

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



BİGADIÇ JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ İÇİN
PLANLANAN EK ISITMA SİSTEMLERİNİN EKONOMİK ANALİZİ

ALİ KESKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Nadir İLTEN
Doç. Dr. Asiye ASLAN

BALIKESİR, OCAK 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Bigadiç Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi İçin Planlanan Ek Isıtma Sistemlerinin Ekonomik Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ali KESKİN

ÖZET

**BİGADIÇ JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ İÇİN
PLANLANAN EK ISITMA SİSTEMLERİNİN EKONOMİK ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ALİ KESKİN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ TUĞRUL AKYOL)**

BALIKESİR, OCAK - 2024

Jeotermal enerji üreterek hizmet veren ısıtma sistemlerinde kuyu sondaj çalışmaları, yalnız sistemler kurulurken değil, kuyuların zamanla işlevselliğini kaybedebilmesi nedeniyle belirli periyotlarla tekrarlanması gereken bir işletme maliyeti olabilmektedir. Sondaj maliyetleri sistemlerin yaşam ömürleri boyunca ortaya çıkan giderlerin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Diğer taraftan, jeotermal su çıkarmak ve bu sudan elde edilen ısıyı ısıtma yapılan mahallere dağıtmak gibi temel faaliyetler için jeotermal kuyu ve sirkülasyon pompaları sürekli olarak çalışır. Bu nedenle, jeotermal bölgesel ısıtma sistemleri ayrıca önemli bir elektrik tüketicisi konumundadır. Jeotermal akışkana katılan kabuklaşma önleyici kimyasallar, işletme maliyetleri açısından dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli gider olabilmektedir. Bigadiç Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi (JBIS), günümüzde büyük çoğunluğu konut olmak üzere 1.050 aboneye ısıtma hizmeti sunan Balıkesir'deki beş bölgesel ısıtma sisteminden biridir. Faaliyete girdiği ilk yıllardan günümüze kadar geçen süreçte, farklı fosil yakıtlarla çalışan sıcak su kazanlarıyla ısıtma desteği sunulan sistemde, günümüzde kömür kazanı ile ilave ısı güç sağlanmaktadır. Bu çalışmada, Bigadiç JBIS'nin mevcut çalışma koşulları ile sistemin farklı tür ve kapasitelerde ek ısıtma sistemleriyle desteklenmesi durumları için birim ısıtma enerji maliyetleri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen 20 yıllık seviyelendirilmiş ısı maliyeti (LCOH) analizi yardımıyla, mevcut kömür kazanına alternatif olarak ya da mevcut kömür kazanı ile birlikte sisteme dahil edilmesi düşünülen yeni doğal gaz kazanı veya yeni ısı pompası sistemlerinin optimum kapasiteleri belirlenmiştir. Buna göre, mevcut jeotermal enerjinin, sistemde hali hazırda kullanılan kömür kazanı ile 2.572 konut eşdeğerlik ısıtma yapılabilecek şekilde desteklenmesinin, birim ısıtma maliyetini en düşük yapan en ekonomik alternatif olduğu görülmüştür. Mevcut jeotermal enerjinin, 2.572 konut eşdeğerlik ısıtma yapılabilecek şekilde büyük kapasiteli bir ısı pompası sistemiyle desteklenmesi durumunun ise birim ısıtma maliyeti bakımından en ekonomik ikinci alternatif olduğu görülmüştür. Yeni ısıtma destek sistemleriyle, mevcut abone sayısı yerine daha fazla aboneye ısıtma hizmeti verilmesinin birim ısıtma enerjisi maliyetlerini %14-%50 arasında değişen oranlarda düşürdüğü görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Jeotermal enerji, bölgesel ısıtma, seviyelendirilmiş ısı maliyeti, hibrit ısıtma.

Bilim Kod / Kodları : 91408, 91444.

Sayfa Sayısı : 109

ABSTRACT

ECONOMIC ANALYSIS OF AUXILIARY HEATING SYSTEMS PLANNED FOR BIGADIÇ GEOTHERMAL DISTRICT HEATING SYSTEM

MSC THESIS

ALİ KESKİN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: DR. ÖĞR. ÜYESİ TUĞRUL AKYOL)

BALIKESİR, JANUARY - 2024

Well drilling in heating systems serving by generating geothermal energy can be an operating cost that needs to be repeated periodically, not only when the systems are installed, but also because the wells may lose their functionality over time. Drilling costs constitute a significant portion of the costs incurred during the lifetime of the systems. On the other hand, geothermal wells and circulation pumps operate continuously for basic activities such as extracting geothermal water and distributing the heat obtained from this water to the heated spaces. Therefore, geothermal district heating systems are also significant consumers of electricity. Anti-scaling chemicals added to the geothermal fluid can be another important expense that needs to be considered in terms of operating costs. Bigadiç Geothermal District Heating System (JBIS) is one of the five district heating systems in Balıkesir, providing heating services to 1.050 subscribers, mostly residential. From the first years of its operation until today, the system has provided heating support with hot water boilers operating with different fossil fuels, and today, additional thermal power is provided by coal fired boilers. In this study, unit heating energy costs are calculated for the current operating conditions of Bigadiç JBIS and for the cases where the system is supported with additional heating systems of different types and capacities. With the help of the 20-year levelized cost of heat (LCOH) analysis, the optimum capacities of the new natural gas boiler or new heat pump systems, which are considered to be included in the system as an alternative to the existing coal boiler or together with the existing coal boiler, were determined. Accordingly, it is seen that supplementing the existing geothermal energy with the coal boiler currently used in the system in such a way that 2.572 houses can be heated is the most economical alternative with the lowest unit heating cost. Supplementing the existing geothermal energy with a large capacity heat pump system, which can heat the equivalent of 2.572 houses, is the second most economical alternative in terms of unit heating cost. Providing heating services to more subscribers instead of the existing number of subscribers with new heating support systems has been found to reduce unit heating energy costs by 14%-50%.

KEYWORDS: Geothermal energy, district heating, levelized cost of heat, hybrid heating.

Science Code / Codes : 91408, 91444.

Page Number : 109

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| TABLO LİSTESİ | vii |
| SEMBOL LİSTESİ | ix |
| ÖNSÖZ | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 14 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 31 |
| 3.1 Bigadiç İlçesinin Tanıtımı | 31 |
| 3.2 Bigadiç Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi | 31 |
| 3.2.1 Hisarköy Jeotermal Sahası | 35 |
| 3.2.2 Isı Merkezi | 40 |
| 3.2.3 Boru Hatları..... | 43 |
| 3.2.4 Bigadiç GES..... | 45 |
| 3.3 Boru Hatlarında Isı Kaybı..... | 45 |
| 3.4 Seviyelendirilmiş Isı Maliyeti..... | 45 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI | 48 |
| 5. GENEL SONUÇLAR | 101 |
| 6. KAYNAKLAR | 104 |
| ÖZGEÇMİŞ | 109 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1: 2009 – 2020 Yılları arasında yenilenebilir enerjinin dünyadaki değişimi | 2 |
| Şekil 1.2: Bir kişinin karbon ayak izini oluşturan faaliyetleri..... | 2 |
| Şekil 1.3: Ülkemizde kullanılan enerji çeşitliliğinin orantısal analizi | 5 |
| Şekil 1.4: Türkiye'nin yıllara göre kurulu jeotermal elektrik santrali gücü..... | 6 |
| Şekil 1.5: Türkiye'nin yıllara göre kurulu hidroelektrik santrali gücü. | 6 |
| Şekil 1.6: Türkiye'nin yıllara göre kurulu rüzgar elektrik santrali gücü. | 7 |
| Şekil 1.7: Türkiye'nin yıllara göre biyokütle ve atık ısı enerjisi kurulu gücü..... | 8 |
| Şekil 1.8: Jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası..... | 10 |
| Şekil 1.9: Türkiye'nin jeotermal kaynak tablosu..... | 10 |
| Şekil 3.1: Bigadiç'in Balıkesir ilindeki konumu | 31 |
| Şekil 3.2: Bigadiç JBIS'de kullanılan bina ısıtma devresi tesisat şeması..... | 32 |
| Şekil 3.3: Bigadiç JBIS'nin mevcut çalışma şeması..... | 34 |
| Şekil 3.4: Hisarköy jeotermal sahası..... | 35 |
| Şekil 3.5: Hisarköy HK8 kuyusu. | 36 |
| Şekil 3.6: Hisarköy 9. Sondaj kuyusu | 37 |
| Şekil 3.7: Ana gaz seperatörü şeması | 39 |
| Şekil 3.8: Ana gaz seperatörü..... | 39 |
| Şekil 3.9: Isı merkezinin görüntüsü | 40 |
| Şekil 3.10: Bigadiç kömür kazan ünitesi..... | 42 |
| Şekil 3.11: Kazanlarda yakılan linyit kömürü..... | 43 |
| Şekil 3.12: Bigadiç ile Hisarköy arasındaki ana isale hattı..... | 45 |
| Şekil 3.13: Bigadiç ilçesi Okçular mahallesinde yer alan GES..... | 46 |
| Şekil 4.1: Bigadiç ilçesi ısıtma derece-saat değerlerinin yıllara göre değişimi..... | 49 |
| Şekil 4.2: Bigadiç ilçesine ait son 13 yıllık aylık ortalama ve aylık minimum dış hava sıcaklık değerleri..... | 50 |
| Şekil 4.3: Bigadiç JBIS'de 100 m ² 'lik bir konutun aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı | 54 |
| Şekil 4.4: Aylara göre Bigadiç JBIS ısı merkezine giren jeotermal akışkanın ortalama giriş-çıkış sıcaklıkları..... | 55 |
| Şekil 4.5: Doğal gaz kazanının tek ısı destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi..... | 58 |
| Şekil 4.6: Isı pompası sisteminin tek ısı destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi..... | 59 |
| Şekil 4.7: Bigadiç JBIS'de farklı konut sayılarına göre tekli ısıtma destek sistemi kullanımında yıllık ısıtma enerjisi değeri..... | 62 |
| Şekil 4.8: Doğal gaz kazanının ile mevcut kömür kazanının ikili destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi..... | 63 |
| Şekil 4.9: Isı pompası ile mevcut kömür kazanının ikili destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi..... | 64 |
| Şekil 4.10: Bigadiç JBIS'de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarına göre yıllık ısıtma enerjisi değerleri..... | 71 |
| Şekil 4.11: Yıllara göre ülkemiz enflasyon değerleri | 75 |
| Şekil 4.12: Yıllara göre ülkemizdeki asgari ücretin işverene maliyeti..... | 77 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.13: Yıllara göre sanayi elektriği birim fiyatının değişimi | 78 |
| Şekil 4.14: Yıllara göre doğal gaz birim fiyatının değişimi | 79 |
| Şekil 4.15: Yıllara göre kömür birim fiyatının değişimi | 79 |
| Şekil 4.16: Jeotermal enerjiye tekli ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %0) | 81 |
| Şekil 4.17: Jeotermal enerjiye tekli ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %60)..... | 82 |
| Şekil 4.18: Jeotermal enerjiye doğalgaz + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES% 0)..... | 83 |
| Şekil 4.19: Jeotermal enerjiye doğalgaz + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES% 60)..... | 83 |
| Şekil 4.20: Jeotermal enerjiye ısı pompası + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES% 0)..... | 84 |
| Şekil 4.21: Jeotermal enerjiye ısı pompası + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES% 60)..... | 85 |
| Şekil 4.22: Farklı ısıtma destek sistemlerinde görülen en düşük ısıtma maliyeti konut sayıları..... | 85 |
| Şekil 4.23: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1562 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 87 |
| Şekil 4.24: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1562 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 87 |
| Şekil 4.25: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1562 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 88 |
| Şekil 4.26: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1562 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 88 |
| Şekil 4.27: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 89 |
| Şekil 4.28: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 89 |
| Şekil 4.29: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 90 |
| Şekil 4.30: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri dağılımı (GES % 60)..... | 90 |
| Şekil 4.31: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1045 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.32: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1045 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 92 |
| Şekil 4.33: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1045 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 92 |
| Şekil 4.34: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1045 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 93 |
| Şekil 4.35: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 93 |
| Şekil 4.36: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 94 |
| Şekil 4.37: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 94 |
| Şekil 4.38: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 95 |
| Şekil 4.39: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 96 |
| Şekil 4.40: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 0)..... | 96 |
| Şekil 4.41: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 97 |
| Şekil 4.42: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES % 60)..... | 97 |
| Şekil 4.43: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES% 0)..... | 98 |
| Şekil 4.44: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES% 0)..... | 99 |
| Şekil 4.45: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES% 60)..... | 99 |
| Şekil 4.46: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değeri (GES% 60)..... | 100 |

TABLO LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Tablo 1.1: Çeşitli enerji santrallerine ait gaz emisyonları..... | 13 |
| Tablo 3.1: Hisarköy jeotermal sahasındaki kuyuların açılış özellikleri..... | 38 |
| Tablo 3.2: Eşanjörlerin teknik özellikleri..... | 41 |
| Tablo 3.3: Sirkülasyon pompalarının teknik özellikleri..... | 42 |
| Tablo 3.4: Bigadiç JBIS şehir dağıtım hatlarındaki boruların özellikleri | 44 |
| Tablo 4.1: Bigadiç ilçesi 2008-2022 yılları için hesaplanan aylık ısıtma derece-saat değerleri | 48 |
| Tablo 4.2: Bigadiç ilçesinde farklı dış hava sıcaklık aralılarının yıllık gözlenme süresi | 49 |
| Tablo 4.3: Birim alan başına aylık ortalama ısı tüketim değerleri modellemesinde kullanılan veriler | 51 |
| Tablo 4.4: Matematiksel model tahminleri ile gözlenen yanıtların karşılaştırılması..... | 52 |
| Tablo 4.5: Bigadiç JBIS’de ısıtılan mahaller için farklı negatif dış hava sıcaklıklarına göre ortalama ısı tüketim değerleri | 53 |
| Tablo 4.6: Bigadiç JBIS’de ısıtılan mahaller için farklı pozitif dış hava sıcaklıklarına göre ortalama ısı tüketim değerleri | 53 |
| Tablo 4.7: Bigadiç JBIS’de yer alan bir konutun farklı dış hava sıcaklıklarına göre yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı | 54 |
| Tablo 4.8: Bigadiç JBIS’de üretilen jeotermal enerji ile ek ısıtma yapılmadan ısıtılacak konut sayısı..... | 55 |
| Tablo 4.9: Bigadiç JBIS’de ilave ısı güç ile ısıtılacak yeni konut sayıları..... | 56 |
| Tablo 4.10: Bigadiç JBIS’de tekli ısıtma destek sistemi kullanımı için jeotermal enerji ve alternatif enerji kullanımının yapıldığı dış hava sıcaklıkları | 60 |
| Tablo 4.11: Bigadiç JBIS’de tekli ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarındaki ısı güç ve enerji değerleri..... | 61 |
| Tablo 4.12: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için Jeotermal enerji ve alternatif enerji kullanımının yapıldığı dış hava sıcaklıkları | 65 |
| Tablo 4.13: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarındaki ısı güç değerleri | 66 |
| Tablo 4.14: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 2572 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 67 |
| Tablo 4.15: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1929 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 67 |
| Tablo 4.16: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1562 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 68 |
| Tablo 4.17: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1323 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 68 |
| Tablo 4.18: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1163 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 69 |
| Tablo 4.19: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1045 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 69 |
| Tablo 4.20: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 960 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri..... | 69 |

| | |
|--|-----|
| Tablo 4.21: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 894 konut ısıtmada karşılaşılan ısıl güç ve enerji değerleri..... | 70 |
| Tablo 4.22: Bigadiç JBIS’de farklı ilave ısıtma gücü ihtiyaçlarını karşılamak için seçilen doğal gaz kazanlarına ait ilk yatırım maliyetleri | 72 |
| Tablo 4.23: Bigadiç JBIS’de farklı ilave ısıtma gücü ihtiyaçlarını karşılamak için seçilen ısı pompası sistemlerine ait ilk yatırım maliyetleri | 73 |
| Tablo 4.24: Döviz kurlarındaki yıllık değişimler | 75 |
| Tablo 4.25: Yıllara göre asgari ücret değerleri..... | 76 |
| Tablo 4.26: Yıllara göre sanayi orta gerilim elektrik birim fiyatları | 77 |
| Tablo 4.27: Yaşam döngüsü maliyet analizinde kullanılan çeşitli maliyetlere ait birim fiyatlar ve yıllık artış oranları | 80 |
| Tablo 4.28: Yaşam döngüsü maliyet analizinde kullanılan döviz kurları ve iskonto oranı | 80 |
| Tablo 4.29: Farklı ısıtma destek sistemlerinin yalnız jeotermal enerji kullanımına göre sağladığı avantajlar | 86 |
| Tablo 4.30: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1562 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması..... | 88 |
| Tablo 4.31: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması..... | 91 |
| Tablo 4.32: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1045 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması..... | 93 |
| Tablo 4.33: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması..... | 95 |
| Tablo 4.34: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması..... | 98 |
| Tablo 4.35: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerinin bugünkü değerlerinin karşılaştırması | 100 |

SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | | |
|----------------------|--|------|
| <i>d</i> | Boru çapı | m |
| <i>F</i> | Yakıt maliyeti | TL |
| <i>h</i> | Boru döşeme derinliği | m |
| <i>H</i> | Isı üretimi | kWh |
| <i>I</i> | Yatırım maliyeti | TL |
| <i>k</i> | Isı iletim katsayısı | W/mK |
| <i>M</i> | İşletme ve bakım maliyeti | TL |
| <i>N</i> | Projenin ekonomik ömrü | yıl |
| <i>Q̇</i> | Isı akımı | kW |
| <i>r</i> | İskonto oranı | - |
| <i>R²</i> | Belirleme katsayısı | - |
| ABD | Amerika Birleşik Devletleri | |
| ANOVA | Varyans analizi | |
| COP | Performans katsayısı | |
| EES | Mühendislik denklem çözümü | |
| GES | Güneş enerji santrali | |
| GHP | Jeotermal ısı pompası | |
| HP | Isı pompası | |
| IDS | Isıtma derece saat | |
| JBIS | Jeotermal bölgesel ısıtma sistemi | |
| LCOH | Seviyelendirilmiş ısı maliyeti analizi | |
| PVGIS | Avrupa Komisyonu Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi | |
| REPA | Rüzgâr enerjisi potansiyeli atlası | |
| SOS | Saatlik ortalama sıcaklık | |
| TÜFE | Tüketici Fiyat Endeksi | |

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda desteğini benden esirgemeyen çok kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL'a en içten teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Çalışmamda desteklerini sunan Sayın Prof. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam esnasında her türlü desteği sağlayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yapmış olduğum tez çalışmamda teknik desteği sağlayan arkadaşım Göktuğ GEREYHAN'a ve Arş. Gör. Abdullah DÜZCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2024

Ali KESKİN

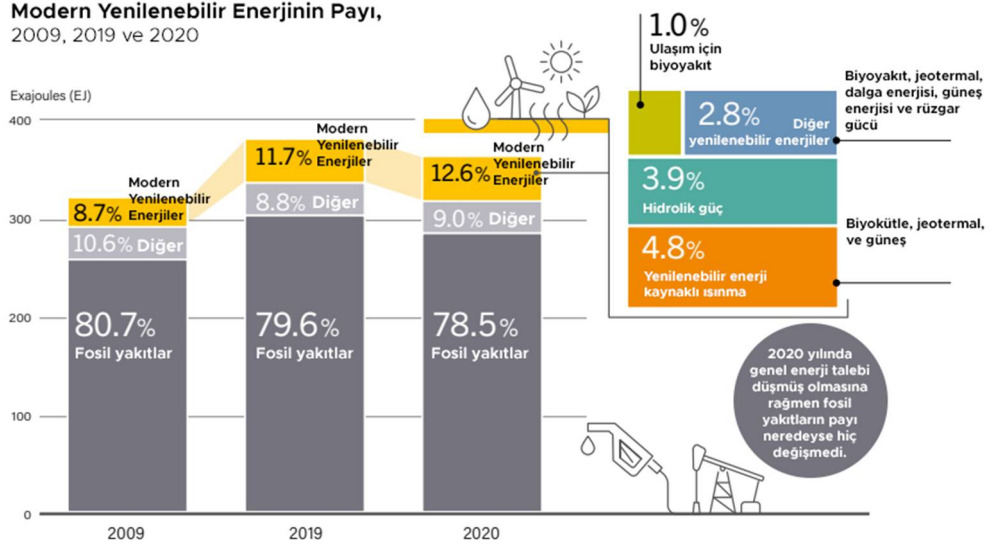


1. GİRİŞ

Enerjinin pek çok farklı forma dönüşebilmesi nedeniyle, kapsamlı bir tanımını yapmak zor olsa da genellikle kabul edilen tanım şudur: Enerji, bir sistemin iş yapma yeteneğidir. Enerji ihtiyacı dünya genelinde nüfus artışıyla birlikte giderek artmaktadır. Sanayi ve teknoloji ilerledikçe, insanların günlük hayatta enerjiye olan bağımlılığı da artmaktadır. Gelecek nesiller için daha temiz bir çevre ve yaşam için yenilenebilir enerjinin üretimi ve kullanımının yaygınlaştırılması oldukça kritik bir öneme sahiptir.

Türkiye'nin elektrik üretiminin büyük bir kısmı hala fosil yakıtlardan, özellikle kömürden sağlanmaktadır. Hidroelektrik enerji ikinci sırada yer alsa da üçüncü sırada yine bir fosil yakıt olan doğalgaz bulunmaktadır. Türkiye, yenilenebilir enerji potansiyeline 2000'li yılların başından beri ciddi yatırımlar yapmış bir ülke konumundadır. Özel sektörün enerji alanındaki girişimlerinin artmasıyla birlikte, gelecekte ülkelerin elektrik ihtiyacının büyük bir bölümünün yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması beklenmektedir.

Yenilenebilir enerji, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki var olan enerji akışından elde edilen enerji çeşididir. Bu kaynaklar, doğal oldukları için aldıkları enerji miktarı ne olursa olsun kendilerini sürekli yenileyebildikleri için aynı zamanda temiz enerji olarak da nitelendirilirler. Temiz enerji üretiminin ve kullanımının artması, gelecek nesillerin daha yaşanabilir bir dünyada yaşamalarına yardımcı olacaktır. Bu nedenle, tükenmeyen enerji olarak da adlandırılan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin kullanımının teşvik edilmesi son derece önemlidir (Şekil 1.1) [1].



Şekil 1.1: 2009 – 2020 Yılları arasında yenilenebilir enerjinin dünyadaki değişimi.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını diğerlerinden ayıran en önemli özellik, sürdürülebilir ve temiz olmalarıdır. Doğanın dengesini bozmadan, çevreye uyumlu bir şekilde üretilen enerji, gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmayı sağlamaktadır.

Karbon ayak izi, birim karbondioksit cinsinden ölçülen, üretilen sera gazı miktarı açısından insan faaliyetlerinin çevreye verdiği zararın ölçüsüdür ve iki ana parçadan oluşur: doğrudan birincil ayak izi ve dolaylı ikincil ayak izi. Birincil ayak izi, evsel enerji tüketimi ve ulaşım dahil olmak üzere fosil yakıtların yanmasından ortaya çıkan doğrudan CO₂ emisyonlarının, ikincil ayak izi ise kullandığımız ürünlerin yaşam döngüleri boyunca imalatı ve en sonunda bozulmalarıyla ortaya çıkan dolaylı CO₂ emisyonlarının ölçüsüdür.[2] (Şekil 1.2) [3].



Şekil 1.2: Bir kişinin karbon ayak izini oluşturan faaliyetleri.

Her gelişmiş devletin enerji kullanım politikaları çeşitlilik gösterir. Ülkelerin enerji politikaları, kaynakları, enerjinin çevresel etkileri ve stratejik hedefleri farklıdır. Önemli olan enerji kullanımının sürdürülebilirliği, verimliliği ve kaynakların çeşitlendirilmesidir. Bazı büyük devletlerin enerji politikaları şunlara odaklanabilir:

Amerika Birleşik Devletleri: ABD, enerji politikalarında köklü bir değişim geçirmektedir. Fosil yakıtların yanı sıra yenilenebilir enerjiye de büyük yatırım yapmaktadır. Yerli petrol ve doğalgaz üretimini artırma çabalarının yanı sıra temiz enerji teknolojilerine de kendisini geliştirmektedir.

Çin: Çin, enerji alanında büyük bir tüketici ve üretici konumundadır. Fosil yakıtların yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yaparak ve temiz enerji teknolojilerini geliştirerek çevresel etkileri azaltmaya çalışmaktadır.

Avrupa Birliği Ülkeleri: AB ülkeleri, karbon salınımını azaltmak için kapsamlı politikalar benimsemiş durumdadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, enerji verimliliği ve karbonsuzlaştırma hedefleri gibi konularda çeşitli planlar ve yasal düzenlemeler yapmaktadır.

Rusya: Rusya, enerji zengini bir ülke ve enerji politikaları genellikle doğalgaz ve petrol ihracatına dayanmaktadır. Ülkenin enerji politikaları genellikle enerji ihracatına dayalı stratejiler üzerine kurulmaktadır.

Hindistan: Hindistan, hızla büyüyen bir ekonomi ve enerji talebi artışıyla karşı karşıyadır. Ülke, fosil yakıtlardan temiz enerji kaynaklarına geçiş yapmak için çeşitli stratejiler geliştirmekte ve bu alanda çalışmalarını artırmaktadır.

Her ülkenin enerji politikaları, ekonomik, çevresel ve stratejik faktörlerle şekillenmektedir. Bu politikalar, genellikle ulusal kaynaklar, dışa bağımlılık, çevresel etkiler, teknolojik gelişmeler ve uluslararası ilişkiler gibi pek çok faktörleri içermektedir. Bu politikaların zaman içinde değişebileceğini ve güncellenebileceğini unutmamak gerekir.

Dünya genelinde enerji politikaları ve bunların karşılaştığı sınırlamalar oldukça çeşitlidir. Ancak, bazı enerji kaynakları sınırlıdır ve sürdürülebilirliği söz konusu değildir. Dünya genelinde birçok ülke, karbon salınımını azaltma hedeflerini belirlemiştir. Bu hedeflere ulaşmak için yenilenebilir enerjiye geçiş, karbonsuz enerji kaynaklarının teşviki ve fosil yakıtların azaltılması gibi politikalar yürütülmektedir. Ancak, bu geçiş bazı ekonomik ve altyapı zorluklarını doğurabilir. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik politikalar, enerji tüketimini azaltmayı ve kaynakların daha etkin kullanılmasını hedeflemektedir.

Yenilenebilir enerji sistemleri diğer enerji sistemlerine göre yüksek teknoloji gerektirmediğinden kolayca kurulabilir sistemlerdir ve ömür boyu kullanım sağladığından uzun vadede oldukça ekonomik bir enerji çözümü sunmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri sayesinde ihtiyaç duyduğunuz ısı ve elektrik üretiminizi sağlayarak, faturalardan tasarruf edebilir; enerji fazlasını satarak kâra geçebilmektedir. Yenilenebilir enerjinin türleri ve kapsamı şu şekilde ifade edilebilir;

Güneş Enerjisi: Güneş içerisinde bulunan hidrojenlerin helyuma dönüşmesi sırasında açığa çıkan ışıma enerjilerine güneş enerjisi denilmektedir. Güneşten gelen ışık ve ısı enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller veya termal sistemler aracılığıyla elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Güneş enerjisi, güneşin bol ve yaygın olarak bulunduğu yerlerde önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Rüzgâr Enerjisi: Rüzgâr türbinleri, rüzgârın mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgâr enerjisi; atmosferdeki sıcak ve soğuk havanın yer değiştirmesi sonucu oluşan rüzgârın kinetik enerjisinin öncelikle mekanik daha sonrasında da elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Rüzgâr enerjisi, genellikle geniş açık alanlarda, kıyı bölgelerinde veya rüzgârın bol olduğu alanlarda kullanılmaktadır.

Hidroelektrik Enerji: Su gücü, barajlar veya akışkanlar aracılığıyla elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Su türbinleri, akarsular veya barajlardaki suyun kinetik enerjisini elektrik

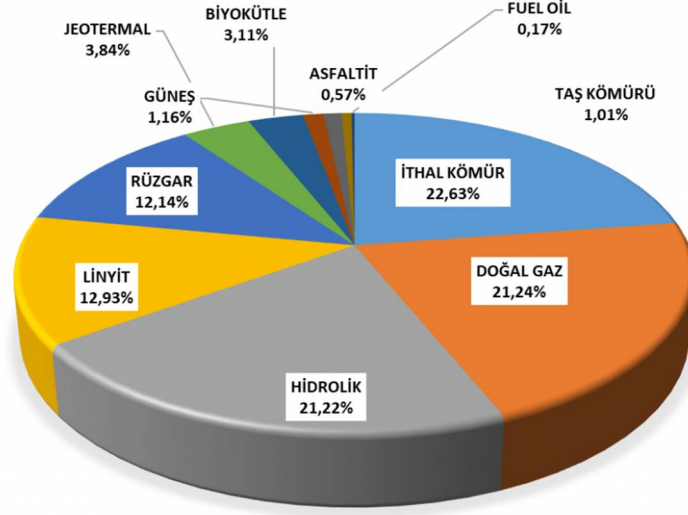
enerjisine çevmektedir. Hidroelektrik enerji, uzun vadeli ve güvenilir bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Biyokütle Enerjisi: Organik madde veya biyolojik atıkların yanması, fermantasyonu veya kimyasal dönüşümü ile elde edilmektedir. Biyokütle enerjisi, biyokütle yakıtlarının (ahşap, atıklar, tarımsal ürün artıkları vb.) enerji üretmek için kullanılmasıyla elde edilmektedir.

Jeotermal Enerji: Yer altındaki sıcak kayaların veya sıcak suyun, buhar veya suyun yüzeye çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Jeotermal enerji, elektrik üretimi, termal ve sağlık turizmi, endüstriyel mineral eldesi, ısınma (sera ve konut) gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

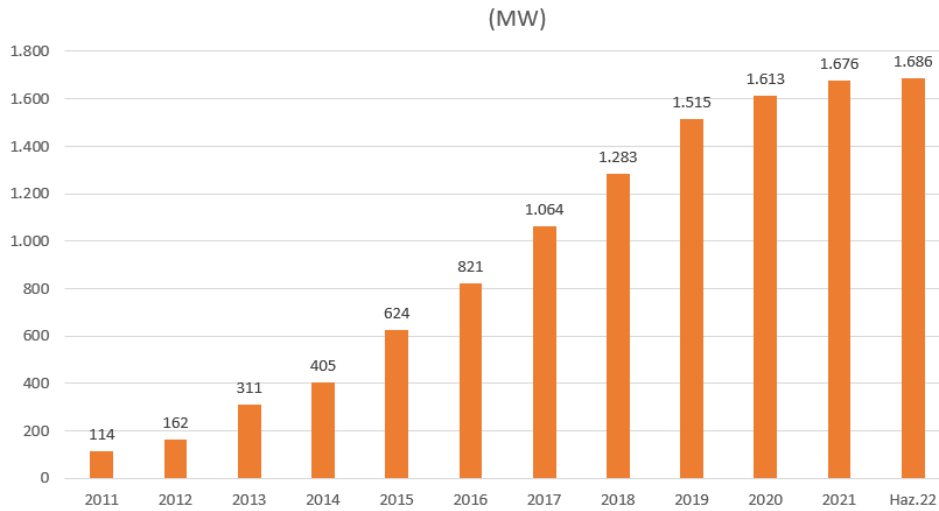
Bu yenilenebilir enerji kaynakları, temiz ve sürdürülebilir enerji sağlamak için kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji türlerinin kullanımı, karbon salınımını azaltmaya, enerji bağımsızlığını artırmaya ve çevresel etkileri en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Her bir kaynağın avantajları ve dezavantajları bulunmakla birlikte, genellikle bu kaynaklar çevresel etkileri azaltma ve enerjiyi sürdürülebilir bir şekilde sağlama potansiyeline sahiptir.

Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça zengin olup bu alandaki yatırımları gün geçtikçe artmaktadır. EPDK'nın son güncel verilerine göre, geçen yıllara oranla yenilenebilir enerjinin yükselişini görmektedir (Şekil 1.3) [4]. Özellikle Ege ve Marmara bölgelerinde rüzgâr çiftlikleri kurularak, bu potansiyel kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye, dünyanın önde gelen rüzgâr enerjisi üreticilerinden biri haline gelmiştir. Son yıllarda fotovoltaik panellerin kurulumuyla güneş enerjisi üretimine büyük önem verilmektedir. Özellikle jeotermal enerji, ülkemizin bazı bölgelerinde aktif olarak kullanılmaktadır.



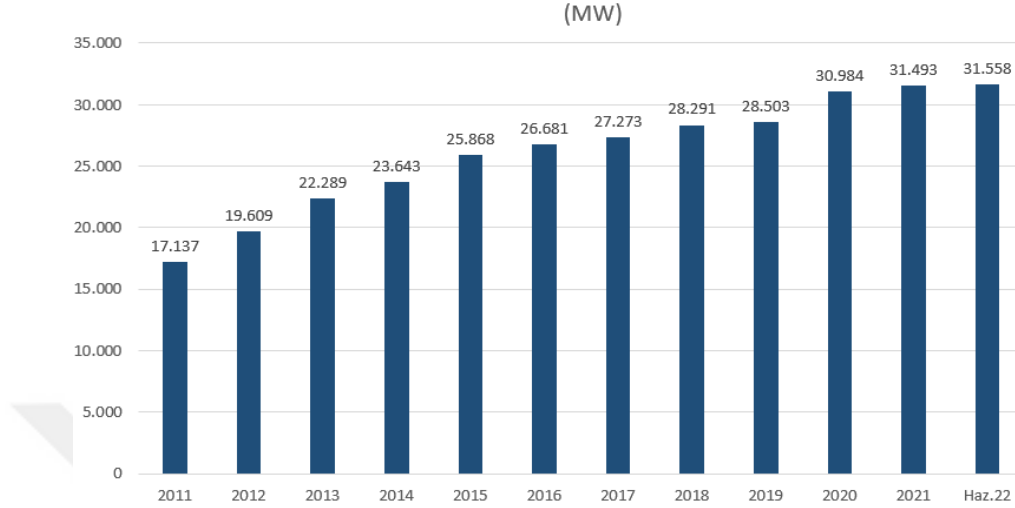
Şekil 1.3: Ülkemizde kullanılan enerji çeşitliliğinin orantısal analizi.

Haziran 2022 itibariyle ülkemizde, kurulu jeotermal elektrik santrali gücü 1686 MWe'ye ulaşmıştır (Şekil 1.4) [4]. Bu değer, ülkemizin toplam elektrik kurulu gücünün %1,66'sını oluşturmaktadır.



Şekil 1.4: Türkiye'nin yıllara göre kurulu jeotermal elektrik santrali gücü.

Haziran 2022 itibariyle ülkemizde, kurulu hidroelektrik santral gücü 31.558 MWe'ye ulaşmıştır (Şekil 1.5) [4]. Bu değer, ülkemizin toplam elektrik kurulu gücünün %31'ini oluşturmaktadır.

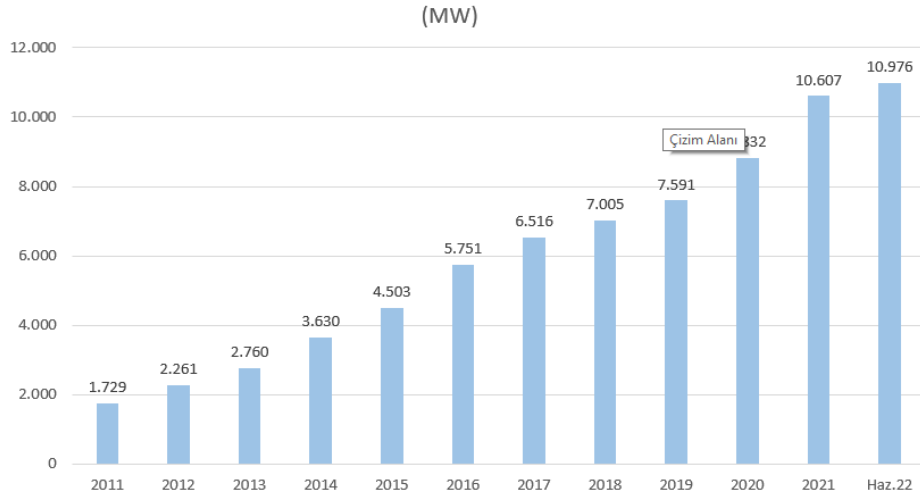


Şekil 1.5: Türkiye'nin yıllara göre kurulu hidroelektrik santrali gücü.

2006 yılında, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası, REPA-V1 adı altında ortalama rüzgâr hızları, 200 m yatay çözünürlükte elde edilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Bu verilere göre, yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri yıllık ortalama rüzgâr hızlarına sahip kullanılabilir alanlarda, kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği öngörülmüştür. Bu tahminlere göre, Türkiye genelinde kurulabilecek rüzgâr elektrik santrallerinin toplam kapasitesi 47.849,44 MW olarak belirlenmiştir.

Ancak, bu potansiyele karşılık gelen toplam alan, Türkiye'nin yüzey alanının %1,30'unu oluşturmaktadır. REPA tarafından elde edilen rüzgâr kaynak bilgileri, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak 200 m x 200 m çözünürlükte üretilmiştir. Bu veriler, rüzgâr enerjisi potansiyelinin detaylarını görselleştirmek ve analiz etmek için kullanılmaktadır.

Haziran 2022 sonu itibariyle ülkemizde, rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 10.976 MWe olarak kaydedilmiştir (Şekil 1.6) [4]. Bu değer, ülkemizin toplam elektrik kurulu gücünün %10,81'ini oluşturmaktadır.



Şekil 1.6: Türkiye'nin yıllara göre kurulu rüzgar elektrik santrali gücü.

Haziran 2022 itibariyle biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı kurulu gücümüz 2.172 MWe olarak kaydedilmiştir (Şekil 1.7) [4]. Bu değer, ülkemizin toplam elektrik kurulu gücünün %2,14'ünü oluşturmaktadır.



Şekil 1.7: Türkiye'nin yıllara göre biyokütle ve atık ısı enerjisi kurulu gücü.

Türkiye tektonik hareketlerin yoğun olduğu bir coğrafyada bulunmaktadır. Ülkemizin her tarafına yayılmış, doğal çıkış şeklinde ve değişik sıcaklıklarda birçok jeotermal kaynak mevcuttur. Jeotermal enerji ülkemiz için önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır [5].

Akışkan sıcaklıklarına göre jeotermal enerji kaynakları üç bölüme ayrılmaktadır;

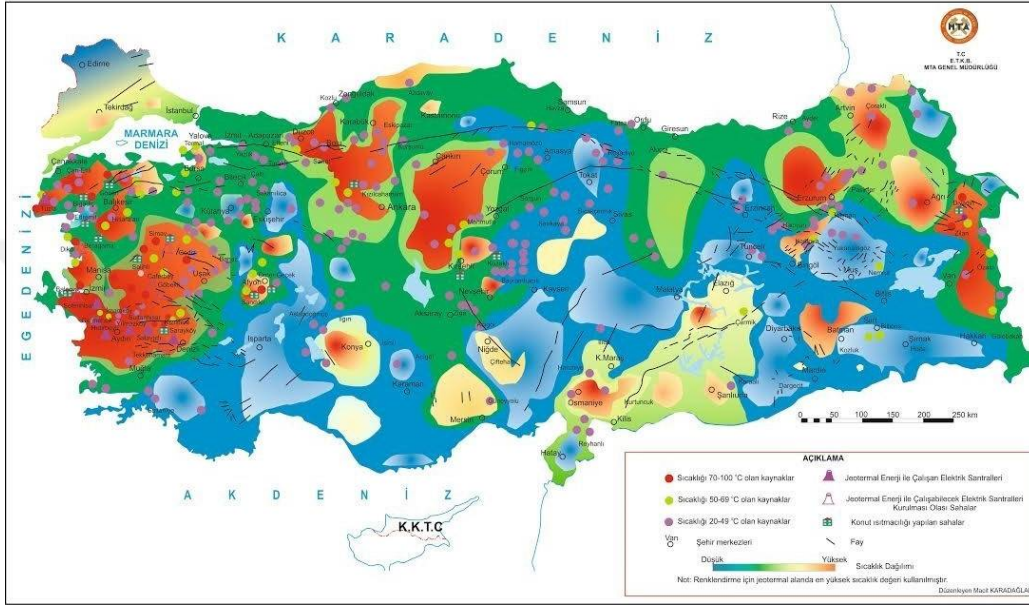
- Düşük entalpili sahalar (20 – 70°C sıcaklık)
- Orta entalpili sahalar (70 – 180°C sıcaklık)
- Yüksek entalpili sahalar (>180°C sıcaklık)

Jeotermal enerji ile bölgesel ısıtma yapıldığında, enerjinin tiletiminde sadece üretilen sıcak su kullanılmaktadır. Dolayısıyla binalarda kazan, yakıt deposu ve benzeri ekipmanlar kullanılmamaktadır. Sadece bina altında ısı eşanjörleri bulunmaktadır. Tabiatıyla jeotermal üretim alanından sıcak suyu taşıyan boru sistemleri göz önünde bulundurulacak ana elemanlardan biridir. Ülkemizde halen birçok yörede bölgesel ısıtma sistemi uygulanmış ve giderek yaygınlaşmaktadır. Bunlardan en önemlileri: Balçova, Narlıdere, Afyon, Gönen, Simav, Kızılcacahamam, Kırşehir, Sandıklı, Kozaklı ve Diyardin'dir. Bu sistemlerin çoğunda bazı sorunlar yaşanmaktadır. Bunların en önemlisi reenjeksiyon sorunudur. Re-enjeksiyon kullanılan termal akışkanın tekrar kuyuya geri basılmasıdır. Bugün 247°C civarında maksimum sıcaklığa sahip olan Kızıldere'deki jeotermal kaynaktan ısıtmada kullanılmamasının sebebi budur. Öte yandan Kızıldere deki kaynağın Denizli'ye mesafesi 31 km olması ve ayrıca buraya ait tam bir fizibilite etüdünün yapılmamış olması, bu kaynağın jeotermal ısıtma için uygun olup olmadığını netleştirmemiştir. Bu kaynaktan tüm sene boyunca 10 MWe lik bir güçle devamlı elektrik enerjisi üretilirken, eğer ısıtma için kullanılmış olsaydı sadece yılın belirli aylarında kullanılmış olacaktı. Elektrik enerjisi üretildikten sonra atılan jeotermal su, bugün Sarayköy'ün ısıtılmasında kullanılmaktadır [6].

Ülkemizin jeotermal potansiyeli oldukça yüksektir ve bu potansiyeli oluşturan alanların %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde bulunmaktadır. Jeotermal kaynaklarımızın %90'ı düşük ve orta sıcaklıkta olup, doğrudan uygulamalar için (ısıtma, termal turizm, endüstriyel kullanım vb.) uygunken, %10'u dolaylı uygulamalar için (elektrik enerjisi üretimi) uygundur.

Ülkemizde jeotermal enerji uygulamaları, 1975 yılında 0,5 MWe gücündeki Kızıldere Santrali ile elektrik üretimi alanında başlamıştır. Bu kaynakların büyük bir kısmı düşük ve orta sıcaklıkta olduğundan, doğrudan uygulamalar için idealdir.

Bakanlık desteğiyle 2005 yılından itibaren, mevcut kaynakların geliştirilmesi ve yeni alanların araştırılmasına önem verilmektedir. 2008 yılında Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle birlikte, özel sektörün jeotermal arama, geliştirme ve yatırım çalışmalarına katılımı artmıştır. Bu süreçle birlikte Türkiye'nin muhtemel jeotermal ısı potansiyelini 35.500 MWt'e, elektrik üretimi potansiyelini ise 4.500 MWe'ye kadar ulaşabileceği tahmin edilmektedir (Şekil 1.8) [7], (Şekil 1.9) [8].



Şekil 1.8: Jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası.

| Jeotermal Kaynak Tablosu | | | | | | |
|-------------------------------|---|-------------|----------|--------------------|----------------------|----------------|
| Jeotermal Saha | Saha sayısı Sıcaklığı ($\geq 30^\circ\text{C}$) | | | | 346 | |
| Doğal çıkış | Kaynak sayısı | | | | 600 | |
| Alan dağılımı | Yüksek / Düşük ve orta entalpili alanlar | | 43/303 | % 12 / % 88 | | |
| | Elektrik üretimi | | 43 | % 12 | | |
| | Isıtma / Termal kullanım | | 153/135 | % 43 / % 45 | | |
| Potansiyel | Tahmini teorik potansiyel (MWt) | | | | 52700-62000 | |
| | Kullanılabilir potansiyel (MWt) | | | | 17000 | |
| Kuyu | Tahmini kuyu sayısı | | | | 2200 | |
| Değerlendirme | Doğrudan kullanım | Saha Sayısı | Uygulama | Kurulu Güç | Miktar | |
| | Merkezi ısıtma | 153 | 18 | 1033 | 116.020 K. E. | |
| | Termal kullanım | 135 | | 1005 | 400 Ad. | |
| | Sera ısıtması | 153 | | 820 | 4283 Dönüm | |
| | Termal tesis otel ısıtması | 153 | | 420 | 46.400 K. E. | |
| | Isı pompası | ? | | 42,8 | | |
| | Tarımsal kurutma | 153 | 2 | 1,5 | | |
| | TOPLAM | | | 3322,3 | 369.100 K.E. | |
| | Elektrik Üretimi | Saha Sayısı | Uygulama | Santral | Kurulu Güç | Üretim |
| | | 43 | 19 | 39 | 1053 | 1021,73 |
| CO₂ Üretimi | Kapasite (ton/yıl) | | | | 240.000 | |

MWt: Megawatt termal

K.E: konut eşdeğeri

Şekil 1.9: Türkiye'nin jeotermal kaynak tablosu.

Enerji etkileri devletlerin ekonomik bağımsızlığını ve büyüme potansiyelini etkileyen en büyük unsurlar arasında yer almaktadır. Yatırımların çoğu yapılırken, yöreye katkıları ve çevreye olan etkileri göz önünde bulundurulmaktadır. Örneğin 2006 yılında Denizli-Kızıldere Jeotermalini, yöreye ve çevreye sağladığı faydalı etkileri olmuştur.

Denizli-Kızıldere’de 20 MWe kurulu güce sahip santralden 12 MWe elektrik üretilmektedir. Kızıldere’deki santral sadece 2006 yılı içerisinde 7500 saat çalışarak 94 milyon kWh elektrik üretmiştir. Bu rakamlar, Denizli-Kızıldere jeotermalini 2008 yılında özelleştirilmesiyle 60 MWe çıkarılmış ve üretim 2010 yılı itibarıyla yaklaşık üç kat artmıştır. Karbondioksitten kurubuz üretimi amacıyla yılda 120.000 ton kapasiteli bir tesis kurulmuş ve halen üretimini sürdürmektedir. Denizli-Sarayköy ilçesinde 2500-3000 konut ısıtılmakta ve Denizli kentinin ısıtılması için girişimler sürmektedir. Kızıldere jeotermal akışkanından jeotermal alana bitişik seraların ısıtılmasında ve yün ağartmada yararlanılmaktadır. Kızıldere jeotermal alanındaki eski bir otel ve hamam tesisleriyle iç turizme, sağlık amaçlı kullanımı (balneoloji) olan “Kaplıca Kür Otel ve Sağlık Çiftliği-[Umut Termal]” hem iç turizme hem de dış turizme yönelik hizmet sunmaktadır. Ayrıca; düşük sıcaklıktaki akışkanlardan elektrik üretimi için izopentan, freon ve izobütan gibi buharlaşma dereceleri düşük gazlar kullanılarak başka bir tesiste enerji üretimi yapılmaktadır. Bunun yanı sıra soğuyan jeotermal sular tarımsal sulamada kullanılmaktadır. Dolayısıyla jeotermal su yeryüzüne çıktığı sıcaklıktan soğuyana kadar kullanılabilir. Jeotermal enerjideki kirleticiler genellikle elde edildiği bölgeyle ilişkilidir. Jeotermal sıvıların içerisinde arsenik, bor, selenyum, kurşun, kadmiyum, hidrojen, sülfür, civa, amonyak, radon, karbondioksit ve metan bulunabilmektedir. Kızıldere jeotermal alanında çıkarılan ve kullanıldıktan sonra Büyük Menderes Nehri’ne bırakılan sıcak su nehirde ilk olarak oksijensizleşmeye (ötrifikasyona) neden olmakta ve bu da suda yaşayan canlıları tehdit etmekte ve ekolojik dengeyi bozmaktadır. Ayrıca Kızıldere jeotermal alanından çıkan sıcak su yüksek düzeyde bor içermektedir. Kullanılmış sıcak suyun bir kısmı geri reenjeksiyon edilmekle birlikte büyük bir kısmı işlemden sonra Büyük Menderes Nehri’ne verilmekte bu da nehir suyundaki bor oranını çok yüksek düzeyde artırmaktadır. Dolayısıyla jeotermal suyun çevreye olumsuz etkilerini azaltmak için reenjeksiyon kuyuları açılması gerekmektedir [9].

Jeotermal enerjinin gelişimi, çevresel etkilere neden olabilmektedir. Jeotermal enerji üretimi sırasında kullanılan sıcak su ve buharın doğaya salınması, çevresel dengeyi değiştirebilir. Bu durum bazen yerel bitki örtüsünü etkileyebilir veya doğal yaşam alanlarını

bozabilmektedir. Jeotermal enerji üretiminde kullanılan kimyasallar veya gazların, hava kirliliğine yol açabileceği durumlar olabilmektedir. Bu da çevresel kirliliğe ve insan sağlığına olumsuz etkiler meydana getirebilmektedir. Jeotermal sıvılar, yerin derinliklerinden geldiği için bazen zehirli maddeler içerebilir. Bazı santrallerin gaz emisyonları Tablo 1.1'de gösterilmiştir. Bu maddelerin doğaya karışması, toprak ve su kirliliğine yol açabilir. Jeotermal enerji tesislerinin inşası, yerel ekonomiyi etkileyebilir ve bazı durumlarda yerel topluluklar üzerindeki sosyal etkileri değiştirebilir. Bu da yerel halk için belirli faydaların yanı sıra bazı zorlukları da beraberinde getirebilmektedir.

Jeotermal enerji diğer enerji türlerine göre temiz enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Çünkü jeotermal santrallerde daha az karbondioksit ve çok az miktarda da sülfüroksit gazı atmosfere salınmaktadır. Jeotermal enerjiye dayalı modern jeotermal santrallerde CO₂, NO_x, SO_x atımı merkezi ısıtma sistemlerinde ise sıfırdır. Buhar santrallerinde ise sadece buhar emisyonu atmosfere salınmaktadır. İkili çevrim santralleri kapalı sistem olduğundan herhangi bir gaz atmosfere salınmamaktadır. Modern jeotermal santrallerinde, yoğunlaşmayan gazları buharın içinden alıp, kullanılmış jeotermal akışkan ile birlikte yeraltına geri veren reenjeksiyon uygulaması kirletici unsurların atmosfere ulaşmasını önlemektedir. Bu özellikler jeotermal enerjinin kullanımının, çevre kirliliğinin önlenmesine katkı sağlaması bakımından önemlidir. Üretilen ya da dönüştürülen enerjinin çevresel etkilerinin olması kaçınılmazdır. Dolayısıyla elektrik üretimi veya diğer nedenlerle kullanılan derin jeotermal suların da çevreye geniş bir oranda etkisi vardır [10].

Tablo 1.1: Çeşitli enerji santrallerine ait gaz emisyonları.

| Santral tipi | CO ₂ kg/MWh | SO ₂ kg/MWh | NO _x kg/MWh | Partikülât kg/MWh |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| Kömür yakıtlı | 994 | 4,71 | 1,955 | 1,012 |
| Akaryakıtlı | 758 | 5,44 | 1,814 | Bilgi yok |
| Gaz yakıtlı | 550 | 0,0998 | 1,343 | 0,0635 |
| Hidrotermal – flaş buharlı, sıvı hakim | 27,2 | 0,1588 | 0 | 0 |
| Hidrotermal – Gayzer kuru buhar sahası | 40,3 | 0,000098 | 0,000458 | Göz ardı edilebilir |
| Hidrotermal – kapalı-döngü ikili | 0 | 0 | 0 | Göz ardı edilebilir |
| EPA ortalaması, tüm ABD santralleri | 631,6 | 2,734 | 1,343 | Bilgi yok |

Jeotermal enerji üreterek hizmet veren ısıtma sistemleri, faaliyette oldukları süre zarfında elektrik tüketimi, yeni kuyu açma, kuyu ve sistem bileşenleri için bakım onarım, çeşitli kimyasal madde ve sarf malzemeler ile personel giderleri gibi önemli işletme maliyetleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu sistemlerden biri olan Bigadiç Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi (JBIS), günümüzde büyük çoğunluğu konut olmak üzere 1050 aboneye ısıtma hizmeti sunun Balıkesir'deki beş bölgesel ısıtma sisteminden biridir. Faaliyete girdiği ilk yıllardan günümüze kadar geçer süreçte, farklı fosil yakıtlarla çalışan sıcak su kazanlarıyla ısıtma desteği sunulan sistemde, günümüzde kömür kazanı ile ilave ısısal güç sağlanmaktadır. Bu çalışmada, Bigadiç JBIS'nin mevcut çalışma koşulları ile sistemin farklı tür ve kapasitelerde ek ısıtma sistemleriyle desteklenmesi durumları için birim ısıtma enerji maliyetleri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen 20 yıllık seviyelendirilmiş ısı maliyeti (LCOH) analizi yardımıyla, mevcut kömür kazanına alternatif olarak ya da mevcut kömür kazanı ile birlikte sisteme dahil edilmesi düşünülen yeni doğal gaz kazanı ve yeni ısı pompası sistemlerinin optimum kapasiteleri belirlenmiştir. Yeni ısıtma destek sistemleriyle, mevcut abone sayısı yerine daha fazla aboneye ısıtma hizmeti verilmesinin, birim ısıtma enerjisi maliyetlerini düşürdüğü görülmüştür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Arat ve arkadaşları [11] yaptıkları çalışmada yaklaşık 25.000 nüfuslu bir ilçe merkezi için jeotermal ısı pompası destekli bölgesel ısıtma sistemini ekserjetik ve ekonomik açıdan incelemişlerdir. Bu şekilde, Simav bölgesinde jeotermal ısı pompası sistemi ile birleştirilmiş bölgesel ısıtma sisteminin uygun değer çözümünü bulmak için 12 farklı çalışma akışkanı araştırılmıştır. Optimum çözümü bulmak için 4686 tasarım incelenerek enerji ve ekserji analizleri yapılarak ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, Net Bugünkü Değerleri (NPV) 1192,81 ile 23,20 milyon ABD Doları arasında değişmektedir. Önerilen sistemle 13.776 konutun ısıtılması sağlanarak, bu sistemin Simav için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Jensen ve arkadaşları [12] yaptıkları çalışmada seri bağlı iki ısı pompasının (HP) tasarımını Danimarka'nın Büyük Kopenhag bölgesinin bölgesel ısıtma (DH) şebekesinde çalıştırılmak üzere araştırmışlardır. Tesis, 85 °C sıcaklıkta 7,2 MW ısı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Isı pompaları, 73 °C 'de bir jeotermal ısı kaynağından faydalanmıştır. Birinci ısı pompasına paralel olarak doğrudan ısı değişimli iki ısı pompasının seri olarak kullanılmasının, performansı artırabileceği gösterilmiştir. Isı pompalarının ekserjetik verimleri %50 ile %65 arasında değiştiği görülmüştür. Buna göre, sistem için ekserji verimi %63 olan bir ısı pompası konfigürasyonu önerilmektedir.

Kljajic ve arkadaşları [13] yaptıkları çalışmada Sırbistan Cumhuriyeti'nin kuzey kesimindeki jeotermal potansiyelini incelemiş ve bir bölgesel ısıtma sisteminde jeotermal ısı pompası teknolojisinin kullanılmasının sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Çalışmada, jeotermal ısı pompası kullanımının çevresel sürdürülebilirliğini ve uygulanabilirliğini incelenmiştir. Bu bölgedeki 1274 konutun enerji, ekonomi ve yaşam döngüsü verilerini de dahil eden çevresel analizleri yapılmıştır. Buna göre, jeotermal ısı pompası sistemi kullanılması halinde yılda yaklaşık bir milyon metreküp doğal gaz tasarrufu sağlanacağı ortaya çıkarılmıştır. Bu yatırım projesi, 17 EUR/MWh'lik oldukça rekabetçi bir enerji maliyeti, %38'e varan iç getiri oranı ve 4,9 yıllık geri ödeme süresi anlamına gelmektedir.

Halaj ve arkadaşları [14] yaptıkları çalışmada 900 km ısıtma ağına sahip Krakow bölgesinin bölgesel ısıtmasını incelemişlerdir. Şehirdeki mevcut yenilenebilir kaynaklarını şehrin

ısıtma sistemine entegre ederek sistemin esnekliğini artırmayı amaçlamışlardır. İhtiyaca bağlı hibrit, modüler ısı pompaları, jeotermal sular ve fotovoltaiklerle birleştirmeye yönelik yenilikçi bir çözüm önermişlerdir. Sondaj kuyularında su ısı pompaları hem ısıtma hem de soğutma amacıyla kullanılmaktadır. Karlı olmayan sistemleri karlı hale getirebilmek için hibrit kaynaklara başvurmuşlardır. Bunun için bir fotovoltaik tesis kurulmuş ve ısı pompasının yıl boyunca tükettiği elektrik enerjisi bu fotovoltaik tesis tarafından karşılanmıştır.

Lubis ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışmada hibrit bir jeotermal ısı pompası sisteminin termodinamik analizi yapmışlardır. Sistemde soğutma kulesi kullanılmıştır. Bu sistemin kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri yazılarak sistem COP ve ekserji verimliliği açısından irdelenmiştir. Sistemin ısıtma COP değeri 5,34 iken aynı şartlar altında sistemin ekserji verimliliği %63,4 olarak hesaplanmıştır. Ortam sıcaklığının ekserji yıkımı ve ekserji verimliliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hibrit jeotermal ısı pompası sistemlerinin performansının hava kaynaklı ısı pompalarından daha iyi olduğunu göstermektedir.

Chahartaghi ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada kullanım suyu ısıtması için bir toprak kaynaklı jeotermal ısı pompasının enerji ve ekserji analizleri ve termo-ekonomik optimizasyonunu yapmışlardır. Kapalı yatay toprak ısı değiştiricili jeotermal ısı pompasının modellenmesi ve optimizasyonu EES programı kullanılarak yapılmıştır. Farklı soğutucu akışkanlar kullanıldığında ve evaporatör girişindeki su sıcaklığının farklı olduğu durumlardaki COP'nin değişimini incelemişlerdir. Sonuçlara göre, R507a en yüksek COP'ye sahip olduğunu bulmuşlardır. Optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu yıllık maliyet (TAC) seçilmiş ve amaç fonksiyonunu minimize etmeye çalışmışlardır. Burada toplam sistem maliyetinin %34'ü ile toprak ısı değiştiricisinin en yüksek paya sahip olduğu bulunmuştur. Bu sistemde maksimum tersinmezlik %53 ile kompresörde olduğunu tespit etmişlerdir. Optimum koşullarda, evaporatör ve kondenser için doyma sıcaklıkları sırasıyla -1,5 ve 51,89°C olarak hesaplanmıştır.

Farzanehkhameh ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada jeotermal ısı pompası (GHP) sistemlerinin kullanılmasını araştırarak optimizasyon çalışmasını Tahran'daki bir konut binası için yapmışlardır. Optimizasyon için beş ana parametre (yarıçap, uzunluk ve kuyu sayısı, dış borunun yarıçapı ve boru içindeki akış deşarjı) belirlenerek, genetik algoritma (GA) ile sistem optimize edilmiştir. Entropi üretimi (EG) üzerinde en yüksek etkilerin boru

ısı iletkenliği, sondaj kuyusu ısı iletkenliği, zemin ısı iletkenliği ve sondaj deliği mesafesi parametrelerinin olduğunu göstermişlerdir. Sonuçlara göre COP'si 5,6 olan bir GHP'nin yıllık enerji tkretiminin 10.111 MWh olduğunu; hava kaynaklı ısı pompasına sahip ısı pompalarının yıllık tüketimi ise 42.222 MWh ile GHP'ninkinden 4,17 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. GHE'nin zaman içindeki performansındaki düşüşü dikkate almak için 10 yıllık bir süre boyunca bir simülasyon da gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, ekonomik analiz sonuçları, bu sistemin geri ödeme sresinin yaklaşık 7,4 yıl olduğunu ve hkmet tarafından ödenen enerji sübvansiyonunun yıllık olarak 14.417.839 İnan Riyaline (IRR) düşürüleceğini göstermişlerdir.

Zhang [18] yaptığı çalışmada orta-derin jeotermal ısı pompası (MDGHP) sistemlerinin uygulanmasında genellikle iki önemli sorunla karşılaşmışlardır. Bunlar işletme ve tasarım koşulları arasında büyük sapmalar ve fiili işlemler sırasında parametre kontrolü için teorik bir temelin olmaması olarak sıralanmıştır. Bu sorunları zmek için MD-GHP'nin doğru ısı transferi ve enerji dönüşüm modelleri oluşturulmalı ve bir toprak ısı eşanjörünün (GHE) tam bir kararsız ısı transfer modelinin kurulmasında ve bu modelin bir ısı pompasının enerji dönüşüm modeli ile birleştirilmesinde yattığını tespit etmişlerdir. Tasarım ve kontrol parametrelerinin MD-GHP'nin performans katsayısı (COP) zerindeki etkileri incelemişlerdir. Vakum yalıtımlı boruların merkezi boru olarak kullanılması sistemin COP değerini yaklaşık %10 oranında artırmıştır. Kuyu derinliği 2000 m'den 3000 m'ye yükseldiğinde, maksimum ısıtma yükü neredeyse doğrusal olarak 500 kW'dan 960 kW'a yükselmiştir. Çimento kılıfının termal iletkenliği, sistemin COP değeri üzerinde minimum etki göstermiştir. Bu çalışmanın önemli yanı, tüm sistemin enerji verimliliğini tahmin etmek için ısıtma yükü ile sıcaklık oluşumunun dağılımı arasında matematiksel bir ilişki kurulmasıdır.

Akhmetzyanov ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada, kentsel alanlarda arazi kullanım planlamasında jeotermal enerji kullanımına ilişkin belirli konulara odaklanmışlardır. Konutlarda jeotermal kullanımının talebi ve uygunluğu, kentsel yoğunluklar ve jeotermal enerjinin uygulanabilir kullanımını incelenmiştir. Rusya'nın St. Petersburg şehrinin Petrogradsky semtindeki tipik birçok aileli konut binası için ısıtma sağlamak için ısı pompalarının kullanılmasına ilişkin bir fizibilite çalışması yapılmıştır.

Hepbaşı [20] yaptığı çalışmada bölgesel ısıtma için toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP) sistemlerinin termodinamik analizini yapmıştır. Bu sistemde U borulu toprak ısı değiştiricili bir GSHP sistemine kütle, enerji, ekserji ve entropi denge denklemlerini kurarak sistemi modellemiştir. 7 Ocak 2004 tarihinde yapılan ölçümlere göre, topraktan ısı çekme hızı ortalama 61,4 W/m, ısıtma kapasitesinin kW başına metre cinsinden gerekli sondaj uzunluğu 11,71 olarak elde edilmiştir. Üniteye giren su sıcaklığı 15,3 °C olarak ölçülmüştür. Isı pompasının (COPHP) ısıtma performans katsayısı yaklaşık 2,85 iken, tüm sistem için bunun COPHP'den %7,4 daha düşük olduğu elde edilmiştir. Isı pompası ünitesi ve tüm sistem için ekserji verim değerleri sırasıyla %66,8 ve %66,6 olarak bulunmuştur.

Erdemir [21] yaptığı çalışmada bir organik Rankine çevrimi (ORC) ve bölgesel ısıtma ile entegre jeotermal tabanlı bir yeraltı pompalı hidroenerji depolama sistemi (UPHES) geliştirmişlerdir. ORC, suyu yeraltından üst rezervuara pompalamak için şarj süresi boyunca kullanılan pompanın güç ihtiyacına katkıda bulunmak için sisteme entegre edilmiştir. Bölgesel ısıtma jeotermal ile yapılmıştır. ORC'den geri kazanılan ısı, bölgesel ısıtmada kullanılan suyun üst rezervuara girmeden önce ön ısıtması için kullanılmıştır. Önerilen bu entegre sistem ile hem pik enerji talebi yoğun olmayan saatlere kaydırılmış hem de bölgesel ısıtma gerçekleştirilmiştir. UPHES pompasının enerji talebine katkıda bulunmak için sisteme bir ORC de dahil edilmiştir. Sistemin performansını değerlendirmek için enerjik ve ekserjetik verimler bazında termodinamik analiz yapılmıştır. Temel durum çalışmasında, UPHES tarafından 60 MWh elektrik depolanmıştır. Ayrıca ORC tarafından 100 konutun 2,8 MW ısıtma ihtiyacı karşılanmış ve 1,7 MW elektrik üretilmiştir. UPHES pompasının gücü 6,81 MW olarak hesaplanmıştır. UPHES sisteminin verimliliği %73,34 olarak hesaplanmıştır. Önerilen entegre sistemin toplam enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %93,09 ve %78,37 olarak hesaplanmıştır.

Azaza ve arkadaşları [22] yaptıkları çalışmada bir ofis binası için yerinde kombine ısı ve güç kaynağı sisteminin karlılığını araştırmışlardır. Bölgesel ısıtmayı kullanan bir referans model oluşturulmuş ve doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Soğuk iklim bölgelerinde en uygun maliyetli yatırım senaryosunu ortaya çıkarmak için, elektrik depolamalı ve depolamasız bir fotovoltaik destekli toprak kaynaklı ısı pompası modeli geliştirilmiş ve incelenmiştir. Bağımsız bir çatı fotovoltaik sistemi ile birlikte toprak kaynaklı bir ısı pompasının, bir bölgesel ısıtma sistemi kullanmaya kıyasla binaya özgü enerji talebini düşürürken termal gereksinimleri karşılamada başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bir pil bankası içeren

fotovoltaik destekli toprak kaynaklı ısı pompası sistemi, teşvikler verildiğinde en karlı olanıdır, 38,4 kWh pil kapasitesi ile %93,1'lik daha yüksek bir öz tüketim elde edilmiştir.

Sun ve arkadaşları [23] yaptıkları çalışmada doğal gaz yakıtlı kazanlara dayalı geleneksel bölgesel ısıtma sistemlerinin geri dönüşü olmayan kayıpları azaltmak ve doğal gaz tüketimini azaltmak için, doğal gaz ve derin jeotermal enerjiye dayalı bölgesel ısıtma sisteminin yeni konfigürasyonları önerilmiş ve termodinamik ve finansal fayda perspektifinden analiz edilmiştir. Sonuçlar, absorpsiyonlu ısı eşanjörleri ve gazla çalışan absorpsiyonlu ısı pompası (DH-AHE-DAHP) ile doğal gaz ve derin jeotermal enerjiye dayalı önerilen bölgesel ısıtma sisteminin sadece daha yüksek termodinamik performansa sahip olmadığını, aynı zamanda daha iyi kazanç elde etmemizi sağladığını göstermiştir. Doğal gaza dayalı geleneksel bölgesel ısıtma sistemleriyle karşılaştırıldığında, DH-AHE-DAHP ürün ekserji verimliliğini yaklaşık %12 artırabilir, doğal gaz tüketimini yaklaşık %54 ve ısıtma maliyetini yaklaşık %25 azaltabilir ve uygun maliyetli ısı iletimi sağlamıştır. Birincil ısıtma ağının mesafesi yaklaşık 28 km'ye yaklaşmaktadır, bu da kentsel bölgelerden uzaktaki derin jeotermal alanların alan ısıtması için verimli bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunmuştur.

Sun ve arkadaşları [24] yaptıkları çalışmada uzak mesafelerdeki termal yükleri karşılamak için jeotermal ısı uzak mesafelere transfer etmeye çalışmışlardır. Bunun için ısı pompalarına ve merkezi bir absorpsiyonlu ısı transformatörüne dayalı yeni bir orta-düşük sıcaklıklı hidrotermal jeotermal bölgesel ısıtma sistemi önerilmiş ve hem termodinamik performans hem de ekonomik fayda açısından değerlendirilmiştir. Önerilen sistem için birincil ısıtma şebekesinin maliyet etkin ana hat uzunluğu yaklaşık 10 km'dir. Önerilen sistemin yıllık performans katsayısı, yıllık ürün ekserji verimliliği ve ısıtma maliyeti sırasıyla %24,5, %61,4 ve 55,62 º/GJ olarak bulunmuştur. Merkezileştirilmiş absorpsiyonlu ısı transformatörü, ısıtma istasyonunun geri döndürülemez kaybını azaltabilir ve dağıtılmış elektrikli sıkıştırılmalı ısı pompalarının performansını iyileştirebilir olduğunu bulmuşlardır. Jeotermal ısıyı taşıma mesafesi daha uzun olan geleneksel orta-düşük sıcaklıklı hidrotermal jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin aksine, önerilenin yıllık performans katsayısı ve yıllık ürün ekserji verimliliği sırasıyla yaklaşık %4,34 ve %7,4 oranında iyileştirilebilir olduğunu göstermiştir.

Arat ve arkadaşları [25] yaptıkları çalışmada çok kademeli ve çok seviyeli yeni bir YSA modeli kullanarak jeotermal ısı pompası destekli bölgesel ısıtma sisteminin (GHPDHS)

optimum tasarımını elde etmişlerdir. Bu amaçla, Levenberg-Marquardt (LM), Pola-Ribiere Eşlenik Gradyan (CGP) ve Ölçekli Eşlenik Gradyan (SCG) olmak üzere üç farklı varyantla geri yayılım öğrenme algoritması kullanılarak en iyi tasarımın elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla önerilen YSA modeli temel olarak iki aşamadan oluşturulmuştur. Bu yeni YSA modelinde ilki tek seviyeli iken ikincisi üç seviyeden oluşmaktadır. Sonuçlara göre, Pompa 2'de meydana gelen hatanın maksimum oranı %3,0092 olarak ve bunun minimumu % 0,0018 ile COPsys'den elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, daha fazla zaman tasarrufu ve basitlik için çok aşamalı, çok seviyeli YSA modelinin diğer enerji sistemlerine kolayca uygulanabileceğini göstermiştir.

Yamankaradeniz [26] yaptığı çalışmada, sistem bileşenleri arasındaki etkileşimleri ve iyileştirme potansiyelini belirlemek için gelişmiş ekserjetik analiz kullanan bir jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin (GDHS) termodinamik performans değerlendirmesini yapmıştır. Bir GDHS için ekserjetik yakıt tükenme oranı, ekserjetik üretkenlik eksiklik oranı, ekserjetik rehabilitasyon oranı ve ekserjetik iyileştirme potansiyeli olmak üzere dört yeni ekserjetik parametre tanımlanmıştır. Bu analiz ve yeni ekserjetik parametreler Türkiye'deki Bursa SGSH'ye uygulanmıştır. Sonuçlar, gelişmiş ekserjetik analizin, sistem performans değerlendirmesi için geleneksel olandan daha anlamlı ve etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Konvansiyonel ve gelişmiş olanlar için ekserjetik verimler sırasıyla %25,24 ve %26,34'tür. Sistem bileşenlerinin iyileştirilmesi için en yüksek öncelikler azalan önem sırasına göre: geleneksel analiz için ısı eşanjörleri ve pompalar ve gelişmiş analiz için yalnızca ısı eşanjörleri olarak verilmiştir. Yeni ekserjetik parametreler, sistemin ne kadar geliştirilebilir ve görünüşte sürdürülebilir olduğunu gösteren temel göstergeler gibi görünmektedir. Bu parametrelerin yukarıda verilen sıradaki oranları Bursa SGSH için sırasıyla %4,19, %16,60, %33,23 ve %4,19 olarak hesaplanmıştır. Isı eşanjörleri, ekserjetik rehabilitasyon oranının en yüksek değerlerine sahiptir. Bu nedenle, ısı eşanjörlerinin iyileştirme öncelikleri olduğu tespit edilmiştir.

Tissen ve arkadaşları [27] yaptıkları çalışmada toplam CO₂ emisyonlarının %28'inin, Viyana gibi Orta Avrupa şehirlerindeki binaların enerji arzından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Sığ jeotermal enerjinin kullanılması, çevre dostu ısı temini için umut verici bir seçenek olarak öne sürülmüştür. Sığ jeotermal sistemlerin kentsel ısıtma talebini karşılamak için uygun bir seçenek olup olmadığını belirlemek için Python aracı GeoEnPy geliştirilmiş ve Viyana'daki bir vaka çalışmasına uygulanmıştır. Yeraltına antropojenik ısı

girdisinin, teorik sürdürülebilir potansiyelin, teknik jeotermal potansiyelin ve ısı tedarik hızının değerlendirilmesini sağlamıştır. Viyana'daki toplam ısı akışı, mevcut ısıtma talebinin %38'ini veya tüm binalar termal olarak yenilendikten sonra %99'unu temsil eden 17,6 PJ/a'dır. Teknik jeotermal potansiyel, şehir alanının %63'ü (BHE sistemi) veya daha doğrusu %8'i (GWHP sistemi) için mevcut ısıtma talebini karşılayabilir. GeoEnPy, BHE sistemlerinin Viyana'nın doğu ve güney bölgelerinde en uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bulgularımız, binalara yeraltından merkezi olmayan ve sürdürülebilir ısı sağlamak için kilit konumlara odaklanan mekansal enerji yönetiminde sığ jeotermal kullanımın entegrasyonuna rehberlik edebilir.

Boesten ve arkadaşları [28] yaptıkları çalışmada beşinci nesil bölgesel ısıtma ve soğutma (5GDHC) sistemlerini incelemiştir. 5GDHC sistemi, termal talebi mümkün olduğunca dengelemek için doğrudan sıcak ve soğuk dönüş akışlarının değişimini ve termal depolamayı kullanan merkezi olmayan, çift yönlü, yer sıcaklığına yakın ağlardır. 5GDHC, sığ jeotermal enerji de dahil olmak üzere düşük sıcaklıklı yenilenebilir ısı kaynaklarını birleştirmenin yanı sıra soğutmadan üretilen ısıyı ve ısıtmadan üretilen soğuğu geri kazanarak toplam talebi azaltmak için bir yol sunar. 5GDHC'nin büyük ölçeği, çok çeşitli arz ve talep profillerini birleştirerek genel sistem verimliliğini artırırken, ısı pompaları ve termal depolama kapları gibi teknik parçaların optimum şekilde tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Hollanda, Heerlen'deki Mijwater sistemi, şehir düzeyinde bir 5GDHC sisteminin nasıl görülebileceğini göstermektedir.

Ozgener ve arkadaşları [29] yaptıkları çalışmada, İzmir, Türkiye'deki Balçova Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin (BGDHS) gerçek sistem verilerini kullanarak termo-mekanik bir ekserji analizini ve bölgesel ısıtma sistemi performansının, enerji ve ekserji verimlerinin ve ekserji yıkımlarının bir değerlendirmesini ele almışlardır. Genel BGDHS'deki ekserji yıkımları, bir ekserji akış diyagramı kullanılarak ölçülmektedir. Ayrıca hem enerji hem de ekserji akış diyagramları karşılaştırılmıştır. Sistemdeki ekserji tahribatları özellikle pompalarda kaybedilen akışkanın ekserjisi, ısı eşanjörü kayıpları, yeniden enjekte edilen termal suyun (jeotermal akışkan) ekserjisi ve sistemin doğal doğrudan deşarjı açısından BGDHS'ine toplam ekserji girdisinin sırasıyla %3,06 %7,24, %22,66 ve %24,1'üne sırasıyla karşılık gelmektedir. Genel BGDHS'nin hem enerji hem de ekserji verimleri sistem performans analizi ve iyileştirme için araştırılmış ve sırasıyla %37,60 ve %42,94 olarak belirlenmiştir.

Qian ve arkadaşları [30] yaptıkları çalışmada son yıllarda ekonomik gelişme ile birlikte sıcak-yaz ve soğuk-kış bölgesinde yaşayan Çinlilerin termal konfor düzeyi artmakta olduğu tespit etmişlerdir. Bu alanlara daha fazla bölgesel ısıtma ve soğutma sistemi kurulmuştur. Hükümet tarafından desteklenen toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP), birçok yerleşim bölgesinde ortak bir çevre dostu bölgesel ısıtma ve soğutma sistemi olarak kullanılmaktadır. Termal dengesizlik ele alınmazsa, GSHP sistemlerinin performansı yıllar içinde bozulabilir. Sıcak-yaz ve soğuk-kış iklim bölgesinde GSHP için, gerçek saha verilerine ve modellemeye dayalı az sayıda termal dengesizlik çalışması bulunmaktadır. Bu boşluğu ele almak için bu makale, GSHP sistemlerinin termal dengesizliğini, bina sakini davranışı ve ısı pompası performansı dahil olmak üzere temel etkileyen faktörleri göz önünde bulundurarak değerlendirmek için entegre bir simülasyon modeli önermektedir. Çin konut binalarında GSHP'nin fiili işleyişini simüle etmek ve analiz etmek için bir vaka çalışması yapılmıştır. İç mekan konfor sıcaklığı ayarı ve bina sakinlerinin bina içi terminal klima üniteleri üzerindeki kontrolünün esnekliği, konut binalarındaki gerçek ısıtma ve soğutma talebini belirler, bu da GSHP sistemleri için termal dengesizlikte farklılıklara neden olmaktadır. Sadece ısıtma için radyan zemine sahip GSHP sistemlerinin en ciddi termal dengesizliğe yol açtığı, soğutma ve/veya ısıtma için fan coil üniteleri veya radyan tavanlı GSHP sistemlerinin çok daha iyi termal denge elde ettiği bulunmuştur. Önerilen termal dengesizlik oranı, GSHP sistemlerinin termal dengesizliğini değerlendirmek ve böylece enerji verimliliği için tasarımlarını ve çalışmalarını bildirmek için kullanılabilecek önemli bir göstergedir.

Şimşek [31] yaptıkları çalışmada jeolojik yapıları nedeniyle zengin jeotermal kaynakların bulunduğu ülkelerde enerji ihtiyacına alternatif bir enerji kaynağı olarak jeotermal enerji tüm dünyada araştırılmakta ve hızla geliştirilmektedir. Türkiye'de ilk jeotermal arama çalışmaları 1960'lı yıllarda Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü (MTA) tarafından başlatılmış ve günümüze kadar 230 jeotermal saha keşfedilmiştir. 2000 adet kaplıca ve mineral kaynak ile arama-üretim kuyusu bulunmakta olup, toplam kanıtlanmış jeotermal kapasitesi 8.000 MWt'dır. Hesaplanan toplam potansiyel 60.000 MWt'dır. Elektrik üretiminin kurulu gücü 2006 yılında sadece Kızıldere 15 MWe iken 2016 yılı başında 43 kat artarak 14 jeotermal sahada yaklaşık 650 MWe'ye ulaşmıştır. Türkiye, 2010-2015 döneminde jeotermal santral kurulu güç artışı açısından dünyada birinci ülke konumundadır. Jeotermal enerjinin ısınma amaçlı kullanımı (ev, sera ve termik tesislerin ısıtılması) 2798 MWt'ye ulaşmıştır. Türkiye'de kullanılan jeotermal suların enerji eşdeğeri 400 kaplıcada 1005 MWt'ye ulaşmıştır. Halihazırda İzmir-Balçova, Narlıdere, Kırşehir ve Afyon il merkezleri başta olmak üzere

farklı merkezlerde 20 adet jeotermal bölgesel ısıtma (DH) sistemi işletilmektedir. Jeotermal sera ısıtma uygulamalarında son üç yılda önemli bir artış sağlanarak 3,93 milyon m²'ye ulaşmıştır. Sıvı karbondioksit ve kuru buz üretimi (yıllık kapasite 160.000 ton) ve ısı pompası uygulamaları dahil olmak üzere jeotermalin doğrudan kullanımının toplam kurulu gücü 3262,3 MWt'dir. Ülkede termal turizm kapasitesi çok yüksek ve ilgili yatırımlar hızla artıyor. 13 Haziran 2007'de Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Maden Suları Kanunu çıkarılmıştır. Kanunun yayımı sonunda MTA tarafından keşfedilen alanların devlet desteği ve ihalesi, araştırma ve işletme çalışmaları hızla artmıştır. Ancak sahanın işletilmesinin korunması büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde Türkiye'deki jeotermal gelişme ile mevcut durum ve hedefler değerlendirilecektir.

Zhang ve arkadaşları [32] yaptıkları çalışmada sığ jeotermal alanda tek enerjinin verimsiz kullanımı ve soğuk birikimi, toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin (GSHPS) verimli çalışmasını ciddi şekilde etkilediğini bulmuşlardır. Güneş destekli GSHPS'nin çalışması, yukarıdaki sorunları etkili bir şekilde çözebilir. Bu bildiriye, çalışma alanı olarak Pekin'in Ping Gu Bölgesi, Nan cha Köyü'nde sığ bir jeotermal kullanım projesi seçilmiştir. Ortam sıcaklığı ve dolgu malzemeleri dikkate alınarak yeraltı suyu akışı ve ısı transferinin üç boyutlu sayısal bir modeli oluşturulmuştur ve model entegrasyonu ve doğrulama düzeyi bu makalenin yeni özellikleridir. Modeli doğrulamak için yaz ve kış koşullarındaki termal tepki testi verileri kullanılır. Sonuçlar, artan hidrolik eğimin ısı alışverişi üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Kum ve barit tozu karışımı, daha verimli ve ekonomik bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir. Termal etki yarıçapı, ısı dengesi ve sığ jeotermal alan değişiklikleri üç şema ile simüle edilir ve analiz edilir. Şema 1, Şema 2 ve Şema 3 için termal etki yarıçapının sırasıyla 5 m, 3,9 m ve 3,9 m olduğu gösterilmiştir. Yer sıcaklığı her zaman Şema 1 ve Şema 2'deki ilk oluşum sıcaklığından daha düşüktür; ancak, Şema 3'te başlangıç değerlerinden daha yüksektir. Delik duvara ne kadar yakınsa, ilk oluşum sıcaklığı ile zemin sıcaklığı arasındaki fark o kadar büyüktür ve bunun tersi de geçerlidir.

Yan ve arkadaşları [33] yaptıkları çalışmaları ısıtma ve soğutma suyu iletim proseslerinin bir dizi dağıtım boru şebekesini paylaştığı, "termal otobüse" dayalı bir bölge enerji sistemi önerildi. Gaz enerji istasyonları, toprak kaynaklı ısı pompaları, küçük ölçekli fotovoltaik enerji santralleri ve çatı tipi güneş kolektörleri ve diğer tesisler ile birleşerek bölgedeki kullanıcılara kışın ısıtma, yazın soğutma ve tüm yıl boyunca güç kaynağı sağladı. Termal bara boyunca ısı enerjisinin çift yönlü (besleme/dönüş) akışı açısından, kaynak, boru ağı,

yük ve depolama için uygulanan ana ekipmanın matematiksel modeli oluşturulmuştur. Yakıt maliyeti, harici elektrik satın alma ücreti ve tüm kullanıcıların enerji talebinin memnuniyet derecesi dikkate alınarak en düşük sistem işletme maliyetine sahip en uygun şekle sokma modeli önerilmiştir. Bölgesel enerji sistemi şeması ve geleneksel dağıtılmış enerji sistemi şemasının işletme maliyeti ve enerji tüketimi, pratik bir vaka çalışması ile incelenmiştir. Sonuçlar, yeni sistemin, tipik haftalık yazın soğutma ve kışın ısıtma senaryoları altında işletme maliyetini sırasıyla %21,5 ve %16,8 oranında azalttığını gösterdi. Hiçbir depolama ekipmanı kullanılmadığında, yeni plan, satın alınan elektrik miktarını yaz ve kış aylarında sırasıyla %4,1 ve %5,2 oranında azaltmıştır.

Zeng ve arkadaşları [34] yaptıkları çalışmada alan ısıtma ve/veya soğutma için çevre dostu jeotermal sistemlerin uygulanmasına yönelik alternatif bir yöntem olarak, yeraltı suyu, açık devre toprak bağlantılı ısı pompası sistemlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çeşitli yeraltı suyu ısı pompası konfigürasyonları arasında, tek kuyulu dolaşım sistemleri, hidrojeolojik ve termojeolojik koşulların kurulumlarına izin verdiği durumlarda en iyi jeotermal değişim verimliliğini sağlama eğilimindedir. Jeotermal kuyulardan oluşan kapalı devre sistemlerle karşılaştırıldığında, tek kuyulu dolaşım sistemleri, özellikle büyük ölçekli jeotermal uygulamalar için ihtiyaç duyulan sondaj kuyularının sayısını önemli ölçüde azaltabilir. Tek kuyulu dolaşım sisteminin küçük ölçekli uygulamalarında, yeraltı suyu sirkülasyonu, dolaşım suyunun sıcaklığının yıllar boyunca sabit kalması için yeraltında yeterli termal enerji sağlar. Bununla birlikte, bölge ölçeğindeki uygulamalar için, sürdürülebilirliklerini ve toprağa bağlı ısı pompası sistemlerinin çalıştırılmasından kaynaklanan yeraltı suyu kalitesi üzerindeki etkileri tam olarak anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Self ve arkadaşları [35] yaptıkları çalışmada artan enerji talepleri ve kirlenici emisyonlar, jeotermal dahil olmak üzere geleneksel olmayan ısıtma teknolojilerinin dikkate alınmasına olanak sağlamıştır. Isı pompası teknolojisi, toprak bağlantıları, mevcut dünya durumu ve son gelişmeler dahil olmak üzere jeotermal ısı pompaları gözden geçirilmiştir. Jeotermal ısı pompası teknolojisi ve geleneksel ısıtma sistemleri maliyetler, CO₂ emisyonları ve diğer parametreler açısından karşılaştırılmıştır. Jeotermal ısı pompası kullanımı, elektrik fiyatının düşük olduğu durumlarda ekonomik olarak avantajlıdır. Alternatif olarak jeotermal ısı pompası üniteleri, elektriğin düşük emisyonlu bir kaynaktan üretildiği zamana bağlı olarak en düşük emisyonu sahiptir.

Brandl [36] yaptığı çalışmada enerji temelleri ve diğer termo-aktif zemin yapıları, enerji kuyuları ve kaldırım ısıtması, çevrenin korunmasına katkıda bulunan ve önemli ölçüde uzun vadeli maliyet tasarrufu ve minimum bakım sağlayan yenilikçi bir teknolojiyi temsil eder. Bu makale, yapısal nedenlerle halihazırda gerekli olan, ancak aynı anda ısı eşanjörü olarak çalışan, toprakla temas eden beton elemanlara odaklanmaktadır. Bir ısı taşıyıcı akışkanla doldurulmuş emici borular, bir jeotermal enerji sisteminin birincil devresini oluşturan geleneksel yapı elemanları (kazıklar, baretler, diyafram duvarları, bodrum döşemeleri veya duvarları, tünel kaplamaları) içine monte edilir. Doğal toprak sıcaklığı kısım ısı kaynağı olarak, yazın ise soğutma için kullanılmaktadır. Bu nedenle, yüzeyin altına herhangi bir ek eleman monte edilmesi gerekmez. Birincil devre daha sonra bir ısı pompası aracılığıyla bina içindeki ikincil devreye bağlanır. 'Serbest soğutma' bir ısı pompası olmadan da çalışabilir. Kağıt, zemindeki ve emici akışkan ile beton/toprak arasındaki ısı transferini açıklar. Zemin özelliklerinin veya temel davranışının sıcaklığa bağlı değişiklikleri de tartışılmakta ve tasarım ve işletmeye yönelik tavsiyeler verilmektedir. Pilot araştırma projeleri ve vaka öyküleri, teori ve uygulama arasındaki boşluğu doldurur ve özel uygulamalar, geniş jeotermal jeoteknik alanını ortaya çıkarır.

Morrone ve arkadaşları [37] yaptıkları çalışmada enerji yığınları ile donatılmış jeotermal ısı pompaları (GHP'ler) ile ısıtılan ve soğutulan konut binaları üzerinde teknik ve ekonomik bir fizibilite çalışması yapılmaktadır. Analiz, mevcut Avrupa standardı ISO 13790'a göre değerlendirilen iki farklı iklim konumu ve bina enerji ihtiyacı için gerçekleştirilmiştir. GHP ile birleştirilmiş enerji kazık sistemi performansı, 20 yıllık çalışma süresi boyunca PILESIM2 yazılımı kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Birincil Enerji Tasarrufu (PES) endeksleri, gerçek GHPs sistemlerini geleneksel soğutma ve ısıtma sistemleriyle ve iki farklı iklim konumu için termal ve soğutma yüklerine karşı duyarlılıkları ile karşılaştırarak hesaplandı. Ayrıca, GHP'lerin kullanımından kaynaklanan ekonomik tasarruflar ve sera gazları (GHG) azaltımı hesaplanmıştır. Sonuçlar, GHP'lerin ağırlıklı olarak HP olarak kullanıldığı ılıman iklimlerde, enerji yığınlarının etrafındaki zeminin yıllık ortalama sıcaklığının uzun yıllar çalıştıktan sonra yaklaşık 10 °C 'ye kadar yükselebileceğini, soğuk iklimlerde ise artışın yaklaşık olarak olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, GHP'lerin ekonomik kârının ılıman iklimlerde elde edilmesi soğuk iklimlere göre daha zordur. Tersine, GHG emisyon azaltımının ılıman iklimlerde soğuk iklimlere göre daha büyük olduğu bulunmuştur.

Kara [38] yaptığı doktora tez çalışmasında jeotermal ısı kaynaklı ısı pompası ile bina ısıtma potansiyelini incelemiştir. Erzurum bölgesinde çıkan jeotermal kaynaklardan çıkan suyun sıcaklığı düşük olduğundan dolayı su-su tipi bir ısı pompası tasarlanarak sıcaklık 45°C'ye kadar çıkarılmış ve binanın ısıtması döşemeden ısıtma ile sağlanmıştır. R-22 soğutucu akışkanı kullanılan sistemin COP değeri 2,8 olarak hesaplanmıştır.

Kalıncı [39] yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında Dikili bölgesinde jeotermal enerji ile bölgesel ısıtma yapılma potansiyelini araştırmıştır. 4000 konutluk bölgede jeotermal ısıtma sistemi tasarlanarak, tesisin kurulum ve işletme giderlerini uygun değer seviyesinde tutacak tasarım gerçekleştirilmiştir. Buna göre en düşük toplam maliyet 761.629,36 TL/yıl olarak hesaplanmıştır

Kula [40] yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında Balıkesir Gönen'de bulunan ilk bölgesel jeotermal ısıtma sisteminin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirmiştir. Gönen jeotermal ısıtma sisteminin deneysel verileri 2 boyunca alınarak, çevre sıcaklığı ile birlikte analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda enerji ve ekserji kayıpları %46,34 ve %48,03 olarak hesaplanmıştır.

Aslan [41] yaptığı doktora tez çalışmasında Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin enerjetik ve termoekonomik analizlerini yapmıştır. 2009 yılı boyunca deneysel değerler alınarak sistem analiz edilmiştir. En yüksek enerji ve ekserji verimleri %50,55 ve %52,34 olarak hesaplanırken ortalama enerji ve ekserji verimleri ise %43,93 ve 47,44 olarak hesaplanmıştır.

Li ve arkadaşları [42] yaptıkları çalışmada bölgesel ısıtma ve soğutma sistemleri, düşük karbon potansiyelleri nedeniyle artan ilgi görüyor. Ancak, çoğu bölgesel ısıtma ve soğutma sistemi beklenen performans seviyesinde çalışmıyor. BISS ağlarının optimizasyonu ve iyileştirilmesi, (a) fosil yakıt tüketimini, CO2 emisyonunu ve ağ boyunca ısı kayıplarını azaltırken, (b) yatırım getirisini artırmak, hızla gelişen enerji manzarasında karar vericilerin karşılaştığı temel zorluklardır. Akademik literatür, saha deneyleri, simülasyonlar, optimizasyon stratejileri ve algoritmalar vb. dayalı araştırmalarla doludur. Ancak, akıllı şebekelerin, enerji depolamanın ve yenilenebilir enerjinin payının artırılmasını teşvik etmek üzere bölgesel ısıtma ve soğutma sistemlerinin optimizasyonu ve iyileştirilmesinin çok yönlü boyutlarını ele alan kapsamlı bir inceleme eksikliği vardır. Bu makale, enerji üretimi,

enerji dağıtımı, ısı alt istasyonları ve son kullanıcılar olmak üzere dört alana odaklanmakta, en son yöntem ve çözümleri tanıtmakta ve gelecek araştırmalar için yol açmaktadır.

Zhang ve arkadaşları [43] yaptıkları çalışmalarda merkezi güneş enerjili bölgesel ısıtma sistemi (MGEBS) için uygun bir yardımcı ısı kaynağı (YIS) seçmek, finansal faydaları artırmak için önemlidir. Bu çalışmada, Tibet Platosu, Çin'deki MGEBS için ekonomik bir YIS bulmak amacıyla, dört tipik şehir (Nyingchi, Qamdo, Lhasa ve Shigatse) ve üç yaygın kullanılan YIS (elektrikli kazan, gazlı kazan ve hava kaynaklı ısı pompası) araştırma nesnesi olarak seçilmiştir. Isının seviyelendirilmiş maliyeti (LCOH) ana değerlendirme indeksi olarak alınmış ve sistemin performansını simüle etmek ve analiz etmek için TRNSYS yazılım paketi kullanılmıştır. MGEBS'nin YIS ve güneş fraksiyonu (SF) seçimi optimize edilmiştir. Sonuçlar, elektrikli kazanın güneş ışınımının bol olduğu bölgeler için uygun olduğunu, SF'nin %85'ten fazla olması gerektiğini göstermiştir. Hava kaynaklı ısı pompasının ise güneş ışınımının sıradan veya zayıf olduğu bölgeler için uygun olduğu bulunmuştur. Bu durumda SF %50'den az olmalıdır. Bakım maliyetindeki değişimin LCOH üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ayrıca, SF ne kadar yüksekse, bakım maliyetinin LCOH üzerindeki etkisi de o kadar büyük olur. Ek olarak, YIS için hava kaynaklı ısı pompası kullanıldığında, garanti edilmeyen oran uygun şekilde artırılabilir, bu da sistemin genel ekonomisini iyileştirir. Sonuçlar, MGEBS'nin ekonomik performansını etkin bir şekilde optimize etmek için kullanılabilir ve Tibet Platosu, Çin'deki farklı bölgelerde YIS ve SF tasarımı için referans sağlayabilir.

Bach ve arkadaşları [44] yaptıkları çalışmada büyük kapasiteli elektrikli IP (ısı pompaları) entegrasyonunun teknik ve özel ekonomik yönlerini, birçok tüketici ve tedarikçiye sahip, son teknoloji büyük bir bölgesel ısıtma sistemi olan Büyük Kopenhag BI (bölgesel ısıtma) sisteminde analiz etmektedir. Analiz, IP'lerin sisteme optimum şekilde dağıtılmasını belirlemek için Balmorel enerji modelini kullanmaya dayanmaktadır. Kopenhag'da IP'lerde kullanılmak üzere potansiyel ısı kaynakları, farklı yerlerdeki sıcaklıklar, akışlar ve hidrografi ile ilgili verilere dayanarak, teknik kısıtlara uygun olarak belirlenmiştir. Balmorel modeli, IP'lerin daha iyi bir temsiliyetini sağlamak, COP (Performans Katsayısı) mevsimsel değişimlerini analiz etmek ve dağıtım veya iletim ağlarına bağlı HP'lerin performans farkını göstermek için daha da geliştirilmiştir. Optimizasyon, mevcut bir senaryo dikkate alındığında, DH dağıtım ağlarına bağlı IP'ler için yaklaşık 3500 FLH (tam yük saati) vermektedir. 2025 yılında beklenen sıfır karbon-dioksit emisyonu senaryosunda, yaklaşık

4000 FLH elde edilmektedir. IP'lerin yükseltilmiş sıcaklıklarda DH iletim ağına bağlandığı durumda, işletmeleri yaklaşık 1000 FLH azalmaktadır. IP'nin sabit ve değişken çalışma özellikleri karşılaştırıldığında önemli bir etki bulunmamıştır.

Rämä ve arkadaşları [45] yaptıkları çalışmada mevcut bir bölgesel ısıtma sisteminde yeni ısı pompası ve güneş kolektörü kapasitesinin etkileri, Helsinki'yi bir vaka çalışması olarak kullanarak araştırılmıştır. Mevcut ısı kaynağı, kombine ısı ve güç santralleri, kazanlar ve büyük ölçekli ısı pompalarından oluşmaktadır. Ayrıca, düşük dağıtım sıcaklıklarının potansiyel faydası da değerlendirilmiştir. Dağıtım için hem 80 ve 110 °C arasında dış sıcaklığa bağlı bir besleme sıcaklığı hem de sabit 65 °C besleme sıcaklığı göz önünde bulundurulmuştur. Isı kaynağının optimal çalışmasına ilişkin bilgi sağlamak için EnergyPro modelleme aracı kullanılmıştır. Isı kaynağındaki değişimler, sistemin emisyonları ve yeni ısı kaynaklarının teknik-ekonomik performansı ile birlikte incelenmiştir. Sonuçlar, CHP tabanlı ısı üretiminin 2030 yılına kadar %68-73 oranında azalacağını göstermektedir. Isı pompaları, ekonomik, emisyon ve enerji verimliliği açısından iyi performans gösteren ısı kaynağı için en ilginç seçenek olarak öne çıkmaktadır. Düşük sıcaklık dağıtımı, normal dağıtım sıcaklıklarına göre hem maliyetlerde hem de emisyon azaltımında sistemin performansını %4 oranında iyileştirmektedir.

Vesterlund ve arkadaşları [46] yaptıkları çalışmada bir bölgesel ısıtma ağının karmaşıklık seviyesi, ağın olgunlaşmasıyla artmakta ve bu da sıcak suyun ısı üretim yerlerinden son kullanıcılara dağıtım şeklini etkilemektedir. Bölgesel ısıtma sistemlerinin çoğu ayrıca çok kaynaklı ağlardır, tipik olarak bir ana üretim yeri ve gerektiğinde devreye giren diğer küçük uydu yerlerden gelen ısı ile desteklenmektedir. Genel olarak, yerel enerji şirketlerinin farklı üretim yerleri çalıştırıldığında örgütlü ağın nasıl davrandığına dair yeterli bilgisi yoktur. Farklı yerlerdeki ısı üretimi programı genellikle personel deneyimi ve bazı genel kural parmaklarına dayanmaktadır. Bu makalede, çok kaynaklı bir ağın toplam işletme maliyetlerini optimize etmek için, kullanıcı bölgelerindeki basınç ve sıcaklık seviyeleri ile her üretim yerindeki ısı üretimi özellikleri üzerindeki kısıtlarla birlikte, karmaşık bölgesel ağların modelleme ve simülasyonu için bir yöntem daha da geliştirilmiştir. Optimizasyon sonuçları, bazı boruların önerilen termal yük kapasitesini aşsa bile, ısı üretiminin dağıtılmasına göre en ucuz kaynakların kullanılmasının tercih edildiğini göstermektedir. Ana yer su besleme sıcaklığı, ağdaki daha düşük termal kayıplarla ilişkili maliyetlerin azalması, daha büyük bir su kütle akış hızının pompalama gücüyle ilişkili maliyetlerin artışı

ile dengelenmediğinden, son kullanıcılara sağlanan suyun sıcaklığı üzerindeki kısıtlamaya izin verilen en düşük değer olarak bulunmuştur.

Jiang ve arkadaşlarının [47] yaptıkları çalışmada, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, doğal gaz ve elektrik enerjisi gibi ortak kullanımlı bir entegre enerji tabanlı doğrudan bölgesel su ısıtma sistemi modeli önermektedir. Model, bağımsız bir rüzgar türbini jeneratörü, ısı üreticileri, bir su temin ağı ve ısı yükünü içermektedir. Bu çalışmada ayrıca, sistemin günlük işletmesindeki fosil yakıt tüketimini optimize eden bir optimal çalışma stratejisi de incelenmiştir. Model temel alınarak, karmaşık çalışma kısıtları ile optimal kontrol stratejisini elde etmek için kullanılan bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. GSO (Grup Arama Optimizasyonu), değişken kısıtları karşılarken yakıt tüketimini en aza indirmek için kazanların optimal ayar sıcaklığını ve pompaların optimal su akışını izlemek için kullanılmıştır. Modeli ve optimal çalışma stratejisini doğrulamak için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimal çalışma stratejisi, optimize edilmemiş bir kontrol stratejisi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, modelin geçerliliğini kanıtlamakta ve optimal çalışma stratejisinin sistemin çalışmasını daha enerji verimli hale getirebildiğini göstermektedir. Önerilen sistem, geleneksel bir doğal gaz ısıtma sistemi ile karşılaştırılarak da değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçlar, yatırım olanaklılığını, günlük işletmede elde edilen önemli enerji tasarrufunu ve maliyet azaltımını göstermektedir.

Olsthoorn ve arkadaşları [48] yaptıkları çalışmalarda bina ve altyapı sektörünün, dünya genelindeki enerji tüketiminin %46'sından sorumlu olduğunu göstermiştir. Kömür veya petrol gibi geleneksel enerji kaynaklarının çoğu yenilenemez türdendir ve önümüzdeki on yıllarda tükenme olasılığı yüksektir. Mevcut enerji krizine çözüm bulmak için, güneş kaynakları gibi yenilenebilir enerji kullanımı ve enerji verimliliğinde önemli bir artış önerilmektedir. Özellikle ısıtma alanında enerji üretimi, dağıtımı ve tüketiminde birçok avantaj sunan bölgesel ısıtma sistemleri (BİS) son zamanlarda daha fazla ilgi görmektedir. Bu makale, BİS'lerin enerji üretimi, modelleme ve optimizasyonundaki son gelişmeleri gözden geçirmektedir. Enerji kaynaklarının sürdürülebilirlik ve BİS'ye entegrasyon kolaylığı açısından bir sınıflandırması sunulmaktadır. Mevcut modelleme yöntemleri, hesaplama kısıtları, hassasiyet seviyesi ve çıktı seviyesindeki belirlilik derecesi açısından karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, BİS'lerin son çalışmaları, enerji/ekserji verimliliği, maliyet, eksergo-ekonomik/termo-ekonomik ve sera gazı (SGG) ve kirletici üretimi gibi optimizasyon amaçlarına göre sınıflandırılmaktadır.

Arslan ve arkadaşları [49] yaptıkları çalışmada, bölgesel jeotermal ısıtma sistemi (BİS) için evsel kullanıma yönelik yeni bir konut tipi ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Bu amaçla, ısı pompası sistemi konutların alt istasyonlarına entegre edilmiştir. Isı pompası sistemi, geleneksel buharlaştırıcıyı termal enerji depolama (TED) ünitesi ile değiştirerek oluşturulmuştur. Bu bağlamda, zirve yükler için tasarlanmış bir kabuk ve boru gizli ısı TED sistemi kullanılmıştır. 66 farklı sistem parametrik olarak oluşturulmuş ve termodinamik olarak analiz edilmiştir. Gözlenen durumlar daha sonra ekonomik ve çevresel açılardan değerlendirilmiştir. Son olarak, en uygun sistem, verimlilik analizi tekniği ile çıktı tatmin ediciliği (VATÇT) adı verilen birçok kriterli karar verme analizi ile belirlenmiştir. Yatırım yapılabilir bir tasarımın, 6.35 milyon \$ NPV değeri, %15.24 ekserji verimliliği ve yılda 1435,32 kton CO2 azaltımı ile elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Carotenuto ve arkadaşlarının [50] yaptığı çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeni bir düşük sıcaklık bölgesel ısıtma ve soğutma sistemi, dinamik bir simülasyon modeli ve enerji-ekonomik bir analiz ile incelenmektedir. Jeotermal, güneş ve biyokütle enerji kaynaklarının entegrasyonundan oluşan yeni bir çözüm ele alınmaktadır. Düşük sıcaklık jeotermal kuyu, vakumlu güneş kolektörleri ve yardımcı odun kırımıcısı kazanı, kış sezonunda bölgesel ısıtma sistemine enerji sağlamak için kullanılmaktadır. Yazın, bölgesel soğutma sağlamak için bir adsorpsiyon soğutucu devreye sokulurken, yıl boyunca sistem, bölge kullanıcıları için sıcak su üretmektedir. Vaka çalışması, İtalya'nın güneyindeki Pozzuoli şehrine yakın Monterusciello bölgesi için geliştirilmiştir. İncelenen vaka çalışması için, yaklaşık 55 °C sıcaklıkta bir jeotermal kaynak ve Akdeniz ikliminin tipik ışıyım koşulları mevcuttur. Göz önünde bulundurulan bölge alanındaki binaların iyileştirilmesi düşünülmektedir. Önerilen sistem, TRNSYS ortamında modellenmiş olup, sistem çalışmasını yönetmek ve bölge kullanıcılarının termal enerji talebiyle uyumlu hale getirmek için yeni ve ayrıntılı bir kontrol stratejisi uygulanmıştır. Bölge şebekesinin kapsamlı bir modeli ve şebeke kullanıcılarının ısıtma ve soğutma talebinin ayrıntılı bir modeli, sistemin dinamik simülasyon modelinde dikkate alınmıştır. 1 yıllık bir simülasyon gerçekleştirilmiş ve sistem performansı günlük, haftalık ve yıllık zaman bazlarında analiz edilmiştir. Sistem analizi, sistemin enerji ve ekonomik karlılığını güneş kolektörü alanının bir fonksiyonu olarak değerlendirmek için yapılan bir duyarlılık analizi ile tamamlanmıştır. Sonuçlar, jeotermal ve güneş enerjisinin sadece kışın bölge kullanıcılarının termal talebini karşılamak için kullanıldığını, yazın ise sadece yardımcı biyokütle kazanının devreye sokulmasının zorunlu olduğunu göstermektedir. Yeni sistem, güneş kolektörü alanı verimliliği (%40'ın

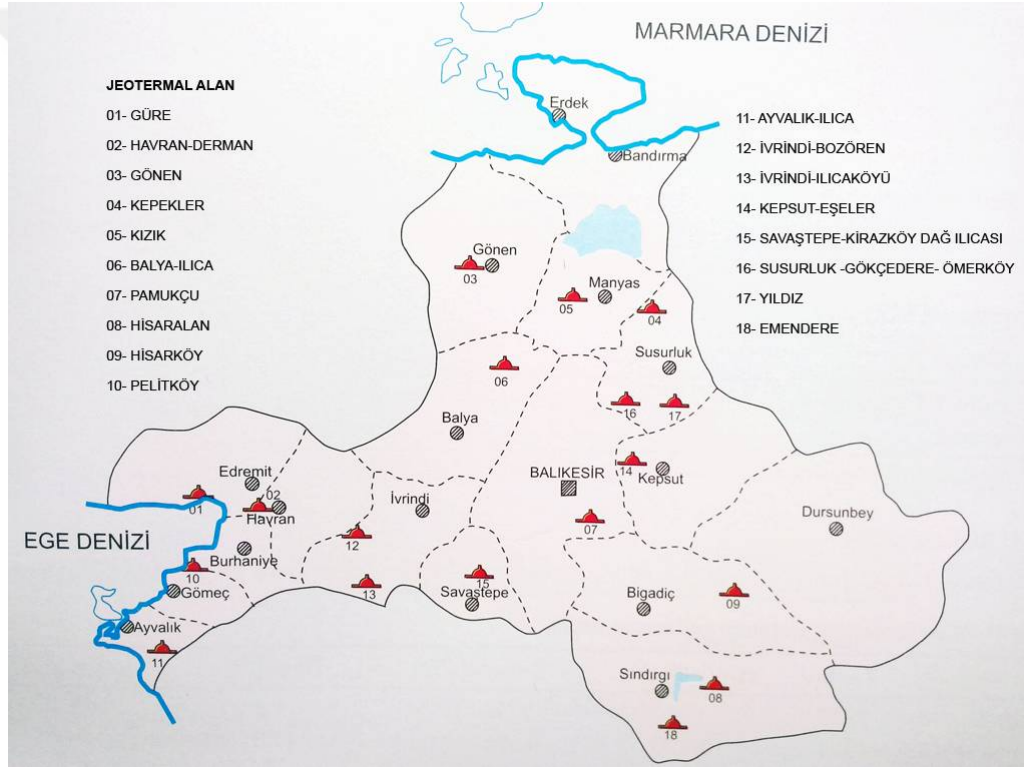
üzerinde) ve adsorpsiyon soğutucu Performans Katsayısı (0,5) açısından tatmin edici bir yıllık performans elde etmektedir. Sistem, herhangi bir kamu finansmanı olmadan ekonomik olarak uygun değildir (Basit Geri Ödeme Süresi 20,9 yıl), ancak önemli bir birincil enerji oranı elde edilmektedir (%75'in üzerinde). Kamu finansmanı politikaları durumunda, Basit Geri Ödeme Süresi yarıya indirilebilir.

Pratiwi ve arkadaşının [51] yaptığı çalışmada jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinin, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayabileceğini, ancak yavaş ilerlemesi, sadece sondaj başarısı ve bölgesel ısıtma tasarımı gibi belirli koşullar altında maliyet açısından rekabetçi olduğunu göstermektedir. Jeotermal bölgesel ısıtmanın diğer alternatiflerden daha az maliyet rekabetçi olduğu durumlarda bile, geliştirme sırasında ortaya çıkan harcamalar, yerel ekonomiyi de yararlandırabilecek dolaylı ekonomik etki yaratmaktadır. Bu çalışmada, İsviçre'nin Cenevre kantonu örnek olayı kullanılarak, bölgesel jeotermal ısıtma geliştirmek için 5.892 karar yolu (karar kombinasyonu) arasından maliyet rekabetçiliği ve ekonomik etkiler analiz edilmekte, yardımcı ısı kaynağı seçimi de dahil olmak üzere en etkili kararları belirlemek için kapsamlı bir duyarlılık analizi yapılmaktadır. Yatırım maliyetleri ve jeotermal ısı üretimi arasında optimum bir kombinasyon elde etmek için ısı karışımındaki jeotermal kapsamının doğru oranı ve atık yakma entegrasyonu maliyet rekabetçiliği için hayati önem taşımaktadır. Bireysel pelet kazanlarını içeren jeotermal sistemler yüksek ekonomik etki çarpanları yaratmaktadır. Yerli etkinin yüksek payı, özellikle ikinci veya üçüncü nesil bölgesel ısıtma ile kullanıldıklarında, bağımsız jeotermal tesislerde tutarlı bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Orta ve derin kuyulardan (1.500 m ve 2.500 m) elde edilen jeotermal bölgesel ısıtmanın atık ısı ile birleştirilmesi, ortalamanın üzerinde maliyet rekabetçiliği ve ekonomik etkiler elde edilen sinerjiler yaratmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Bigadiç İlçesinin Tanıtımı

Bigadiç, Marmara Bölgesi'nin güneybatısında, Balıkesir il merkezinin ise güneydoğusunda yer alan Balıkesir'in bir ilçesidir (Şekil 3.1). Deniz seviyesinden yüksekliği 180 metre olup toplam yüzölçümü 1007 km²'dir. İlçe merkezi 39° 23' 46" kuzey enlemi ve 28° 8' 9" doğu boylamında yer almaktadır. Nüfüsü 2023 yılı verilerine göre 49.177'dir. Bu nüfus 25.440 erkek ve 23.737 kadından oluşmaktadır. Türkiye'nin ve dünyanın en önemli bor mineralleri madenlerine sahiptir. Ayrıca, Selenyum ve Kükürt bulunan kaplıcalarıyla öne çıkmaktadır.

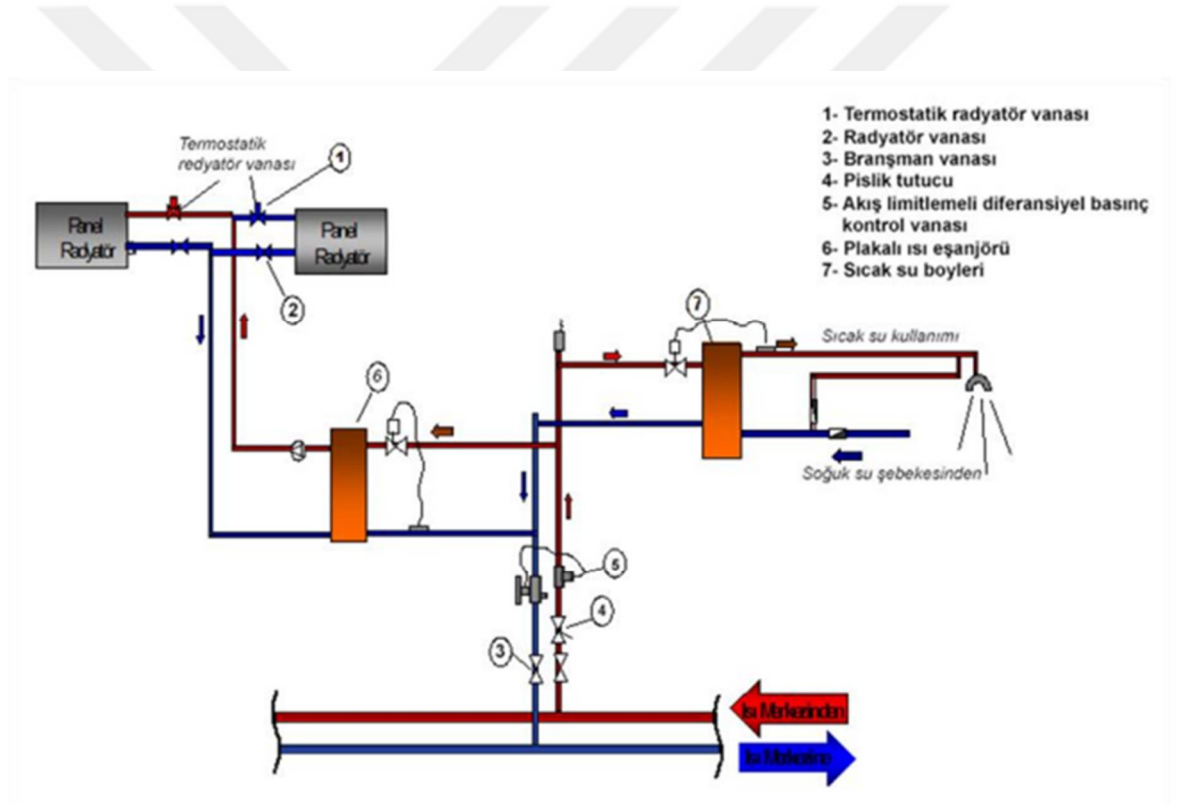


Şekil 3.1: Bigadiç'in Balıkesir ilindeki konumu.

3.2 Bigadiç Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi

Bigadiç JBIS, 3000 konut ısıtacak şekilde projelendirilmiş olup, 2004-2005 ısıtma sezonunda 300 abone ile ısıtma faaliyetine başlamıştır. Sistemde 2023 yılı itibariyle 981'i konut, 7'si okul, 15'i resmi kurum ve 47'si ticarethane olmak üzere toplam 1050 konut eşdeğerlik ısıtma gerçekleştirilmektedir.

Üç bölümden oluşan Bigadiç JBIS'nin birinci bölümü enerji üretim hattı olup, üretim kuyularını, çamur ve gaz seperatörlerini, kuyu pompaları ve ekipmanlarını içermektedir. İkinci bölüm enerji dağıtım hattı olup ısı aktarımını sağlayan ısı değiştiricilerini (eşanjörler) ve sirkülasyon pompalarını içerir. Üçüncü bölüm ise enerji tüketim hattı olup, bina ısıtma sistemlerini içermektedir. Jeotermal enerjinin üretiminin gerçekleştirildiği, Hisarköy kuyular bölgesi enerji üretim hattını; Bigadiç'e gelen jeotermal enerjinin plakalı ısı eşanjörleri yardımıyla ısısının alındığı ve bu ısının ısıtma zonlarına dağıtımının gerçekleştirildiği ısı merkezi enerji dağıtım hattını ve binalara ulaştırılan sıcak suyun tüketiminin gerçekleştirildiği bina altı eşanjör devreleri ise tüketim hattını oluşturmaktadır. Şekil 3.2'de Bigadiç JBIS'de yaygın olarak kullanılan bina ısıtma devresi tesisat Şeması gösterilmektedir [52].

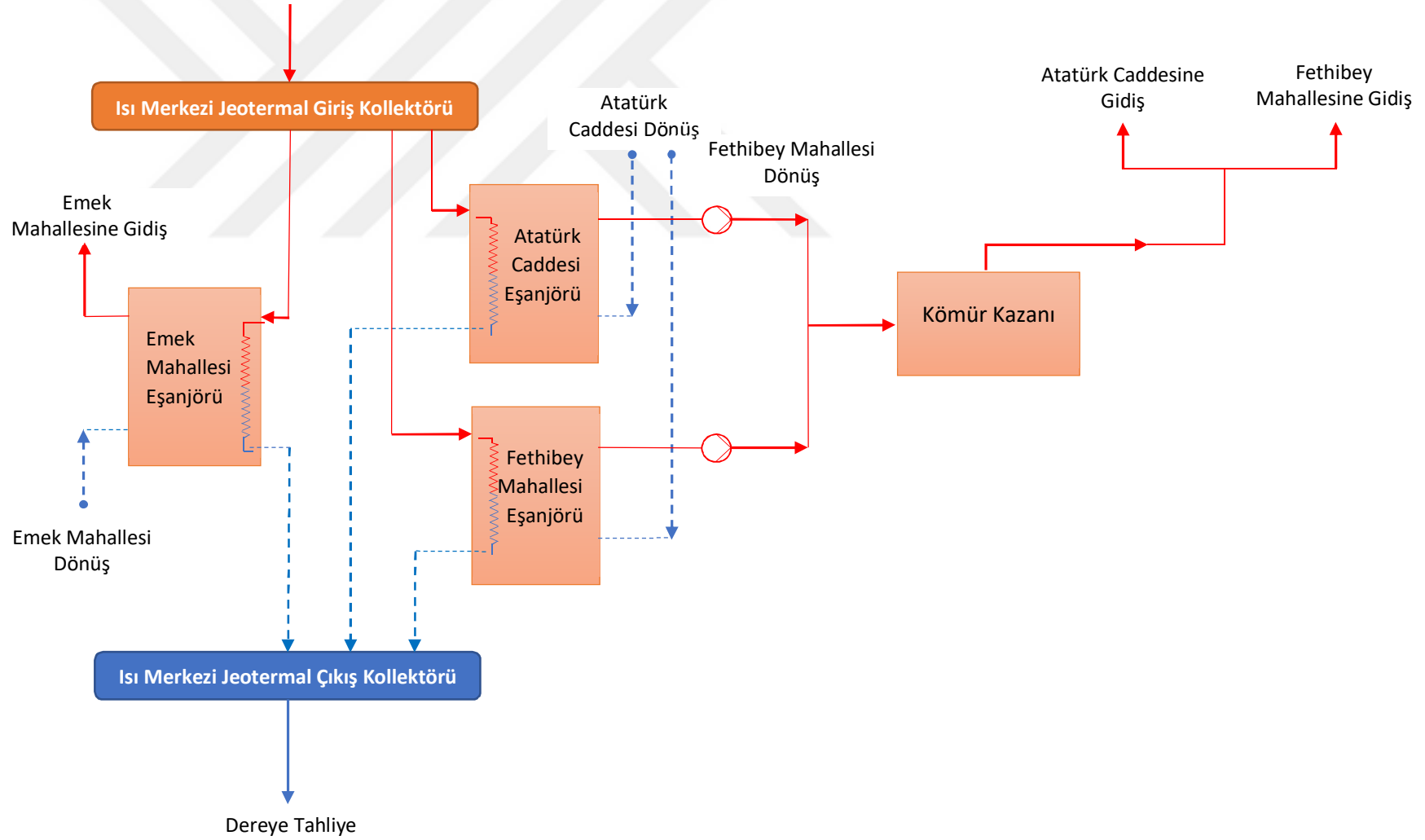


Şekil 3.2: Bigadiç JBIS'de bulunan bina ısıtma devresi tesisat Şeması.

Isı talebinin arttığı soğuk kış dönemlerinde, jeotermal enerjinin yetersiz kaldığı durumlar için ek ısıtma sistemleri kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda LNG ve fuel oil yakıtların yakıldığı 2 adet 2.000.000 kcal/h kapasiteli sıvı yakıt kazanı, 2012 yılının Mart ayına kadar aktif olarak kullanılmıştır. Isıtma sezonu boyunca bu kazanlardan genel olarak biri çalıştırılırken, kuyuların arızalanması veya sıcaklıkların çok düşük olması gibi durumlarda

iki kazan devreye alınmıştır. Sistemde bulunan ısıtma zonlarından Atatürk Caddesi hattında bulunan dolaşım suyu tamamen, diğer bir ısıtma zonu olan Fethibey Mahallesi hattı ise kısmen kazan takviyesi ile desteklenmektedir. Üçüncü ve son ısıtma zonu Emek Mahallesi hattında ise, mahalle kot yüksekliğinin fazla olması nedeniyle, kazan takviyesi yapılmamaktadır. LNG ve fuel oil yakılan ek ısıtma sistemleri günümüzde yerini 3.000.000 ve 4.000.000 kcal/h kapasiteli, bağlantı yapıları aynı olan Kısırdere yakanmış 10 - 18 mm tane boyutlu linyit kömürü yakan iki kazana bırakmıştır. Emek Mahallesi dışında, diğer iki ısıtma zonu tamamıyla bu kazanlar ile desteklenmektedir. Ortalama sıcaklıkların 13-14°C olduğu geçiş mevsimlerinde pik güç üniteleri devre dışı bırakılarak, sistemdeki ısı ihtiyacı sadece jeotermal enerjiyle karşılanmaktadır. Bigadiç JBIS'nin şematik çalışma sistemi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



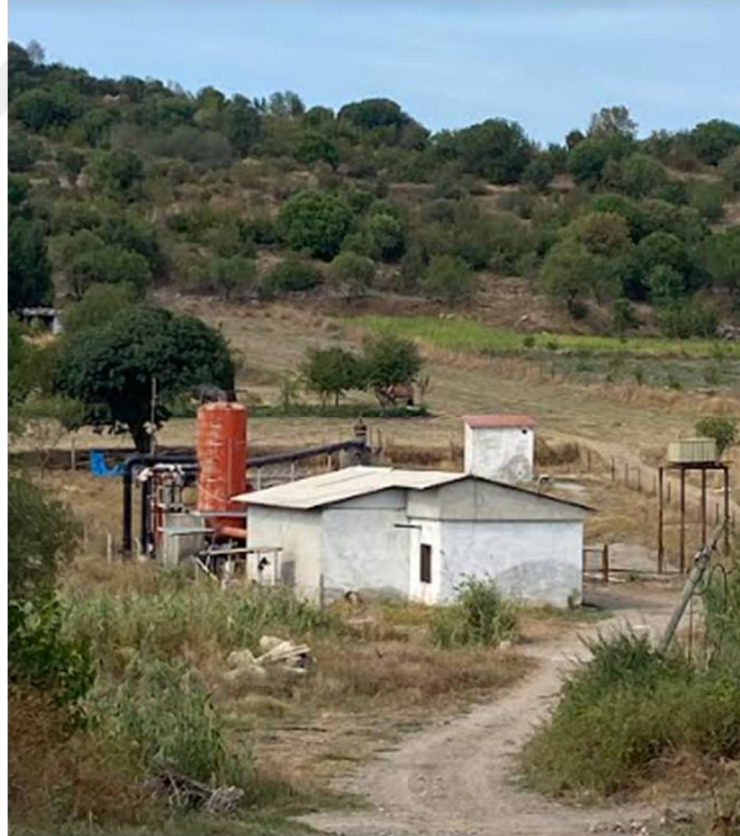


Şekil 3.3: Bigadiç JBIS'nin mevcut çalışma şeması.

3.2.1 Hisarköy Jeotermal Sahası

Anadolu'nun İç Batı bölgesinde yer alan Bigadiç-Hisarköy jeotermal sahası (Şekil 3.4), çalışma alanının temelini yüzeyde belirgin olmayan ofiyolit oluşturur. Bu ofiyolit birimi, tersiyer döneme ait riyodasit, dasit, tuf, aglomera ve karbonat katmanlarından oluşan dedetepe formasyonu ile örtülmüştür. Bu oluşumların üstünde ise kuvaterner döneme ait alüvyonlar ve travertenler bulunmaktadır. Bölgede yüzeye çıkan sıvıların yükselmesini sağlayan temel fay sistemi, KB-GD ve K-G doğrultularında uzanan fay sistemi üzerindedir.

Yer altı suları ve akarsular, bölgeye yağın yağmurlarla birlikte derinlere doğru sızmakta ve jeotermal akışkanların beslenmesini sağlamaktadır. Yeraltı suyu, tektonik yapıların etkisiyle daha da derinlere inmekte ve ısınmaktadır. Bölgedeki jeotermal akışkanların beslenmesi genellikle bu sularla gerçekleşmektedir. Isı kaynağı ise yerkabuğundan gelen magmanın yüzeye yakın yerlerde oluşturduğu cepler olarak düşünülmektedir.



Şekil 3.4: Hisarköy jeotermal sahası.

Hisarköy jeotermal alanında derinlikleri 307 ile 750 m arasındaki 9 jeotermal kuyu bulunmaktadır. Kuyu sıcaklıkları 52 ile 104°C, debileri ise 14 ile 60 l/s arasında değişmektedir. Bu kuyulardan 2010 yılı Aralık ayından beri sadece HK2 ve HK8 kuyuları aktif olarak çalışmaktadır (Şekil 3.5). Diğer kuyuların debileri çeşitli sebeplerle azalmış ve kullanılamaz hale gelmiştir. 2023 yılı ilk çeyreği itibarıyla fizibilite çalışmalarının başladığı 9. kuyunun sondaj işlemleri Eylül ayında başlayarak 60 gün içerisinde tamamlanmış ve test aşamalarına geçilmiştir (Şekil 3.6). Testler bittiğinde sistem yalnızca 9. kuyu (HK9) tarafından beslenecektir. Bigadiç JBIS’de yer alan jeotermal kuyuların açılış özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.5: Hisarköy HK8 kuyusu.

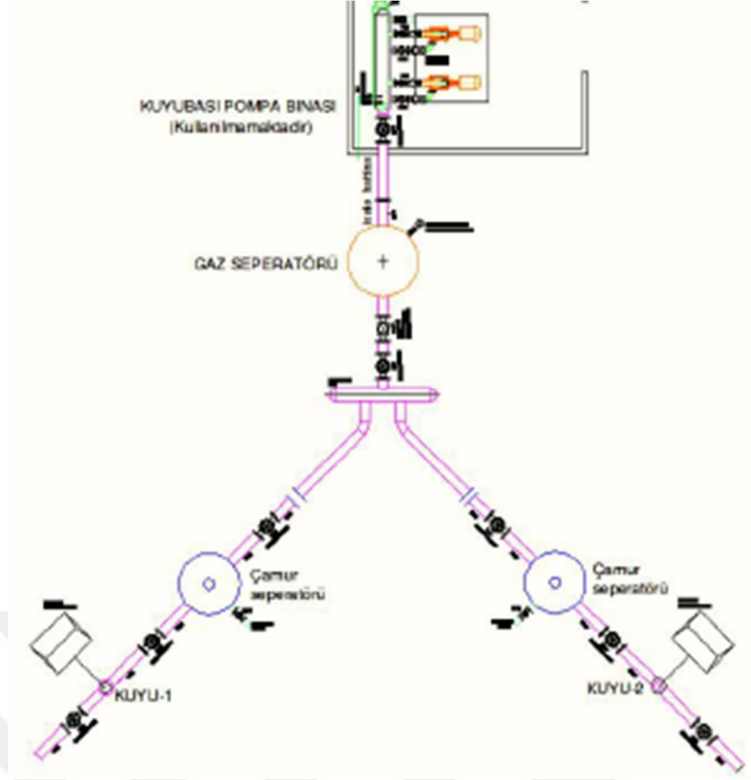


Şekil 3.6: Hisarköy 9. sondaj kuyusu.

Tablo 3.1: Hisarköy Jeotermal Sahasındaki kuyuların açılış özellikleri.

| Kuyu adı | Açıldığı yıl | Açan kurum | Derinlik (m) | Sıcaklık (°C) | Debi (l/s) | Seviye (m) | Güncel işletme durumu |
|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| HK-1 | 2000 | MTA | 701 | 94 | 14 | - | Servis dışı |
| HK-2 | 2001 | MTA | 429 | 98 | 60 | 65 | Üretim |
| HK-3 | 2001 | MTA | 307 | 98 | 40 | - | Servis dışı |
| HK-4 | 2001 | MTA | 750 | 57 | 3 | - | Servis dışı |
| HK-5 | 2002 | MTA | 590 | 52 | 2 | - | Servis dışı |
| HK-6 | 2006 | MTA | 624 | 70 | 20 | - | Servis dışı |
| HK-7 | 2007 | MTA | 397 | - | - | - | Servis dışı |
| HK-8 | 2007 | Özel firma | 630 | 93 | 32 | 35 | Üretim |
| HK-9 | 2023 | Özel firma | 500 | 104 | 40 | 80 | Üretim |

Hisarköy’de üretilen jeotermal akışkan ilk olarak çamur ve tortusunun ayrıştırılması için çamur ayırıcı seperatörlere (kuyu başı seperatörü) gönderilmektedir (Şekil 3.7). Burada çamurdan ayrılan jeotermal akışkan daha sonra içinde bulunan gazlardan arındırılmak ve geriye kalan son çamur ve tortunun temizlenmesi için ana gaz ayırıcı seperatöre iletilmektedir (Şekil 3.8). Jeotermal akışkan daha sonra 18 kilometrelik bir isale hattını takip ederek, kuyular bölgesinden yaklaşık 210 metre daha düşük kot seviyesinde bulunan Bigadiç ilçe merkezindeki ısı merkezine, pompa yardımına gerek duymaksızın gönderilmektedir.



Şekil 3.7: Ana gaz seperatörü şeması.



Şekil 3.8: Ana gaz seperatörü.

Hisarköy'de üretim kuyularının ortalama sıcaklığı 93°C olmasına rağmen, isale hattında yaşanan ısı kayıpları nedeniyle, bu sıcaklık ısı merkezi girişinde sıcaklık değeri 82°C'ye kadar düşebilmektedir. 18 kilometrelik isale hattı DN250 ön izolasyonlu (3,54 cm kalınlığında poliüretan yalıtımlı) paket borulardan oluşmaktadır. Isı kayıpları, mevsimsel toprak sıcaklıklarına ve jeotermal akışkan debisine bağlı olarak isale hattı boyunca değişiklik göstermektedir. Tek bir kuyunun düşük debili çalıştığı durumlarda, isale hattında ısı kayıpları artmakta ve bu durum hat çıkışında sıcaklıkların daha fazla düşmesine neden olmaktadır.

3.2.2 Isı Merkezi

Bigadiç JBIS, toplam üç farklı ısıtma bölgesinden oluşmaktadır (Şekil 3.9). Zon 2 ve Zon 3, 2005 yılının son dönemlerinde tamamlanmış ve sisteme bağlı konutların kış sezonundaki ısıtma ve sıcak su ihtiyacı karşılanmıştır. Bu süreçte Bigadiç-Hisarköy bölgesinde 2 üretim kuyusu (HK2 ve HK3) kullanılmıştır. 2006 yılının ortasında, sistemin geri kalan kısmı tamamlanmış (Zon 1) ve sistemdeki konutların ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak için başka bir kuyu (HK6) sisteme dahil edilmiştir.



Şekil 3.9: Isı merkezinin görüntüsü.

Isı merkezinde, plakalı ısı eşanjörleri, dolaşım pompaları, pik güç üniteleri, genleşme depoları, ısıtma şebekesi suyunu destekleyen sistemler ve bu sistemlerin kontrol panoları gibi temel bileşenler bulunmaktadır. Jeotermal akışkanın ısı enerjisini şehir ısıtma şebekesine aktarmak amacıyla üç adet titanyum plakalı eşanjör kullanılmaktadır. Bu cihazların kapasite ve teknik özellikleri Tablo 3.2’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Jeotermal akışkanın eşanjörlere giriş debileri, ısı merkezi personeli tarafından manuel olarak ayarlanarak her ısıtma bölgesine eşit sıcaklıkta şehir ısıtma suyu temin etmek üzere düzenlenmektedir. Bigadiç JBIS'nin işletme sırasında elde edilen ortalama dönüştürme sıcaklıkları, bölgesel ısıtma dağıtım ağı için 55/45°C ve bina içi devreler için 51/47°C olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2: Eşanjörlerin teknik özellikleri.

| Eşanjör No | Bulunduğu ısıtma zonu | Marka | Plaka sayısı | Boyut (en x boy) | Kapasite (kW) |
|------------|-------------------------|-------|--------------|------------------|---------------|
| 1 | 1.Zon (Emek Mah.) | ARES | 69 | 250-60cm | 5232 |
| 2 | 2.Zon (Fethibey Mah.) | ARES | 380 | 210-60cm | 10465 |
| 3 | 3.Zon (Atatürk Caddesi) | APV | 300 | 160-60cm | 6395 |

Emek ve Fethibey mahallelerinde birer adet, Atatürk Caddesi’nde bulunan ısıtma zonunda ise ikişer adet olmak üzere toplamda 4 sirkülasyon pompası bulunmaktadır (Tablo 3.3). Ayrıca, her bir hat için bir de yedek sirkülasyon pompası bulunmaktadır. Tüm sirkülasyon pompaları, değişken debi sağlayabilme özelliğine sahip frekans kontrollü motorlarla donatılmıştır. Bu özellik sayesinde, sistemin farklı yük koşullarına uyum sağlayabilmesi adına hat debileri ayarlanabilmektedir. Bu esneklik, sistemin değişen gereksinimlere daha iyi cevap vermesini sağlamaktadır.

Tablo 3.3: Sirkülasyon pompalarının teknik özellikleri.

| Pompa No | Bulunduğu hat | Hm (mSS) | Güç (kW) | Devir (d/dak) |
|----------|-----------------------|----------|----------|---------------|
| 1 | Emek Mah. hattı | 85 | 45 | 2950 |
| 2 | Fethibey Mah. hattı | 45 | 45 | 2950 |
| 3 | Atatürk Caddesi hattı | 45 | 75 | - |

Bigadiç JBIS’de ısıtma desteği, kapasiteleri 3.000.000 ve 4.000.000 kcal/h olan iki kömür kazan ünitesi ile sağlanmaktadır (Şekil 3.10). Isıtma sezonlarında genelde daha küçük olan ünite kullanılırken, ünitelerde 10-18 mm boyutunda linyit kömürü yakılmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.10: Bigadiç JBIS kömür kazan ünitesi.



Şekil 3.11: Kazanlarda yakılan linyit kömürü.

3.2.3 Boru Hatları

Bigadiç JBIS'de bulunan boru hatları üç ana bölüme ayrılabilir: kuyu birleştirme hatları, isale hattı ve şehir içi ısıtma şebekesi ile branşman (şehir dağıtım) hattı. Şehir dağıtım hattı, 1., 2. ve 3. zon olmak üzere üç farklı bağımsız güzergaha sahiptir. Sistemdeki tüm hatlar, farklı çaplarda olsa da aynı özelliklere sahip ön izolasyonlu paket boru sistemlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler, düz dikişli St37 çelik taşıyıcı iç boru, yoğunluğu 80 kg/m^3 olan poliüretan izolasyon ve HDPE dış kılıftan oluşmaktadır. Bu boru sistemleri, farklı bölgelerdeki ısıtma hatlarını ve dağıtım ağını korumak ve jeotermal akışkanın enerjisini taşımak için kullanılmaktadır. Bigadiç JBIS şehir dağıtım boru hattı yaklaşık 69 km uzunluğa sahiptir (Tablo 3.4).

Tablo 3.4: Bigadiç JBIS şehir dağıtım hatlarındaki boruların özellikleri.

| Boru cinsi | Dağıtım hatlarındaki boru uzunlukları (m) | | |
|--------------------------------|---|---------------------|--------------------|
| | Emek Mah. hattı | Fethibey Mah. hattı | Atatürk Cad. hattı |
| Ø 25 mm Ön İzoleli Paket Boru | 270 | 588 | 450 |
| Ø 32 mm Ön İzoleli Paket Boru | 6492 | 13044 | 6948 |
| Ø 40 mm Ön İzoleli Paket Boru | 600 | 4236 | 2778 |
| Ø 50 mm Ön İzoleli Paket Boru | 966 | 4842 | 1992 |
| Ø 65 mm Ön İzoleli Paket Boru | 2586 | 5076 | 3618 |
| Ø 80 mm Ön İzoleli Paket Boru | 822 | 2208 | 918 |
| Ø 100 mm Ön İzoleli Paket Boru | 612 | 1332 | 396 |
| Ø 125 mm Ön İzoleli Paket Boru | 504 | 1074 | 816 |
| Ø 150 mm Ön İzoleli Paket Boru | 468 | 132 | 804 |
| Ø 200 mm Ön İzoleli Paket Boru | 2520 | 810 | 1692 |
| Ø 250 mm Ön İzoleli Paket Boru | - | 2088 | - |

Dağıtım hattında oluşan sızıntılar ve kaçaklar nedeniyle, bu hatta günde yaklaşık 65 ton su takviyesi yapılmaktadır. Ayrıca jeotermal akışkan kimyasal özellikleri itibariyle borularda kabuklaşma meydana getirmektedir. Kabuk oluşumunu engellemek için kuyularda bir inhibitör sistemi kullanılmaktadır. İsale hatlarında ise yaklaşık 18 km uzunluğunda DN 250 paket boru sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.12). Tüm boru hatları toprağa, yaklaşık 1,5 metre derinliğe gömülerek döşenmiştir. Bu yöntem, boruların korunması ve sistemlerin uzun süreli dayanıklılığını sağlamak için tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 3.13: Bigadiç İlçesi Okçular mahallesinde yer alan GES.

3.3 Boru Hatlarında Isı Kaybı

Ön izolasyonlu paket boruların direkt olarak toprağa gömülmesi halinde sürekli rejimde birim uzunluk başına ısı kaybı,

$$\dot{Q} = \frac{2\pi(T_{iort} - T_{toprak})}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{k_4} \ln \frac{4h}{d_4}} \quad (3.1)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada, T_{iort} boru hattı giriş ve çıkış su sıcaklık ortalamasını (K); T_{toprak} boruların gömüldüğü derinlikteki toprak sıcaklığı (K); k_1 , k_2 , k_3 boru sistemini oluşturan sırasıyla, servis borusu, ısı yalıtım malzemesi ve dış kılıf borusunun, k_4 toprağın ısı iletim katsayılarını (W/mK); d_2/d_1 , d_3/d_2 , d_4/d_3 sırasıyla servis borusu, yalıtım malzemesi ve kılıf borusunun dış ve iç çap oranlarını; h ise boruları döşeme derinliğini (m) göstermektedir [52].

3.3 Seviyelendirilmiş Isı Maliyeti

Seviyelendirilmiş ısı maliyeti (LCOH), elektrik enerjisi üretim sistemleri için yaygın olarak kullanılan ekonomik ölçü olan seviyelendirilmiş enerji maliyetine (LCOE) benzer bir kavramdır. LCOH, optimum ısıtma projelerini belirlemek için kullanılır [53, 54, 55, 56, 57, 58].

Bu yöntem, farklı ısı üretim teknolojilerini karşılaştırmanıza olanak tanır. LCOH'yi hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılır [59]:

$$LCOH = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{i=1}^N \frac{H_t}{(1+r)^t}}, \frac{TL}{kWh} \quad (3.2)$$

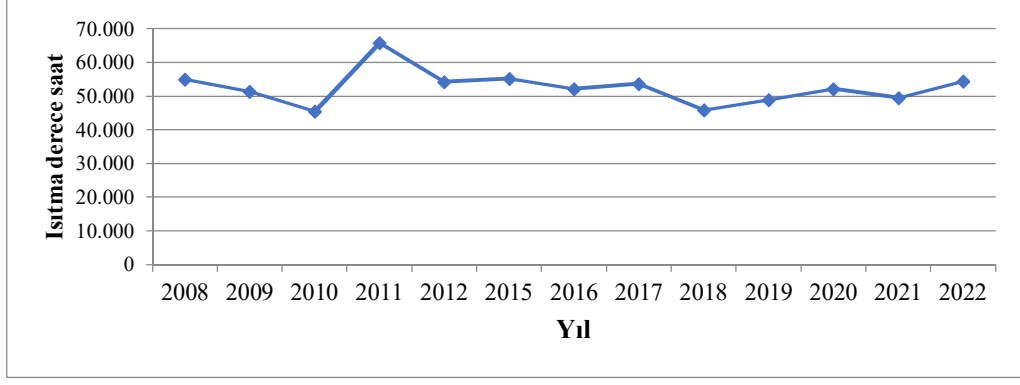
Burada I_t , t. yıldaki ilk yatırım maliyetlerini, TL olarak; M_t , t. yıldaki ısı tedarik sisteminin işletme ve bakım maliyetlerini, TL olarak; F_t , t. yıldaki yakıt maliyetlerini, TL olarak; H_t , t. yıldaki ısı üretimi, kWh olarak; r, iskonto oranını ve N, projenin yıl olarak ömrünü göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmada, Bigadiç ilçesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden (MGM) alınan geçtiğimiz son 13 yıla ait (2008-2022) bazı saatlik ve aylık dış hava sıcaklık verileri analiz edilerek aşağıda belirtilen tablo ve grafikler elde edilmiştir. Verilerindeki eksiklikler nedeniyle 2013 ve 2014 yıllarına ait değerler söz konusu analize dahil edilmemiştir. Saatlik ortalama sıcaklık (SOS) değerleri kullanılarak, 20°C iç ortam referans sıcaklığı için aylık ısıtma derece-saat (IDS) değerleri hesaplanmıştır. Buna göre, 2013 ve 2014 yılları hariç geçtiğimiz son 13 yılın ısıtma sezonu bazında ortalama derece-saat değeri 52.629'dur. Isıtma enerjisi ihtiyacının en az olduğu yıl 45.622 derece-saat değeri ile 2010 yılı iken; bu ihtiyacın en fazla olduğu yıl ise 65.805 derece-saat değeri ile 2011 yılıdır (Tablo 4.1 ve Şekil 4.1).

Tablo 4.1: Bigadiç ilçesi 2008-2022 yılları için hesaplanan aylık ısıtma derece-saat değerleri.

| Yıl | Isıtma sezonundaki aylar | | | | | | | | Sezonluk toplam IDS |
|------|----------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|----------|--------|---------------------|
| | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Ekim | Kasım | Aralık | |
| | Ayların toplam içindeki dağılımı | | | | | | | | |
| 2008 | 13.682 | 10.597 | 5.496 | 3.764 | 2.556 | 3.210 | 5.964 | 9.813 | 55.081 |
| 2009 | 10.609 | 8.475 | 8.330 | 5.568 | 2.285 | 1.939 | 6.854 | 7.288 | 51.348 |
| 2010 | 9.847 | 6.725 | 7.929 | 4.880 | 1.843 | 3.487 | 3.342 | 7.568 | 45.622 |
| 2011 | 11.515 | 9.931 | 8.974 | 7.148 | 3.040 | 5.384 | 10.329 | 9.483 | 65.805 |
| 2012 | 12.438 | 11.919 | 9.233 | 3.244 | 1.608 | 1.452 | 5.049 | 9.341 | 54.283 |
| 2015 | 10.881 | 8.953 | 8.134 | 5.835 | 1.290 | 2.441 | 5.289 | 12.402 | 55.225 |
| 2016 | 10.945 | 5.894 | 6.778 | 3.031 | 2.240 | 3.458 | 6.846 | 12.918 | 52.111 |
| 2017 | 13.407 | 8.201 | 7.628 | 5.378 | 2.367 | 3.841 | 6.475 | 6.339 | 53.635 |
| 2018 | 10.469 | 7.218 | 4.779 | 3.732 | 965 | 2.256 | 5.738 | 10.731 | 45.888 |
| 2019 | 10.193 | 9.154 | 7.400 | 5.353 | 1.205 | 2.207 | 4.130 | 9.296 | 48.938 |
| 2020 | 11.465 | 8.600 | 7.525 | 6.107 | 2.560 | 1.514 | 7.465 | 7.002 | 52.238 |
| 2021 | 8.484 | 8.390 | 9.367 | 4.857 | 1.657 | 3.714 | 5.128 | 7.858 | 49.455 |
| 2022 | 11.789 | 9.022 | 11.397 | 4.308 | 2.413 | 3.043 | 5.192 | 7.392 | 54.555 |
| | | | | | | | Ortalama | | 52.629 |



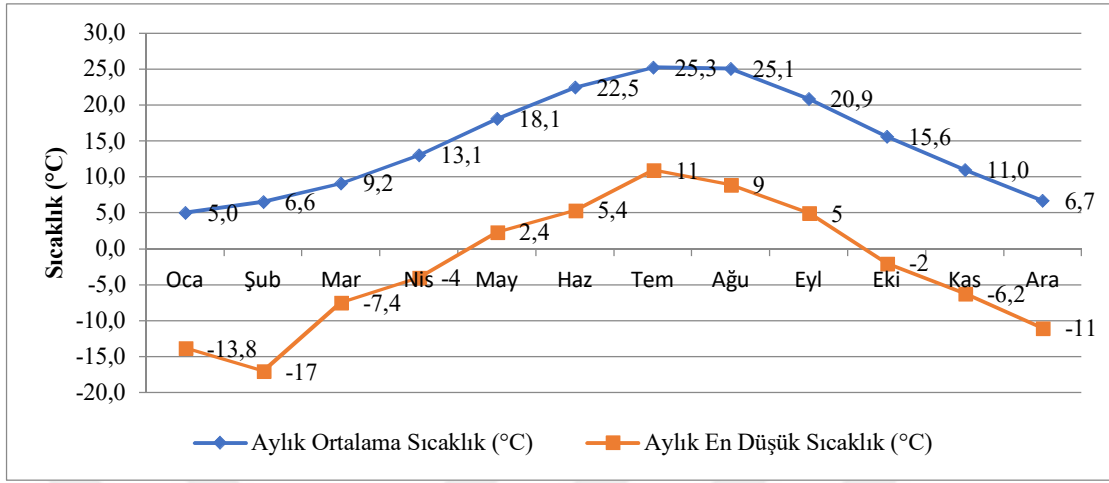
Şekil 4.1: Bigadiç ilçesi ısıtma derece-saat değerlerinin yıllara göre değişimi.

MGM'den alınan saatlik ortalama sıcaklık değerlerinin 13 yıllık ortalaması kullanılarak, ısıtma faaliyetinin yapılacağı çeşitli dış hava sıcaklık aralıklarının aylara göre bir yılda kaç saat sürdüğü hesaplanmıştır (Tablo 4.2). Bu sayede Bigadiç JBIS'nin hangi ısıtma yüklerinde yılda kaç saat çalışacağı belirlenmiştir. Buna göre, ısıtma sezonu içerisinde, Bigadiç ilçesinde saatlik ortalama dış hava sıcaklığının ilçe tasarım sıcaklığının da yer aldığı sıcaklık aralığı olan -6°C ile -4°C aralığında seyrettiği süre yılda sadece 33,9 saattir (1,4 gün). Saatlik ortalama sıcaklığın, tasarım sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda gözleendiği süre ise 182,5 gündür.

Tablo 4.2: Bigadiç ilçesinde farklı dış hava sıcaklık aralıklarının yıllık gözlenme süresi.

| SOS Aralıkları | $-10^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < -8^{\circ}\text{C}$ | $-8^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < -6^{\circ}\text{C}$ | $-6^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < -4^{\circ}\text{C}$ | $-4^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < -2^{\circ}\text{C}$ | $-2^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 0^{\circ}\text{C}$ | $0^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 2^{\circ}\text{C}$ | $2^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 4^{\circ}\text{C}$ | $4^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 6^{\circ}\text{C}$ | $6^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 8^{\circ}\text{C}$ | $8^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 10^{\circ}\text{C}$ | $10^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 12^{\circ}\text{C}$ | $12^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 14^{\circ}\text{C}$ | $14^{\circ}\text{C} \leq \text{SOS} < 16^{\circ}\text{C}$ |
|----------------|--|---|---|---|--|---|---|---|---|--|---|---|---|
| Oca. | 2,9 | 8,3 | 19,9 | 41,1 | 74,3 | 100,6 | 97,0 | 97,6 | 75,3 | 70,9 | 53,1 | 43,1 | 26,9 |
| Şub. | 0,2 | 1,2 | 8,1 | 20,6 | 45,6 | 69,7 | 80,2 | 98,4 | 83,5 | 65,5 | 60,1 | 56,3 | 41,0 |
| Mar. | 0,0 | 0,1 | 0,9 | 6,6 | 22,3 | 36,9 | 62,9 | 88,1 | 125,1 | 105,2 | 77,9 | 68,3 | 52,6 |
| Nis. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 5,1 | 19,5 | 40,2 | 76,7 | 95,5 | 102,5 | 88,4 | 75,7 |
| May. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 3,9 | 13,6 | 29,6 | 62,8 | 86,5 | 102,9 |
| Eki. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 3,9 | 12,2 | 28,1 | 43,8 | 74,3 | 107,9 | 125,2 |
| Kas. | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 2,4 | 6,1 | 15,6 | 33,8 | 63,8 | 86,2 | 97,2 | 106,6 | 85,2 | 71,0 |
| Ara. | 0,8 | 1,1 | 4,7 | 16,0 | 39,2 | 72,6 | 88,3 | 98,9 | 93,0 | 86,9 | 66,4 | 51,8 | 51,6 |
| Top. Saat | 3,9 | 10,6 | 33,9 | 86,6 | 187,8 | 301,9 | 386,1 | 503,2 | 581,4 | 594,7 | 603,6 | 587,5 | 547,0 |
| Top. Gün | 0,2 | 0,4 | 1,4 | 3,6 | 7,8 | 12,6 | 16,1 | 21,0 | 24,2 | 24,8 | 25,1 | 24,5 | 22,8 |
| | Tasarım sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda seyrettiği süre 2 gün. | | | Saatlik ortalama sıcaklığın (SOS), tasarım sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda seyrettiği süre 182,5 gün. | | | | | | | | | |

Bigadiç ilçesine ait aylık ortalama dış hava sıcaklıkları ile aylık minimum dış hava sıcaklıkları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2: : Bigadiç ilçesine ait son 13 yıllık aylık ortalama ve aylık minimum dış hava sıcaklık değerleri.

Bigadiç JBIS’de ısıtılan hacimlerin, farklı dış hava sıcaklıkları için birim alan başına ortalama ısı tüketim güçlerini (kW/m^2) matematiksel olarak modelleyebilmek amacıyla, Bigadiç Belediyesinden Bigadiç JBIS için çeşitli dönemlere ait aylık kalorimetre sayaç okuma değerleri (kWh) temin edilmiştir. Bu kapsamda Tablo 4.3’te verilen 21 veri kullanılmıştır. Modellemede kalorimetre değerlerinin yanında, ilgili sayaç okuma dönemlerine ait aylık ortalama dış hava sıcaklık değerleri ve Bigadiç ilçesi aylık ortalama küresel güneş radyasyon değerlerinden yararlanılmıştır. Tabloda yer alan birim alan başına aylık ortalama ısı tüketim değerleri, gözlem yapılan ayda Bigadiç JBIS’de ısıtılmakta olan tüm mahallerin kalorimetre cihazlarıyla ölçülen ısı tüketim değerlerinin, mahallerin toplam net kullanım alanlarına bölünmesiyle elde edilmiştir. Aylık ortalama dış hava sıcaklık değerleri ile aylık ortalama yatay global radyasyon değerleri ise sırasıyla MGM ve Avrupa Komisyonu Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sisteminden (PVGIS) alınmıştır.

Tablo 4.3’te verilen 21 gözlem verisi ile Minitab istatistiksel analiz programı yardımıyla tam karesel regresyon denklemleri kullanılarak “Birim Alan Başına Aylık Ortalama Isı Tüketimi” ile “Aylık Ortalama Dış Hava Sıcaklığı” ve “Aylık Ortalama Yatay Global Radyasyon” arasındaki matematiksel ilişki modellenmiştir. Elde edilen matematiksel model Eşitlik (4.1)’de verilmiştir.

$$Y = 24,6073216671384 - 0,693392702977464X_1 + 0,0167882363939036X_2 - 0,0226042646588723X_1^2 - 0,000152386323704049X_2^2 - 0,00013050208814867X_1X_2$$

(4.1)

Elde edilen matematiksel modelin R^2 (belirleme katsayısı) değeri %97,28 olarak bulunmuştur. Bu da modellemede kullanılan faktörlerin (Aylık Ortalama Dış Hava Sıcaklığı ve Aylık Ortalama Yatay Global Radyasyon), yanıtı (Birim Alan Başına Aylık Ortalama Isı Tüketimi) modelleyebilmek için yeterli olduğunu göstermektedir. Buna göre “Aylık Ortalama Dış Hava Sıcaklığı” ve “Aylık Ortalama Yatay Global Radyasyon”, “Birim Alan Başına Aylık Ortalama Isı Tüketimi” ndeki değişimin %97,28’ini açıklamaktadır. Kalan %2,72’lik değişim modelde yer almayan başka değişkenlerden etkilenmektedir. Elde edilen modelin Minitab ile gerçekleştirilen ANOVA analizleri sonunda ise P-değeri 0,000 olarak bulunmuştur. $P < 0.05$ ($\alpha = I.$ tip hata olasılığı=Önem Düzeyi=%5=005) olduğundan %95 güven düzeyinde, elde edilen matematiksel modelin anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır [60].

Tablo 4.3: Birim alan başına aylık ortalama ısı tüketim değerleri modellemesinde kullanılan veriler.

| Gözlem No | Gözlem tarihi (Yıl-Ay) | Faktörler (Girdiler) | | Yanıt (Çıktı) |
|-----------|------------------------|--|--|--|
| | | Aylık ortalama dış hava sıcaklığı (°C) | Aylık ortalama yatay global radyasyon (kWh/m ² /ay) | Birim alan başına aylık ortalama ısı tüketimi (kWh/m ² /ay) |
| | | X_1 | X_2 | Y |
| 1 | 2020-12 | 9,9 | 42,6 | 15,011 |
| 2 | 2021-11 | 12,4 | 73,8 | 13,945 |
| 3 | 2022-11 | 12,4 | 73,8 | 12,427 |
| 4 | 2022-12 | 9,6 | 42,6 | 16,578 |
| 5 | 2020-1 | 4,3 | 63,6 | 22,454 |
| 6 | 2020-2 | 7,3 | 75,7 | 18,966 |
| 7 | 2020-3 | 9,5 | 111,3 | 15,864 |
| 8 | 2021-1 | 8,2 | 63,6 | 19,116 |
| 9 | 2021-2 | 7,2 | 75,7 | 18,163 |
| 10 | 2021-3 | 6,7 | 111,3 | 19,467 |
| 11 | 2022-1 | 4,1 | 63,6 | 22,185 |
| 12 | 2022-2 | 6,4 | 75,7 | 20,206 |
| 13 | 2022-3 | 4,1 | 111,3 | 21,379 |
| 14 | 2023-1 | 7,5 | 63,6 | 17,758 |

| | | | | |
|----|---------|------|-------|--------|
| 15 | 2023-2 | 5,4 | 75,7 | 18,109 |
| 16 | 2021-4 | 13,1 | 148,6 | 10,385 |
| 17 | 2022-4 | 14,0 | 148,6 | 9,893 |
| 18 | 2023-4 | 12,4 | 148,6 | 10,659 |
| 19 | 2023-5 | 15,8 | 197,7 | 5,071 |
| 20 | 2020-10 | 18,8 | 109,9 | 3,225 |
| 21 | 2022-10 | 15,5 | 109,9 | 7,968 |

Elde edilen bu matematiksel model kullanılarak Tablo 4.3'te verilen girdiler için yapılan tahminlerin sonucu Tablo 4.4'te özetlenmiştir. Matematiksel modelden tahmin edilen değerler ile gözlenen gerçek değerler arasındaki tahmin hata yüzdesi (TH (%)) hesaplanmış ve yine Tablo 4.4'te verilmiştir. Tabloda yer alan tahmin hatalarının %0,26 ile %11,87 arasında değişmesi nedeniyle, matematiksel modelin iyi bir tahmin performansı sergilediği sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.4: Matematiksel model tahminleri ile gözlenen yanıtların karşılaştırılması.

| Gözlem No | Gözlenen yanıtlar | Regresyon ile tahmin edilen (Beklenen) yanıtlar | Tahmin hatası (%) |
|-----------|-------------------|---|-------------------|
| 1 | 15,011 | 15,911 | 5,66 |
| 2 | 13,945 | 12,823 | 8,75 |
| 3 | 12,427 | 12,823 | 3,09 |
| 4 | 16,578 | 16,253 | 2,00 |
| 5 | 22,454 | 21,623 | 3,84 |
| 6 | 18,966 | 18,666 | 1,60 |
| 7 | 15,864 | 15,823 | 0,26 |
| 8 | 19,116 | 17,785 | 7,48 |
| 9 | 18,163 | 18,770 | 3,23 |
| 10 | 19,467 | 18,830 | 3,38 |
| 11 | 22,185 | 21,802 | 1,76 |
| 12 | 20,206 | 19,578 | 3,21 |
| 13 | 21,379 | 21,306 | 0,34 |
| 14 | 17,758 | 18,524 | 4,14 |
| 15 | 18,109 | 20,548 | 11,87 |
| 16 | 10,385 | 10,520 | 1,29 |
| 17 | 9,893 | 9,328 | 6,06 |
| 18 | 10,659 | 11,423 | 6,69 |
| 19 | 5,071 | 4,964 | 2,14 |
| 20 | 3,225 | 3,317 | 2,76 |
| 21 | 7,968 | 8,211 | 2,96 |

Eşitlik (4.1)'de verilen model kullanılarak Bigadiç JBIS'deki 100 m²'lik bir konutun farklı dış hava sıcaklıklarına göre aylık ortalama ısı tüketim değerleriyle, ısı güç tüketim değerleri hesaplanarak Tablo 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Tablolarda yer alan “m² başına aylık ortalama ısı tüketimi” değerleri, ilgili sıcaklık değerinin Tablo 4.2'de aylara göre saat olarak verilen değerlerinin ağırlıkları dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.5: Bigadiç JBIS'de ısıtılan mahaller için farklı negatif dış hava sıcaklıklarına göre ortalama ısı tüketim değerleri.

| Isıtma sezonundaki aylar | Dış hava sıcaklığı | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|
| | -9°C | -7°C | -6°C | -3°C | -1°C |
| Ocak | 29,54 | 28,86 | 28,00 | 26,96 | 25,74 |
| Şubat | 29,50 | 28,82 | 27,96 | 26,91 | 25,69 |
| Mart | 29,13 | 28,44 | 27,56 | 26,51 | 25,27 |
| Nisan | 28,32 | 27,62 | 26,74 | 25,67 | 24,43 |
| Mayıs | 26,61 | 25,90 | 25,00 | 23,92 | 24,43 |
| Ekim | 29,15 | 28,46 | 27,59 | 26,53 | 25,30 |
| Kasım | 29,51 | 28,83 | 27,97 | 26,92 | 25,70 |
| Aralık | 29,51 | 28,83 | 27,98 | 26,94 | 25,72 |
| Verilen sıcaklık için m ² başına aylık ortalama ısı tüketimi (kWh/m ² /ay) | 29,53 | 28,85 | 27,98 | 26,91 | 25,66 |
| Verilen sıcaklıkta 100 m ² 'lik bir konut için ısı güç tüketimi (kW) | 4,10 (Örnek hesap: $\frac{29,53 \cdot 100 \text{m}^2}{24 \text{saat} \cdot 30 \text{gün}} = 4,10$) | 4,01 | 3,89 | 3,74 | 3,56 |

Tablo 4.6: Bigadiç JBIS'de ısıtılan mahaller için farklı pozitif dış hava sıcaklıklarına göre ortalama ısı tüketim değerleri.

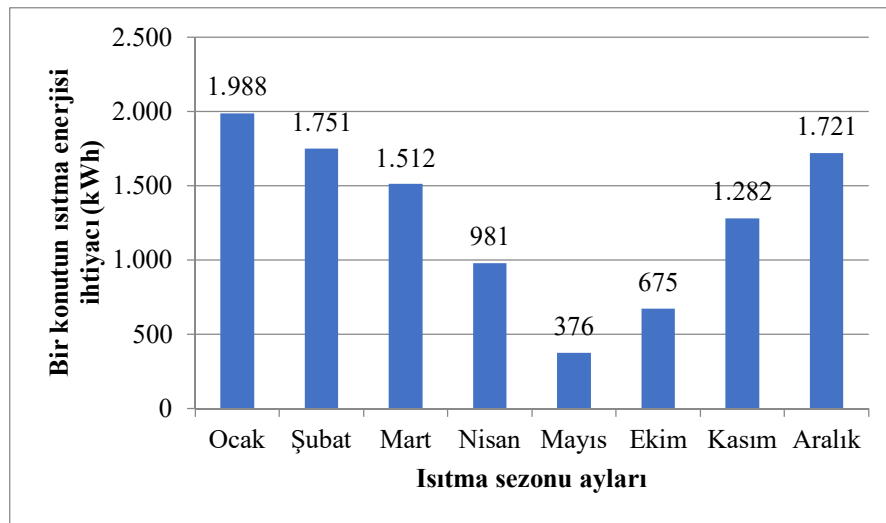
| Isıtma sezonundaki aylar | Dış hava sıcaklığı | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | +1°C | +3°C | +5°C | +7°C | +9°C | +11°C | +13°C | +15°C |
| Ocak | 24,33 | 22,75 | 20,99 | 19,04 | 16,91 | 14,60 | 12,12 | 9,45 |
| Şubat | 24,28 | 22,69 | 20,92 | 18,97 | 16,84 | 14,53 | 12,04 | 9,37 |
| Mart | 23,86 | 22,26 | 20,48 | 18,53 | 16,39 | 14,07 | 11,57 | 8,88 |

| | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Nisan | 23,00 | 21,40 | 19,61 | 17,64 | 15,49 | 13,16 | 10,65 | 7,96 |
| Mayıs | 23,00 | 19,61 | 17,81 | 15,83 | 13,67 | 11,32 | 8,80 | 6,10 |
| Ekim | 23,88 | 22,29 | 20,51 | 18,55 | 16,41 | 14,09 | 11,59 | 8,91 |
| Kasım | 24,29 | 22,70 | 20,94 | 18,99 | 16,86 | 14,55 | 12,06 | 9,39 |
| Aralık | 24,32 | 22,75 | 20,99 | 19,05 | 16,92 | 14,62 | 12,14 | 9,48 |
| Verilen sıcaklık için m ² başına aylık ortalama ısı tüketimi (kWh/m ² /ay) | 24,23 | 22,58 | 20,73 | 18,63 | 16,38 | 13,87 | 11,23 | 8,42 |
| Verilen sıcaklıkta 100 m ² 'lik bir konut için ısı güç tüketimi (kW) | 3,37 | 3,14 | 2,88 | 2,59 | 2,27 | 1,93 | 1,56 | 1,17 |

Tablo 4.2, 4.5 ve 4.6'daki değerler birleştirilerek Bigadiç JBIS'de bulunan 100 m²'lik net ısıtma alanına sahip bir konutun yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 10.285 kWh olarak bulunmuştur. Tablo 4.7'de bu değer, son 13 yıllık ortalamalar dikkate alınarak, ısıtmanın gerçekleştiği tüm dış hava sıcaklık aralıklarına göre, Şekil 4.3'te ise ısıtma sezonundaki aylara göre dağılımı verilmiştir.

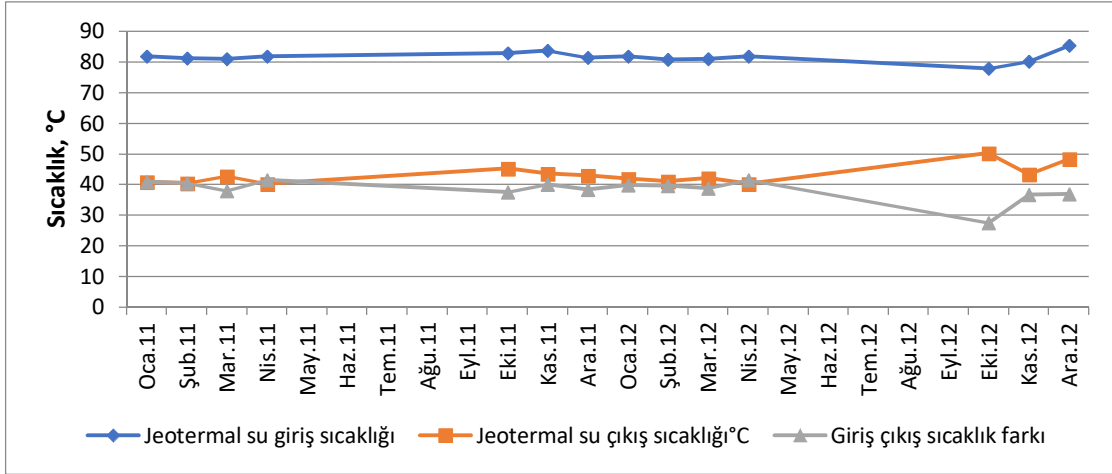
Tablo 4.7: Bigadiç JBIS'de yer alan bir konutun farklı dış hava sıcaklıklarına göre yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı.

| -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | +1°C | +3°C | +5°C | +7°C | +9°C | +11°C | +13°C | +15°C | |
|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--|
| -10 ≤ SOS < -8 | -8 ≤ SOS < -6 | -6 ≤ SOS < -4 | -4 ≤ SOS < -2 | -2 ≤ SOS < 0 | 0 ≤ SOS < 2 | 2 ≤ SOS < 4 | 4 ≤ SOS < 6 | 6 ≤ SOS < 8 | 8 ≤ SOS < 10 | 10 ≤ SOS < 12 | 12 ≤ SOS < 14 | 14 ≤ SOS < 16 | Yıllık toplam ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh) |
| 16 | 42 | 129 | 319 | 659 | 1.001 | 1.194 | 1.431 | 1.484 | 1.333 | 1.146 | 902 | 628 | 10.285 |



Şekil 4.3: Bigadiç JBIS'de 100 m²'lik bir konutun aylık ısıtma enerjisi ihtiyacı.

Bigadiç JBIS’de ısıtma sezonu boyunca üretilen jeotermal akışkan debisinin son 10 yıl içinde 20-25 kg/s arasında değiştiği bilinmektedir. Bigadiç JBIS sistem yetkilisinden alınan bilgiye göre, geçtiğimiz ısıtma sezonu boyunca sistemde üretilen jeotermal akışkanın debisi ortalama 22,4 kg/s olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, jeotermal akışkanın sisteme giriş ve sistemden çıkış sıcaklıklarının farkı ortalama 40°C civarında seyretmektedir (Şekil 4.4). Bu sıcaklık ve debi değerleri dikkate alındığında, Bigadiç JBIS’de üretilen jeotermal enerji ile yaklaşık 3750 kW değerinde ısıtma yapılabilmektedir.



Şekil 4.4: Aylara göre Bigadiç JBIS ısı merkezine giren jeotermal akışkanın ortalama giriş-çıkış sıcaklıkları.

Bu gücün yaklaşık 741 kW’lık kısmı sekonder akışkanın dolaştığı dağıtım borularında ısı kaybı ve su kaçağı şeklinde atılmaktadır. Geriye kalan 3009 kW’lık jeotermal güç, Bigadiç tasarım sıcaklığına (-6°C) göre toplam 774 konutu tek başına ısıtabilecek kapasitededir (Tablo 4.8). Mevcut jeotermal enerji üretimi ve ısı kayıpları dikkate alındığında Bigadiç JBIS’de 774 konuttan daha fazla konut ısıtılmak için ilave ısı güce ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 4.8: Bigadiç JBIS’de üretilen jeotermal enerji ile ek ısıtma yapılmadan ısıtılacak konut sayısı.

| Üretilen jeotermal enerji (kW) | Dağıtım borularındaki ısı kaybı (kW) | Konut ısıtmada kullanılabilir net güç (kW) | Bigadiç tasarım sıcaklığı (-6°C) için konut başına ısıtma gücü tüketimi | Yalnız jeotermal enerji ile ısıtılacak konut sayısı | Jeotermal enerji ile yapılacak toplam ısıtma (kWh) |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|---|---|--|
| 3750 | 741 | 3009 | 3,8854 (Tablo 4.5) | 774 | 7.960.664 (774*10.285) |

Bigadiç JBIS’de jeotermal enerji dışında kömür, doğal gaz ve elektrik (ısı pompası) gibi alternatif enerji kaynakları ile ilave güç sağlayarak ısıtılacak yeni konut sayıları aşağıda belirtilen yöntemle hesaplanmıştır. Öncelikle ısıtmanın yapıldığı farklı dış hava sıcaklık değerleri -3°C’ten

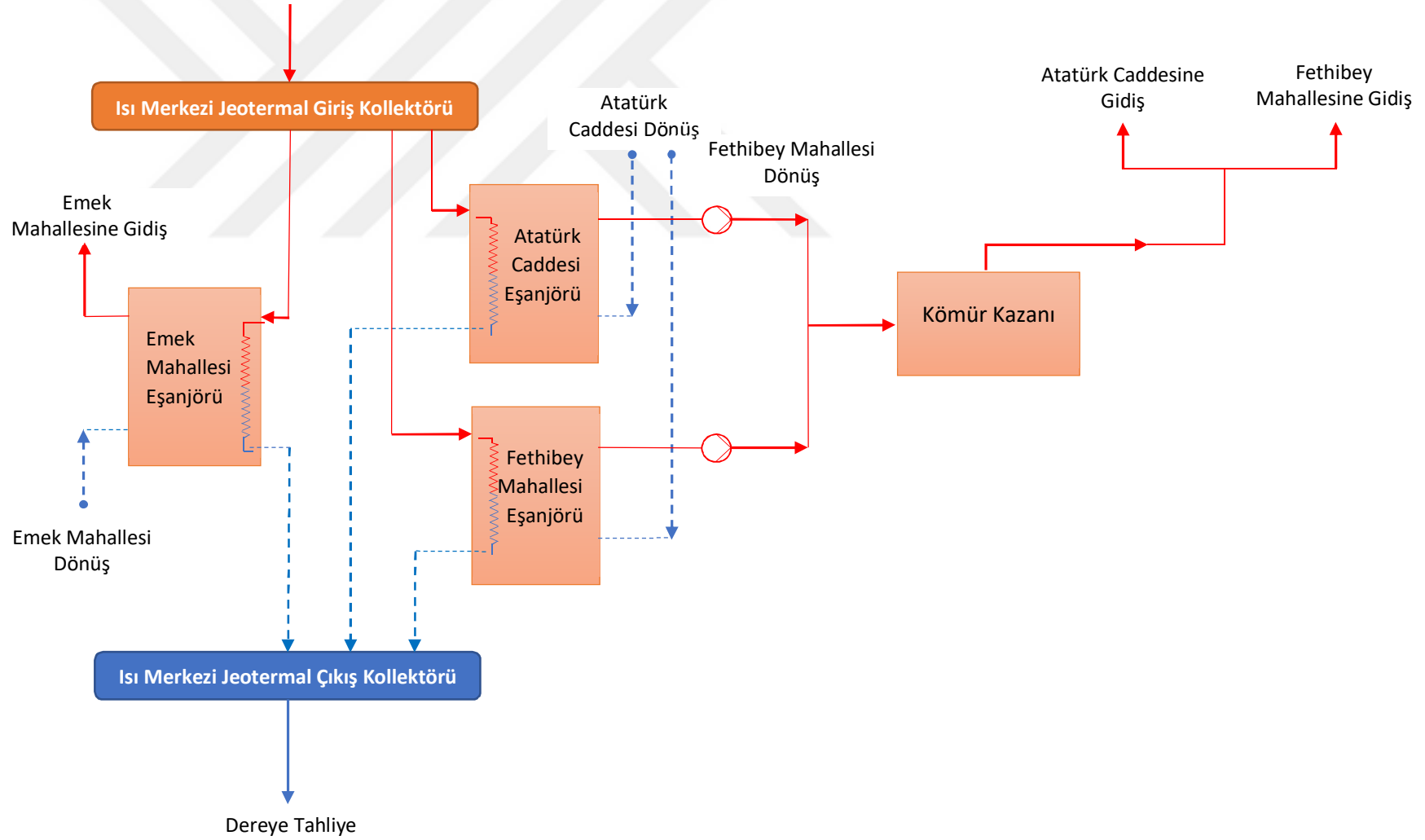
başlayarak 2'şer °C arttırılarak +13°C'ye kadar Tablo 4.9'da görüldüğü gibi sıralanmıştır. Daha sonra jeotermal enerji ile sağlanan net ısıl güç (3009 kW) Tablo 4.9'da 5. satırda verilen "100 m²'lik konutun verilen dış hava sıcaklığına göre ısıl güç ihtiyacı" değerlerine bölünerek ısıtılacak alternatif konut sayıları belirlenmiştir. Bu konut sayıları ile Bigadiç için tasarım sıcaklığındaki 100 m²'lik konutun ısıl güç ihtiyacı değeri ile çarpılarak yeni konut sayılarına göre Bigadiç JBIS'nin tasarım sıcaklığına göre ısıl güç talepleri tespit edilmiştir.

Tablo 4.9: Bigadiç JBIS'de ilave ısıl güç ile ısıtılacak yeni konut sayıları.

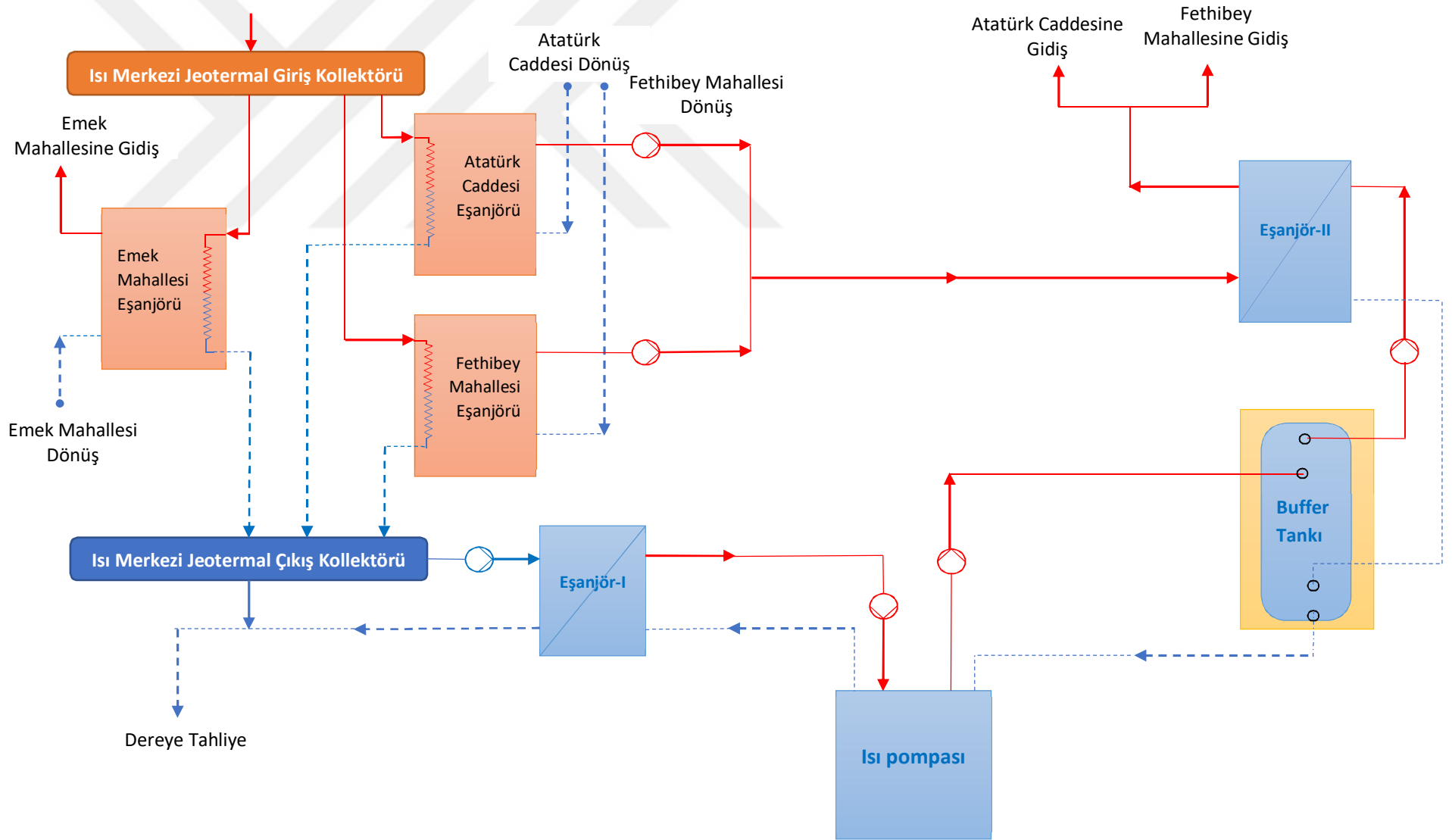
| Dış hava sıcaklığı °C | -6°C (Bigadiç Tasarım Sıcaklığı) | -3°C | -1°C | +1°C | +3°C | +5°C | +7°C | +9°C | +11°C | +13°C | +15°C |
|---|---|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Jeotermal enerji ile sağlanan ısıl güç (kW) | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 | 3750 |
| Boru hatları ısı kaybı (kW) | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 | 741 |
| Jeotermal enerji ile sağlanan net ısıl güç (kW) | 3750-741= 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 | 3009 |
| 100 m ² 'lik konutun verilen dış hava sıcaklığına göre ısıl güç ihtiyacı (kW) | 3,8854 | 3,74 | 3,56 | 3,37 | 3,14 | 2,88 | 2,59 | 2,27 | 1,93 | 1,56 | 1,17 |
| Mevcut jeotermal enerji ile verilen dış hava sıcaklığı için ısıtılacak konut sayısı (alternatif konut sayıları) | 3009/3,8854 =774 | 805 | 844 | 894 | 960 | 1045 | 1163 | 1323 | 1562 | 1929 | 2572 |
| Tasarım sıcaklığına (-6°C) göre göre konutların toplam ısıl güç ihtiyacı (kW) | 3937 | 4063 | 4222 | 4425 | 4693 | 5041 | 5522 | 6175 | 7150 | 8646 | 10404 |
| Tasarım sıcaklığına (-6°C) göre göre konutların ilave ısıl güç ihtiyacı (kW) | 187 | 313 | 472 | 675 | 943 | 1291 | 1772 | 2425 | 3400 | 4896 | 6654 |

Tasarım sıcaklığına göre konutların ihtiyaç duyduğu ısı güç değerleri yukarıdaki tabloda verilmiştir. Bu ilave güç değerlerinin iki farklı yaklaşım ile karşılanması düşünülmüştür: Birinci yaklaşımda, ihtiyaç duyulan ilave ısı gücün, jeotermal enerji dışında tek bir alternatif enerji kaynağı ile karşılanması incelenmiştir. Bu tek enerji kaynağı kömür, doğal gaz ya da ısı pompasıyla elektrik enerjisi kullanımı olarak ön görülmüştür. Buna göre ihtiyaç duyulan ilave ısı gücün: 1). Bigadiç JBIS’de hali hazırda kullanılan toplam anma gücü 8.141 kW olan mevcut kömür kazanıyla veya sisteme dahil edilecek 2). Yeni doğal gaz kazanıyla ya da 3). Isı pompası sistemiyle sağlanması durumu incelenerek, her bir alternatif için 20 yıllık yaşam döngüsü maliyet analizi yardımıyla birim ısıtma enerjisi maliyetleri hesaplanmıştır. Her üç alternatif ısı desteğinin kullanılması durumunda Bigadiç JBIS’ye ait çalışma şemaları Şekil 4.5 ve 4.6’da verilmiştir. Şekil 4.5’teki şemada, sistemin mevcut halinde yer alan kömür kazanının yerine Tablo 4.9’da elde edilen alternatif konut sayılarına göre farklı kapasitelerdeki yer tipi doğal gaz kazanlarının kullanılması ön görülmüştür. Şekil 4.6’da ise mevcut kömür kazanının yerine Tablo 4.9’da elde edilen alternatif konut sayılarına göre farklı kapasitelerdeki ısı pompası sistemlerinin kullanılması ön görülmüştür. Isı pompası sistemi, şekilde görüldüğü gibi 2 adet plakalı ısı eşanjörü (Eşanjör-I ve Eşanjör-II), bir ısı pompası ünitesi ve bir buffer tank olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır.

Bigadiç JBIS’de Tablo 4.9’da verilen alternatif konut sayılarının ısıtılması durumunda, sistemin çalışma hangi dış hava sıcaklığında hangi enerji kaynağı ile ısıtılacağı, jeotermal enerji ve alternatif destek sistemleriyle yılda kaç MWh ısıtma yapılacağı hesaplanarak Tablo 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. Bigadiç JBIS’de tekli ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarına göre yıllık ısıtma enerjisi değerleri ise Şekil 4.7’de verilmiştir. Tablo 4.11 incelendiğinde tasarım sıcaklığında 2.572 konut ısıtılmak için jeotermal enerjiye ilave olarak 7.522 kW ısı güce ihtiyaç duyulduğu ve bu gücün ise ya mevcut kömür kazanı, ya yeni satın alınacak doğal gaz kazanı ya da yeni kurulacak ısı pompası sistemiyle sağlanacağı görülmektedir. Tablo 4.9’da verilen her bir alternatif konut sayısı için ilave ısı gücün farklı kaynaklardan sağlanması durumları yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak incelenmiş ve en ekonomik konut sayısı ile ilave ısıtma yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.5: Doğal gaz kazanının tek ısı destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi.



Şekil 4.6: Isı pompası sisteminin tek ısı destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi.

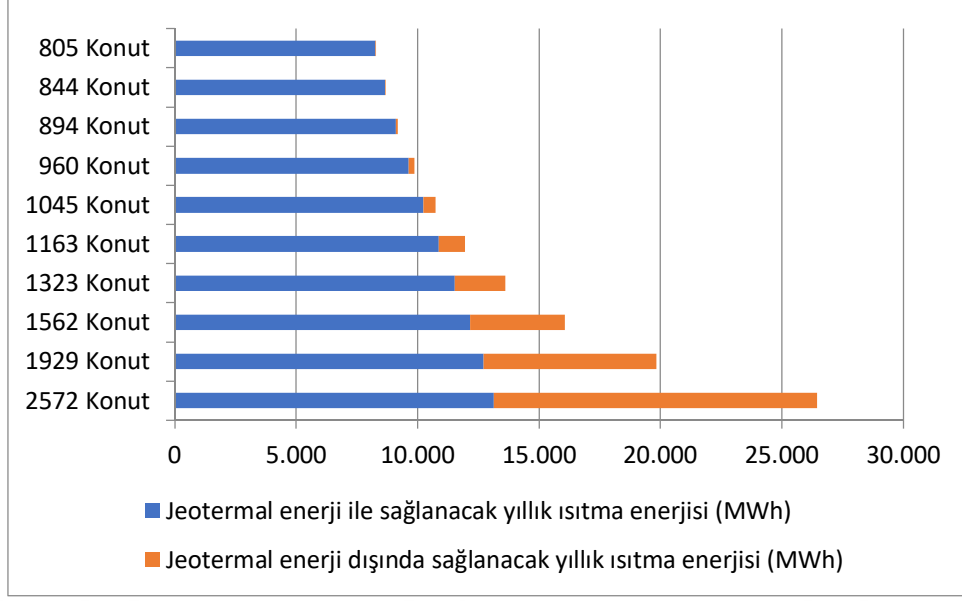
Tablo 4.10: Bigadiç JBIS’de tekli ısıtma destek sistemi kullanımı için jeotermal enerji ve alternatif enerji kullanımının yapıldığı dış hava sıcaklıkları.

| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
|-------------------------------------|--|------|------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| 1929 konut ısıtılması durumu (13°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 1562 konut ısıtılması durumu (11°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 1323 konut ısıtılması durumu (9°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 1163 konut ısıtılması durumu (7°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 1045 konut ısıtılması durumu (5°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 960 konut ısıtılması durumu (3°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 894 konut ısıtılması durumu (1°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 844 konut ısıtılması durumu (-1°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | | | | |

| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
|------------------------------------|--|------|------|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| 805 konut ısıtılması durumu (-3°C) | Jeotermal ısıtmanın yanında Mevcut Kömür Kazanı / Doğalgaz Kazanı veya Isı Pompası Desteği | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | | | | | |

Tablo 4.11: Bigadiç JBIS’de tekli ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarındaki ısıl güç ve enerji değerleri.

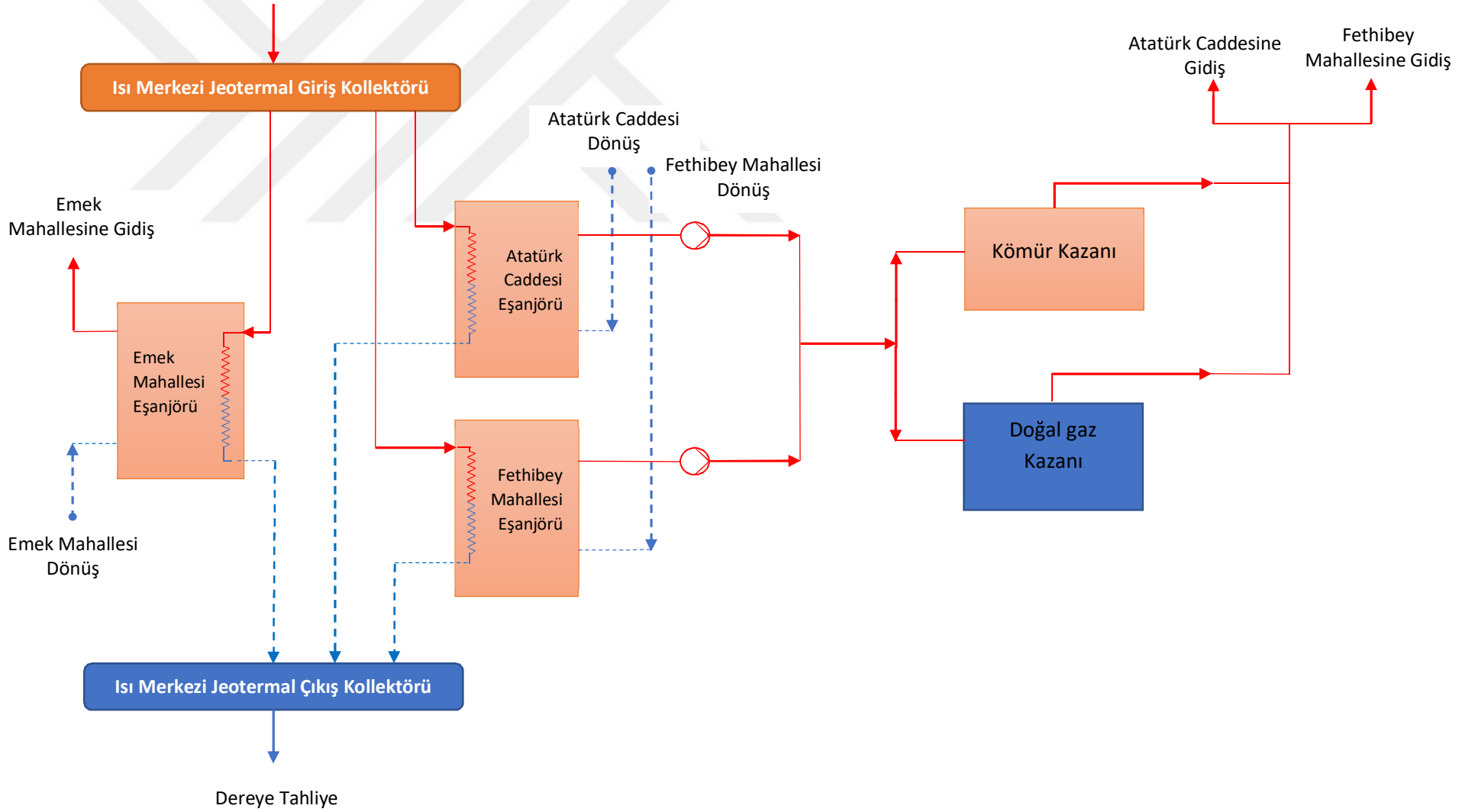
| | Toplam ısıl güç ihtiyacı (kW) | İlave ısıl güç ihtiyacı (kW) | Jeotermal enerji ile sağlanacak ısı enerjisi (kWh) | Mevcut kömür kazanı / Kurulacak yeni doğal gaz kazanı veya / yeni ısı pompası ile sağlanacak ilave ısı enerjisi (kWh) |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|---|
| 2572 konut ısıtılması durumu (13°C) | 11.272 | 7.522 | 13.128.728 | 13.324.655 |
| 1929 konut ısıtılması durumu (13°C) | 8.646 | 4.896 | 12.724.253 | 7.115.455 |
| 1562 konut ısıtılması durumu (11°C) | 7.150 | 3.400 | 12.162.988 | 3.902.133 |
| 1323 konut ısıtılması durumu (9°C) | 6.175 | 2.425 | 11.522.903 | 2.083.561 |
| 1163 konut ısıtılması durumu (7°C) | 5.522 | 1.772 | 10.881.695 | 1.079.499 |
| 1045 konut ısıtılması durumu (5°C) | 4.693 | 943 | 10.233.374 | 514.093 |
| 960 konut ısıtılması durumu (3°C) | 5.041 | 1.291 | 9.642.516 | 228.046 |
| 894 konut ısıtılması durumu (1°C) | 4.425 | 675 | 9.109.660 | 85.081 |
| 844 konut ısıtılması durumu (-1°C) | 4.222 | 472 | 8.655.791 | 26.995 |
| 805 konut ısıtılması durumu (-3°C) | 4.063 | 313 | 8.273.190 | 7.289 |



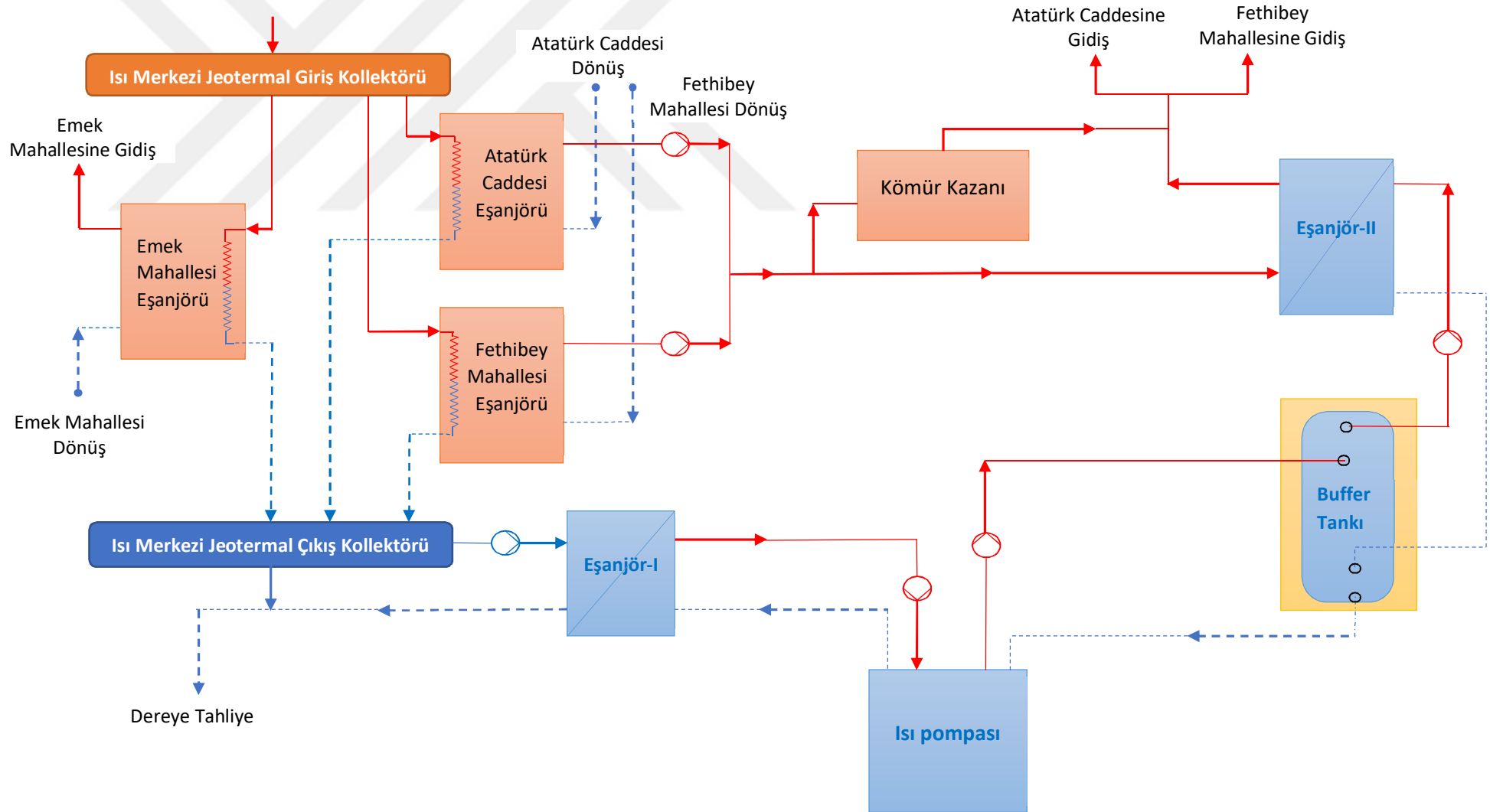
Şekil 4.7: Bigadiç JBIS’de farklı konut sayılarına göre tekli ısıtma destek sistemi kullanımında yıllık ısıtma enerjisi değerleri.

Bigadiç JBIS’de farklı konut sayıları için ortaya çıkan ilave ısıl gücün karşılanmasında ön görülen ikinci yaklaşım ise daha soğuk ısıtma günlerinde sistemde bulunan mevcut kömür kazanının çalıştırılması, nispeten daha sıcak ısıtma günlerinde ise ya doğal gaz kazanı ya da ısı pompası ile ısıtma desteği sağlanması şeklindedir. Bu yaklaşımda Bigadiç JBIS’de jeotermal enerjinin dışında, ya kömür + doğal gaz kazanı ikilisinin; ya da kömür kazanı + ısı pompası ikilisinin sisteme ısı desteği sağlaması söz konusudur. Buna göre tasarım sıcaklığına yakın dış hava sıcaklıklarında ilave ısıl güç mevcut kömür kazanı ile karşılanacak, böylece doğal gaz kazanı ile ısı pompası sistemlerinin kapasiteleri ve dolayısıyla ilk yatırım maliyetleri daha düşük tutulmuş olacaktır.

Her iki alternatif ısı desteğinin kullanılması durumunda Bigadiç JBIS’ye ait çalışma şemaları Şekil 4.8 ve 4.9’da verilmiştir. Buna göre Bigadiç JBIS’de jeotermal enerji dışında yapılacak olan ısıtma desteği, dış hava sıcaklığının nispeten daha yüksek olacağı ısıtma günlerinde ya Şekil 4.8’de görüleceği gibi doğal gaz kazanı ile ya da Şekil 4.9’da gösterilen ısı pompası sistemi ile sağlanacaktır. Isıtma sezonu içerisinde daha kısa sürede hüküm süren daha düşük dış hava sıcaklığı koşullarında ise ısıtma desteği mevcut kömür kazanı ile sağlanacaktır.



Şekil 4.8: Doğal gaz kazanının ile mevcut kömür kazanının ikili destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi.



Şekil 4.9: Isı pompası ile mevcut kömür kazanının ikili destek sistemi olarak Bigadiç JBIS'ye dahil edilmesi.

Tablo 4.12 Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için jeotermal enerji ve alternatif enerji kullanımının yapıldığı dış hava sıcaklıkları.

| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
|-------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|---|-----|-----|-----|-----|------|------|-------------------------|
| 2572 konut ısıtılması durumu (15°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | | Jeotermal ısıtmaya doğal gaz kazanı veya ısı pompası ile destek | | | | | | | Y.Jeo. ısıtma |
| 1929 konut ısıtılması durumu (13°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | | Jeotermal ısıtmaya doğal gaz kazanı veya ısı pompası ile destek | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma |
| 1562 konut ısıtılması durumu (11°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | | Jeotermal ısıtmaya doğal gaz kazanı veya ısı pompası ile destek | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma |
| 1323 konut ısıtılması durumu (9°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | | Jeotermal ısıtmaya doğal gaz kazanı veya ısı pompası ile destek | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma |
| 1163 konut ısıtılması durumu (7°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | | Jeotermal ısıtmaya doğal gaz kazanı veya ısı pompası ile destek | | | | | | | Yalnız jeotermal ısıtma |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|--|-----|-----|-------------------------|-----|-----|------|------|------|
| 1045 konut ısıtılması durumu (5°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | Jeotermal ısıtmaya d. gaz kazanı veya ısı pompası ile destek | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 960 konut ısıtılması durumu (3°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | J+DG veya J+ IP | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | |
| Dış hava sıcaklığı | -9°C | -7°C | -5°C | -3°C | -1°C | 1°C | 3°C | 5°C | 7°C | 9°C | 11°C | 13°C | 15°C |
| 894 konut ısıtılması durumu (1°C) | Jeotermal ısıtma + kömür kazanı | | | | J+DG veya J+ IP | | | Yalnız jeotermal ısıtma | | | | | |

Tablo 4.12’de, belirlenen farklı konut sayıları için, kömür kazanının devreye gireceği alternatif dış hava sıcaklıkları belirlenmiştir. Örneğin Tablo 4.12’deki gösterilen 2.572 konut ısıtılması durumunda, kömür kazanının -3, -1, +1, +3, +5 ve +7°C dış hava sıcaklık değerlerinde devreye girmesi durumlarının incelendiği görülmektedir. Her bir durum için ayrı ayrı yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak en ekonomik ısıtma seçeneği araştırılmıştır.

Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarına göre toplam ısıl güç ile ilave ısıl güç değerleri Tablo 4.13-4.21 arasında, bu tabloların özet hali ise Şekil 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.13: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarındaki ısıl güç değerleri.

| | 2572 konut ısıtılması durumu | | 1929 konut ısıtılması durumu | | 1562 konut ısıtılması durumu | | 1323 konut ısıtılması durumu | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | 15°C | | 13°C | | 11°C | | 9°C | |
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) |
| -1°C’a kadar | 10.404 | 6.654 | 7.996 | 4.246 | 6.623 | 2.873 | 5.729 | 1.979 |
| +1°C’a kadar | 9.868 | 6.118 | 7.594 | 3.844 | 6.298 | 2.548 | 5.453 | 1.703 |
| +3°C’a kadar | 9.247 | 5.497 | 7128 | 3.378 | 5.921 | 2.171 | 5.133 | 1.383 |
| +5°C’a kadar | 8.555 | 4.805 | 6.609 | 2.859 | 5.501 | 1.751 | 4.778 | 1.028 |

| | | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| +7°C'a kadar | 7.766 | 4.016 | 6.018 | 2.268 | 5.021 | 1.271 | 4.372 | 622 |
| +9°C'a kadar | 6.922 | 3.172 | 5.384 | 1.634 | 4.509 | 759 | | |

| | 1163 konut ısıtılması durumu | | 1045 konut ısıtılması durumu | | 960 konut ısıtılması durumu | | 894 konut ısıtılması durumu | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | 7°C | | 5°C | | 3°C | | 1°C | |
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) |
| -1°C'a kadar | 5130 | 1380 | 4689 | 939 | 4369 | 619 | 4124 | 374 |
| +1°C'a kadar | 4888 | 1138 | 4471 | 721 | 4169 | 419 | | |
| +3°C'a kadar | 4607 | 857 | 4218 | 468 | | | | |
| +5°C'a kadar | 4294 | 544 | | | | | | |

Tablo 4.14: Bigadiç JBIS'de ikili ısıtma destek sistemi ile 2572 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

| 2572 konut ısıtılması durumunda (15°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C'a kadar | 10.404 | 6.654 | 900.094 | 12.424.443 | 13.128.728 |
| +1°C'a kadar | 9.868 | 6.118 | 2.039.347 | 11.285.189 | 13.128.728 |
| +3°C'a kadar | 9.247 | 5.497 | 3.719.492 | 9.605.045 | 13.128.728 |
| +5°C'a kadar | 8.555 | 4.805 | 5.644.592 | 7.679.944 | 13.128.728 |
| +7°C'a kadar | 7.766 | 4.016 | 7.829.692 | 5.494.844 | 13.128.728 |
| +9°C'a kadar | 6.922 | 3.172 | 9.920.739 | 3.403.797 | 13.128.728 |
| | | | 2572 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | 26.453.264 |

Tablo 4.15: Bigadiç JBIS'de ikili ısıtma destek sistemi ile 1929 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

| 1929 konut ısıtılması durumunda (13°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |

| | | | | | |
|--------------|------|------|---|-----------|------------|
| -1°C'a kadar | 7996 | 4246 | 575.208 | 6.540.247 | 12.724.253 |
| +1°C'a kadar | 7594 | 3844 | 1.290.484 | 5.824.971 | 12.724.253 |
| +3°C'a kadar | 7128 | 3378 | 2.326.812 | 4.788.643 | 12.724.253 |
| +5°C'a kadar | 6609 | 2859 | 3.484.205 | 3.631.249 | 12.724.253 |
| +7°C'a kadar | 6018 | 2268 | 4.749.228 | 2.366.227 | 12.724.253 |
| +9°C'a kadar | 5384 | 1634 | 5.886.067 | 1.229.387 | 12.724.253 |
| | | | 1929 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | 19.839.707 |

Tablo 4.16: Bigadiç JBIS'de ikili ısıtma destek sistemi ile 1562 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

| 1562 konut ısıtılması durumunda (11°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C'a kadar | 6623 | 2873 | 389.776 | 3.512.442 | 12.162.988 |
| +1°C'a kadar | 6298 | 2548 | 863.061 | 3.039.157 | 12.162.988 |
| +3°C'a kadar | 5921 | 2171 | 1.531.923 | 2.370.294 | 12.162.988 |
| +5°C'a kadar | 5501 | 1751 | 2.251.139 | 1.651.079 | 12.162.988 |
| +7°C'a kadar | 5021 | 1271 | 2.991.015 | 911.202 | 12.162.988 |
| +9°C'a kadar | 3938 | 188 | 3.583.229 | 318.988 | 12.162.988 |
| | | | 1562 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | 16.065.206 |

Tablo 4.17: Bigadiç JBIS'de ikili ısıtma destek sistemi ile 1323 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

| 1323 konut ısıtılması durumunda (9°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C'a kadar | 5729 | 1979 | 269.017 | 1.814.782 | 11.522.903 |
| +1°C'a kadar | 5453 | 1703 | 584.711 | 1.499.088 | 11.522.903 |
| +3°C'a kadar | 5133 | 1383 | 1.014.271 | 1.069.529 | 11.522.903 |
| +5°C'a kadar | 4778 | 1028 | 1.448.133 | 635.666 | 11.522.903 |
| +7°C'a kadar | 4372 | 622 | 1.846.022 | 237.778 | 11.522.903 |
| | | | 1323 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | 13.606.703 |

Tablo 4.18: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1163 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

| 1163 konut ısıtılması durumunda (7°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C’a kadar | 5130 | 1380 | 188.175 | 891.425 | 10.881.695 |
| +1°C’a kadar | 4888 | 1138 | 398.369 | 681.230 | 10.881.695 |
| +3°C’a kadar | 4607 | 857 | 667.725 | 411.874 | 10.881.695 |
| +5°C’a kadar | 4294 | 544 | 910.556 | 169.043 | 10.881.695 |
| 1163 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | | | | 11.961.294 |

Tablo 4.19: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 1045 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

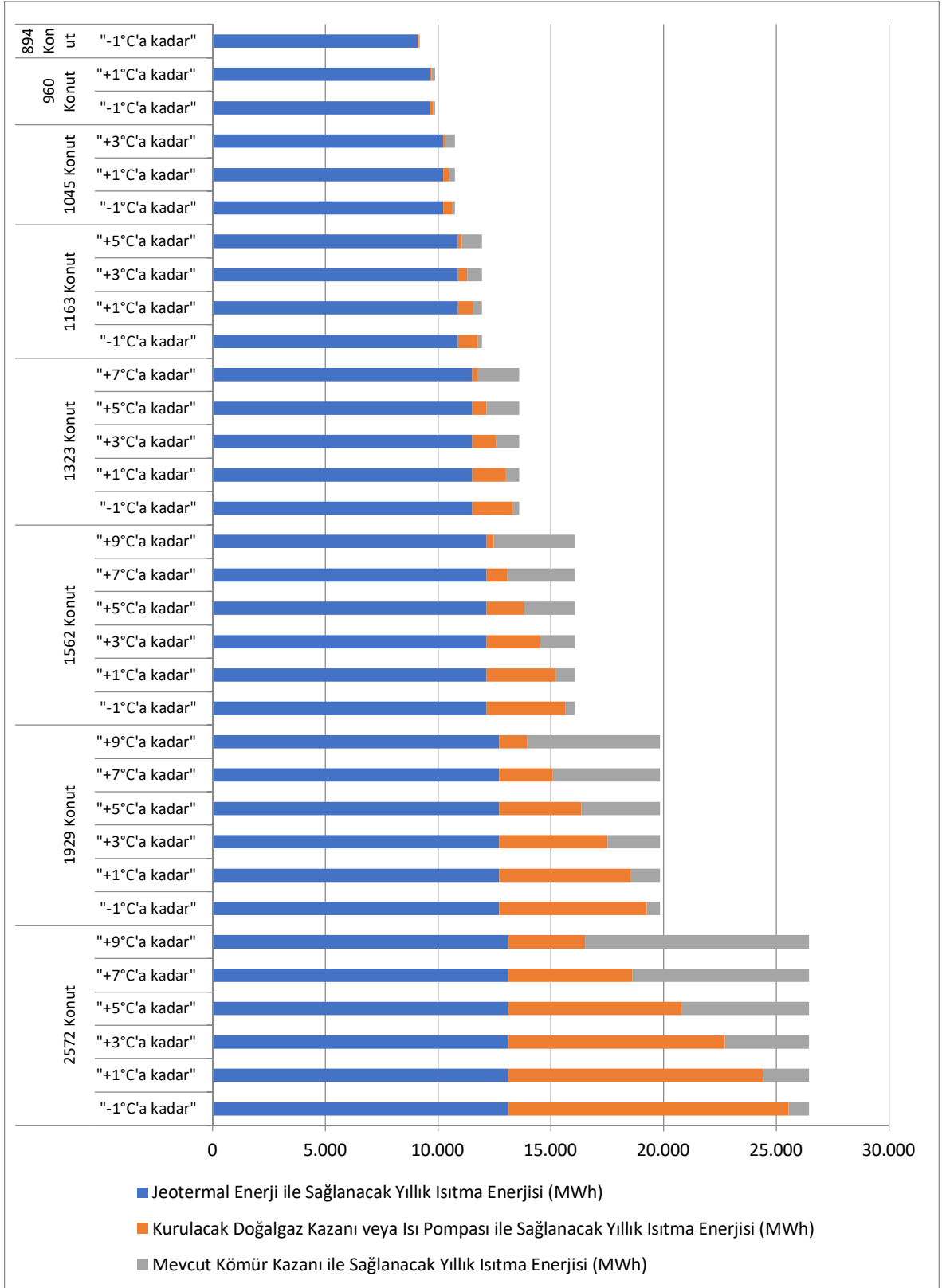
| 1045 konut ısıtılması durumunda (5°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C’a kadar | 4689 | 939 | 128.553 | 385.635 | 10.233.374 |
| +1°C’a kadar | 4471 | 721 | 260.941 | 253.246 | 10.233.374 |
| +3°C’a kadar | 4218 | 468 | 412.148 | 102.040 | 10.233.374 |
| 1045 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | | | | 10.747.562 |

Tablo 4.20: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 960 konut ısıtmada karşılaşılan ısı güç ve enerji değerleri.

| 960 konut ısıtılması durumunda (3°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C’a kadar | 4369 | 619 | 85.606 | 142.900 | 9.642.516 |
| +1°C’a kadar | 4169 | 419 | 161.947 | 66.559 | 9.642.516 |
| 960 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | | | | 9.871.022 |

Tablo 4.21: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi ile 894 konut ısıtmada karşılaşılan ısıtma güç ve enerji değerleri.

| 894 konut ısıtılması durumunda (1°C) farklı enerji kaynakları tarafından sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------------|---|---|--|
| | Toplam Isıl Güç İhtiyacı (kW) | İlave Isıl Güç İhtiyacı (kW) | Mevcut kömür kazanı ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Yeni kurulacak doğalgaz kazanı veya ısı pompası ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) | Jeotermal enerji ile sağlanacak yıllık ısıtma enerjisi (kWh) |
| -1°C'a kadar | 4124 | 374 | 52.258 | 32.838 | 9.109.660 |
| | | | 894 konut için yıllık toplam ısıtma enerjisi | | 9.194.755 |



Şekil 4.10: Bigadiç JBIS’de ikili ısıtma destek sistemi kullanımı için farklı konut sayılarına göre yıllık ısıtma enerjisi değerleri.

Bigadiç JBIS’de farklı konut sayılarında gerek tekli gerekse ikili ısıtma destek sistemi kullanılması halinde ortaya çıkacak olan ilave ısıtma güç ihtiyaçlarını karşılayacak doğal gaz kazanı ve ısı pompası sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri yapılan piyasa araştırması sonucu tespit edilmiş ve Tablo 4.21 ve 4.22’de verilmiştir.

Tablo 4.22: Bigadiç JBIS’de farklı ilave ısıtma gücü ihtiyaçlarını karşılamak için seçilen doğal gaz kazanlarına ait ilk yatırım maliyetleri.

| İlave güç ihtiyacı (kW) | Kullanılacak kazanın anma gücü (kW) | Kullanılacak kazan sayısı | Kazan birim fiyatı (KDV dahil Euro) | Kazan maliyeti (KDV dahil Euro) | %10 işçilik dahil toplam kazan maliyeti (KDV dahil Euro) |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|
| 7.522 | 938 | 8 | 80.777 | 646.216 | 710.838 |
| 6.654 | 938 | 7 | 80.777 | 565.439 | 621.983 |
| 6.118 | 938 | 7 | 80.777 | 565.439 | 621.983 |
| 5.497 | 938 | 6 | 80.777 | 484.662 | 533.128 |
| 4.896 | 938 | 6 | 80.777 | 484.662 | 533.128 |
| 4.805 | 938 | 5 | 80.777 | 403.885 | 444.274 |
| 4.246 | 938 | 5 | 80.777 | 403.885 | 444.274 |
| 4.016 | 575 | 7 | 39.032 | 273.224 | 300.546 |
| 3.844 | 938 | 4 | 80.777 | 323.108 | 355.419 |
| 3.400 | 575 | 6 | 39.032 | 234.192 | 257.611 |
| 3.378 | 575 | 6 | 39.032 | 234.192 | 257.611 |
| 3.172 | 460 | 7 | 33.720 | 236.040 | 259.644 |
| 2.873 | 575 | 5 | 39.032 | 195.160 | 214.676 |
| 2.859 | 575 | 5 | 39.032 | 195.160 | 214.676 |
| 2.548 | 575 | 5 | 39.032 | 195.160 | 214.676 |
| 2.425 | 575 | 5 | 39.032 | 195.160 | 214.676 |
| 2.268 | 575 | 4 | 39.032 | 156.128 | 171.741 |
| 2.171 | 575 | 4 | 39.032 | 156.128 | 171.741 |
| 1.979 | 575 | 4 | 39.032 | 156.128 | 171.741 |
| 1.938 | 575 | 4 | 39.032 | 156.128 | 171.741 |
| 1.772 | 575 | 3 | 39.032 | 117.096 | 128.806 |
| 1.751 | 575 | 3 | 39.032 | 117.096 | 128.806 |
| 1.703 | 575 | 3 | 39.032 | 117.096 | 128.806 |
| 1.634 | 575 | 3 | 39.032 | 117.096 | 128.806 |
| 1.383 | 460 | 3 | 33.720 | 101.160 | 111.276 |
| 1.380 | 460 | 3 | 33.720 | 101.160 | 111.276 |
| 1.291 | 460 | 3 | 33.720 | 101.160 | 111.276 |
| 1.271 | 460 | 3 | 33.720 | 101.160 | 111.276 |
| 1.138 | 575 | 2 | 39.032 | 78.064 | 85.870 |
| 1.028 | 575 | 2 | 39.032 | 78.064 | 85.870 |
| 943 | 460 | 2 | 33.720 | 67.440 | 74.184 |
| 939 | 460 | 2 | 33.720 | 67.440 | 74.184 |

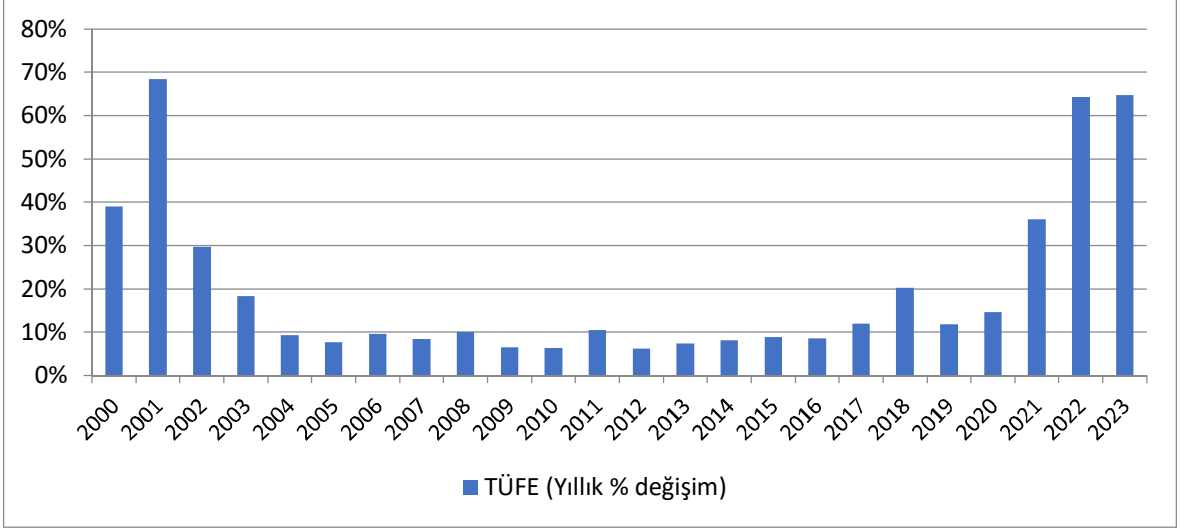
| | | | | | |
|-----|-----|---|--------|--------|--------|
| 857 | 460 | 2 | 33.720 | 67.440 | 74.184 |
| 759 | 750 | 1 | 73.301 | 73.301 | 80.631 |
| 721 | 370 | 2 | 29.626 | 59.252 | 65.177 |
| 675 | 575 | 1 | 39.032 | 39.032 | 42.935 |
| 622 | 575 | 1 | 39.032 | 39.032 | 42.935 |
| 619 | 575 | 1 | 39.032 | 39.032 | 42.935 |
| 544 | 575 | 1 | 39.032 | 39.032 | 42.935 |
| 472 | 460 | 1 | 33.720 | 33.720 | 37.092 |
| 468 | 460 | 1 | 33.720 | 33.720 | 37.092 |
| 419 | 370 | 1 | 29.626 | 29.626 | 32.589 |
| 374 | 370 | 1 | 29.626 | 29.626 | 32.589 |
| 313 | 370 | 1 | 29.626 | 29.626 | 32.589 |
| 188 | 370 | 1 | 29.626 | 29.626 | 32.589 |

Tablo 4.23: Bigadiç JBIS’de farklı ilave ısıtma gücü ihtiyaçlarını karşılamak için seçilen ısı pompası sistemlerine ait ilk yatırım maliyetleri.

| İlave güç ihtiyacı (kW) | Isı pompası fiyatı (KDV dahil Euro) | Su eşanjörü (KDV Dahil Euro) | Antifriz eşanjörü (KDV Dahil Euro) | Buffer tank (KDV Dahil Euro) | İşçilik (KDV Dahil Euro) | Toplam ısı pompası sistemi maliyeti (KDV Dahil Euro) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| 7.522 | 2.256.971 | 23.500 | 57.750 | 86.807 | 135.418 | 2.560.445 |
| 6.654 | 1.996.624 | 20.798 | 51.195 | 76.793 | 119.797 | 2.265.208 |
| 6.118 | 1.835.843 | 20.798 | 51.195 | 76.793 | 110.151 | 2.094.780 |
| 5.497 | 1.649.300 | 17.180 | 42.290 | 63.435 | 98.958 | 1.871.163 |
| 4.896 | 1.441.824 | 15.019 | 36.970 | 55.455 | 86.509 | 1.635.777 |
| 4.805 | 1.441.824 | 15.019 | 36.970 | 55.455 | 86.509 | 1.635.777 |
| 4.246 | 1.273.945 | 13.270 | 32.665 | 48.998 | 76.437 | 1.445.315 |
| 4.016 | 1.205.047 | 13.270 | 32.665 | 48.998 | 72.303 | 1.372.283 |
| 3.844 | 1.153.392 | 12.015 | 29.574 | 44.361 | 69.204 | 1.308.546 |
| 3.400 | 1.153.392 | 12.015 | 29.574 | 44.361 | 69.204 | 1.308.546 |
| 3.378 | 1.013.523 | 11.541 | 24.143 | 28.936 | 60.811 | 1.138.955 |
| 3.172 | 951.610 | 11.541 | 24.143 | 28.936 | 57.097 | 1.073.327 |
| 2.873 | 862.182 | 11.541 | 24.143 | 28.936 | 51.731 | 978.534 |
| 2.859 | 857.958 | 11.541 | 24.143 | 28.936 | 51.477 | 974.056 |
| 2.548 | 764.551 | 6.715 | 15.164 | 24.739 | 45.873 | 857.042 |
| 2.425 | 764.551 | 6.715 | 15.164 | 24.739 | 45.873 | 857.042 |
| 2.268 | 680.424 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 40.825 | 761.456 |
| 2.171 | 651.275 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 39.077 | 730.559 |
| 1.979 | 593.687 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 35.621 | 669.515 |
| 1.938 | 581.423 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 34.885 | 656.515 |
| 1.772 | 525.288 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 31.517 | 597.012 |
| 1.751 | 525.288 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 31.517 | 597.012 |
| 1.703 | 511.001 | 5.771 | 13.507 | 20.929 | 30.660 | 581.868 |

| | | | | | | |
|-------|---------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 1.634 | 490.280 | 4.998 | 11.851 | 17.671 | 29.417 | 554.216 |
| 1.383 | 415.066 | 4.998 | 11.851 | 17.671 | 24.904 | 474.489 |
| 1.380 | 414.145 | 4.998 | 11.851 | 17.671 | 24.849 | 473.513 |
| 1.291 | 381.508 | 4.998 | 11.851 | 17.671 | 22.891 | 438.918 |
| 1.271 | 381.508 | 4.998 | 11.851 | 17.671 | 22.891 | 438.918 |
| 1.138 | 341.453 | 2.750 | 8.515 | 12.425 | 20.487 | 385.630 |
| 1.028 | 308.451 | 2.750 | 8.515 | 12.425 | 18.507 | 350.648 |
| 943 | 281.643 | 2.750 | 8.515 | 12.425 | 16.899 | 322.232 |
| 939 | 281.643 | 2.750 | 8.515 | 12.425 | 16.899 | 322.232 |
| 857 | 257.114 | 2.750 | 8.515 | 12.425 | 15.427 | 296.231 |
| 759 | 227.737 | 2.372 | 5.839 | 8.759 | 13.664 | 258.372 |
| 721 | 216.327 | 2.372 | 5.839 | 8.759 | 12.980 | 246.277 |
| 675 | 216.327 | 2.372 | 5.839 | 8.759 | 12.980 | 246.277 |
| 622 | 186.597 | 1.944 | 4.785 | 7.177 | 11.196 | 211.697 |
| 619 | 185.836 | 1.944 | 4.785 | 7.177 | 11.150 | 210.891 |
| 544 | 163.227 | 1.480 | 3.479 | 8.835 | 9.794 | 186.815 |
| 472 | 140.545 | 1.480 | 3.479 | 8.835 | 8.433 | 162.772 |
| 468 | 140.545 | 1.480 | 3.479 | 8.835 | 8.433 | 162.772 |
| 419 | 125.853 | 1.311 | 3.227 | 4.841 | 7.551 | 142.783 |
| 374 | 112.140 | 1.311 | 3.227 | 4.841 | 6.728 | 128.247 |
| 313 | 112.140 | 1.168 | 2.875 | 4.313 | 6.728 | 127.225 |
| 188 | 134.002 | 1.168 | 2.875 | 4.313 | 8.040 | 150.399 |

Yukarıda belirtilen her bir alternatif konut sayısı ve ilave ısı güç destek sistemi için yapılan yaşam döngüsü maliyet analizlerinde, gelecek 20 yılda gerçekleşecek fiyat ve oranların tahmin edilebilmesi için geçtiğimiz son 15-25 yıllık süreç içerisindeki enflasyon, USD ve Euro döviz kurları, elektrik, doğal gaz ve kömür birim fiyatları ve asgari ücret değerleri incelenmiştir. Buna göre yıllık enflasyon değerlerinin 2000-2023 yılları arasındaki ortalamasının %20,29, son üç yıllık ortalamasının ise %55,04 olduğu görülmüştür (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: Yıllara göre ülkemiz enflasyon değerleri.

Yapılan yaşam döngüsü maliyet analizlerinde birçok maliyeti önemli ölçüde etkileyen USD ve Euro kurlarının 2006-2024 yılları arasındaki gelişimi, yıllık ortalama satış kurları dikkate alınarak Tablo 4.24'te verilmiştir. Buna göre geçtiğimiz son 18 yıl içinde USD ve Euro kurlarının yıllık ortalama artış oranları sırasıyla %19,22 ve %18,17 iken; geçtiğimiz son üç yılda bu oranlar %52,05 ve %47,22 gibi daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir.

Tablo 4.24: Döviz kurlarındaki yıllık değişimler.

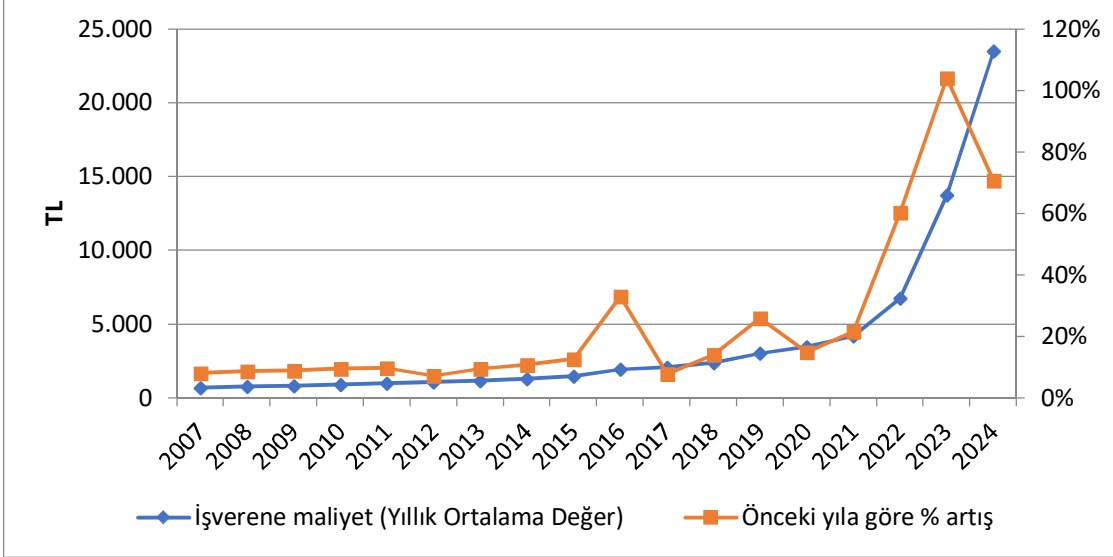
| | Yıllık ortalama satış kuru | | Önceki yıla göre % değişim | |
|------|----------------------------|----------|----------------------------|-------|
| | USD | Euro | USD | Euro |
| 2006 | 1,43801 | 1,80868 | 6,74 | 7,81 |
| 2007 | 1,30779 | 1,78676 | -9,06 | -1,21 |
| 2008 | 1,29915 | 1,90492 | -0,66 | 6,61 |
| 2009 | 1,55453 | 2,16089 | 19,66 | 13,44 |
| 2010 | 1,5076 | 1,99895 | -3,02 | -7,49 |
| 2011 | 1,67806 | 2,3336 | 11,31 | 16,74 |
| 2012 | 1,80114 | 2,3156 | 7,33 | -0,77 |
| 2013 | 1,90543 | 2,53084 | 5,79 | 9,30 |
| 2014 | 2,19232 | 2,91122 | 15,06 | 15,03 |
| 2015 | 2,72515 | 3,02498 | 24,30 | 3,91 |
| 2016 | 3,02342 | 3,34361 | 10,95 | 10,53 |
| 2017 | 3,65007 | 4,12125 | 20,73 | 23,26 |
| 2018 | 4,82025 | 5,66958 | 32,06 | 37,57 |
| 2019 | 5,68111 | 6,35843 | 17,86 | 12,15 |
| 2020 | 7,01823 | 8,03284 | 23,54 | 26,33 |
| 2021 | 8,87734 | 10,46632 | 26,49 | 30,29 |
| 2022 | 16,58555 | 17,39508 | 86,83 | 66,20 |
| 2023 | 24,05339 | 26,02526 | 45,03 | 49,61 |

| | | | | |
|------|------------------------|----------|--------|--------|
| 2024 | 29,89731 | 32,75187 | 24,30 | 25,85 |
| | Yıllık ortalama artış: | | %19,22 | %18,17 |

Bigadiç JBIS’de ortaya çıkan personel maliyetlerinin hesaplanmasında, asgari ücret değerlerinin 2007-2024 yılları arası işverene olan maliyetleri incelenmiştir. Buna göre geçtiğimiz son 17 yıl içinde bu değerın ortalama %24,35 oranında arttığı görülmüştür (Tablo 4.25 ve Şekil 4.12).

Tablo 4.25: Yıllara göre asgari ücret değerleri.

| Yıl | İşverene maliyet, TL (Yıllık Ortalama Değer) | Önceki yıla göre % artış |
|------|---|--------------------------|
| 2007 | 697 | 8,05 |
| 2008 | 758 | 8,68 |
| 2009 | 826 | 8,97 |
| 2010 | 905 | 9,60 |
| 2011 | 992 | 9,67 |
| 2012 | 1.064 | 7,24 |
| 2013 | 1.165 | 9,47 |
| 2014 | 1.290 | 10,73 |
| 2015 | 1.454 | 12,71 |
| 2016 | 1.935 | 33,09 |
| 2017 | 2.089 | 7,92 |
| 2018 | 2.385 | 14,18 |
| 2019 | 3.006 | 26,06 |
| 2020 | 3.458 | 15,03 |
| 2021 | 4.204 | 21,56 |
| 2022 | 6.742 | 60,38 |
| 2023 | 13.761 | 104,12 |
| 2024 | 23.503 | 70,80 |
| | Yıllık ortalama artış: %24,35 | |



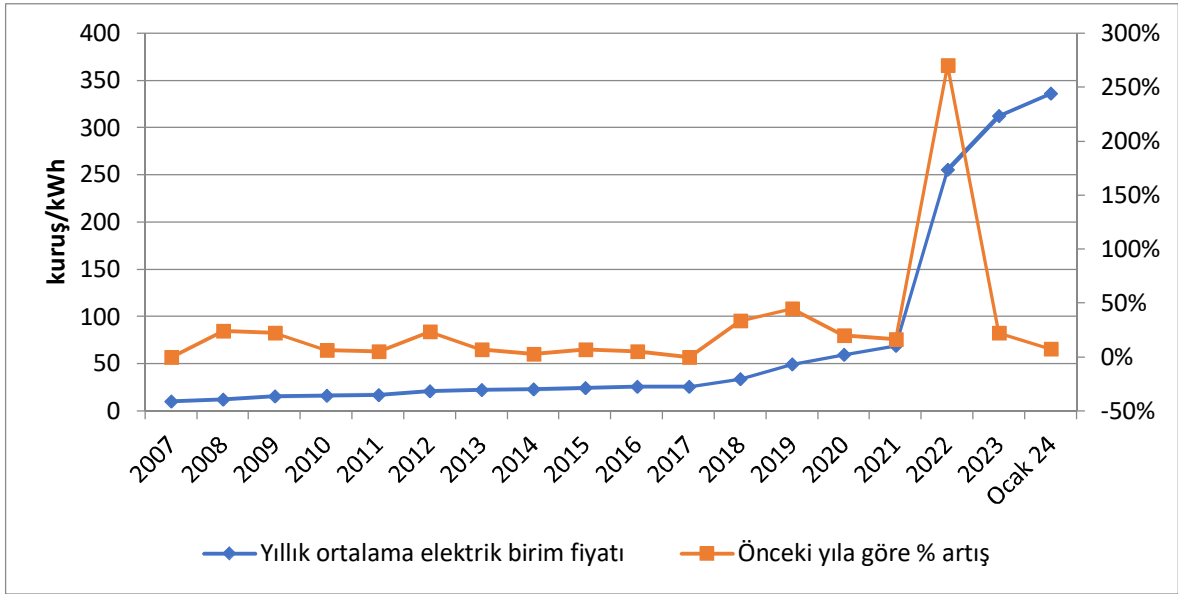
Şekil 4.12: Yıllara göre ülkemizdeki asgari ücretin işverene maliyeti.

Bigadiç JBIS’de elektrik kullanımı, jeotermal kuyu pompalarının ve dağıtım hatları sirkülasyon pompalarının çalıştırılmasında olduğu kadar, ısı pompası ile ısıtma desteği sağlanması durumunda da önemli bir işletme maliyet olacaktır. Bu yüzden bu enerjinin gelecek 20 yıl içerisindeki yıllık artış oranının doğru bir şekilde tahmin edilmesi yapılan yaşam döngüsü maliyet analizleri için oldukça önemlidir. Bigadiç JBIS’de kullanılan çift terimli tek zamanlı orta gerilim sanayi elektrik birim fiyatının 2007-2024 yılları arasındaki değişimi Tablo 4.26 ve Şekil 4.13’te verilmiştir. Buna göre, sistemde kullanılan elektriğin birim fiyatının geçtiğimiz son 17 yıl içinde ortalama %28,74, son 3 yıl içinde ise ortalama %103,10 oranında arttığı görülmüştür.

Tablo 4.26: Yıllara göre sanayi orta gerilim elektrik birim fiyatları.

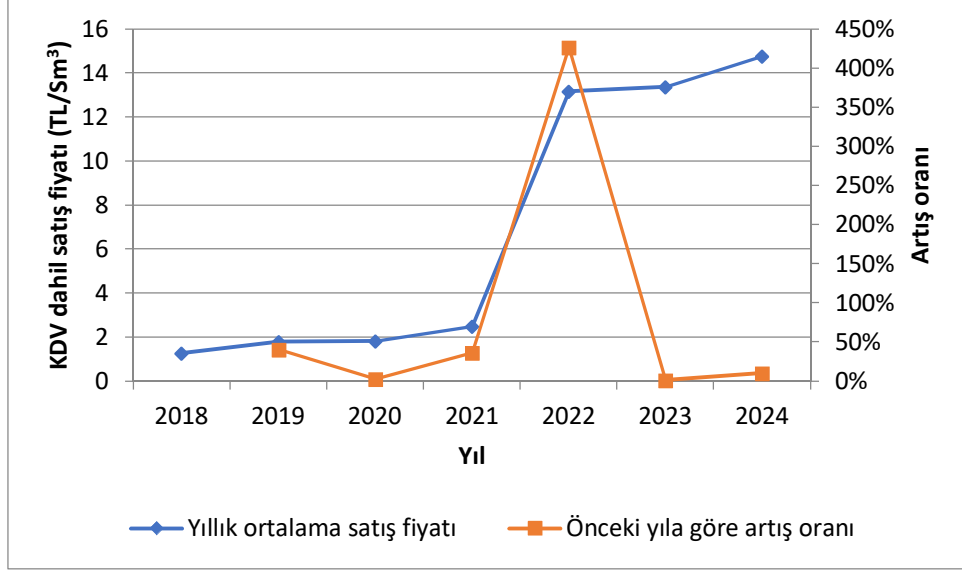
| Yıl | Yıllık ortalama birim fiyat, kuruş/kWh* | Önceki yıla göre % artış |
|------|---|--------------------------|
| 2007 | 9,964 | 0,00 |
| 2008 | 12,385 | 24,29 |
| 2009 | 15,149 | 22,32 |
| 2010 | 16,136 | 6,52 |
| 2011 | 16,908 | 4,79 |
| 2012 | 20,841 | 23,26 |
| 2013 | 22,242 | 6,72 |
| 2014 | 22,810 | 2,55 |
| 2015 | 24,314 | 6,60 |

| | | |
|--------------------------|---------|-------------------------------|
| 2016 | 25,486 | 4,82 |
| 2017 | 25,485 | 0,00 |
| 2018 | 33,978 | 33,32 |
| 2019 | 49,307 | 45,12 |
| 2020 | 59,204 | 20,07 |
| 2021 | 68,932 | 16,43 |
| 2022 | 255,386 | 270,49 |
| 2023 | 312,527 | 22,37 |
| Ocak 2024 | 336,374 | 7,63 |
| * Vergi ve fonlar hariç. | | Yıllık ortalama artış: %28,74 |

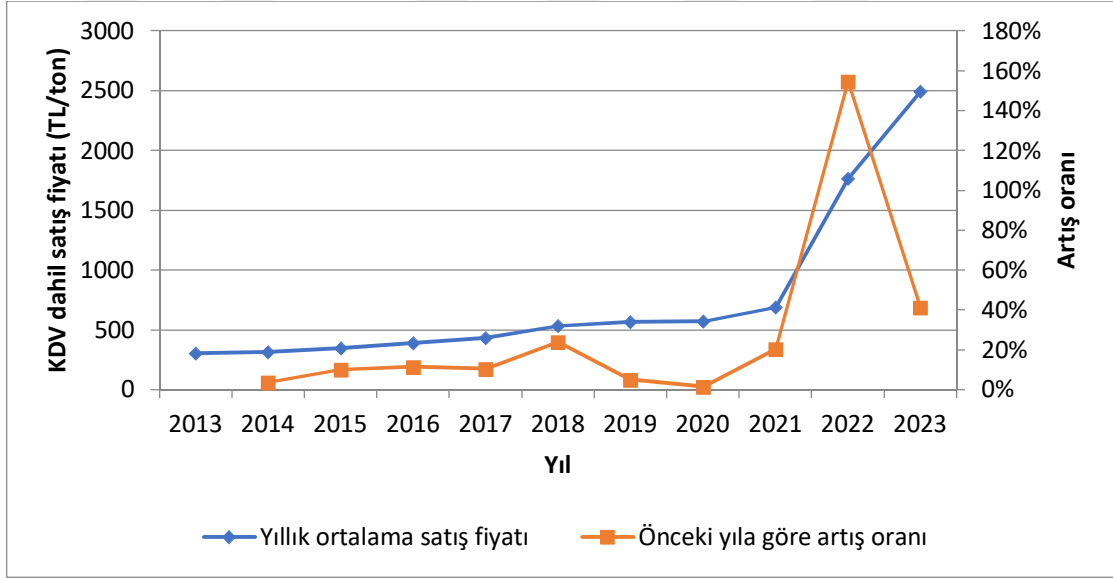


Şekil 4.13: Yıllara göre sanayi elektriği birim fiyatının değişimi.

Bigadiç JBIS’de mevcut kömür kazanı ve yeni kurulacak doğal gaz kazanı için gerekli olan kömür ve doğal gaz yakıtlarının birim fiyatlarındaki yıllık artış oranları, bu yakıtlar için yapılacak yaşam döngüsü maliyet analizlerinin en hassas bölümünü oluşturmaktadır. Doğal gaz için son beş, kömür için ise son on yıla ait yıllık ortalama birim fiyatlar, yıllık artış oranlarıyla birlikte sırasıyla, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilmiştir. Buna göre geçtiğimiz son beş yılda kullanılması kullanılan çift terimli tek zamanlı orta gerilim sanayi elektrik birim fiyatının 2007-2024 yılları arasındaki değişimi Tablo 4.26 ve Şekil 4.14’te verilmiştir. Buna göre, sistemde kullanılan elektriğin birim fiyatının geçtiğimiz son 17 yıl içinde ortalama %28,74, son 3 yıl içinde ise ortalama %103,10 oranında arttığı görülmüştür.



Şekil 4.14: Yıllara göre doğal gaz birim fiyatının değişimi.



Şekil 4.15: Yıllara göre kömür birim fiyatının değişimi.

Yukarıda açıklanan ve maliyetler üzerinde önemli etkiye sahip fiyat ve oranlara ilişkin tablo ve grafikler incelendiğinde, geçtiğimiz son 3 yıl içinde enflasyon, döviz kurları ile asgari ücret, doğal gaz, elektrik ve kömür birim fiyatlarındaki artış oranlarının geçtiğimiz 15-25 yıllık süreç içinde gerçekleşen artış oranlarının oldukça üzerinde bir seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenle yapılan yaşam döngüsü maliyet analizlerinde kullanılan artış oranları hesaplanırken son 3 yılda görülen ekstrem artış oranları dikkate alınmamıştır. Buna göre maliyet hesaplamalarına temel teşkil eden başlangıç birim fiyat değerleri ve bu fiyatların gelecek dönemlerdeki tahmini artış oranları Tablo 4.27'de verilmiştir.

Tablo 4.27: Yaşam döngüsü maliyet analizinde kullanılan çeşitli maliyetlere ait birim fiyatlar ve yıllık artış oranları.

| | Açıklama | Analiz başlangıcı KDV dahil birim fiyat | Öngörülen yıllık birim fiyat artış oranı, % |
|------------------------------|--|---|---|
| Doğal gaz | Hu = 9,59 kWh/m ³ | 13,97 TL/m ³ | 20,48 |
| Kömür | Hu = 5,7925 kWh/kg (Kısrakdere Yıkanmış 10-18 mm - Açık) (2023 Kasım) | 2,46266 TL/kg | 14,38 |
| Elektrik | Çift terimli tek zamanlı sanayi Orta Gerilim (2023 Kasım) | 4,7047 TL/kWh | 12,60 |
| Kabuklaşma önleyici kimyasal | Birim fiyat Bigadiç JBIS'den alınmıştır (2023 Kasım) | 59 TL/kg | 29,00 |
| Personel | Bir asgari ücretlinin işverene aylık maliyeti (2023 2. Dönem) | 15.762 TL/kişi | 13,50 |
| Bakım onarım | Yeni jeotermal kuyu sondaj maliyeti ve diğer bakım onarım maliyetleri. Birim fiyat Bigadiç JBIS'den alınmıştır (2023 Kasım). | 600.000 TL/yıl | 29,00 |
| Malzeme | Birim fiyat Bigadiç JBIS'den alınmıştır (2023 Kasım). | 350.000 TL/yıl | 29,00 |

Analizlerde kullanılan iskonto oranı ve Euro ve USD kurları Tablo 4.28'de verilmiştir.

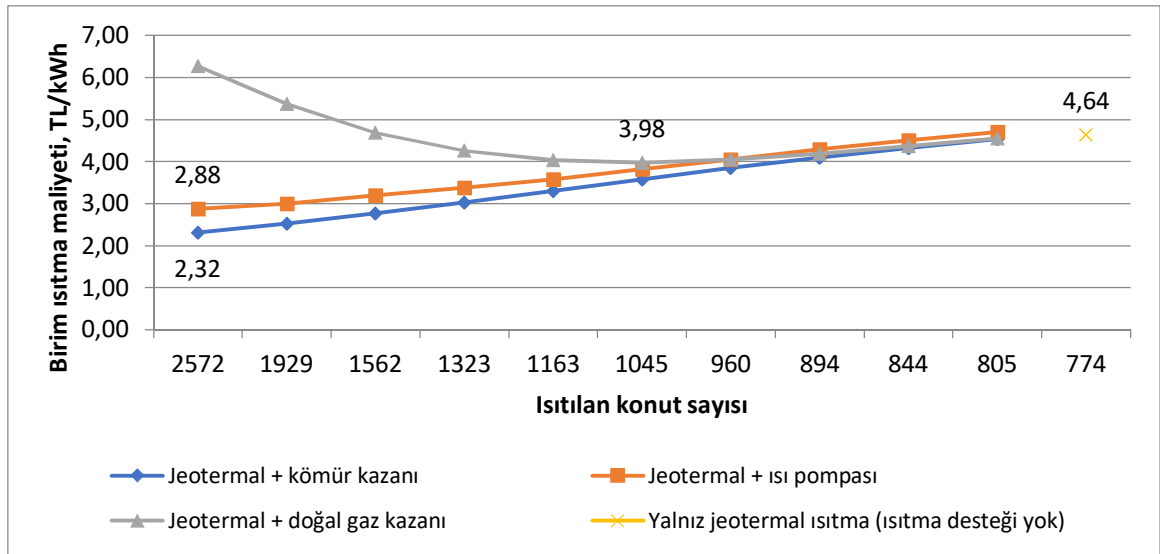
Tablo 4.28: Yaşam döngüsü maliyet analizinde kullanılan döviz kurları ve iskonto oranı.

| | |
|---|------------|
| 1 Euro* | 31,1953 TL |
| 1 USD* | 28,7109 TL |
| i (iskonto oranı) | %10 |
| *15.11.2023 tarihli TCMB efektif satış kuru | |

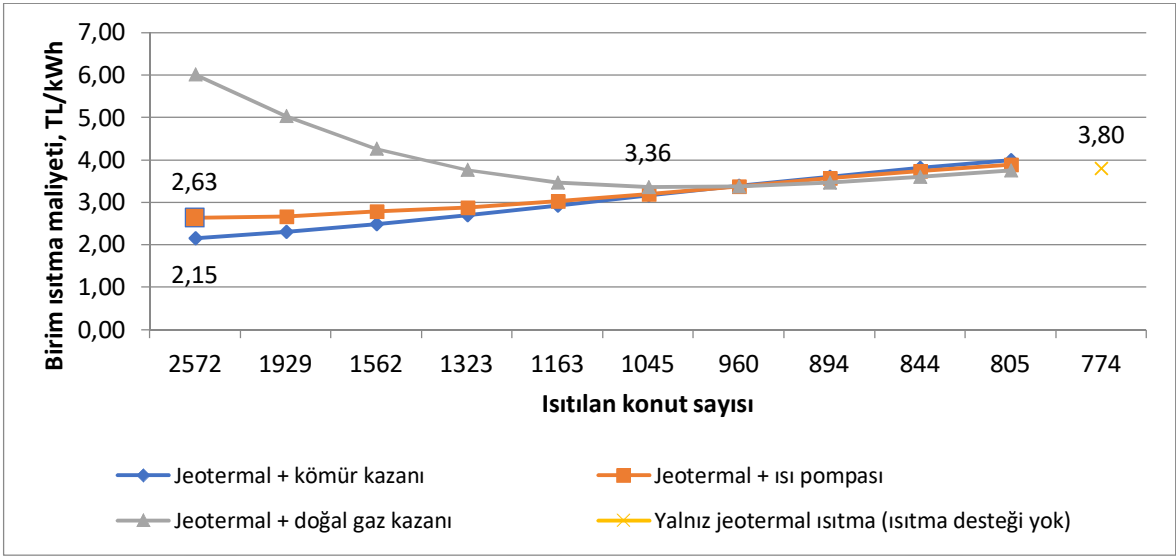
Çalışmada farklı konut sayıları ve ısıtma destek kombinasyonları için yapılan 20 yıllık yaşam döngüsü maliyet analizi sonuçlarına göre elde edilen birim ısıtma maliyetleri sistemde güneş enerji santrali kullanılmaması (GES%0) ve %60 oranında kullanılması (GES%60) durumlarına göre Şekil 4.15-4.20 arasında verilmiştir. Buna göre Bigadiç JBIS'de hiçbir ek ısıtma sistemi kullanılmadan mevcut jeotermal enerji ile yalnız 774 konut ısıtılabilir. Yapılan yaşam döngüsü maliyet analizine göre yalnız jeotermal enerji ile 774 konutun 20 yıl süre içinde ısıtılması durumunda birim ısıtma maliyeti GES kullanılmadığı durumda

(GES%0) 4,64 TL/kWh olmaktadır (Şekil 4.15). Bigadiç JBIS’de jeotermal enerjiye kömür kazanı, doğal gaz kazanı ve ısı pompası gibi yardımcı ünitelerle tekli ısıtma desteği verilmesi halinde ortaya çıkan ısıtma maliyetleri Şekil 4.15 ve 4.16’da verilmiştir. Sisteme GES ile elektrik enerjisinin sağlanmadığı durumda en düşük birim ısıtma maliyeti 2,32 TL/kWh ile kömür kazanı destekli 2.572 konutun ısıtıldığı durumda gerçekleşmiştir. En düşük ikinci birim ısıtma maliyeti ısı pompası destekli 2.572 konutun ısıtıldığı durumda, 2,88 TL/kWh olarak gerçekleşmiştir. Bigdiç JBIS’ye doğal gaz desteği sağlanması durumunda en düşük ısıtma maliyeti 1.045 konutun ısıtıldığı durumda, 3,98 TL/kWh olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.15).

Bigadiç JBIS’ye sistemde bulunan mevcut GES ile jeotermal üretiminde ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin %60’ının sağlanması durumunda (GES%60), tekli ısıtma destek sistemlerindeki birim ısıtma maliyetlerinin önemli derecede azaldığı görülmüştür. Buna göre en düşük birim ısıtma maliyeti 2,15 TL/kWh ile kömür kazanı destekli 2.572 konutun ısıtıldığı durumda gerçekleşmiştir. En düşük ikinci ısıtma maliyeti ısı pompası destekli 2.572 konutun ısıtıldığı durumda, 2,63 TL/kWh olarak gerçekleşmiştir. Bigdiç JBIS’ye doğal gaz desteği sağlanması durumunda en düşük birim ısıtma maliyeti 1.045 konutun ısıtıldığı durumda, 3,36 TL/kWh olarak gerçekleşmiştir. GES%60 durumunda, jeotermal enerji ile 774 konutun ısıtılması halinde ise birim ısıtma maliyeti 3,80 TL/kWh’ye düşmüştür (Şekil 4.16).



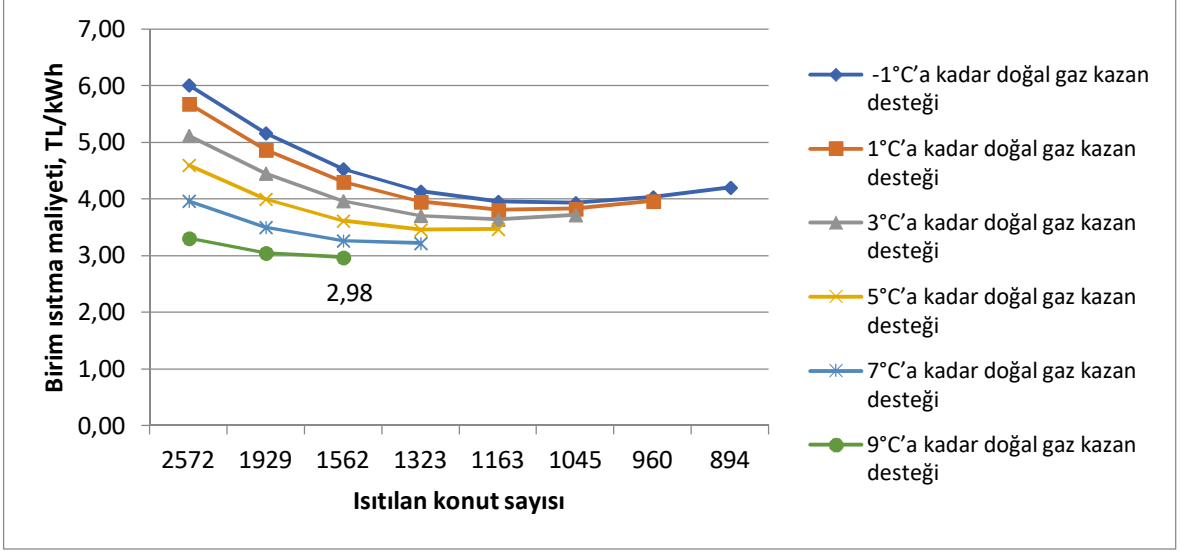
Şekil 4.16: Jeotermal enerjiye tekli ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %0).



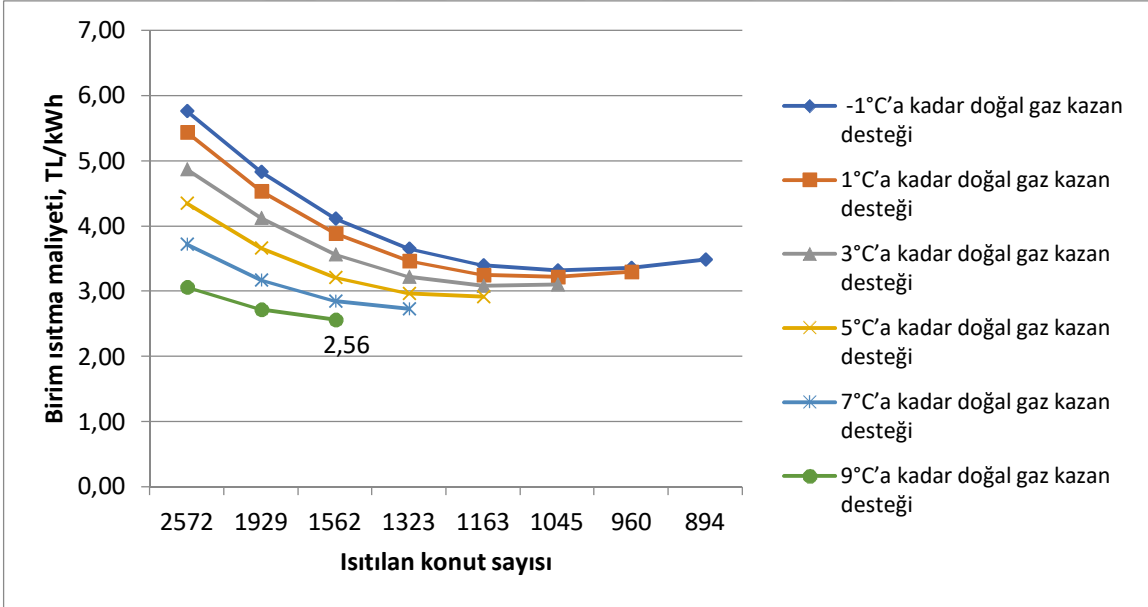
Şekil 4.17: Jeotermal enerjiye tekli ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %60).

Bigadiç JBIS'ye ikili ısıtma desteğinin sağlandığı durumlarda gerçekleşen birim ısıtma maliyetlerine ilişkin sonuçlar aşağıda açıklanmıştır. Jeotermal enerjiye doğal gaz + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri GES%0 ve GES%60 durumları için Şekil 4.18 ve 4.19'de verilmiştir. Buna göre sisteme GES ile elektrik enerjisinin sağlanmadığı durumda (GES%0) en düşük birim ısıtma maliyetinin 2,98 TL/kWh olarak 1.562 konutun +9°C'ye kadar olan dış hava sıcaklıklarında jeotermal enerji + doğal gaz kazanı, daha düşük sıcaklıklarda ise jeotermal enerji + mevcut kömür kazanı ile ısıtılması durumunda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.18).

GES ile elektrik kısmi elektrik enerjisinin sağlandığı durumda (GES%60) en düşük birim ısıtma maliyetinin 2,56 TL/kWh olarak 1.562 konutun +9°C'ye kadar olan dış hava sıcaklıklarında jeotermal enerji + doğal gaz kazanı; daha düşük sıcaklıklarda ise jeotermal enerji + mevcut kömür kazanı ile ısıtılması durumunda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.18: Jeotermal enerjiye doğal gaz + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %0).

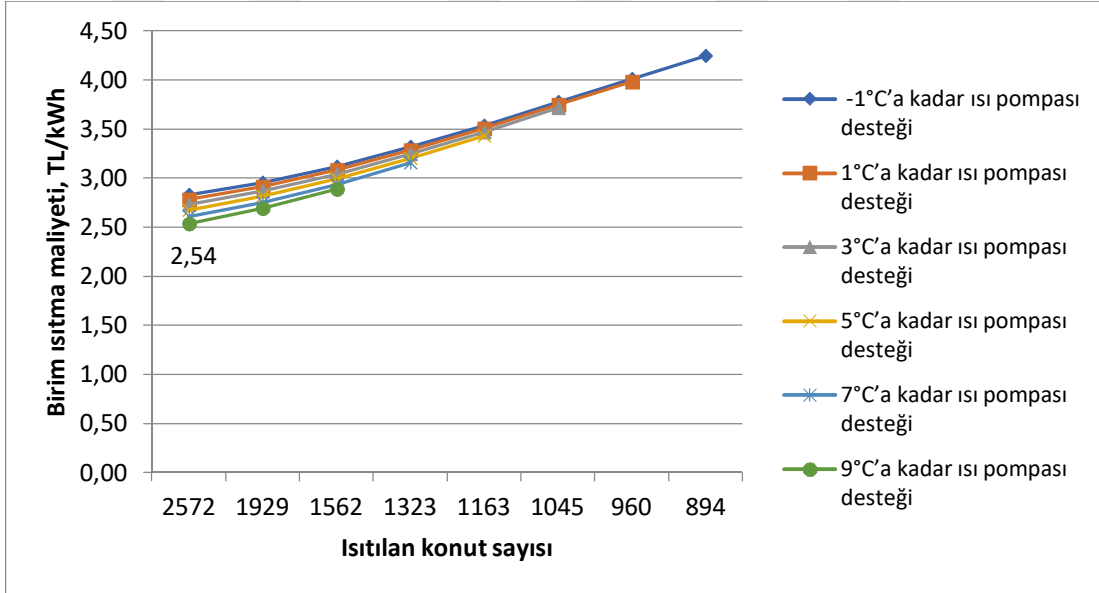


Şekil 4.19: Jeotermal enerjiye doğal gaz + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %60).

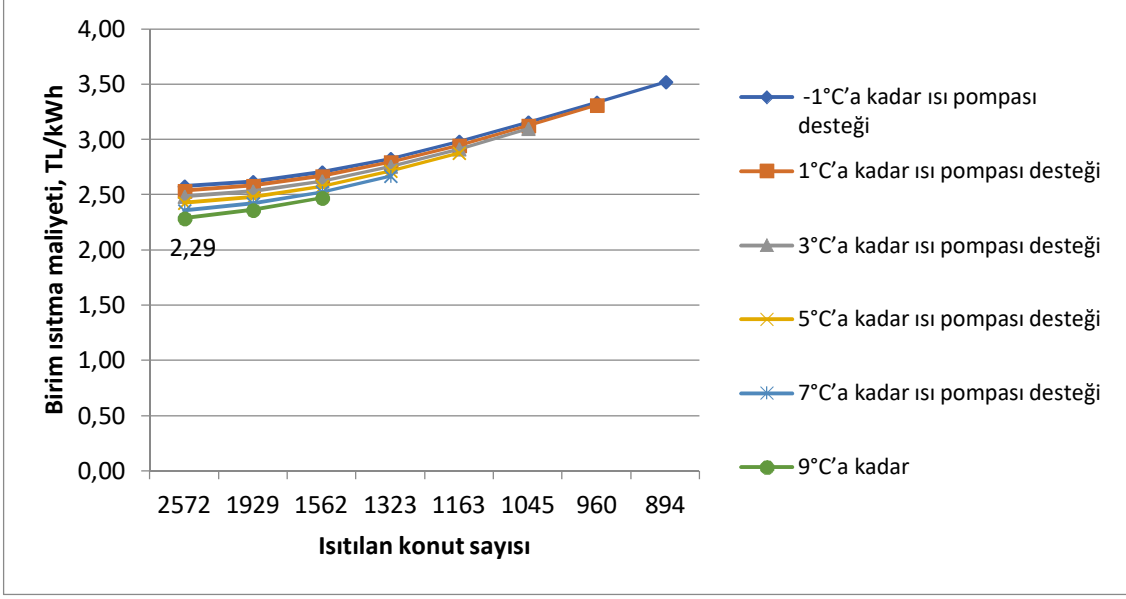
Bigadiç JBIS'ye ısı pompası + kömür kazanı ikilisi tarafından ısıtma desteğinin sağlandığı durumlarda gerçekleşen birim ısıtma maliyetlerine ilişkin sonuçlar aşağıda açıklanmıştır. Jeotermal enerjiye ısı pompası + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda farklı konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri GES%0 ve GES%60 durumları için Şekil 4.20

ve 4.21’de verilmiştir. Buna göre sisteme GES ile elektrik enerjisinin sağlanmadığı durumda (GES%0) en düşük birim ısıtma maliyetinin 2,54 TL/kWh olarak 2.572 konutun +9°C’ye kadar olan dış hava sıcaklıklarında jeotermal enerji + ısı pompası; daha düşük sıcaklıklarda ise jeotermal enerji + mevcut kömür kazanı ile ısıtılması durumunda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.20).

GES ile elektrik kısmi elektrik enerjisinin sağlandığı durumda (GES%60) en düşük birim ısıtma maliyetinin 2,29 TL/kWh olarak 2.572 konutun +9°C’ye kadar olan dış hava sıcaklıklarında jeotermal enerji +ısı pompası; daha düşük sıcaklıklarda ise jeotermal enerji + mevcut kömür kazanı ile ısıtılması durumunda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.21).

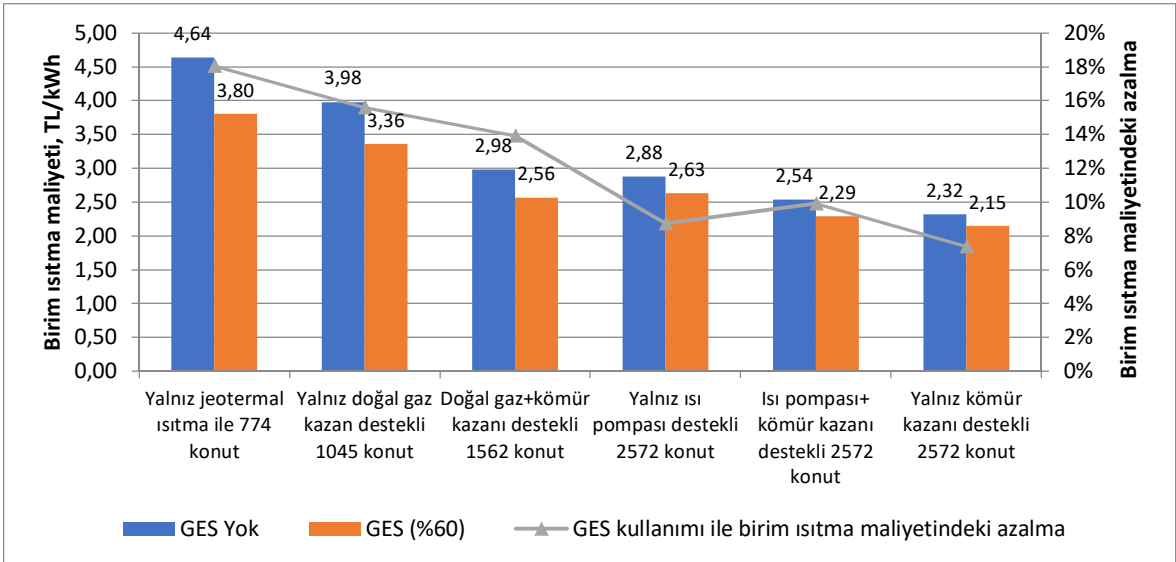


Şekil 4.20: Jeotermal enerjiye ısı pompası + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %0).



Şekil 4.21: Jeotermal enerjiye ısı pompası + kömür kazanı ısıtma desteği sağlanması durumunda konut sayılarına göre birim ısıtma maliyetleri (GES %60).

Yukarıda farklı kombinasyonlar için verilen birim ısıtma maliyetleri arasında ısıtma destek sistemi türüne göre en düşük birim ısıtma maliyetleri Şekil 4.22'de GES%0 ve GES%60 durumları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Buna göre Bigadiç JBIS'de jeotermal enerji üretimi için kullanılan elektriğin %60'ının mevcut 1 MW'lık GES ile karşılanması, birim ısıtma maliyetlerini %7 ile %18 arasında değişen oranlarda azaltmıştır.



Şekil 4.22: Farklı ısıtma destek sistemlerinde görülen en düşük ısıtma maliyetli konut sayıları.

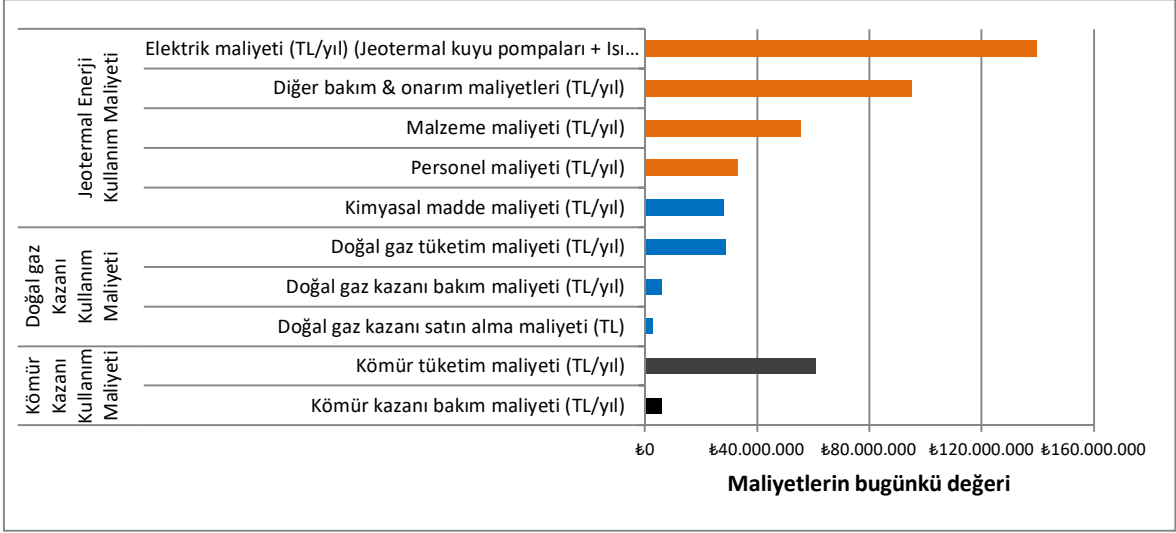
Bigadiç JBIS’de yalnız jeotermal enerji ile ısıtma yapmak yerine farklı ısıtma destek sistemleri kullanarak daha fazla konut ısıtmanın getireceği avantajlar Tablo 4.29’da GES%0 ve GES%60 durumları için verilmiştir. Buna göre Bigadiç JBIS’de GES%0 durumunda, yalnız kömür kazanı destekli 2.572 konut ısıtmanın, hiçbir ısıtma desteği olmadan jeotermal enerji ile 774 konut ısıtmaya göre %50 oranında daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Tablo 4.29: Farklı ısıtma destek sistemlerinin yalnız jeotermal enerji kullanımına göre sağladığı avantajlar.

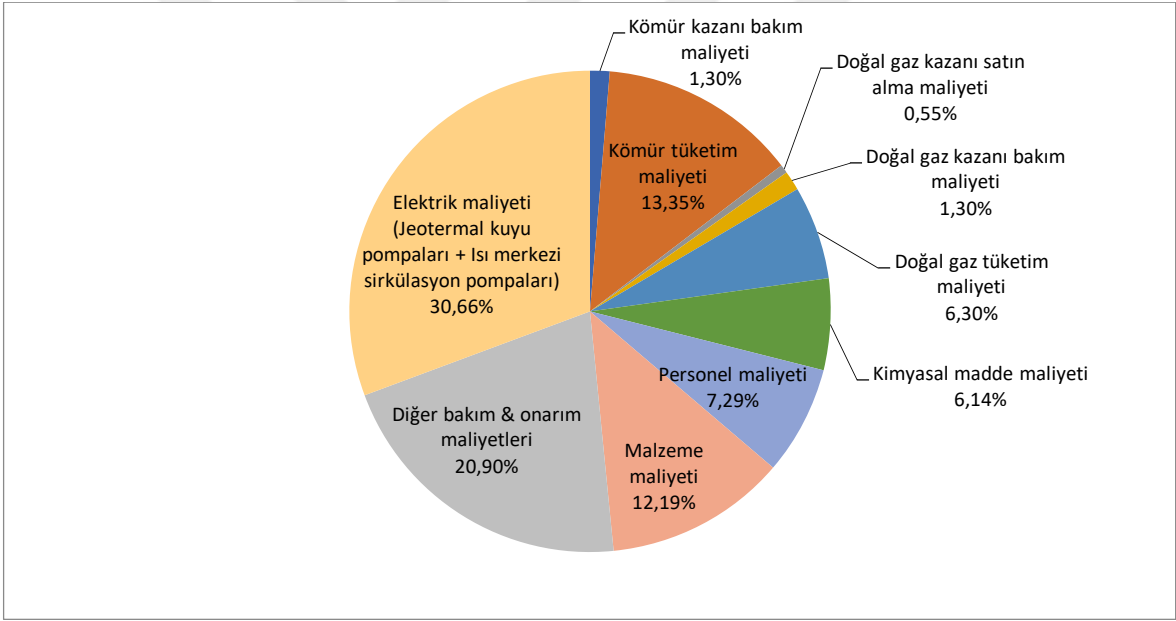
| | Birim ısıtma maliyetindeki azalma | |
|---|-----------------------------------|-----------|
| | GES (%0) | GES (%60) |
| Yalnız doğal gaz kazanı destekli 1045 konut | %14 | %12 |
| Doğal gaz+kömür kazanı destekli 1562 konut | %36 | %33 |
| Yalnız ısı pompası destekli 2572 konut | %38 | %33 |
| Isı pompası+ kömür kazanı destekli 2572 konut | %45 | %40 |
| Yalnız kömür kazanı destekli 2572 konut | %50 | %44 |

Bigadiç JBIS için yapılan yaşam döngüsü maliyet analizi sonuçlarına göre Şekil 4.21’de verilen en düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısıtma destek sistemleri için maliyetlerin bugünkü değerleri GES%0 ve GES%60 durumları için Şekil 4.22-4.45 Tablo 4.30-4.35 arasında verilmiştir.

Buna göre en düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.562 konut) 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %30,66 ile elektrik tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %20,90 ile diğer bakım&onarım maliyetleri ve %13,35 ile kömür tüketim maliyeti izlemektedir (Şekil 4.23).

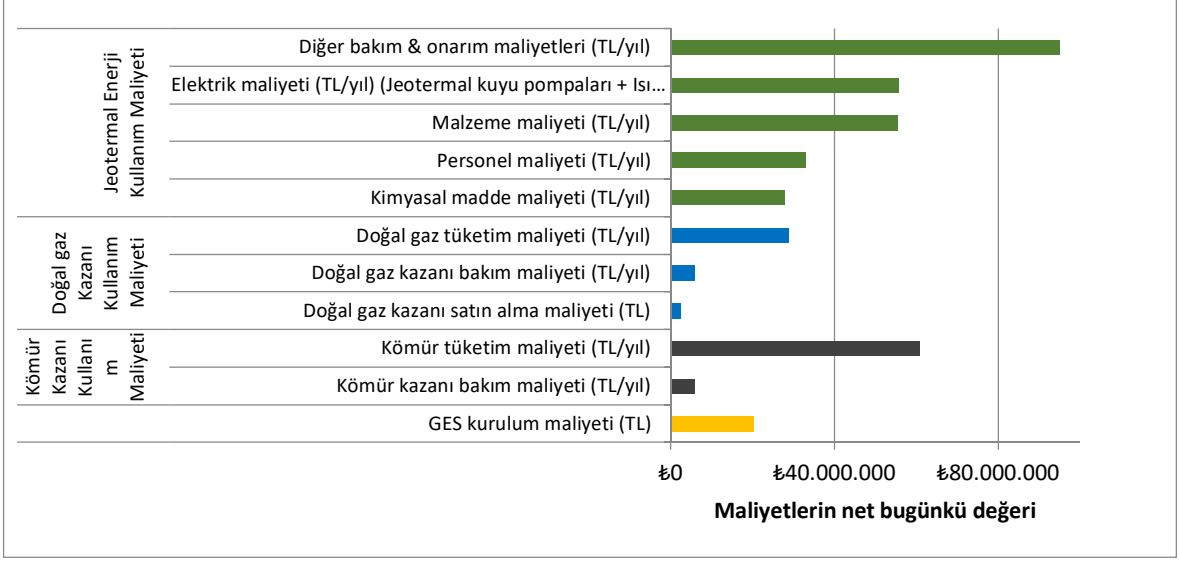


Şekil 4.23: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.562 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %0).

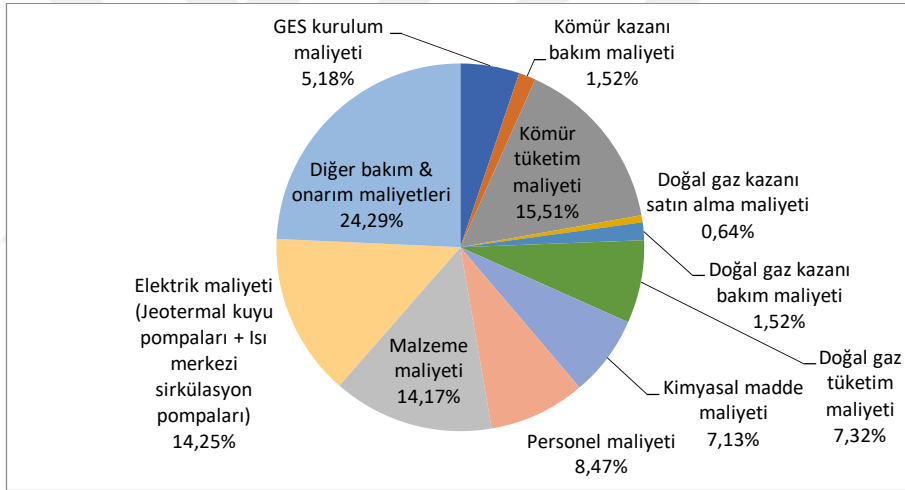


Şekil 4.24: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.562 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %0).

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemine (1.562 konut) %60 GES desteği sağlanması durumunda ise, 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %24,29 ile diğer bakım&onarım maliyetleri oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %15,51 ile kömür tüketim maliyeti ve %14,25 ile elektrik tüketim maliyeti izlemektedir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.562 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %60).

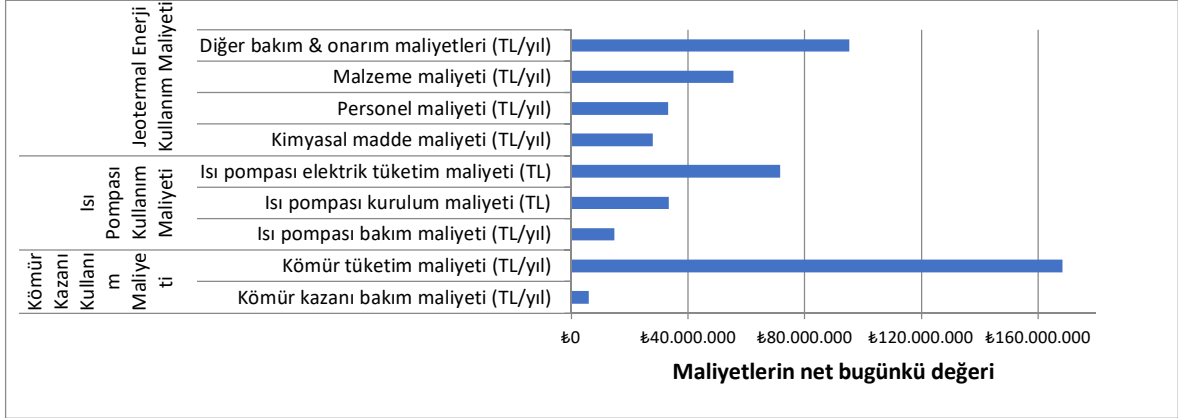


Şekil 4.26: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.562 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin dağılımı (GES %60).

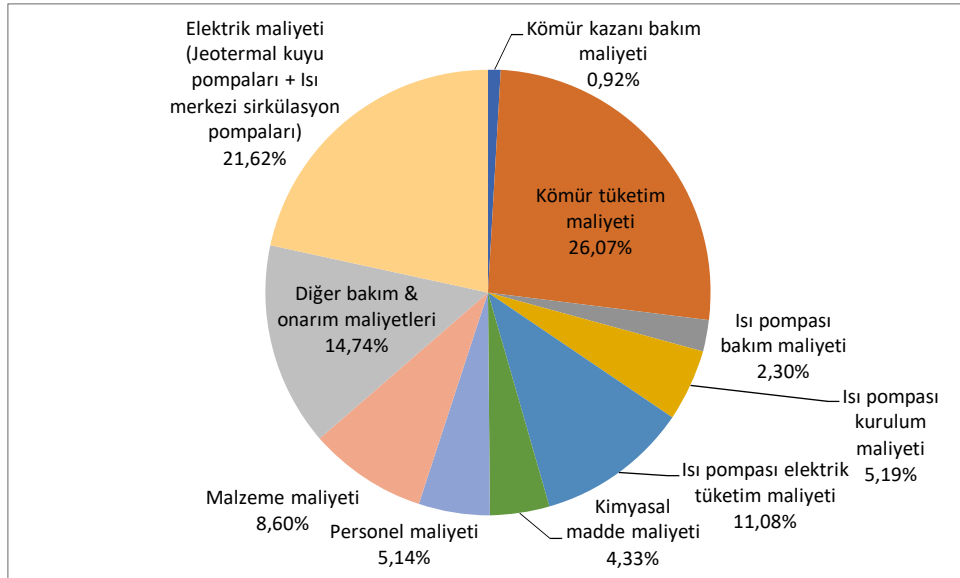
Tablo 4.30: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.562 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması.

| | GES kurulum maliyeti (TL) | Elektrik maliyeti (TL/yıl) (Jeotermal kuyu pompaları + Isı merkezi sirkülasyon pompaları) | Diğer maliyetlerin NBD'si (TL) | Tüm maliyetlerin NBD'si (TL) | Birim ısıtma maliyeti (TL/kWh) |
|---------|---------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| GES %0 | --- | 139.533.940 | 315.568.515 | 455.102.455 | 2,98 |
| GES %60 | 20.288.581 | 55.813.576 | 315.568.515 | 391.670.672 | 2,56 |

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %26,07 ile kömür tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %21,62 ile elektrik tüketim maliyeti ve %14,74 ile diğer bakım&onarım maliyeti izlemektedir (Şekil 4.27).

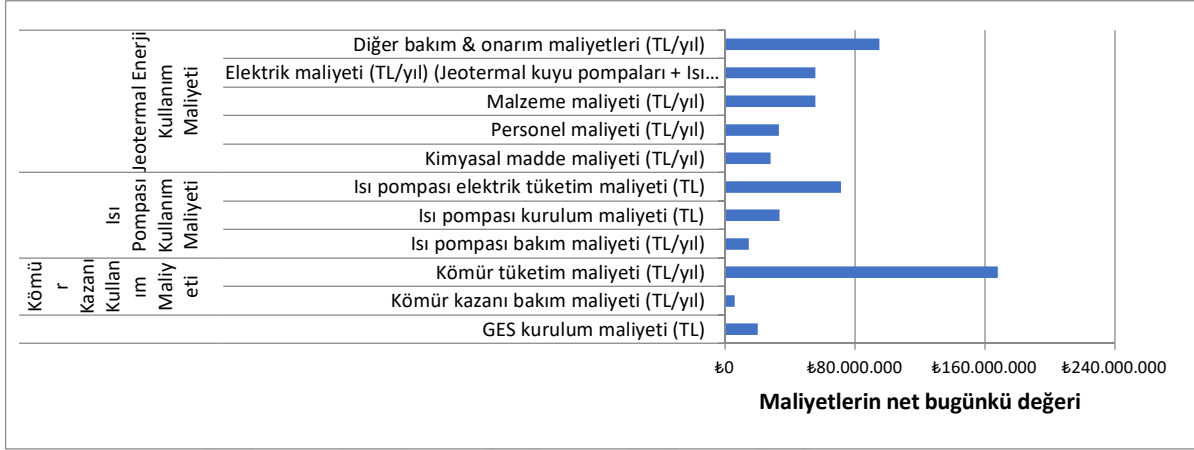


Şekil 4.27: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %0).

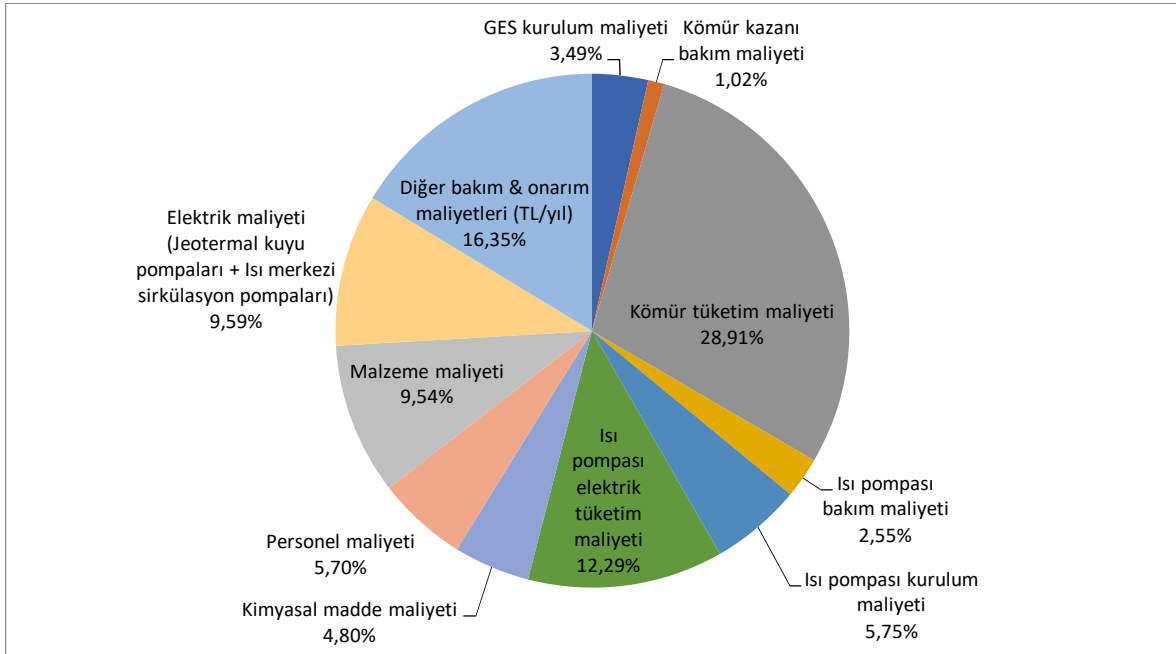


Şekil 4.28: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin dağılımı (GES %0).

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemine (2.572 konut) %60 GES desteği sağlanması durumunda ise, 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %28,91 ile kömür tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %16,35 ile diğer bakım&onarım maliyeti ve %12,29 ile ısı pompası elektrik tüketim maliyeti izlemektedir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %60).

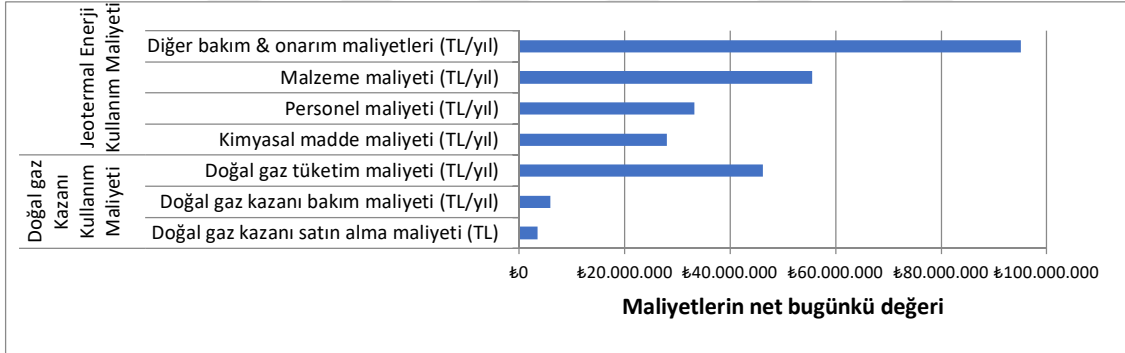


Şekil 4.30: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %60).

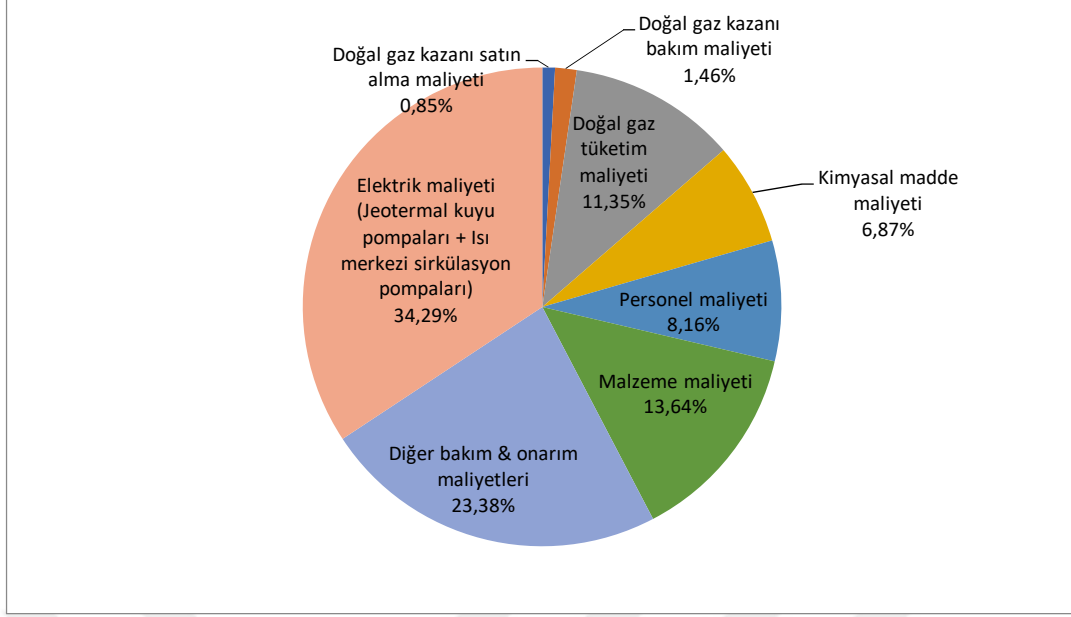
Tablo 4.31: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası + kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması..

| | GES kurulum maliyeti (TL) | Elektrik maliyeti (TL/yıl) (Jeotermal kuyu pompaları + Isı merkezi sirkülasyon pompaları) | Diğer maliyetlerin NBD'si (TL) | Tüm maliyetlerin NBD'si (TL) | Birim ısıtma maliyeti (TL/kWh) |
|---------|---------------------------|--|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| GES %0 | --- | 139.533.940 | 505.735.740 | 645.269.680 | 2,54 |
| GES %60 | 20.288.581 | 55.813.576 | 505.735.740 | 581.837.897 | 2,59 |

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.045 konut) 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %34,29 ile elektrik tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %23,38 ile diğer bakım&onarım maliyeti ve %13,64 ile malzeme maliyeti izlemektedir (Şekil 4.31).

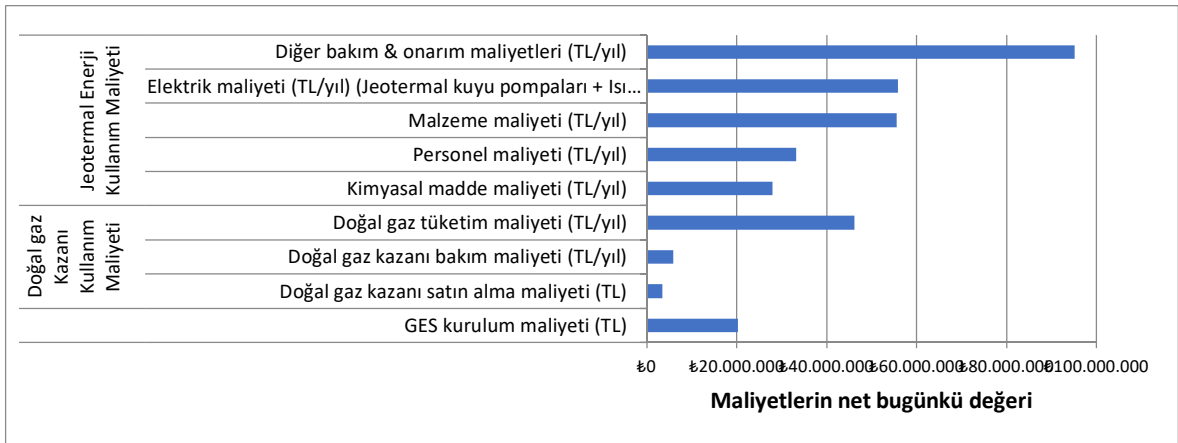


Şekil 4.31: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.045 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %0).

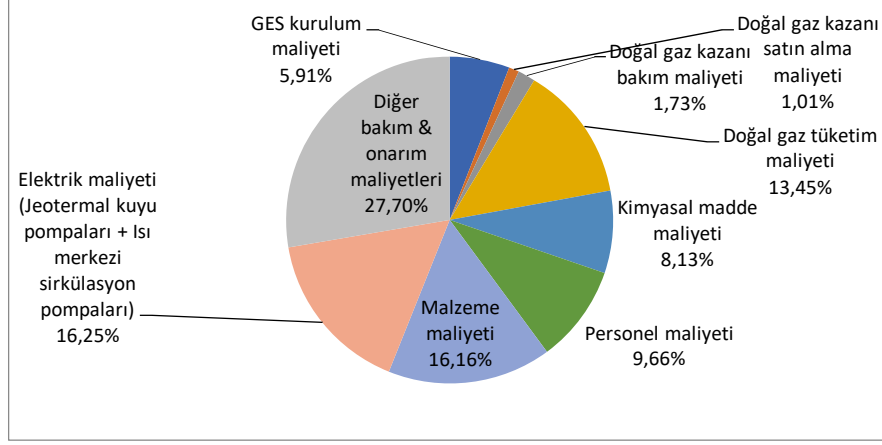


Şekil 4.32: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.045 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %0).

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemine (1.045 konut) %60 GES desteği sağlanması durumunda ise, 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %27,70 ile diğer bakım&onarım maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %16,25 ile elektrik tüketim maliyeti ve %16,16 ile malzeme maliyeti izlemektedir (Şekil 4.33).



Şekil 4.33: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.045 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %60).

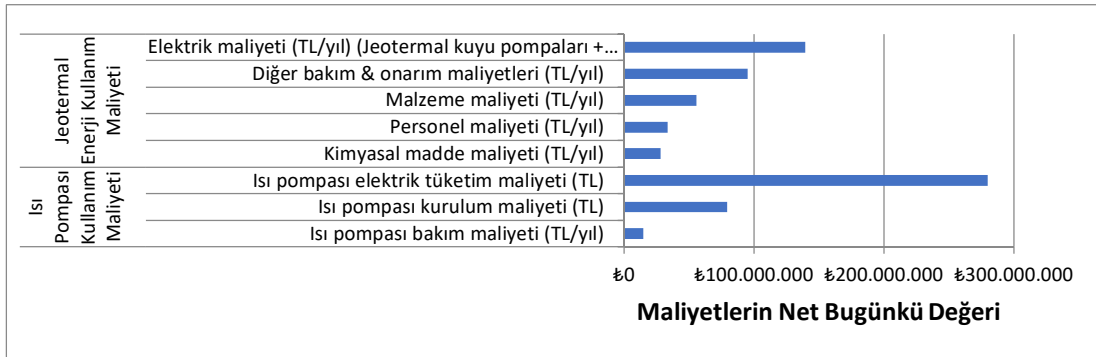


Şekil 4.34: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.045 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %60).

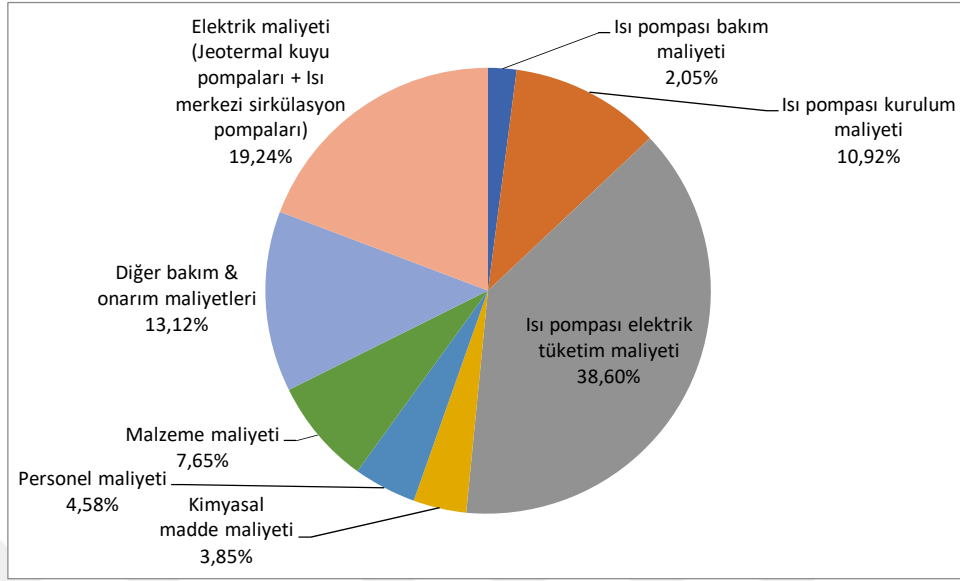
Tablo 4.32: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip doğal gaz kazanlı ısıtma destek sistemi için (1.045 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması.

| | GES kurulum maliyeti (TL) | Elektrik maliyeti (TL/yıl) (Jeotermal kuyu pompaları + Isı merkezi sirkülasyon pompaları) | Diğer maliyetlerin NBD'si (TL) | Tüm maliyetlerin NBD'si (TL) | Birim ısıtma maliyeti (TL/kWh) |
|---------|---------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| GES %0 | --- | 139.533.940 | 267.367.712 | 406.901.652 | 3,98 |
| GES %60 | 20.288.581 | 55.813.576 | 267.367.712 | 343.469.868 | 3,36 |

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %38,60 ile ısı pompası elektrik tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %19,24 ile elektrik maliyeti ve %13,12 ile diğer bakım&onarım maliyeti izlemektedir (Şekil 4.35).

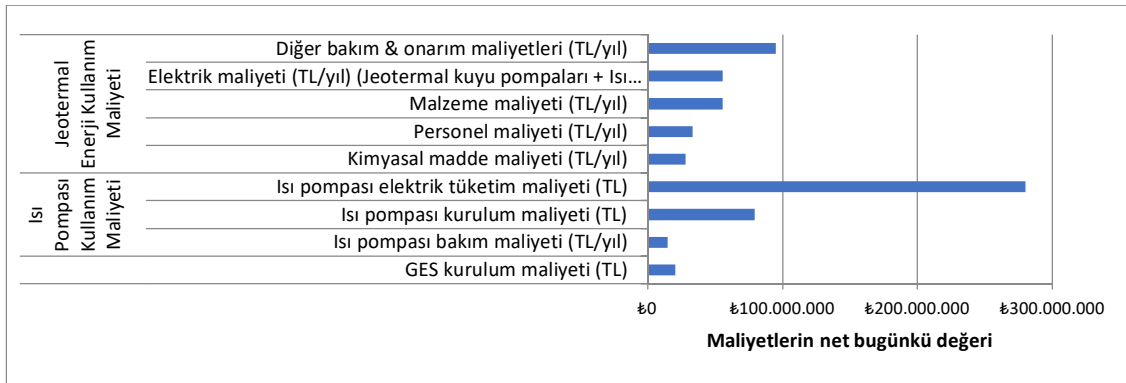


Şekil 4.35: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %0).

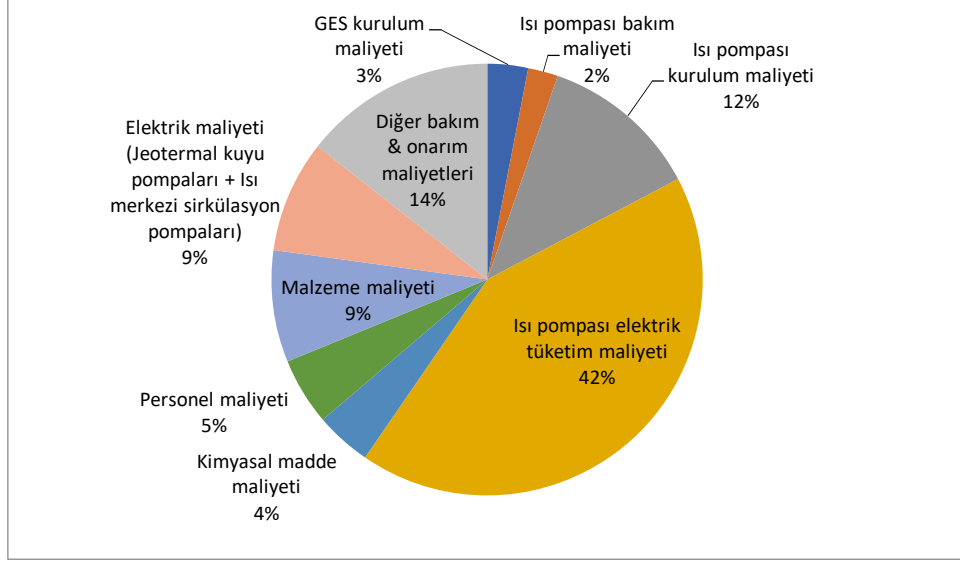


Şekil 4.36: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %0).

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan ısı pompası ısıtma destek sistemine (2.572 konut) %60 GES desteği sağlanması durumunda ise, 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %42 ile ısı pompası elektrik tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %14 ile diğer bakım&onarım maliyeti ve %12 ile ısı pompası kurulum maliyeti izlemektedir (Şekil 4.37).



Şekil 4.37: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %60).

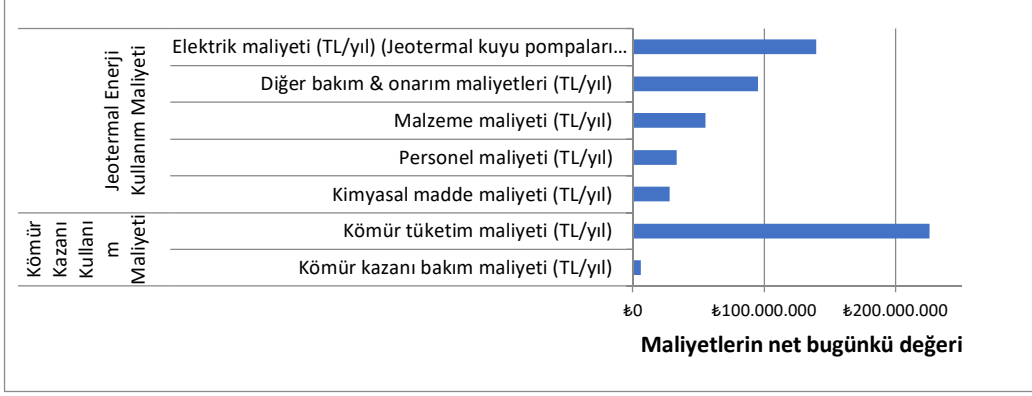


Şekil 4.38: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %60).

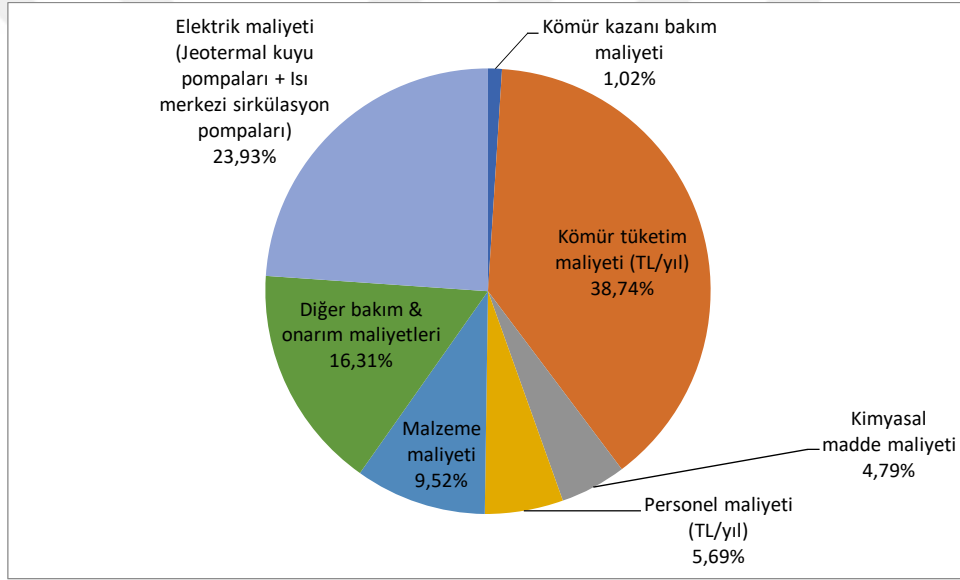
Tablo 4.33: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip ısı pompası ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması.

| | GES kurulum maliyeti (TL) | Elektrik maliyeti (TL/yıl) (Jeotermal kuyu pompaları + Isı merkezi sirkülasyon pompaları) | Diğer maliyetlerin NBD'si (TL) | Tüm maliyetlerin NBD'si (TL) | Birim ısıtma maliyeti (TL/kWh) |
|---------|---------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| GES %0 | --- | 139.533.940 | 585.734.609 | 725.268.549 | 2,88 |
| GES %60 | 20.288.581 | 55.813.576 | 585.734.609 | 661.836.766 | 2,63 |

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %38,74 ile kömür tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %23,93 ile elektrik maliyeti ve %16,31 ile diğer bakım&onarım maliyeti izlemektedir (Şekil 4.39).

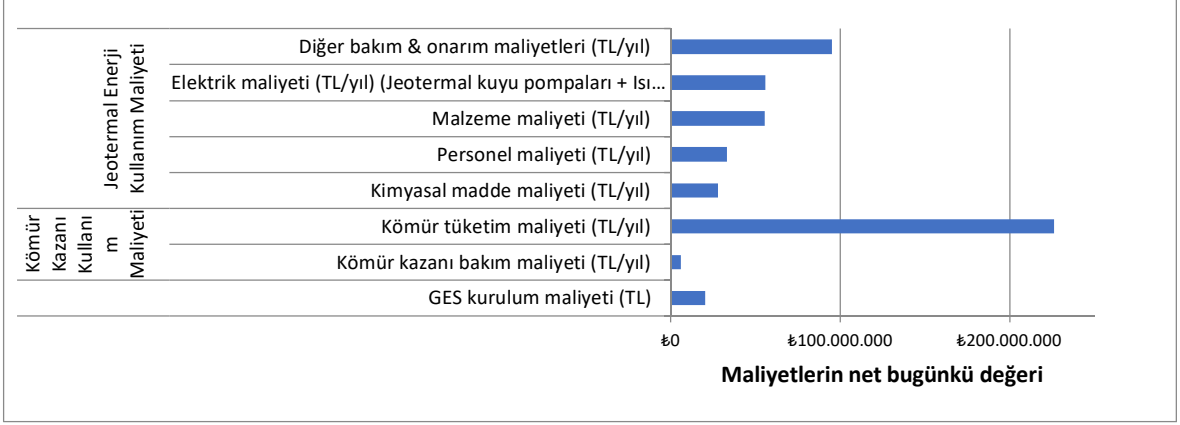


Şekil 4.39: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %0).

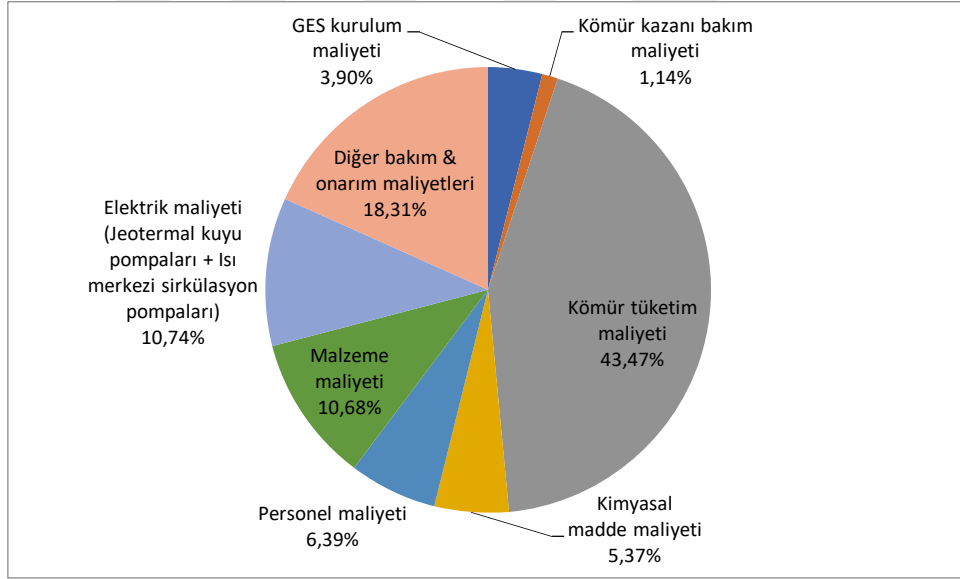


Şekil 4.40: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %0).

En düşük birim ısıtma maliyetine sahip olan kömür kazanlı ısıtma destek sistemine (2.572 konut) %60 GES desteği sağlanması durumunda ise, 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %43,47 ile kömür tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %18,31 ile diğer bakım&onarım maliyeti ve %10,74 ile elektrik tüketim maliyeti izlemektedir (Şekil 4.41).



Şekil 4.41: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %60).

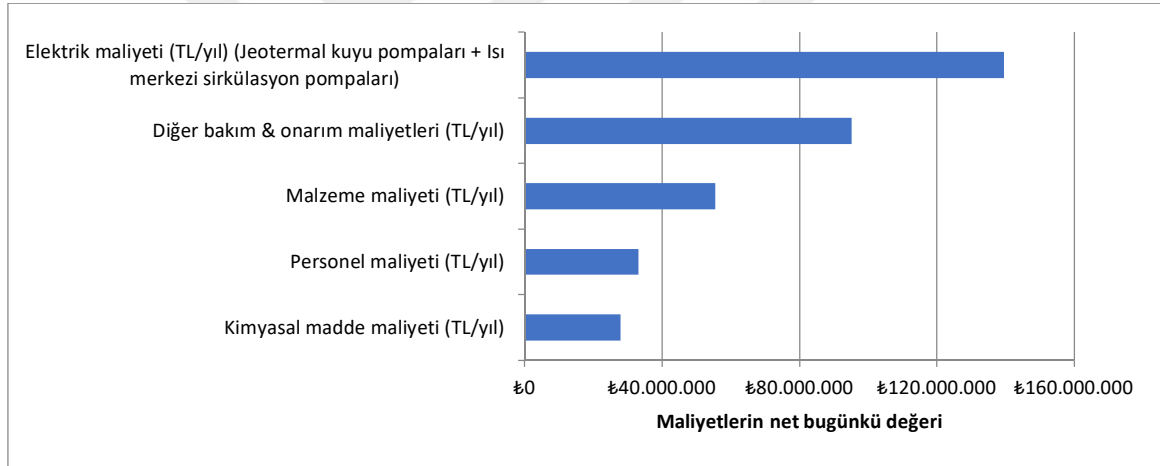


Şekil 4.42: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %60).

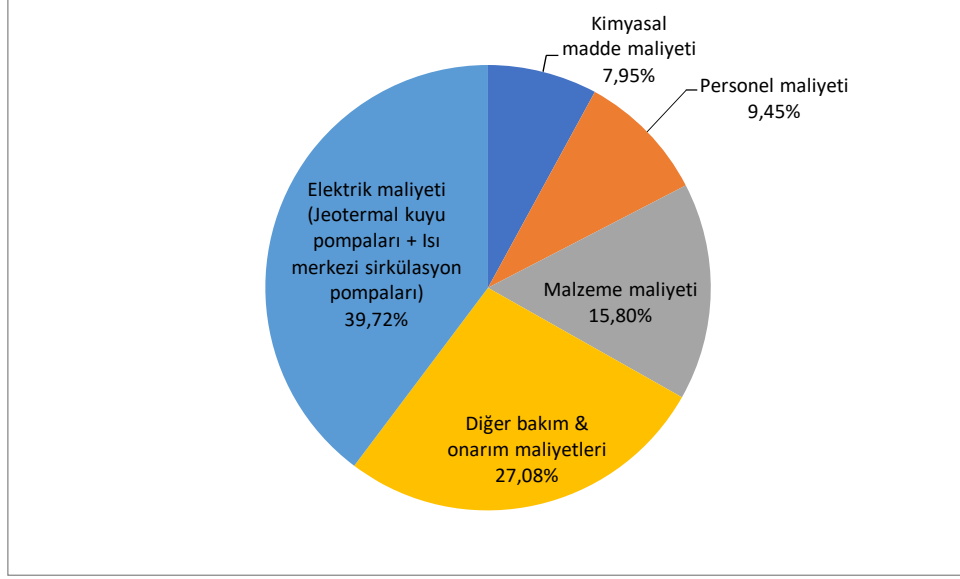
Tablo 4.34: En düşük birim ısıtma maliyetine sahip kömür kazanlı ısıtma destek sistemi için (2.572 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırması.

| | GES kurulum maliyeti (TL) | Elektrik maliyeti (TL/yıl) (Jeotermal kuyu pompaları + Isı merkezi sirkülasyon pompaları) | Diğer maliyetlerin NBD'si (TL) | Tüm maliyetlerin NBD'si (TL) | Birim ısıtma maliyeti (TL/kWh) |
|---------|---------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| GES %0 | --- | 139.533.940 | 443.620.710 | 583.154.650 | 2,32 |
| GES %60 | 20.288.581 | 55.813.576 | 443.620.710 | 519.722.867 | 2,15 |

Hiçbir ısıtma destek sistemi olmadan yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %39,72 ile elektrik tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %27,08 ile diğer bakım&onarım maliyeti ve %15,80 ile malzeme maliyeti izlemektedir (Şekil 4.43).

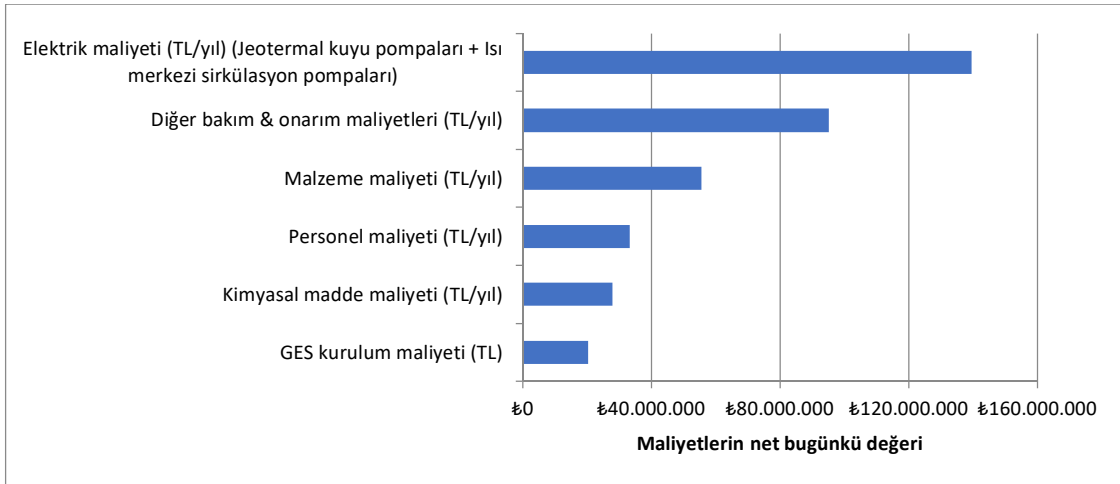


Şekil 4.43: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %0).

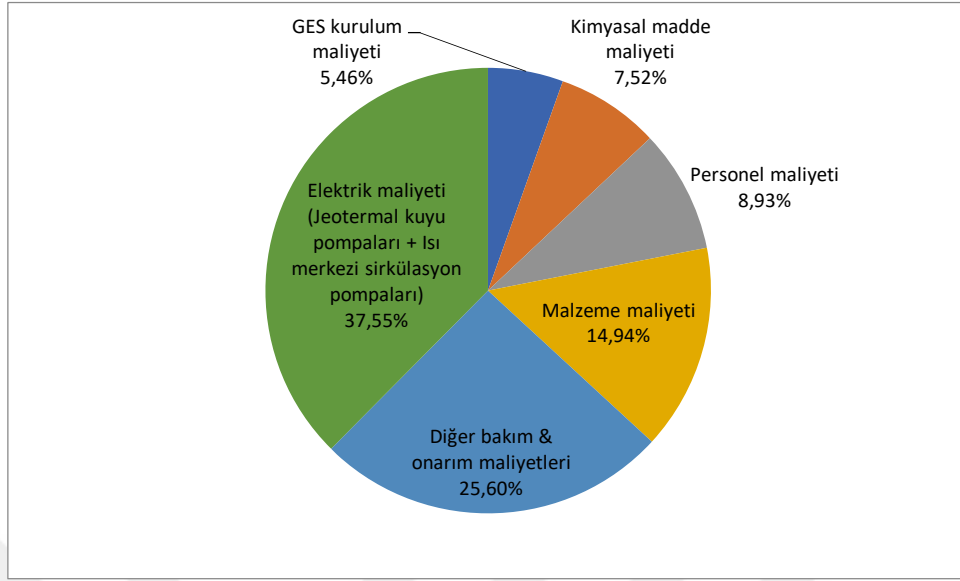


Şekil 4.44: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %0).

Hiçbir ısıtma destek sistemi olmadan yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) %60 GES desteği sağlanması halinde, 20 yıllık maliyetlerin bugünkü değerinin en büyük bölümünü %37,55 ile elektrik tüketim maliyeti oluşturmaktadır. Bu değeri sırasıyla %25,60 ile diğer bakım&onarım maliyeti ve %14,94 ile malzeme maliyeti izlemektedir (Şekil 4.45).



Şekil 4.45: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değerleri (GES %60).



Şekil 4.46: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değerinin dağılımı (GES %60).

Tablo 4.35: Yalnız jeotermal enerjinin kullanıldığı durum için (774 konut) maliyetlerin bugünkü değerlerinin karşılaştırılması.

| | GES kurulum maliyeti (TL) | Elektrik maliyeti (TL/yıl) (Jeotermal kuyu pompaları + Isı merkezi sirkülasyon pompaları) | Diğer maliyetlerin NBD'si (TL) | Tüm maliyetlerin NBD'si (TL) | Birim ısıtma maliyeti (TL/kWh) |
|---------|---------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| GES %0 | --- | 139.533.940 | 211.757.480 | 351.291.420 | 4,64 |
| GES %60 | 20.288.581 | 55.813.576 | 295.477.844 | 371.580.000 | 3,80 |

5. GENEL SONUÇLAR

Bigadiç JBIS, 3000 konut ısıtmak üzere tasarlanan ve 2004-2005 ısıtma sezonunda 300 abone ile işletilmeye başlanan ve günümüzde 1.050 aboneye ısıtma hizmet sunan ülkemizdeki yirmiye yakın jeotermal bölgesel ısıtma sisteminden biridir. Sisteme ek ısıtma desteği, farklı dönemlerde farklı pik güç üniteleriyle sağlanmıştır. Bu amaçla 2012 yılının Mart ayına kadar etkin bir şekilde kullanılan karşı basınçlı sıcak su kazanlarında 2006 yılına kadar LNG, 2006-2012 yılları arasında ise kalorifer yakıtı kullanılmıştır. Gerek LNG gerekse kalorifer yakıtı maliyetlerinin yüksek olması, ayrıca abone sayısının sürekli artması işletme maliyetlerini önemli ölçüde artırmış ve sisteme ısıtma desteği, Mart-2012'den sonra yeni kurulan kömür kazan sistemiyle gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Üniteler hareketli ızgaralı yakma sistemlerine sahip olup, kapasiteleri 3.000.000 ve 4.000.000 kcal/h'lik ön ocak ve kazan bölümlerinden oluşmaktadır. 10-18 mm tane boyutlu linyit yakılan kazan sistemiyle günümüzde halen Bigadiç JBIS'ye ek ısıtma desteği sağlanmaktadır.

Jeotermal ısıtma sistemlerinde kuyu sondaj çalışmaları, yalnız sistem kurulurken değil, kuyuların zamanla işlevselliğini kaybedebilmesi nedeniyle belirli periyotlarla tekrarlanması gereken bir işletme maliyeti olabilmektedir. Sondaj maliyetleri sistemlerin yaşam ömürleri boyunca ortaya çıkan giderlerin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Diğer taraftan, jeotermal su çıkarmak ve bu sudan elde edilen ısıyı ısıtma yapılan mahallere dağıtmak gibi temel faaliyetler için jeotermal kuyu ve sirkülasyon pompaları sürekli olarak çalışır. Bu nedenle, jeotermal bölgesel ısıtma sistemleri önemli bir elektrik tüketicisi konumundadır. Bazı jeotermal sular içerdikleri mineraller nedeniyle borularda kabuklaşma ve korozyona neden olabilmektedir. Bu nedenle jeotermal akışkana katılan kabuklaşma önleyici kimyasallar, işletme maliyetleri açısından dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli gider olabilmektedir.

Bigadiç JBIS de yukarıda sayılan önemli işletme maliyetlerinin etkisi altında faaliyetlerini sürdürmektedir. Bu giderler, ısıtılan konut sayısı da dikkate alındığında, birim ısınma maliyetlerini önemli ölçüde artırmıştır. Sistemde ek ısıtma için kömür kazanı kullanımının sürdürülebilir yaşam adına olumsuz bir tablo oluşturması, ilçede kömüre göre daha temiz bir yakıt olan doğal gaz kullanımına geçilmesi ve sistemden ortalama 40°C sıcaklıkta deşarj edilen jeotermal akışkanın ısı pompası gibi verimli sistemlerde değerlendirilebilme

potansiyelinin bulunması, daha temiz ve daha ucuz ısıtma faaliyetlerinin araştırılması adına bu çalışmanın motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu çalışmada, Bigadiç JBIS'nin mevcut çalışma koşulları ile sistemin farklı tür ve kapasitelerde ek ısıtma sistemleriyle desteklenmesi durumları için birim ısıtma enerjisi maliyet analizi yapılmıştır. Çalışmada farklı ısı üretim teknolojilerinin karşılaştırılmasına olanak tanıyan ve ekonomik olarak optimum ısıtma projelerini belirlemek için kullanılan Seviyelendirilmiş Isı Maliyeti (LCOH) Analizi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen 20 yıllık LCOH analizi yardımıyla, mevcut kömür kazanına alternatif olarak ya da mevcut kömür kazanı ile birlikte sisteme dahil edilmesi düşünülen yeni doğal gaz kazanı ve yeni ısı pompası sistemlerinin optimum kapasiteleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, 2021 yılının Ocak ayında Bigadiç JBIS'nin elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla faaliyete geçen ve bu doğrultuda jeotermal enerji üretimi için ihtiyaç duyulan elektrik enerjisinin yılda ortalama %60'ını karşılayan 1.171.800 Wp kapasiteli Bigadiç GES'nin, birim ısıtma maliyetleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Herhangi bir ek ısıtma sistemi kullanılmaması durumunda, Bigadiç JBIS'de üretilen mevcut jeotermal enerji ile 774 konut eşdeğerlik ısıtma gerçekleştirilebilmektedir. İlave konut sayıları için ek ısıtmaya ihtiyaç duyulmaktadır.
- Mevcut jeotermal enerjinin, sistemde hali hazırda kullanılan kömür kazanı ile 2.572 konut eşdeğerlik ısıtma yapılabilecek şekilde desteklenmesi, birim ısıtma maliyetini en düşük yapan en ekonomik alternatiftir.
- Bigadiç JBIS'den deşarj edilen atık jeotermal akışkanın mevcut debi ve sıcaklığı göz önüne alındığında, bu enerjiden büyük çaplı ısı pompası sistemlerinde yararlanılması mümkün olmamaktadır. Ancak sistemde sürekli yeni sondaj çalışmalarının yapılıyor olması, ilerleyen yıllarda daha büyük jeotermal kaynakların ortaya çıkma potansiyeli, büyük kapasiteki ısı pompalarının da bu çalışmaya dahil edilmesini sağlamıştır. Bu çalışmanın sonucunda ise mevcut jeotermal enerjinin, 2.572 konut eşdeğerlik ısıtma yapılabilecek şekilde büyük kapasiteli bir ısı pompası sistemiyle desteklenmesi durumunun, birim ısıtma maliyeti bakımından en ekonomik ikinci alternatif olduğu görülmüştür.
- Bigadiç JBIS'nin mevcut kömür kazanı yerine yeni kurulacak bir doğal gaz kazanı ile desteklenmesi durumunda, oluşacak jeotermal + doğal gaz kazanı ikili ısıtma sisteminin, 1.045 konut eşdeğerlik ısıtma yapmasının, bu alternatif ısıtma şekli için en ekonomik çözüm olduğu görülmüştür.

- Çalışmada, mevcut jeotermal enerjiye, ısıtma sezonu boyunca nadir olarak görülen düşük dış ortam sıcaklıklarında mevcut kömür kazanı ile; diğer dış ortam sıcaklıklarında ise doğal gaz kazanı veya ısı pompası sistemiyle ısıtma desteği sağlanması durumunda ortaya çıkacak birim ısıtma maliyetleri de hesaplanmıştır. Buna göre birim ısıtma maliyetini en düşük yapan doğal gaz-kömür-jeotermal hibrit enerji üretim alternatifinin, 1.562 konutun +9°C'ye kadar olan dış hava sıcaklığında jeotermal enerji + doğal gaz kazanı; daha düşük sıcaklıklarda ise jeotermal enerji + mevcut kömür kazanı ile ısıtılması durumunda gerçekleştiği görülmüştür. Birim ısıtma maliyetini en düşük yapan ısı pompası-kömür-jeotermal hibrit enerji üretim alternatifinin ise, 2.572 konutun +9°C'ye kadar olan dış hava sıcaklığında jeotermal enerji + ısı pompası; daha düşük sıcaklıklarda ise jeotermal enerji + mevcut kömür kazanı ile ısıtılması durumunda gerçekleştiği görülmüştür.
- Yeni ısıtma destek sistemleriyle, mevcut abone sayısı yerine daha fazla aboneye ısıtma hizmeti verilmesinin birim ısıtma enerjisi maliyetlerini %14-%50 arasında değişen oranlarda düşürdüğü görülmüştür.
- Bigadiç GES'nin, alternatif senaryolar için birim ısıtma maliyetlerini %7 ile %18 arasında değişen oranlarda düşürdüğü görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- [1] Semtrio Blog, “Yenilenebilir Enerji Nedir [online]”, (25 Mayıs 2021), www.semtrio.com/blog/yenilenebilir-enerji-nedir, (2021).
- [2] Vikipedi Özgür Ansiklopedi, “Karbon Ayak İzi [online]”, (27 Mayıs 2021), www.tr.wikipedia.org, (2021).
- [3] Entegre Proje Yönetim, “Karbon Ayak İzini Oluşturan Faaliyetler [online]”, (10 Nisan 2021), www.epy.com.tr, (2021).
- [4] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye’nin Kurulu Güçleri [online]”, (26 Ağustos 2022), www.enerji.gov.tr, (2022).
- [5] A., Zaim. H., Çavşi. (2018), Türkiye’deki Jeotermal Enerji Santrallerinin Durumu.
- [6] M., Kozak. (2016), Konut Isıtmacılığın da Jeotermal Yenilenebilir Enerji Kaynağının Kullanılmasının Araştırılması
- [7] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, “ Enerji Haritaları [online]”, (5 Ocak 2022), www.mta.gov.tr, (2022).
- [8] Jeoloji Mühendisleri Odası, “Neden Jeotermal Enerji” Türkiye İçin Önemi, Hedefler ve Beklentiler [online]”, (18 Mayıs 2022), www.jmo.org.tr, (2022).
- [9] H., Erkul. (2012), Jeotermal Enerjinin Ekonomik Katkıları ve Çevresel Etkileri: Denizli-Kızıldere Jeotermal Örneği.
- [10] Burcu K. (2013), Balıkesir İlinde Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Ekonomik Etkileri
- [11] Arat, H., & Arslan, O. (2017). Exergoeconomic analysis of district heating system boosted by the geothermal heat pump. *Energy*, 119, 1159-1170.
- [12] Jensen, J. K., Ommen, T., Markussen, W. B., & Elmegaard, B. (2017). Design of Serially connected district heating heat pumps utilising a geothermal heat source. *Energy*, 137, 865-877.
- [13] Kljajić, M. V., Anđelković, A. S., Hasik, V., Munćan, V. M., & Bilec, M. (2020). Shallo geothermal energy integration in district heating system: An example from Serbia. *Renewable Energy*, 147, 2791-2800.
- [14] Hałaj, E., Kotyza, J., Hajto, M., Pełka, G., Luboń, W., & Jastrzębski, P. (2021). Upgrading a District Heating System by Means of the Integration of Modular Heat Pumps, Geothermal Waters, and PVs for Resilient and Sustainable Urban Energy. *Energies*, 14(9), 2347.

- [15] Lubis, L. I., Kanoglu, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2011). Thermodynamic analysis of a hybrid geothermal heat pump system. *Geothermics*, 40(3), 233-238.
- [16] Chahartaghi, M., Kalami, M., Ahmadi, M. H., Kumar, R., & Jilte, R. (2019). Energy and exergy analyses and thermo-economic optimization of geothermal heat pump for domestic water heating. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(2), 108-121.
- [17] Farzanehkhameh, P., Soltani, M., Kashkooli, F. M., & Ziabasharhagh, M. (2020). Optimization and energy-economic assessment of a geothermal heat pump system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110282.
- [18] Zhang, X. (2021). Numerical study of geothermal district heating from a ground heat exchanger coupled with a heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116335.
- [19] Akhmetzyanov, A., Bobylev, N., & Wende, W. (2021, March). Geothermal energy in urban planning. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 703, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- [20] Hepbasli, A. (2005). Thermodynamic analysis of a ground-source heat pump system for district heating. *International journal of energy research*, 29(7), 671-687.
- [21] Erdemir, D. (2020). Development and assessment of geothermal-based underground pumped hydroenergy storage system integrated with organic Rankine cycle and district heating. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10894-10907.
- [22] Azaza, M., Eriksson, D., & Wallin, F. (2020). A study on the viability of an on-site combined heat-and power supply system with and without electricity storage for office building. *Energy Conversion and Management*, 213, 112807.
- [23] Sun, F., Zhao, X., Chen, X., Fu, L., & Liu, L. (2019). New configurations of district heating system based on natural gas and deep geothermal energy for higher energy efficiency in northern China. *Applied Thermal Engineering*, 151, 439-450.
- [24] Sun, F., Hao, B., Fu, L., Wu, H., Xie, Y., & Wu, H. (2021). New medium-low temperature hydrothermal geothermal district heating system based on distributed electric compression heat pumps and a centralized absorption heat transformer. *Energy*, 120974.
- [25] Arat, H., & Arslan, O. (2017). Optimization of district heating system aided by geothermal heat pump: A novel multistage with multilevel ANN modelling. *Applied Thermal Engineering*, 111, 608-623.

- [26] Yamankaradeniz, N. (2016). Thermodynamic performance assessments of a district heating system with geothermal by using advanced exergy analysis. *Renewable Energy*, 85, 965-972.
- [27] Tissen, C., Menberg, K., Benz, S. A., Bayer, P., Steiner, C., Götzl, G., & Blum, P. (2021). Identifying key locations for shallow geothermal use in Vienna. *Renewable Energy*, 167, 1-19.
- [28] Boesten, S., Ivens, W., Dekker, S. C., & Eijndems, H. (2019). 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply. *Advances in Geosciences*, 49, 129-136.
- [29] Ozgener, L., Hepbasli, A., & Dincer, I. (2004). Thermo-mechanical exergy analysis of Balcova geothermal district heating system in Izmir, Turkey. *J. Energy Resour. Technol.*, 126(4), 293-301.
- [30] Qian, M., Yan, D., An, J., Hong, T., & Spitler, J. D. (2020, January). Evaluation of thermal imbalance of ground source heat pump systems in residential buildings in China. In *Building Simulation* (pp. 1-14). Tsinghua University Press.
- [31] Simsek, S. (2017). The Turkish Geothermal Experience. In *Perspectives for Geothermal Energy in Europe* (pp. 157-186).
- [32] Zhang, Y., Zheng, J., Liu, A., Zhang, Q., Shao, J., & Cui, Y. (2020). Numerical Simulation of Shallow Geothermal Field in Operating of a Ground Source Heat Pump System—A Case Study in Nan Cha Village, Ping Gu District, Beijing. *Water*, 12(10), 2938.
- [33] Xu, T., Yan, J., Wang, H., Wang, X. L., Zhu, T., & Wang, H. Y. (2019, October). Construction and analysis of a district heating/cooling network system based on thermal bus. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 657, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.
- [34] Zeng, Y., Zhou, W., & LaMoreaux, J. (2017). Single-well circulation systems for geothermal energy transfer. *Environmental Earth Sciences*, 76(7), 296.
- [35] Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied energy*, 101, 341-348.
- [36] Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- [37] Morrone, B., Coppola, G., & Raucci, V. (2014). Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates. *Energy conversion and management*, 88, 189-198.

- [38] Kara, Y.A. “Düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynakların ısı pompası yardımıyla bina ısıtmada kullanımı”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, (1999)
- [39] Kalıncı Y. “Dikili’de jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Enerji Anabilim Dalı, İzmir, (2006)
- [40] Kula, Ö. “Jeotermal ısıtma sistemlerinin ekserji analizleri” Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2008)
- [41] Aslan A. “Gönen jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin enerji ve termoekonomik verimliliğinin incelenmesi” Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (2010)
- [42] Li, Y., Rezgui, Y., Zhu, H., (2017). District heating and cooling optimization and enhancement – Towards integration of renewables, storage and smart grid. Volume 72, May 2017, Pages 281-294
- [43] Zhang, R., Wang, D., Liu, Y., Chen, Y., Fan, J., Song, C., Wang, Y., (2021). Economic optimization of auxiliary heat source for centralized solar district heating system in Tibetan Plateau, China. Volume 243
- [44] Bach, B., Werling, J., Ommen, T., Münster, M., Morales, M., J., Elmegaard, B., (2016). Integration of large-scale heat pumps in the district heating systems of Greater Copenhagen. Volume 107
- [45] Rama, M., Wahlroos, M., (2018). Introduction of new decentralised renewable heat supply in an existing district heating system. Volume 154
- [46] Vesterlund, M., Toffolo, A., Dahl, J., (2017). Optimization of multi-source complex district heating network, a case study. Volume 126
- [47] Jiang, X., S., Jing, Z., X., Li, Y., Z., Wu, Q., H., Tang, W., H., (2014). Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system. Volume 64
- [48] Olsthoorn, D., Haghghat, F., Mirzaei, P., A., (2016). Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization. Volume 136
- [49] Arslan, O., Arslan, A., E., Boukelia, T., E., (2023). Modelling and optimization of domestic thermal energy storage based heat pump system for geothermal district heating. Volume 282.

- [50] Carotenuto, A., Figaj, R., D., Vanoli, L., (2017). A novel solar-geothermal district heating, cooling and domestic hot water system: Dynamic simulation and energy-economic analysis. Volume 141
- [51] Pratiwi, S., A., Trutnevyte E., (2022). Decision paths to reduce costs and increase economic impact of geothermal district heating in Geneva, Switzerland. Volume 322
- [52] Akyol, T., “Bigadiç- Balıkesir Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi” Doktora tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir. (2016)
- [53] Bogoslavskaya, O.; Stanytsina, V.; Artemchuk, V.; Garmata, O.; Lavrinenko, V. Comparative Efficiency Assessment of Using Biofuels in Heat Supply Systems by Levelized Cost of Heat into Account Environmental Taxes. *Stud. Syst. Decis. Control* 2021, 346, 167–185. [Google Scholar] [CrossRef]
- [54] Ruffino, E.; Piga, B.; Casasso, A.; Sethi, R. Heat pumps, wood biomass and fossil fuel solutions in the renovation of buildings: A techno-economic analysis applied to piedmont region (NW Italy). *Energies* 2022, 15, 2375.
- [55] Stanytsina, V.; Artemchuk, V.; Bogoslavskaya, O.; Zinovieva, I.; Ridei, N. The Influence of Environmental Tax Rates on the Levelized Cost of Heat on the Example of Organic and Biofuels Boilers in Ukraine. *E3S Web Conf.* 2021, 280, 09012.
- [56] Gerssen-Gondelach, S.J.; Saygin, D.; Wicke, B.; Patel, M.K.; Faaij, A.P.C. Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 40, 964–998.
- [57] Li, H.; Song, J.; Sun, Q.; Wallin, F.; Zhang, Q. A Dynamic Price Model Based on Levelized Cost for District Heating. *Energy Ecol. Environ.* 2019, 4, 15–25.
- [58] Bogoslavskaya, O.Y.; Stanytsina, V.V.; Artemchuk, V.O.; Maevsky, O.V.; Garmata, O.M.; Lavrinenko, V.M.; Zinovieva, I.S. The Impact of Fuel Delivery Logistics on the Cost of Thermal Energy on the Example of Biofuels Boilers in Ukraine. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2022, 1049, 012018.
- [59] Stanytsina, V., Artemchuk, V., Bogoslavskaya, O., Zaporozhets, A., Kalinichenko, A., Stebila, J., Suszanowicz, D. (2022). Fossil Fuel and Biofuel Boilers in Ukraine: Trends of Changes in Levelized Cost of Heat. *Energies*, 15(19), 7215.
- [60] Montgomery, D. C., *Design and analysis of experiments*, 8th ed. John Wiley & Sons, Inc., NJ, USA, (2013).