2009. <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/tgunes.html> (09.09.2010)
- Ekinci, D.A., 2007. Erzurum'da Mahal Isıtma Amaçlı Kullanılan Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ersöz, İ., 2000. Toprak kaynaklı ısı pompası ile bir hacmin soğutulması. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Esen, H., İnallı M. Esen M., 2006. Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47, 1281-1297.
- Esen, H., İnallı M., Esen M., Pihtili K., 2007. Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers, *Building and Environment*, 42, 3606-3615.
- Esen, H. ve İnallı M., 2009. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey. *Energy*, 41(4), 395-401.
- FTA (Federal Technology Alert), 2001. Ground-Source Heat Pumps Applied to Commercial Facilities, http://www.pnl.gov/fta/2_ground.htm (03.05.2012).
- Healy, P.F. and Ugursal V.I., 1997. Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate, *Fuel and Energy Abstracts*, 38(5), 348-348.
- Hepbaşlı, A. ve Ertöz Ö.E., 1999. Geleceğin Teknolojisi:Yer kaynaklı ısı pompaları. IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir.
- Hepbaşlı, A. ve Günerhan H., 2000. A Study on the Utilization of Geothermal Heat Pumps in Turkey Proceedings World Geothermal Congress, May 28 - June 10, Kyushu - Tohoku, Japan, 3433-3438.
- Hepbaşlı, A. ve Hancıoğlu E., 2001. Toprak kaynaklı (jeotermal) ısı pompalarının tasarımı, testi ve fizibilitesi. V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, 459, 445-492.
- Hepbaşlı, A., Akdemir O. Hancıoğlu E., 2003. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 44, 527-548.
- İNallı, M. Ve Esen H., 2004. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 24, 2219-2232.
- Jenkins, D.P., Tucker R., Rawlings R., 2009. Modelling the carbon-saving performance of domestic ground-source heat pumps. *Energy*, 41(6), 587-595.
- Karabacak, R., Acar Ş.G., Kumsar H., Gökğöz A., Kaya M., 2011. Experimental investigation of the cooling performance Energy analysis of a ground-source heat pump system in Denizli, Turkey. *International Journal of Refrigeration*, 34(2), 454-465.

- Kavanaugh, S., 1989. Design considerations for ground and water source heat pumps in southern climates, ASHRAE Transaction 1, 95, 1139-1149.
- Kıncay, O., Utlu Z., Ağustos H., Akbulut U., Açıkgöz Ö., 2009. Combining trend of renewable energy sources. Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma 27, 60-82.
- Miles, L., 1997. "Heat Pumps Theory and Service". Delmar Publishers Inc. 397, Newyork.
- Montagud, C., Corberan J.M., Montero A., Urchueguia J.F., 2011. Analysis of the energy performance of a ground source heat pump system after five years of operation. Energy, 43(12), 3618-3626..
- Nam, Y., Ooka R., Hwang S., 2008. Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system. Energy, 40(12), 2133-2140
- Odeh, S., Nijmeh S., Akash B., 2004. Performance evaluation of solar-assisted double-tube evaporator heat pump system. International Communications in Heat and Mass Transfer, 31(2), 191-201.
- Oerder, S.A. and Meyer J.P., 1998. Effectiveness of a municipal ground-coupled reversible heat-pump system compared to an air-source system. ASHRAE Transactions, 104(1), 540-9.
- Okka, O., 2006. Mühendislik ekonomisi, (dördüncü baskı), Nobel Yayın Dağıtım, 1108, Ankara.
- Omer, A.M., 2008. Ground-source heat pumps systems and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(2), 344-371.
- Özkol, N., 1999. Uygulamalı Soğutma Tekniği. Özkan Matbaacılık, 320, Ankara.
- Özyurt, Ö., 2002. Isı Pompasının Süt Pastörizasyonunda Kullanımının Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özyurt, Ö. ve Ekin D.A., 2011. Experimental study of vertical ground-source heat pump system performance evaluation for cold climate in Turkey. Applied Energy, 88(4), 1257-1265.
- Pala, M. ve Devres Y. O., 1987. Isı pompaları: Kuramı, çeşitleri ve uygulama alanları. Mühendis ve Makina Dergisi, 28, s 7-15.
- Petit, P.J. and Meyer J.P., 1998. Economic potential of vertical ground-source heat pumps compared to air source air conditioners in South Africa. Energy, 23(2), 137-143.
- Phetteplace, G. and Sullivan W., 1998. Performance of a hybrid ground-coupled heat-pump system. ASHRAE Transactions, 104(1B), 763-70.
- Pulat, E., Coşkun S., Ünlü K., Yamankaradeniz N., 2009. Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. Energy, 34(9), 1284-1295.
- Spilker, E.H., 1998. Ground-coupled heat-pump loop design using thermal-conductivity testing and the effect Of different backfill materials on vertical bore length. ASHRAE Transactions, 104(1B), 775-779.
- Viessmann, 2009. Isı pompaları. Mesleki yayınlar, http://www.viessmann.com.tr/etc/medialib/internetr/prospekte.Par.67273.File.File.tmp/Mesleki_pompasi.pdf (18.10.2011)

- Wood, J.C., Liu H., Rifat B.S., 2012. Comparative performance of 'U-tube' and 'coaxial' loop design for use with a ground-source heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 37, 190-195.
- Yang, W., Zhou J., Xu W., Zhang G., 2010. Current status of a ground-source heat pumps in China. *Energy*, 38(1), 323-332.
- Zhai, X.Q., Wang X.L., Pei H.T., Yang Y., Wang R.Z., 2012. Experimental investigation and optimization of a ground source heat pump systems under different indoor set temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 45(15), 105-116.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Erzurum’da doğdu. Lisans eğitimine Erzurum Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde başladı. Lisans mezuniyetiyle birlikte, askerliğini, Diyarbakır-Devegeçidi’nde tank yedek subay rütbesiyle, Karargah Bölüğü, İkmal-İaşe Takım Komutanı olarak tamamladı. Askerden döndükten sonra iş yaşamına, Erzurum’da doğalgaz sektöründe bazı özel şirketler bünyesinde proje mühendisi olarak başladı. 2006 yılında Aşkale Çimento San. T.A.Ş.’de çalışmaya başlayıp şirketin, Erzurum ve Trabzon fabrikalarında, Proje Yöneticiliği, Planlama ve Bakım Mühendisliği, Üretim Mühendisliği ve Proses Mühendisliği pozisyonlarında çalıştı. 2008 yılında Pınar A.Ş. ve 2009 yılında Lafarge Van Çimento A.Ş.’de kısa bir dönem çalıştı. 2010-2011 yılları arasında, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği’nin, Erzurum’da yürüttüğü, “Binalarda Enerji Verimliliği Konusunda Gençlerin Eğitimi ve İstihdam Edilebilirliğinin Sağlanması Projesi (Yeşil Meslekler için Gençlerin Eğitimi Projesi) ” isimli Avrupa Birliği projesi’nde Proje Asistanı olarak görev aldı ve projeyi başarı ile tamamladı.