

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SIĞ KUYU TOPRAK KAYNAKLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIMINDA
MEVSİMLERE BAĞLI ATMOSFERİK KOŞULLARIN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat Can KOÇAK

Enerji Bilim & Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim & Teknoloji Programı

MART 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SIĞ KUYU TOPRAK KAYNAKLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIMINDA
MEVSİMLERE BAĞLI ATMOSFERİK KOŞULLARIN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ferhat Can KOÇAK
(301191013)**

Enerji Bilim & Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim & Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi Sevan KARABETOĞLU

MART 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**EFFECTS OF SEASONAL ATMOSPHERIC CONDITIONS ON THE
DESIGN OF SHALLOW GROUND-SOURCE HEAT EXCHANGERS**

M.Sc. THESIS

**Ferhat Can KOÇAK
(301191013)**

Department of Energy Science & Technology

Energy Science & Technology Programme

Thesis Advisor: Asst. Prof. Sevan KARABETOĞLU

MARCH 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301191013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ferhat Can KOÇAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SIĞ KUYU TOPRAK KAYNAKLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIMINDA MEVSİMLERE BAĞLI ATMOSFERİK KOŞULLARIN ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Sevan KARABETOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Deniz ULUSARSLAN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zehir Fatih Öztürk
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 04 Mart 2023
Savunma Tarihi : 08 Mart 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana yol gösteren ve destek olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sevan KARABETOĞLU'na ve lisans sürecinde olduğu gibi yüksek lisans aşamasında da hem akademik hem de manevi desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Ece EKMEKÇİ'ye ve dönem arkadaşlarım Bilge Dilara ÇINKILIÇ ve Arda Can ÇINKILIÇ'a teşekkür ederim.

Bununla birlikte her zamanda yanımda olup beni destekleyen arkadaşım Arzu MÜYESSEROĞLU'na teşekkür ederim. Son olarak beni her şart ve koşulda destekleyip bugün olduğum insan olmamı sağlayan annem Fatma KOÇAK ve babam Hikmet KOÇAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2023

Ferhat Can KOÇAK
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Binalarda Enerji Tüketimi ve Çevre Üzerindeki Etkileri	1
1.2 Isı Pompalarının Kullanım Amaçları.....	4
1.3 Tezin Amacı	5
2. ISI POMPASI TEKNOLOJİLERİ, TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARI VE MEVSİMSSEL ETKİLERİN TOPRAK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	7
2.1 Isı Pompası Teknolojileri	7
2.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompaları	9
2.2.1 Yeraltının termo-fiziksel özelliklerinin belirlenmesi	12
2.3 Toprak Kaynaklı Isı Pompaları ve BTES Entegrasyonu	12
2.4 Toprak Sıcaklığına Mevsimsel Değişimin Etkileri	13
3. SIĞ KUYU TOPRAK KAYNAKLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIMI	15
3.1 Model Özellikleri.....	15
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	21
KAYNAKLAR	27
ÖZGEÇMİŞ.....	31



KISALTMALAR

ASHP	: Hava Kaynaklı Isı Pompası
BTES	: Borehole Termal Enerji Depolama
DS	: Değişken Sıcaklık
GSHP	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası
HP	: Isıl Darbe
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Sistemleri
OSS	: Ortalama Sabit Sıcaklık
TID	: Toprak Isı Değiştiricileri
TRT	: Termal Tepki Testi
UWSHP	: Yeraltı Suyu Kaynaklı Isı Pompası
YKIP	: Yer Kaynaklı Isı Pompası
WSHP	: Su Kaynaklı Isı Pompası



SEMBOLLER

A_H	: Evin efektif ısı kayıp yüzeyi
C	: Şarj periyodu
CO_2	: Karbondioksit
D	: Deşarj periyodu
H	: Isı değiştiricisi derinliği
H_G	: Toprak derinliği
N	: Isı değiştiricisi sayısı
Q_C	: Şarj döneminde toprağa verilen enerji
Q_D	: Deşarj döneminde toprağa verilen enerji
Q_D^{WC}	: Şarj prosesi yapılmadan topraktan çekilebilecek enerji
$\dot{Q}$	: Isı transfer oranı
SB	: Bekleme periyodu
T	: Sıcaklık
T_∞	: Toprak sıcaklığı
T_B^C	: Şarj sıcaklığı
T_B^D	: Deşarj sıcaklığı
$T_{dış ortam}$	: Deşarj süresince saatlik elde edilen dış ortam sıcaklığı
T_H	: Ev için belirlenen konfor sıcaklığı
U_H	: Binalar için toplam ısı transfer katsayısı
c_p	: Isıl kapasite
c_{pk}	: Kil ısı kapasitesi
k	: Isıl iletkenlik
k_k	: Kil ısı iletkenlik
r	: Isı değiştiricisi merkezinden olan radyal uzaklık
r_B	: Isı değiştiricisi yarıçapı
r_G	: Toprak yarıçapı
t	: Zaman
z	: Toprak yüzeyinden olan derinlik
α	: Isıl difüzyon katsayısı

α_k	: Kil ısıf difüzyon katsayısı
η	: Depolama verimi
ρ	: Yoğunluk
ρ_k	: Kil yoğunluk



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Aylara göre sıcaklık tablosu.	16
Çizelge 3.2: Model parametreleri tablosu.	17
Çizelge 4.1: İklim bölgelerine göre ısı transfer katsayıları.	24
Çizelge 4.2: Farklı derinliklere ve döngü sayılarına göre ısı yük değerleri.	25





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: 2022 Yılı enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı.	2
Şekil 1.2: Isı pompası çalışma prensibi.	5
Şekil 2.1: Isı kaynağına göre ısı pompası çeşitleri.	8
Şekil 2.2: Isı pompası kullanımının CO ₂ emisyonuna etkisi.	8
Şekil 2.3: Düşey ve yatay toprak kaynaklı ısı pompası uygulamaları	10
Şekil 2.4: Toprak kaynaklı ısı pompası çalışma prensibi.	10
Şekil 2.5: Toprak kaynaklı ısı pompası kullanımının verime etkisi.	11
Şekil 2.6: Sarıyer’de aylara göre toprak sıcaklığı değişimleri.....	14
Şekil 3.1: Isı pompası sistem şeması.	15
Şekil 3.2: Comsol Modeli Parametreler Görseli.....	19
Şekil 3.3: Comsol Modeli Mesh Görseli 1.	19
Şekil 3.4: Comsol Modeli Mesh Görseli 2.	20
Şekil 4.1: Döngü sonları sıcaklık profilleri.....	21
Şekil 4.2: Değişken sıcaklık ve ortalama sabit sıcaklık koşulları altında Döngü 1 - Döngü 3 - Döngü 5 Şarj sonu sıcaklık profilleri.	22
Şekil 4.3: 5. Döngü sonu derinliğe bağlı deşarj durumu bağlı fark grafiği.	22
Şekil 4.4: Değişken sıcaklık ve ortalama sabit sıcaklık koşulları altında 6m, 12 m ve 18 m için 5. Döngü şarj sonu sıcaklık profilleri.	23
Şekil 4.5: 5. Döngü sonu derinliğe bağlı deşarj durumu bağlı fark grafiği.	23
Şekil 4.6: TSE 825'e göre iklim bölgeleri.....	24



SIĞ KUYU TOPRAK KAYNAKLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIMINDA MEVSİMLERE BAĞLI ATMOSFERİK KOŞULLARIN ETKİSİ

ÖZET

Isı değıştirciler geleneksel ısıtma sistemlerine alternatif olarak ortaya çıkmış doğal ya da özel bir sistemden (kazan, fırın vb.) ısı enerjisini toplayan sistemlerdir. Topladığı bu enerjiyi daha sonra evler, küçük işletmeler veya büyük hacimli endüstriyel tesisler gibi birçok farklı uygulama ve alanda kullanabilen cihazlardır. Isı pompaları genellikle ısı enerjisini topladığı kaynağa göre farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Doğal kaynaklardan enerji toplayan sistemler hava, su ve toprak kaynaklı olarak isimlendirilirler.

Hava kaynaklı ısı pompaları, dışarıdaki havadan ısıyı toplayarak ve iklimlendirilmesi sağlanmak istenen iç mekana bir fan yardımıyla ileterek ilgili ortamın ısıtılmasını veya soğutulmasını sağlayabilir. Su kaynaklı ısı pompaları ise çeşitli su kaynaklarından (deniz, göl, nehir vb.) ısıyı toplayarak çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları ise toprağın sahip olduğu ısı enerjisini toplayarak binaların ısıtılması ve/veya soğutulması için kullanılan cihazlardır. Toprak, gün boyunca güneş enerjisini emerek depoladığı için alternatif ısı pompası kaynaklarına göre daha kararlı bir duruş sergiler. Toprak kaynaklı ısı pompalarının genel çalışma prensibi toprak altına yerleştirilen bir döngü sistemi yardımıyla dolaşan bir ısı taşıyıcı sıvı kullanılmasıdır. Genellikle kapalı döngü sistemler kullanılmakla beraber açık döngü sistemler de kullanılabilir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, yüksek verimlilik ve düşük işletme maliyetleri nedeniyle giderek daha popülerlik kazanmaktadır. Bununla birlikte kurulum maliyetleri ve doğru boyutlandırmanın çok önemli olması sebebiyle tasarımların hassas bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Toprak kaynaklı ısı pompaları açık ve kapalı sistemler olarak ayrılmanın dışında sığ kuyu kaynaklı ve derin kuyu kaynaklı olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Bu tez çalışması kapsamında sığ kuyu kaynaklı ısı değıştircilerinin tasarımı üzerine odaklanılmaktadır.

Bu kapsamda ilk olarak sığ kuyu kaynaklı ısı değıştircilerinin çalışma prensipleri incelenmiştir. Yer altı toprak sıcaklığı, toprağın derinlerine inildikçe nispeten sabit kalmakta ve bu da sıcaklık farkı kullanılarak ısının aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Daha sonra sığ kuyu kaynaklı ısı değıştircilerinin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler, sıcaklık farkı, su debisi, boru malzemesi, boru uzunluğu ve boru çapı gibi değışkenleri içermektedir. Bu faktörler, sığ kuyu kaynaklı ısı değıştircilerinin verimlilik ve performans değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Bu tez çalışması içerisinde özellikle mevsimsel etki nedeniyle oluşan yüzey ve toprak sıcaklık farkı ve boru uzunluğu üzerinde durularak sığ kuyu çalışmalarının limitlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu limitler belirlenirken COMSOL programı kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve parametrelerin etkisi incelenmiştir.



EFFECTS OF SEASONAL ATMOSPHERIC CONDITIONS ON THE DESIGN OF SHALLOW GROUND-SOURCE HEAT EXCHANGERS

SUMMARY

In the modern era, with the growing awareness of climate change, environmental problems, increasing population and the need for sustainable practices; energy efficiency and reviewing energy consumption parameters has become a priority. Improving energy efficiency has environmental, economic and social benefits such as lowering energy bills and operational costs, make room for employment, increasing comfort and support healthy life standards, etc. By prioritizing energy efficiency, we can create more sustainable and comfortable for both living and working environments while minimizing our carbon footprint.

Considering buildings are one of the biggest contributors to energy consumption and greenhouse gas emissions, energy efficiency and effective energy management techniques need to be prioritized in this area. Optimizing building energy use involves a comprehensive approach that includes architectural design, advanced building systems, and energy-efficient technologies. This requires the integration of renewable energy sources, the use of energy-efficient building materials, the implementation of smart control systems, and the promotion of behavioral changes among building residents. The goal is to eliminate energy waste, reduce CO₂ emissions, and improve overall energy performance. With a growing focus on sustainability, laws and regulations are being developed to promote energy efficient building designs, retrofitting existing buildings, and the implementation of renewable energy sources. Therefore, research and development in building energy management systems and energy-efficient technology has grown more important. Additionally, there is an urgent need to focus on improving building energy performance through effective design, construction, and use of energy-efficient technologies and practices.

Due to their numerous advantages, heat exchangers are an attractive choice for a variety of applications and they play a crucial role in improving energy efficiency in buildings. Heat exchangers are devices that have emerged as an alternative to traditional heating systems and collect thermal energy from a natural or special system (boiler, furnace, etc.). The application areas can be diversified as residential buildings, small businesses and large industrial facilities where it can use the energy it collects.

Heat exchangers allow for more efficient use of available heat energy sources, which contributes to energy conservation and reduced environmental impact. They also enable the efficient transfer of heat across different fluids or other sources, resulting in more efficient heating, cooling, and ventilation systems. Heat exchangers, for instance, allow in the exchange of heat between incoming fresh air and outgoing polluted air in HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) systems, so optimizing energy conservation. Furthermore, heat exchangers are adaptable in their applications meeting a wide range of heating and cooling requirements in the residential, commercial, and industrial sectors.

Heat exchangers can also help sustainability and the transition to a greener future by extracting heat from renewable energy systems like solar thermal systems, geothermal heat pumps or waste energy sources to improve energy use and reduce dependency on traditional energy sources.

Buildings can recover and reuse waste heat by using heat exchangers, lowering the need for additional energy inputs. They can be customized to meet unique needs, assuring optimal performance and cost-effectiveness. In addition to increasing heat transfer efficiency and providing temperature control, they ensure that energy is not wasted in buildings as much as possible while maintaining comfort levels. As a result, using heat exchangers in building design and retrofitting projects is critical for creating sustainable and energy-efficient surroundings.

Heat pumps are generally classified based on the source of heat energy from which they obtain. These sources are often classified as air, water, or ground-based. Air-source heat pumps extract heat from the surrounding air to provide heating or cooling for indoor spaces through the use of a fan. Water-source heat pumps, on the other hand, gather heat from various water sources such as seas, lakes, or rivers for diverse applications.

Ground source heat pumps also known as geothermal heat pumps are devices that collect the thermal energy that the soil contains, which can be used for heating, cooling and providing hot water in residential, commercial or industrial buildings. Since the soil stores solar energy throughout the day, it is more stable than alternative heat pump sources. The general operating principle of ground source heat pumps is to use a heat-carrying liquid that circulates through a loop buried underground. Although closed loop systems are more common, open loop systems can be employed as well. In addition to being classified as open and closed systems, ground source heat pumps are also divided into shallow well and deep well systems.

When ground source heat pumps operate in heating mode, the fluid circulates through the pipes and takes heat energy from the soil. The fluid absorbs heat energy from the warmer underground and transports it to the heat pump unit inside the building. The fluid transfers heat within the heat pump unit to a refrigerant, which is a cooling agent such as hydrofluorocarbon (HFC) or carbon dioxide. The refrigerant evaporates from a low-pressure liquid to a high-pressure gas, allowing it to absorb a considerable quantity of heat energy from the fluid. The heated refrigerant is then forced through a compressor, where its temperature and pressure are further increased. The heated, high-pressure refrigerant is then sent to a second heat exchanger, where it is transferred to the building's heating system, such as underfloor heating or radiators. Heat is transferred from the refrigerant to the building's heating system, which warms the interior space. At the same time, the refrigerant returns to its initial low-pressure liquid condition after releasing its heat energy, and the cycle repeats.

In cooling mode the process works in reverse. The fluid absorbs heat from the building's interior space and transmits it to the refrigerant in the heat exchanger. The refrigerant then transports the heat to the ground, where it is released and cooled.

Ground source heat pumps are becoming increasingly popular due to their high efficiency and low operating costs. However, due to installation costs and the importance of correct sizing, designs must be handled with care. Before using ground source heat pump systems, especially in shallow wells and horizontal applications where ground temperature vary seasonally, more accurate models should be developed and the level of accuracy should be increased during the design phase. Instead of sizing

based on an assumed average ground temperature value for the entire year, utilizing analytical and numerical model results for different scenarios will enable a more realistic design.

In this context, the goal of the thesis is to design a ground source heat pump working in shallow wells and to estimate efficiency limits of this systems. First, the operating principles of shallow well ground source heat exchangers are examined.

Then, the design parameters of shallow well ground source heat exchangers are determined. These parameters include variables such as temperature difference, water flow rate, pipe material, pipe length, and pipe diameter.

Ground temperatures based on measurement data will be treated as time-dependent initial and boundary conditions in this study, and an annual performance analysis for heating and cooling modes of ground source heat exchangers will be conducted. Different outdoor conditions will be determined, and the results of analytical and numerical modeling for different size and type of heat exchanger design parameters will be compared. As a result, a realistic sizing model method will be developed. The system was run with continuous charge and discharge phases. There is also stand by periods between each charging and discharge cycle. The charging period is 4 months and the discharge period is 7 months, based on the climatic features of the Sarıyer Istanbul region. The graphs and change values for annual average temperature change and radiation are obtained from the NASA database. The charging, discharging, and stand by periods of the system have been identified using these graphics. These factors have a significant impact on the efficiency and performance values of shallow well ground source heat exchangers.

The soil temperature is the key parameter for evaluating the performance of ground-based heat exchangers. The temperature of the soil at the surface is directly influenced by the ambient temperature, resulting in a time-dependent variation in heat transmission. In this context, the time-dependent heat conduction equation will be solved analytically for 2D and 3D domains separately using both the constant temperature and constant heat flux methods. The boundary conditions used in this analysis will be time-dependent, where the temperature distribution obtained at the end of the previous period will be considered as the initial condition for the next period. To validate the results of the analytical model, numerical models with high mesh density will be created for the same geometries.

In this thesis, the limits of shallow well operations were determined, especially by focusing on surface and soil temperature differences due to seasonal effects and pipe length. Mathematical modeling and COMSOL program were used to perform simulation studies and examine the effect of parameters. The accuracy of the Comsol simulation model applied has been demonstrated by using the mathematica application to solve heat transfer equations that have been approved in previous studies. The effectiveness of ground source shallow well heat pumps was investigated by simulating the confirmed comsol model, over a wide range of variables. The points to consider in the design of an optimum shallow well source heat pump system have been disclosed by analysing the data.



1. GİRİŞ

Günümüzde, dünya nüfusundaki artış toplumun devamlılığının sağlanması adına ihtiyaç duyulan enerji tüketiminin de günden güne artmasına neden olmuştur. Sıklıkla kullanılan enerji üretim yöntemlerinden biri olan fosil yakıtların kullanımı iklim krizinin başlıca sebeplerinden biri olarak görülmektedir. Fosil yakıtların yanması sırasında ortaya çıkan karbondioksit (CO_2) ve diğer sera gazları, atmosferde ısının tutulmasına ve küresel sıcaklık değerlerinin ortalamanın üzerine çıkmasına neden olmaktadır. Küresel sıcaklıklardaki artış, deniz seviyesinin yükselmesi, hava olaylarının daha şiddetli hale gelmesi ve biyoçeşitlilik kaybı gibi bir takım olumsuz etkilere yol açmaktadır.

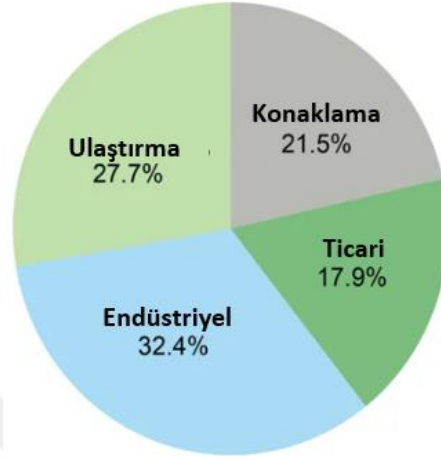
İklim kriziyle mücadele edebilmek adına rüzgar, dalga, güneş, jeotermal ve hidro gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve üretilen enerjinin daha verimli olarak kullanılması önem kazanmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerji altyapısı için önemli yatırımlar ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve daha yaygın olarak kullanılması için destekleyici politikaları gerektirmektedir.

Bu noktada kullanılabilecek olan yenilenebilir enerji sistemlerinden biri toprak kaynaklı ısı pompalarıdır. Toprak kaynaklı ısı pompaları, çevre dostu bir ısıtma ve soğutma seçeneği olarak öne çıkmaktadır.

1.1 Binalarda Enerji Tüketimi ve Çevre Üzerindeki Etkileri

Çevre üzerinde önemli etkiye sahip unsurlardan biri binaların enerji tüketim değerleridir. Bu enerji tüketimi, zararlı gazların çevreye salınmasına ve kaynakların tükenmesine neden olabilir seviyededir. Binalarda enerji tüketimi, binaların kullanım amacına, büyüklüğüne ve bina içinde kullanılan cihazların güçlerine göre değişkenlik gösterir. Örnek olarak, konutlar genellikle daha az enerji tüketimi yaparken, iş yerleri daha fazla enerji tüketirler. Bunun nedeni, iş yerlerinde çok daha fazla aydınlatma, iklimlendirme ve elektronik cihazların kullanılmasıdır. Ancak bu ayrımın ötesinde, dünya geneli toplam tüketim değerleri incelendiğinde, 2022 yılında üretilen toplam

enerjinin yaklaşık %20'sini binaların tükettiği görülmektedir. Şekil 1.1 2022 yılı için enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımını göstermektedir. Buna göre endüstriyel ve ulaşırmada tüketilen enerjiden sonra, konaklamanın en büyük paya sahip olduğu görülebilmektedir.



Şekil 1.1: 2022 Yılı enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı. (U.S. EIA 2022)

Binalarda kullanılan enerjinin, çevre üzerinde kümülatif bir etki gösterdiği için iklim değişikliği ve enerji verimliliği politikaları kapsamında dikkatle takip edilmesi gerekmektedir. Kullanılan bu enerjinin sürekli olması ve gelişen teknolojik ihtiyaçlarla birlikte daha da artması nedeniyle karbon emisyonları ve diğer sera gazı emisyonlarının artmasına neden olur. Bu sebeple, iklim değişikliği ve enerji verimliliği politikaları için hedef haline gelir. Özellikle iç mekanlarda kullanılan enerjinin çok önemli bir kısmı binaların termal konforunu arttırmak amacıyla kullanılan enerjidir.

Enerji tüketiminin artış eğilimi göz önüne alındığında binaların daha sürdürülebilir ve enerjiyi daha verimli şekilde kullanılacak şekilde tasarlanması önem kazanmaktadır. Geçmişe bakıldığında binaların daha çok yerel iklimin baz alındığı konseptler kullanılarak tasarlandığı görülebilir. Ancak teknolojinin ilerlemesi ve binaların havalandırma sistemlerinin daha fazla yaygınlaşması bu tasarım mantığının geri planda kalmasına neden olmuştur. Bu sebeple tarihi yapılar termal konfor ve enerji verimliliği açısından daha başarılı olarak görülmektedir (Sekatia ve diğ, 2019). Ancak, tüketilen enerji ve/veya güneş ışığının kullanımı ya da sisteme dahil edilmesi gibi enerjinin ne kadar ve ne şekilde kullanıldığını ortaya koyan göstergeler, tarihi binaların performanslarının karakterizasyonu için yetersiz kalmaktadır (Todorovic ve diğ, 2015).

Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri, binaları konforlu tutmada önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, bu cihazlar aynı zamanda oldukça enerji yoğundur ve ciddi bir çevresel etkiye sahiptir. HVAC sistemleri elektrikle çalışır ve bu nedenle çok fazla enerji tüketir. Öyle ki binaların ısıtılmasında, soğutulmasında ve havalandırılmasında kullanılan HVAC istemlerinin enerji tüketimi ticari ve endüstriyel binalarda dünya enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. HVAC sistemlerinin enerji tüketimi birçok faktöre bağlıdır. Bunlar arasında kullanılan ekipmanın tipi, binanın büyüklüğü, yerel iklim, kullanım süresi ve bina sakinlerinin tercihleri sayılabilir. HVAC sistemlerinin enerji tüketimini azaltmanın birkaç yolu vardır. Öncelikle enerji tasarrufu sağlayan cihazlar tüketimi azaltmaya yardımcı olabilir. Bu cihazlar ile daha az enerji tüketilebilir ve sistemlerin daha verimli çalışması sağlanabilir. Ayrıca düzenli bakım ve temizlik de enerji tasarrufuna yardımcı olur. Filtrelerin temizlenmesi ve sızıntıların giderilmesi HVAC sistemlerinin verimli çalışması için çok önemlidir. Bina sakinlerinin tercihleri de sistemlerin enerji tüketimini etkiler. Aydınlatma için gün ışığı kullanmak, serinlemek ve doğal havalandırma sağlamak için pencereleri açmak enerji tasarrufuna yardımcı olabilir. Fakat bu sistemlerinin daha verimli çalışmasını hedefleyen ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle desteklenen yeni kontrol yöntemlerine rağmen özellikle ticari ve endüstriyel binalarda HVAC sistemlerinin verimleri istenen seviyeye çıkamamıştır (Huaguang ve diğ, 2002). Bu nedenle, binalardaki enerji verimliliği arttırmak ve yeşil binalar oluşturabilmek için sürdürülebilir matematiksel modeller geliştirmek gereklidir (Delavar ve diğ, 2020).

Günümüzde çevre ve sürdürülebilirlik konuları giderek daha önemli hale gelmektedir. Yeşil bina kodları da bu konuda inşaat sektörüne öncülük etmiştir. Yeşil bina kodları binaların çevresel performansını iyileştirmek için geliştirilen standartlardır ve bina tasarımından inşaatı kadar her aşamada çevre dostu malzeme kullanmayı, havalandırma ve ısıtma sistemlerinde verimliliğin artırılmasını, çevresel etkinin azaltılmasını, enerji tasarrufu sağlamayı, su kaynakları ve atık yönetimi gibi konuları dikkate almayı amaçlar. Yeşil bina kodları ve derecelendirme sistemleri, yeşil bina uygulamalarının bir temeli olarak dünya çapında geliştirilmiştir. Yeşil bina kodları sadece çevreye ve sürdürülebilirliğe katkıları nedeniyle değil, aynı zamanda ekonomik faydaları için de tercih edilmektedir. Yeşil binalar enerji tasarrufu sağlayarak işletme maliyetlerini düşürür ve uzun vadeli yatırım getirisi sağlar. Bu normlar ulusal ve yerel

düzeylerde mevcut olabilir (Capeluto, 2022). Bu araştırmaların da ortaya koyduğu gibi, binaların çevresel etkilerini azaltmak için enerji verimliliği optimizasyonun önemi görülmektedir. Yüksek enerji verimli bir bina, zamanının %30'undan fazlasını bu alanlarda geçiren kişiler için optimal iç mekan koşullarını sağlarken, düşük bir çevresel etkiye sahip olabilmektedir. (Puig ve diğ, 2019)

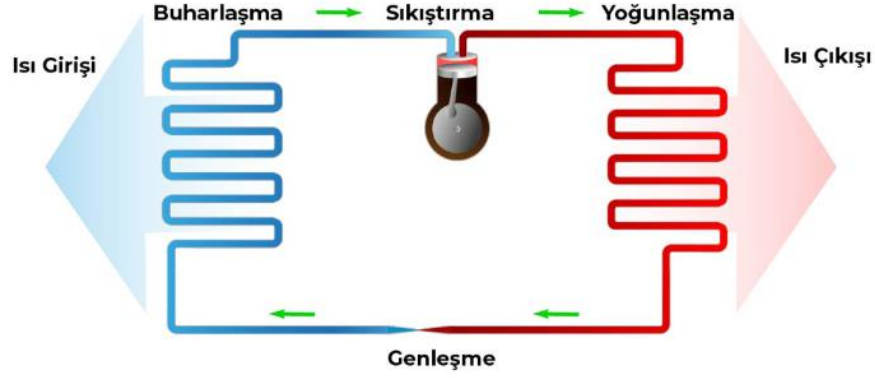
Bu bilgiler ışığında, binalar büyük miktarlarda enerji tüketmekte ve çevre üzerindeki kümülatif etkileri nedeniyle iklim değişikliği ve enerji verimliliği politikaları tarafından hedef alınmaktadır. Yerel iklimi dikkate alarak sürdürülebilir ve enerji verimli binalar tasarlamak önemlidir. Dünyanın enerji tüketiminin büyük bir kısmından sorumlu olan ticari ve endüstriyel binalardaki HVAC ekipmanları ile, net sıfır enerji binaları tasarlamak için sürdürülebilir matematiksel modeller geliştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bir binanın enerji verimliliğini optimize etmek, çevresel etkisini azaltmak için kritik öneme sahiptir.

1.2 Isı Pompalarının Kullanım Amaçları

Günümüzde enerji maliyetlerinin artması ve çevre kirliliği nedeniyle enerji tasarruflu sistemlerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Isı pompaları ısıtma ve soğutma nedeniyle oluşan ısı enerji talebini karşılamak için kullanılabilecek alternatif sistemlerden birisidir (Raymond ve diğ., 2017). Kaynak olarak hava, toprak veya su kullanılabilir. Geleneksel ısıtma sistemlerine kıyasla daha yüksek verimliliğe sahiptirler.

Isı pompalarının farklı türleri vardır. Bunlardan en popüler olanları hava kaynaklı ısı pompaları, su kaynaklı ısı pompaları ve toprak kaynaklı ısı pompalarıdır. Hava kaynaklı ısı pompaları, dış ortamdan ısı alışverişi yaparken, su kaynaklı ısı pompaları yer altı suyu ile ısı alışverişi yaparlar. Toprak kaynaklı ısı pompaları ise, toprağın altındaki kayaçların doğal ısını kullanarak çalışır.

Isı pompalarının belki de en önemli kullanım alanı ise binaların ısıtma, soğutma, havalandırma ve ev kullanımına uygun sıcak su üretimi için tercih edilmesidir (Pardinas ve diğ, 2017). Bu kullanım alanlarına ek olarak ısı pompaları tarım ürünlerinin daha enerji verimli bir şekilde kurutulması amacıyla da kullanılırlar. Bu kurutma işleminde düşük enerji kullanımı ile daha iyi ürün kalitesinde ürünler için kontrol edilebilir kurutma ortamı sağlarlar (Patel ve diğ, 2011).



Şekil 1.2: Isı pompası çalışma prensibi.

Şekil 1.2’de de ısı pompalarının çalışma prensibi görselleştirilmiştir. Isı pompaları ısı kaynağı olarak doğal kaynaklardan beslendiği için verimlilikleri dış ortam hava sıcaklığıyla bağlantılıdır. Bu konuda yapılan çalışmalarda daha sıcak iklimlerde, ısı pompalarının daha verimli çalıştığı görülmüştür (Witkowska ve diğ, 2020). Bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan verilere göre ısıtma uygulamaları için Güneydoğu Asya gibi daha sıcak bölgeler daha uygun görülebilmektedir (Widiatmojo ve diğ, 2017). Ancak bu çıkarım her zaman tam olarak doğru kabul edilmeyebilir. Bunun öncelikli nedeni ise bu tarz sistemlerin verimli olarak görülebilmesi için tek değişkenin hava sıcaklığı olmamasıdır. Özellikle hükümetlerin uyguladığı destek programları, hibelerin büyüklüğü, kredi sübvansiyonları gibi sistemlerin efektif bir şekilde uygulanmasıyla Polonya gibi daha soğuk bölgelerde de ısı pompalarının kullanımda artış görülebilir (Witkowska ve diğ, 2020). Bu gibi destekler daha sürdürülebilir çözümler ortaya koyulabilmesi ve çevresel etkilerin minimuma düşürülmesi için gereklidir.

Sonuç olarak, ısı pompaları binaların enerji verimli ve çevre dostu ısıtma ve soğutma işlemleri için çeşitli kaynaklarla beslenebilen bir alternatiftir. Ancak, verimlilikleri bir çok değişkene bağlı olduğu için ısı pompası tasarımları yapılırken bu değişkenlere dikkat edilmesi gerekir. Yapılan tasarımların özellikle bölgesel olarak ele alınması gerekmektedir.

1.3 Tezin Amacı

Bu çalışma, toprak kaynaklı ısı değiştiricilerinin performansını mevsimsel değişime göre incelemeyi amaçlamaktadır. Bunun yanı sıra bina içi konfor sıcaklığının sağlanabilmesi için kuyu derinliğinin metre cinsinden en az ne kadar olması gerektiği

araştırılmıştır. Bu amaçla sistem bilgisayar ortamında simüle edilmiş ve sonuçlar sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

Mevsimsel değişikliklerin toprak kaynaklı ısı pompalarının performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır ve bu çalışma bu etkiyi ayrıntılı olarak incelemektedir. Bu inceleme sonucunda ısı pompasının performansını optimize etmek için kuyunun minimum derinliği belirlenmeye çalışılmıştır.

Bilgisayar simülasyonları ve sayısal analiz yoluyla bulunan sonuçlar, toprak kaynaklı ısı pompasının performansını en st düzeye çıkarmak için uygun kuyu derinliği seçimine rehberlik edecektir. Ayrıca bu çalışmanın ıktıları toprak kaynaklı ısı pompalarının daha verimli kullanılmasına ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır.

2. ISI POMPASI TEKNOLOJİLERİ, TOPRAK KAYNAKLI ISI POMPALARI VE MEVSİMSSEL ETKİLERİN TOPRAK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bu başlık altında ısı pompası teknolojileri ve toprak kaynaklı ısı pompalarının tasarımında mevsimsel etkilerin ortaya çıkardığı etkiler incelenmiştir.

2.1 Isı Pompası Teknolojileri

Isı pompası teknolojileri son yıllarda giderek popüler hale gelmiştir (Gou ve diğ, 2016). Çünkü çevre dostu, verimli ve enerji tasarruflu bir ısınma ve soğutma alternatifi sunarlar. Geleneksel ısınma ve soğutma sistemlerine göre, ısı pompaları daha az enerji tüketir ve daha az karbon salınımına neden olur. Ayrıca, ısı pompaları kullanıcıların enerji faturalarını düşürmelerine yardımcı olarak uzun vadede tasarruf sağlar. Bazı ülkelerde, hükümetler çevre dostu enerji kaynaklarına geçişi sağlamak için ısı pompalarının kullanımını teşvik etmektedir. Isı pompalarının çok yönlülüğü de popülerliğini artırmaktadır. Hem evlerde hem de ticari binalarda kullanılabilen çeşitli modeller mevcuttur ve ısı pompaları sadece ısınma ve soğutma amaçlı değil, aynı zamanda sıcak su üretimi için de kullanılabilir.

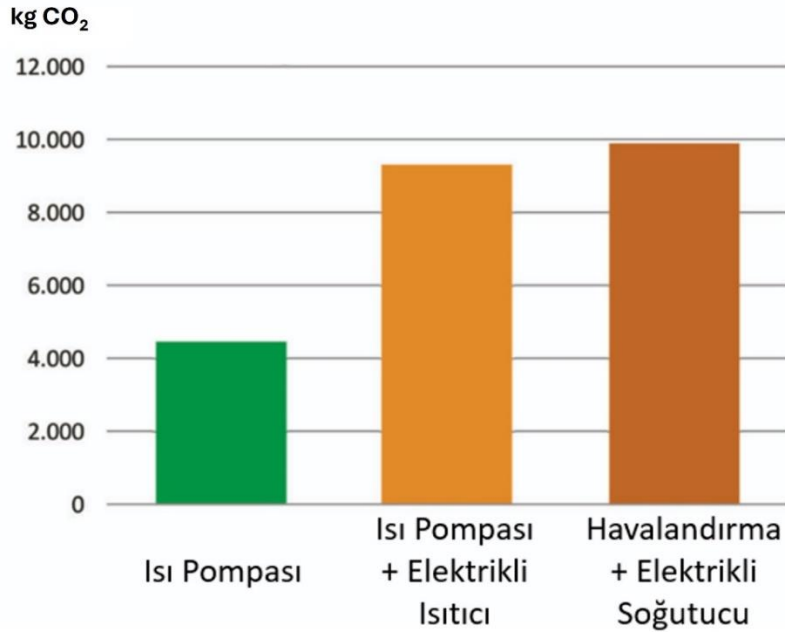
Isı pompası teknolojisi birçok farklı türü içerir. Bu türler arasında en popüler olanları olarak hava kaynaklı ısı pompası (ASHP), atık su kaynaklı ısı pompası (WSHP), toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP) ve yeraltı suyu kaynaklı ısı pompası (UWSHP) gibi çeşitli ısı pompası teknolojileri gösterilebilir (Gou ve diğ, 2016). Bu teknolojiler içerisinden toprak, hava ve su kaynaklı olan ısı pompası çeşitleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin tasarımı, tasarım seçeneklerinin sistemin enerji performansını ve çalışma koşullarını etkilemesi nedeniyle önemlidir. Yer tarafındaki ısı yükü profili dengesiz ise, yer sıcaklığı zamanla değişmekte ve buna bağlı olarak ısı pompasının enerji verimliliği de değişmektedir. Bu fenomen "yer termal kayması" olarak bilinir. Bu durumdan kaçınmak için hibrid bir sistem kullanımı olası ve efektif bir çözümdür (Zarrella ve diğ, 2018).



Şekil 2.1: Isı kaynağına göre ısı pompası çeşitleri.

Isı pompaları, ısıtma ve soğutma için toprakta veya havada toplanan "ücretsiz enerjiyi" kullanırlar (Ruqun Wu, 2009). Bu "ücretsiz enerji", ısı pompası cihazları tarafından toplanır, işlenir ve binanın ısıtma veya soğutma sistemi için kullanılır. Isı pompalarının enerji verimliliği, toplanan ısı enerjisinin kullanımı sırasında harcanan enerjinin miktarına göre belirlenir. Eğer ısı pompası daha az enerji harcayarak daha fazla ısı üretebiliyorsa, o zaman daha verimli olarak kabul edilir. Isı pompalarının bu özelliği, geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine göre çevre dostu ve enerji tasarruflu bir alternatif olmalarını sağlar. Şekil 2.2’de ısı pompalarının elektrikli ısıtıcı ve elektrikli soğutuculara göre daha düşük CO₂ salınımı yaptığı görülebilmektedir. Isı pompaları uzun vadede hem enerji maliyetlerini hem de çevresel etkiyi azaltarak sürdürülebilir bir çözüm sunarlar.



Şekil 2.2: Isı pompası kullanımının CO₂ emisyonuna etkisi.

Tüm bu ısı pompası çeşitleri baz alındığında temelde kabul gören iki ana ısı pompası türü vardır. Hava kaynaklı ısı pompaları ve toprak kaynaklı ısı pompaları genellikle en yaygın olarak kullanılan iki ana ısı pompası türü olarak kabul edilirler (Ruqun Wu, 2009). Hava kaynaklı ısı pompaları, ev veya ticari bina gibi kapalı mekanların ısıtılması veya soğutulması için dışarıdaki hava ile ısı alışverişi yaparlar. Bu ısı pompaları, bir fan aracılığıyla havayı emer ve bu havadaki ısı enerjisini kullanarak sıcak veya soğuk hava üretir. Hava kaynaklı ısı pompaları, toprak kaynaklı ısı pompalarına göre daha uygun maliyetli ve kolay kurulum avantajlarına sahiptirler. Ancak, dış hava sıcaklığına bağlı olarak verimlilikleri değişebilir ve soğuk havalarda daha düşük verimlilik gösterme eğilimindedirler. Toprak kaynaklı ısı pompaları ise, yer altındaki toprak veya su kaynaklarından ısı enerjisi toplayarak çalışırlar. Bu sistemler, toprak veya su kaynaklarındaki daha istikrarlı sıcaklıklardan yararlanarak daha yüksek bir verimlilik sağlarlar. Ancak, toprak kaynaklı ısı pompaları daha yüksek kurulum maliyetlerine sahiptir ve daha karmaşık bir tasarıma sahiptirler. Toprak kaynaklı ısı pompası, dünyanın çeşitli ülkelerindeki binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için güvenilir, ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri, diğer ısıtma ve soğutma sistemlerine göre daha yüksek verimlilik, daha düşük işletme maliyetleri ve daha düşük çevresel etki sağlar. Bu nedenle, özellikle uzun vadeli yatırımlar için, toprak kaynaklı ısı pompası birçok ülkede tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir (Widiatmojo ve diğ, 2019).

2.2 Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

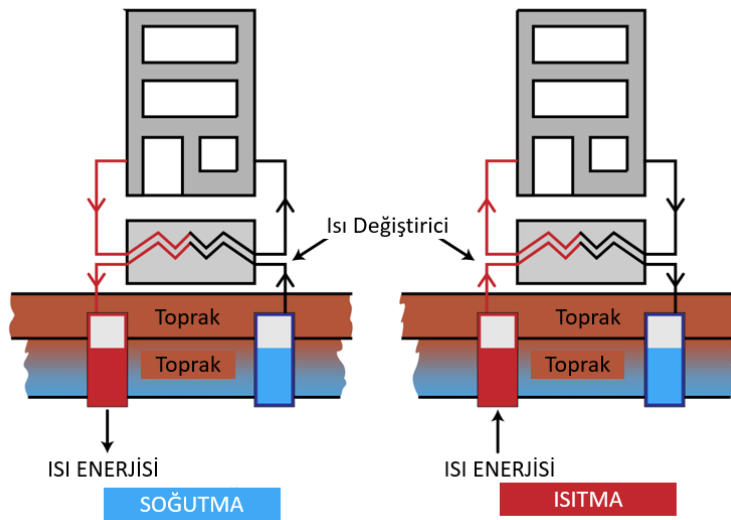
Toprak kaynaklı ısı pompaları, binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için oldukça enerji verimli bir alternatif olarak kabul edilirler. Bu sistemler, topraktan alınan enerjiyi kullanarak binaların iklimlendirilmesini sağlarlar ve bu sayede hem daha düşük işletme maliyetleri sağlarlar hem de çevresel etkiyi minimize ederler. Toprak kaynaklı ısı pompaları, diğer geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerine göre daha yüksek bir verimlilik sunarlar ve enerji tasarrufu sağlarlar. Bu nedenle, enerji verimliliği ön planda olan binalar için toprak kaynaklı ısı pompaları en iyi seçeneklerden biri olarak kabul edilir (Raymond ve diğ, 2017).

Şekil 2.3'te toprak kaynaklı ısı pompası teknolojilerinin düşey ve yatay olarak uygulamalarının görsel gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.3: Düşey ve yatay toprak kaynaklı ısı pompası uygulamaları (Aydın, 2015).

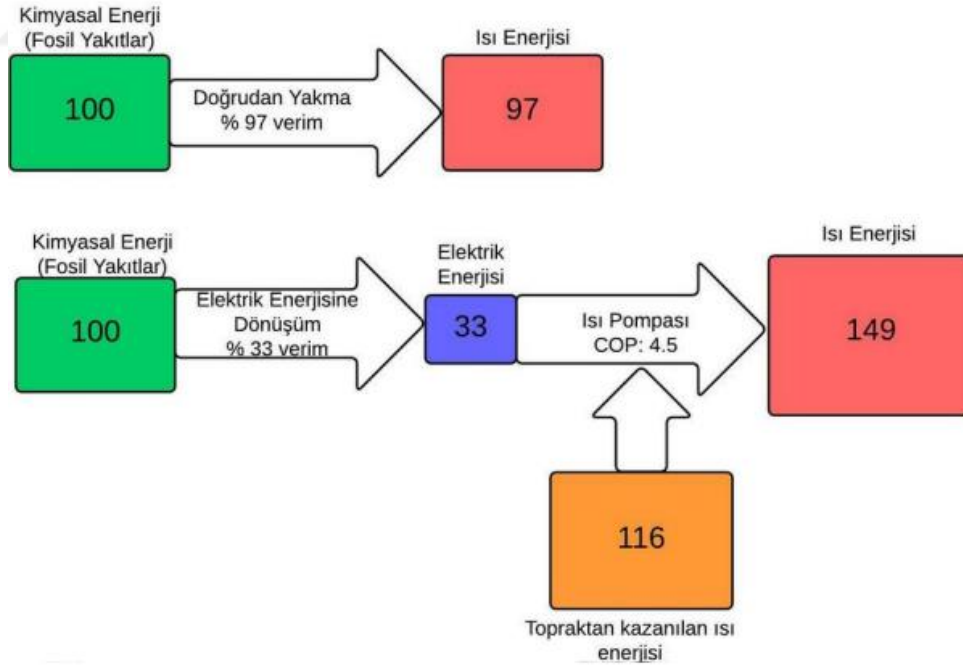
Jeotermal ısıtma veya soğutma sistemi için geçerli olan faktörlerin belirlenmesine yönelik kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu faktörler, toprak kaynaklı ısı pompaları için de önemli olabilirler. Toprak kaynaklı ısı pompalarının sağlamlığını artırmak ve kurulumunu kolaylaştırmak için doğru yer seçimi, toprak koşullarının değerlendirilmesi, sistem boyutlandırması, uygun boru tipi ve yerleştirilmesi, doğru ısıtma ve soğutma yük hesaplama yöntemleri gibi faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu faktörler, toprak kaynaklı ısı pompalarının uzun ömürlü ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaya yardımcı olmaktadır (Soltani ve diğ, 2019). Toprak kaynaklı ısı pompaları ve toprak ısı değiştiricileri, jeotermal enerji kaynaklarından yararlanan ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan önemli bileşenlerdir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, toprağın sıcaklığından yararlanarak evler, binalar ve diğer yapılar için enerji verimli bir ısıtma ve soğutma sistemi sağlarlar. Şekil 2.4 toprak kaynaklı ısı pompalarının çalışma prensibini görsel olarak ifade etmektedir.



Şekil 2.4: Toprak kaynaklı ısı pompası çalışma prensibi (Url-1).

Toprak ısı değiştiricileri ise, toprak içinde döşenmiş borular aracılığıyla, topraktaki sabit sıcaklık seviyelerinden yararlanarak ısıtma ve soğutma için enerji sağlarlar. Jeotermal enerji kaynakları, dünya yüzeyindeki sıcak noktalardan kaynaklanan doğal ısıdır ve toprak kaynaklı ısı pompaları ve toprak ısı değiştiricileri, bu enerjinin kullanılmasına yardımcı olurlar (Soltani ve diğ, 2019). Toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri, çevre dostu ve düşük karbon ayak izi nedeniyle son yıllarda giderek popüler hale gelmiştir. Yüksek verimlilikleri sayesinde, diğer ısı kazanım teknolojilerine kıyasla daha az enerji harcarlar ve düşük işletme maliyetleri ile ekonomik bir seçenek sunarlar. Ayrıca, toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri, çevre dostu bir enerji kaynağı olduğu için birçok ölkede devlet teşvikleri ile desteklenmektedir. Bu nedenle, verimli bir jeotermal enerji kazanım teknolojisi olarak kabul edilirler ve gelecekte daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir (Zhang ve diğ, 2021).

Fosil yakıtların doğrudan yanması sonucu ısı enerjisinde %97 verim olurken, fosil yakıtlardan sağlanan elektrik enerjisinin ısı pompaları yardımıyla ısı enerjisine çevrilme sürecinde ise topraktan kazanılan ısı enerjisi sayesinde %149 verim sağlanmaktadır. (şekil 2.5)



şekil 2.5: Toprak kaynaklı ısı pompası kullanımının verime etkisi (Aydın, 2015).

Ancak, bu teknolojinin uygulanmasında bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu faktörler, toprak kaynaklı ısı pompalarının uygulanmasını engelleyebilir. Bununla birlikte, daha doğru simölasyon araçları geliştirilmesi ve bütünleşik bir çerçevenin oluşturulması ile,

toprak kaynaklı ısı pompalarının uygulanması daha kolay hale gelebilir. Böylece enerji tasarrufu sağlayan bu teknolojinin daha yaygın hale gelmesine ve daha çevre dostu bir gelecek için bir adım atılmasına olanak sağlanabilir (Li ve diğ, 2023).

Toprak ısı değiştiricileri (TID), yatay veya dikey olarak (bir sondaj kuyusunda) toprağa gömölür ve bir ısı pompası ile birleştirilerek, bina ısıtma ve soğutma için jeotermal enerjiyi çeken Toprak Kaynaklı Isı Pompası (YKIP) sistemini oluştururlar. Bu, yenilenebilir enerji sistemlerinin de bir türüdür (Aresti ve diğ, 2022). Toprak kaynaklı ısı pompası teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar halen devam etmekte ve bu çalışmalar sonucunda önemli enerji tasarrufları elde edilmektedir. Bu durum sayesinde toprak kaynaklı ısı pompaları net sıfır enerjili binalara yönelik hedeflenen enerji dengesine katkıda bulunmaktadır (Massarotti ve diğ, 2021).

2.2.1 Yeraltının termo-fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Borehole Termal Enerji Depolama Sistemleri (BTES) tasarlanırken yeraltının termo-fiziksel özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi önem kazanmaktadır. Çünkü ısı değiştiriciler yeraltı ile doğrudan ısı transferi yaptıkları için bu özellikler sistem tasarımını etkilemektedirler. Isıl iletkenlik, ısı kapasite ve malzeme yoğunluğu gibi özelliklerin belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntem termal tepki testi (TRT)'dir (Murphy ve diğ, 2014). İlk olarak 1983 yılında Mogensen tarafından önerilen TRT testi zaman içerisinde yerinde termal özelliklerin belirlenmesinde standart bir uygulama haline gelmiştir (Spitler ve Gehlin, 2015). Bu test yöntemi yeraltı ısı değiştiricisinin giriş ve çıkış akışkan sıcaklıkları ve akış hızındaki farklar kullanılarak yeraltının termal özelliklerini homojenleştirmiş bir biçimde elde edilmesine olanak sağlar. Sistemin homojen bir şekilde değerlendirilmesi zaman zaman yeterli olmayabilir. Yeraltı çoğunlukla birden fazla katmandan meydana gelir ve her katmanın termo-fiziksel özellikleri birbirinden farklılık gösterebilir. Bu çalışma kapsamında tek bir katmanlı yapı kurgulanmış olup sistem homojen olarak değerlendirilecektir.

2.3 Toprak Kaynaklı Isı Pompaları ve BTES Entegrasyonu

Günümüzde artan enerji tüketimi ve çevresel kaygılar yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin daha verimli kullanılabilmesi amacıyla çeşitli enerji depolama sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu sistemlerin ana amacı enerji verimliliğinin arttırılması

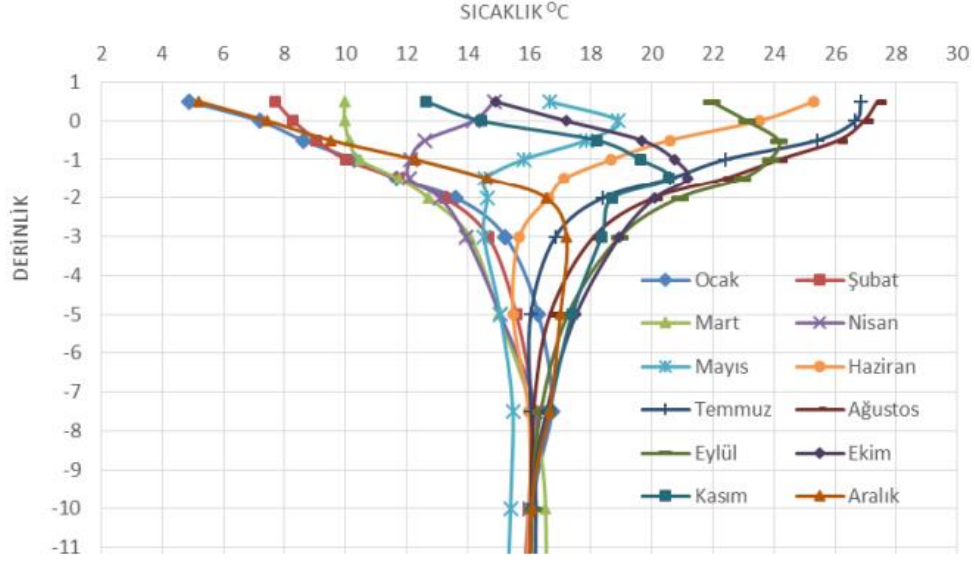
olmakla beraber, enerji talebi ve arzı arasında dengenin sağlanması ve enerji maliyetlerinin düşürülmesi gibi konularda da önemli bir rol oynamaktadır. Termal enerji depolama sistemleri, ısıнын depolanması ve geri kazanılması için çeşitli yöntemler kullanırlar. Bu yöntemlerden bir tanesi ise BTES sistemidir. BTES’ler genellikle binalarda ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılmak üzere gereken ısıyı yeraltında depolamayı içeren bir enerji depolama teknolojisidir (Skarphagen ve diğ, 2011). Bu sistemler güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından toplanan ısıyı depolayabilirler. Depolanan ısı, toprak kaynaklı ısı pompaları aracılığıyla binalarda iklimlendirme amaçlı kullanılarak, enerji tasarrufuna ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunabilirler (Shakerin ve diğ, 2011). Burada temel prensip güneş enerjisinin, termal enerjiye dönüştürülerek yer altındaki kuyulara depolanmasıdır. Güneş kollektörleri ile toplanan enerji, bir akışkan vasıtasıyla BTES sistemine taşınır. Sistem bu termal enerjiyi yer altındaki kuyulara depolayarak ileri bir zamanda kullanılabilmesine olanak sağlar.

2.4 Toprak Sıcaklığına Mevsimsel Değişimin Etkileri

Toprak sıcaklığı, birçok doğal ve insan yapımı sistem için önemli bir parametredir. Özellikle tarım, çevre ve yer bilimleri alanlarında, toprak sıcaklığı çok etkilidir. Mevsimsel değişimler, toprak sıcaklığını önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle hava sıcaklığı gibi atmosferik değişkenler de, toprak sıcaklığını doğrudan etkiler. Hava sıcaklığı yükseldiğinde, toprak sıcaklığı da yükselir. Ayrıca, rüzgar hızı, güneş ışınlarının şiddeti ve bulut örtüsü de toprak sıcaklığını etkileyen diğer atmosferik faktörlerdir. Toprağın yüksekliği ve enlem de diğer önemli faktörler arasındadır (Wang ve diğ, 2020). Mevsimsel etki nedeniyle yıl içi ortalama ısı toprak sıcaklığının yıllık ve mevsimsel olarak yükseklik ile birlikte azaldığı, ancak derinlik arttıkça mevsimsel etkiyle artıp/azalmadığı bulunmuştur (Wang ve diğ, 2020).

Toprak sıcaklığı değişimi, iklim değişikliği altında bölgesel peyzajları, ekosistemleri, hidrolojik süreçleri ve diğer parametreleri etkileyen önemli bir faktördür (Wang ve diğ, 2020). Bu değişim, toprak yüzeyinde ve üzerinde meydana gelen tüm süreçleri birleştirdiği için iklim değişikliğinin önemli bir göstergesi olarak bildirilmektedir. Araştırma sonuçları mevsimlerin toprak sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve bu durumun çeşitli ekolojik süreçleri etkilediğini göstermektedir.

Şekil 2.8, İstanbul - Sarıyer’de aylara göre ortalama toprak sıcaklığının değişimini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi yaklaşık ilk 10 metreden sonra atmosfer sıcaklığının toprak sıcaklığı üzerinde bir etkisi kalmamaktadır.



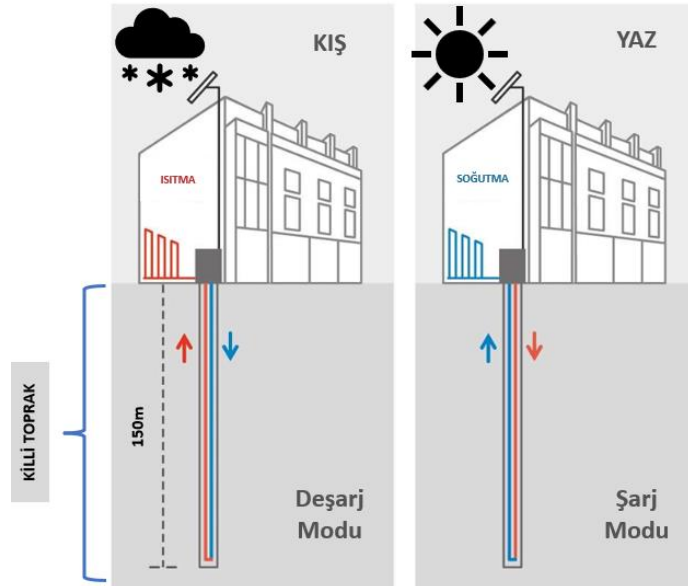
Şekil 2.6: Sarıyer’de aylara göre toprak sıcaklığı değişimleri (Aydın, 2015).

3. SIĞ KUYU TOPRAK KAYNAKLI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIMI

Tezin bu bölümünde, siğ kuyularda toprak sıcaklığının mevsimsel etkenlere bağlı olarak değişmesinin, kışın ısıtma modunda çalışacak toprak kaynaklı ısı pompası sistemlerinin saha uygulaması öncesi tasarım aşamasında, daha doğru modeller geliştirilerek mühendislik boyutunda doğruluk seviyesinin artırılmasına odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında 150 metre derinliğe kadar ısı değiştiriciler analiz edilmiş, sistem verimi ilk 5 yıllık çalışma dönemi için ve 2 farklı lokasyon için analizler yapılmıştır.

3.1 Model Özellikleri

Çalışmada kullanılan sistem, tek bir düşey ısı değiştiricisinden oluşmaktadır. Bu ısı değiştiricisinin yarıçapı 0.1 m olarak alınmıştır. Isı değiştiricisinin derinliği ise maksimum 150 m olarak seçilmiştir. Sistem tamamen killi bir toprak içerisinde simüle edilmiş ve ilgili sistem şeması Şekil 3.1’de gösterildiği gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 3.1: Isı pompası sistem şeması.

Çalışmanın numerik modelleme kısmında, toprak derinliği ve yarıçapı seçimi, analiz sonuçlarını etkilemeyecek kadar büyük tutulmuştur. Tek katmanlı bir toprak yapısı

kullanılmıştır. Isı pompası sisteminin kurulum sahası olarak Sarıyer/İstanbul/Türkiye ve Kars/Türkiye seçilmiştir. Analizlerde ısı geçişinin gözlemlenebilmesi adına başlangıç koşulu olarak, T_{∞} , ilgili bölgelerin yıllık ortalama sıcaklıkları olan İstanbul ve Kars için sırasıyla 15 °C ve 7,1 °C olarak alınmıştır. Çizelge 3.1 seçilen iki kurulum sahasındaki 2021 yılına ait aylık ortalama sıcaklıkları göstermektedir.

Çizelge 3.1: Aylara göre sıcaklık tablosu.

Ay	İstanbul Sıcaklık*	Kars Sıcaklık*
Ocak	8	-6
Şubat	7	-3
Mart	7	-2
Nisan	11	7
Mayıs	18	13
Haziran	21	18
Temmuz	26	19
Ağustos	27	20
Eylül	21	14
Ekim	16	7
Kasım	13	2
Aralık	9	-4
Yıl Ortalaması	15	7.1

*: Değerler tam sayıya yuvarlanmıştır.

Sistem toprağın enerji kaybını minimize edebilmek adına şarj ve deşarj şeklinde çift yönlü olarak kurgulanmıştır. Şarj ve deşarj periyotları arasında toprağın ısı karakteristiğini koruyabilmek adına 15'er günlük bekleme süreleri eklenmiştir. Şarj ve deşarj periyotları ise NASA'nın veri tabanından 2021 yılı baz alınarak belirlenmiştir. Analizler Şarj-Bekleme-Deşarj-Bekleme şeklinde periyodik olarak 5 yıllık süre ile yürütülmüştür.

Kurulan modele ait tüm termal ve iklimsel özellikler ile dizayn parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelgede verilen parametrelerden Şarj sıcaklığı olan 40 °C 'nin sağlanabilmesi için gerekli güneş panellerinin yerleştirilebileceği kadar büyük bir alanın varlığı kabul edilmiştir.

Çizelge 3.2: Model parametreleri tablosu.

Parametreler	
Isı değiştiricisi sayısı, N	1
Isı değiştiricisi derinliği, H_G	150 m
Isı değiştiricisi yarıçapı, r_B	0,1 m
Toprak derinliği, H_G	200 m
Toprak yarıçapı, r_G	20 m
Toprak sıcaklığı İstanbul, T_∞	15,4 °C
Toprak sıcaklığı Kars, T_∞	7,1 °C
şarj sıcaklığı, T_B^C	40 °C
Deşarj sıcaklığı İstanbul, T_B^D	0,4 °C
Deşarj sıcaklığı Kars, T_B^D	-7,9 °C
şarj süresi İstanbul	4 ay
Deşarj süresi İstanbul	7 ay
şarj süresi , Kars	3 Ay
Deşarj süresi Kars	8 Ay
Bekleme süresi	15 + 15 gün
U_{value} , İstanbul (TSE 825, 2013)	0,25
U_{value} , Kars (TSE 825, 2013)	0,29
$T_{out,ortalama}$, İstanbul	15,45 °C
$T_{out,ortalama}$, Kars	7,1 °C
Evlerin efektif yüzey alanı	325 m ²
Bina Isıl Yüğü, $Q_{İst}$	3,97 MWh
Bina Isıl Yüğü, Q_{Kars}	11,2 MWh
Kil yoğunluk, ρ_k	2500 kg/m ³
Kil ısı kapasitesi, c_{p_k}	858 J/kgK
Kil ısı iletkenlik, k_k	2,14 Wm/K
Kil ısı difüzyon katsayısı, α_k	9,98x10 ⁻⁷ m ² /s

Denklem 3.1’de gösterilen ısı difüzyon denklemi kullanılarak, her bir dönemdeki ısı enerji transferleri nümerik olarak hesaplanabilmektedir.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

Burada, α ısı difüzyon katsayısı, T sıcaklık, t zaman, r ısı değiştiricisi merkezinden olan radyal uzaklık, z toprak yüzeyinden olan derinliktir. Isıl difüzyon katsayısı, $\alpha = k/\rho c_p$ ile belirlenmekte olup, k ısı iletkenliği, ρ yoğunluğu ve c_p ısı kapasiteyi göstermektedir. Analizler sırasında, sıcaklıkla birlikte çok yavaş değişen bu termal özelliklerin sabit kaldığı varsayılmıştır.

Denklem 3.1, şarj,deşarj ve bekleme periyotları için aşağıda verilmiş olan sınır koşullarıyla nümerik çözüm yapılabilmektedir (Ekmekci ve diğ, 2021).

Şarj Periyodu:

$$0 \leq t \leq t_C, T_C(r, z, 0) = T_\infty$$

$$T_C(r_B, z \leq z_B, t) = T_C(r \leq r_B, z_B, t) = T_B^C, T_C(r_G, z, t) = T_\infty \quad (3.2)$$

$$\left(\frac{\partial T_C(r, z, t)}{\partial z} \right)_{z=0} = 0, T_C(r, H_G, t) = T_\infty$$

Bekleme Periyodu:

$$t_C \leq t \leq t_{SB}, T_{SB}(r, z, t_C) = T_C(r, z, t_C)$$

$$\left(\frac{\partial T_{SB}(r, z, t)}{\partial r} \right)_{\substack{r=r_B \\ z \leq z_B}} = \left(\frac{\partial T_{SB}(r, z, t)}{\partial r} \right)_{\substack{r < r_B \\ z=z_B}} = 0, T_{SB}(r_G, z, t) = T_\infty \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{\partial T_{SB}(r, z, t)}{\partial z} \right)_{z=0} = 0, T_{SB}(r, H_G, t) = T_\infty$$

Deşarj Periyodu:

$$t_{SB} \leq t \leq t_D, T_D(r, z, 0) = T_{SB}(r, z, t_{SB})$$

$$T_D(r_B, z \leq z_B, t) = T_D(r \leq r_B, z_B, t) = T_B^D, T_D(r_G, z, t) = T_\infty \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{\partial T_D(r, z, t)}{\partial z} \right)_{z=0} = 0, T_D(r, H_G, t) = T_\infty$$

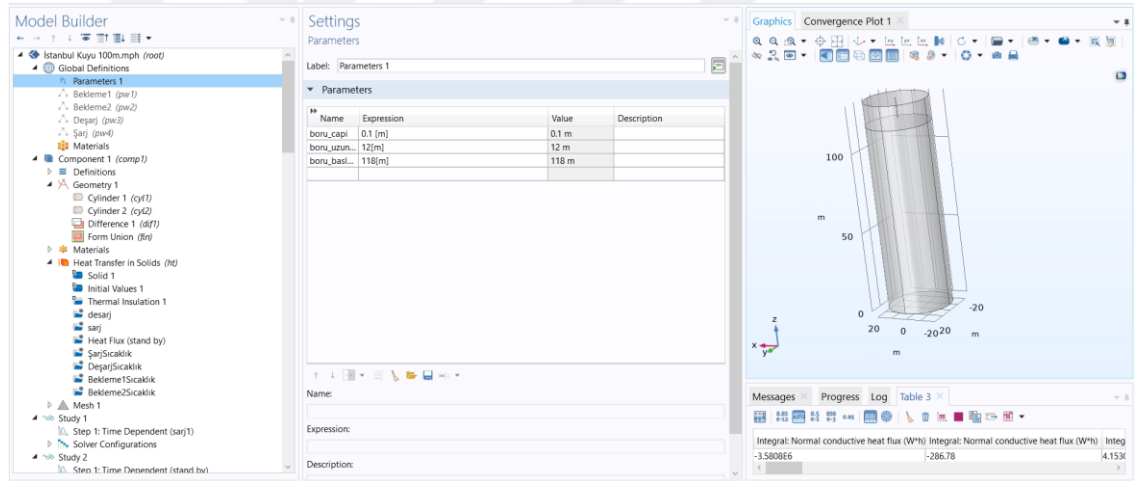
Isı değiştiricinin yüzeyi ile içinde dolaşan akışkan arasında çok az bir sıcaklık farkı vardır ve uzun süreli şarj-deşarj döngülerinde neredeyse eşit hale gelirler. Bu nedenle, analizler sırasında ısı değiştiricileri, sabit yüzey sıcaklığına sahip içi boş silindirler olarak ele alınmıştır. Isı değiştiricisinin yüzeyinde olan ısı transfer oranı,

$$\dot{Q} = -k \int_0^H 2\pi r_B \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_B} dz \quad (3.5)$$

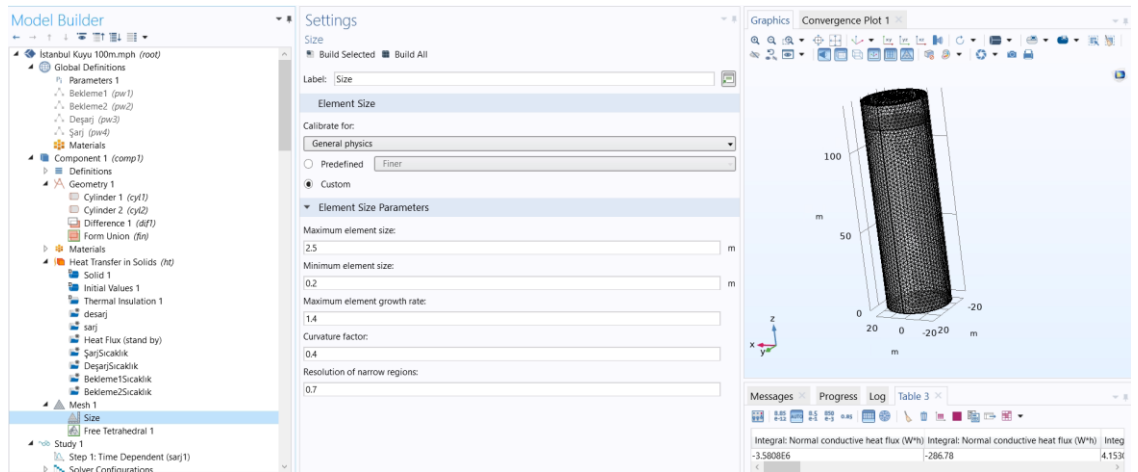
Denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada, H ısı değiştiricisinin derinliğidir. Isı değiştiricisinden olan toplam ısı enerji transferi ise;

$$Q = \int_0^t Q(t') dt' \quad (3.6)$$

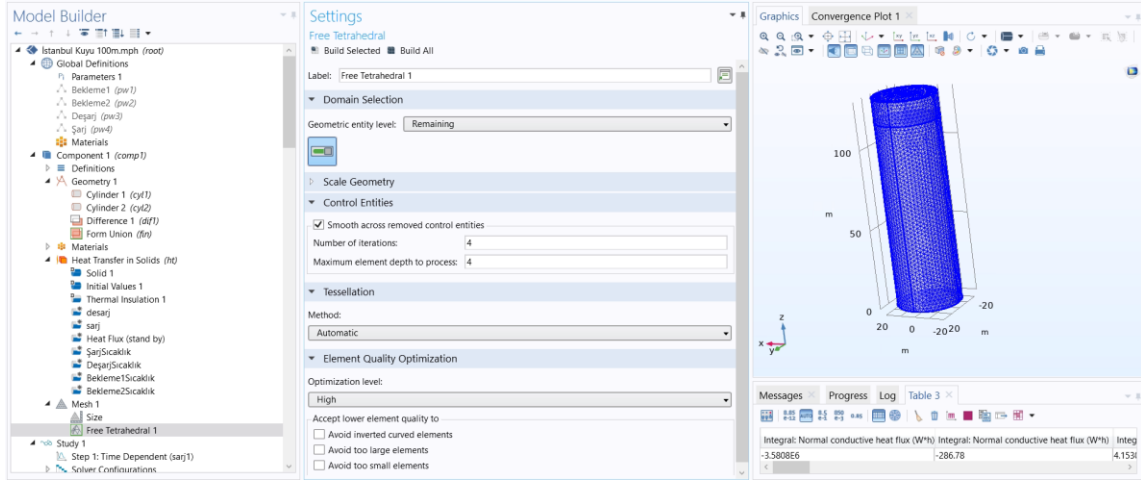
Denklemleri ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.5 ve 3.6 kullanılarak, şarj döneminde toprağa verilen enerji, Q_C , ve deşarj döneminde topraktan çekilen enerji, Q_D , hesaplanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada şarj prosesi yapılmadan topraktan çekilebilecek enerjiler, Q_D^{WC} , de hesaplanabilmektedir. Nümerik detayları verilen analiz için kurulan Comsol modeline ait parametreler Şekil 3.2 , Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Comsol Modeli Parametreler Görseli.



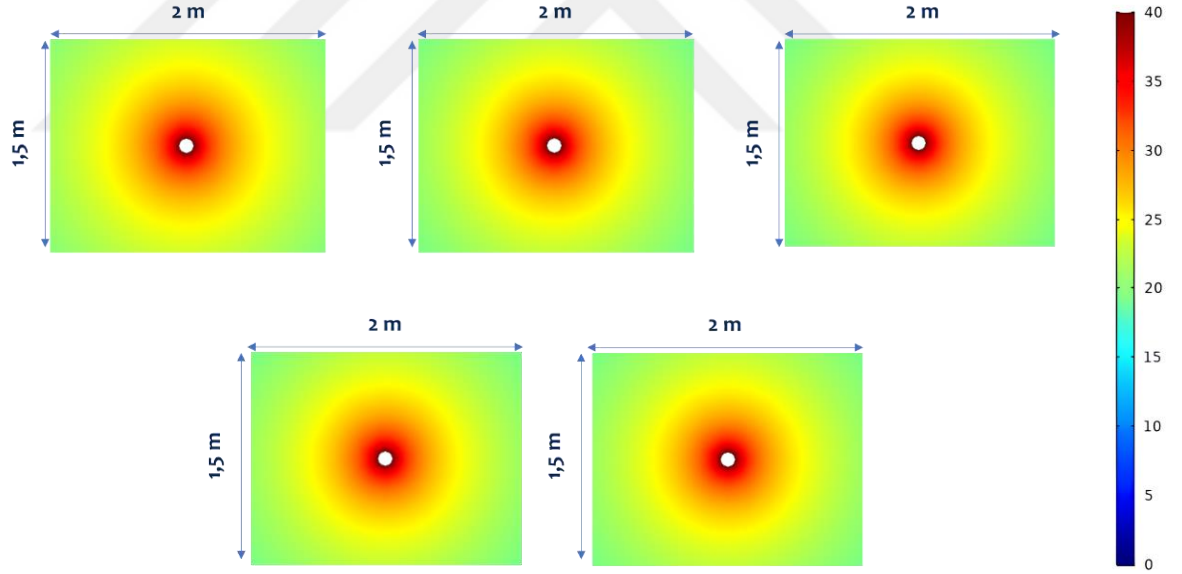
Şekil 3.3: Comsol Modeli Mesh Görseli 1.



Şekil 3.4: Comsol Modeli Mesh Görselfi 2.

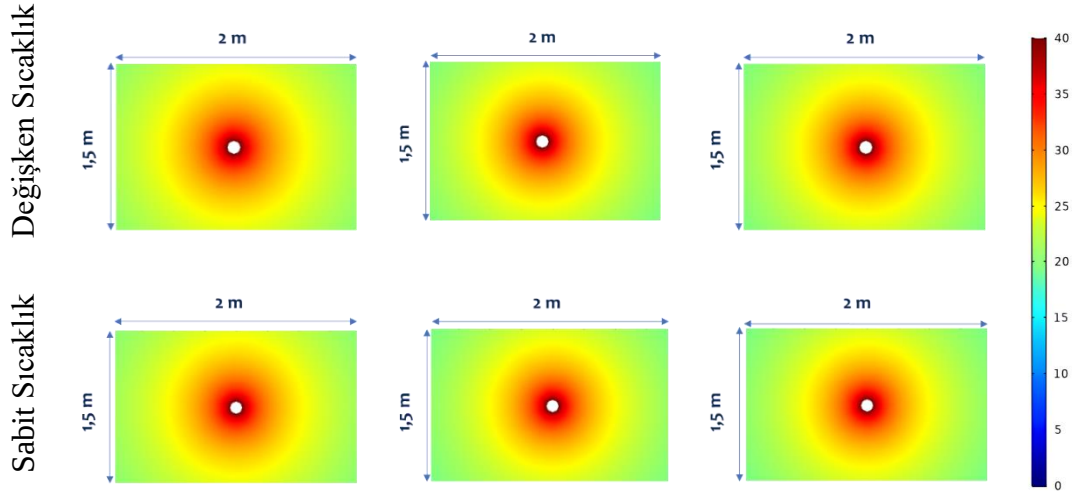
4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hazırlanan Comsol modeli ilk olarak İstanbulda kurulu 150 metrelik ısı değıştircisi için şarj, bekleme, deşarj, bekleme dğsnde 5 yıllık süre için analiz edilmiştir. Yüzey sıcaklığının etkisinin görülebilmesi adına, yıllık ortalama hava sıcaklığının tüm yılda sabit bir şekilde etkilediği ve mevsimsel olarak sıcaklık değişimlerinin her ay için uygulandığı durumlar için analizler tekrarlanmıştır. Bu noktada ilk olarak sırasıyla 10 m, 25 m, 40 m, 50 m, 75 m, 100 m ve 150 m derinlikleri için analiz sonuçları alınmıştır. Analizlere girdi olan sıcaklık değerleri 2021 yılı için NASA verilerinden alınmış olup 5 yıllık döngüler şeklinde kurgulanmıştır. Her döngü sonunda boru çevresinden alınan sıcaklık profilleri şekil 4.1 ve şekil 4.2’de gösterilmiştir.



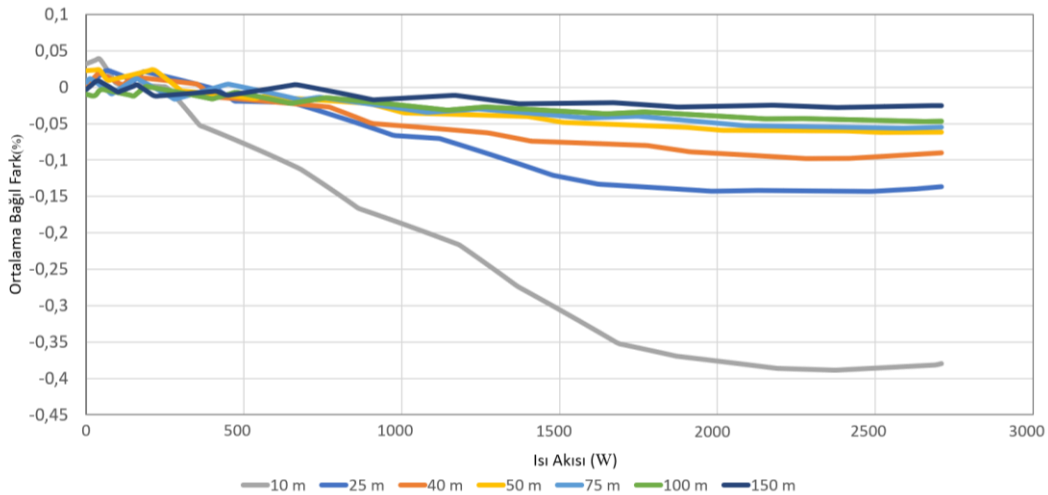
şekil 4.1: Döngü sonları sıcaklık profilleri.

şekil 4.1 ve şekil 4.2’de verilen sıcaklık profilinde döngüler st sıra için soldan sağa doğru 1. döngü, 2. döngü ve 3. döngü; alt sıra için 4. döngü ve 5. döngü olarak verilmiştir.



Şekil 4.2: Değişken sıcaklık ve ortalama sabit sıcaklık koşulları altında Döngü 1 - Döngü 3 - Döngü 5 Şarj sonu sıcaklık profilleri.

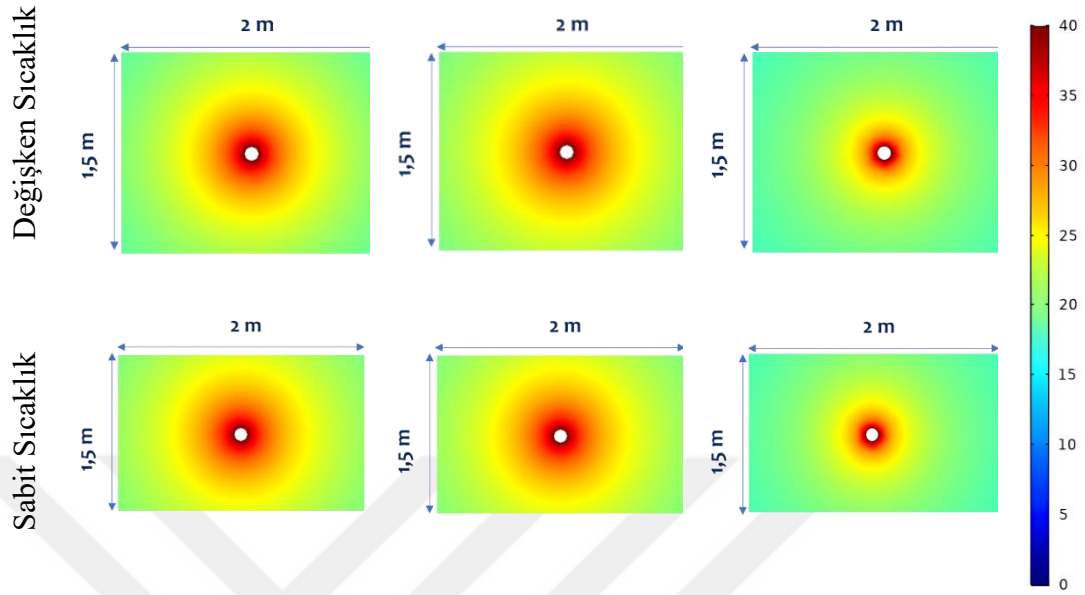
Kıyaslama, her derinlik için değişken sıcaklık (DS) ve ortalama sabit sıcaklık (OSS) değerleri kullanılarak yapılan analizlerdeki ısı akıları arasındaki bağıl fark baz alınarak yapılmıştır. Bağıl fark değeri her zaman için DS ve OSS ısı akıları arasındaki yüzdesel olarak $(Q_{DS} - Q_{OSS})/Q_{OSS}$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm zaman değerleri için yapılan bu hesaplamalar sonucu bağıl fark değişimlerini içeren grafik Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 25 m ile 10 m aralığında bağıl farkındığı derinlik değerlerine göre çok yüksek oranda değişim gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.3: 5. Döngü sonu derinliğe bağlı deşarj durumu bağıl fark grafiği.

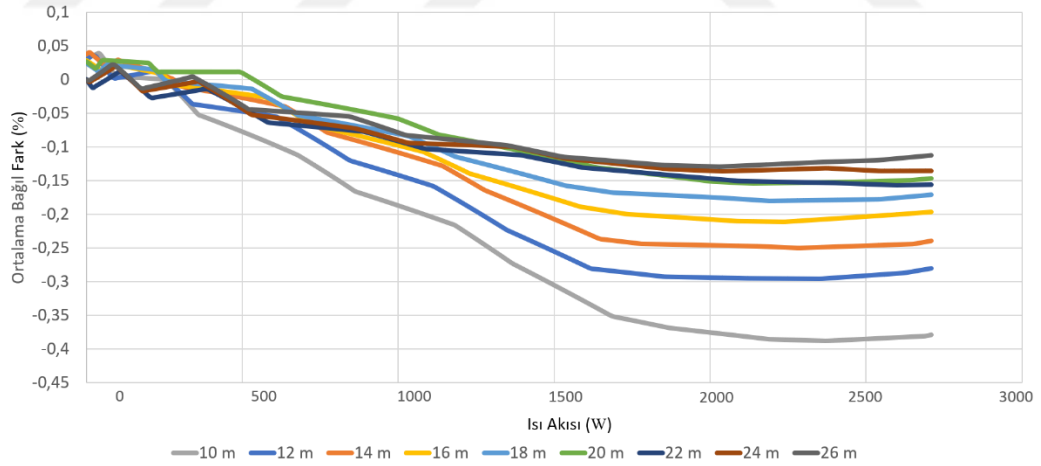
10 m ile 25 m aralığında tam değişim noktası belirlenebilmesi adına analizler 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, 18 m, 20 m, 22 m, 24 m ve 26 m derinlikleri için tekrarlanmıştır. Değişken ve ortalama sabit sıcaklık değerleri altında yapılan analizler sonucu 6 m, 12

m ve 18 m derinlikleri için her 5. döngü sonunda boru çevresinden alınan sıcaklık profilleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Değişken sıcaklık ve ortalama sabit sıcaklık koşulları altında 6m, 12 m ve 18 m için 5. Döngü şarj sonu sıcaklık profilleri.

Şekil 4.5'te bu analizler sonucu elde edilen bağıl fark değişim grafiği verilmiştir.



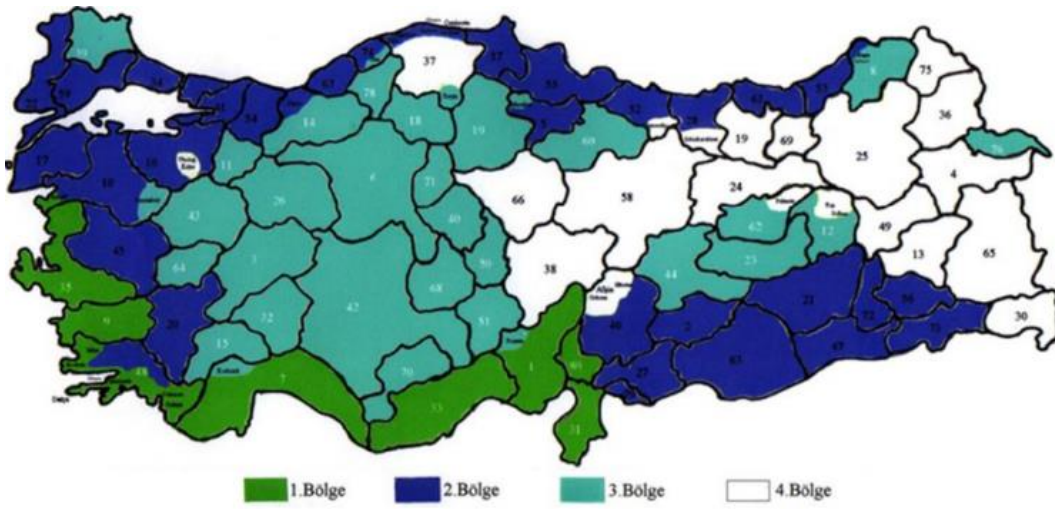
Şekil 4.5: 5. Döngü sonu derinliğe bağlı deşarj durumu bağıl fark grafiği.

Grafik incelendiğinde, sığ kuyu toprak kaynaklı ısı pompalarının mevsimsel olarak yüzeyde yaşanan değişimlerden etkilendiğini ve bu etkinin toprağın derinliklerine inildikçe azaldığı görülmektedir. Analizlerimiz, toprağın yaklaşık 12 metre derinliğine kadar mevsimsel sıcaklık değişiminden ciddi şekilde etkilendiğini ortaya koymuştur. Ancak 12 metre derinliğin altındaki toprak tabakaları, mevsimsel değişimlerden daha az etkilenmektedir.

Analiz kurgusu bozulmadan mevsimsel etkinin iklim şartlarının sertliğine göre boru derinliğine olan etkisini görebilmek adına yapılan analizler ile, İstanbul ve Kars şehirlerinde belirlenen konumlardan alınan sıcaklık değerlerine göre 40m derinlikten başlanarak 120m²'lik bir evin ısı ihtiyacını karşılayabilme durumu incelenmiştir. Isıl yük aşağıda verilen Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır,

$$Q = U_H A_H (T_H - T_{OUT}) \quad (4.1)$$

Burada U_H ısı transfer sabiti , TSE 825, 2013 kaynak alındığında iklim bölgeleri Şekil 4.6 da verilmiştir.



Şekil 4.6: TSE 825'e göre iklim bölgeleri.

Bu bölgelere göre tavsiye edilen U_H değerleri, Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: İklim bölgelerine göre ısı transfer katsayıları.

TS 825 İklim Bölgesi	Duvar [W/(m ² .K)]	Çatı [W/(m ² .K)]	Zemin [W/(m ² .K)]	Pencere [W/(m ² .K)]
1	0,7	0,45	0,7	2,4
2	0,6	0,4	0,6	2,4
3	0,5	0,3	0,45	2,4
4	0,4	0,25	0,4	2,4

Tavsiye edilen değerler baz alındığında birim alan başına düşen U_H değerini bulabilmek adına $U = 1 / (U_{Duvar} + U_{Çatı} + U_{Zemin} + U_{Pencere})$ formülü uygulanmıştır. Bu hesaplama göre istanbul için U değeri 0,25 bulunurken, Kars için ise 0,29 olarak hesaplanmıştır.

A_H efektif yüzey alanı, T_H ideal ortam sıcaklığı ve T_{out} ise dış ortam sıcaklığı olarak alınmaktadır. Bu formül üzerinden yapılan hesaba göre İstanbul için ısı yük değeri 3,97 *MWh* ve Kars için ise 11,20 *MWh* olarak hesaplanmıştır. Daha sonra Comsol üzerinde bu ısı yük değerlerinin hangi derinliklerde kurulan sistemlerde sağlanabildiğini görmek adına analizler İstanbul ve Kars konumları için tekrarlanmış ve her döngü için topraktan çekilen ısı değerleri *MWh* cinsinden Çizelge 4.2 de listelenmiştir.

Çizelge 4.2: Farklı derinliklere ve döngü sayılarına göre ısı yük değerleri.

	Derinlik	Döngü 1 (MWh)	Döngü 2 (MWh)	Döngü 3 (MWh)	Döngü 4 (MWh)	Döngü 5 (MWh)
İstanbul	12 m	4.15	4.07	4.05	4.04	4.04
	15 m	5.17	5.06	5.03	5.03	5.02
	20 m	7.82	7.58	7.53	7.51	7.49
Kars	30 m	11.63	11.27	11.18	11.14	11.12
	35 m	13.54	13.12	13.02	12.97	12.94

Alınan sonuçlar incelendiğinde İstanbul konumu için tek borehole kullanılarak hazırlanan sistem için minimum derinlik 12 m olarak bulunmuştur. Ancak ideal kullanımda ihtiyaç duyulan ısı yük değerini belirli bir marjda sağlamak istenirse kuyu tasarımı 15 m üzerinden yapılmalıdır. Bu sayede daha yüksek kullanım gerektiği durumlarda sorun yaşanmasının önüne geçilmiş olacaktır. Yine benzer bir değerlendirme ile Kars konumu için minimum derinlik 30m olarak görülmektedir. Yine ilgili marjı sağlayabilmek ve yüksek kullanım olması durumunda ihtiyacı karşılayabilmek adına 35m derinlik üzerinden tasarım yapılmalıdır.

Bu kuyu derinliklerinin yaratacağı farklılıklar sebebiyle maliyet analizi yapılmak istenirse temel olarak 3 ana başlık altında bu analiz yürütülebilir. İlk olarak İstanbul ve Kars konumlarında hem kuyu derinliklerinin farklı olması hem de işçiliğin farklılık gösterebilecek olmasından dolayı kuyu açma ve ısı pompası maliyetleri hesaba katılmalıdır. İkinci olarak iki konum için ısıtma yapılacak süreçler için ısıtma maliyetleri hesaba katılmalı ve son adımda ise ilgili yatırımın amortisman süresi hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar yardımıyla potansiyel bir projenin finansal açıdan değerlendirilmesi sağlanacaktır. Bu çalışma kapsamında alınan tüm maddi karşılıklar yerel tedarikçilerden alınmış ve herhangi bir oynama olmadan aktarılmıştır.

İlk olarak kuyu delinme ve ısı pompası maliyetlerine bakıldığında, İstanbul için 7 kw'lık bir ısı pompası kullanıldığı düşünülürse maliyeti 30.000 TL ve Kars için 12 kW'lık ortalama bir ısı pompası kullanıldığında maliyeti 67.500 TL olmaktadır. Bir diğer değişken ise delinecek kuyu uzunluğudur. Bu kapsamda delme işlemi metre başına 1.000 TL olarak alınmaktadır. İstanbul için bu maliyet 12.000 TL olurken, Kars'ta 35.000 TL olarak ortaya çıkmaktadır. Isınma maliyetleri ele alınacak olursa 2023 yılı Aralık ayı için doğalgaz maliyeti İGDAŞ verilerine göre kWh başına İstanbul için 0,46 TL ve KARGAZ verilerine göre Kars için 0,62 TL olarak belirtilmiştir. Bunlar baz alındığında ilgili tüketim değerlerinde (4 MWh ve 13 MWh) yıllık ısınma maliyeti İstanbul için 1.840 TL ve Kars için ise 8.060 TL olarak bulunmaktadır. Buradan yola çıkarak 42.000 TL toplam kurulum maliyeti ile yılda 1.840 TL'lik bir tasarruf yapmak İstanbul konumu için mümkünken, Kars konumunda ise 102.500 TL maliyet ile yıllık 8.060 TL'lik bir tasarruf yapmak mümkündür.

Alınan tüm bu sonuçlar incelendiğinde aynı ölçülerde ve isterlerdeki bir evin ısıtma ihtiyacının karşılanması için gereken sistem tasarlanırken, bölgesel olarak oluşan mevsimsel değişikliklerin sistem tasarımını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu sebeple sistem tasarımları yapılırken uygulama yapılacak alanın mevsimsel sıcaklık değerleri detaylıca analiz edilmelidir. Bu sayede ihtiyaç duyulan kuyu derinliği daha doğru şekilde belirlenerek sistem tasarımı daha efektif bir şekilde yapılabilecektir.

Ayrıca, ilerleyen yıllarda yapılacak araştırmalar, toprağın farklı derinliklerindeki sıcaklık değişimlerinin daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesiyle, sığ kuyu toprak kaynaklı ısı pompalarının performansını daha da artırabilir. Bu çalışma, sığ kuyu toprak kaynaklı ısı pompalarının daha etkili bir şekilde kullanılmasına yardımcı olacak önemli bir analiz sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Aresti, L., Florides, G. A., Skaliontas, A., & Christodoulides, P.** (2022). Environmental Impact of Ground Source Heat Pump Systems: A Comparative Investigation From South to North Europe. *İçinde Frontiers in Built Environment* (C. 8). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.914227>
- Aydın, M., Şişman A., Onbaşıoğlu S.** (2015). Toprak Isı Değiştiricilerinde Yeni Bir Isıl Tepki Yöntemi ve Performansın Parametrik İncelenmesi
- Aye, L.** (2020). Heat Pumps. *İçinde Managing Air Quality and Energy Systems* (ss. 617-631). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003043461-42>
- Boahen, & Choi.** (2019). A Study on the Performance of a Cascade Heat Pump for Generating Hot Water. *İçinde Energies* (C. 12, Issue 22, s. 4313). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12224313>
- Capeluto, I. G.** (2022). *The Unsustainable Direction of Green Building Codes: A Critical Look at the Future of Green Architecture.* *İçinde Buildings* (C. 12, Issue 6, s. 773). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings12060773>
- Chao, Z., Xiaodan, Z., Guanghui, Z., & Yin, L.** (2010). The Domestic Research Status of the Solar-Air Dual-Source Heat Pump. *İçinde 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA).* IEEE. <https://doi.org/10.1109/isdea.2010.213>
- Chen, J., Gao, X., Zheng, X., Miao, C., Zhang, Y., Du, Q., & Xu, Y.** (2019). Simulation of Soil Freezing and Thawing for Different Groundwater Table Depths. *İçinde Vadose Zone Journal* (C. 18, Issue 1, ss. 1-14). Wiley. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.08.0157>
- Curiel Yuste, J., Janssens, I. A., Carrara, A., & Ceulemans, R.** (2004). Annual Q10 of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *İçinde Global Change Biology* (C. 10, Issue 2, ss. 161-169). Wiley. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00727.x>
- Dannoura, M., Kominami, Y., Oguma, H., & Kanazawa, Y.** (2008). The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *İçinde Plant Root* (C. 2, ss. 14-18). Japanese Society for Root Research. <https://doi.org/10.3117/plantroot.2.14>
- Dec, D., Dörner, J., & Horn, R.** (2009). EFFECT OF SOIL MANAGEMENT ON THEIR THERMAL PROPERTIES. *İçinde Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* (C. 9, Issue 1). SciELO Agencia Nacional de Investigacion y Desarrollo (ANID). <https://doi.org/10.4067/s0718-27912009000100003>

- Delavar, H., & Sahebi, H.** (2020).). A sustainable mathematical model for design of net zero energy buildings. *Içinde Heliyon* (C. 6, Issue 1, s. e03190). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03190>
- Ekmekci, E., Ozturk, F. Z., & Sisman, A.** (2021). *Configurational Effects on Borehole Thermal Energy Storage Performance*. 1-5.
- Escorihuela, M. J., Chanzy, A., Wigneron, J. P., & Kerr, Y. H.** (2010). Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study. *Içinde Remote Sensing of Environment* (C. 114, Issue 5, ss. 995-1001). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.011>
- Gou, X., Fu, Y., Shah, I., Li, Y., Xu, G., Yang, Y., Wang, E., Liu, L., & Wu, J.** (2016). Research on a Household Dual Heat Source Heat Pump Water Heater with Preheater Based on ASPEN PLUS. *Içinde Energies* (C. 9, Issue 12, s. 1026). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en9121026>
- Li, H. X., Okolo, D. E., Tabadkani, A., Arnel, T., Zheng, D., & Shi, L.** (2023). *An integrated framework of ground source heat pump utilisation for high-performance buildings*. *Içinde Scientific Reports* (C. 13, Issue 1). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27704-2>
- Massarotti, N., Mauro, A., Normino, G., Vanoli, L., Verde, C., Allocca, V., Calcaterra, D., Coda, S., De Vita, P., Forzano, C., Palombo, A., & Cosenza, P.** (2021). Innovative Solutions to Use Ground-Coupled Heat Pumps in Historical Buildings: A Test Case in the City of Napoli, Southern Italy. *Içinde Energies* (C. 14, Issue 2, s. 296). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en14020296>
- Murphy, K., McCartney, J., & Henry, K.** (2014). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10(2), 179-195. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0298-4>
- Nguyen, H. V., Law, Y. L. E., Zhou, X., Walsh, P. R., Leong, W. H., & Dworkin, S. B.** (2021). *A Techno-economic Analysis of Heat-Pump Entering Fluid Temperatures, and CO2 Emissions for Hybrid Ground Source Heat Pump Systems*. Ryerson University Library and Archives. <https://doi.org/10.32920/14639664.v2>
- Pardiñas, Á. Á., Alonso, M. J., Diz, R., Kvalsvik, K. H., & Fernández-Seara, J.** (2017). State-of-the-art for the use of phase-change materials in tanks coupled with heat pumps. *Içinde Energy and Buildings* (C. 140, ss. 28-41). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.061>
- Patel, K. K., & Kar, A.** (2011). Heat pump assisted drying of agricultural produce—an overview. *Içinde Journal of Food Science and Technology* (C. 49, Issue 2, ss. 142-160). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0334-z>
- Pi Puig, M., Paniego, J. M., Medina, S., Rodríguez Eguren, S., Libutti, L., Lanciotti, J., De Antueno, J., Estrebou, C., Chichizola, F., & De Giusti, L.** (2019). Intelligent Distributed System for Energy Efficient Control. *Içinde Communications in Computer and Information Science* (ss. 51-60). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27713-0_5

- Raymond, J., Sirois, C., Nasr, M., & Malo, M.** (2017). *Evaluating the geothermal heat pump potential from a thermostratigraphic assessment of rock samples in the St. Lawrence Lowlands, Canada. İçinde Environmental Earth Sciences* (C. 76, Issue 2). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6398-y>
- Sattari, M. T., Avram, A., Apaydin, H., & Matei, O.** (2020). Soil Temperature Estimation with Meteorological Parameters by Using Tree-Based Hybrid Data Mining Models. *İçinde Mathematics* (C. 8, Issue 9, s. 1407). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/math8091407>
- Sekatia, A., Setyowati, E., Hardiman, G., & Harsritanto, B.** (2019). The Effect of Low Ventilation to Thermal Condition in Cathedral Church. *İçinde Proceedings of the 18th International Conference on Sustainable Environment and Architecture (SENVAR 2018). Proceedings of the 18th International Conference on Sustainable Environment and Architecture (SENVAR 2018).* Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/senvar-18.2019.1>
- Shakerin, M., Eikeskog, V., Li, Y., Thorgeir, H., & Nord, N.** (2021). Sizing and performance analyses of a combined heating and cooling system with the integration of short- and long-term storages. *E3s Web of Conferences*, 246, 07004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124607004>
- Sivasubramaniam, W., Wratten, S. D., & McErlich, A.** (1995). Monitoring the flight activity of the carrot rust fly, *Psila rosae*, in New Zealand. *İçinde New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* (C. 23, Issue 3, ss. 251-256). Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/01140671.1995.9513896>
- Skarphagen, H., Banks, D., Frengstad, B., & Gether, H.** (2019). Design considerations for borehole thermal energy storage (btes): a review with emphasis on convective heat transfer. *Geofluids*, 2019, 1-26. <https://doi.org/10.1155/2019/4961781>
- Soltani, M., M. Kashkooli, F., Dehghani-Sanij, A. R., Kazemi, A. R., Bordbar, N., Farshchi, M. J., Elmi, M., Gharali, K., & B. Dusseault, M.** (2019). A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *İçinde Sustainable Cities and Society* (C. 44, ss. 793-818). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.036>
- Spitler, J. and Gehlin, S.** (2015). Thermal response testing for ground source heat pump systems—an historical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1125-1137. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.061>
- Todorović, M. S., Ećim-Đurić, O., Nikolić, S., Ristić, S., & Polić-Radovanović, S.** (2015). Historic building's holistic and sustainable deep energy refurbishment via BPS, energy efficiency and renewable energy—A case study. *İçinde Energy and Buildings* (C. 95, ss. 130-137). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.011>
- U.S. EIA (2022).** Monthly Energy Review April 2022.
- Wang, X., Chen, R., Han, C., Yang, Y., Liu, J., Liu, Z., Guo, S., & Song, Y.** (2020). Response of shallow soil temperature to climate change on the Qinghai–Tibetan Plateau. *İçinde International Journal of Climatology* (C. 41, Issue 1, ss. 1-16). Wiley. <https://doi.org/10.1002/joc.6605>

- Widiatmojo, A., Chokchai, S., Takashima, I., Uchida, Y., Yasukawa, K., Chotpantarat, S., & Charusiri, P.** (2019). *Ground-Source Heat Pumps with Horizontal Heat Exchangers for Space Cooling in the Hot Tropical Climate of Thailand*. *Içinde Energies (C. 12, Issue 7, s. 1274)*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12071274>
- Witkowska, A., & Krawczyk, D. A.** (2020). Analysis of the Advisability of Using an Air-Source Heat Pump in a Single Family House in Poland and Spain. *Içinde The 9th Innovations-Sustainability-Modernity-Openness Conference (ISMO'20)*. Innovations-Sustainability-Modernity-Openness Conference. MDPI. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020051011>
- Wu, R.** (2009). Energy Efficiency Technologies – Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump. *Içinde Journal of Sustainable Development (C. 2, Issue 2)*. Canadian Center of Science and Education. <https://doi.org/10.5539/jsd.v2n2p14>
- Zarrella, A., Zecchin, R., Pasquier, P., Guzzon, D., Ciantia, M., De Carli, M., & Emmi, G.** (2018). Double source heat pump: A case study. *Içinde Proceedings of the IGSHPA Research Track 2018*. International Ground Source Heat Pump Association. International Ground Source Heat Pump Association. <https://doi.org/10.22488/okstate.18.000049>
- Zhang Huaguang, & Lilong Cai.** (2002). *Decentralized nonlinear adaptive control of an HVAC system*. *Içinde IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) (C. 32, Issue 4, ss. 493-498)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tsmcc.2002.807271>
- Zhang, Q., Li, Y., Hua, J., Niu, X., Hou, L., Chen, Z., & Ge, W.** (2021). Assessment of Energy Potential and Benefit under the Ground Source Heat Pump Air Conditioning System in Anqing Area of Eastern China. *Içinde M. Zucchi (Ed.), Geofluids (C. 2021, ss. 1-14)*. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/3271884>

Url-1

<<https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:HeatAndColdStorageWithHeatPump.svg>> Erişim Tarihi: 10.12.2023.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ferhat Can KOÇAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014 yılında ADELL Armatür ve Vana firmasında stajını gerçekleştirdi.
- 2015 yılında Buga Otis Asansör. firmasında stajını gerçekleştirdi.
- 2016 yılında ABB Elektrik firmasında stajını gerçekleştirdi.
- 2016 – 2017 yılları arasında Türk Hava Yolları firmasında proje stajı yaptı.
- 2018 – 2020 yılları arasında ELT Makine firmasında Makine Mühendisi olarak çalıştı.
- 2020 – 2021 yılları arasında Wittur Grup firmasında ARGE Mühendisi olarak çalıştı.
- 2021 - 2023 yılları arasında Profen İletişim Teknolojileri Firmasında Mekanik Tasarım Uzman Mühendisi olarak çalıştı
- 2023 yılından itibaren Atlas Magnetics Firmasında Kıdemli Mekanik Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Testing and Evaluation of The Core Material in Honeycomb Composite Structures According to The ASTM C393/C393M Standard”, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE AVIATION (2017)

