

**TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARINDA
TOPRAK NEMİNİN ISI POMPASININ ENERJİ
TÜKETİMİNE ETKİSİ**

**2015
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Murat ÖZTÜRK

**TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARINDA TOPRAK NEMİNİN ISI
POMPASININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ**

Murat ÖZTÜRK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2015

Murat ÖZTÜRK tarafından hazırlanan "TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARINDA TOPRAK NEMİNİN ISI POMPASININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı

Bu çalışma jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 15/06/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Engin ÖZBAŞ (OMÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)

.../.../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“ Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Murat ÖZTÜRK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARINDA TOPRAK NEMİNİN ISI POMPASININ ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ

Murat ÖZTÜRK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN

Haziran 2015, 85 sayfa

Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve bu yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyonların çevreye olan zararları, hızla artan insan nüfusuna karşılık artan enerji tüketimi ve buna karşılık üretim maliyetlerinin artması enerjinin daha verimli kullanılmasını gerekli kılmıştır. Isı pompası sistemleri, ısıtma ve soğutma sistemleri içinde mevcut enerjinin daha verimli kullanılması ve çevreye zarar vermemeleri gibi özellikleriyle en iyi alternatiflerden biridir. Isı pompaları; ısı enerjisini hava, su, toprak ve yer altı sularından almaktadır. Toprak kaynaklı ısı pompası (TKIP) sistemlerinde toprak sıcaklığının yüzeyden derinlere doğru indikçe çok değişmemesi, hava ve su gibi kullanılmakta olan diğer kaynaklara nazaran bütün bir yıl boyunca daha az bir farklılık göstermesi ve kışın havadan daha sıcak, yazın ise havadan daha soğuk olması bu tip ısı pompalarının kullanımını cazip kılmaktadır.

Bu çalışmada Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı Laboratuvarında örnek uygulama olarak toprak kaynaklı ısı pompası tasarımı yapılarak, sistemde toprak çeşidi olarak ince taneli koyu gri tonlarda kum kullanılmıştır. Kumun, % 0 (kuru) ve % 10, % 20, % 30, % 40 olmak üzere değişken nem oranlarında ısı pompasının enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. Bütün deneyler boyunca sistem sürekli akış, sürekli açık (SASA) olarak çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, kumun nem oranının artmasıyla birlikte ısı iletkenliğinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, TKIP sisteminin buharlaştırıcı kapasitesinin % 39 oranında ve yoğunlaştırıcı kapasitesinin de % 32 oranında arttığı sistemin performansının % 7 iyileştiği ve kumun % 30 ile % 40 nem doygunluğunda ise değişmediği ve artan nem oranıyla birlikte sistemin enerji tüketiminin azalan yönde eğilim gösterdiği ve 32,5 Wh'lik enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Toprak kaynaklı ısı pompası, enerji tüketimi, performans katsayısı, enerji.

Bilim Kodu : 708.3.015

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECT OF GROUND MOISTURE ON THE SOIL-GROUND SOURCE HEAT PUMP'S ENERGY CONSUMPTION

Murat ÖZTÜRK

KarabukUniversity

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Systems Emgineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN

June 2015, 85 pages

The rapidly increasing human population effects that using fossil fuels. Becuase of this reason, fossil fuel resevers are decreasing day by day. Moreover, increasing human population causes increasing energy consumption. Therefore, using much more fossil fuels results in emission which causes greenhouse effect and damage the environment. Heat pump systems are the most efficient that using energy in heating and cooling systems. In addition, they are the best alternatives because of not damage the environment. Heat pumps are using air, water, ground and underground water source. Soil-Ground source heat pump is more usefull than water or air source because ground is more warm than water and air in winter, and also more cold in summer.

In this study, the sample application was designed the soil-ground source heat pump with using sand ,at the laboratory of Karabük University of Technology faculty of

Energy Systems Engineering department. Dry, % 10, % 20, % 30, % 40 with a variable rate of the sand humidity in the heat pump energy consumption and the effects were examined. During all experiments, system had been run with continuous flow and continuous open (SASA). As a result of these experimental study, if sand moisture content is increased, it increases heat conductivity. Moreover, % 39 of the capacity of the evaporator and the TKIP system of condenser capacity of the system increased by % 32, and system performans becomes % 7 more efficiency. Consequently, the systems's efficiency has not changed, where sand has % 30 and % 40 moisture saturation and with increasing humidity, system's energy consumption is going to downward as, 32,5 Wh of energy saving has been obtained.

Key Words : Ground source heat pump, energy consumption, COP, energy.

Science Code : 708.3.015

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasında öncelikle Őahsıma gösterdiği hoŐĐörü ve sabır için, daha sonra bu alıőmanın ileriye gitmesinde değerli fikir, tavsiye ve yardımlarını ve en önemlisi zamanını esirgemeyen akademik, yönetsel ve kişisel birikimi ile beni yönlendiren tez danışmanım, değerli hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Erdoğan KILIÇASLAN'a;

Bu alıőmayı, KBÖ-BAP-14/2-YL-025 numaralı proje kapsamında destekleyen Karabök Üniversitesi BAP birimine;

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

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİSİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. TOPRAĞIN TERMAL ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	7
BÖLÜM 3	13
GENEL BİLGİLER	13
3.1. TOPRAĞIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	13
3.2. ISI POMPASI.....	16
3.2.1. Isı Pompası Kavramı	16
3.2.2. Isı Pompası Elemanları	17
3.2.2.1. Kompresörler	17
3.2.2.2. Buharlaştırıcılar.....	18
3.2.2.3. Yoğuşturucular.....	18
3.2.2.4. Genleşme Elemanları	19
3.2.3. Isı Pompası Çalışma Prensibi	19
3.2.4. Isı Pompasında Kullanılan Isı Kaynakları	21
3.2.4.1. Hava	22

	<u>Sayfa</u>
3.2.4.2. Su	22
3.2.4.3. Toprak	23
3.2.4.4. Güneş	24
3.2.5. Isı Pompası Çeşitleri	24
3.2.5.1. Su Kaynaklı Isı Pompası	24
3.2.5.2. Hava Kaynaklı Isı Pompası	25
3.2.5.3. Toprak Kaynaklı Isı Pompası	26
3.2.5.4. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Çalışma Prensibi	27
3.2.5.5. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Çeşitleri	29
3.2.5.6. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantajları ve Dezavantajları	32
BÖLÜM 4	35
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
4.1. DENEY SETİNİN ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ	35
4.1.1. Kompresörün Yapısı ve Özellikleri	44
4.1.2. Yoğuşturucunun Yapısı ve Özellikleri	44
4.1.3. Buharlaştırıcı Serpantin Yapısı ve Özellikleri	44
4.1.4. Eşanjörün Yapısı ve Özellikleri	45
4.1.5. Su Sirkülasyon Pompasının Yapısı ve Özellikleri	45
4.2. DENEY SETİNDE KULLANILAN ÖLÇÜ ALETLERİNİN TANITIMI ...	46
4.2.1. Dijital Termometrelerin Tanıtımı ve Özellikleri	46
4.2.2. Kombine (Birleşik) Basınç Anahtarının Tanıtımı ve Özellikleri	46
4.2.3. Alçak ve Yüksek Basınç Manometrelerinin Tanıtımı ve Özellikleri	47
4.2.4. Elektrik Sayacının Tanıtımı ve Özellikleri	47
4.2.5. Anemometrenin Tanıtımı ve Özellikleri	48
4.3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ÖLÇÜMLERİN ALINMASI	49
4.4. MODEL SİSTEME AİT VERİLER	50
4.5. DENEYLERE AİT VERİLER	52
4.5.1. % 0 (Kuru) Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler	52
4.5.2. % 10 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler	54
4.5.3. % 20 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler	55
4.5.4. % 30 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler	56
4.5.5. % 40 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler	57

	<u>Sayfa</u>
4.6. DENEYSEL SONUÇLARIN HATA ANALİZİ	58
4.6.1. Deneysel Hata Tipleri ve Nedenleri	58
4.6.2. Sıcaklık Ölçümü Hata Analizi	59
4.6.3. Enerji Tüketimi Ölçümü Hata Analizi.....	59
4.6.4. Zaman Ölçümü Hata Analizi	60
BÖLÜM 5	61
SONUÇLAR	61
BÖLÜM 6	73
TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	73
KAYNAKLAR	76
EK AÇIKLAMALAR A. DENEY SETİNDE ALINAN ÖLÇÜMLERE AİT DENEY FÖYLERİ	80
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Örnek bir kompresörün iç ve dış görünümü	18
Şekil 3.2. Soğutma çevrimi	19
Şekil 3.3. Isı pompası çevrimi	20
Şekil 3.4. Su kaynaklı ısı pompası.....	25
Şekil 3.5. Hava kaynaklı ısı pompası	25
Şekil 3.6. Toprak kaynaklı ısı pompası	27
Şekil 3.7. Yatay tip toprak ısı değiştiricisi	31
Şekil 3.8. Dikey tip toprak ısı değiştiricisi	32
Şekil 4.1. TKIP model sistem çevrimi	35
Şekil 4.2. Çevrime ait sistemin montajlandığı platform ve boyutları.....	36
Şekil 4.3. Toprak haznesi ve boyutları	36
Şekil 4.4. Toprak haznesi	37
Şekil 4.5. Buharlaştırıcı serpantin ve helezonik yerleşmiş şekli	37
Şekil 4.6. Sirkülasyon pompası	38
Şekil 4.7. Yalıtılmış boru ve bağlantıları.....	38
Şekil 4.8. TKIP deney setinin önden görünümü.....	39
Şekil 4.9. TKIP deney setinin sol yandan görünümü	40
Şekil 4.10. TKIP deney setinin sağ yandan görünümü	40
Şekil 4.11. Deneylerde kullanılan kumun görünüşü	41
Şekil 4.12. Elektrik tüketiminin ölçülmesinde kullanılan elektrik sayacı.....	41
Şekil 4.13. Deneylerde kullanılan dijital termometrelerin görünümü.....	42
Şekil 4.14. Deneylerde kullanılan anemometrenin görünümü	42
Şekil 4.15. Kombine basınç anahtarı ve basınç manometreleri.....	43
Şekil 4.16. Deney sistemine ait basınç ve sıcaklık ölçüm noktaları.....	43
Şekil 4.17. Dijital termometre	46
Şekil 4.18. Kombine basınç anahtarı	47
Şekil 4.19. Alçak ve yüksek basınç manometreleri.....	47
Şekil 4.20. Bir faz elektronik elektrik sayacı	48

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.21. Anemometre	49
Şekil 5.1. Toprağın nem oranına bağlı toprak sıcaklığı değişimi.....	62
Şekil 5.2. Toprağın nem oranına bağlı basınç değişimi	63
Şekil 5.3. Toprağın nem oranına bağlı eşanjöre su giriş ve çıkış sıcaklığı değişimi	64
Şekil 5.4. Toprağın nem oranına bağlı kompresör ve kondenser giriş ve çıkış sıcaklık değişimi.....	65
Şekil 5.5. Toprağın nem oranına bağlı Q_B ve Q_Y kapasite değişimi	67
Şekil 5.6. Toprağın nem oranına bağlı STK ve ITK değerleri değişimi	69
Şekil 5.7. Toprağın nem oranına bağlı kondenser hava giriş ve çıkış sıcaklık değerleri değişimi	70
Şekil 5.8. Toprağın nem oranına bağlı enerji tüketimi değişimi	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. % 0 (Kuru) kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.....	53
Çizelge 4.2.% 10 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.....	54
Çizelge 4.3.% 20 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.....	55
Çizelge 4.4.% 30 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.....	56
Çizelge 4.5.% 40 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.....	57
Çizelge 5.1. Nem oranına bağlı toprak sıcaklıkları.....	62
Çizelge 5.2. Nem oranına bağlı TKIP sistem basınçları	63
Çizelge 5.3. Nem oranına bağlı eşanjöre su giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	64
Çizelge 5.4. Nem oranına bağlı kompresör ve kondenser giriş ve çıkış sıcaklıkları .	65
Çizelge 5.5. Toprağın nem oranına bağlı Q_B ve Q_Y kapasite değerleri.....	66
Çizelge 5.6. Toprağın nem oranına bağlı STK ve ITK değerleri.....	68
Çizelge 5.7. Toprağın nem oranına bağlı kondenser hava giriş ve çıkış sıcaklıkları	70
Çizelge 5.8. Toprağın nem oranına bağlı enerji tüketimi.....	71
Çizelge Ek A.1. 2 saat süreyle % 0 nemli kum deney seti ölçümleri	80
Çizelge Ek A.2. 2 saat süreyle % 10 nemli kum deney seti ölçümleri	81
Çizelge Ek A.3. 2 saat süreyle % 20 nemli kum deney seti ölçümleri	82
Çizelge Ek A.4. 2 saat süreyle % 30 nemli kum deney seti ölçümleri	83
Çizelge Ek A.5. 2 saat süreyle % 40 nemli kum deney seti ölçümleri	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

E	: Toplam iç enerji, enerji tüketimi (Wh)
K	: Toplam ısı geçiş katsayısı ($W/m^2 K$)
L	: Uzunluk (m veya cm)
Q	: Isı kaynağından alınan ve ısıtılmak istenen ortama verilen ısı (W)
P	: Basınç (bar)
T	: Sıcaklık (K veya °C)
V	: Hacim (m^3 veya cm^3)
V	: Hız (m/s)
h	: Entalpi, ısı taşınım katsayısı (kj/kg veya W/ m^2K)
k	: Isı iletim katsayısı ($W/m^2 K$)
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s veya m^3/s)
c	: Özgül ısı (kj/kgK)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
ΔT	: Sıcaklık farkı (°C)
A	: Alan (m^2)
()	: Denklem numarası
[]	: Referans numarası
Comp	: Kompresör (Ekovat)
Cond	: Kondenser
Soil	: Toprak
Water	: Su
Air	: Hava
i	: Giriş
o	: Çıkış

KISALTMALAR

TKIP	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası
TID	: Toprak Isı Değiştiricisi
HKIP	: Hava Kaynaklı Isı Pompası
SASA	: Sürekli Akış, Sürekli Açık
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
STK	: Soğutma Tesir Katsayısı
ITK	: Isıtma Tesir Katsayısı
\dot{Q}_B	: Buharlaştırıcı Kapasitesi
\dot{Q}_Y	: Yoğuşturucu Kapasitesi
COP	: Verim Katsayısı (Coefficient Of Performance)
NPT	: Konik Dişli Bağlantı (National Pipe Thread Taper)
V AC	: Volt, Alternatif Akım (Alternating current)
V DC	: Volt, Doğru Akım (Direct Current)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde kullanılan enerji kaynakları, kaynakların tükenmesi ve değişen teknoloji ile paralel olarak değişmektedir. Günümüz şartlarında neredeyse tüm enerji ihtiyacımız yenilenemez enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Bu yenilenemez enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması hatta tükenmesi sorunu yanında fiyatlarındaki artış ve çevreye olan zararları alternatif enerji kaynakları arayışına girilmesinin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

Enerji, geçmişte olduğu gibi günümüzde de çok önemli ve stratejik bir kavramdır. Sanayi ve teknolojinin hızla gelişmesi, dünya nüfusunun ve yaşam standartlarının artması enerjiye olan talebi de sürekli arttırmakta, dolayısıyla enerji üretiminin yanı sıra enerjiyi etkin, verimli ve aynı zamanda çevreye en az zarar verecek şekilde tüketme zorunluluğu, günümüzün ve geleceğin çözülmesi gereken en önemli problemlerinden biri olmaktadır. Hem Dünya hem de Türkiye için enerjinin etkin ve verimli kullanılması vazgeçilemez bir zorunluluk olmuştur. Enerjinin mevcut talebi karşılamakla beraber ihtiyaçtan fazla tüketimi engellenmeli, daha az enerji ile daha çok iş yapılabilmesi, daha çok ürün ve hizmet elde edilmelidir. Aynı zamanda enerji üretim ve tüketiminin çevreye vereceği zarar minimuma indirilmelidir. Bunun için özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile beraber kullanılacak alternatif teknolojiler geliştirilmeli ve bu sistemlerin sanayi ve günlük yaşamda kullanılabilirliğini sağlayacak çalışmalar yapılmalıdır [1].

Bütün bu nedenlerden dolayı toprakta var olan ısı gibi doğadaki mevcut sonsuz enerjiyi kullanabileceğimiz sistemler dünyanın birçok ülkesinde yıllardır kullanılmakta ve bunların başında da ısı pompası gelmektedir.

Düşük ısıdan faydalanmayı sağlayan bu sistemlerden, toprağın ısısı toprak içerisine serilen ve içinde bir pompa aracılığıyla su dolaştırılan borular vasıtasıyla yararlı ısı sağlamaktır. Topraktaki mevcut ısının bütün bir yıl boyunca çok fazla değişiklik göstermemesi ısı pompası sistemlerinin daha kararlı çalışmasını sağlamaktadır.

TKIP sistemleri soğuk kış aylarında topraktaki ısıyı sisteme aktararak ısıtma, yaz aylarında ise ortamdaki ısıyı toprağa aktararak soğutma yaparlar. Toprak ısısının stabil olması ısı pompasının kararlı çalışmasını sağlamaktadır. Dış ortam sıcaklığına göre toprak ısısının soğuk aylarda sıcak ve sıcak aylarda soğuk olması ısı kaynağı bakımından hava kullanılan ısı pompası sistemlerine göre TKIP'lerinin daha az enerji harcayarak ısıtma ve soğutma yapmasını sağlar [2].

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

2.1. TOPRAĞIN TERMAL ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Toprağın yapısal ve termal özellikleri zirai açıdan önemli olduğu kadar gelişen teknolojiyle birlikte bu özelliklerin Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında kaynak olarak toprağın kullanılmasından dolayı bilinmesi gerekmektedir.

Atmosferden gelen toplam ışınım miktarı ve toprağın potansiyel ısısal özellikleri toprak sıcaklığının belirlenmesinde önemli yer tutmaktadır. Ayrıca toprağın sıcaklığı topraktaki suyun sıvı ve buhar haldeki hareketini de etkilemektedir [3].

Toprağın potansiyel ısısal özellikleri, ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği olmak üzere iki bölümde incelenmektedir [3]. Topraktaki ısı iletimini etkileyen faktörler ise şunlardır;

1) Fiziksel özellikler : Toprağın nem oranı, toprağın su tutma kapasitesi, porozite, toprağın tane büyüklüğü, toprağın hacim ağırlığı, hidrolik iletkenlik [4].

2) Isısal özellikler : Isı kapasitesi, ısı iletkenlik, ısı geçirenlik [5].

Toprağın ısı iletkenliği aşağıdaki etmenlerle yakından ilişkilidir [4].

1) Porozite : Porozitenin çok olması ısı iletkenliğini azaltmaktadır.

2) Yoğunluk : Hacim ağırlığının çok olması ısı iletkenliğini arttırmaktadır.

3) Tekstür (Bünye) : Kaba (kumlu) topraklarda ısı iletkenliği ince (killi) topraklardan daha fazladır.

4) Organik madde : Toprak içeriğindeki organik madde miktarının fazla olması ısı iletkenliğini azaltmaktadır.

Toprak tanecikleri arasındaki ısı geçişi ve toprağın içindeki ısı akışını sağlayan ısı transferi;

- 1) Konveksiyon (Taşınma)
- 2) Kondaksiyon (İletim)
- 3) Kondensasyon (Sıkışma)
- 4) Radyasyon (Işınım, aktarım)
- 5) Diffüzyon (Yayılm)

yollarıyla gerçekleşmektedir [3].

Patten, topraklardaki ısı transferi üzerine yapmış olduğu çalışmada toprak tanecikleri arasındaki boşluklarda bulunan suyun bir toprak taneciğinden diğerine olan ısı transferini etkilediğini ve topraktaki nemin termal iletkenliği arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca kuru toprakların nemlendirildiklerinde termal iletkenliğin nem oranına göre lineer seyrettiğini belirlemiştir. Bu durum havadan daha iyi bir iletken olan suyun, nemlendirilen toprakta taneciklerin birbirleriyle bağlantı kurmasını sağlamasıyla açıklanmaktadır. Suyun ısı kapasitesi fazla olduğundan topraktaki su belirli bir değerin üzerine çıktığında, yani tarla kapasitesine ulaştığında termal iletkenlik yavaşlamaktadır [6].

Smith ve Byers, topraklardaki ısı iletkenliğinin toprağın içeriğindeki organik madde ve toprağın bünyesine göre değişiklik gösterdiğini ve kaba (kumlu) topraklardaki ısı iletkenliğinin ince (killi) topraklara göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. İçeriğindeki organik madde miktarı fazla olan toprakların ise ısı iletkenliği en düşük değerdedir [7].

Kertsen, toprakların termal özellikleriyle ilgili yaptığı çalışmada, sıcaklığın artmasıyla termal iletkenliğinde arttığını belirtmiştir. Isı iletkenliği toprağın kuru hacim ağırlığının artması sonucu azalma, toprağın nem oranının artması sonucu artış göstermiştir. Buradaki toprağın hacim ağırlığı ve nem oranları toprak tekstürüne göre değişmektedir. Isı iletkenliği kaba (kumlu) topraklarda en fazla, ince (siltli, killi) topraklarda en düşükken tınlı topraklarda orta düzeydedir [8].

Toprakların ısısal özelliklerinin değerlendirilmesinde toprağın hacim ağırlığı, nemi ve tekstürü, önemli bir yer tutmaktadır. Yapılan çalışmada [9], % 81 kum, % 10 silt, % 9 kil ve içeriğinde % 1'den daha az organik maddeler bulunan toprak örnekleri kullanılarak toprağın % 8 ve % 34'lük nem oranlarındaki ısı kapasitesi, ısı iletkenliği ve ısı geçirgenliği değerleri tespit edilmiştir. Çalışmada, nem oranının artmasıyla birlikte diğer değerlerinde artması, nemin ısı iletkenliğini arttırdığı ve kumunda iyi bir iletken olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sıcaklıktan dolayı oluşan latent (gizli) ısıda iletkenlikte önemli derecede tesirli olmuş ve bunun yanında iletkenliğin ısı yayınılmada alakalı olduğu belirlenmiştir [9].

Salah El - Din, Arabistan'da derinliğe bağlı olarak toprak sıcaklığının değişimi üzerine Fourier serisi ve Sinüs dalgası olarak iki yaklaşım geliştirmiş ve yapılan çalışmada, toprağın yutuculuğu ve havanın özgül nemi arttığında toprak içerisindeki ısı akışı değerinin ve toprak sıcaklığının arttığı, buharlaşma oranı ve rüzgâr hızı arttığında ise toprak içerisindeki ısı akışı değerinin ve toprak sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir [10].

Kohnke ve Nakshabandi'ye göre, toprağın içerisinde bulunan bütün etmenlerin ısı kapasiteleri toprak sıcaklığını etkilemektedir [11].

Gardner ve Hanks, topraktaki ısının bir bölümünün toprağı ısıtan sensible (hissedilebilir) ısı, bir bölümünün ise suyun buharlaşmasını sağlayan latent (gizli) ısı olduğunu belirtmişlerdir [12].

Pala'ya göre, toprakların nem oranları termal iletkenlikte oldukça önemlidir. Isının topraktaki hareketi yüzey toprağı ve daha alt tabakaların sıcaklık değişimlerine bağlı olup, ısının hareketi sıcak tabakalardan soğuk tabaklara doğru olmaktadır [13].

Hanks ve Ascroft, Güneş ışıınının uzun süreli ve fazla yoğun olduğu anlarda sıcaklığın aylık ve günlük değişimlerinin maksimum seviyede olduğu ve toprağın yüzeyinden 7 - 8 m altına kadar etkili olduğu, güneş ışıınının az süreli ve az yoğun olduğu anlarda ise sıcaklığın aylık ve günlük sıcaklık değişimlerinin minimum seviyede olduğu ayrıca toprağın yüzeyinden 30 - 40 cm altına kadar etkili olduğunu belirtmişlerdir [14].

Topraktaki nem toprağın sıcaklığında ve meydana gelen sıcaklık değişikliklerinde etkili olup, buharlaşmanın artmasına sebep olmaktadır. Yani toprağın yüzeyindeki nem ne kadar fazlaysa buharlaşmada o kadar fazla olmaktadır [9].

Isı iletiminde etkili olan nemin topraktaki miktarının artmasıyla birlikte topraklardaki ısı iletkenliğide artmaktadır. Toprağın ıslanmaya başlamasıyla birlikte su toprak tanecikleri arasındaki dokunma alanını arttırdığından iletkenlikte artmaktadır. Toprağın nem oranı ısı iletim kapasitesini arttırarak özgül ısısında artmasıyla beraber toprak sıcaklığının üst değerlere çıkması için gerekli olan ısı oranını da arttırmaktadır [9].

2.2. TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPASI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Toprak kaynaklı ısı pompası, topraktan gelen enerjiyi kullanarak çevreye zarar vermeden ısıtma ve soğutmada ideal konfor şartlarını en ekonomik şekilde sağlayabilirler. Literatürde, farklı bölgeler ve değişik amaçlar için toprak kaynaklı ısı pompaları üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Literatürde toprak kaynaklı ısı pompaları konusunda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Catan ve Baxter, kuzey iklim uygulamaları için TKIP'nın ekonomik analizini yaparak Pittsburgh'daki 167 m²'lik bir konut için, su kaynaklı ısı pompasının imal ve kullanım maliyeti yedi yıllık ekonomik ömür için minimize edilmiş ve konvansiyonel HKIP sistemlerine nazaran bu ısı pompasının amorti süresi 3 yıldan daha düşük bulunmuştur [15].

Hughes vd., New York şehri dolaylarında konutlarda TKIP'nı teknik ve ekonomik yönden değerlendirmek amacıyla, bir projeden elde edilen sonuçları vermişler ve bu kapsamda, 1982 - 1984 yılları arasında ısıtma ve soğutma verimleri ve kullanım suyu sıcaklıkları ölçülmüştür [16].

Franck ve Berntsson, İsveç'te yürütülen büyük bir araştırma programı doğrultusunda, 10 - 40 m uzunluklardaki düşey boruları kullanarak bir TKIP sistemi kurmuşlardır. Bu sisteme güneş enerjisi takviyesi yapılarak performans karşılaştırılması yapılmıştır [17].

Kavanaugh, güney iklimlerde kullanılacak toprak ve su kaynaklı ısı pompalarının tasarımıyla ilgili esasları vererek sistemlerin nasıl daha yüksek verimli ve daha güvenli olacağı açıklanmıştır. Ayrıca, geleneksel ısıtma sistemleriyle kıyaslanmış; esneklik, performans ve ekonomi bakımından bu sistemlerin daha iyi olduğu vurgulanmıştır [18].

Kavanaugh, güney iklimlerde düşey TKIP sistemlerinin kullanılabilirliğini ve işletme karakteristiklerini belirlemek üzere bir deney yapmıştır. Alabama'da bulunan 150 m²'lik bir eve kurulmuş olan bir ısı pompasının ısıtma ve soğutma performansları göz önünde bulundurulmuştur [18].

Kavanaugh, alanı 6700 m² olan bir okulun TKIP sisteminin değişik TID boru şekillerini ve dört farklı pompa için durumlarını incelemiştir. Merkezden dışa doğru yayılan sistemde tekli halkalar, her bir tabaka için dolaşım pompaları ve üç merkezi sistem (değişken hızlı, sabit hızlı, birincil - ikincil halka şeklinde pompalar) ele alınmıştır. Bu dört pompa türü için yıllık enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır. Sırasıyla değişken hızlı pompanın, sabit hızlı pompanın ve birincil - ikincil sistemdeki pompanın yıllık tüketimi; 18800, 108600 ve 65500 kWh bulunmuştur [18].

Martin, yatay tip TID'sı olan bir ısı pompası sisteminin tasarlanmasında etkin olan parametrelerin değişimini incelemek üzere teorik ve deneysel çalışma yapmıştır. Konutlar için 3 ton soğutma yüküne sahip olan bir ısı pompasının performans ve enerji sarfiyatını belirlemek amacıyla bir bilgisayar programı geliştirilerek, elde edilen sonuçlar Oklahoma'daki iki konut için kıyaslanmıştır. Ayrıca, ekonomik bakımdan optimum tasarımı belirlemek için bir ekonomik analiz yapılmıştır [19].

Mei ve Baxter, kurmuş oldukları deney düzeneği ile doğrudan genleşmeli TID'nın uygulamada karşılaşılan yarar ve sakıncalarını ortaya koymuşlardır [20].

Safemazandarani vd., doğrudan genleşmeli bir TKIP sisteminin simülasyonunda bir matematiksel model geliştirmişlerdir. TID'nın tasarımında etkin parametreler için deneyler yapılmıştır [21].

Sulatisky ve Van der Kamp, Kanada'da evler için 5 adet TKIP'nin performansını araştırmışlardır. 5 - 8 yıl arasında kullanılan ısı pompası sistemlerinin, sadece iki yıllık bir süre için performans sonuçları yorumlanmıştır [22].

Kangas, düşey boru kullanarak ısı pompaları için toprağın termohidrolik analizini yapmıştır. Bilgisayar simülasyonu ile ısı kaynağı olarak toprağın kullanılması durumunda analiz yapılmıştır. 3 boyutlu THETA denilen bir model kullanılmıştır. Sonuçta, topraktan ısı çekme sisteminin davranışı üzerinde farklı jeolojik ve ısı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Toprağın sıcaklığının sistem performansı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu vurgulanmıştır [23].

Petit ve Meyer, Johannesburg'da düşey TID'lı TKIP ile HKIP'nin ekonomik kıyasını yapmışlardır. TKIP'nin yatırım maliyetleri ve optimum sondaj deliği uzunluğu hesaplanmıştır. Aylık ısıtma - soğutma kapasiteleri ve performans değerleri hesaplanarak, TKIP sisteminin HKIP sisteminden daha büyük oranda ekonomik olduğu bulunmuştur [24].

Leong vd., kum, alüvyonlu toprak ve alüvyonlu killi toprak türleri için % 0, % 12.5, % 25, % 50 ve % 100 nem doygunluklarında bilgisayar ortamında simülasyon yapmışlardır. TKIP performansının büyük oranda toprağın nem oranına ve toprak çeşidine bağlı olduğu, topraktaki nem oranının azalmasının TKIP'nin performansını düşürdüğü, bu durumda toprak nem içeriğinin mümkün olduğunca kuru toprak şartlarının üzerinde tutulması gerektiği, toprağın nem doygunluğu % 25'in üzerine çıktığında TKIP'nin performansının büyük oranda iyileştiği, doygunluğun % 50'nin üzerine çıkması durumunda ise TKIP'nin performansının etkilenmediği sonucuna varılmıştır [25].

Den Braven, ABD'deki TKIP sistemlerinin TID'larında antifriz kullanılabilirliğini inceleyerek, tablo halinde vermiştir. ABD'deki eyaletlerin birçoğunda, TKIP sistemleri için antifriz kullanımıyla ilgili herhangi bir kural veya öneri olmadığı belirtilmiştir [26].

Spilker, dört farklı delik çapı için düşey TID'da kullanılan farklı dolgu malzemelerinin etkisini termal iletkenlik testi yaparak açıklamıştır. Düşey TID'nın delik çapının, boru tipinin, dolgu malzemesinin ve toprağın termal özelliklerinin; ısı değiştiricisinin sıcaklığına ve tasarımına önemli etkisi olduğu vurgulanmıştır [27].

Piechowski, yatay tip TID'nin dizaynının daha doğru ve hesaplamalarının daha kolay olması için simülasyonlar yapmıştır. Bu çalışma, toprak - boru yüzeyi gibi daha büyük sıcaklıkların olduğu ve nem hareketinin fazla olduğu yerlerde daha kolay çözüme erişmek için yapılmıştır [28].

Bernier, düşey TID'na sahip TKIP sistemi için ısı pompasının yıllık performansını simüle etmiştir. Klasik silindirik ısı kaynağı çözümü geliştirilerek yük birleşimi bulunmaya çalışılmıştır. Daha sonra toprağın ısı transfer denklemleri çözülerek ısı pompasının performansı için kısa süreli simülasyonlarla hesaplamalar yapılmıştır [29].

Yavuztürk, Lincoln'da inşa edilen bir ilkokuldan alınan gerçek işletimsel bilgiyi kullanarak kısa zaman adımlarında elde edilecek sıcaklık modelini geliştirmiştir. Sistem, düşey TID'dır. Bu çalışmada, akışkanın pompaya giriş sıcaklığının sistemin enerji tüketimi üzerine olan etkisi de incelenmiştir. Kurulan sistemin enerji tüketimi, pompa akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak verilmiştir [30].

Parent, TKIP projesi için uygulanabilir bir yöntem kullanarak simülasyon modelini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu model, TKIP sistem simülatörü ve yapı yükünden oluşturulmuştur. Isı pompası sisteminin performansının ve TID şeklinin tahmini için, yapının yıllık enerji kullanımı göz önüne alınmıştır. Model'in ticari, mesken, kurumsal ve endüstriyel yapılar için düşey TID, yatay TID ve yer altı su sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir [31].

Bi vd., düşey spiral şeklindeki TID etrafında iki boyutlu toprak bölgesi olarak öncelikle kontrol hacim metodunu kullanmış, toprak sıcaklık dağılımını teorik olarak modellemişlerdir ve daha sonra deneysel sistem kurularak deneysel veriler elde edilmiştir. Teorik sonuçlarla deneysel veriler karşılaştırılmıştır. TKIP sisteminin ısıtma yükünün TID'nın civarındaki toprak sıcaklığına bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın TKIP sistemlerinin TID dizaynı için yol gösterici olduğu savunulmuştur [32].

Bi vd., teorik ve deneysel olarak düşey kıvrımlı kangal borulu ısı değiştirgeçli güneş - toprak kaynaklı ısı pompasını incelemişlerdir. Güneş enerjisi kaynaklı ısı pompası, TKIP sistemi ve güneş - toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri karşılaştırılmıştır [32].

Doherty vd., Nottingham Üniversitesinde ekonomik ev (Eco House) diye tarif ettikleri bir yere kurulan TKIP sistemini test etmişlerdir. Çeşitli tipte TID konfigürasyonları denenerek karşılaştırma yapılmıştır. Bunlar, slinky (spiral), düşey ve yatay TID'lerdir [33].

Nagano vd., TKIP sistemlerinin performans tahmini ve tasarımı için yeni gelişmeleri irdelemişlerdir. Çalışmalarında Sappora'da bir evin bahçesinde ısıl duyarlılık testi yapılmıştır. TKIP sisteminin, CO₂ emisyonu bakımından diğer geleneksel ısıtma sistemleri ile karşılaştırması yapılmıştır [34].

Florides ve Kalogirou, Kıbrıs'ta kurulan düşey borulu TKIP sistemi üzerindeki deneysel verilerden U - borusu dolgusunun ısıl performansını yerinde saptamışlardır. Sondaj deliği boyunca toprağın ısıl iletkenliği 1.605 W/m²K, sondaj deliğinin ısıl direnci de 0.257 K/(W/m) olarak hesaplanmıştır [35].

Hepbaşlı, "Isı Pompası Sistemleri ve Konut Isıtılması" başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, TKIP sistemi ile konut ısıtılması üzerine çalışmıştır. Projelendirmesi yapılan tek katlı ve TID'nın yerleştirilmesine uygun, yeterli toprak alanı bulunan konuta döşmeden ısıtma metodunu uygulamıştır. Bu çalışmada; hem yatay hem de düşey TID tasarımı yapılmış ve bu iki farklı yöntemin birbirine göre kıyası verilmiştir [36].

Ataman İstanbul Teknik Üniversitesinde "Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Tasarımı" başlıklı Yüksek lisans çalışmasında, bir konutun TKIP ile ısıtılmasını ele almıştır. Konutun ısı kaybı derece - gün metoduyla hesaplanarak uygun ısı pompası seçilmiştir. Seçilen bu ısı pompasının çalışma şartlarına uygun olarak, TID'nın boyutlandırılması yapılmıştır. TID boyutlandırılırken, topraktaki sıcaklık değişimi, Kelvin Çizgisel Kaynak Teorisi'nin ayna görüntü metodu kullanılarak elde

edilmiştir. Bu metodun kullanılması için gerekli toprak direncinin hesaplanmasında tüm boruların birbirine olan ısı etkileşimi göz önüne alınmıştır [37].

Esen vd., yatay TID'li TKIP sisteminin ısıtma periyodunda termoeekonomik değerlendirilmesini yapmışlardır. Bu analiz, çeşitli yakıt türleri veya sistemleri için yapılmıştır ve sonuçta Türkiye için doğalgazdan sonra TKIP sisteminin işletme maliyeti bakımından en uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca 2007 yılında, bu sistem ile ilgili olarak üzerinde deneysel çalışmanın yanında sayısal çalışma da yapılmıştır. Bu çalışmada, yatay TID'li bölgede toprak sıcaklık dağılımı sonlu farklar yöntemi ile belirlenmiştir [38].

BÖLÜM 3

GENEL BİLGİLER

3.1. TOPRAĞIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Atmosferdeki radyoaktif parçalanmalar, toprak içerisindeki kimyasal ayrışmalar ve yeryüzünün derinliklerinden açığa çıkan ısı ilaveleri dikkate alındığında, toprak için asıl ısı kaynağını güneşten yeryüzüne ulaşan radyasyon enerjisi oluşturmaktadır. Yer yüzüne ulaşan bu enerji mekanik, kimyevi ve ısıl gibi enerji çeşitlerine dönüşerek, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerinin oluşumuna etki etmektedir. Toprakların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerindeki farklılıklardan dolayı, her bir toprak tipi farklı oranda günlük ısı birikimine sahip olmaktadır. Toprakların ısı kaynağı ve akımı gibi bütün yüzey ısı süreçleri, toplam güneş radyasyonu, atmosfer, toprak şeklinde ki üçlü blok sistemi içerisinde gösterilebilir [39].

Toplam güneş radyasyonu bağımsız enerji kaynağı olup, toprak yüzeyi ve atmosfer tarafından tutulmakta veya yansımaktadır. Yansıyan radyasyonun toprak yüzeyi ve atmosfer tarafından bir kısmının tekrar tutulması mümkün olabilir [40].

Yansıyan radyasyon yansıdığı ortamın (toprak yüzeyi, toprak örtüsü sistemi veya atmosfer bileşenleri) sıcaklığı ile fonksiyonel ilişki içerisinde. Toprak yüzeyine veya alt katmanlara yönelen ısı akımı, atmosfere yönelen türbülans ısı akımı ve buharlaşmaya harcanan gizli ısı akımları sıcaklığa bağlı olmaktadır. Toprak profilinde sıcaklık günlük, aylık veya yıllık olarak değişim göstermektedir. Bu değişim bir gün veya bir yıl olmak üzere zamanın periyodik fonksiyonları şeklindedir. Toprak yüzeyinde sıcaklık değişimi fazla olup, aşağı katmanlara doğru inildikçe azalmaktadır. Toprağın 35 - 100 cm derinliğinde ise sıcaklığın günlük değişimi pratik olarak sabit değerlere ulaşmaktadır.

Toprak sıcaklığının değişimi toprağın nem oranının değişiminde önemli etki oluşturmaktadır. Toprakta suyun taşınım potansiyeli, toprak sıcaklığı ve rutubetinin bir fonksiyonudur. Gözenekli bir yapıya sahip olan toprakta suyun buharlaşarak taşınımı sıcaklık değişimi sonucunda oluşmaktadır. Toprak içeriğindeki su buharı geceleri alt katmanlardan daha soğuk olan üst katmanlara doğru hareket etmektedir. Toprak nemi ve sıcaklık değişimleri arasındaki ilişki, toprak türleri arasında farklılık göstermektedir. Bazı topraklarda 1 °C/cm sıcaklık farklılığı, toprak neminde 0,1244 g/cm³ değişim oluşturmaktadır [41].

Toprak sıcaklığının zamana ve bulunduğu yere göre değerlendirilmesi, toprakta ısı taşınım modelinin uygulanması, genel olarak toprakların ısı absorplama katsayılarına ve termofiziksel özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu nedenle, toprakların termofiziksel özelliklerinin incelenmesi ve toprak katmanlarındaki sıcaklık dağılımının tahmini için ısısal yayınım katsayısının kullanılması, toprakta sıcaklık dengesinin ifadesinde önemlidir [42].

Yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının toprak tarafından tutulması ve toprakta ısı akımının oluşumunda temel faktör olan toprağın ısı absorplama katsayısı, deneme veya analitik yöntemlerle belirlenebilen toprağın ısı kapasitesi, ısı iletkenliği, sıcaklık iletkenliği veya ısısal yayınım katsayıları gibi termofiziksel özelliklerin toprak sıcaklığının derinlik ve zamana göre değerlendirilmesinde çok önemlidir [42].

Toprak yüzeyinde yansıma katsayısı günlük olarak kuvvetli bir değişime sahip olmaktadır. Sabah ve akşam saatlerinde yansıma katsayısı önemli derecede azalmaktadır [43].

Toprağın birim kütlesinde veya hacminde birim sıcaklık değişiminde oluşan ısı miktarı; toprağın özgül ısısı ve hacimsel ısı kapasitesi ile ilişkilidir. Genel olarak, ısı kapasitesi toprağın mineralojik ve organik bileşimine, hacim ağırlığına ve nem oranına bağlı olmaktadır. Hacimsel ısı kapasitesi toprağın nem oranının artması ile lineer olarak artmakta olup, kuru toprakla karşılaştırıldığında, nemli toprağı belli bir sıcaklık değerine kadar ısıtmak için daha fazla enerji gerekmektedir [44].

Toprağın içerisindeki bileşenler çok farklı termal iletkenlik değerlerine sahip olabilirler. Toprağın ortalama termal iletkenliği onun mineralojik ve bünyesel özelliklerine, içeriğindeki organik madde ve nem oranına, toprağın havalanmasına bağlı olarak değişmektedir. Toprakta nem oranının az, havanın ise fazla olması termal iletkenliği azaltmaktadır. Bu nedenle toprak yüzeyinin kuruması ısı iletkenliğinin, dolayısıyla aşağı katmanlara olan ısı akımının azalmasına sebep olmaktadır. Toprakta su ve hava oranı sürekli olarak değiştiği için, ısı iletkenliğide zamana bağlı olarak değişmektedir. Toprağın sıvı fazındaki ısı taşınımı, düzgün bir fazda olmayan esnek dalgaların enerji taşınması teorisine benzemektedir. Genel olarak sıvıların ısı iletkenliği ise 0,07 - 0,7 W/m²K aralığında değişmektedir [45].

Toprağın termal iletkenliği ısı kapasitesi ile karşılaştırıldığında, ısı iletkenliği belli bir sınıra kadar nem miktarının değişimi ile daha fazla değişmektedir. Tarla kapasitesindeki nem oranında, hacimsel ısı kapasitesi nem değişimi ile 3 - 4 kat değişebilirken, ısı iletkenliği ise 100 katı veya daha fazla değişebilmektedir. Isı iletkenliğinin oluşumunda toprak taneciklerinin teması (kondüksiyon) önemli bir faktördür. Bu nedenle, ısı kapasitesinden farklı olarak, ısı iletkenliği ancak toprak fazlarının hacimsel orantısına değil, aynı zamanda toprak taneciklerinin yapısına, çap sınırlarına, yerleşimine ve tekstürüne de bağlıdır. Toprak gibi çok fazlı sistemlerde ısı taşınımı çeşitli olaylarla meydana gelmektedir. Kondüksiyon veya özel ısı iletkenliği bu olaylardan önemlisi olup, bu yolla ısı taşınımı toprak taneciklerinin teması sonucunda oluşmaktadır. Toprağın sıvı ve gaz bileşimindeki moleküllerin yer değişimine bağlı olan konveksiyon olayları da ısı iletkenliğinin oluşumunda oldukça önemlidir. Genel olarak toprakta buhar ve sıvı şeklinde olan rutubet akımının oluşturduğu ısı taşınımı toprağın termofiziksel özelliklerini etkilemektedir. Profil boyunca aşağı genetik katmanların özelliği, yapısı, bileşenlerinin oranı, nemi farklı olduğu için, ısı iletkenliği ve termofiziksel özellikler, derinliğin bir fonksiyonu olmaktadır. Ayrıca, ısı iletkenliği zamana göre de değişmektedir [46].

Topraktaki nem miktarının azalmasıyla ısısal yayınımda azalmaktadır. Nem miktarının artması ile ısı iletkenliği azalan artışa göre, ısı kapasitesi ise doğrusal olarak artmaktadır. Bu durumda, başlangıçta termal iletkenliğindeki artışı ısı kapasitesine göre daha hızlıdır. Benzer şekilde ısısal yayınımda termal iletkenliği

gibi başlangıçta daha hızlı bir artış göstermektedir. Toprağın nem içeriği tarla düzeyine yaklaştığında termal iletkenliğindeki artışta çok azdır [46].

3.2. ISI POMPASI

3.2.1. Isı Pompası Kavramı

Isı pompası basit olarak ısı enerjisini bir ortamdan diğer bir ortama taşıyan ve elektrikle beslenen bir sistemdir. Bilindiği üzere enerji vardan yok, yoktan var edilemez, sadece ya biçim değiştirir ya da bir yerden bir yere taşınır. Isı pompası adını da ısı enerjisini bir ortamdan diğer bir ortama "pompalama" veya "taşıma" kabiliyetinden alır. Buna örnek olarak dalgıç pompalar verilebilir. Dalgıç pompaları nasıl suyu üretmiyorlarsa, ısı pompaları da ısıyı üretmeyip sadece taşırlar. Dalgıç pompalarının su pompalaması için bir su kaynağına daldırılmalarına benzer olarak, ısı pompaları da yeryüzünde bir enerji kaynağına temas etmedikleri sürece ısıyı taşıyamazlar. Gerekli şartlar sağlandığında yüksek miktarlarda enerji düşük maliyetlerle kullanıma sunulabilir [47].

Isı pompası sistemlerinde dış hava, toprak, nehir suyu, göl suyu gibi bir ortam kış şartlarında düşük sıcaklık kaynağı olarak kullanılarak, bu ortamlardan alınan ısı, ısıtılması hedeflenen hacme aktarılır. Yaz şartlarında ise serinletilmesi hedeflenen hacimden alınan ısı yüksek sıcaklık kaynağı olarak görev yapan dış hava, toprak, nehir suyu, göl suyu, vb. ortamlara aktarılmaktadır. Sıcaklık kaynağı olarak kullanılacak ortamın seçilmesi ise iklim şartları, coğrafik yerleşim, ilk yatırım maliyeti gibi pek çok faktöre bağlı olmaktadır [47].

Isı pompaları genel anlamda ısıyı üretmek yerine taşımaya amaçladığı için ısının alınacağı bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan ısı pompalarının çoğu ısı kaynağı olarak havayı kullanmaktadırlar. Günümüzde havayı ısı kaynağı olarak kullanan ısı pompaları split klima ve çiller olarak adlandırılmaktadır. Hava kaynaklı cihazların verimleri, dış hava sıcaklıklarının değişimlerinde, farklı değerler alırlar. Verim değerlerinin gün içinde dahi sabit kalmaması sebebiyle, işletme maliyetlerinde beklenmeyen artışlar meydana gelir. Bu

verim değişimlerini önleyen sıcaklığı sabit kabul edebilecek ısı çukurlarında mevcuttur. Bu amaçla kullanılan sıcaklığı sabit kabul edebilen ısı kaynakları toprak ve sudur [47].

3.2.2. Isı Pompası Elemanları

Buhar sıkıştırırmalı ısı pompaları dört ana elemandan meydana gelir. Bu elemanlar:

- 1) Kompresörler
- 2) Buharlaştırıcılar
- 3) Yoğuşturucular
- 4) Genleşme valfleri'dir.

3.2.2.1. Kompresörler

Kompresörler alçak basınçta ve buhar halinde buharlaştırıcılardan çıkan akışkanı yoğuşma sıcaklığına daha kolay gelebilmesi için sıkıştıran elemanlardır. Kompresörler genellikle elektrik motoru yardımıyla tahrik edilmektedir [48]. Dört tip kompresör vardır;

- 1) Pistonlu kompresörler
- 2) Rotatif (dönel) kompresörler
- 3) Turbo (santrifüj) kompresörler
- 4) Vidalı kompresörler



Şekil 3.1. Örnek bir kompresörün iç ve dış görünümü.

3.2.2.2. Buharlaştırıcılar

Buharlaştırıcılar soğutulması istenilen ortamdan ısı çekerek ortamın istenilen şartlara ulaşmasını sağlayan elemanlardır. Bu işlem yapılırken ortamdan ısı çeken akışkan burada buharlaşmaya başlar. Soğutucu akışkanın cinsine göre muhtelif malzemelerden yapılır. Genellikle bakır ve çelik borular kullanılır. Buharlaştırıcı şekillerine göre; gövde borulu buharlaştırıcılar, koaksiyal buharlaştırıcılar ve kanatlı buharlaştırıcılar olarak gruplara ayrılırlar [48].

3.2.2.3. Yoğuşturucular

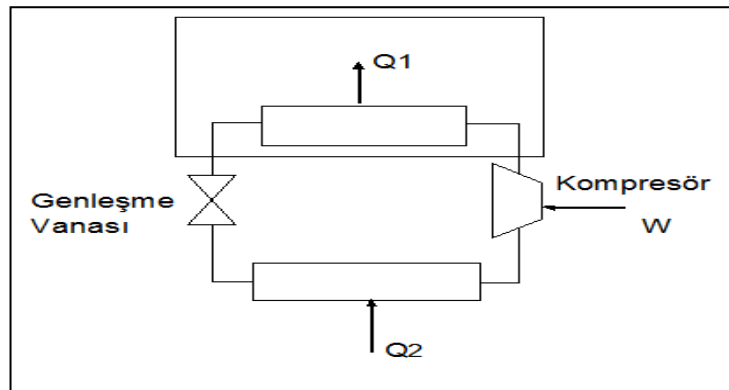
Yoğuşturucular, kompresörde kızgın haldeki akışkana basınç uygulandıktan sonra çıkan akışkan buharının yoğunlaştırıldığı yerdir. Burada soğutma işlemini hava ve su yaptığı için yoğuşturucular hava soğutmalı ve su soğutmalı yoğuşturucular olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Hava soğutmalı sistemlerde yoğuşturucu kanatlı boru sistemine göre yapılır, dış yüzeyi havayla temas eden borular içerisinde soğutucu akışkan bulunmaktadır ve ısı taşınımı bu sistem aracılığı ile yapılır. Hava taşınım katsayısının küçük olması nedeniyle bu sistem genellikle daha küçük alanlarda ve küçük soğutma yüklerinde kullanılır. Aksi taktirde çok büyük alanların kullanılması söz konusudur. Bu sisteme en güzel örnek evlerimizde kullandığımız buzdolaplarıdır. Dolabın arkasında açık halde bulunan borulardan geçen akışkan hava ile temas ederek ısı transferini gerçekleştirir [48].

3.2.2.4. Genleşme Elemanları

Genleşme elemanları, soğutucu akışkan basıncını istenilen buharlaştırıcı basıncına düşürmeye yarayan sistem elemanıdır. Kompresörde sıkıştırılan soğutucu akışkan yoğuşturucuda ısı vererek sıvı hale geldikten sonra genleşme vanasına gelir ve basıncı buharlaştırıcı basıncına düşer. Genleşme vanasının diğer bir adı da kısılma vanasıdır. Alçak basınçtan yüksek basınca geçmek kompresörde, yüksek basınçtan alçak basınca düşmek ise genleşme elemanında gerçekleşir. Genleşme elemanı basıncı düşürmenin yanında, evaporatöre verilmesi gereken soğutucu miktarının ayarlanmasından da sorumlu olduğundan, dozlama ünitesi olarakta bilinir [48].

3.2.3. Isı Pompası Çalışma Prensibi

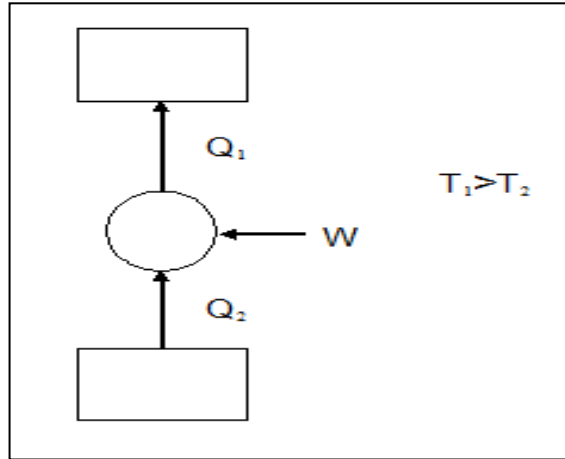
Isı pompası, dışarıdan enerji verilmesi ile düşük sıcaklıktaki bir ortamdan aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki ortama veren bir makinedir. Kışın ısıtma maksadı ile kullanılan ısı pompası, yazın da soğutma için kullanılabilir. Isıtma pompasının çalışma prensibini daha iyi anlayabilmek için önce soğutma çevrimlerinin iyi incelenmesi gereklidir. Termodinamiğin ikinci yasası gereğince ısı ancak sıcak bir ortamdan soğuk bir ortama kendiliğinden geçer. Bunun tersi için, yani soğuk bir ortamdan sıcak bir ortama ısı transfer etmek için mutlaka bir iş yapılması gerekir. Düşük sıcaklıktaki bir ortamdan yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi ancak soğutma makinelerinin kullanımıyla olanaklıdır. En yaygın kullanılan soğutma çevrimi buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimidir [47].



Şekil 3.2. Soğutma çevrimi [47].

Soğutucu akışkan kompresöre buhar olarak girer ve burada yoğunlaştırıcı basıncı altında sıkıştırılır. Kompresör çıkışında kızgın buhar halinde olan akışkan, yoğunlaştırıcıda çevre ortamına ısı vererek soğur ve yoğuşur. Akışkan yoğunlaştırıcıdan sonra genleşme vanasına girer ve kısılma etkisiyle basıncı ve sıcaklığı büyük ölçüde azalır. Soğutucu akışkan daha sonra buharlaştırıcıda soğutulan ortamdan ısı alarak buharlaşır ve çevrim buharlaştırıcıdan çıkan akışkanın kompresöre girmesiyle tamamlanır [47].

Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çevrimi gerçekleştirirler fakat kullanım amaçları farklıdır. Bir soğutma makinesinin amacı düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdan ısı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimin tamamlanması için yapılması zorunlu bir işlemdir fakat amaç değildir. Isı pompasının amacı ise bir ortamı sıcak tutmaktır. Bu işlevi yerine getirmek için düşük sıcaklıktaki bir ısı deposundan alınan ısı, ısıtılmak istenen ortama verilir. Düşük sıcaklıktaki ısı deposu genellikle soğuk çevre havası, kuyu suyu veya toprak, ısıtılmak istenen ortam ise bir evin içidir [2].



Şekil 3.3. Isı pompası çevrimi [47].

Isı pompasının akışkanı ısı kaynağından aldığı Q_2 ısı ile buharlaşarak kompresöre gelir. Kompresör çıkışında istenilen basınçla yoğunlaştırıcıya girer. Burada Q_1 ısını bırakarak ortamı ısıtır [47].

Bir ısı pompasının en önemli karakteristiği performans katsayısıdır (COP). Verimli bir sistemin COP değerleri 4'ten büyük olmalıdır, yani sisteme girilen her bir birim girdi karşılığında 4 birim enerji elde edilir. Genel olarak kullanıma uygun ısı pompalarının COP değerleri 5' in üzerindedir [2].

3.2.4. Isı Pompasında Kullanılan Isı Kaynakları

Isının çekildiği ortamın sıcaklığı ile ısının verildiği ortamın ulaşılması istenen sıcaklığının aynı olmaları halinde, ısı pompası maksimum verimde çalışır. Dolayısıyla mümkün olan en sıcak kaynak ısı pompası için en uygun kaynaktır. Aynı zamanda, kaynak sıcaklığının doğrudan kullanılmayacak bir sıcaklıkta olması gerekir. Aksi takdirde ısı pompasına ihtiyaç olmaz [2].

Isı kaynağını seçerken aşağıdaki ana faktörler göz önüne alınır;

- 1) Coğrafi durum
- 2) İklim Şartları
- 3) İlk maliyet
- 4) Uygunluk

Isı pompası tasarımında başlıca zorluklardan biri de, kullanılacak kaynaklarla ilgili verilerin elde edilmesidir. Isı pompalarında başlıca dört kaynaktan yararlanılır. Bunlar, hava, su, toprak ve güneş enerjisidir. Bunlardan ilk üçü tek başlarına kullanılabilirle beraber, güneş enerjisi genellikle yardımcı kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu dört kaynağın dışında atık ısı ve lağım sularından da özel durumlarda ısı kaynağı olarak yararlanılır [2].

3.2.4.1. Hava

Hava, ısı pompası için tedariki kolay, ucuz ve bol bir ısı kaynağıdır. En önemli yararları, sürekli bulunmasından başka, her ortamda kullanılması, kullanılan ekipmanların makul boyutlarda olması ve düşük işletme ve tesis maliyetleri gerektirmesidir. Ayrıca tasarımı ve uygulaması için, şu anda çok geniş ve ayrıntılı bilgi kaynakları mevcuttur. Hava kaynaklı ısı pompalarının iki büyük dezavantajı sıcaklık değişimi ve buzlanma problemidir. Hava kaynaklı ısı pompalarının tasarımı hava sıcaklığı değişimi ile çok ilgilidir. Birçok yerde hava sıcaklığının değişimi büyüktür. Buna göre, ısıtma yükü, hava sıcaklıklarının düşük olduğu zaman, yüksek değerlerde olmalıdır. 0 °C veya daha alçak sıcaklıklarda ısı değiştirici yüzeylerinde don meydana gelir. Periyodik olarak donun çözülmesi gerekir [2].

3.2.4.2. Su

Kuyulardan, göllerden, nehirlerden, şehir şebekesinden ve üretim işlerinden elde edilen su, ısı kaynağı olarak kullanılabilir. 10 m ve daha fazla derinliklerde yer altı suyunun sıcaklığı yıl boyunca çok az değişir. Sıcaklığı ortalama olarak 10 °C'dir. Kuyuların yerleştirildiği sahaya ve suyun çıkarıldığı yer altı suyu stok durumuna göre, yer altı suyu sıcaklığı kış ortasında 8 - 12 °C ve yaz ortasında 10 - 14 °C arasında değişir.

Su kaynağı olarak göller, nehirler gibi yerüstü sularından yararlanıldığında ise, sıcaklık kuyu sularına göre daha fazla değişmekle beraber, hava kadar değişmemektedir. Ülkemizde yerüstü sularının genellikle 0 °C'nin altına düşmemesi de su kaynaklı ısı pompalarının kullanımı için ayrı bir yarar sağlamaktadır. Kaynak olarak su kullanıldığı takdirde, kullanılan suyun kalitesi de önemlidir. Su kalite testi kesinlikle yapılmalı ve içerdiği mineraller korozyon probleminden ötürü önceden incelenmelidir. Suyu kaynak olarak kullanmanın başka bir yararı ise, ısı değiştiricilerinde ısı geçişinin daha yüksek olmasıdır. Ancak ısı değiştiricilerinin suyla temasıyla sağlayacağı ısı geçişinden en iyi şekilde yararlanmak ve ömrünü uzatmak için daha verimli ve kompakt yapılmaları gerekmektedir [2].

3.2.4.3. Toprak

Toprağın bir yıl boyunca az değişen (1 - 2 m derinlikte) bir sıcaklığı vardır. Isı bir yıl boyunca güneşin yeryüzüne ışıdığı ve toprağın depoladığı güneş enerjisinden kaynaklanmaktadır. Güneş yazın öğle zamanlarında 1000 W/m^2 yeryüzü alanı, kışın $50 - 200 \text{ W/m}^2$ yeryüzü alanı ışınlar. Toprağın içinden yeryüzüne akan ısı akısı sadece $0.042 - 0.063 \text{ W/m}^2$ toprak alanı tutmaktadır. Bu nedenle pratikte ihmal edilebilir [36].

Toprak; sıcaklık sabiti, sıcaklık durumu, yerel ve zamansal varlığı ve de depolama imkanı açısından çok elverişli bir ısı kaynağıdır. Sakıncaları ise; ısı çekilen elemanların yüksek masrafı, toprağın bünyesinden ve yerel ile zamansal değişimlerinden dolayı ölçülmesinin emniyetsizliği, boş toprak alanına olan ihtiyaç, yerleştirilmesindeki güçlükler, tamir veya değişimlerdir. Bu mahsurların yanında sistematik denenmesi ve pratik deneyimlerin değerlendirilmesine dayanarak, bugün hala mevcut emniyetsizlikleri ortadan kaldırmak ve uygun metotlarla toprağı küçük taban alanı ihtiyacıyla yetinerek kullanmak uygundur [2].

Toprak altına gömülen borulardan doğrudan soğutucu akışkan veya daha ucuz olması bakımından, genellikle, salamura geçirilir. Bu ısı geçişini sağlayan yüzeyler (toprak ısı değiştiricileri), yatay ve dikey olmak üzere iki şekilde yerleştirilir. Toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdiği nem miktarı ve gömme derinliği, toprak ısı değiştirici seçimini ve boyutlandırılmasını etkiler. Toprak özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmesi projelendirmede güçlük oluşturan sebeplerden birisidir. Aynı şekilde ısı pompası çalıştırıldığı andan itibaren toprağın özelliklerini değiştirir. Örneğin; ısı pompası ile ısıtma yapıldığı takdirde, toprak ısı değiştiricisine yakın yerlerde toprak sıcaklığı düşer. Dolayısıyla bu bölgede nem miktarı ve toprak özellikleri değişir.

Geri dönüş suyu sıcaklığı da aynı sebeple düşer ve bu da, ısı pompasının gerek kapasitesini gerekse ısıtma tesir katsayısını doğrudan etkiler. Soğuk yörelerde, ısıtma yapıldığı süre içinde toprağa yeteri kadar ısı girişi olmazsa; kış aylarında topraktan sürekli çekilen ısı nedeniyle, toprağın donması tehlikesi de mevcuttur [2].

3.2.4.4. Güneş

Güneş yeryüzüne sürekli olarak yüksek miktarda enerji ışıır, öyle ki yazın öğlen zamanı bu enerji miktarı 1000 W/m^2 , kışın yeryüzünde sadece $50 - 200 \text{ W/m}^2$ 'dir. Bu enerjiden alışlagelmiş güneş kolektörleri ile %50 yararlanılabilir. Güneş enerjisinden tek başına veya diğer kaynaklarla birlikte yararlanır [2].

Kaynak olarak güneş enerjisinden yararlanıldığında iki sistem söz konusudur. Bunlar direkt ve indirekt sistemlerdir. Direkt sistemlerde buharlaştırıcılar doğrudan güneş kollektörüne yerleştirilir. Endirekt sistemlerde ise kolektörlerden su veya su buharı geçirilerek kaynak olarak bunlardan yararlanır. Ancak hava kaynağında olduğu gibi, ısı ihtiyacı bulunan günlerde güneşten elde edilebilecek enerji az olduğundan; ek bir ısıtma tesisatına veya ısının depolanmasına ihtiyaç vardır ki bu da zaten pahalı olan sistemin maliyetinin artmasına neden olur [2].

3.2.5. Isı Pompası Çeşitleri

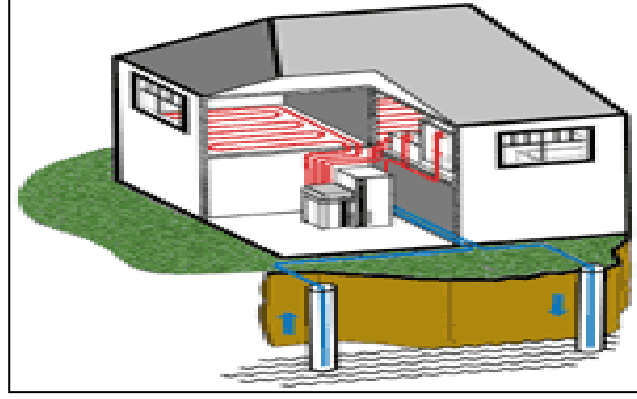
Isı pompalarını basitçe ısı kaynağı bakımından üç öge üzerinde inceleyebiliriz. Bunlar şöyledir;

- 1) Isı Kaynağı "Su" Olan Isı Pompaları
- 2) Isı Kaynağı "Hava" Olan Isı Pompaları
- 3) Isı Kaynağı "Toprak" Olan Isı Pompaları

3.2.5.1. Su Kaynaklı Isı Pompası

Toprağın ulaşılabilir derinliğinde sürekli akışı olan yeraltı su kaynağı bulunması durumunda bu kaynaktaki su ısı kaynağı olarak kullanılabilir. $+8 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $+12 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkları arasındaki su optimal bir işletmeye imkan tanır. Bu sistemlerde, yeraltı suyu açılan bir kuyu ile topraktan emilir, ısı pompasında kullanıldıktan sonra emiş kuyusuna 15 metre uzaktaki bir geri basma kuyusu ile tekrar toprağa gönderilir.

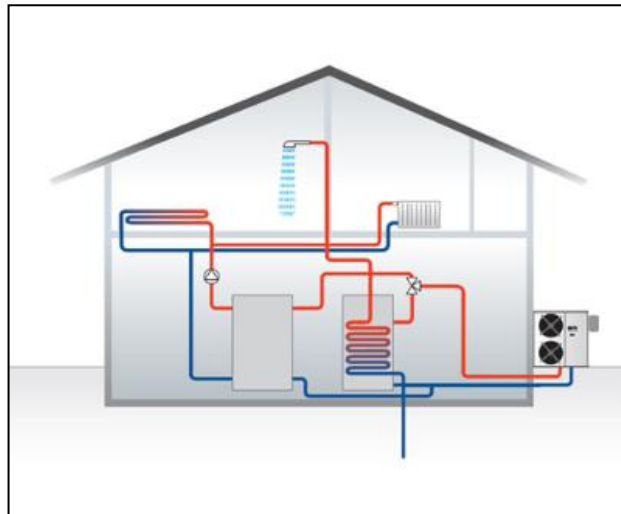
Su kaynaklı ısı pompalarını da basitçe şöyle sınıflandırabiliriz. Bunlar; sudan suya toprak kaynaklı ve deniz kaynaklı ısı pompalarıdır [2].



Şekil 3.4. Su kaynaklı ısı pompası.

3.2.5.2. Hava Kaynaklı Isı Pompası

Yeraltı su kaynağı olmaması ve topraktan ısı alınmasının çeşitli nedenlerle mümkün olmaması durumunda, ısı kaynağı olarak dış hava kullanılır. Bu tür ısı pompaları, mevcut sistemlere yapılan ekler ve çiftli işletim sistemleri için ideal çözümdür. Isı pompasında mevcut olan donmayı önleyici sistem sonucu, dış hava sıcaklığının - 18 °C soğuk olması halinde bile kusursuz bir çalışma mümkündür. Bu sistemlerde, ısı pompası bina içine, buharlaştırıcı sistem ise bina dışına kurulur [2].



Şekil 3.5. Hava kaynaklı ısı pompası.

Ev içindeki havadan yararlanabilmek için ev, bir havalandırma sistemiyle havalandırılabilirdir. Havalandırma, kullanışlı bir vantilatör sistemiyle tamamlanmalıdır. Bir hava ısı pompası, evdeki havalandırmayı artırır. Buda genellikle, küf, rutubet ve radon gazı problemlerini çözer. En büyük kazancı, hem sıcak su hem deradyatör suyu için harcanan ısıyı kullanabilmesidir. Bu tip ısı pompaları bir ünitenin içine monte edilmiştir [2].

3.2.5.3. Toprak Kaynaklı Isı Pompası

Toprak ısı % 98 oranında depolanmış güneş enerjisidir. Toprak, kışın en soğuk günlerinde bile, en uygun işletme için gerekli olan sıcaklık değerlerine sahiptir. Toprak kolektörleri adı verilen özel kolektörler toprağa yerleştirilerek topraktaki ısı alınır. Toprak kolektörlerinin içinde dolaşan ısı taşıyıcı sıvı topraktaki ısıyı, ısı pompasına iletir [2].

Toprağın ısı kaynağı olarak kullanılması fikri ilk defa 1912 yılında İsviçre’de ortaya atılmıştır [49]. O zamanlar ısı pompalarının verimlerinin düşük olması ve enerji maliyetlerinin ucuz olmasından dolayı bu fikir çok rağbet görmemiştir. 1940’lı yıllarda Amerika ve İngiltere’de toprak kaynaklı ısı pompaları üzerindeki araştırma çalışmaları tekrar başlamıştır. İngiltere’ de ilk defa TKIP 1940’ların ortasında Sumner tarafından tek katlı bir evin ısıtılması için kullanılmıştır [50]. 1948’de her biri 9 KW çıkışlı, ortalama performans katsayısı 3 civarında, toprak kolektörü kullanan 12 adet prototip ısı pompası kurmuştur. Fakat bu çalışması 2 yıl kadar sürmüştür. Kuzey Amerika’da ilk TKIP 1945 yılında Indianapolis’ te bir eve kurulmuştur [51]. Bugün toprağın ısı kaynağı ya da ısı çukuru olarak kullanılmasıyla ilgili hemen hemen bütün metotlar, bundan sonraki senelerde araştırılmıştır [52].

TKIP (Toprak kaynaklı ısı pompası) endüstrisi ülkemiz için oldukça yenidir. Günümüzde, TKIP’larının kullanımının düşük oranda olmasının nedeni, toprak ısı değiştiricisinin projelendirilme yönteminin henüz tam anlamıyla ortaya konulamaması ve toprak ısı değiştiricisinin maliyetinin yüksek olmasıdır.

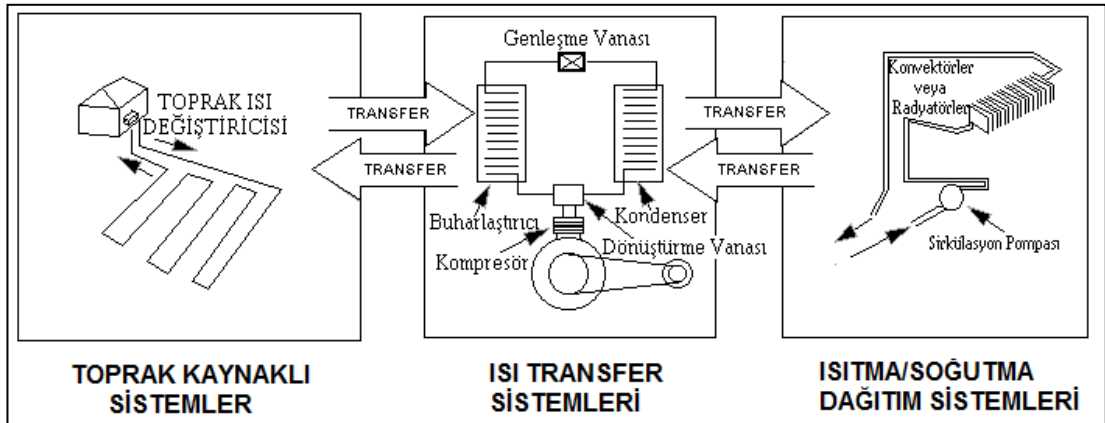
Son birkaç yıldır, bazı şirketler yurt dışından ithal ettikleri TKIP'larının ülkemizde kullanımlarını artırmak için yoğun çaba harcamaktadırlar. Bununla beraber, kurulan TKIP'larının sayısı, yurt dışında kurulanlarla kıyaslanmayacak ölçüde azdır [38].

Bugün artık TKIP'larının dünyada yaklaşık olarak 400 000 üniteye ulaşan sayısı ile (bunların yaklaşık % 62'si Amerika'da bulunmaktadır) ve her yıl 45 000 yeni ünitenin eklenmesiyle kendini ispatlamış ve kabul edilmiş bir teknoloji olarak karşımızdadır. Sahip oldukları potansiyel ile birincil enerji kaynakları tüketimini azaltmaktadır. Dolayısıyla sera gazlarının ve diğer çevreye zararlı gazların atılımını düşürmektedir [47].

3.2.5.4. Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Çalışma Prensibi

Toprak Kaynaklı Isı Pompaları, toprağın içindeki sıcaklığın kararlı değişmesi ve soğuk iklimlerde performansını yüksek seviyede tutması nedeniyle enerjinin kullanımında daha etkili sonuçlar ortaya çıkarır. Genel anlamda toprak kaynaklı ısı pompası üç ana kısımdan oluşur [47].

- 1) Isı pompası
- 2) Yer bağlantıları
- 3) Isıtma ya da soğutma için dağıtıcı sistem



Şekil 3.6. Toprak kaynaklı ısı pompası [47].

1) Isı pompası

Isı pompası, sistem içerisinde dolaşan antifriz esaslı akışkanı sıkıştırarak ve genişleterek ısıyı yer bağlantısı ile dağıtıcı sistem arasında transfer eder. Termodinamiğin ikinci yasasına göre ısı ancak sıcak bir ortamdan soğuk bir ortama enerji harcamadan iletilebilir. Bunun tersi ısı pompasıyla mümkün kılınır. Isıtma yöntemi düşünüldüğünde, yerin altındaki ısı dönüştürücüsünde (buharlaştırıcı) topraktan akışkana ısı iletilir. Buharlaştırıcıda bulunan soğuk akışkan sıvı halde bulunur. Isı dönüştürücüsünün bulunduğu ortamın yani toprağın sıcaklığının daha yüksek olmasından dolayı akışkana ısı transferi olur. Bu ısı, kaynama noktası düşük olan bu antifrizli akışkanın buharlaşmasına sebep olur. Düşük basınç ve düşük sıcaklıktaki akışkan elektrikle çalışan kompresör vasıtasıyla yüksek basınç altında yüksek sıcaklıklara ulaşır. Artık yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınç altında buhar halindeki akışkan bakır borular vasıtasıyla ikinci bir ısı dönüştürücüsüne iletilir. Bu ısı dönüştürücüsü yoğuşturucu olarak tanımlanır. Yoğuşturucuda kızgın buhar halindeki akışkandan ısıtılması istenen zemine ısı transferi gerçekleşir. Akışkanın sıcaklığı düşer ve yoğunlaşır. Yoğuşturucudan çıkan akışkan genişleme valfinden geçirilerek basıncının ve dolayısıyla sıcaklığının önemli derecede düşmesi sağlanır. Daha sonra sıcaklığı düşmüş olan akışkan buharlaştırıcıya gönderilir ve döngü tamamlanır ve tekrar başlar. Soğutma işlemi için ısı pompası içerisine yerleştirilmiş dönüştürme vanası kullanılarak aynı döngü tekrarlanır [47].

2) Yer bağlantıları

TKIP ile toprak arasında ısı transferini sağlayan ısı değiştiricilerinin olduğu kısım yer bağlantıları olarak adlandırılır. Bu ısı değiştiricileri toprağa yatay ya da düşey olarak gömülmüş ısı iletkenlikleri yüksek borulardan oluşmaktadır.

3) Isıtma ya da soğutma için dağıtıcı sistem

TKIP dağıtıcı sistemleri, ısı pompasından aldıkları sıcak ya da soğuk havayı hedeflenen zemine iletirler. Büyük sistemlerde farklı birimleri besleyen birden çok

ısı pompası kullanılabilir ve her bir ısı pompası ortak bir çevrime bağlanıp çalıştırılabilirler.

İç hacimlerin ısıtılmasında kullanılan ısıtıcı elemanlar farklılık gösterse de, temel prensip hepsinde aynıdır. En sık kullanılan yöntemler radyatör sistemleri ve yerden ısıtma sistemleridir. Isı pompası sistemi 55 - 45 °C ve 45 - 35 °C sıcaklıklarında çalışabilir ve bu özelliği yerden ısıtma sistemleriyle uyum içerisinde çalışmasına imkân verir. Isıtmanın yanı sıra soğutma ihtiyacı mevcut ise fan - coil sistemi tercih edilmelidir [47].

3.2.5.5. Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Çeşitleri

1. Açık Çevrim Sistemler

Açık çevrimli sistemler kapalı çevrimli sistemlere göre daha az tercih edilmesine karşılık kaynak suyunun bol olduğu yerlerde kullanılabilirler. Amaç maliyetin daha az olmasını sağlamaktır. Sistemde gömülü olan borunun içinden akan sıvı akışkan yerine, göl, kuyu gibi kaynaklardan gelen su kullanılır. Yeraltında bulunan su bir kuyudan çekildikten sonra ısı değiştiriciye ısı transferi yapıldıktan sonra tekrar geri boşaltılır. Bu boşaltma ya deşarj kuyusuna ya da tekrar alındığı kaynağa verilir. Hem su ihtiyacını karşılamakta hem de ısı pompasında kullanılan bir sistemdir. Sistemde deşarj olayı mevcut olduğundan dolayı performansı yüksektir. Yıl boyunca da yer altı su sıcaklığının sabit olması sistemin avantajıdır.

Açık sistemlerin en önemli unsuru su kalitesinin yüksek olması gerekmesidir. Su da korozyona neden olacak maddelerin bulunması, mineraller ısı değiştiricisinde birikebilir, demir ve diğer kirler dönüşüm kuyusunu tıkayabilir. Bu yüzden suya aşındırıcılık, asitlik ve mineral içeriği testlerinin yapılması gerekmektedir.

Sistemde çevreye zarar söz konusu olduğundan bazı yerlerde kullanılması yasaklanmıştır. Suyun geri verilmeme durumu, bulaşıcı riskinin taşınması, organik bileşiklerin taşınması gibi olumsuz etkileri vardır [2].

2.Kapalı Çevrim Sistemler

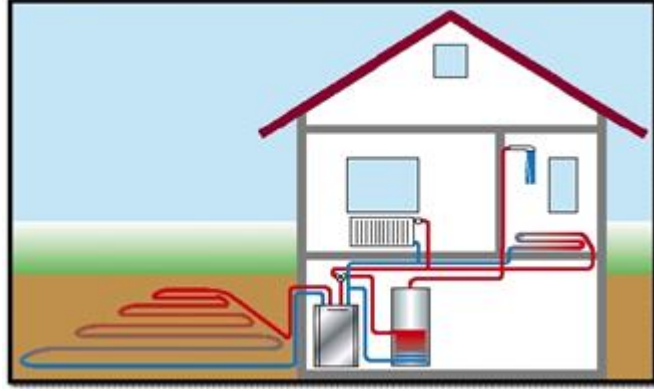
Kapalı çevrim sistemler ekonomik olması, emniyetli olması ve kullanım alanlarının fazlalığı nedeniyle en çok kullanılan sistemdir. Isı değiştirici olan sıvı akışkan devamlı sirküle olmaktadır. Isı taşıyıcı olarak genellikle su - antifriz karışımı kullanılır ve boru sistemi de en çok tercih edilen polietilen malzemesindedir. Kapalı devre çevrim sistemleri, toprak ısı değiştirici tiplerine göre yatay ve dikey olmak üzere iki gruba ayrılırlar [2].

1. Yatay Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

Yatay uygulama genellikle arazinin büyük olduğu projelerde uygulanmakta olup, ısı değiştiricisi boruların toprağın 1,5 - 2 m altına döşenerek üstünün yine toprakla doldurulması suretiyle oluşturulmaktadır. Isı değiştirici olarak en yaygın olan sistemdir. Sistemde boru veya borular toprağa yatay olarak gömülürler. Boru hatları arasındaki mesafede 0,3 - 0,6 m arasında alınabilir [2,47].

Dikkat edilmesi gereken bir husus, boru döşenmesi için açılan hendeğin boru döşendikten sonra toprak-boru ısı transferinin en iyi olması için iyi bir şekilde sıkıştırılması gerekmektedir.

Yatay boruların yüzeye olan mesafesinin bu tip ısıl sistemlerin performansına etkisinin önemine yukarıda değinmiştik. Borular genelde; yüzeyden 0,9 - 1,8 m derinlikte ve 0,9 - 1,8 m aralıklarla yerleştirilmelidir. Yeraltı konstrüksiyonlu ısıl sistemlerde, toprak türüne bakılmaksızın, yüzeyden 2 m derinliklerde, dış ortam şartlarının sistem performansı üzerinde etkisinin olmadığı gözlenmiştir [53]. Ancak, hendeğin derinliği arttıka kazı maliyetinin; dolayısıyla ısıl sistemin ilk yatırım maliyetinin artması da gözardı edilmemelidir [2].



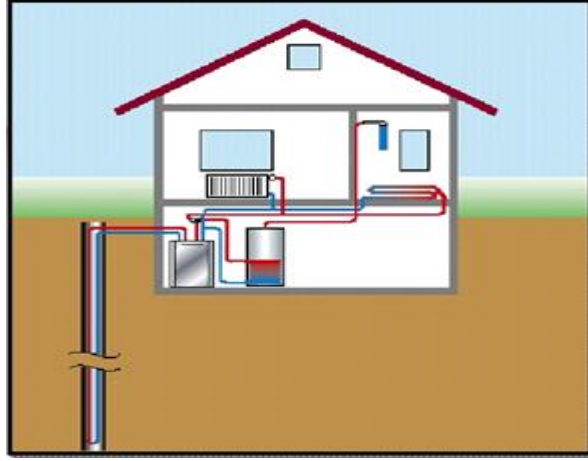
Şekil 3.7. Yatay tip toprak ısı değiştiricisi.

Literatürde, en yaygın yatay ısı değiştiricilerinin, $\frac{3}{4}$ " , 1" , $1\frac{1}{2}$ "'lik tek borulu 0,5 - 2,5 m derinliğe ve birbirinden 0,6 - 2,5 m aralıklarda döşenmiş yatay ısı değiştiricileri olduğu belirtilmiştir [54]. Bu tip ısı değiştiriciler, genelde temel kabul edilir ve diğer ısı değiştiricilerinin iyilik dereceleri bunlara göre mukayese edilir. Yatay toprak ısı değiştiricilerinde, 700 m boru boyu, 2" boru çapı ve 1 lt/s akışkan debisi kullanılabilir üst sınır değerleri olarak kabul edilir [55].

2. Dikey Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

Dikey (düşey) tip ısı değiştiricileri yeteri kadar alanın olmadığı ve hendek açmanın zor olduğu bölgelerde kullanılan ısı pompası türüdür. Dikey tip ısı değiştiricilerinin yerleştirilme şekilleri, kesit geometrilerine göre U - tüp, bölünmüş tüp ve eş eksenli tüp olmak üzere sınıflandırılırlar. Burada çeşitli çaplardaki borular genellikle 40 - 150 m derinlik açılmış kuyulara gömülebilirler [54].

Ayrıca düşey ısı değiştiricisi boruları farklı geometrilerde uygulanabilir. Borular yerleştirildikten sonra kuyudaki boşluk, standart bentonit, ısıl özellikleri iyileştirilmiş bentonit ve kum gibi bazı dolgu maddeleri kullanılarak doldurulur. Bu yolla ısıl sistemin performansının iyileştirilmesi hedeflenir. Dolayısıyla düşey boruların birbirine olan mesafesi enerji nakli için büyük önem arz etmektedir. Isı değiştiricisi derinliği, basınç düşmesi ve ısı geçişi göz önünde bulundurularak boru çaplarına göre 15 - 185 m arasında değişir [54].



Şekil 3.8. Dikey tip toprak ısı değiştiricisi.

Toprak ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin tasarımında, ısı değiştiricisinin dōřenmesi gereken alanın azaltılmasının bir amaç olduğu düşünülürse, dikey yer ısı değiştiricili ısı pompası sistemlerinin diğer sistemlerden en büyük avantajı ortaya çıkar. En az boruya ihtiyaç duyma, pompalama enerji ihtiyacının diğer sistemlere nazaran daha az olması, tüm sistemler içinde en az yüzey alanına ihtiyaç duyan sistem olması, toprak sıcaklığının mevsimlik değişimlerinden etkilenmemesi dikey toprak ısı değiştiricilerinin diğer avantajlarıdır. Delme makineleri ve ekipmanları gerektirmesi, delme işleminin hendek açma işleminden pahalı olması dikey ısı değiştiricilerin dezavantajlarındandır [2].

3.2.5.6. Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Avantajları ve Dezavantajları

Basit kontroller ve ekipman açısından değerlendirildiğinde toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin ilk yatırım maliyetini düşürmek için, pahalı cihazların kullanılmaması önerilir. Her bölgede, optimum konforu sağlamak için yerel olarak kontrol edilebilen ayrı bir ısı pompası vardır. Hava debisi sabit değerde olup, merkezi kontrol sadece su pompasındaki isteğe bağlı değişken değerde kumanda eder.

Uygun bir şekilde tasarlandığında; kararlı kapasitesi ve yüksek etkinlik açısından fosil yakıtlı ya da hava kaynaklı ısı pompası sistemlerine göre daha ekonomik ve daha yüksek etki katsayısı ile çalışırlar.

Konfor ve hava kaliteleri dikkate alındığında toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri yüksek etkinlik katsayısı sağlar. Yüksek etkinlik katsayısı kompresörün basma basıncının emme basıncına oranının azaltılması ile elde edilir.

Toprak kaynaklı ısı pompalarında genellikle birçok uygulamada belirgin olan, ayrı nem alma veya gizli ısı geri kazanma ekipmanı olmadan, nemlendirme sorunları ile etkin bir biçimde uğraşılır. Çevrim sıcaklıkları, dış hava sıcaklıkları ile çok az değişir. Bu nedenle kapasitesi kararludur. Toprak kaynaklı ısı pompalarının mevcut ısıtma ve soğutma yöntemlerine seçenek oluşturma, yerel hava kalitesine katkı sağlama, enerji temin sorunlarını çözmeye yardımcı olma, enerji giderlerini azaltma, tasarım esnekliği sağlama gibi bir dizi yararları vardır. Bunun yanı sıra toprak kaynaklı ısı pompalarının ilk yatırımının daha yüksek olması, etkinliğinin toprak ısı değiştiricisine ve donanımlarına bağlı olması gibi sakıncaları da mevcuttur.

Toprak kaynaklı ısı pompaları aynı zamanda, büyük yapılarda yaygın olarak kullanılan merkezi ve değişken hava debili sistemlere kıyasla çok daha küçük fan ve pompa enerjisi gerektirir. Konforu ve kısmi yükteki etkinliği sağlamak için karmaşık kontrol sistemleri gerekli olmadığından, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin maliyetini arttırmamak amacıyla, pahalı ve özel cihazların kullanılmaması önerilir. Her bölgede en iyi konforu sağlamak için yerel olarak kontrol edilebilen ayrı bir ısı pompası ile ısıtma veya soğutma yapılabilir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları, göze hoş görünmeyen dış ünite olmadan kurulabilirler. Böylece dış etkenler, korozyon ve hava etkisi ile oluşabilecek sorunlara rastlanmaz. Tüm ısı pompası donanımı iç ünite şeklindedir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, enerji ve bakım giderlerinin düşük olması ve donanım ömrünün uzun olması nedeniyle, yapım ve kullanım ömrü boyunca meydana gelen işletme giderleri göz önüne alındığında diğer sistemlerden daha avantajlıdır.

Toprak kaynaklı ısı pompaları tasarımda önemli ölçüde esneklik sağlar. Çünkü değişik boyut ve yerleşim şekillerinde tasarlanabilirler. Çoğu ticari yapılarda, iç yüklerden dolayı soğutma sistemleri ile yutulan ve çevreye atılan bir atık ısı mevcuttur. Bu atık ısı toprak kaynaklı ısı pompalarıyla sıcak su ihtiyacını karşılamak üzere kullanılabilir. Bu seçilen ısı pompalarındaki ısı geri kazanım ısı değiştiricileri ile veya sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulan sudan suya ısı pompası sistemleri yardımıyla gerçekleştirilebilir.

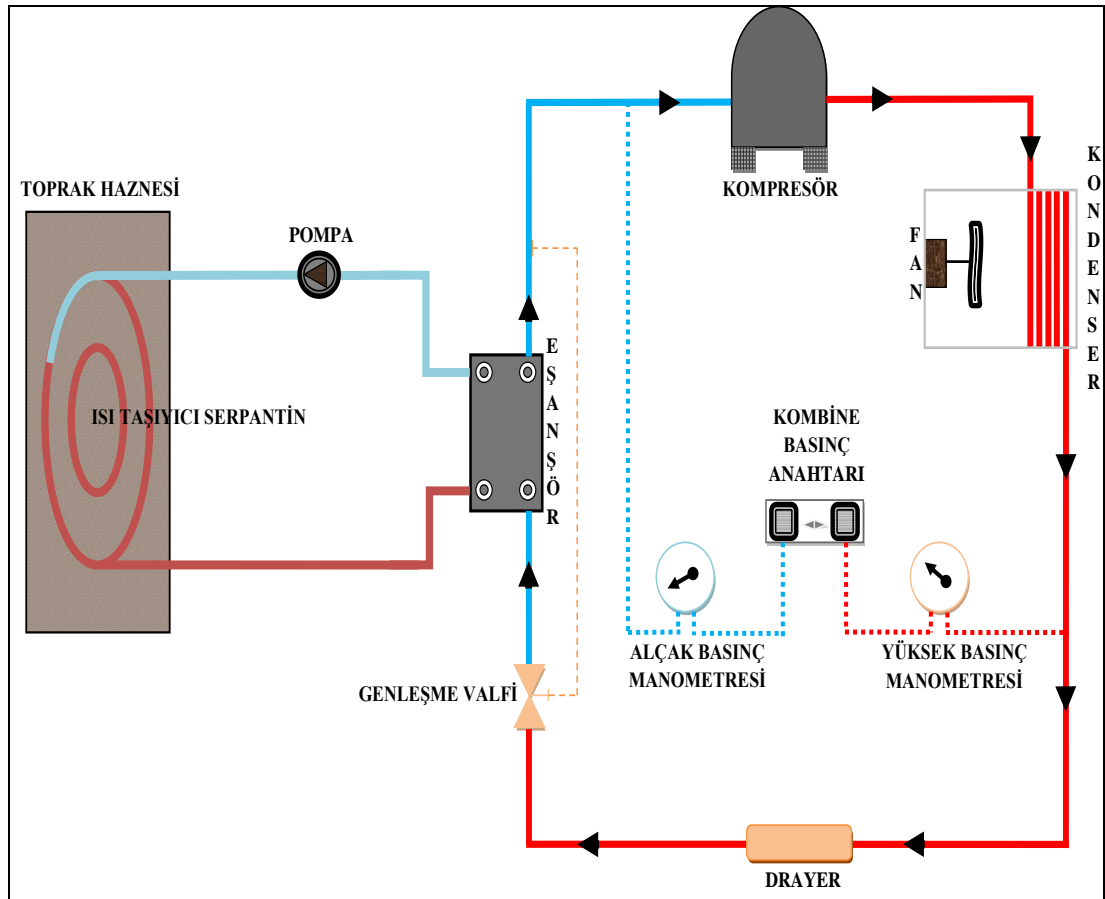
Tüm bu avantajlarına karşılık toprak kaynaklı ısı pompasının kullanımını kısıtlayan en önemli faktörler bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin diğerlerine göre daha yüksek olması ve jeotermal ısı kaynaklarına olan ilgisizliktir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. DENEY SETİNİN ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ

Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı Laboratuvarında tasarımı gerçekleştirilen TKIP model sistem çevrimi Şekil 4.1’deki gibidir.



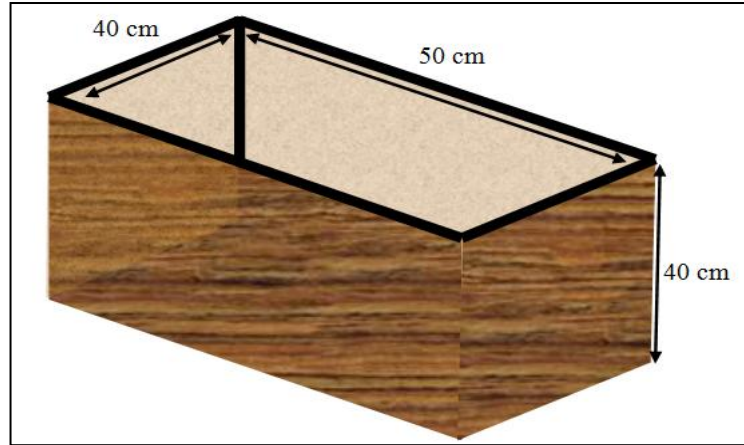
Şekil 4.1. TKIP model sistem çevrimi.

Bu çevrime ait sistemin montajı Şekil 4.2’de boyutları verilmiş bir platform üzerine yapılmıştır.



Şekil 4.2. Çevrime ait sistemin montajlandığı platform ve boyutları.

Bu platform üzerinde bulunan toprak haznesi ve boyutları Şekil 4.3’deki gibidir.



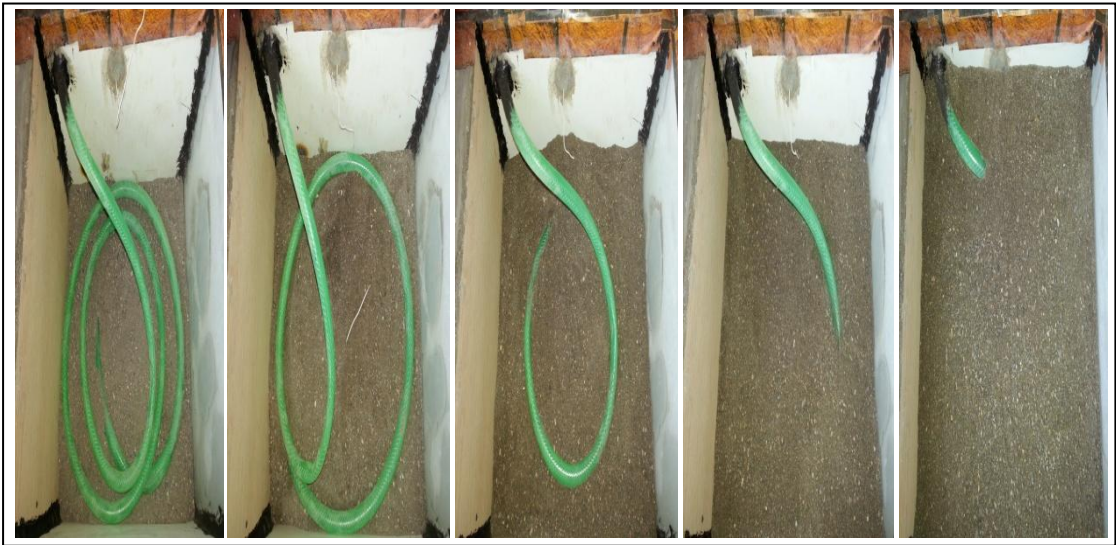
Şekil 4.3. Toprak haznesi ve boyutları.

Toprak haznesi 0,8 m³ hacminde ve yaklaşık olarak 100 kg toprak kapasitesine sahip olup, hazne dışarıdan ve içeriden oluşabilecek ısı kayıplarına karşı 3 cm kalınlığında strafor malzemeyle yalıtılıp dış yüzeyi görsellik açısından Şekil 4.4’de görüldüğü gibi renkli folyo ile kaplanmıştır.



Şekil 4.4. Toprak haznesi.

Sistemde buharlaştırıcı serpantin olarak 3,80 m uzunluğunda plastik hortum kullanılmıştır ve Şekil 4.5’de görüldüğü gibi toprağa helezonik olarak yerleştirilmiştir.



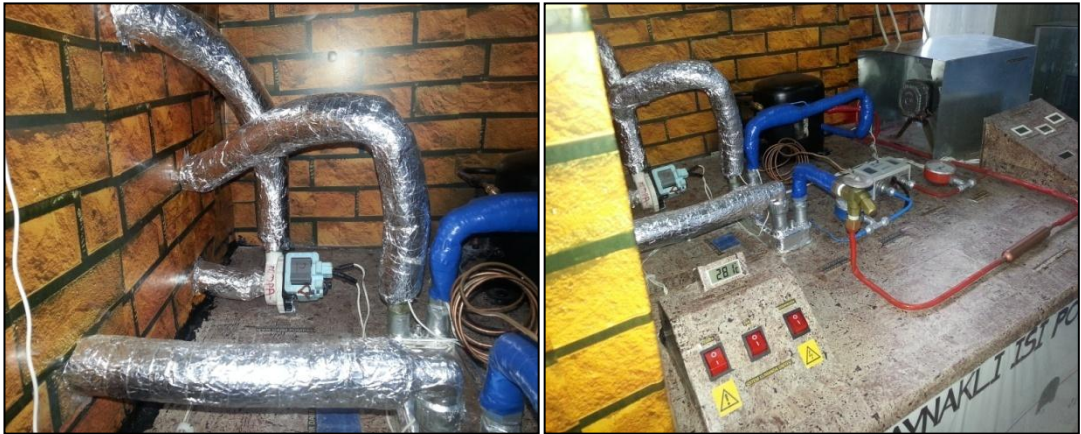
Şekil 4.5. Buharlaştırıcı serpantin ve helezonik yerleşmiş şekli.

Toprak tarafında ısı taşıyıcı akışkan olarak su kullanılmıştır ve bu akışkanın sirkülasyonu Şekil 4.6’da görüldüğü gibi bir devir daim pompasıyla sağlanmıştır.



Şekil 4.6. Sirkülasyon pompası.

Ayrıca sistemin dışarıda kalan, eşanjör (ısı değiştiricisi) bölümündeki tüm boru ve bağlantıları dış hava koşullarından etkilenmemesi amacıyla tamamen yalıtılmıştır. Yalıtılmış borular aşağıdaki Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Yalıtılmış boru ve bağlantıları.

Tasarımı tamamlanan TKIP deney seti derin ve üçlü vakum yöntemiyle vakuma alınarak içindeki hava boşaltılmıştır. Sistemde soğutucu akışkan olarak R-134a kullanılmış olup, sisteme 250 gr soğutucu akışkan şarjı yapılmıştır. Daha sonra gerekli basınç, kaçak testleri ve diğer tüm kontroller yapılarak sistemin kararlı çalışır durumda olduğu gözlemlenmiş ve deneylere başlanılmıştır. Tasarımı tamamlanan ve deneylerde kullanılan TKIP deney setinin farklı açılardan görünümü Şekil 4.8, 9 ve 10'da görülmektedir.



Şekil 4.8. TKIP deney setinin önden görünümü.



Şekil 4.9. TKIP deney setinin sol yandan görünümü.



Şekil 4.10. TKIP deney setinin sağ yandan görünümü.

Bütün deneyler boyunca sistem sürekli akış, sürekli açık (SASA) olarak çalıştırılmış ve deneylerde toprak çeşidi olarak Şekil 4.11’de görüldüğü gibi ince taneli, koyu gri tonlarda, 100 kg kum kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Deneylerde kullanılan kumun görünüşü.

Deneylerde kullanılan kumun; % 0 (Kuru), % 10, % 20, % 30 ve % 40 nemli durumlarının her biri için ayrı deneyler yapılarak ısı pompasının enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. Sistemin elektrik tüketimi elektronik bir elektrik sayacı kullanılarak, (kWh) olarak ölçülmüştür. Deney setinde kullanılan elektrik sayacı Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. Elektrik tüketiminin ölçülmesinde kullanılan elektrik sayacı.

Yapılan deneylerde ilk olarak; % 0 nemli (kuru) kumun, daha sonra sırasıyla % 10, % 20, % 30 ve % 40 nemli kumun ısı pompasının enerji tüketimine etkileri incelenmiştir. Her deney 2 saat süreyle yapılmış ve bu süre zarfında 0. dakikadan başlamak üzere her 10 dakikalık periyotta, 120 dakika boyunca tüm veriler deney föyüne kaydedilmiştir (Ek Açıklamalar - A). Kumu nemlendirmek için 100 kg kuma her deneyin yüzdelik değeri kadar su ilave edilmiştir. Ayrıca her deneyden sonra 1 gün ara verilmiş ve bu arada kumun her deneyden önce güneşte tamamen kuruması sağlanmıştır.

Sistemdeki sıcaklık ölçümleri; ortam sıcaklığı, su giriş ve çıkış sıcaklıkları, kompresör, kondenser giriş ve çıkış sıcaklıkları ve toprak sıcaklığı (°C) olmak üzere Şekil 4.13'de görüldüğü gibi dijital termometreler kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.13. Deneylede kullanılan dijital termometrelerin görünümü.

Kondenser hava çıkış sıcaklığı (°C) ve hava hızı (m/s) ölçümleri ise Şekil 4.14'de görüldüğü gibi bir anemometre cihazı kullanılarak yapılmıştır.



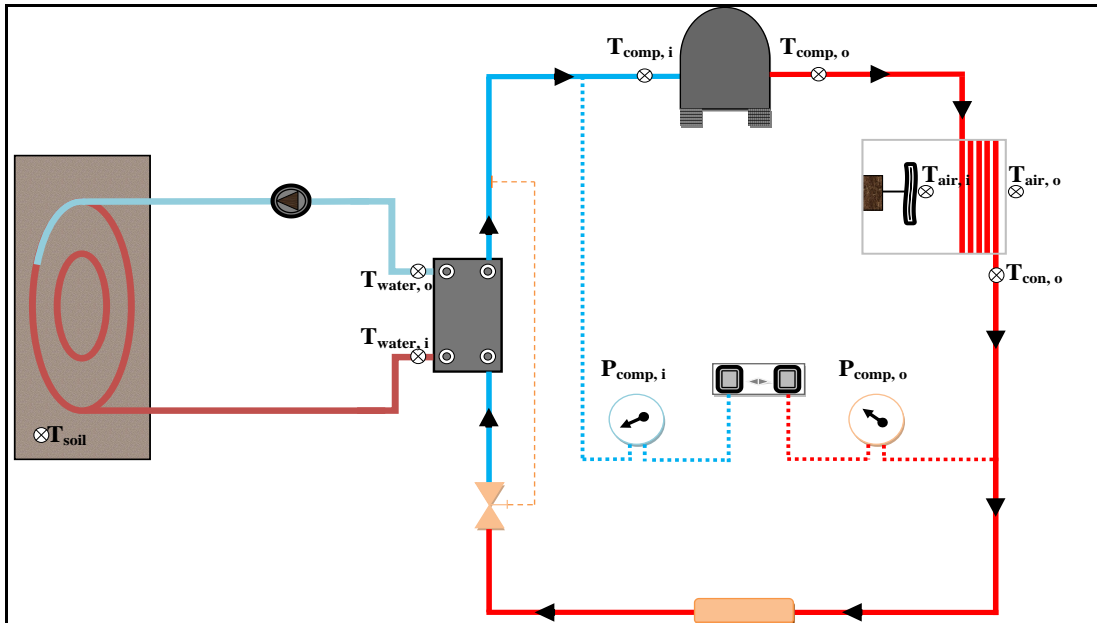
Şekil 4.14. Deneylede kullanılan anemometrenin görünümü

Sistemin basınç ölçümleri (bar); analog basınç manometreleriyle yapılmıştır. Sistemin güvenliği açısından, Şekil 4.15’de görüldüğü gibi sistem bir kombine (birleşik) basınç anahtarı ile donatılmıştır.



Şekil 4.15. Kombine basınç anahtarı ve basınç manometreleri.

Sisteme ait basınç, sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 4.16’da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.16. Deney sistemine ait basınç ve sıcaklık ölçüm noktaları.

Bu deney setinde kullanılan elemanlar ve özellikleri şöyledir;

4.1.1. Kompresörün Yapısı ve Özellikleri

Deney seti olarak kullanılan sistemin kompresörünün özellikleri şu şekildedir;

Üretici firma	: Türk Elektrik
Model	: AE 146 AD
Çalışma voltajı	: 220 /240 VAC
Gücü	: 160 W
Frekansı	: 50 Hz
Piston sayısı	: 1

4.1.2. Yoğuşturucunun Yapısı ve Özellikleri

TKIP sistemi için kullanılan yoğuşturucu orijinal olup şu özelliklere sahiptir;

Üretici firma	: Günay Soğutma
Model	: Boru - Kanatlı tip
Ebatları	: 0.20x 0.25x 0.05 m
Boru dış çapı	: 0,0048 m
Boru iç çapı	: 0,0038 m
Kapasite	: 230 W

4.1.3. Buharlaştırıcı Serpantin Yapısı ve Özellikleri

TKIP sistemi için kullanılan buharlaştırıcı serpantin şu özelliklere sahiptir;

Üretici firma	: Fırat Plastik
Renk	: Yeşil
Tür	: Plastik / PVC Hortum
Uzunluk	: 3,8 m
Çalışma Basıncı	: 4 bar

Patlama Basıncı	: 10 bar
Çalışma Sıcaklığı	: - 5 °C / + 60 °C
Isı İletkenliği	: 0.28 W/m ² K
İç Çapı	: 17 mm
Dış Çapı	: 22 mm

4.1.4. Eşanjörün Yapısı ve Özellikleri

TKIP sistemi için kullanılan eşanjör orijinal olup şu özelliklere sahiptir;

Üretici firma	: Ekin Endüstriyel
Model	: MIT B3 - 095
Isı Transfer Alanı	: 0.095 m ²
Dizayn Basıncı	: 30 bar
Test Basıncı	: 45 bar
Dizayn Sıcaklığı	: - 196 °C / + 200 °C
Plaka Tipi	: H.L.M
Isı Yüğü	: 30 - 200 KW

4.1.5. Su Sirkülasyon Pompasının Yapısı ve Özellikleri

TKIP sistemi için kullanılan su sirkülasyon pompası orijinal olup şu özelliklere sahiptir;

Üretici firma	: SAREX
Model	: B20 – 6A
Çalışma voltajı	: 220 V
Gücü	: 40 W
Frekansı	: 50 Hz
Debisi	: 3 lt / dk.

4.2. DENEY SETİNDE KULLANILAN ÖLÇÜ ALETLERİNİN TANITIMI

Deney setinde kullanılan ölçü aletleri şunlardır;

4.2.1. Dijital Termometrenin Tanıtımı ve Özellikleri

TT Technic Echne firmasınca üretilen dijital termometreler 2 x 1,5 V DC pil ile çalışmakta olup $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +110\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık algılama özelliğine sahiptir. Şekil 4.17'de görülen ve ölçme hassasiyeti $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan termometre $^{\circ}\text{C}$ cinsinden sıcaklık ölçmekle beraber ölçülen en yüksek sıcaklığı gösterme, sıcaklık farkı okuma gibi özelliklerle donatılmıştır. Dijital termometreler kullanılmadan önce kalibrasyonu yapılarak kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 4.17. Dijital termometre.

4.2.2. Kombine (Birleşik) Basınç Anahtarının Tanıtımı ve Özellikleri

Teknı Cold firmasınca üretilen ve Şekil 4.18'de görülen kombine basınç anahtarı -1 bar ile $+30$ bar çalışma aralığına sahiptir. Kombine basınç anahtarı, giriş ucuna uygulanan basınç, belirlenen setpoint (referans değerine) ulaştığında elektrik kontaklarını kapatan bir tür anahtardır. Bu anahtar hem basınç yükselmesi hem de düşmesinde devreye girecek şekilde tasarlanır. Sistemdeki basınç değeri alt setpoint (referans değerine) ulaştığında veya basınç değeri üst referans değerine ulaştığında kompresörü durdurularak sistemin güvenliğini sağlar.



Şekil 4.18. Kombine basınç anahtarı.

4.2.3. Alçak ve Yüksek Basınç Manometrelerinin Tanıtımı ve Özellikleri

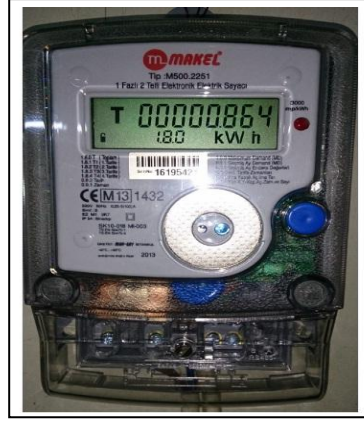
Refco firmasınınca üretilen ve Şekil 4.19’da görülen manometreler bourdon tip olup; % 1,6 hassasiyete sahip, 68 mm ve 1 / 8 NPT alttan bağlantılıdır. Basınç ölçümü için kullanılan bu cihazlar, basınç ölçüm saati veya vakum ölçüm saati olarak da adlandırılırlar.



Şekil 4.19. Alçak ve yüksek basınç manometreleri.

4.2.4. Elektrik Sayacının Tanıtımı ve Özellikleri

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi deneylerde Makel marka 1 fazlı 2 telli elektronik elektrik sayacı kullanılmıştır. Tüketilen elektrik enerjisi miktarını, devrelerdeki üretilen veya tüketilen işi doğrudan ölçen ölçü aleti ya da sayaçtır. Tüketilen enerji kilowatt - saat (kWh) olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Bir faz elektronik elektrik sayacı.

TKIP sistemi için kullanılan elektrik sayacı orijinal olup şu özelliklere sahiptir;

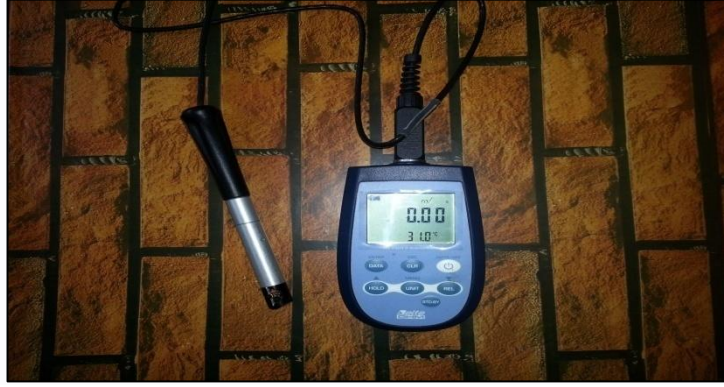
Marka	: Makel
Model	: M500.2251
Faz	: Bir Faz İki Telli
Çalışma Frekansı	: 50 Hz
Çalışma Gerilimi	: 220 V
Gerilim toleransı	: 150-300 V

4.2.5. Anemometrenin Tanıtımı ve Özellikleri

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi Delta Ohm HD2303.0 anemometre cihazı ısıtma - soğutma, havalandırma ve iç hava kalitesi ölçümlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış, hava hızı ve sıcaklık ölçüm cihazıdır. Hava hızı ölçümü için pervaneli problar kullanılmaktadır. Sıcaklık ölçümü için ise Delta Ohm PT100 veya PT1000 sıcaklık probları kullanılmaktadır. Maksimum, minimum ve ortalama değer hafızası bulunan bu cihaz, ayrıca HOLD fonksiyonu ile de anlık ölçüm modunda iken istenildiği zaman veriyi ekranda sabitleyebilmektedir. Deneylerde kullanılan bu cihaza ait teknik özellikler şöyledir;

Ebatları	: 140 x 88 x 38 mm
Ağırlık	: 160 gram

Kullanılan Malzeme	: ABS
Çalışma Sıcaklığı	: -25 / +65 °C
Nem Çalışma Aralığı	: 0 / 90 % RH
Batarya	: 3 x 1,5 V AA
Çalışma Süresi	: ~200 saat
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	: -200 / +650 °C
Hassasiyet	: 0,1 °C
Sapma Oranı	: ± 0,1 °C



Şekil 4.21. Anemometre

4.3. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR VE ÖLÇÜMLERİN ALINMASI

Deney seti olarak kullanılan TKIP sisteminde, toprak neminin ısı pompasının enerji tüketimine etkileri üzerine deneyler yapıldı. Deney seti Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Laboratuvarında uygun bir kısma yerleştirildi.

Gerekli bağlantılar ve kontroller yapıldıktan sonra sistem 2 saatlik periyotlarla SASA olarak çalıştırıldı. Deney setinin enerji tüketimini ölçmek üzere bir elektrik sayacı deney setine monte edildi. Deney seti çalışırken, harcanan enerji (kWh), ölçülen sıcaklıklar (°C), basınçlar (bar), hava hızı (m/s) olarak kaydedildi. Elektrik sayacı ile harcanan enerjinin bulunması sağlandı.

Deneme alışmaları sırasında ortam sıcaklığının çok fazla değişmediği gözlendi. Deneylet sırasında kapı ve pencerelerin zorunlu haller dışında kapalı tutulmasına gayret edildi.

Yapılan bütün ölçümlerde aynı sensörlerle ve aynı noktalardan 10 dakikalık peryotlarla toplam 2 saat boyunca ölçüm alındı. Atmosfer sıcaklığı ölçümünde deney setinin bulunduğu ortamın civarındaki sıcaklık ölçülerek kaydedildi.

TKIP deney setinde % 0 nemli (kuru), % 10 nemli, % 20 nemli, % 30 nemli ve % 40 nemli olmak üzere toplam 5 adet deney yapılarak gerekli tüm ölçümler alındı ve kaydedildi (Ek Açıklamalar - A).

Bu çalışmada ilk olarak kumun % 0 nemli (kuru) durumu daha sonra sırasıyla % 10, % 20, % 30 ve % 40 nemli durumlarının ısı pompasının enerji tüketime etkilerinin incelenmesi için deneyler yapıldı. TKIP deney setinde toplam 100 kg ince taneli, koyu gri tonlarda kum kullanıldı. Kumun nemlendirilmesi için her deneyin yüzdeliği kadar kuma su ilave edildi. Her deney sonrası 1 gün ara verildi ve kumun bu 1 günlük sürede güneşte kuruması sağlandı. Deneyletlerde; ortam, toprak, su giriş ve çıkış, kompresör giriş ve çıkış, ve kondenser çıkış sıcaklıkları ile ayrıca kompresör giriş ve çıkış basıncı, kondenser giriş ve çıkış hava hızı ve sıcaklığı olmak üzere 10 dakikalık aralıklarla 2 saat boyunca tüm veriler kaydedildi. Kaydedilen veriler doğrultusunda her deney için sistemin; STK, ITK, Buharlaştırıcı ve Yoğuşturucu kapasiteleri ile toplam enerji tüketimleri ayrı ayrı hesaplandı.

4.4. MODEL SİSTEME AİT VERİLER

TKIP deney seti sistemine ait soğutma ve ısıtma tesir katsayıları hesaplanırken entalpi değerlerine temel teşkil eden sıcaklık dataları, deney setinin kararlı çalıştığı dilimden 2 saatlik sredeki sıcaklıklar 10' ar dakika aralıklarla kaydedilmiş olup bu değerlerin son 20 dakikasının ortalaması baz alınarak seçilmiştir. Ayrıca bu sıcaklıklara ait entalpi değerleri solkane adlı program kullanılarak elde edilmiştir.

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kapasiteleri hesaplanırken aynı şekilde son 20 dakikanın ortalaması baz alınmıştır. Sistemin kondenserine ait hava çıkış sıcaklığı ve hızı anemometre ile ölçülmüş ve hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır. Enerji tüketimine ait değerlerin ilk ve son ölçümleri kaydedilmiş olup, son ölçüm değerinden ilk ölçüm değerinin çıkarılmasıyla 1 saatlik enerji tüketimi hesaplanmıştır. Deney verilerine ait datalar şöyle adlandırılmıştır;

$T_{Comp,i}$ = Soğutucu akışkanın kompresöre giriş sıcaklığı (°C)

$T_{Comp,o}$ = Soğutucu akışkanın kompresörden çıkış sıcaklığı (°C)

$P_{Comp,i}$ = Kompresör giriş basıncı (bar)

$P_{Comp,o}$ = Kompresör çıkış basıncı (bar)

$T_{Cond,o}$ = Soğutucu akışkanın yoğuşturucudan çıkış sıcaklığı (°C)

$T_{Water,i}$ = Suyun eşanjöre giriş sıcaklığı (°C)

$T_{Water,o}$ = Suyun eşanjörden çıkış sıcaklığı (°C)

T_{Soil} = Toprak sıcaklığı (°C)

$T_{Air,i}$ = Hava giriş sıcaklığı (°C)

$T_{Air,o}$ = Hava çıkış sıcaklığı (°C)

E = Enerji tüketimi (Wh)

Siteme ait soğutma ve ısıtma tesir katsayıları hesaplanırken şu eşitliklerden yararlanılmıştır;

$$STK = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} \quad (4.1)$$

$$ITK = \frac{\dot{m}(h_2 - h_3)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} \quad (4.2)$$

Sistemin buharlaştırma kapasitesi hesaplanırken kullanılan eşitlik ise şu şekildedir;

$$\dot{Q}_B = \dot{m}c\Delta T \quad (4.3)$$

Yoğuşturma kapasitesi hesaplanırken yararlanılan eşitlik ise;

$$\dot{Q}_Y = \dot{m}c\Delta T \quad (4.4)$$

Burada, (\dot{m}) bulunurken;

$$\dot{m} = AV\varrho \quad (4.5)$$

eşitliğinden yararlanılmıştır.

4.5. DENEYLERE AİT VERİLER

Toprak neminin ısı pompasının enerji tüketimine etkisini incelemek üzere TKIP model sistemde yapılan deneylere ait veriler şu şekildedir;

4.5.1. % 0 Nemli (Kuru) Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler

Nemli toprağın ısı pompasının enerji tüketimine etkisini anlayabilmek için ilk olarak kumun tamamen kuru (nemsiz) haldeki durumunun enerji tüketimine dair bir deney yapılmış ve 2 saat süreyle her 10 dakikada bir, tüm ölçümler kaydedilmiştir. Kaydedilen ölçümlerin son 20 dakikalık değerlerinin ortalaması baz alınmış ve deneye ait hesaplamalar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 nolu eşitliklerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait kaydedilen ölçümler ve hesaplamalar doğrultusunda elde edilen veriler şöyledir;

Çizelge 4.1. % 0 (Kuru) kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.

TOPRAĞIN TÜRÜ	KUM
TOPRAĞIN DURUMU (%)	0 (KURU – NEMSİZ)
TOPRAĞIN SICAKLIĞI (°C)	28,2
ORTAM SICAKLIĞI (°C)	31,5
SU GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	18,2
SU ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	18,1
KOMP. GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	15,1
KOMP. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	85,5
KOND. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	50,25
HAVA ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	41,5
HAVA ÇIKIŞ HIZI (m / s)	1,05
ALÇAK BASINÇ (bar)	2,8
YÜKSEK BASINÇ (bar)	13
STK	2,37
ITK	3,37
\dot{Q}_B (W)	167,48
\dot{Q}_Y (W)	633,15
ELEKTRİK TÜKETİMİ (Wh)	335,5

4.5.2. % 10 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler

100 kg kuma, kumun % 10'u kadar, yani 10 lt su ilave edilmek suretiyle kumun bu oranda nemlendirilmesi sağlanarak yapılan bu deneyde 2 saat süreyle her 10 dakikada bir tüm ölçümler kaydedilmiştir. Kaydedilen ölçümlerin son 20 dakikalık değerlerinin ortalaması baz alınmış ve deneye ait hesaplamalar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 nolu eşitliklerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait kaydedilen ölçümler ve hesaplamalar doğrultusunda elde edilen veriler şöyledir;

Çizelge 4.2. % 10 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.

TOPRAĞIN TÜRÜ	KUM
TOPRAĞIN DURUMU (%)	10 NEMLİ
TOPRAĞIN SICAKLIĞI (°C)	27,4
ORTAM SICAKLIĞI (°C)	30,15
SU GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	18,15
SU ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	17,95
KOMP. GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	14,55
KOMP. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	83,85
KOND. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	48,05
HAVA ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	41
HAVA ÇIKIŞ HIZI (m / s)	1,05
ALÇAK BASINÇ (bar)	2,6
YÜKSEK BASINÇ (bar)	12,5
STK	2,46
ITK	3,46
\dot{Q}_B (W)	188,415
\dot{Q}_Y (W)	686,9678
ELEKTRİK TÜKETİMİ (Wh)	319,5

4.5.3. % 20 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler

100 kg kuma, kumun % 20'si kadar, yani 20 lt su ilave edilmek suretiyle kumun bu oranda nemlendirilmesi sağlanarak yapılan bu deneyde 2 saat süreyle her 10 dakikada bir tüm ölçümler kaydedilmiştir. Kaydedilen ölçümlerin son 20 dakikalık değerlerinin ortalaması baz alınmış ve deneye ait hesaplamalar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 nolu eşitliklerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait kaydedilen ölçümler ve hesaplamalar doğrultusunda elde edilen veriler şöyledir;

Çizelge 4.3. % 20 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.

TOPRAĞIN TÜRÜ	KUM
TOPRAĞIN DURUMU (%)	20 NEMLİ
TOPRAĞIN SICAKLIĞI (°C)	27
ORTAM SICAKLIĞI (°C)	29,55
SU GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	18,1
SU ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	17,8
KOMP. GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	14,05
KOMP. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	83,05
KOND. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	48
HAVA ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	41,7
HAVA ÇIKIŞ HIZI (m / s)	1,05
ALÇAK BASINÇ (bar)	2,5
YÜKSEK BASINÇ (bar)	12
STK	2,51
ITK	3,51
\dot{Q}_B (W)	209,35
\dot{Q}_Y (W)	769,2773
ELEKTRİK TÜKETİMİ (Wh)	315

4.5.4. % 30 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler

100 kg kuma, kumun % 30'u kadar, yani 30 lt su ilave edilmek suretiyle kumun bu oranda nemlendirilmesi sağlanarak yapılan bu deneyde 2 saat süreyle her 10 dakikada bir tüm ölçümler kaydedilmiştir. Kaydedilen ölçümlerin son 20 dakikalık değerlerinin ortalaması baz alınmış ve deneye ait hesaplamalar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 nolu eşitliklerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait kaydedilen ölçümler ve hesaplamalar doğrultusunda elde edilen veriler şöyledir;

Çizelge 4.4. % 30 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.

TOPRAĞIN TÜRÜ	KUM
TOPRAĞIN DURUMU (%)	30 NEMLİ
TOPRAĞIN SICAKLIĞI (°C)	26,1
ORTAM SICAKLIĞI (°C)	27,45
SU GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	17,9
SU ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	17,55
KOMP. GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	12,35
KOMP. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	80,4
KOND. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	45,85
HAVA ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	41,5
HAVA ÇIKIŞ HIZI (m / s)	1,05
ALÇAK BASINÇ (bar)	2,4
YÜKSEK BASINÇ (bar)	11,5
STK	2,54
ITK	3,54
\dot{Q}_B (W)	230,285
\dot{Q}_Y (W)	889,5758
ELEKTRİK TÜKETİMİ (Wh)	310

4.5.5. % 40 Nemli Kumla Yapılan Deneye Ait Veriler

100 kg kuma, kumun % 40'ı kadar, yani 40 lt su ilave edilmek suretiyle kumun bu oranda nemlendirilmesi sağlanarak yapılan bu deneyde 2 saat süreyle her 10 dakikada bir tüm ölçümler kaydedilmiştir. Kaydedilen ölçümlerin son 20 dakikalık değerlerinin ortalaması baz alınmış ve deneye ait hesaplamalar 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 nolu eşitliklerden yararlanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait kaydedilen ölçümler ve hesaplamalar doğrultusunda elde edilen veriler şöyledir;

Çizelge 4.5. % 40 nemli kum deneyine ait sayısal veriler tablosu.

TOPRAĞIN TÜRÜ	KUM
TOPRAĞIN DURUMU (%)	40 NEMLİ
TOPRAĞIN SICAKLIĞI (°C)	24,9
ORTAM SICAKLIĞI (°C)	28,05
SU GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	17,3
SU ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	16,85
KOMP. GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	11,45
KOMP. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	80,15
KOND. ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	45,7
HAVA ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	42,6
HAVA ÇIKIŞ HIZI (m / s)	1,05
ALÇAK BASINÇ (bar)	2,4
YÜKSEK BASINÇ (bar)	11,5
STK	2,54
ITK	3,54
\dot{Q}_B (W)	272,155
\dot{Q}_Y (W)	921,2333
ELEKTRİK TÜKETİMİ (Wh)	303

4.6. DENEYSEL SONUÇLARIN HATA ANALİZİ

4.6.1. Deneysel Hata Tipleri ve Nedenleri

Deneysel bir çalışmada elde edilen sonuçların geçerliliğinin gösterilmesi, yapılan deneylerden elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, deneylerden elde edilen sonuçların belirli bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Bu analizler bazen çok kolay olmasına rağmen, bazen de sonuçların temel fizik kurallarına uymasını sağlayabilmek için çok karmaşık olabilmektedir. Deneylerde yapılan ölçümlerin hassasiyeti incelenerek, ölçümlerde yapılan ve yapılabilecek hatalar analiz edilebilir.

Deneysel hataların bazıları rastgele karakterde olurken, bazıları da deneyi yapan kişinin dikkatsizliği nedeni ile ortaya çıkan ve çoğunlukla normal dağılımdan aşırı farklılıklar gösteren karakterde olabilir.

Genel olarak deneysel hatalar üç grupta toplanabilir. Bunlardan en önemlisi dikkatsizlik ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalardır. İkinci grup hatalar, sabit ve sistematik olarak adlandırılan hatalar olup, genelde tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinmeyen hatalardır. Üçüncü grup hatalar ise, rastgele hatalar olup, deneyi yapan kişinin değişmesinden, dikkatlerin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, cihazların ısınmasıyla ortaya çıkan elektronik ölçme aletlerindeki salınımlardan veya ölçme aletlerindeki histerizis olaylardan kaynaklanan hatalardır.

Pratikte özellikle sistematik hataların tespiti için bazı teorik modeller geliştirilmiştir. Belirli sayıda deneye ait hata oranları, geliştirilen hata analiz modelleriyle tespit edilebilir. Bunlardan en çok kullanılan bir tanesi akılcı yaklaşım (cooen sense basis), diğeri ise belirsizlik analizi (uncertanity analysis) yöntemleridir. Akılcı yaklaşım yönteminde, ölçme sisteminde bulunan bütün aletlerin aynı anda maksimum hatayı yaptığı kabul edilir. Belirsizlik analizinde ise, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük ve bu büyüklüğe etki eden bağımsız değişkenlerin neden olduğu hatalar ayrı ayrı belirlenmek suretiyle hata analizi yapılmaktadır.

Bu analizin en belirgin özelliği, en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesidir. En büyük hataya neden olan değişken yanında diğer değişkenler ihmal edilerek, inceleme bu hatayı yapan cihaz üzerine yoğunlaştırılmak suretiyle hata oranı azaltılabilir.

4.6.2. Sıcaklık Ölçümü Hata Analizi

DeneYlerde buharlaştırıcı sıcaklık değerleri °C cinsinden ölçülmüştür. -50 ile +110 °C aralığında ölçüm yapabilen termometrenin hassasiyeti $\pm\% 1$ °C'dir. Ölçüme başlamadan önce termometre probu, 0 °C buz banyosunda kalibre edilerek doğru ölçüm yapıp yapmadığı kontrol edilmiştir.

Sıcaklık ölçümlerinde yapılan hataların analizinde, akılcı yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. DeneYlerde, 14 ile 85 °C arasında değişen sıcaklık değerleri ölçülmüş olup, $2 \pm \% 1$ °C ve $40 \pm \% 1$ °C değerlerindeki maksimum ve minimum hatalar bulunmuştur. Buna göre, 2 °C' de yapılan hata $\pm 0,02$ °C, termometreden hatalı olarak okunabilecek maksimum sıcaklık değerı 20,02 °C, minimum sıcaklık değerı ise 19,98 °C olacaktır. Akılcı yaklaşım yönteminin kullanılmasıyla sıcaklık ölçümlerinde yapılan hata oranı % 1 olarak bulunmuştur.

4.6.3. Enerji Tüketimi Ölçümü Hata Analizi

DeneY setinin enerji tüketimi Makel marka 1 fazlı 2 telli elektronik elektrik sayacı yardımıyla yapıldı. Elektrik sayacının enerji ölçüm hassasiyeti $\pm \% 3$ Wh olarak katalog datalarından belirlenmiştir. Elektrik saatiyle ölçülen en yüksek değer 1518 Wh en küçük değer olarak 1318 Wh'tir. Akılcı yöntemi kullanarak hata analizi yapacak olursak; $1518 \pm \% 3 = 1472,46$ ve $1563,54$ değerleri, $1318 \pm \% 3 = 1278,46$ ve $1357,54$ değerleri elde edilir.

4.6.4. Zaman Ölçümü Hata Analizi

Yapılan deneyler sırasında zaman değerleri dijital bir saat yardımıyla ölçülmüştür. Ölçülen zaman değerleri deney setinin enerji tüketiminde ve çalışma sürelerinin belirlenmesinde kullanıldığı için önem arz etmektedir. Ortaya çıkabilecek hatalar; zaman ölçerin titreşiminden kaynaklanan hatalar \pm % 0,0003 dakika, sıcaklık değerlerinin alınmasında yapılabilecek ortalama hata \pm % 0,10 dakika şeklinde sıralanabilir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

TKIP'larında toprak neminin ısı pompasının enerji tüketimine etkisini incelediğimiz ve bu doğrultuda yapmış olduğumuz deneylerden elde edilen verilere göre; iki saatlik çalışma diliminin sonunda toprağın nem oranı arttıkça sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Her deney için toprağın farklı nem oranlarındaki ortalama sıcaklık değerleri Çizelge 5.1.'de görülmektedir.

Yaptığımız literatür araştırmalarına göre; toprağın termofiziksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, nemin toprak sıcaklığını ve sıcaklık değişimlerini etkileyip, buharlaşmanın artmasına neden olduğu ve bu nedenle toprak yüzeyi ne kadar nemli olursa buharlaşmanında o kadar fazla olacağı belirtilmiştir [9].

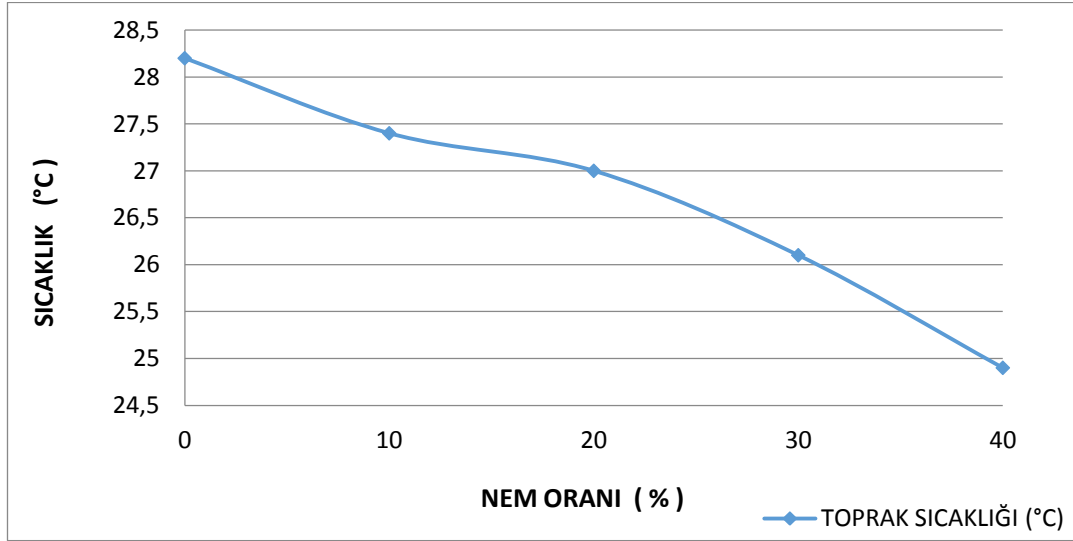
Yapılan bir başka çalışmada ise, nemin ısı iletiminde etkili bir faktör olduğu ve nem miktarının artması ile toprakların ısı iletiminin arttığı belirtilmiştir. Toprağın ıslanmaya başlamasıyla birlikte su taneler arasındaki dokunma alanını arttırdığından iletkenliği arttırmıştır [9].

Toprakların ısısal özelliklerinin belirlenmesi için yapılan diğer bir çalışmada ise, termal iletkenliğin sabit nem içeriğinde kuru hacim ağırlığının artmasıyla azalma gösterdiği, sabit kuru hacim ağırlığında ise, nem miktarının artmasıyla artış gösterdiği ve termal iletkenliğin kumlu topraklarda en yüksek değerde olduğu tespit edilmiştir. [8].

Çizelge 5.1. Nem oranına bağlı toprak sıcaklıkları.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	TOPRAK SICAKLIĞI (°C)
0	28,2
10	27,4
20	27
30	26,1
40	24,9

Toprağın nem oranına bağlı sıcaklık değişim grafiği Şekil 5.1.'de görülmektedir.



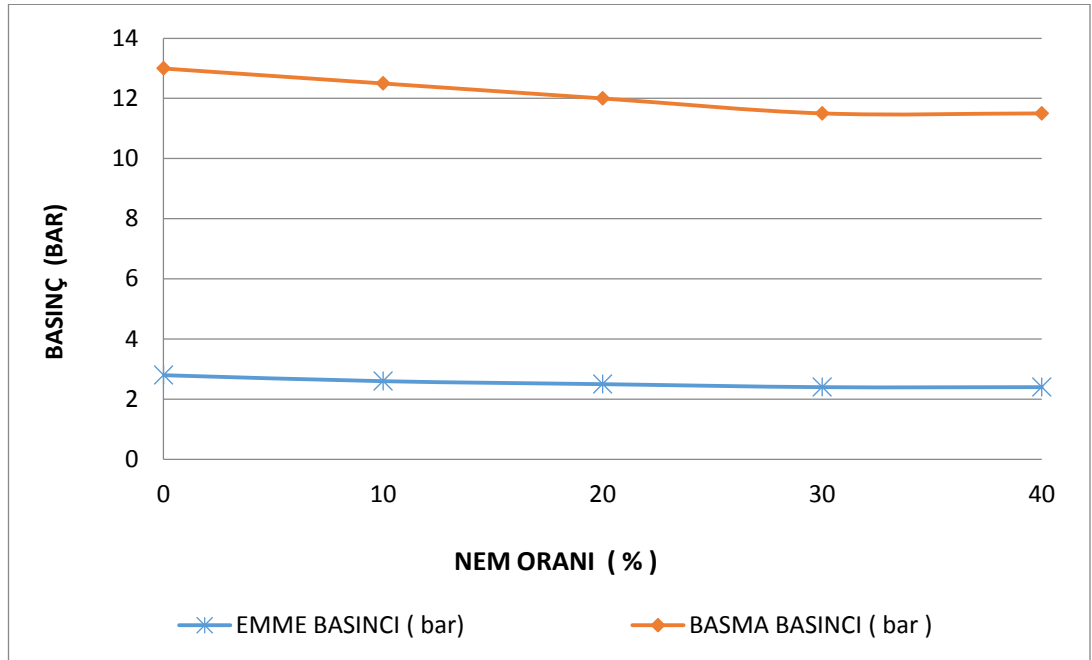
Şekil 5.1. Toprağın nem oranına bağlı toprak sıcaklığı değişimi.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada, kumun nem oranının artmasıyla birlikte buharlaşma daha çok gerçekleşmiş ve kuru toprağa göre nemli toprakta ısı iletkenliği daha fazla oluşmuştur. Isı iletkenliğinin artmasından dolayı soğutucu akışkana daha fazla ısı transferi gerçekleşmiş olup, sistem daha düşük yoğuşma basıncında ve buharlaşma basıncında çalışmaya başlamıştır. Yani; Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi nem oranı arttıkça sistem basınçları düşüş eğilimi göstermiştir.

Çizelge 5.2. Nem oranına bağlı TKIP sistem basınçları.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	EMME BASINCI (bar)	BASMA BASINCI (bar)
0	2,8	13
10	2,6	12,5
20	2,5	12
30	2,4	11,5
40	2,4	11,5

Toprağın nem oranına bağlı basınç değişim grafiği Şekil 5.2.'de görülmektedir.



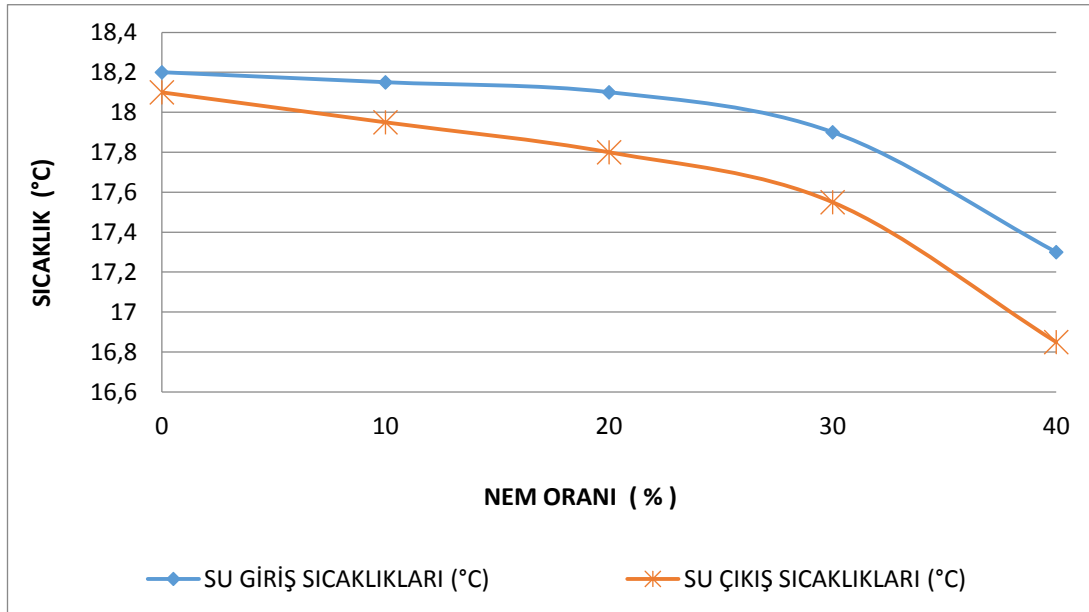
Şekil 5.2. Toprağın nem oranına bağlı basınç değişimi.

Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi en düşük sıcaklık farkı $0,1^{\circ}\text{C}$ ile kumun % 0 nemli olduğu durumda gerçekleşmiş, en fazla sıcaklık farkı ise $0,45^{\circ}\text{C}$ ile kumun % 40 nemli olduğu durumda gerçekleşmiştir. Bunun nedeni; artan nem oranına bağlı olarak meydana gelen ısı iletkenliğinin artması sonucu nemli topraktan soğutucu akışkana daha fazla ısı transferi gerçekleşmiş olmasıdır.

Çizelge 5.3. Nem oranına bağlı eşanjöre su giriş ve çıkış sıcaklıkları.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	SU GİRİŞ SICAKLIKLARI (°C)	SU ÇIKIŞ SICAKLIKLARI (°C)
0	18,2	18,1
10	18,15	17,95
20	18,1	17,8
30	17,9	17,55
40	17,3	16,85

Toprağın nem oranına bağlı eşanjöre su giriş ve çıkış sıcaklığı değişim grafiği Şekil 5.3.'de görülmektedir.



Şekil 5.3. Toprağın nem oranına bağlı eşanjöre su giriş ve çıkış sıcaklığı değişimi.

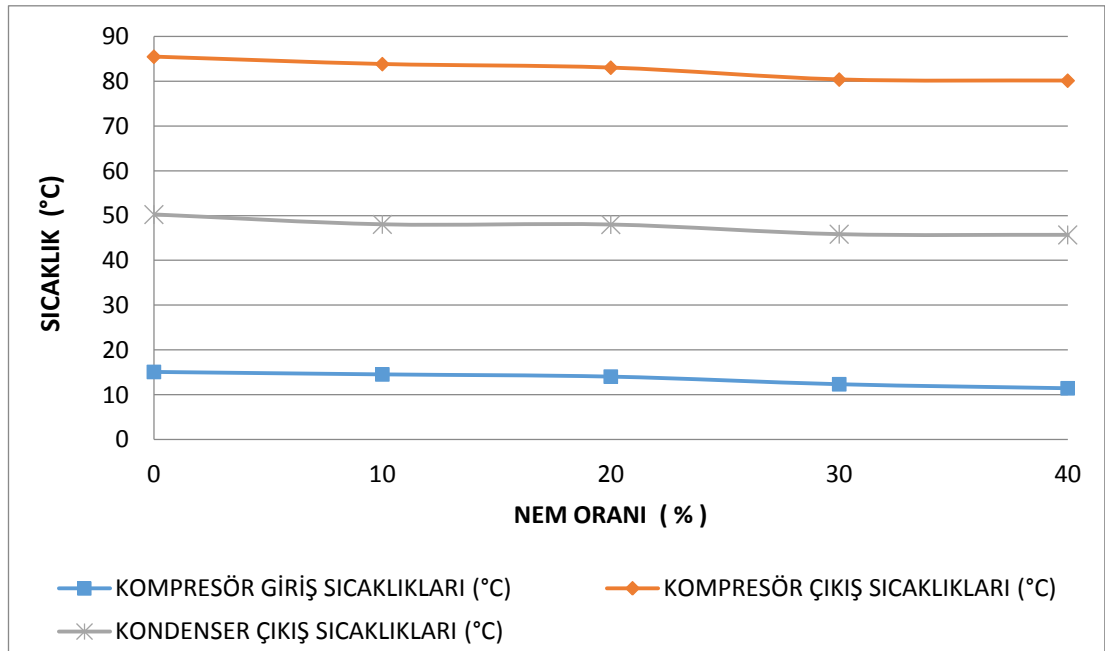
Nem oranının artışına bağlı olarak buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıklarında azalma meydana gelmiştir. % 0 nemli kumda kompresör giriş sıcaklığı 15,1 °C, kompresör çıkış sıcaklığı ise 85,5 °C iken % 40 nemli kumda kompresör giriş sıcaklığı 11,45 °C, kompresör çıkış sıcaklığı ise 80,15 °C'ye düşmüş ve ayrıca kondenser çıkış sıcaklıkları da % 0 nemli kumda 50,25 °C iken % 40 nemli kumda 45,7 °C'ye kadar düşmüştür. Çizelge 5.4'de görüldüğü gibi buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı sıcaklıklarında düşüş eğilimi görülmesinin sebebi artan nem oranıyla birlikte ısı iletkenliğinde artmış ve soğutucu akışkana daha fazla ısı transferi gerçekleşmiştir.

Böylece evaporatöre aktarılan ısının artması sonucu evaporatör kapasitesi ve dolayısıyla yoğuşturucu kapasitesi artmış ve kompresörün harcadığı enerji aynı olduğu için sistemin STK değeri yükselmiş ve buna bağlı olarak da sistemin ITK değeri de yükselmiştir.

Çizelge 5.4. Nem oranına bağlı kompresör ve kondenser giriş ve çıkış sıcaklıkları.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	KOMPRESÖR GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	KOMPRESÖR ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)	KONDENSER ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)
0	15,1	85,5	50,25
10	14,55	83,85	48,05
20	14,05	83,05	48
30	12,35	80,4	45,85
40	11,45	80,15	45,7

Toprağın nem oranına bağlı kompresör ve kondenser giriş ve çıkış sıcaklıklarının değişim grafiği Şekil 5.4.'de görülmektedir.



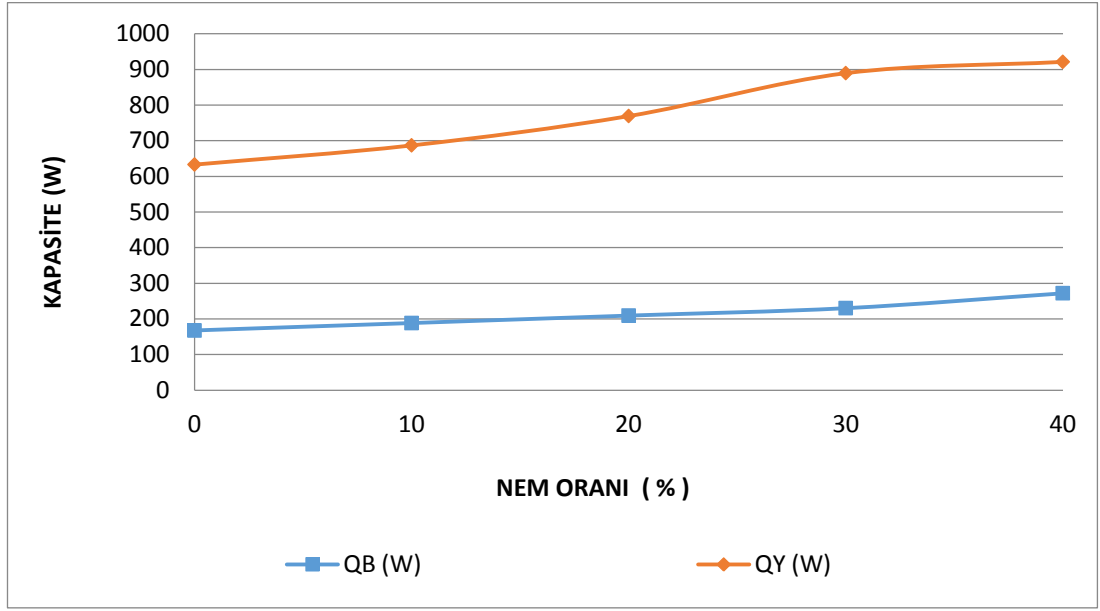
Şekil 5.4. Toprağın nem oranına bağlı kompresör ve kondenser giriş ve çıkış sıcaklık değişimi.

Yapılan deneyler sonucunda soğutucu akışkanın ısı kaynağı olarak topraktan çektiği ısı ve ortama verdiği ısı 4.3 ve 4.4 nolu eşitliklerden hesaplanmış ve hesaplamalar sonucunda buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kapasitelerinin artan nem oranına bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeni; ısı iletkenliğinin artması sonucu soğutucu akışkana daha fazla ısı transferinin gerçekleşmesidir ve buna bağlı olarak sistemin daha düşük buharlaşma ve yoğuşma basıncında çalışarak buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kapasitelerinin artış göstermesidir. Çizelge 5.5 ve Şekil 5.5 birlikte incelendiğinde, \dot{Q}_B (167,48 W) ve \dot{Q}_Y (633,15 W) olmak üzere kumun % 0 nemli durumunda en düşük, \dot{Q}_B (272,155 W) ve \dot{Q}_Y (921,2333 W) olmak üzere kumun % 40 nemli durumunda ise en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 5.5. Toprağın nem oranına bağlı \dot{Q}_B ve \dot{Q}_Y kapasite değerleri.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	\dot{Q}_B (W)	\dot{Q}_Y (W)
0	167,48	633,15
10	188,415	686,9678
20	209,35	769,2773
30	230,285	889,5758
40	272,155	921,2333

Toprağın nem oranına bağlı \dot{Q}_B ve \dot{Q}_Y kapasite değişim grafiği Şekil 5.5'de görülmektedir.



Şekil 5.5. Toprağın nem oranına bağlı \dot{Q}_B ve \dot{Q}_Y kapasite değişimi.

Yine yapılan deneyler sonucunda sistemin soğutma ve ısıtma tesir katsayıları 4.1 ve 4.2 nolu eşitliklerden hesaplanmış ve hesaplamalar sonucunda soğutma ve ısıtma tesir katsayılarının artan nem oranına bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. Artan nem oranıyla birlikte ısı iletkenliğide artmış ve soğutucu akışkana daha fazla ısı transferi gerçekleşmiştir. Böylece evaporatör kapasitesi artmış ve STK değeri yükselmiş olup buna bağlı olarak kondenser kapasitesi de artmış ve dolayısıyla sistemin ITK değeri de yükselmiştir. Çizelge 5.6 ve Şekil 5.6 birlikte incelendiğinde en düşük STK ve ITK değerleri kumun % 0 nemli durumunda kaydedilmiştir (STK, 2,37 - ITK, 3,37). Ayrıca soğutma ve ısıtma tesir katsayıları artan nem oranına bağlı olarak artış göstermiş ve en yüksek STK ve ITK değerleri kumun % 30 ve % 40 nemli durumlarında (STK, 2,54 - ITK, 3,54) olarak kaydedilmiş ve kumun % 30 ve % 40 nemli durumlarında bu değerlerin eşitlendiği görülmüştür.

Yapılan bir çalışmada üç farklı toprak türü (kum, alüvyonlu toprak ve alüvyonlu killi toprak) için beş değişik doyma derecesinde (% 0, % 12,5, % 25, % 50, ve % 100) bilgisayarda simülasyon yapılmış ve TKIP performansının büyük ölçüde toprağın nem içeriğine ve toprak türüne bağlı olduğu, topraktaki nem azalışının TKIP'nin performansını düşürdüğü, bu durumda toprak nem içeriğinin mümkün olduğunca kuru toprak şartlarının üzerinde tutulması gerektiği, toprağın nem doygunluğu % 25'in üzerine çıktığında TKIP'nin performansının büyük oranda iyileştiği, doygunluğun % 50'nin üzerine çıkması durumunda ise TKIP'nin performansının etkilenmediği görülmüştür [25].

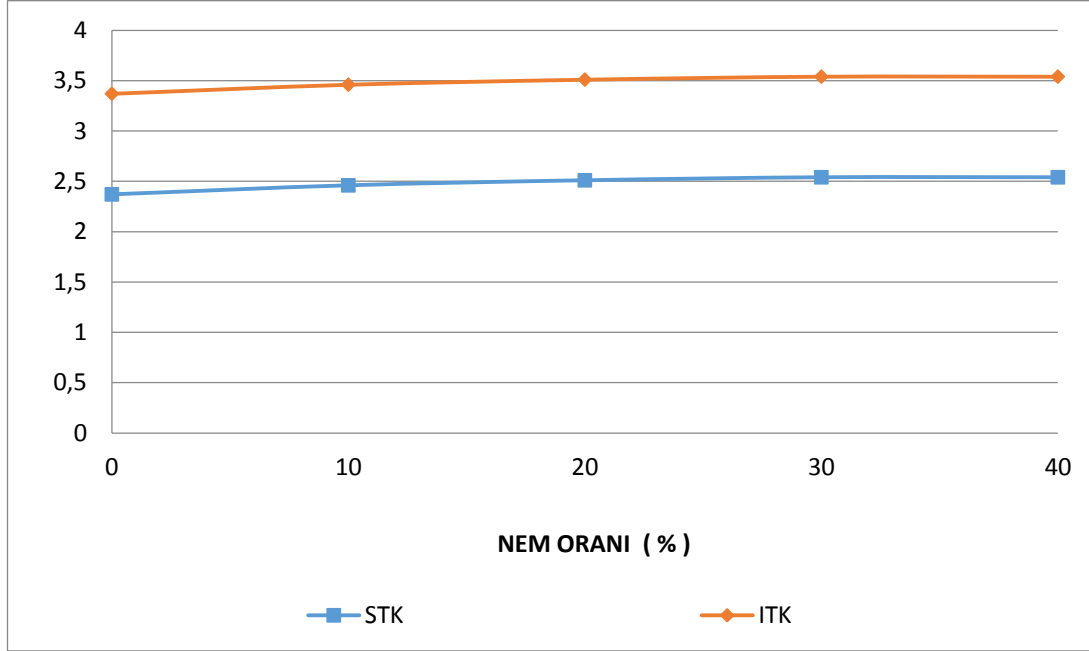
Yapılan bir başka çalışmada ise Patten, kuru toprakların nemlendirilmesi ile ısı iletkenliğinin neme bağlı olarak lineer bir fonksiyon haline geldiğini belirlemiştir. Bu durum suyun toprak partiküllerinin nemlendirilmesi sonucunda birbirleriyle bağlantı sağlaması ve suyun havadan daha iyi bir iletken olmasıyla açıklanmaktadır. Toprağa ilave edilen su belirli bir yüzdenin üzerinde olduğunda (tarla kapasitesi) ısı iletkenliği daha yavaş artmaktadır. Bu etki, suyun yüksek düzeyde ısı kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [6].

Yaptığımız bu çalışmada göstermektedir ki kumun nem doygunluğunun artmasıyla birlikte sistem performansı büyük oranda iyileşmiş ve % 40 nem doygunluğunda bu değerler eşitlenmiştir. Çizelge 5.6 ve Şekil 5.6 birlikte incelendiğinde STK ve ITK değerlerinin kumun % 0 nemli durumunda (STK; 2,37 - ITK; 3,37) olmak üzere en düşük değerlerde olduğu ve kumun % 30 ile % 40 nemli durumunda (STK; 2,54 - ITK; 3,54) olmak üzere en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.6. Toprağın nem oranına bağlı STK ve ITK değerleri.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	STK	ITK
0	2,37	3,37
10	2,46	3,46
20	2,51	3,51
30	2,54	3,54
40	2,54	3,54

Toprağın nem oranına bağlı STK ve ITK değerleri değişim grafiği Şekil 5.6.'da görülmektedir.



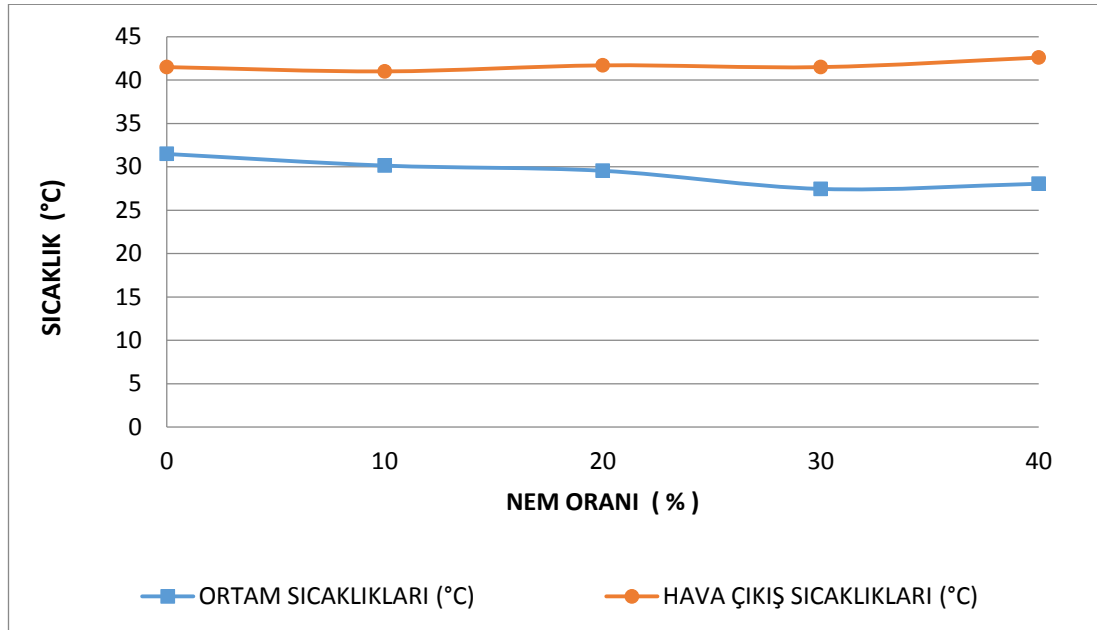
Şekil 5.6. Toprağın nem oranına bağlı STK ve ITK değerleri değişimi.

Deneyle sırasında sistemde yoğuşturucu fanı olarak sabit devirli bir fan kullanılmış ve hava çıkış sıcaklığı ile hava çıkış hızı anemometre ile ölçülmüştür. Hava çıkış hızı bütün deneylerde sabit olup, 1,05 m/s'dir. Ayrıca sistemin hava giriş sıcaklığı ise bir dijital termometre ile ölçülmüştür. Çizelge 5.7 ve Şekil 5.7 incelendiğinde en düşük kondenser hava çıkış sıcaklığı farkının 10 °C ile kumun % 0 nemli durumunda olduğu, en yüksek hava çıkış sıcaklığı farkının ise 14,55 °C ile kumun % 40 nemli durumunda olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; nemin artmasıyla birlikte evaporatör kapasitesinin artması ve buna bağlı olarak da kondenser kapasitesinin artmasıdır. Kondenser kapasitesinin artması sonucu hava çıkış sıcaklığıda artmıştır.

Çizelge 5.7. Toprağın nem oranına bağlı kondenser hava giriş ve çıkış sıcaklıkları.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	HAVA GİRİŞ SICAKLIĞI (°C)	HAVA ÇIKIŞ SICAKLIĞI (°C)
0	31,5	41,5
10	30,15	41
20	29,55	41,7
30	27,45	41,5
40	28,05	42,6

Toprağın nem oranına bağlı kondenser hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişim grafiği Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7. Toprağın nem oranına bağlı kondenser hava giriş ve çıkış sıcaklık değerleri değişimi.

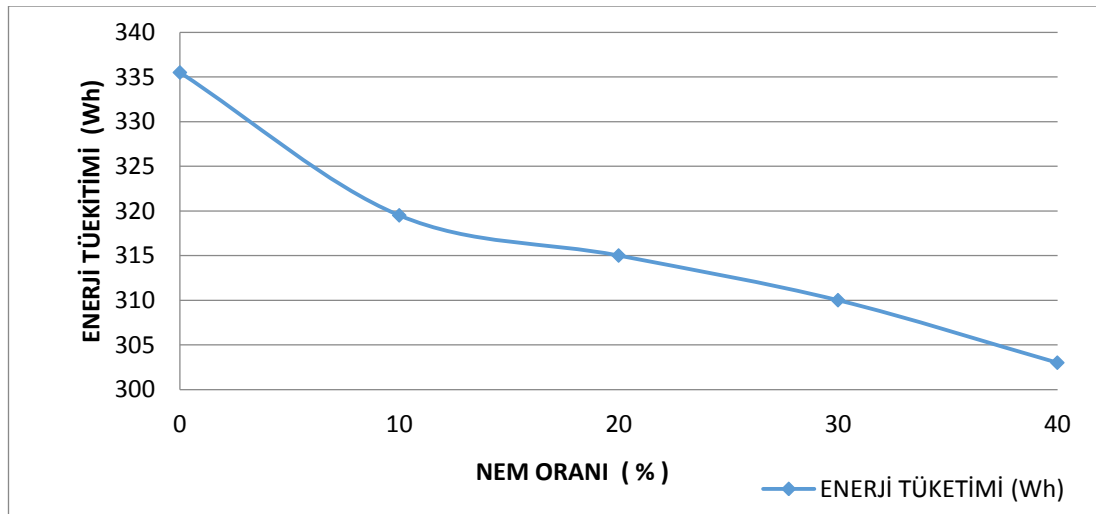
Son olarak kumun artan nem oranına bağlı olarak saatlik enerji tüketimi hesaplanmış ve artan nem oranına paralel olarak sistemin enerji tüketiminin azalan yönde eğilim gösterdiği görülmüştür. Çizelge 5.8 ve Şekil 5.8 birlikte incelendiğinde, sistemin en çok, kumun % 0 nemli olduğu durumda enerji (335,5 Wh) tükettiği görülmektedir.

Buna sebep olarak kompresörün soğutucu akışkanı sıkıştırmak için zorlanması gösterilebilir. Kumun artan nem oranına paralel olarak enerji tüketiminin % 10 nem doygunluğunda 319,5 Wh, % 20 nem doygunluğunda 315 Wh, % 30 nem doygunluğunda 310 Wh ve % 40 nem doygunluğunda ise 303 Wh olmak üzere azalan yönde olduğu görülmektedir. Enerji tüketiminin düşüş eğilimi göstermesinin nedeni, nem oranının artması sonucu ısı iletkenliğinin artarak soğutucu akışkana daha fazla ısı transferinin gerçekleşmesiyle sistemin emme ve basma basınçlarının düşerek kompresörün daha düşük yoğunlaşma basıncında çalışması ve soğutucu akışkanı sıkıştırmak için zorlanmamış olması ve böylece daha az enerji harcayarak sistemin enerji tüketiminin azalmış olması olarak açıklanabilir.

Çizelge 5.8. Toprağın nem oranına bağlı enerji tüketimi.

TOPRAĞIN NEM ORANI (%)	ENERJİ TÜKETİMİ (Wh)
0	335,5
10	319,5
20	315
30	310
40	303

Toprağın nem oranına bağlı enerji tüketimi değişim grafiği Şekil 5.8.'de görülmektedir.



Şekil 5.8. Toprağın nem oranına bağlı enerji tüketimi değişimi.

Sonuç olarak, kumun nem oranı arttıkça buharlaşmadan dolayı ısı iletkenliği artmış ve TKIP sisteminin emme ve basma basınçlarını düşürerek kompresörün daha düşük yoğunlaştırma basıncında sıkıştırma yapmasını sağlamış ve böylece daha düşük yoğunlaştırma sıcaklıkları elde edilmiştir. Ayrıca artan nem oranıyla birlikte ısı iletkenliğinin artması soğutucu akışkana daha fazla ısı transferi gerçekleşmesini sağlamış böylece sistemin buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı kapasiteleri ile STK ve ITK'larında artış gözlenmiş ve nem oranının artmasıyla beraber TKIP performansının giderek iyileştiği, % 40 nem doygunluğunda bu değerlerin eşitlenerek değişmediği ve bütün bunlara bağlı olarak da sistemin enerji tüketiminin azalan yönde eğilim gösterdiği görülmüştür.

BÖLÜM 6

TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Enerji insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamada gereksinim duyduğu en önemli olgudur ve ekonomik kalkınmanın lokomotifidir. Neredeyse bütün toplumların enerji sorunu ile karşı karşıya kalması göz önüne alındığında, enerji konusu önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte, enerji sadece insanların temel ihtiyaçlarını karşılamada değil, uluslararası politikalara yön veren etkili bir güç olmasıyla göze çarpılmaktadır. Geçmişten günümüze toplumların temel enerji kaynakları petrol, doğalgaz, kömür ve elektrik enerjisi olmuştur. Nüfusun giderek artması, teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve kalkınmanın gereksinimlerinden dolayı her geçen gün insanoğlunun enerji ihtiyacı artmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacına karşın, üretilen enerji yeterli olmamaktadır ve bununla birlikte, fosil yakıtların neden olduğu çevre kirliliği göz ardı edilemez durumdadır.

Çevre dostu ya da yeşil enerji türleri olarak adlandırdığımız enerji kaynakları geleceğin enerji kaynaklarıdır. Çevre koruma ölçütleri içerisinde ve bunlarla gelen yaptırımlar, günümüzde ulusal sınırları aşmakta ve uluslararası bir boyut kazanmaktadır. Bu nedenle, uluslararası ortak çözümlere etkin katılım sağlanmalı, yenilenebilir, çevre dostu enerji kaynakları desteklenmeli ve geliştirilmelidir. Enerji sektöründe teknolojik yenilik, çok boyutludur. Buna göre: eski, hantal ve verimsiz enerji teknolojileri, ilke olarak kullanılmamalı, maliyet düşürücü teknolojilere öncelik verilmelidir. Ayrıca, ülkeler eskimiş enerji sistemlerinin tutsağı olmamalı, yeni yenilenebilir ve temiz enerji teknolojilerine yatırım yaparak, bu alandaki az gelişmişliklerini, çok büyük bir ekonomik ve toplumsal gelişme atılımına dönüştürmelidir.

Enerji verimliliği düşüncesinin çıkış noktasında, üretimi kısımadan ve kullanıcıların yaşam kalitesini düşürmeden enerji tüketiminin azaltılması amacı yatar. Enerji tasarrufunda, bu amaçla atılan adımlardan biri olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, bir yandan enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanımına çalışılırken, bir yandan da enerjiyi verimli kullanmanın yolları geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Toprak kaynaklı ısı pompaları birincil enerji kaynakları tüketiminin düşürülmesi ve böylece sera gazları ve diğer kirletici emisyon gazlarının azaltılması konusunda sahip oldukları potansiyel ile dünyada giderek artan bir ilgi toplamaktadır.

Günümüzde ısı pompalarında ısı kaynağı olarak en yaygın kullanım havadır. Hava sıcaklığının kararlı yapıda olmamasından dolayı sistemlerin performans katsayıları düşüktür. Havanın sıcaklığının sürekli değişmesine karşın toprak sıcaklığının neredeyse sabit kalması ve toprağın 1 m altında ısıtma mevsimi boyunca sıcaklık değişiminin çok az olması toprağın çok stabil bir ısı kaynağı olduğunu ve dolayısıyla toprağın iyi bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. Ayrıca toprak her yerde bulunan bir ısı kaynağıdır ve bu nedenle karasal iklimler için toprağın iyi bir kaynak olduğu görülmektedir. Toprağın stabil bir kaynak olmasından dolayı TKIP'nin performans katsayısı kararlı bir yapıdadır ve dış hava sıcaklığından fazla etkilenmez. Bu nedenle TKIP sistemleri diğer konvansiyonel ısı pompası sistemlerinden daha verimlidir.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada TKIP'da toprak neminin ısı pompasının enerji tüketimine etkilerini incelemek amacıyla % 0 ile % 40 nemli toprak durumlarında deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde ettiğimiz verilere göre; toprağın % 0 nemli durumuna kıyasla artan nem oranına bağlı olarak TKIP sisteminin performansının giderek iyileştiği ve belirgin bir şekilde enerji tüketiminde düşüş olduğu görülmüştür.

Bundan sonra bu alanda yapılacak diğer çalışmalarda farklı toprak çeşitleri kullanarak TKIP'nın enerji tüketimi üzerine etkileri incelenebilir ve sonuçlar yapmış olduğumuz bu çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılabilir.

Ayrıca, dünyada bazı ülkelerde TKIP'ları uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise yıllarda artan bir ilgiye rağmen yeterli seviyede değildir. Bunun sebebi sistemin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, nitelikli tasarım ve müteahhit firmalarının azlığı ve yaygın olmayan kullanım nedeniyle gelişmiş, esnek, kullanıcı dostu kontrol ve izleme sistemlerinin uygulanamayışı gibi sebepleri vardır. Ülkemizde TKIP'larına ilginin ve kullanımının arttırılması için eğitim, ar - ge konusunda üniversite - sanayi işbirliğine gidilmeli ve devlet desteği ile kullanıcılara ve müteşebbislere mali desteklerde bulunulmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Başkal, A., “Duvardan ısıtma ve soğutmalı toprak kaynaklı ısı pompasının performansının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2011).
2. Kural, A. K., “Malatya ilinde bir binada toprak kaynaklı ısı pompası uygulamasının merkezi klima ve doğalgazlı sistemlerle karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, (2012).
3. Diener, E., “Heat and Mass Transfer Characteristics of Mushroom Casing and Horticultural Soils and Soil Mixes”. *The Penn. State Uni. Ph D. Thesis*, (1974).
4. de Vries, D.A., “Thermal Properties of Soils In Physics of Plant Environment”, W.R.Van Wijk (ed). *North Holland Publishing. Co.*, Amsterdam, 210-235, (1963).
5. Campbell, G.S., Soil Physics With Basic. *Transport Models for Soil Plant System*. Elsevier, NewYork, (1985).
6. Patent, H.E., “Heat transference in soils”. *Bulletin 5.Unites States Department of Agriculture Bureau of Soils*, (1909).
7. Smith, W.O. and Byers, H.G., “The thermal conductivity of certain of great soil groups”, *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.*, 3: 13-19, (1938).
8. Kertsen, M.S., “Thermal properties of soils”, *Bulletin 28. Universty of Minnesota Agricultural Experimental Station*, 1-227, (1949).
9. Kaptan, H., “Orman yangınlarının topraktaki ısı iletimi ve nem miktarına etkisi”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bil. Der.*, (2012).
10. Salah El-Din, M.M., 1999, “On the heat flow into the ground”, *Renewable Energy*, 18: 473 -90, (1999).
11. Kohnke, H. and Nakshabandi, G., “Heat transport in soils”, *Transactions of 8th International Congress of Soil Sciences*. Buchrasnet romania, 185-191, (1964).
12. Gardner, M.R. Hanks, R.J., “Evaluation of the soil by measurements of heat flux”, *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.*, 30: 425-428, (1966).
13. Pala, M., “Toprak sıcaklığı ve neminin toprak havasının özelliklerine etkisi”, *Orta Ana. Böl. Zirai Araş. Enst.* Ankara, (1979).

14. Hanks, R.J. Ascroft, G.L., "Applied of Physics", *Advanced Series in Agriculture Sciences*, 8. *Springer - Verlag, N.Y.*, USA, (1980).
15. Catan, M.A. and Baxter, V.D., "An optimized ground coupled heat pump system design for Northern climate applications", *ASHRAE Transactions*, (1985).
16. Hughes, P.J., Looms, L., O'neil, R.A. and Rizzuto, J., "Results of the Residential Earth coupled Heat Pump Demonstration in Upstate New York", *ASHRAE Transactions*, part 2b, (1985).
17. Franck, P. and Berntsson, T., "Ground coupled heat pumps with low temperature heat storage: some Swedish experiences", *ASHRAE Transactions*, (1985).
18. Kavanaugh, S., "Development of design tools for ground - source heat pump piping", *ASHRAE Transactions*, (1998).
19. Martin, S.D., "A design and economic sensitivity study of single - pipe horizontal ground-coupled heat pump systems", *ASHRAE Transactions*, (1990).
20. Mei, V.C., "Experimental study of direct - expansion ground coil heat exchangers", *ASHRAE Transactions*, (1990).
21. Safemazandarani, P., Edwards, J.A., Johnson, R.R., and Mohammad - Zadeh, Y., "Mathematical modeling of a direct expansion ground coupled heat pump system", *ASHRAE Transactions*, (1990).
22. Sulatisky, M.T. and Van Der Kamp, G., "Ground-source heat pumps in the Canadian Prairies", *ASHRAE Transactions*, (1991).
23. Kangas, M.T., "Thermohydraulic analysis of ground as a heat source for heat pumps using vertical pipes", *Transactions of the ASME*, Journal of Energy Resources Technology, (1996).
24. Petit, P.J. and Meyer, J.P., "Economic potential of vertical ground - source heat pumps compared to air - source air conditioners in South Africa", *Energy J.*, 137-43, (1998).
25. Leong, W.H., Tarnawski, V.R. and Aittomaki, A., "Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance", *Int. J. Refrig.*, 21, 8, 595-606, (1998).
26. Den Braven, K.R., "Antifreeze acceptability for ground-coupled heat pumps ground loops in the United States", *ASHRAE Transactions*, (1998).
27. Spilker, E.H., "Ground coupled heat pump loop design usign thermal conductivity testing and the effect of different backfill material on vertical bore length", *ASHRAE Transactions*, 775-79, (1998).

28. Piechowski, M., "Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: theoretical development", *International Journal of Energy Research*, 23, 571-88, (1999).
29. Bernier, M.A., "Ground-coupled heat pump system simulation", *ASHRAE Transactions*, 605-16, (2001).
30. Yavuzturk, C., "Field validation of a short time step model for vertical groundloop heat exchangers", *ASHRAE Transactions*, 617-25, (2001).
31. Parent, M., "A simplified tool for assessing the feasibility of ground-source heat pump projects", *ASHRAE Transactions*, 120-129, (2001).
32. Bi, Y., Chen, L., and Wu, C., "Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification", *Applied Thermal Engineering*, 22, 2, 89-183, (2002).
33. Doherty, P.S., Al - Huthaili, S., Riffat, S.B., and Abodahab N., "Ground source heat pump description and preliminary results of the Eco House system", *Applied Thermal Engineering*, 24, 17-18, 2627-41, (2004).
34. Nagano, K., Katsura, T. and Takeda, S., "Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system", *Applied Thermal Engineering*, 26, 14-15, 1578-92, (2006).
35. Florides, G. and Kalogirou, S., "First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus", *Applied Thermal Engineering*, 28, 2-3, 157-63, (2008).
36. Hepbaşı, A., ve Hancıoğlu, E., "Toprak Kaynaklı (Jeotermal) Isı Pompalarının Tasarımı, Testi, Fizibilitesi", *V. Ulusal Tesisat Mühendisleri Kongresi ve Sergisi*, İzmir, Teskon, 521-564., (2001).
37. Ataman, H., "Toprak kaynaklı bir ısı pompası tesisinin tasarımı ve optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1991).
38. Esen, H., İnallı, M. and Esen, M., "Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system", *Building and Environment*, 42, 3, 1126-34, (2007).
39. Greçişev S.E., Çistotinov L.V., Şur Yu.L., *Kriogen fiziksel jeolojik süreçlerin modellenmesinin temelleri*, Moskova, Nauka, (1984).
40. Ross Yu.K., *Bitki örtülü toprakların radyasyon rejimi ve dinamiği*, Leningrad, Gidrometeoizdat, (1975).
41. Gerayzade A.P., *Toprak bitki atmosfer sisteminde enerji döngüsü*, Bakü, Elm, (1989).

42. Ekberli İ., Gülser C., Özdemir N., “Toprakların termofiziksel özellikleri ve ısısal yayılım katsayısının değerlendirilmesi”, *OMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(2): 85 - 91, (2005).
43. Mamedov R.G., *SSR topraklarının agrofiziksel özellikleri*, Bakü, Elm, 172 – 192, Azerbaycan, (1989).
44. Chudnovskii A.F., *Toprakların Isı Fiziği*, Moskova, Nauka, (1976).
45. İsaçenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S., *Isı iletimi*, Moskova, Energoizdat, 8-24, (1981).
46. Voronin A.D., “Toprak fiziğinin esasları”, İzdatelstvo *Moskovskogo Universiteta*, (1986).
47. Evirgen Y.F., “Karayollarında buzlanmayı engelleyici toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin analizi ve PLC - SCADA ile denetimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).
48. Patlar Ö., “Toprak kaynaklı ısı pompalarında enerji analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
49. Wirth, P.E., “History of the development of heat pumps”, *Schweiz Bauzeits*, Basel, 47-51, (1955).
50. Summer, J.A., “Domestic heat pumps”, *Prism Press*, Dorchester, 27, (1976).
51. Crandall, A.C., “House heating with earth heat pump”, *Electrical World*, New York, 94-95, (1946).
52. Kemler, E.N., “Methods of earth heat recovery for the heat pump”, *Heating and Ventilating*, New York, 69-72, (1947).
53. İnallı, M., “Toprak Altında Depolanan Güneş Enerjisi ile Beslenen Isı Pompalı Bir Konut Isıtma Sisteminin Bilgisayarda Simülasyonu”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1993).
54. Ünlü, K., “Hava ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2005).
55. Bose, J. E., “Design and testing of a solar asisted coils”, *DOE Bildirisi*, Washington, US (1981).

EK AÇIKLAMALAR A.

DENEY SETİNDE ALINAN ÖLÇÜMLERE AİT DENEY FÖYLERİ

Çizelge Ek A.1. 2 saat süreyle % 0 nemli kum deney seti ölçümleri.

	0.dak	10.dak	20.dak	30.dak	40.dak	50.dak	60.dak	70.dak	80.dak	90.dak	100.dak	110.dak	120.dak
$T_{air,i}$ (°C)	30,9	31,1	31,2	31,3	31,4	31,4	31,4	31,5	31,5	31,5	31,6	31,5	31,5
$P_{comp,i}$ (bar)	4,8	2,5	2,6	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
$P_{comp,o}$ (bar)	5	12	12,5	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
T_{soil} (°C)	28,9	28,9	28,9	28,8	28,7	28,5	28,7	28,9	28,5	28,1	28,1	28,2	28,2
$T_{water,i}$ (°C)	29,7	26,1	24,3	22,8	21,7	20,8	20,2	19,7	19,2	18,9	18,6	18,3	18,1
$T_{water,o}$ (°C)	30,4	25,9	23,8	22,6	21,3	20,6	20,1	19,2	19,1	18,6	18,4	18,2	18,0
$T_{comp,i}$ (°C)	30,1	21,5	19,5	19,8	18,1	18,5	17,1	17,1	16,5	16,0	15,8	15,2	15,0
$T_{comp,o}$ (°C)	30,8	68,2	76,8	81,9	84,4	85,9	86,2	86,5	86,8	86,1	85,9	85,5	85,5
$T_{con,o}$ (°C)	31,1	46,5	49,3	50,4	50,5	51,6	51,4	51,1	50,6	50,4	50,2	50,4	50,1
V_{air} (m/s)													1,05
$T_{air,o}$ (°C)													41,5
kWh	14,526	14,585	14,636	14,691	14,747	14,801	14,860	14,914	14,971	15,025	15,075	15,135	15,197

Çizelge Ek A.2. 2 saat süreyle % 10 nemli kum deney seti ölçümleri.

	0.dak	10.dak	20.dak	30.dak	40.dak	50.dak	60.dak	70.dak	80.dak	90.dak	100.dak	110.dak	120.dak
$T_{air,i}$ (°C)	30,9	30,9	30,9	30,8	30,6	30,4	30,3	30,3	30,3	30,2	30,3	30,2	30,1
$P_{comp,i}$ (bar)	4,8	2	2,2	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
$P_{comp,o}$ (bar)	5	10	11	11,5	12	12	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
T_{soil} (°C)	28,8	28,6	28,8	28,6	28,6	28,4	28,2	28,0	28,2	27,8	28,0	27,6	27,2
$T_{water,i}$ (°C)	27,1	24,8	22,6	22,0	21,6	20,9	20,1	19,7	19,2	18,8	18,4	18,2	18,1
$T_{water,o}$ (°C)	27,8	24,4	22,4	21,6	21,1	19,9	19,2	18,9	18,4	18,2	18,1	18,0	17,9
$T_{comp,i}$ (°C)	30,9	18,9	17,5	16,7	15,2	15,4	15,6	15,3	15,4	15,5	14,6	14,6	14,5
$T_{comp,o}$ (°C)	30,5	64,5	72,9	78,1	81,1	82,6	83,2	83,6	83,9	83,9	84,2	84,0	83,7
$T_{con,o}$ (°C)	30,2	45,5	47,2	47,6	47,5	47,7	47,8	48,1	47,6	47,6	48,0	47,9	48,2
V_{air} (m/s)													1,05
$T_{air,o}$ (°C)													41
kWh	15,203	15,254	15,307	15,361	15,412	15,464	15,519	15,573	15,628	15,683	15,737	15,791	15,842

Çizelge Ek A.3. 2 saat süreyle % 20 nemli kum deney seti ölçümleri.

	0.dak	10.dak	20.dak	30.dak	40.dak	50.dak	60.dak	70.dak	80.dak	90.dak	100.dak	110.dak	120.dak
$T_{air,i}$ (°C)	28,3	28,5	28,6	28,7	28,8	29,0	29,1	29,3	29,3	29,3	29,4	29,5	29,6
$P_{comp,i}$ (bar)	4,8	2	2,2	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$P_{comp,o}$ (bar)	5	10	11	11,5	11,5	12	12	12	12	12	12	12	12
T_{soil} (°C)	28,0	27,9	27,7	27,5	27,7	27,7	27,6	27,8	27,9	27,6	27,6	27,1	26,9
$T_{water,i}$ (°C)	26,8	24,2	22,8	21,1	20,3	20,0	19,8	19,7	19,6	19,4	19,1	18,2	18,0
$T_{water,o}$ (°C)	27,5	23,9	22,4	20,7	19,9	19,6	19,5	19,4	19,2	19,1	18,8	17,9	17,7
$T_{comp,i}$ (°C)	28,4	17,4	16,3	16,3	15,5	15,6	15,5	15,3	14,5	14,4	14,6	14,2	13,9
$T_{comp,o}$ (°C)	28,2	61,8	71,6	76,8	79,7	81,3	82,4	82,9	83,1	82,8	83,0	83,1	83,0
$T_{con,o}$ (°C)	28,1	42,6	45,7	46,4	44,9	47,6	48,1	48,2	48,2	48,7	48,7	48,3	47,7
V_{air} (m/s)													1,05
$T_{air,o}$ (°C)													41,7
kWh	15,843	15,885	15,935	15,989	16,040	16,093	16,147	16,201	16,256	16,310	16,365	16,418	16,473

Çizelge Ek A.4. 2 saat süreyle % 30 nemli kum deney seti ölçümleri.

	0.dak	10.dak	20.dak	30.dak	40.dak	50.dak	60.dak	70.dak	80.dak	90.dak	100.dak	110.dak	120.dak
$T_{air,i}$ (°C)	27,4	27,6	27,7	27,7	27,7	27,6	27,6	27,6	27,4	27,5	27,5	27,5	27,4
$P_{comp,i}$ (bar)	4,8	2	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$P_{comp,o}$ (bar)	5	10	11	11	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
T_{soil} (°C)	27,3	27,2	27,4	27,4	27,1	27,1	26,8	26,5	26,7	26,5	26,3	26,2	26,0
$T_{water,i}$ (°C)	26,1	23,1	21,8	21,0	20,4	20,1	19,8	19,5	19,2	18,5	18,3	18,0	17,9
$T_{water,o}$ (°C)	26,7	22,9	21,5	20,7	20,0	19,7	19,4	19,1	18,8	18,0	18,2	17,7	17,4
$T_{comp,i}$ (°C)	27,9	16,5	15,7	15,5	15,3	14,4	14,6	13,4	13,4	13,2	13,2	12,4	12,3
$T_{comp,o}$ (°C)	27,6	62,3	71,7	76,1	78,5	79,6	80,5	80,5	80,9	81,0	80,8	80,5	80,3
$T_{con,o}$ (°C)	26,2	42,3	44,6	45,4	46,0	46,1	46,0	46,0	46,7	46,2	46,7	46,2	45,5
V_{air} (m/s)													1,05
$T_{air,o}$ (°C)													41,5
kWh	16,571	16,620	16,670	16,721	16,773	16,824	16,875	16,931	16,986	17,035	17,090	17,140	17,191

Çizelge Ek A.5. 2 saat süreyle % 40 nemli kum deney seti ölçümleri.

	0.dak	10.dak	20.dak	30.dak	40.dak	50.dak	60.dak	70.dak	80.dak	90.dak	100.dak	110.dak	120.dak
$T_{air,i}$ (°C)	25,9	26,2	26,5	26,8	27,1	27,3	27,6	27,7	27,8	27,8	27,9	28,0	28,1
$P_{comp,i}$ (bar)	4,8	2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$P_{comp,o}$ (bar)	5	10	11	11	11	11	11	11	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
T_{soil} (°C)	26,2	26,3	26,3	26,3	26,1	26,0	25,6	25,8	25,8	25,6	25,1	25,1	24,7
$T_{water,i}$ (°C)	25,2	22,2	20,6	19,7	19,4	19,1	18,7	18,5	18,3	17,8	17,6	17,4	17,2
$T_{water,o}$ (°C)	25,9	21,9	20,3	19,5	19,3	19,0	18,6	18,4	18,2	17,5	17,4	17,1	16,6
$T_{comp,i}$ (°C)	25,2	13,4	13,5	12,1	12,7	12,6	11,6	12,4	12,5	12,3	12,0	11,9	12,0
$T_{comp,o}$ (°C)	26,1	61,0	68,9	73,5	75,9	77,3	78,3	78,9	79,5	79,8	79,9	80,1	80,2
$T_{con,o}$ (°C)	25,3	40,4	42,5	43,9	44,7	44,5	45,6	45,5	46,1	46,5	46,7	46,1	45,3
V_{air} (m/s)													1,05
$T_{air,o}$ (°C)													42,6
kWh	17,418	17,466	17,514	17,564	17,614	17,665	17,714	17,766	17,817	17,871	17,921	17,972	18,024

ÖZGEÇMİŞ

Murat ÖZTÜRK 04.05.1981 yılında Ankara’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamlayarak 2009 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümüne yerleşti ve 2013 yılında iyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında başladığı Yüksek Lisansa devam etmektedir.

ADRES BİLGİSİ

Adres : Barış Mahallesi Serçe Sokak Ümit evler sitesi A Blok, Kat 2, Daire 3
Safranbolu/KARABÜK
Tel : 0 506 700 52 07
E – posta : fen_der80@hotmail.com