

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



GÜRE JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA
SİSTEMİNİN EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ

MUSA DEVECİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL (Tez Danışmanı)**
Doç. Dr. Asiye ASLAN
Doç. Dr. Ersin AKYÜZ

BALIKESİR, HAZİRAN - 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Güre Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin Eksergoekonomik 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.

Musa DEVECİ

ÖZET

**GÜRE JEOTERMAL BÖLGESEL ISITMA
SİSTEMİNİN EKSERGOEKONOMİK ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUSA DEVECİ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ TUĞRUL AKYOL)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2025

Jeotermal enerji, küresel ölçekte öz kaynak kullanımına olanak sağlayan yenilenebilir bir enerji kaynağı olması sebebiyle stratejik öneme sahiptir. Düşük karbon salınımı, maliyet etkinliği, çoklu amaçlara yönelik kullanıma olanak sağlaması, dış ortam koşullarından bağımsız olarak yıl boyunca kesintisiz olarak enerji kaynağı oluşturması gibi özellikleri jeotermal enerjiyi diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasında farklı bir konuma taşımaktadır.

Bu çalışmada Balıkesir'in Edremit İlçesi Güre Mahallesi'nde bulunan Güre Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin (JBIS) 28 Ocak 2023 tarihinde yapılan gerçek saha ölçüm verilerine dayalı olarak enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %72,61 ve %64,11 olarak elde edilmiştir. Bu değerler hâlâ iyileştirme potansiyeline sahip olan sistemin, enerjik ve ekserjik açıdan oldukça verimli çalıştığını göstermektedir.

Eksergoekonomik analizde, ekserjiye bağlı parametreler ile sistem akış şeması üzerinde belirlenen her bir nokta ve bileşene ait akış maliyetleri tayin edilerek sistemin eksergoekonomik açıdan incelenmesine olanak sağlayan spesifik ekserji maliyetlendirme (SPECO) yönetimi kullanılmıştır. Sistemde yer alan 1 ve 4 numaralı pompaların sırasıyla 22,34 \$/h ve 27,07 \$/h değerlerindeki yüksek ekserji yıkım maliyetleri ($\hat{C}_{D,k}$) nedeniyle termodinamik açıdan verimsiz çalıştıkları ve buna bağlı olarak operasyonel maliyetlerde ilave artışlara neden oldukları belirlenmiştir. Ayrıca 3 ve 4 numaralı eşanjörlerin de sırasıyla 3,25 \$/h ve 3,68 \$/h değerlerindeki yüksek sermaye ve işletme-bakım giderleri (\hat{Z}_k) sebebiyle sistemin genel maliyet etkinliğini düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle öncelikli olarak belirtilen pompaların termodinamik olarak daha verimli çalışmasına yönelik yatırımlar ve operasyonel iyileştirmeler yapılması gerektiği, ardından eşanjörlerin sermaye yatırımı ve bakım maliyetlerini düşürmeye yönelik stratejiler uygulanmasının sistemin toplam maliyet etkinliğini daha yüksek seviyelere çıkarılabileceği sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Enerji, ekserji, eksergoekonomik analiz, Güre, jeotermal enerji, jeotermal bölgesel ısıtma sistemi

ABSTRACT

**EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF THE
GÜRE GEOTHERMAL DISTRICT HEATING SYSTEM
MSC THESIS
MUSA DEVECİ
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. TUĞRUL AKYOL)

BALIKESİR, JUNE - 2025

Geothermal energy holds strategic importance as a renewable energy source that enables the utilization of domestic resources on a global scale. Its low carbon emissions, cost effectiveness, multi-purpose usability and ability to provide an uninterrupted energy supply throughout the year regardless of external conditions set geothermal energy apart from other renewable energy sources.

In this study, energy, exergy, and exergoeconomic analyses were performed on the Güre Geothermal District Heating System (GDHS), located in the Güre neighborhood of Edremit, Balıkesir. The analyses were based on actual field measurement data collected on 28.01.2023. The energy and exergy efficiencies of the system were determined to be 72,61% and 64,11%, respectively. These values indicate that the system, while still possessing potential for improvement, operates with high energetic and exergetic efficiency.

For the exergoeconomic analysis, the specific exergy costing (SPECOC) method was employed, which allows for an exergoeconomic investigation of the system by determining the flow costs for each point and component defined on the system's flow diagram. It was determined that pumps 1 and 4 operate thermodynamically inefficiently due to their high exergy destruction costs ($\dot{C}_{D,k}$) of 22,34 \$/h and 27,07 \$/h, respectively, leading to additional increases in operational costs. Furthermore, heat exchangers 3 and 4 were found to reduce the overall cost-effectiveness of the system due to their high capital and operation-maintenance costs (\dot{Z}_k) of 3,25 \$/h and 3,68 \$/h, respectively. Therefore, it was concluded that investments and operational improvements aimed at enhancing the thermodynamic efficiency of the specified pumps should be prioritized. Subsequently, implementing strategies to reduce the capital investment and maintenance costs of the heat exchangers could elevate the system's total cost-effectiveness to higher levels.

KEYWORDS: Energy, exergy, exergoeconomic analysis, Güre, geothermal energy, geothermal district heating system

Science Code / Codes : 91441, 91408

Page Number : 85

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1 Güre Mahallesi'nin Tanıtımı	23
3.2. Güre Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi	28
3.2.1 Sistemin Şematik Yapısı	32
3.2.2 Termodinamik Durum Noktalarına Ait Operasyonel Veriler.....	35
3.2.3 Güre Jeotermal Sahası.....	38
3.2.4 Isı Merkezi.....	43
3.2.5 Boru Hatları.....	47
3.3 Analizde Kullanılan Veriler ve Temel Varsayımlar.....	48
3.4 Maliyet Hesaplamaları	50
3.5 Kütle, Enerji ve Ekserji Denge Eşitlikleri.....	53
3.6 SPECO Denklem Eşitlikleri	57
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	63
4.1 Enerji Analizi	63
4.2 Ekserji Analizi.....	64
4.3 Eksergoekonomik Analiz	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
6. KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: 2024 yılı yenilenebilir küresel güç kapasite verileri.....	2
Şekil 1.2: 2021 yılı küresel enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin sektörel payları	2
Şekil 1.3: 2024 yılında Türkiye’de üretilen elektriğin kaynaklarının yüzdelik dağılımı	3
Şekil 1.4: 2025 yılında Türkiye’de üretilen elektriğin kaynaklarının yüzdelik dağılımı	4
Şekil 1.5: Ana neotektonik hatlar ve Türkiye’nin sıcak kaynak dağılımı	5
Şekil 1.6: Türkiye’de bulunan jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası.....	7
Şekil 1.7: 2022 yılında jeotermal doğrudan kullanım uygulamalarının mevcut kapasiteleri	9
Şekil 1.8: Türkiye’de jeotermal kentsel ısıtma sistemi bulunan şehirler	10
Şekil 3.1: Balıkesir’in konumu	23
Şekil 3.2: Güre’nin konumu	24
Şekil 3.3: 2000-2023 yılları arası ortalama sıcaklık ve ortalama minimum sıcaklıklar.....	27
Şekil 3.4: Güre JBIS ısı merkezi	29
Şekil 3.5: Güre JBIS abone ve hat projesi.....	30
Şekil 3.6: Güre JBIS üretim kuyuları ile desteklenen turistik tesisler	31
Şekil 3.7: Güre JBIS ısıtma sezonu çalışma şeması.....	33
Şekil 3.8: Güre JBIS yaz sezonu çalışma şeması	34
Şekil 3.9: Ultrasonik debimetre ile hat tesisat debilerinin ölçümü	35
Şekil 3.10: Güre bölgesi jeoloji haritası	39
Şekil 3.11: IGJD-1 jeotermal kuyusu	40
Şekil 3.12: IGJ-2 jeotermal kuyusu	41
Şekil 3.13: IGJ-3 jeotermal kuyusu	42
Şekil 3.14: IGJ-4 jeotermal kuyusu	43
Şekil 3.15: Güre JBIS ısı merkezi planı	44
Şekil 3.16: Isı merkezinin içeriden görünümü	45
Şekil 3.17: Jeotermal depo	46
Şekil 3.18: Turistik jeotermal tesisleri destekleyen sirkülasyon pompaları.....	46
Şekil 3.19: 1 numaralı eşanjörün 2025 yılındaki maliyetinin 2023 yılına dönüştürülmesi	52
Şekil 3.20: 1 numaralı eşanjörün 2025 yılındaki maliyetinin 2002 yılına dönüştürülmesi	52
Şekil 4.1: Toplam enerji girişinin kullanım ve kayıp oranlarının grafiksel gösterimi	64
Şekil 4.2: Sisteme giren ekserjinin kullanım oranlarının grafiksel gösterimi	66

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1: Türkiye'nin 2025 yılı elektrik üretimi kurulu gücü	4
Tablo 1.2: Ülkelerin yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi sıralaması	5
Tablo 1.3: Türkiye'de illerin jeotermal kuyu kapasite değerleri	6
Tablo 1.4: Jeotermal elektrik üretimi kurulu güç kapasitesi ve büyüklüğünde ilk 5 ülke....	6
Tablo 1.5: Jeotermal uygulamalar için enerji gereksinimleri	7
Tablo 1.6: 2022 yılında Türkiye'de bulunan jeotermal enerjinin değerlendirilme durumu .	8
Tablo 1.7: Türkiye'nin ısıtma ve soğutma amaçlı jeotermal kapasitesi ile yıllık üretimi	8
Tablo 1.8: Türkiye'deki jeotermal merkezi ısıtma sistemi uygulamaları.....	10
Tablo 3.1: Güre'nin 2000-2023 yılları arası ısıtma derece saat değerleri	25
Tablo 3.2: 2000-2023 yılları arası aylık ortalama dış hava sıcaklıkları	26
Tablo 3.3: 2000-2023 yılları arası aylık minimum dış hava sıcaklık ortalamaları.....	26
Tablo 3.4: Güre jeotermal sahasındaki aktif jeotermal kuyuların kimyasal analizi	27
Tablo 3.5: Turistik tesislerin Güre JBIS kuyularından faydalanma durumları	32
Tablo 3.6: Ölçümlerde kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri	36
Tablo 3.7: Termodinamik durum noktalarına ait operasyonel veriler	38
Tablo 3.8: Eşanjör bilgileri ve 28.01.2023 tarihli operasyonel ölçüm verileri.....	44
Tablo 3.9: Konut ısıtma hatlarını destekleyen sirkülasyon pompalarının özellikleri.....	45
Tablo 3.10: Turistik jeotermal tesisleri destekleyen sirkülasyon pompalarının özellikleri	47
Tablo 3.11: Güre JBIS boru hattı bilgileri ve uzunlukları	48
Tablo 3.12: Ekonomik hesaplamalarda kullanılmak üzere kabul edilen değerler.....	49
Tablo 3.13: Mart-2025 dönemi için geçerli ekipman satın alma maliyetleri	50
Tablo 3.14: Mart-2025 dönemi için geçerli boru hattı satın alma maliyetleri.....	51
Tablo 3.15: Kurulumla ait sermaye yatırım maliyetleri tablosu.....	53
Tablo 4.1: Güre JBIS'nin enerji analizi sonuçları	63
Tablo 4.2: Güre JBIS ekserjik performans analiz değerleri	65
Tablo 4.3: Yakıt, ürün, yıkım ve kayıp ekserji değerleri.....	66
Tablo 4.4: Eşanjörler ve sistem bütününe ait ekserji verim değerleri	67
Tablo 4.5: Satın alma ve seviyelendirilmiş maliyet değerleri	70
Tablo 4.6: Ekserjik denge denklemleri ve yardımcı denklemler.....	72
Tablo 4.7: Maliyet akış hızları ve birim ekserji maliyetleri	73
Tablo 4.8: Eksergoekonomik değerlendirme kriterleri.....	74

SEMBOL LİSTESİ

c	: Birim ekserji maliyeti (\$/GJ)
\dot{C}	: Maliyet akış hızı (\$/h)
r_k	: Göreceli maliyet farkı (%)
f_k	: Eksergoekonomik faktör (%)
\dot{Z}	: Bileşene ait seviyelendirilmiş saatlik maliyet değeri (\$/h)
PEC	: Ekipmanın satın alma maliyeti (\$)
\dot{m}	: Kütlesel debi (kg/s)
\dot{E}_{ex}	: Ekserji akış hızı (kW)
\dot{Q}	: Isı akısı (kW)
\dot{W}	: İş (güç) (kW)
h	: Özgül entalpi (kJ/kg)
T	: Sıcaklık (K veya °C)
ψ	: Özgül ekserji (kJ/kg)
s	: Özgül entropi (kJ/kg.K)
η_{sistem}	: Sistemin enerji verimi
$\dot{C}A_{Sistem}$: Sistemin seviyelendirilmiş yıllık maliyeti (\$/h)
$\dot{P}W_{Sistem}$: Sistemin bugünkü değeri (\$)
CRF	: Sermaye geri ödeme faktörü
\dot{C}_{Sistem}	: Sistemin ilk yatırım maliyeti (\$)
i	: Reel faiz oranı
n	: Ekonomik ömür (yıl)
i_n	: Nominal faiz oranı
r	: Enflasyon oranı
\dot{S}_{Sistem}	: Sistemin hurda değeri (\$)
PWF	: Bugünkü değer faktörü
\dot{Z}_{Sistem}^{CI}	: Sistemin seviyelendirilmiş saatlik sermaye maliyeti (\$/h)
\dot{Z}_{Sistem}^{OM}	: Sistemin seviyelendirilmiş saatlik işletme ve bakım maliyeti (\$/h)
τ	: Sistemin yıllık çalışma saati (h/yıl)
P	: Basınç (kPa)
ε	: Ekserjik verim

KISALTMALAR

JBIS	: Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi
SPECO	: Spesifik Ekserji Maliyetlendirme (Specific Exergy Costing)
LCC	: Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost)
MOPSA	: Modifiye Edilmiş Üretken Yapı Analizi
EES	: Mühendislik Denklem Çözücüsü (Engineering Equation Solver)
EÜÇ	: Enerji Üretim Çevrimi
EDÇ	: Enerji Dağıtım Çevrimi
ETÇ	: Enerji Tüketim Çevrimi
ABD PPI	: Amerika Birleşik Devletleri Tüketici Fiyat Endeksi (Produce Price Index)
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
TCMB	: Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme ve Denetleme Kurumu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak eğitim-öğretim hayatım boyunca bilgi ve rehberlikleri ile yolumu aydınlatan tüm öğretmenlerime en içten şükranlarımı sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitimim süresince tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmam boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, sergilediği sabırlı ve anlayışlı tutumuyla bu tezin ortaya çıkmasında büyük emeği bulunan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL'a yadsınamaz katkıları sebebiyle teşekkür ederim.

Son olarak ise desteklerini her daim hissettiğim aileme, bu süreçte fikir ve yardımlarını esirgemeyen tüm sevdiklerime teşekkürü bir borç bilirim.

Balıkesir, 2025

Musa DEVECİ

1. GİRİŞ

Enerji, dünya üzerindeki tüm toplumlar için ekonomik, sosyal kalkınma ve yaşam kalitesindeki artışın sağlanması için gereklidir. Ancak hali hazırda dünya genelinde üretimi gerçekleştirilen ve tüketilen enerji miktarları göz önüne alındığında, mevcut fosil yakıt temelli enerji kaynaklarının gelecek projeksiyonlar için sürdürülebilirliği mümkün gözükmemektedir [1]. Nitekim 2024 yılı küresel enerji talebi, geçmiş 50 yıllık dönem ortalamasının üzerinde bir seyirle %2,2 oranında artış göstermiştir [2].

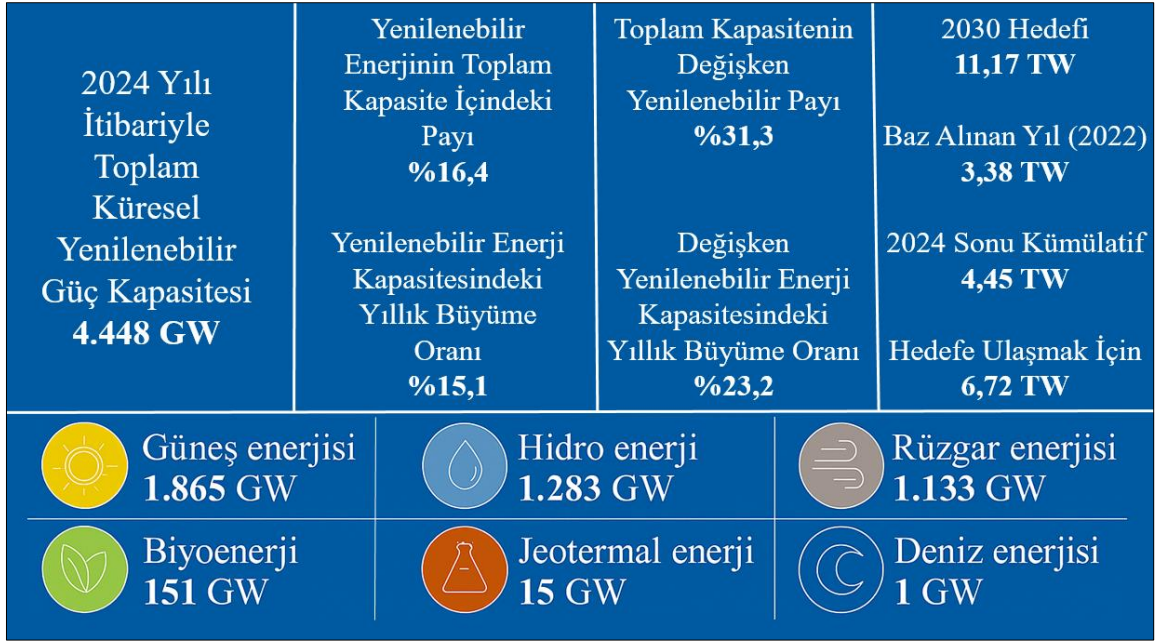
Türkiye gibi nüfusu artış eğiliminde olan ülkeler birincil enerji kaynağı olan fosil yakıtların yerini alacak sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmedikleri takdirde, fosil enerji kapasitelerinin nüfusunun ihtiyacını karşılayamayacak duruma gelmesi kaçınılmazdır [1].

Dünya üzerindeki yeni sanayileşme adımları ve yaşanan ekonomik gelişmeler, fosil yakıt tüketimindeki artışları da beraberinde getirmektedir. İklim değişikliği, sağlık sorunları ve hava kirliliği gibi olumsuz etkiler de bu duruma bağlı olarak gelişmektedir [3].

Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve karbon salınımlarının düşürülmesi, ülkelerin enerji alanındaki temel stratejileri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı büyük önem taşımaktadır [4].

Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyoenerji, deniz enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir kaynaklar, sağladıkları çevresel fayda ve ekonomik getiri potansiyeli ile geleceğe yönelik olarak gerçekleştirilen enerji planlamalarında kendilerine daha fazla yer bulmaktadır.

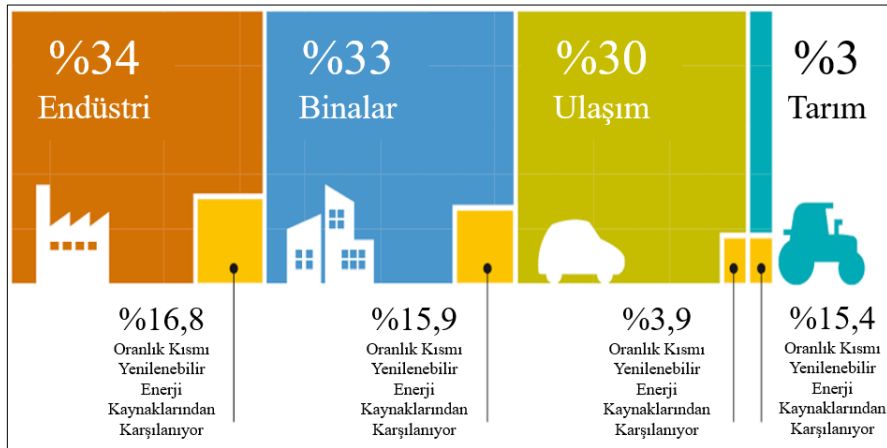
2024 yılı sonu itibariyle küresel yenilenebilir güç kapasitesi 4448 GW olarak gerçekleşmiştir. Güneş enerjisi 1865 GW'lık enerji kapasite değeri ile bir önceki yılda olduğu gibi küresel olarak yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük paya sahip kaynak olma özelliğini korumaktadır [5] (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: 2024 yılı yenilenebilir küresel güç kapasite verileri

Jeotermal güç kapasitesi ise küresel düzeyde 2024 yılında bir önceki yıl gerçekleşen kapasite artışına benzer şekilde 0,4 GW'lık bir artış göstermiştir. Bu artışın yaklaşık %60'lık kısmı Yeni Zelanda tarafından gerçekleştirilirken sırasıyla Endonezya, Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri sırasıyla onu takip etmektedir [5].

2021 yılında dünya üzerindeki toplam nihai enerji tüketiminin 4 ana sektöre göre dağılımını ve bu sektörlerde kullanılan enerjinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilen oranlarının toplam tüketimdeki paylarını içeren veriler Şekil 1.2'de sunulmuştur [6]. Buna göre ulaşım dışındaki sektörlerde kullanılan yenilenebilir enerji payı diğer enerji türlerine göre daha yüksek bir seyir göstermektedir.



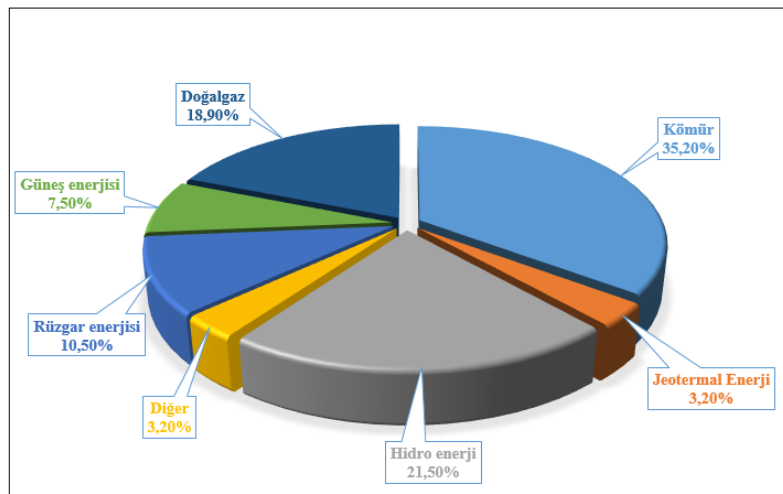
Şekil 1.2: 2021 yılı küresel enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin sektörel payları

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinden elde edilen termal (ısı) enerjisidir. Bu ısı enerjisinin kaynağını güneş ve yer kabuğu içerisinde meydana gelen radyoaktif bozunmalar oluşturmaktadır. Dünya yüzeyi ile çekirdeği arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle kabukta bir sıcaklık gradyanı meydana gelmektedir. Volkanik altyapıyla ilişkili olarak dağılan sıcaklık gradyanları ve jeotermal yer altı ısı akışlarının sıcaklıkları, yeryüzüne doğru inildikçe yaklaşık her bir kilometre derinlik başına ortalama 25-30 °C artmaktadır [6].

2024 yılı verilerine göre Dünya genelinde elektrik üretimi amacıyla kurulu jeotermal güç kapasitesi 16211 MW_e iken yıllık elektrik üretimi 96556 GWh olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca elektrik üretimi dışındaki amaçlar için kurulu bulunan jeotermal güç kapasitesi 173303 MW_t ve yıllık enerji üretimi 1476312 TJ değerinde gerçekleşmiştir [7].

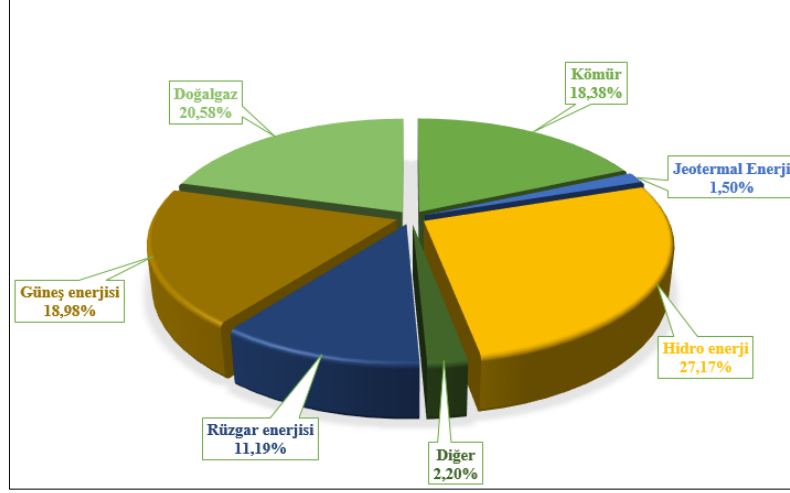
2024 yılında Türkiye’de elektrik üretimi 348,9 TWh olarak gerçekleşmiştir. Türkiye Ulusal Enerji Planı çalışmalarına göre 2025 yılında Türkiye’de tüketileceği öngörülen elektriğin yaklaşık olarak 380 TWh, 2030 yılında 455 TWh ve 2035 yılında ise 510 TWh değerlerine ulaşması beklenmektedir [8].

348,9 TWh’lik elektrik üretimi; kömür (%35,2), hidro enerji (%21,5), doğal gaz (%18,9), rüzgâr enerjisi (%10,5), güneş enerjisi (%7,5), jeotermal enerji (%3,2) ve diğer kaynaklardan (%3,2) sağlanmış olup belirtilen kaynakların üretime verdikleri katkıların yüzdelik olarak gösterimi Şekil 1.3’te sunulmuştur [8].



Şekil 1.3: 2024 yılında Türkiye’de üretilen elektriğin kaynaklarının yüzdelik dağılımı

2025 yılı Mayıs ayı itibariyle Türkiye'nin elektrik üretimindeki kurulu güç kapasitesi 119,271 MW_e değerine ulaşmıştır. Bu kapasiteyi oluşturan kaynaklar olan hidro elektrik (%27,1), doğal gaz (%20,6), güneş (%19), kömür (%18,4), rüzgâr (%11,2), diğer (%2,2) ve jeotermal (%1,5) enerjinin yüzdesel olarak dağılımı Şekil 1.4'te sunulmuştur [8].



Şekil 1.4: 2025 yılında Türkiye’de üretilen elektriğin kaynaklarının yüzdelik dağılımı

Türkiye'nin 2025 yılındaki elektrik üretimi kurulu gücünü oluşturan 36316 adet santralin kaynağı ve toplam kapasiteye sağladıkları güç değerleri Tablo 1.1’de sunulmuştur [9].

Tablo 1.1: Türkiye'nin 2025 yılı elektrik üretimi kurulu gücü

Kaynak	Santral Sayısı	Kurulu Güç (MW _e)
Akarsu	624	8420
Asfaltit Kömür	1	405
Atık Isı	70	310
Barajlı	147	23863
Biyokütle	376	2121
Doğal Gaz	326	24611
Fuel Oil	8	230
Güneş	34244	22759
İthal Kömür	16	10456
Jeotermal	66	1734
Linyit	50	10232
LNG	1	2
Motorin	1	1
Nafta	1	5
Rüzgar	381	13391
Taş Kömürü	4	841
Toplam	36316	119271

Türkiye sahip olduğu 58462 MW_e'lık yenilenebilir kurulu güç kapasite değeri ile 2023 yılında yenilenebilir güç kapasitesi sıralamasında dünya ölçeğinde bir sıra yükselerek 11. sırada yer almıştır [10] (Tablo 1.2).

Tablo 1.2: Ülkelerin yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi sıralaması

Sıralama	Ülke	Yenilenebilir Kurulu Gücü (MW _e)
1	Çin	1453701
2	Amerika Birleşik Devletleri	387549
3	Brezilya	194085
4	Hindistan	175929
5	Almanya	166939
6	Japonya	127328
7	Kanada	108764
8	İspanya	80136
9	Fransa	69301
10	İtalya	65157
11	Türkiye	58462
12	Rusya	56708
13	İngiltere	55561
14	Avustralya	51328
15	Vietnam	46012

Alp-Himalaya jeotermal kuşağı üzerinde yer alan ve tektonik-volkanik etkilerin yoğun bir biçimde gözlemlendiği Türkiye'ye, jeotermal potansiyel açısından oldukça zengindir (Şekil 1.5) [11].



Şekil 1.5: Ana neotektonik hatlar ve Türkiye'nin sıcak kaynak dağılımı

Türkiye’de kaynak boşalım ve rezervuar sıcakları olarak 20 ila 287 °C aralığında değişken sıcaklıklara sahip ortalama 2000 adet sıcak ve mineralli su kaynağı bulunmakta olup bunlardan 227 adet jeotermal alan ekonomik ölçekte kullanılmaktadır (Tablo 1.3) [11] [12].

Tablo 1.3: Türkiye’de illerin jeotermal kuyu kapasite değerleri

İl	Kuyu Sayısı	Kapasite (MW _e)	İl	Kuyu Sayısı	Kapasite (MW _e)	İl	Kuyu Sayısı	Kapasite (MW _e)
Afyon	52	334,1	Erzincan	1	0	Muğla	5	11,38
Ağrı	6	87,04	Erzurum	11	21,82	Nevşehir	13	90,26
Aksaray	5	1,12	Eskişehir	14	20,83	Niğde	14	15,38
Amasya	7	4,79	Gaziantep	1	0	Ordu	1	0
Ankara	62	108,65	Hatay	8	0,22	Osmaniye	1	0
Aydın	673	19143,53	İstanbul	9	0,79	Rize	4	4,84
Balıkesir	33	90,25	İzmir	209	874,10	Sakarya	5	56,52
Batman	1	3,21	Kahramanmaraş	7	8,61	Samsun	12	12,92
Bilecik	1	0,22	Karabük	1	0,33	Siirt	1	0,29
Bingöl	4	6	Kayseri	6	2,62	Sivas	16	58,38
Bolu	23	20,84	Kırklareli	2	2,76	Şanlıurfa	25	57,21
Bursa	5	17,43	Kırşehir	21	66,46	Tokat	7	5,82
Çanakkale	21	180,44	Kilis	1	0	Tunceli	2	0,81
Çankırı	5	5,91	Kocaeli	2	0	Uşak	5	15,64
Çorum	10	0,80	Konya	18	20,92	Van	7	26,85
Denizli	228	4906,63	Kütahya	84	392,36	Yalova	6	19,75
Diyarbakır	7	6,30	Manisa	384	9242,40	Yozgat	40	74,83
Elazığ	1	0,63	Mersin	2	2,82			
TOPLAM KUYU SAYISI								2089
TOPLAM KAPASİTE (MW _e)								36025,81

Türkiye jeotermal enerji potansiyeli bakımından Avrupa’da yer alan ülkeler arasında ilk sırada bulunmaktadır [13].

Türkiye 2024 yılı itibariyle jeotermal enerjiden elektrik üretimi gerçekleştiren Dünya ülkeleri arasında hem kurulu güç kapasite (MW_e) hem de elektrik üretimi (GWh) büyüklüğü olarak 4. sırada bulunmaktadır (Tablo 1.4) [7].

Tablo 1.4: Jeotermal elektrik üretimi kurulu güç kapasitesi ve büyüklüğünde ilk 5 ülke

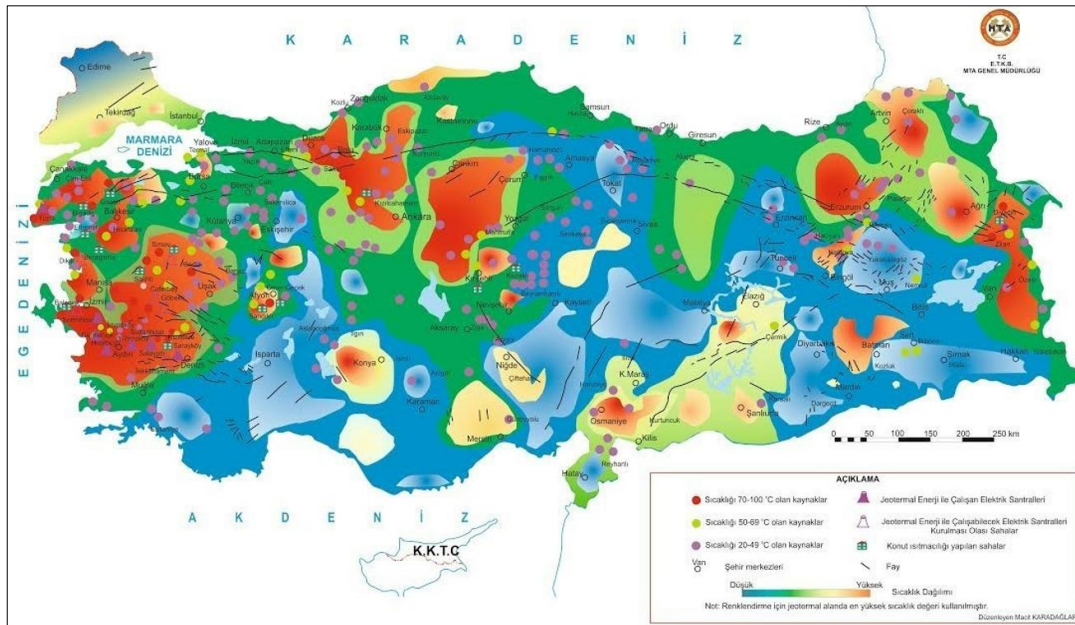
Sıralama	Ülkeler	Kurulu Güç (MW _e)	Elektrik Üretimi (GWh)
1	Amerika Birleşik Devletleri	3889	18702
2	Endonezya	2335	16592
3	Filipinler	1952	11670
4	Türkiye	1717	10840
5	Yeni Zelanda	1055	7820

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde depolanmış olan ısı enerjisi olmakla birlikte doğrudan veya dolaylı olarak kullanımına yönelik çeşitli uygulama alternatiflerini de bünyesinde barındırmaktadır (Tablo 1.5) [14].

Tablo 1.5: Jeotermal uygulamalar için enerji gereksinimleri

Tür	Uygulama	Minimum Sıcaklık (°C)	Maksimum Sıcaklık (°C)
Isı	Metal Yüzey İşleme	25	190
Isı	Ağaç İşleme	40	175
Isı	Kağıt İşleme	40	230
Isı	Gıda ve İçecek İşleme	40	165
Isı	Tekstil İşleme	40	160
Isı	Bölgesel Isıtma	60	110
Isı	Sera Isıtması	40	90
Isı	Su Ürünleri Yetiştiriciliği	25	65
Isı	Jeotermal Isı Pompaları	25	60
Elektrik	Buhar Santralleri	175	340
Elektrik	Binary (İkili) Çevrim Santralleri	100	340

Türkiye’de yer alan jeotermal kaynaklar ile gerçekleştirilen uygulamaların yer aldığı harita Şekil 1.6’da sunulurken jeotermal enerjinin değerlendirime şekillerinin 2022 yılındaki durumu Tablo 1.6’da verilmiştir [12] [13].



Şekil 1.6: Türkiye’de bulunan jeotermal kaynaklar ve uygulama haritası

Kaynak ve uygulama yoğunluğu bakımından incelendiğinde; jeotermal potansiyeli oluşturan alanların %78'inin Batı Anadolu, %9'unun İç Anadolu ve %7'sinin ise Marmara Bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Sahip olunan kaynakların %90'lık kısmının düşük ve orta sıcaklıkta olduğu, %10'unun ise elektrik enerjisi üretimine uygun yüksek sıcaklıklara sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 1.6: 2022 yılında Türkiye’de bulunan jeotermal enerjinin değerlendirilme durumu

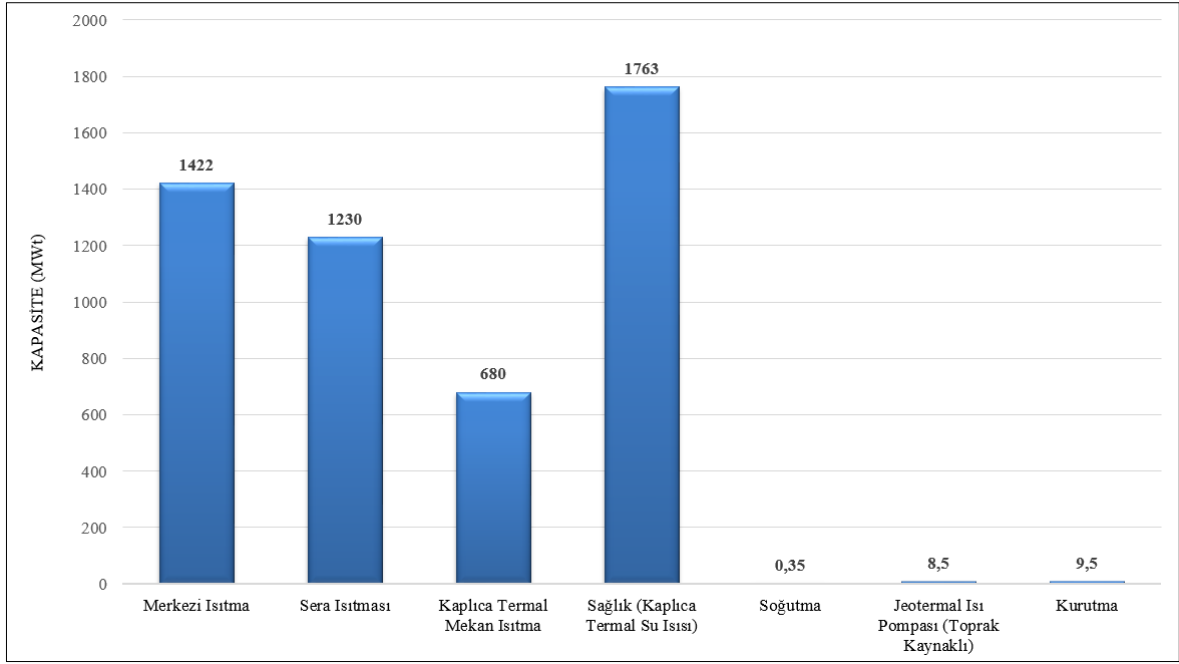
Değerlendirme Şekli	Kapasite
Jeotermal Merkezi Isıtma (Şehir, Konut)	158000 Konut Eşdeğeri (1422 MW _t)
Sera Isıtması	5293 Dönüm (1230 MW _t) 146000 Konut Eşdeğeri
Kaplıca Tesisleri, Termal Oteller ve Devremülk Tesisleri Isıtma	68000 Konut Eşdeğeri (680 MW _t)
Otellerde, Kaplıcalarda, Devremülklerde Kullanılan Termal Suyun Isıl Enerjisi	520 Kaplıca (1763 MW _t) (Yılda 23 Milyon Kişi)
Meyve ve Sebze Kurutma	9,5 MW _t
Soğutma	0,35 MW _t
Jeotermal Isı Pompası (Toprak Kaynaklı)	8,5 MW _t
Jeotermal Isı Kullanımı (Kurulu Termik Güç)	5113 MW _t
Toplam Elektrik Üretimi	1663 MW _e
Endüstriyel Sıvı CO ₂ , Kuru Buz Üretimi	400000 Ton/Yıl

Türkiye’nin 2024 yılı itibariyle kurulu ısıtma ve soğutma amaçlı (elektrik üretimi dışındaki alanlarda kullanılan) jeotermal kapasitesi 5113 MW_t iken bu kapasiteye bağlı olarak gerçekleştirilen yıllık üretim 85000 TJ değerine ulaşmaktadır. Kapasite ve üretim değerlerinin, kullanıldığı alanlara göre dağılımı Tablo 1.7’de sunulmuştur [7].

Tablo 1.7: Türkiye’nin ısıtma ve soğutma amaçlı jeotermal kapasitesi ile yıllık üretimi

Kullanım Alanı	Kurulu Güç (MW _t)	Yıllık Üretim (TJ/Yıl)
Tarım	1240	23000
Sağlık	2443	45000
Isıtma	1430	17000
Toplam	5113	85000

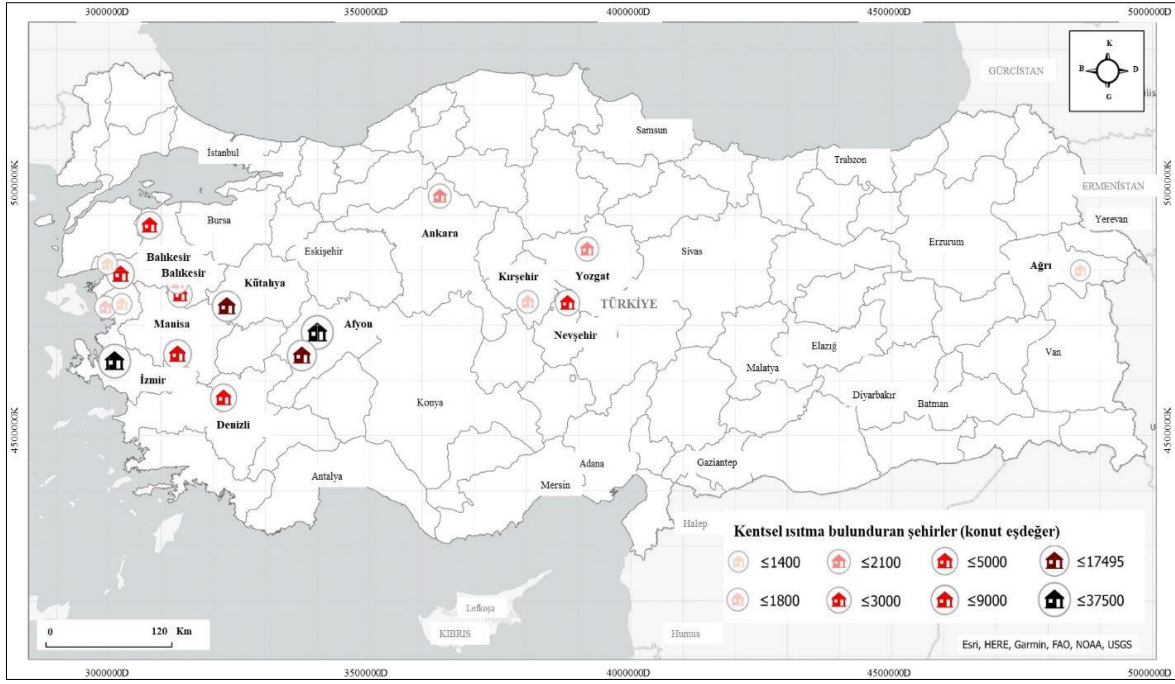
Tablo 1.7’de genel bir çerçeve çizmesi amacıyla sunulan değerlerin, 2022 yılında jeotermal doğrudan kullanım uygulama alanlarına göre detaylandırılmış kapasite özeti Şekil 1.7’de sunulmuştur [12].



Şekil 1.7: 2022 yılında jeotermal doğrudan kullanım uygulamalarının mevcut kapasiteleri

Jeotermal enerji kendisini oluşturan kaynağın iklimden bağımsız olması nedeniyle diğer birçok yenilenebilir kaynağın aksine, dış hava koşullarına bağlı olmaksızın yıl boyunca kesintisiz bir şekilde enerji akışı sunma potansiyeline sahiptir. İklim şartlarının elverişli olduğu yerlerde bölgesel veya bireysel ısıtma sağlamak amacıyla etkin bir şekilde kullanılmaktadır [14].

Türkiye’de jeotermal enerjinin doğrudan en yaygın olarak kullanıldığı alanın kapalı mekân (şehir, bina, tesis vb.) ısıtma sistemleri olduğu kabul edilmektedir. 2022 yılı itibarıyla merkezi jeotermal ısıtma sistemleri ile termal tesis kullanım uygulamalarının toplam kapasitesi 2102 MW olarak gerçekleşmiştir. Şekil 1.8’de ülkemizde jeotermal kentsel ısıtma sistemi bulunan şehirler ve sahip oldukları konut eşdeğer bilgileri gösterilirken, işletimde bulunan jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerine dair özellikler Tablo 1.8’de özetlenmiştir [12].



Şekil 1.8: Türkiye’de jeotermal kentsel ısıtma sistemi bulunan şehirler

Tablo 1.8: Türkiye’deki jeotermal merkezi ısıtma sistemi uygulamaları

Uygulama Sahası	Sıcaklık (°C)	Konut Eşdeğeri	Uygulama Sahası	Sıcaklık (°C)	Konut Eşdeğeri
Balıkesir-Gönen	80	3400	İzmir-Dikili	125	1530
Kütahya-Simav	120	18612	Nevşehir-Kozaklı	92	3800
Ankara-Kızılcahamam	80	2100	Ağrı-Diyadin	70	970
İzmir-Balçova-Narlidere	98-125	38899	Manisa-Salihli	94	10067
Afyon-Sandıklı	70	30000	Denizli-Sarayköy	140	5000
Kırşehir-Terme	57	1800	Balıkesir-Edremit	60	5100
Afyon-Ömer-Gecek	95	25610	Balıkesir-Bigadiç	96	1500
Balıkesir-Güre	65	1400	Yozgat-Sorgun	80	2100
Balıkesir-Sındırgı	98	4000	İzmir-Bergama	65	866
TOPLAM					156754

Bu tez çalışmasının temel amacı, Güre Mahallesinde mevcut durumda işletilmekte olan jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin enerjik, ekserjik ve eksergoekonomik performansını ayrıntılı bir şekilde analiz etmektir. Ele alınan sistemin farklı durum noktalarındaki akışlarında meydana gelen termodinamik ve ekonomik kayıpları belirleyerek, genel sistem verimliliğinin ve maliyet etkinliğinin artırılmasına yönelik potansiyel iyileştirme alanlarının tespit edilmesine kaynaklık etmektir. Çalışmada SPECO yöntemi kullanılarak sistemin ekserjisi ile ekserjiye bağlı olarak geliştirilen akışların maliyetini izlemeye odaklanılacaktır.

Belirlenen temel amaç doğrultusunda, çalışmanın alt amaçları analiz adımlarına bağlı sıra ile açıklanacak olursa:

- İlk olarak, Güre JBIS'nin termodinamik durum noktalarına ait 28 Ocak 2023 tarihli gerçek ölçümlerine dayalı operasyonel verilerini kullanarak sistemin farklı bileşenlerinin enerjik ve ekserjik performansını (ekserji yakıtı, ürünü, imhası ve ekserjik verimlilikleri) hesaplamak,

- İkinci olarak, SPECO yöntemi tanımlamalarına uygun şekilde her bir bileşen için maliyet dengesi denklemlerinden oluşan denklem sistemini çözmek için ihtiyaç duyulan yardımcı denklemleri F (Yakıt) ve P (Ürün) prensipleri aracılığıyla türetmek,

- Üçüncü olarak, kurulan denklem sistemini temel başlangıç varsayımlarını da kullanmak suretiyle çözerek, sistemdeki tüm enerji ve madde akışlarının saatlik maliyet akış hızlarını (\dot{C}) ve birim ekserji maliyetlerini (c) belirlemek,

- Dördüncü olarak, sistem bileşenlerinin ekserji imha maliyetlerini ve toplam maliyet oranlarını hesaplamak,

- Beşinci ve son olarak ise, bileşenler hakkında yorumlar geliştirmemize olanak sağlayacak olan göreceli maliyet farkları (r_k) ve eksergoekonomik faktörleri (f_k) gibi eksergoekonomik değerlendirme kriterlerini belirleyerek sistemin hangi bileşenlerinin termodinamik veya ekonomik açıdan iyileştirme potansiyeli taşıdığını tespit etmek olacaktır.

Çalışma kapsamında, Güre JBIS üretim kuyularından elde edilen jeotermal enerji ile yüklü akışkanın ısı merkezinde bulunan ısı eşanjörlerine ulaştırılması, ısı eşanjörleri aracılığıyla bölgesel ısıtma sistemine ait kalorifer tesisat hattı suyunun ısıtılması ve ardından ısıtılan suyun enerji tüketim çevrimine pompalar vasıtasıyla iletilmesi süreçleri ele alınacaktır.

SPECO yöntemi ile ise JBIS’de yer alan her bir sistem bileşeni için yakıt ve ürün tanımları yapılacak, maliyet denge denklemleri kurulacak ve F-P prensibine dayalı olarak yardımcı denklemler türetilenektir. Elde edilen denklem sistemi, tüm akışların birim ekserji maliyetlerini ve akış maliyetlerini belirlemek üzere başlangıç değerleri ile temel kabuller de kullanılarak çözülecektir. Bileşen satın alma maliyetleri, sermaye yatırımı maliyetleri ve işletme-bakım giderleri ve bileşen ömürleri dikkate alınarak çalışma süresi boyunca sistemin harcayacağı maliyet seviyelendirilerek analizde kullanılacaktır.

Bu tez çalışması ile elde edilecek bulguların, Güre JBIS’nin eksergoekonomik olarak mevcut çalışma değerlerinin anlaşılmasına ve böylece sistem performansının ortaya çıkmasına önemli katkılar sağlaması beklenmektedir. Analiz sonucunda, sistem işletmecilerine hangi bileşenlere yönelik iyileştirme çalışmalarının daha öncelikli ve maliyet etkin olacağına dair verilere dayalı öneriler sunulacaktır.

Ayrıca bu çalışmanın ile JBIS’lerinin eksergoekonomik analizlerine yönelik literatüre, gerçek saha ölçümlerine dayalı operasyonel verilerle gerçekleştirilmiş bir çalışma sunarak katkıda bulunması hedeflenmektedir.

JBIS gibi karmaşık enerji sistemlerinin eksergoekonomik analizleri, geleneksel analiz yöntemlerinin genel sistematığı olan “yalnızca enerji miktarlarına odaklı bir yaklaşım” ile mümkün olmamaktadır. Bunun başlıca nedeni; sıcaklık ve basınç değerleri bakımından farklı koşullarda bulunan akışların, depolama ekipmaları, eşanjörler ve pompalar gibi JBIS’ne ait temel bileşenlerin sistemin genel performansına ve maliyet özelliklerine doğrudan etki etmesidir. Bu sebeple eksergoekonomik analizi gerçekleştirilmek istenilen sistemin enerji yapısının incelenmesinin ötesine geçen bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca cevap vermek amacıyla çeşitli termoekonomik analiz yöntemleri ortaya konulmuş ve genel prensip olarak sistemdeki akışların maliyetlerinin bileşenler boyunca doğru bir şekilde dağıtılması temeline dayanan bakış açıları geliştirilmiştir.

“Enerjinin dış ortam şartları ile eşit duruma gelinceye kadar geçen süreçteki iş yapabilme potansiyeli” olarak tanımlanan ekserji, dıştaki (ex) ve güç/iş (ergon) kelimelerinden türetilen bir kavramdır [15]. Eksergoekonomik analiz ise temelde ekserjiyi ekonomik parametreler ile ilişkilendirerek sistemde meydana gelen verimsizliklerin meydana getirdiği ekonomik etkilere odaklanmaktadır [16]. Bu noktada eksergoekonomi analizi için seçilen metot,

analizin doğru sonuçlara ulaştırması, yinelenildiğinde yine aynı sonuçları vermesi konusundaki tutarlılığı, teyit edilebilirliği ve sonuçların yorumlanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada eksergoekonomik analiz yöntemi olarak daha önce de belirtildiği gibi SPECO yöntemi benimsenmiştir. Bu analiz yaklaşımı, Lazzaretto ve Tsatsaronis tarafından detaylandırılmış olup termal sistemlerde kullanılmaya uygun bir metottur [17].

SPECO yönteminin seçilmesinde etkili olan ve önce çıkan özelliklerinden ilki, sistem bileşenleri için “yakıt” ve “ürün” tanımlarının fiziksel temellere dayalı olarak net kurallar ile tanımlanmasıdır [17]. Sistemde yer alan her bir bileşene giren ve akış içerisinde tüketilen ekserji, yakıt olarak adlandırılırken sistem tarafından tüketilen faydalı ekserji ise ürün olarak adlandırılmaktadır. Alternatif olarak kullanılabilmesi muhtemel diğer farklı termoekonomik yöntemlerin aksine, ifade edilen bu açıklayıcı tarifler bileşenlerin maliyet denklemleri ile sistemin maliyetinin hesaplanmasına olanak tanıyan yardımcı denklemlerin kurulması sürecinde ortaya çıkması muhtemel kafa karışıklıklarının önüne geçmektedir. Böylece farklı kişiler tarafından aynı sistem üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarının tutarsız sonuçlanma potansiyeli azalmaktadır [18].

SPECO yönteminin öne çıkan bir diğer önemli özelliği ise, yakıt ve ürün prensipleri ile ilişkili olarak türetilen yardımcı denklemlerin tespitine yönelik net bir sistematik sunmasıdır. Bahse konu sistematik yaklaşımın ilişkili olduğu temellerin yakıt ve ürün kavramlarına dayalı olması nedeniyle F-P (Yakıt-Ürün) Prensibi olarak adlandırılmaktadır. F prensibi yakıt olarak bileşene giren akıştan, uzaklaştırılan ortalama ekserjik birim maliyetin yakıtle ilişkili tüm akışlar için eşit olduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde, P prensibi de bileşenden çıkan ve ürünle ilişkili tüm akışların eşit ortalama ekserjik birim maliyetle üretildiğini belirtmektedir [17].

Bu prensipler aracılığıyla elde edilen yardımcı denklemler, her bir sistem bileşeni için yazılan ekserji maliyet akış denklemlerinde yerlerine konulmak suretiyle çözüldüğünde, sistem üzerinde belirlenen durum noktalarının her birindeki akışların birim ekserji maliyetlerinin (c) ve maliyet akış hızlarının (\dot{C}) belirlenmesine olanak tanımaktadır.

SPECO yöntemi, akışların birim ekserji maliyetleri ile maliyet akış hızlarının hesaplanmasına yönelik sağladığı yöntemsel kolaylığa ilave olarak, bileşenlerin eksergoekonomik performanslarının değerlendirilmesine olanak sağlayan göreceli maliyet farkı (r_k) ve eksergoekonomik faktör (f_k) gibi önemli gösterge çıktıları sağlamaktadır. Bu sayede analizi gerçekleştirilen sisteme yönelik olarak elde edilen sonuçların yorumlanması sürecine kaynaklık etmektedir [16].

Bir bileşene kaynak sağlayan yakıtın birim ekserji maliyetindeki değişimin, o bileşenin çıkış noktasındaki ürüne ait birim ekserji maliyetine etkisinin oransal olarak ifadesi göreceli maliyet farkı (r_k) olarak tanımlanmaktadır. Bileşenin sahip olduğu maliyet değerinin (Z_k), ekserji yıkım maliyetine olan oransal kıyaslaması ile eksergoekonomik faktör tanımı ile ifade edilmektedir [16].

Tanımlanan çıktı parametreleri sayesinde, SPECO metoduna dair analiz adımlarının uygulandığı geniş ölçekli ve karmaşık sistemlerin bileşenleri arasından termodinamik olarak yüksek ekserji imhasının meydana geldiği bileşenler ile ekonomik açıdan iyileştirme önceliği verilmesi gereken bileşenlerin kolaylıkla tespit edilebilir hale getirilmesi mümkün olmaktadır. Bu sayede karar verme süreçlerinin öngörülebilirliğine imkân sağlamaktadır.

JBIS'ler yapıları itibarıyla farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde çalışan çevrimleri bünyesinde barındırmaya müsait sistemlerdir. SPECO yönteminin termodinamik ve maliyet denklemlerine dayalı analiz yöntemi sayesinde, farklı durum ve hâl özelliklerinde bulunan sistemin bütün olarak bir modeli oluşturulmaktadır. Bu sayede başlangıçta karmaşık görünen yapıların analizi anlaşılır ve daha sade bir hale indirgenmektedir. Farklı işletme koşulları ve analizi istenen senaryoların değerlendirilmesi bu sayede mümkün olmaktadır. Diğer farklı ve yetersiz bakış açılarına sahip yöntemlerde ise, sisteme dair karmaşıklık seviyesi arttıkça eksergoekonomik analiz yönüyle sisteme uygulanabilirlik açısından çeşitli zorluklar ortaya çıkabilmektedir.

JBIS'lerin eksergoekonomik analizlerinde SPECO yönteminin kullanılmasının; sağladığı net tanımlamalar, ekonomik analizi tamamlayıcı nitelikteki yardımcı denklemlerin F-P kuralı ile kolayca elde edilebilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi sürecini sistemli bir hale

getiren performans gösterge çıktılarına sahip olması gibi nedenler sebebiyle diğer birçok eksergoekonomik yaklaşıma göre öne çıkan özelliklere sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, Güre JBIS'nin analizine dair elde edilecek sonuçlar ile genel sistem verimliliği ve maliyet etkinliğine katkılar sağlanmasına yönelik somut iyileştirme stratejilerinin belirlenmesine yardımcı olacağı kanaati sebebiyle eksergoekonomik analiz yöntemi olarak SPECO yönteminin uygulanmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ülkemizde ve dünyada jeotermal enerjinin kullanım potansiyelinin araştırılmasına yönelik birçok analiz çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmaların temelini oluşturan giriş verileri genellikle hali hazırda kullanımda olan sistemlerde yapılan saha ölçümleri aracılığıyla elde edilmektedir. Önceki dönemlerde gerçekleştirilen jeotermal sistem analizlerinde genel olarak sistemlerin enerji ve ekserji incelemeleri ile buna bağlı olarak ortaya çıkan termodinamik içerikli sonuçlara yoğunlaşıldığı görülmektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda ise sistemlerin kullanımında bulunan jeotermal enerji potansiyelinin ekonomik içerikli değerlendirilmesine dayalı maliyet analizlerine de yer verilmektedir. Maliyet hesaplamalarının gerçekleştirildiği çalışmalarda, öncelikli olarak sistemin maliyet etkin çalışma koşullarının sağlayıp sağlamadığının tespiti yapılmaktadır. Gerçekleştirilen tespit doğrultusunda ekonomik olmayan sistem noktalarının iyileştirilmesi noktasında öneriler sunulurken verimliliğin artırılmasına yönelik bakış açılarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Belirlenen amaç doğrultusunda çeşitli analiz yöntemleri kullanılmakta ve ısı sistemleri için genel olarak SPECO metodu tercih edilmektedir. Bu kapsamda jeotermal enerji kaynaklı olarak bölgesel ısıtma sistemleri başta olmak üzere, ısı enerji sistemleri üzerine gerçekleştirilen ekserji ve eksergoekonomik analiz çalışmaları aşağıda incelenmiştir.

Keçebaş et al. [19] yaptıkları çalışmada, ileri eksergoekonomik analiz bakışı ile aynı referans parametreleri ve dış koşullar altında bulunan iki ayrı JBIS'i ekonomik açıdan değerlendirmişlerdir. Analizi gerçekleştirilen sistemlerden biri olan Afyon JBIS, 1994 yılında 10000 konut ısıtması için tasarlanarak kurulmuş iken inceleme tarihi itibarıyla 4613 konutun ısıtmasını gerçekleştirmektedir. İkinci Sistem olan Sarayköy JBIS ise 2002 yılında 5000 konuta göre tasarlanmış fakat mevcut durumda 2350 konutu ısıtmaktadır. Sistemlerin 2012 ve 2013 yıllarındaki çalışmaları esnasında yapılan ölçümler ile işletmecilerden elde edilen maliyet değerleri analizde kaynak verileri olarak kullanılmıştır. SPECO metoduna ait bakış açılarından faydalanılarak gerçekleştirilen analizde, kurulum maliyetinin sonuçlara önemli etkiler yapmayacağı değerlendirildiğinden, kayıpların azaltılması ile gerçekleştirilebilecek iyileştirmelere ve önlenemez içsel-dışsal etkilere odaklanılmıştır. Sistemlerin bileşen düzeyinde gerçekleştirilen analizleri neticesinde; ileri eksergoekonomik yöntemin kullanılması ile sadece ekserji odaklı bakış açısıyla gerçekleştirilen, görece sığ kalan analizlere oranla daha çok sayıda, faydalı ve doğruluğu arttırmış sonuçların elde edildiği görülmüştür. Sistem işletme maliyetleri geleneksel ve ileri eksergoekonomik

analizler için sırasıyla Afyon JBIS'te 1087 \$/h-213 \$/h iken Sarayköy JBIS'te 899 \$/h-126 \$/h olarak elde edilmiş olup Afyon JBIS'te yer alan sistem bileşenlerine oranla Sarayköy JBIS bileşenlerinin daha verimli çalıştığı görülmüştür.

Arslan et al. [20] çalışmalarında, Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli yüksek alanlardan biri olan Simav jeotermal sahasına kurulan Simav JBIS'i ele almışlardır. Sahip olduğu jeotermal enerji potansiyeli sebebiyle çoklu kaynak kullanımının uygulandığı bölgede 5000 konutluk JBIS ile 225000 m² alana sahip sera ısıtması birlikte gerçekleştirilmektedir. Sistem bileşenlerinde yapılacak olan değişiklikler ile kullanıcı faydasının sağlanmasının hedeflendiği analizdeki optimizasyon yaşam döngüsü maliyeti (LCC) konsepti ile gerçekleştirilmiş ve yatırım, işletme ve hurda maliyetleri dikkate alınmıştır. Farklı ısıtma devrelerine ait karşılaştırılmaların yapıldığı analizde en düşük entropi üretimi 60/49 °C ısıtma devresi için sağlanmış ve aynı devre şartlarında ekserjik verim ise %43,77'lik oranı ile en yüksek değere ulaşmıştır. Optimum şartların yakalandığı bu ısıtma devresi sisteminin etkin olduğu halde dahi genel sisteme ait yeterli iyileştirmenin sağlanamadığı görülmüştür. Netice itibariyle istenen düzeyde bir iyileştirmenin yakalanabilmesi için üretim kuyularından, daha az kayıp sağlayacak yeni binaların inşasına kadar JBIS'nin yeniden yapılandırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Özgener et al. [21] Salihli'de yer alan ve 2004 yılı itibariyle kamu binalarının da içinde yer aldığı toplam 2400 konutun ısıtılmasını sağlayan Salihli JBIS ele almışlardır. Bölge jeotermal yapısı itibariyle 95 °C rezervuar sıcaklığı, 0,087 m³/s maksimum verim ile 838 MW minimum kapasiteye sahiptir. Isıtma ihtiyacına göre kuyu kullanımının değişkenlik gösterdiği sistem, 01 Şubat 2004 tarihli ölçüm verilerine göre analiz edilmiştir. Anılan tarihteki ölçümlerde enerji ve ekserji verimleri %55,5 ve %59,4 olarak belirlenen sistemin, en büyük ekserji kaybı kaynağının sistem kaçakları sebebiyle oluşan deşarj neticesinde meydana geldiği ve %20,44 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Çeşitli ekonomik gider kalemlerinin ihmal edildiği analiz neticesinde ekserji kaybı oranları ile sermaye yatırım giderleri arasında sistematik bir bağlantı olduğu görülürken, enerji kaybı oranları çerçevesinde değerlendirme yapıldığında ekonomik gider maliyeti ile bağlantı kurulamadığı görülmüştür. Bu durum ekserji tabanlı tasarımın iyi seviyede yapılandırılmış olabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Alkan et al. [22] SPECO metodunun kullanıldığı ilk JBIS analizi olma özelliği taşıyan analizlerinde, Afyon JBIS'i 2011 yılı operasyonel ölçümlerine dayalı veriler aracılığıyla ele almışlardır. İlk olan bu özelliği sebebiyle araştırmacıların SPECO'nun JBIS uygulamasını içselleştirebilmeleri açısından uygulanan metoda dair temel ve detaylı bir açıklama gerçekleştirilmiştir. 1994 yılında faaliyete başlayan ve tasarımı 10000 konut ısıtması için yapılan sistem, analizin yapıldığı dönemde 4.613 konutun ısıtmasını gerçekleştirmektedir. Sistemde yer alan tüm bileşenlere dair akışların tanımlandığı, dış referans koşulları ile ekonomik parametre kısıtlarının belirlendiği analizde, termodinamik açıdan en önemli sistem bileşenler olan eşanjör ve pompalar üzerinde durulmuştur. Sistemin ekserji kayıp oranının ekserjik yakıt oranının %52,25'ini oluşturduğunun belirlendiği analizde, tüm sistem bileşenlerinin ekonomik ömür döngüsü üzerinde farklı ekonomik giderlere ve değerlere sahip olacağı düşüncesinden yola çıkılarak hesaplamalar seviyelendirilmiş maliyetler üzerinden yapılmıştır. Sistemin çalışmasında temel işletim süreci olan yakıt girişi ve ürün çıktısı temellerine dayandırılan sistematik üzerinden, SPECO'ya ait bakış açılarından olan F-P prensipleri ile üretilen yardımcı denklemler vasıtasıyla elde edilen denklemlerin çözülmesi ile değerlendirme kriterleri olan göreceli maliyet farkı, eksergoekonomik faktör vb. elderleri sağlanmış ve buna dayalı olarak da JBIS'e dair yorumlamalar gerçekleştirilmiştir. İlave olarak hassasiyet deneylerinin gerçekleştirildiği analizde ekserji yıkım oranı 390,754 kW ile en yüksek değere sahip bileşen olan 3 numaralı eşanjörün iyileştirmesine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Kuyu başı sıcaklıklarının ve sistem çalışma yükünün arttırılması ile üretilen ısının birim maliyetinin sırasıyla %11,86 ila %19,75 oranlarında azalacağını değerlendirildiği analizde, tasarımın daha iyi yapılması halinde enerji kazanım oranının daha yüksek seviyelere ulaşabileceği gibi sonuçlara ulaşılmıştır.

Keçebaş [23] Afyon JBIS'nin ekserjik maliyet alt yapısının incelenmesine olanak sağlayan ve modifiye edilmiş üretken yapı analizi (MOPSA) olarak da bilinen eksergoekonomik analiz yöntemini kullanarak dış koşulların sistem çalışmasını olası etkilerini değerlendirmek üzere ele almıştır. 2010 yılı içerisinde gerçekleştirilen iki ayrı ölçümde de %100 kapasite ile çalışan sistemin, sıcaklık başta olmak üzere dış koşullarının farklılığı sebebiyle ortaya çıkan sonuçların kıyaslanarak irdelenmesi sağlanmıştır. İlk ölçümdeki dış referans ortam sıcaklığı olan 2,3 °C koşullarında gerçekleştirilen analizde sistemin ekserji verimliliği %25,34 olarak hesaplanırken, 10,2 °C referans sıcaklığında gerçekleştirilen ikinci analizde ekserji veriminin düştüğü ve %22,78'lik bir değere sahip olduğu görülmüştür. Afyon JBIS'i

oluşturan maliyet girdilerinin büyükten küçüğe olmak üzere ilk olarak eşanjörler ve borulardan ardından ise pompalardan oluştuğu hesaplanmıştır. %100 yük koşulları altında çalışan sistemin her iki referans şartında da ısıtma birim maliyetinin 711,491 \$/h olduğu tespit edilmiştir. Sistemin ısı geri kazanım sağlayacak şekilde optimizasyona ihtiyacının olduğunun belirlendiği analizde, dış koşulların sistem çalışması üzerinde ciddi olabilecek etkilere sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Oktay and Dinçer [24] 1987 yılında Balıkesir'in Gönen ilçesinde kurulan ve 2008 yılı itibarıyla 2985 konut eşdeğere karşılık gelecek şekilde konut ısıtması gerçekleştiren Gönen JBIS ele alınmıştır. Ele alınan sistemin ekserji ve daha detaylı verilere ulaşılabilmesi adına, maliyet muhasebesi işlem adımları ile eksergoekonomik olarak incelemesi yapılmıştır. Eksergoekonomik analiz adımlarının sürece dahil edilmesi ile sistemin optimum tasarımı ve işletilmesi için fikirler elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunun gerçekleştirilmesi için öncelikli olarak ısıtması sağlanan bina karakteristikleri ile kış ve yaz dönemindeki sistem çalışma prosedürlerinin ne olduğu belirlenmiştir. Sistemin analizi için gerekli temel akış verilerini elde etmek için 2007 yılında gerçekleştirilen ölçümler EES (Engineering Equation Solver) Programı akışlara dair değerlerin atanmasında kullanılmıştır. %80'lik bir yükleme koşulunda çalışan JBIS'de, kaynak ekserjisinde meydana gelen ekserji kaybının yaklaşık %10,3'ünün bileşenler düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Bileşen düzeyindeki bu ekserji kaybının birincil olarak %80'inin ısı eşanjörlerinde ve daha sonra sırasıyla pompa ve boru hattında olmak üzere %8,75 ile %11,25 oranlarında gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum kayıp ekserjinin büyük bir bölümünün kaynağını eşanjörlerin oluşturduğu gerçeğini ortaya çıkarmış ve iyileştirme önceliği verilmesi gerektiği tespitine temel oluşturmuştur. Ayrıca Gönen JBIS'nin %100 kapasite ile çalıştırılması halinde jeotermal su ile gerçekleştirilen birim ısıtmanın maliyetinin 89,52 \$/h gibi bir maliyete sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Baldvinsson and Nakata [25] Japonya'nın yaklaşık 70000 nüfuslu küçük bir şehri olan Hirosaki'nin mevcut durumda kullanımında bulunan fosil yakıt temelli sıcak su temin ve ısıtma sistemi ile varsayımsal bir model olarak tasarladıkları birden fazla enerji kaynağına sahip, sıcak su temin ve ısıtma sistemini SPECO metodundan da faydalanarak karşılaştırmışlardır. Varsayımsal olarak tasarlanan bölgesel sıcak su ve ısıtma sistemi modelinin birincil enerji kaynağını bölgeye yaklaşık 23 kilometre uzaklıkta bulunan Shimoyu jeotermal sahasından elde edilen jeotermal akışkan oluştururken, ikincil enerji kaynağını ise yerel atıkların entegrasyonu ile sağlanan enerji oluşturmaktadır. Isıtma sezonu

olarak kabul edilen 16 Ekim ila 30 Nisan tarihleri arasındaki ortalama dış sıcaklığın 3,3 °C olduğu bölgede, 15,5 °C ısıtma eşiği ile hesaplanan ısıtma derece gün sayısı 2539'dur. 128 kg/s debiyle 110 °C sıcaklığında jeotermal akışkanın elde edildiği iki ayrı jeotermal üretim kuyusu ile tahliye amaçlı bir adet reenjeksiyon kuyusunun bulunduğu kabullerine göre termoeconomik analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda; mevcutta kullanılmakta olan sistemin toplam maliyet oranı ile ekserji tüketim maliyet oranları sırasıyla 0,093 \$/h ve 0,178 \$/h olarak hesaplanırken, tasarımı yapılan modele ait maliyet oranı ve ekserji tüketim maliyet oranlarının 0,05 \$/h ve 0,23 \$/h değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Yücer and Hepbaşlı [26] fuel oil yakıtlı bir buhar kazanından elde edilen buhar enerjisinin ısı eşanjöründe gerçekleşen ısı transfer ile bir binanın ısıtma ile kullanım sıcak su ihtiyacının karşıladığı sistemi ele almışlardır. İncelenen sistemin ısıtılan bölgesi konaklama evi olarak kullanılmakta olan 49 odalı ve 5850 m³ iç hacme sahip bir binadır. Yalıtım özelliğine sahip olmayan binaya ait ısı geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi ile başlanılan analizde, iç ve dış hava sıcaklıkları sırasıyla 21 °C ve 0 °C olduğu koşullar dikkate alınmıştır. Maliyete ait ekonomik değerlerin belirlenmesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın keşif özetlerindeki verilerden yararlanılan analizde, ısıtma sistemi bileşenlerine SPECO metoduna dair işlem adımları uygulanmıştır. Ayrıca dinamik hesaplama yöntemlerine kıyasla çok hassas olmadığı değerlendirilen statik hesaplama yöntemlerine dayalı bir düşük ekserji yaklaşımından da faydalanılmıştır. Gerçekleştirilen ekserji ve eksergoekonomi analizleri neticesinde, ekserjik maliyet etkinlik değeri 0,469 olarak hesaplanan üretim adımının öncelikli olarak incelenmesi ve ekserji kaybını azaltmak amacıyla buhar kazanının daha verimli bir versiyonu ile güncellenmesi gerektiği belirlenmiştir. Genel ekserji verimliliğinin %3,46 olarak hesaplandığı sistemde, ekserji maliyet katsayısı sahip olduğu 256,89 \$/GJ değeriyle en yüksek olarak emisyon aşamasını oluşturan ısıtma radyatörlerinde meydana gelmektedir. Ayrıca çevresel bir analizi barındıran incelemede ısıtma ve kullanım sıcak suyu için yıllık CO₂ salınımları sırasıyla 292,70 kg ve 247,77 kg olarak elde edilmiştir.

Özgener et al. [27] Türkiye'de kurulu olarak faaliyet göstermekte olan Balçova, Salihli ve Gönen JBIS'lerinin enerjistik ve ekserjik analizlerini gerçekleştirerek, genel performans iyileştirmelerini belirlemek üzere incelemiştir. Analizde saha ölçümlerine dayalı olarak gerçek işletim verileri kullanılmıştır. Ele alınan sistemlerin ortalama jeotermal kaynak rezervuar sıcaklıkları sırasıyla 118 °C, 95 °C ve 70 °C'dir. Analiz için referans koşul olarak

4 °C ve 101,32 kPa değerleri kabul edilmiştir. Referans durum sıcaklığının düşmesi ile genel sistem enerji ve ekserji kayıplarının arttığı ifade edildiği çalışmada, 4 °C sıcaklığı için JBIS'lerine olan toplam enerji girdi değerleri 17,02 MW ila 101,22 MW arasında değişirken, toplam ekserji girdi değerleri ise 2,35 MW ila 16,49 MW arasında değişmektedir. JBIS'lerin belirlenen dış referans sıcaklığı için toplam enerji verimlilikleri %39,6 ila %55,6 arasında değişirken, toplam ekserji verimlilikleri %45,7 ila %63 arasında değişmektedir. Sistemlerin işleyişi esnasında meydana gelen kayıpların kaynaklarına işaret edilen çalışmada, çeşitli yollarla meydana gelen kayıpların sistemden çevreye olacak şekilde önemli bir enerji kaybı oluşturduğu ifade edilmektedir. Son olarak incelenen sistemler kendi aralarında enerji verimliliği açısından kıyaslandığında Salihli JBIS'nin en yüksek enerji verimliliğine, ekserjik verimlilik açısından kıyaslandığında ise Gönen JBIS'nin en yüksek ekserji verimliliğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Keçebaş and Hepbaşı [28] Afyon JBIS'i 8 Şubat 2011 tarihinde gerçekleştirilen gerçek saha ölçüm verilerine dayalı olarak gerçekleştirdikleri analizde, SPECO metodunu ile kaçınılmaz/kaçınılmaz ve içsel/dışsal parçalar kavram temellerinde ele alarak ekserjik ve ekonomik açıdan incelemişlerdir. Ele alınan JBIS'in enerji kaynağını, şehrin 15 kilometre uzaklığında bulunan ortalama 105 °C rezervuar sıcaklığına sahip Ömer-Gecek jeotermal sahasından sağladığı ifade edilmektedir. Belirtilen kaynaktan elde edilen jeotermal akışkan ısı merkezine 95 °C ortalama sıcaklık ve 175 kg/s ortalama kütleli debi ile ulaşmakta ve toplamda 6 adet olan plakalı tipteki ısı eşanjörlerinde gerçekleşen ısı enerji transferi neticesinde ısıtılması amaçlanan bölgelere ait kalorifer tesisat boru hatlarının ısıtılması olarak sistemin genel işleyişi açıklanmaktadır. Spesifik ekserjiler, ekserji birime başına maliyetler ve bileşenler için yardımcı maliyetlendirme denklemlerinin kullanıldığı analizde sistem bütününe ekserji verimliliği değeri %29,29 ve eksergoekonomik faktör %5,53 olarak görülmekte iken uygulanan optimizasyon sonucu gerçekleştirilen iyileştirme neticesinde anılan değerler sırasıyla %34,46 ve %9,49 olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda mutlak, endojen ve ekzojen yıkım maliyet oranlarının sunulduğu analizde, geleneksel eksergoekonomik analizin yüksek verimsizlik kaynağını oluşturan bileşenleri tespit edebildiği ancak bileşenler arası etkileşimler ile her bir bileşene dair iyileştirme potansiyelinin belirlenmesinde yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. Bu nedenle ısı enerji sistemlerinde, gelişmiş eksergoekonomik değerlendirme yaklaşımının enerji tasarrufunun potansiyelini belirlemede daha etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

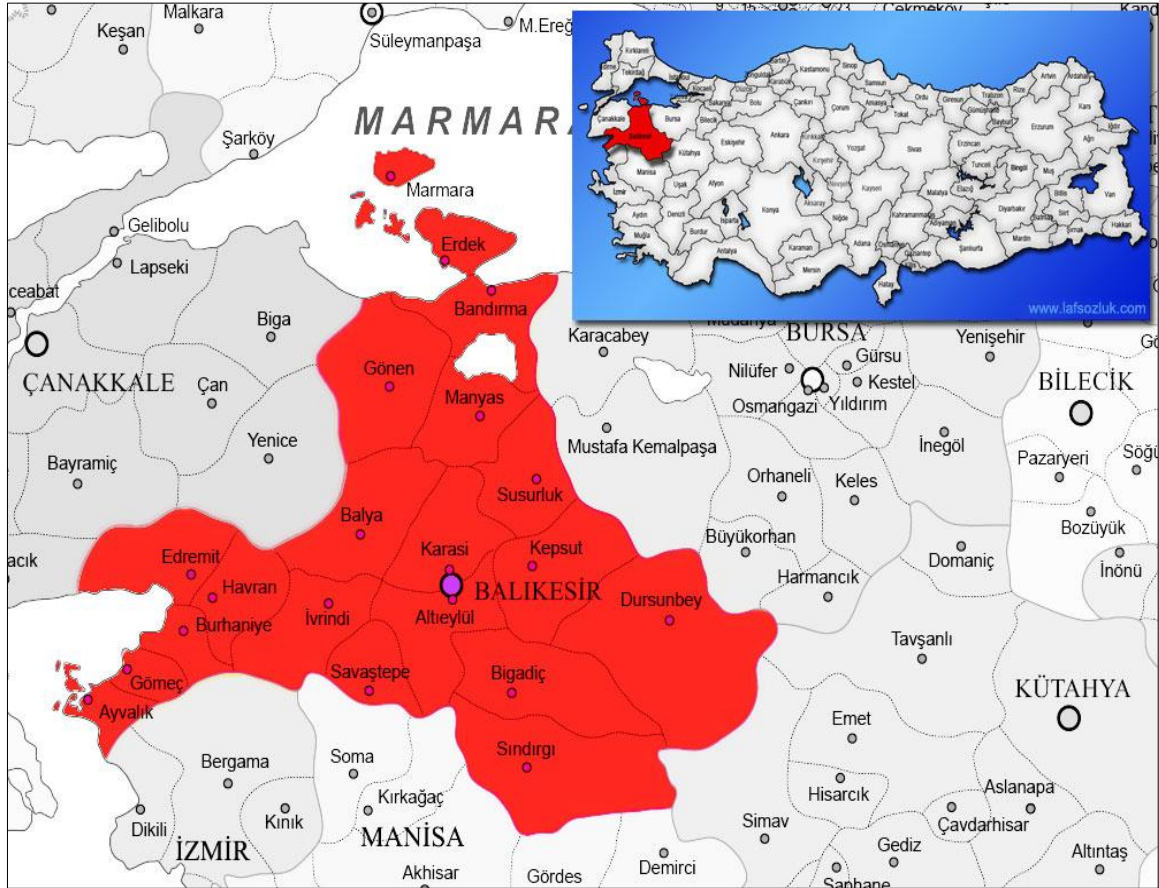
Arat and Arslan [29] Türkiye'nin en büyük jeotermal sahalarından olan Simav jeotermal sahasından elde edilen jeotermal akışkanın, boru tipi bir ısı eşanjörüne ilave olarak ısı pompası da eklenmesi ile ortalama 25000 nüfuslu bir ilçe için konut ısıtması amaçlı bölgesel ısıtma sistemi çözümünü araştırmışlardır. Arzu edilen ısı pompalı ısıtma sisteminin hayata geçirilmesi öncesinde bir fizibilite özelliği taşıyabilecek nitelikteki çalışmalarında, ısı pompası için soğutucu akışkan belirlenmesi amacıyla 12 farklı çalışma sıvısı ve toplam 4686 farklı tasarım üzerinde analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaşam döngüsü maliyeti ve net bugünkü değer analiz yöntemlerinden de faydalanılan araştırmada, ısı pompası için en uygun soğutucu akışkanın R-410A sıvısı olduğunu tespit etmişlerdir. Bölgede bulunan jeotermal kaynağın sahip olduğu 133,5 °C sıcaklık ve 462 kg/s debi değerleri ile ısı pompası kullanılmadan doğrudan bir JBIS çevrimi oluşturabilecek niteliktedir. Ancak araştırma neticesinde elde edilen bulgular ile tasarıma ilave edilecek ısı pompası sistemi ile ilk duruma göre 600 konut daha fazla ısıtmanın ek 2147806,20 \$ maliyet getirerek makul bir yatırım olabileceği değerlendirilmiştir.

Tan and Keçebaş [30] 2002 yılında kullanım sıcak suyu ve konut ısıtması sağlamak üzere kurulan ve enerji kaynağını Denizli il sınırlarında yer alan Kızıldere jeotermal sahasından alan Sarayköy JBIS'i geleneksel ve gelişmiş eksergoekonomik bakış açıları ile analiz etmek üzere ele almışlardır. Analiz için 20 Ocak 2023 tarihi seçilmiş olup sistem işleyişindeki çeşitli durum noktalarının anılan tarihteki ölçüm verileri ile referans dış ortam koşulları olarak 5,8 °C sıcaklık ve 101,32 kPa değerleri kullanılmıştır. Çalışma çerçevesinde SPECO metodu kullanılarak spesifik ekserjiler, ekserji birimi başına maliyetler ve sistem bileşenlerine ait yardımcı maliyet denklemleri elde edilmiştir. Sisteme ait iyileştirme potansiyeli ve toplam maliyet tasarrufu potansiyelleri sırasıyla %2,98 ve %14,05 olarak hesaplanmıştır. İnceleme sonucunda sistem performansını iyileştirmek için geliştirilmesi gereken muhtemel çözüm odaklı bakış açılarının tespitinin, ekserji tabanlı bir şekilde sağlanmaya çalışıldığı çalışmada; sistem performans değerlendirmesi için, gelişmiş ekserji temelli yöntemin geleneksel yöntemlere kıyasla daha sağlıklı sonuçlara ulaştırdığı görülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

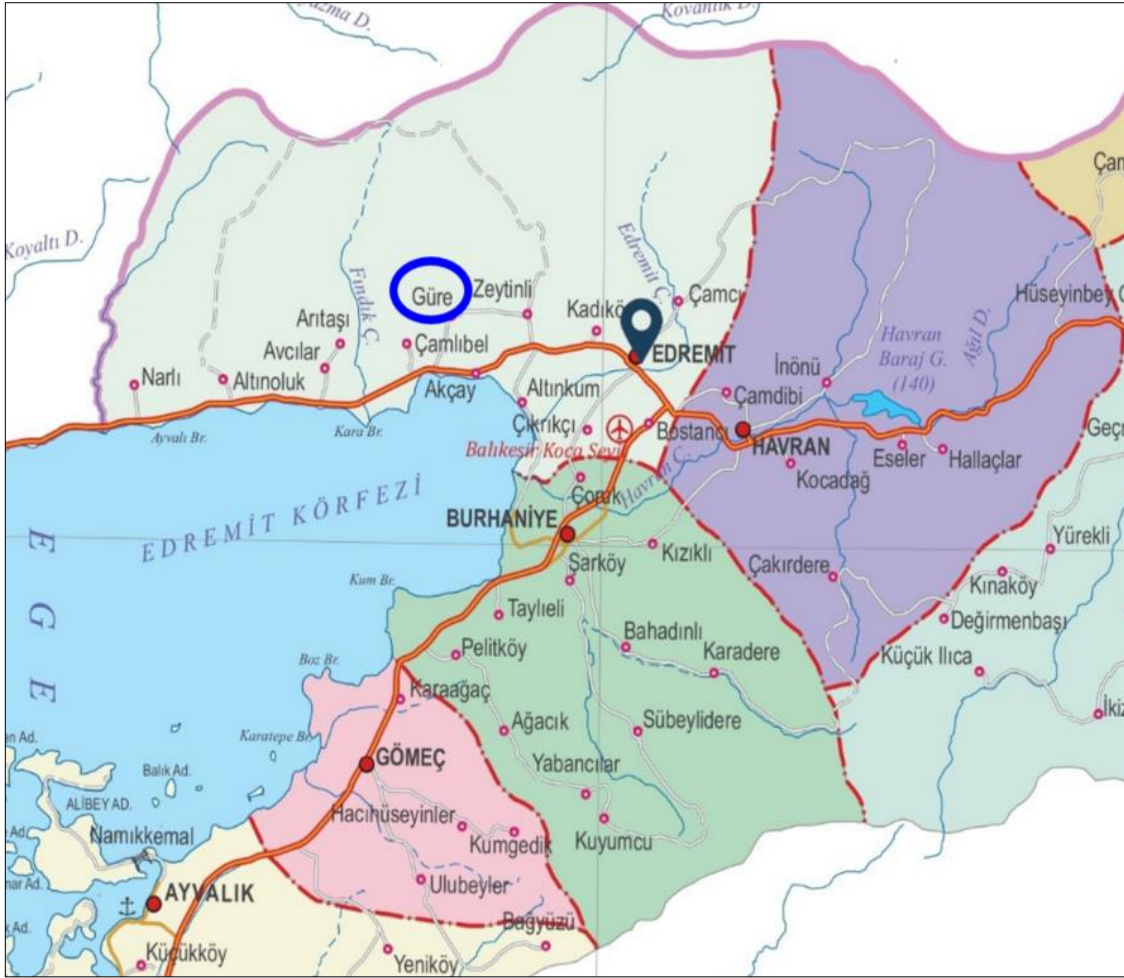
3.1 Güre Mahallesi'nin Tanıtımı

Balıkesir, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan bir şehirdir. Sahip olduğu toprakların büyük bir kısmı Güney Marmara Bölgesinde yer almakla birlikte Ege Bölgesinde de toprakları bulunmaktadır. Doğusunda Bursa ile Kütahya, batısında Ege Denizi ile Çanakkale, güneyinde İzmir ile Manisa, kuzeyinde ise Marmara Denizi bulunmaktadır (Şekil 3.1) [31].



Şekil 3.1: Balıkesir'in konumu

Güre ise Balıkesir'in Edremit ilçesine bağlı bir mahalledir. Kaz Dağları'nın güneyinde, Edremit Körfezi'nin kuzeyinde yer almaktadır. Coğrafi koordinatları 39°35'K 26°58'D olan bölgenin Edremit'e uzaklığı 12 kilometredir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Güre'nin konumu

Yaz aylarında nüfus yoğunluğu artan Güre'nin kış nüfusu 3000 ila 4000 kişi aralığında değişmektedir.

İklim özellikleri açısından Akdeniz ile Marmara iklimleri arasında geçiş göstermektedir. Bölgede yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılıman ve yağışlı geçmektedir. Sahip olduğu iklim yapısı, jeotermal enerjinin ısıtma amaçlı kullanımına imkân tanımaktadır [32].

Güre Mahallesi için TS 2164 "Kalorifer Tesisatı Projelendirme Kuralları" standardına göre ısı kaybı hesabında kullanılan dış hava sıcaklık değeri $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak verilmektedir [33].

Meteoroloji Genel Müdürlüğünden sağlanan veriler vasıtasıyla Güre Mahallesi'nin 2000 ila 2023 yılları arasındaki ısıtma derece saat değerleri dökümü çıkarılmış olup 2023 yılında gerçekleşen yıllık ısıtma derece saat ölçümünün ($T_{dış} \leq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ için) 2680 saat olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.1) [32].

Tablo 3.1: Güre'nin 2000-2023 yılları arası ısıtma derece saat değerleri

Yıllar/Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık Bazda Isıtma Derece Saat Değerleri
2000	11246	8410	7568	1977	760	47	0	38	136	2041	4177	6739	3595
2001	7259	6710	3897	3325	819	58	0	0	119	1373	5792	9860	3268
2002	9929	5437	5636	3228	630	58	0	0	130	1586	4242	8973	3321
2003	7201	10490	8753	5076	143	42	0	0	106	1587	5119	8150	3889
2004	9616	8482	6069	3495	877	16	0	0	87	901	4962	7338	3487
2005	8171	8289	6798	3538	602	44	0	0	28	2499	5568	6931	3539
2006	10679	8030	6105	2705	1302	222	0	0	21	1166	5912	8278	3702
2007	7260	4949	5581	3488	341	11	0	0	102	1366	5601	9118	3151
2008	10118	8649	4570	2805	991	22	0	0	367	1083	3350	7187	3262
2009	8346	7402	6881	3209	708	31	0	0	45	753	4244	5352	3081
2010	8324	5934	5952	2600	580	16	0	0	0	1787	2026	6268	2790
2011	8978	7746	7223	4696	1252	51	0	0	0	2782	6661	6940	3861
2012	10796	9537	7034	2554	587	11	0	0	44	448	2641	8064	3476
2013	8480	6373	5012	2743	182	5	0	0	90	2339	3522	8773	3127
2014	6114	5890	5366	2469	846	113	0	0	101	1265	4337	5924	2702
2015	8736	7600	6547	4293	276	0	0	0	0	771	3130	7746	3258
2016	8954	4651	5199	1652	827	16	0	0	28	1341	4546	10610	3152
2017	10888	6771	5252	3069	302	0	0	0	38	1371	4572	5319	3132
2018	8344	5885	3560	1478	119	0	0	0	0	983	3437	8850	2721
2019	9080	7354	5654	3532	633	5	0	0	103	435	2165	6564	2960
2020	9257	6867	5546	3896	1044	146	0	0	5	663	3604	5272	3025
2021	6972	6474	7703	3351	539	137	0	0	193	1311	3317	7033	3086
2022	9432	7445	9081	2584	959	0	0	0	346	658	2991	5586	3257
2023	6940	7518	5266	3462	670	0	0	0	0	571	2690	5041	2680

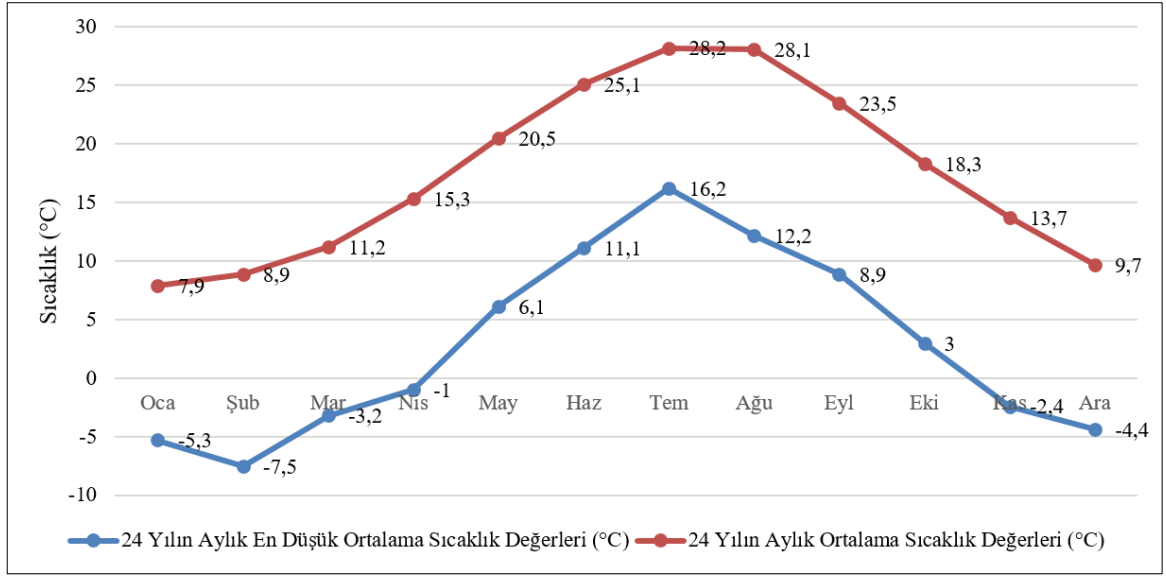
Güre Mahallesine ait 2000 ila 2023 yılları arasındaki aylık ortalama dış hava sıcaklıkları ile 24 yılın aylık ortalama sıcaklık değerleri Tablo 3.2'de, aylık minimum dış hava sıcaklıkları ile 24 yılın aylık minimum ortalama sıcaklık değerleri Tablo 3.3'te sunulurken bu değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir [32].

Tablo 3.2: 2000-2023 yılları arası aylık ortalama dış hava sıcaklıkları

Aylık Ortalama Dış Hava Sıcaklıkları (°C)												
Yıl/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	4,9	7,8	9,4	16,7	20,6	25,3	28,7	27,3	22,8	17,2	13,9	10,4
2001	9,9	9,6	14,3	15	19,6	24,4	28,8	28,4	23,5	19,1	11,5	6,5
2002	6,5	11,2	12,2	14,7	20,2	25,5	28,6	27,3	22,6	17,5	13,3	7,7
2003	9,9	4,4	7,9	12,5	22	27,4	28,4	28,3	22,2	18,4	12,5	8,9
2004	6,9	7,3	11,4	14,7	19,2	24,9	27,3	26,9	23,2	19,6	12,6	9,9
2005	8,8	7,3	10,4	15	20,4	24	28,1	27,5	23,8	16,6	11,7	10,2
2006	5,6	7,7	10,9	15,8	19,9	24,3	26,7	28,5	22,5	18,3	11,3	8,7
2007	8,7	9,1	11,5	14,5	21,2	26,6	29,1	28,4	23,1	18,7	11,7	7,7
2008	6	7,2	13,5	15,9	19,8	25,7	27,5	28,3	22,7	17,9	14,7	10
2009	8,5	8,7	10,3	15	20,7	24,7	28	26,8	22,5	19,8	13,6	12
2010	8,5	10,7	11,4	15,9	21,1	24,6	28,1	30,3	23,8	16,7	16,6	11,2
2011	7,8	8,3	9,8	12,8	19,1	24,2	28,3	27,1	25,2	15,9	10,4	10
2012	5,6	6,1	10,2	16,1	20	26,6	29,8	28,7	24,1	20,6	15,3	9
2013	8,4	10,1	12,5	16,2	22,2	25	27,6	28,3	22,9	16,6	14,4	8
2014	11,2	10,6	12,2	15,9	19,5	23,9	27,3	28,1	23,1	18,2	13,3	11,5
2015	7,9	8,5	10,9	13,6	21,2	23,8	27,8	28,5	25	18,5	15,1	9,4
2016	7,4	12,6	12,3	17,7	19,6	26,2	28,2	28,3	23,5	17,9	13,1	5,7
2017	5,3	9,3	12,6	15,4	20,5	25,7	28,2	28,1	24	17,8	12,9	11,1
2018	8,5	10,8	14	18,7	22,7	25,1	28,5	28,6	24,3	18,4	14,5	8
2019	7,7	8,8	11,8	14,5	20,5	26,6	27	28,1	23,8	19,7	16,5	10,5
2020	7,5	9,6	12,2	14,4	20,2	23,8	27,9	28,2	25,3	19,5	13,8	12
2021	10	9,9	9,3	14,6	21	24	28,5	28,5	22,8	17,2	14,6	10
2022	7	8,7	7	16	20,6	25,6	27,8	27,7	22,8	19	15,4	12
2023	10,2	8,3	11,9	14,6	19,4	24,6	29,4	28,8	25,4	20,1	15,6	12,6
24 Yıllık Ortalama	7,9	8,9	11,2	15,3	20,5	25,1	28,2	28,1	23,5	18,3	13,7	9,7

Tablo 3.3: 2000-2023 yılları arası aylık minimum dış hava sıcaklık ortalamaları

Aylık Minimum Dış Hava Sıcaklık Ortalamaları (°C)												
Yıl/Ay	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	-4,7	-2	-1,4	4,8	9,6	12,6	17,4	12,2	12,4	4,8	3,6	-0,6
2001	0,8	0	4,4	4,2	6,2	11,2	18,8	18,6	13,5	5	-1	-4,4
2002	-3,6	-0,2	4	4,6	10,2	12,8	19,6	19	11,6	3,6	3,2	-3,2
2003	-1,2	-1,2	-1,6	-1	11,2	11,8	17,2	18,8	11	3,6	3,5	-2,4
2004	-5,3	-7,5	-1	3,2	8,9	14,5	19,1	17,1	11,7	9,5	-2,4	-3,2
2005	-1,1	-3,2	-3,2	1,8	7,7	13,6	19	18	12,8	4,4	1,4	-3,4
2006	-3,5	-4,2	-1	6,7	7,2	12,5	17,9	18	14	10,3	-0,3	-4,2
2007	-2,2	-1,6	3	2,9	10,8	14,3	18,4	17,8	12,9	7,4	2,2	0
2008	-3	-7,4	4	5,7	8,5	14,2	16,5	17,7	8,9	9,8	5,2	-0,8
2009	-1,3	0,5	0,1	5,2	9,9	14,3	18,9	17,6	12	10	4,5	2,6
2010	-3,1	-2,9	1,9	7,9	10,1	14,1	17,4	22,2	15,1	6,8	7,8	-3
2011	-1,5	0,1	-0,4	1,8	6,1	12,7	17,3	15,9	17,1	3,2	1,3	-0,5
2012	-3,5	-3,8	-0,5	4,5	9,7	14,4	21,2	19,3	13,5	9,8	5,9	0,8
2013	-4	2,1	1,8	7,2	11,1	14,3	17,9	20,3	12	6,8	1,9	0,1
2014	2	1,9	3,8	5,4	10,2	12	16,6	19,3	12,5	7,7	4,9	1,2
2015	-5	-2,7	1,2	3	11,5	14,9	19,9	20,9	15,6	11,6	6,8	-1,4
2016	-5,2	-0,3	1	8	9,3	14,4	20,7	20,2	13,5	7,3	2,2	-3,1
2017	-3,5	-1,3	1,2	5,8	10,5	16,1	17	19,3	13,7	8,2	2,4	0,6
2018	-0,8	3,6	1,9	7,6	11,5	16,8	18,7	19,8	15,3	3	6	-0,6
2019	-4,3	2	1,5	4,2	8,1	14,4	16,2	20	11,8	9,4	6,3	0,6
2020	-1,7	-2,5	2,5	5	9	12,6	19,6	20,4	15,9	10,9	3	2,1
2021	-3,7	-1,9	0	3,2	11	11,1	19	19,6	10,6	8,9	5,2	-3,1
2022	-3,6	-1,3	-3,1	3,9	9,5	17,6	18,6	18,8	9,2	8,1	5,7	1,9
2023	0,5	-1,2	0,9	4,6	9,1	17,4	18,9	19,9	16,7	10,7	1,6	4,1
24 Yıllık Ortalama	-5,3	-7,5	-3,2	-1	6,1	11,1	16,2	12,2	8,9	3	-2,4	-4,4



Şekil 3.3: 2000-2023 yılları arası ortalama sıcaklık ve ortalama minimum sıcaklıklar

Güre, aktif fay hatlarına yakınlığı nedeniyle önemli bir jeotermal potansiyele sahiptir. Bölgedeki termal kaynakların sıcaklığı 33-98°C aralığında değişmekte olup bu değerler özellikle bölgesel ısıtma sistemleri için uygundur. Jeotermal kaynaklarının sahip olduğu yüksek olmayan mineral içeriği ve yüksek ısıl kapasitesi de konut ısıtmada verimli şekilde kullanılabilceğini göstermektedir [34].

İller Bankası Genel Müdürlüğü Makine ve Sondaj Dairesi Başkanlığı tarafından Güre jeotermal sahasında bulunan aktif kuyulardan alınan numunelerin Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarı tarafından gerçekleştirilen ve Güre JBIS tesisinde görevli ilgililerden temin edilen kimyasal analiz sonuçlarının özeti Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3.4: Güre jeotermal sahasındaki aktif jeotermal kuyuların kimyasal analizi

Kuyu	EC	pH	B mg/lt	SiO ₂ mg/lt	Derişim (ppm)														
					Na	K	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	NH ₄	F	Br	Li
Igid-1	1550	8,2	4,3	42,4	300	12.1	51.19	0.42	12.70	64.55	54.31	565	<0,01	0.33	<0,01	0.25	5.13	<0,01	0.32
Igj-2	954	8,7	1,8	46,1	220	8.48	21.77	0.24	23.53	41.86		42	367	<0,01	0.10	<0,01	<0,01	5.40	0.12
Igj-3	1333	7,6	1,5	52,0	275	8.28	39.76	0.29	33.33	16.94	46.44	491	<0,01	0.14	<0,01	<0,01	5.15	0.15	0.28
Igj-4	1280	8,3	3,4	49,7	240	6.56	45.72	0.70	26.47	17.94	43.32	458	0.08	<0,01	<0,01	<0,01	4.82	<0,01	0.20

Kimyasal analiz sonucunda, kuyulardan elde edilen jeotermal akışkanın yüksek yoğunlukta olmayan mineralli bir yapıya sahip olduğu, özellikle sülfat içeriği fazla olan kuyularda

(IGJD-1 ve IGJ-3) boru hattı paslanmasının daha hızlı gerçekleşebileceği ve kuyularda ön arıtma filtrelemesi yapılarak sistemin çalışmasını kötü yönde etkileyen bazı kimyasallardan korunulabileceği sonucuna varılmaktadır.

Güre'nin jeolojik yapısı, jeotermal enerjinin sürdürülebilir kullanımına imkân tanımaktadır. Bölge, Edremit Fay Zonu'nun etkisi altında olup yeraltı sularının ısınması için gerekli jeotermal gradyanı karşılamaktadır [34].

Mevcut termal kuyuların debi analizleri, uzun vadeli enerji üretim kapasitesinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle bölgesel ısıtmada kullanılma ve ardından sera ısıtması gerçekleştirmek gibi çoklu kullanım imkânları bulunmaktadır. Bu durum bölgenin sahip olduğu jeotermal enerji kaynağının ekonomik değerini önemli ölçüde arttırmaktadır.

3.2. Güre Jeotermal Bölgesel Isıtma Sistemi

Güre JBIS 2002-2003 ısıtma sezonunda faaliyetlerine başlamıştır. Sistem hizmete girdiği tarihten 2017-2018 ısıtma sezonuna kadar olan süreçte ilave jeotermal kuyu sondajları ile ısıtma sistemi boru hatları geliştirmeleri gibi altyapı gerekliliklerini tamamlamıştır. 2024-2025 ısıtma sezonu itibariyle toplamda 1000 bağımsız abonenin konut ısıtmasını ve civarda bulunan turistik jeotermal tesislerin kapalı alanlarının ısıtılması ile jeotermal sıcak su ihtiyaçlarını karşılar hale gelmiştir.

Faaliyete alındığı günden bu yana eklenen yeni boru hatları ile artan ısıtma talebine ilave farklı bir enerji kaynağı olmadan cevap veren Güre JBIS'de farklı dönemlerde ve sondaj derinliklerinde birden fazla jeotermal üretim kuyusu aktif olarak kullanılmıştır. Ancak hali hazırda toplam 4 adet aktif üretim kuyusu ile ısıtma ihtiyacı karşılanmaktadır. Sistemdeki enerji kaynağı olan jeotermal akışkandan sağlanan ısı transfer yalnızca ısı merkezinde konumlandırılan 4 adet ısı eşanjöründe gerçekleşmekte olup ısıtması sağlanan binaların girişlerinde veya farklı merkezlerde eşanjör sistemi bulunmamaktadır.

Ulusal kaynak niteliğinde olan ve bölgenin doğal zenginliği kabul edilen jeotermal kaynaklı ısıtma sisteminden faydalanan yöre halkı, diğer enerji kaynaklarına oranla daha ekonomik bir şekilde konut ısıtma hizmetine ulaşmaktadır. Ayrıca coğrafi özellikleri itibariyle turistik bir özelliğe sahip olan Güre'nin doğal güzellikleri, yenilenebilir kaynak kullanımı sayesinde korunmaktadır.

Güre Jeotermal Bölgesel Isıtma Sisteminin işleyişi, jeotermal akışkanın çıkarıldığı jeotermal üretim kuyularından elde edilen jeotermal akışkanın sisteme ait tüm süreçlerin işletildiği ve kontrolünün sağlandığı ısı merkezine taşınması ile başlamaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Güre JBIS ısı merkezi

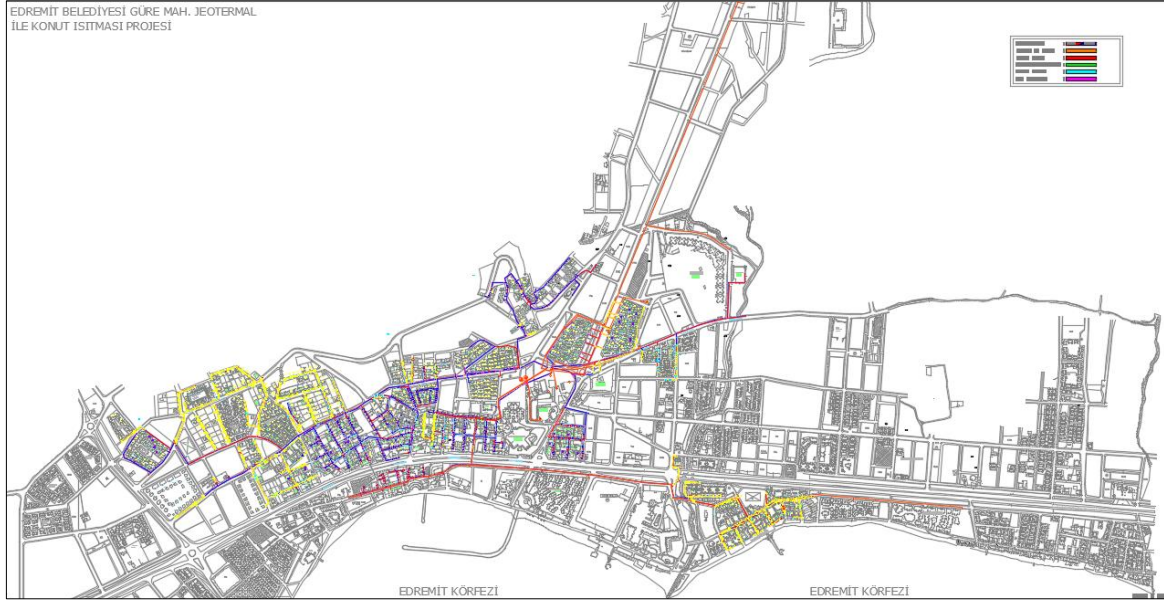
Jeotermal akışkanın üretim kuyularından ısı merkezine taşınmasına kadar olan ilk aşamada; üretim kuyuları, kuyu pompaları ve iletimi sağlayan boru iletim hatları görev almakta olup gerçekleştirilen bu ilk çevrim enerji üretim çevrimini (EÜÇ) oluşturmaktadır.

EÜÇ vasıtasıyla kuyulardan eldesi ve ısı merkezine taşınma işlemi gerçekleştirilen yüksek enerjili jeotermal akışkanın, ısı merkezinde bulunan 4 adet ısı eşanjörüne ulaşması ile ikinci çevrim devreye girmektedir. Enerji dağıtım çevrimi (EDÇ) olarak adlandırılan bu ikinci süreçte, jeotermal akışkan atmosfer basıncı altında yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip ısı eşanjör plakalarına ulaşmaktadır. Burada ısıtılması istenen kapalı mekânlara ait kalorifer tesisat hattı dönüş hattından gelen tesisat suyuna enerjisini aktaran jeotermal akışkan, kalorifer tesisatı gidiş hattı suyunun ısıtılması işlemi gerçekleştirilmektedir.

Son aşamada ise, ısınan ve enerjisi yükselen kalorifer tesisatı gidiş hattı suyunun eşanjörler ile ısıtma bölgeleri arasında yer alan devirdaim pompaları ve boru hatları marifetiyle

ısıtılmak istenen mekânlara ulaştırılması ile son çevrim olan enerji tüketim çevrimi de (ETÇ) tamamlanmaktadır. ETÇ’de devirdaim pompaları ile boru iletim hattı yer almaktadır.

Açıklanan 3 ayrı çevrim neticesinde jeotermal akışkanın enerjisi kalorifer tesisat suyuna aktarılarak binaların ısıtılması sağlanmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Güre JBIS abone ve hat projesi

Isıtma sezonu boyunca IGJD-1 ile IGJ-3 (arıza vb. hallerde yedeği IGJ-4) olmak üzere 2 adet üretim kuyusundan beslenen ve ortalama 76 °C sıcaklıkta bulunan jeotermal akışkan, ısı enerjisinin büyük bir kısmını kalorifer tesisat suyuna aktarmasının ardından eşanjör plakalarından 41 ila 45 °C aralığında değişen sıcaklıklarda çıkmaktadır. Eşanjörlerden ayrılan jeotermal akışkanın kütsel debisinin yaklaşık %75-80'lik kısmı civarda bulunan turistik jeotermal tesislerin jeotermal akışkan ihtiyacını karşılamak için devirdaim pompaları ile aktarılırken, kalan küçük kısım reenjeksiyon kuyuları ve doğal yollar ile dışarıya (aktif üretim kuyularının rezervuar sıcaklıklarının korunması amacıyla) atılmaktadır. Reenjeksiyon kuyusu dışına gerçekleştirilen tahliye ile jeotermal kaynak rezervuar sıcaklığının belirli bir seviyede tutulması sağlanmaktadır.

Isıtma sezonu dışında kalan dönemde ise turistik tesislerin jeotermal su ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla 56 °C'lik üretim kaynağına sahip IGJ-2 üretim kuyusu aktif olarak kullanılmakta ve diğer kuyuların ısıtma sezonuna kadar kullanılmaması ile rezervuar dinlendirilmesi sağlanmaktadır. IGJ-2 üretim kuyusunun çalıştığı dönemde ısı merkezine

ulaştırılan jeotermal akışkan, ısı eşanjörleri ve kapalı mekân ısıtma hattı baypas edilerek akışkanın doğrudan turistik tesislere iletimi gerçekleştirilmektedir. Bu sayede yörenin ekonomik gelir kalemlerinden birisi olan jeotermal sağlık turizminin yıl boyunca kesintisiz olarak sürdürülmesine imkân ve kaynak sağlamaktadır (Şekil 3.6) [35].



Şekil 3.6: Güre JBIS üretim kuyuları ile desteklenen turistik tesisler

Bölgede Güre JBIS aracılığıyla desteklenen özel sektöre ait toplam 13 adet jeotermal turistik tesis bulunmaktadır. Bahsedilen bu destek; sıcak jeotermal akışkandan kaplıca amaçlı, kapalı alan ısıtma amaçlı veya hem kaplıca hem de kapalı alan ısıtmasını gerçekleştirecek şekilde sağlanmaktadır.

Güre jeotermal sahasına yakın mesafelerde bulunan ve kaplıca ile kapalı alan ısıtması amacıyla Güre JBIS'ye ait jeotermal üretim kuyularını kullanan turistik tesislerin kullanım durumlarının ilgililerden alınan özeti Tablo 3.5'te sunulmuştur.

Tablo 3.5: Turistik tesislerin Güre JBIS kuyularından faydalanma durumları

Tesis No	Termal Tesis	Kaplıca Amaçlı Jeotermal Kullanım	Isıtma Amaçlı Jeotermal Kullanım
1	Güre Termal Resort	-	+
2	Hattuşa Vacation Thermal Club	-	+
3	Dedeman Güre Nurhayat Thermal Resort	+	-
4	1774 Kazdağı Termal Otel	+	-
5	Form Termal Otel	+	+
6	Medila Thermal Health Club	+	-
7	Ramada Resort Thermal Kazdağları	+	-
8	Güre Afrodit Termal Otel	+	+
9	Güre Saruhan Termal Otel	+	+
10	Körfez Termal Otel	-	-
11	Adrına Termal Health	-	-
12	Kazdağları Allia Thermal Health	+	+
13	Venüs Termal Butik Otel	+	-

* Kaplıca amaçlı kullanımı bulunmayan termal tesislerin kendilerine ait jeotermal üretim kuyuları bulunmaktadır. Ancak arıza vb. durumlar halinde Güre JBIS'ye ait jeotermal üretim kuyulardan faydalanmalarını sağlayacak iletim alt yapısı bulunmaktadır.

3.2.1 Sistemin Şematik Yapısı

Güre JBIS, ısıtma sezonu ve ısıtmanın olmadığı yaz sezonu olmak üzere iki farklı üretim döngüsüne göre işletilmektedir. Bu durumun temel sebebi sistemin enerji kaynağını oluşturan jeotermal akışkanın, prosesin son aşamasında turistik jeotermal tesislerde kullanılmasıdır.

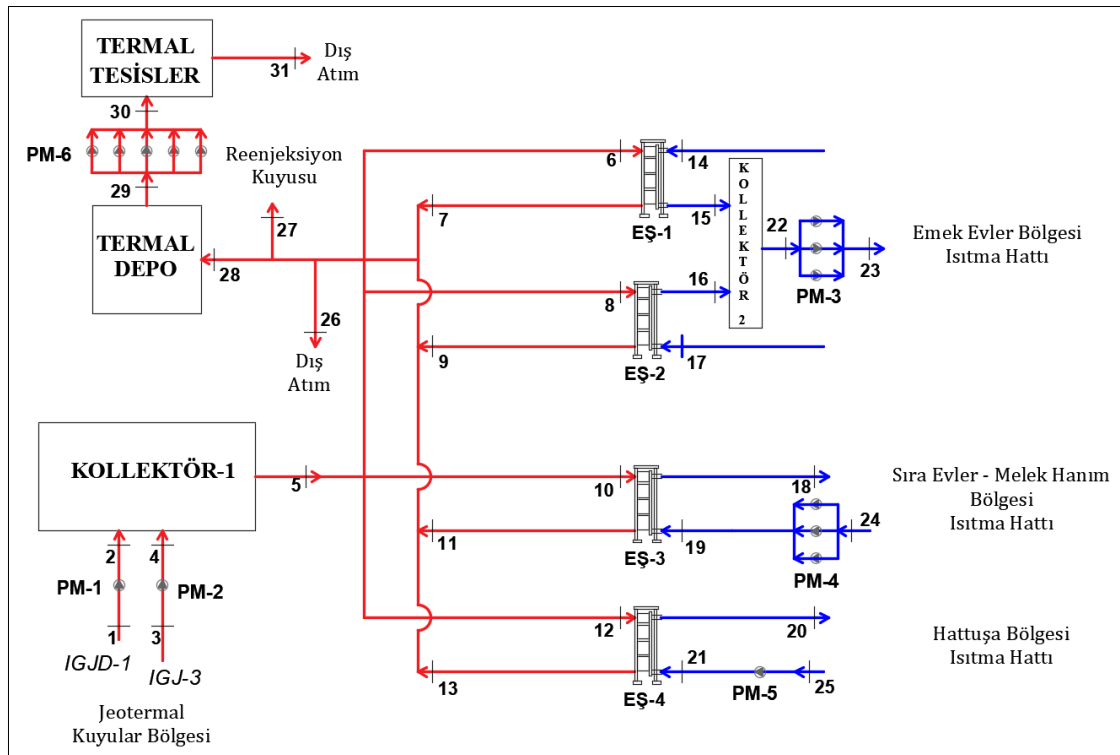
Isıtma sezonu dâhilinde gerçekleştirilen döngüde, yaz dönemine kıyasla daha yüksek ısı enerjisiye sahip 2 ayrı jeotermal üretim kuyusu kullanılmaktadır (IGJD-1 ve IGJ-3 veya arıza yedeği konumunda bulunan IGJ-4 kuyusu). Kuyulardan elde edilen jeotermal akışkan, ısı merkezinde yer alan 1 numaralı kollektöre girmesini müteakip konut ısıtması amacıyla ısı eşanjörlerine yönlendirilmektedir. Eşanjör iç plakalarında jeotermal akışkandan gerçekleşen ısı enerjisi transferi ile ısınan kalorifer tesisat suyu, eşanjörlerden çıkarak kapalı mekân ısıtması için ETÇ'ye ait boru hatlarından ısıtma bölgelerine sevk edilmektedir.

Isı eşanjörleri çıkışlarında sıcaklık değeri görece azalmış olan jeotermal akışkan ise önce termal depoya ve oradan da jeotermal turistik tesislere ulaştırılmaktadır. Jeotermal tesislere ulaştırılmadan önceki son aşamada ise jeotermal akışkanın bir kısmı rezervuarın beslenmesi amacıyla reenjeksiyon kuyusuna, fazlası ise üretim kuyusunun sıcaklığının belirli seviyede tutulmasını sağlamak amacıyla reenjeksiyon kuyusu dışına gerçekleştirilen doğal atım ile sistemden uzaklaştırılmaktadır.

Sistem üzerinde belirlenen kritik durum noktaları numaralandırılarak akışa ait özelliklerin tespiti bu noktadaki ölçümlere göre gerçekleştirilmiştir. 1 numaralı kollektöre ortalama 75-80 °C sıcak aralığında giren jeotermal akışkan ortalama 40-45 °C'lik sıcaklık ile turistik tesislere ulaştırılmaktadır.

Bu çalışmada Güre JBIS'nin temel kurulum amacı olan kapalı mekân ısıtma sisteminin aktif olarak görev aldığı ısıtma sezonu döngüsü dikkate alınarak analizi gerçekleştirilmiştir.

Güre JBIS'nin kış koşullundaki faaliyetine dair işlem adımlarının yer aldığı çalışma şeması Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.7: Güre JBIS ısıtma sezonu çalışma şeması

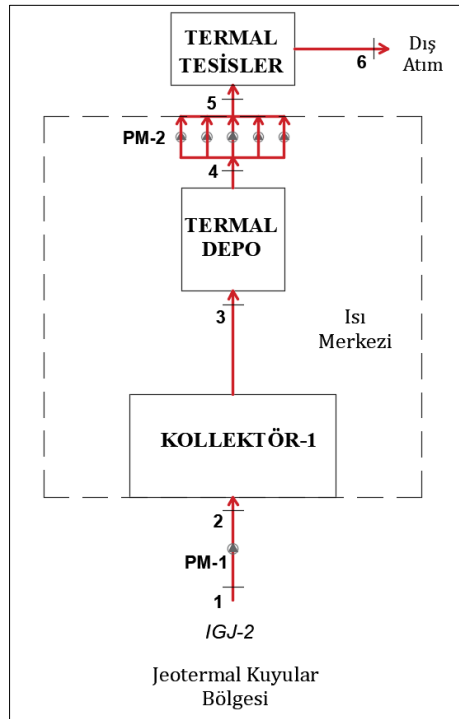
Isıtma sezonu harici dönemlerde aktif olan ve temel amacın jeotermal tesislerde kullanılan jeotermal suyun kaynağından çıkarılması ile ilgili tesislere sevk edilmesi olduğu işletme koşuluna yaz dönemi üretim döngüsü adı verilmektedir.

Yaz dönemi döngüsünde, rezervuar sıcaklığı 56 °C olan IGJ-2 üretim kuyusundan elde edilen jeotermal akışkan ısı merkezinde getirilmekte ardından sırasıyla 1 numaralı kollektör ve termal depo yolunu izleyerek ortalama 40-45 °C sıcaklıkta turistik tesislere ulaştırılmaktadır.

Güre JBIS'ne ait temel sistem bileşenleri olan eşanjörler ve ETC'ye ait devirdaim pompaları yaz dönemi üretim döngüsünde kullanılmamaktadır.

Konut ısıtmasının gerçekleştirilmediği yaz döneminde baypas edilen ve ısıtma sezonu boyunca planlı kontroller, arıza vb. haller dışında aktif olarak çalışan ısı merkezi bileşenleri detaylı bakım ve temizliğe alınmaktadır.

Güre JBIS'nin yaz koşulundaki faaliyetine dair işlem adımlarının yer aldığı çalışma şeması Şekil 3.8'de sunulmuştur.



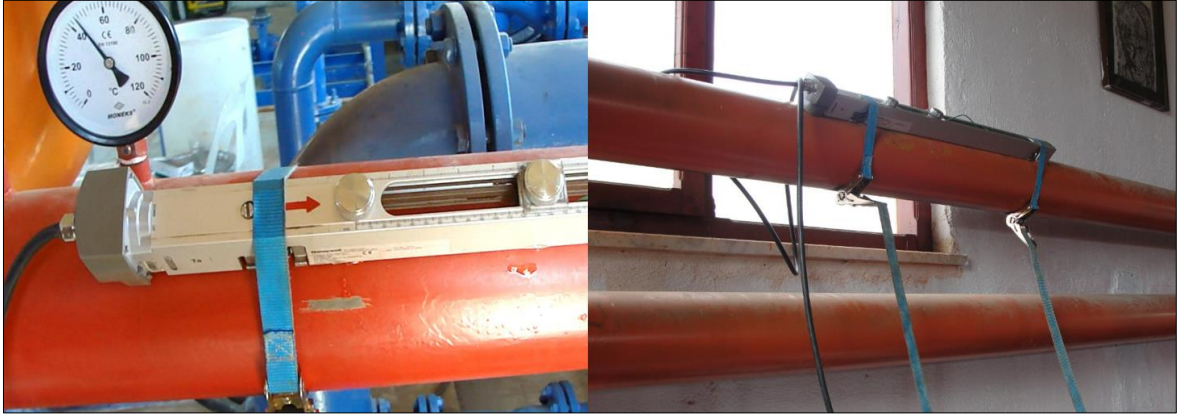
Şekil 3.8: Güre JBIS yaz sezonu çalışma şeması

Üretim kuyuları, sisteme kaynak oluşturdıkları çalışma sezonları dışında kalan dönemlerde dinlendirilmektedir. Aktif üretim kuyularının jeotermal akışkan derinlik seviyeleri, tag line (işaretli kablo) kullanılarak belirli aralıklarla ölçülmekte ve güncel durumları gözlenmektedir.

3.2.2 Termodinamik Durum Noktalarına Ait Operasyonel Veriler

Bir enerji sisteminin performans değerlendirmesinden elde edilecek sonuçların doğruluğu, sistemin çalışmasına yönelik toplanan verilerin doğruluğu ile doğrudan ilişkilidir.

Bu analize temel teşkil edecek olan verilerin elde edildiği veri toplama süreci, Güre JBIS'e kurulan veri toplama sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem durumunun değerlendirilmesinde önemli olduğu belirlenen kritik noktalarda elektromanyetik ve ultrasonik debimetreler vasıtasıyla debi değerleri ölçülürken, sıcaklık değerleri termal direnç termometresi ile basınç değerleri ise sistemde mevcut olan manometreler aralığıyla elde edilmiştir. Yapılan bu ölçümler ile sistemin detaylı olarak izlenmesi neticesinde jeotermal akışkanın, kaynaktan başlayıp son kullanıcı ihtiyacının da karşılanmasından sonraki aşama olan yeraltına tahliyesine kadarki süreci eksiksiz olarak takip edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Ultrasonik debimetre ile hat tesisat debilerinin ölçümü

Bu kapsamda Güre JBIS'in izlenmesinde kullanılan ve hangi parametrenin hangi ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirildiği Tablo 3.6'da özetlenmiştir.

Tablo 3.6: Ölçümlerde kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri

Ölçüm	Ölçüm Cihazı	Teknik Özellikler		Ölçüm Amacı	
Sıcaklık	Termal Direnç Termometresi	Ölçüm Aralığı	-50 ile +180 °C	Kuyu başı sıcaklıklarıyla, eşanjör ve pompa giriş-çıkış sıcaklıkları gibi ısı merkezindeki kritik noktalarındaki sıcaklık ölçümleri.	
		Sensör	Pt100, Klas A, 4 Telli		
		Doğruluk	\pm °C \pm Ohm -50 °C 0,25 0,1 0 °C 0,15 0,06 100 °C 0,35 0,13		
Hacimsel Debi	Transit Zamanlı Portatif Ultrasonik Debimetre	Ölçüm İşlevselliği	Standart fiili hacimsel debi ve toplam akış miktarı	Jeotermal kuyu debi ölçümleriyle, ısı merkezindeki primer ve sekonder devredeki hacimsel debi ölçümleri.	
		Ölçüm Aralığı	0 ile 20 m/s		
		Doğruluk	Ölçüm değerinin $< \pm 1\%$, (DN ≥ 50 mm için)		
		Tekrarlanabilirlik	$< \pm 0,2\%$		
		Proses Koşulları	Katı partikül içeriği $< 5\%$ (hacimsel) Gaz içeriği $< 2\%$ (hacimsel)		
		Boru Çapları	DN50 ile DN600		
	Proses Sıcaklıkları	-40 °C ile 120 °C			
	Elektro-manyetik Debimetre	Elektro-manyetik Debimetre	Doğruluk	$\leq \pm 0,3\%$ veya $0,2\%$ of MV	Isı merkezine giren toplam jeotermal ekışkan debisinin ölçümü.
			Kaplama	Propilen	
			Boru Çapı	DN150	
Proses Sıcaklıkları			-5 ile 90 °C		
Elektrik Gücü	Üç Fazlı Güç Analizatörü	V-mss wye ölçümü	57 V/66 V/110 V/120 V/127 V/220 V/ 230 V/ 240 V/ 260 V/ 277 V/ 347 V/ 380 V/ 400 V/ 417 V/ 480 V ac	Kuyu ve sirkülasyon pompalarının güç tüketimi değerlerinin ölçümleri.	
		Yapısal Hata	\pm (ölçülen değer $\%0,2$ 'si + 5 dijit)		
		İşletim (Çalışma) Hatası	\pm (ölçülen değer $\%0,5$ 'i + 10 dijit)		
		Çözünürlük	0,1V		

Alınan ölçüm verileri data logger (veri kaydedici) vasıtasıyla toplanarak bir veri havuzu oluşturulmuştur. Toplanan bu başlangıç verilerinin ardından, analiz için 28.01.2023 tarihi seçilmiştir. Belirlenen tarihte dış hava sıcaklık değeri 8,39 °C ve dış basınç değeri 101,32 kPa olarak ölçülmüştür.

Belirlenen koşullar altında sisteme enerji kaynağı oluşturan IGJD-1 ile IGJ-3 kuyularından çıkarılan jeotermal akışkan, ısı merkezinde yer alan 1 numaralı kollektörde 76,47 °C sıcaklığında toplanmış ve 4 adet ısı eşanjörüne yine aynı sıcaklıkta taşınmıştır. Isı eşanjörlerindeki ısı transferlerinin ardından Emek Evler, Sıra Evler-Melek Hanım, Hattuşa Bölgesi kalorifer tesisatı sıcak su akışının sıcaklıkları sırasıyla 49,90 °C, 49,12 °C ve 49,09 °C değerlerine çıkarılmıştır.

Eşanjörlerde ısıl enerjisi azalan jeotermal akışkan, 4 eşanjörden sırasıyla 42,33°C, 42,19 °C, 45,58 °C ve 41,65 °C sıcaklıkta ayrılmıştır. Ardından kütleli debisinin %24'lük kısmını reenjeksiyon ve tahliye hatları ile kaybettikten sonra 43,11 °C sıcaklık ve 35,73 kg/s debi değerleri ile termal depoda toplanmıştır.

Termal depo çıkışına konumlandırılan sirkülasyon pompalarının sağladığı basıncın etkisi ile 43,61 °C sıcaklıkta jeotermal tesis gidiş hattına verilen jeotermal akışkan, tesislerdeki kullanımının ardından 26 °C sıcaklıkta dışarıya atılmıştır (Tablo 3.7).

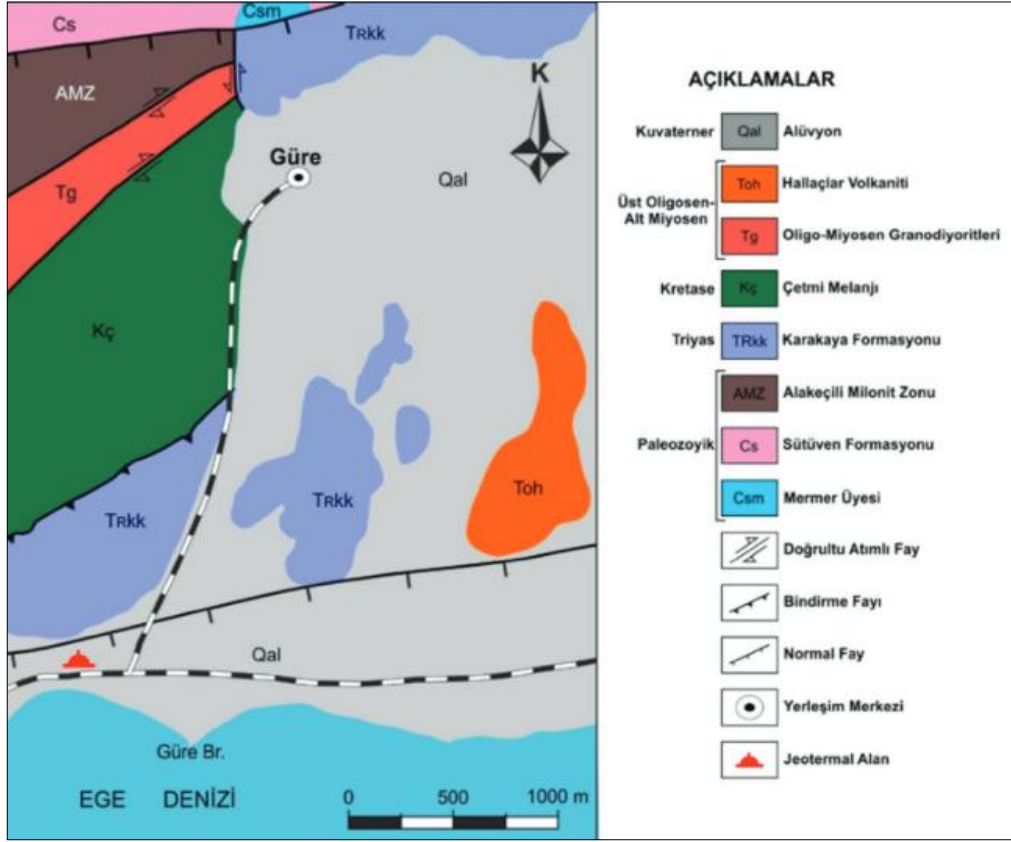
Tablo 3.7: Termodinamik durum noktalarına ait operasyonel veriler

Durum Noktası	Akışkan Tipi	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Kütleli Debi (kg/s)
0	Su	8,39	101,32	-
1	Jeo. Akışkan	89,17	101,32	20,57
2	Jeo. Akışkan	89,67	151,98	20,57
3	Jeo. Akışkan	65,55	101,32	26,21
4	Jeo. Akışkan	66,05	162,11	26,21
5	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	46,98
6	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	9,61
7	Jeo. Akışkan	42,33	101,32	9,61
8	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	17,11
9	Jeo. Akışkan	42,19	101,32	17,11
10	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	13,48
11	Jeo. Akışkan	45,58	101,32	13,48
12	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	6,78
13	Jeo. Akışkan	41,65	101,32	6,78
14	Su	41,67	344,49	51,50
15	Su	48,04	283,70	51,50
16	Su	50,33	273,56	71,60
17	Su	42,14	344,49	71,60
18	Su	49,12	607,92	67,82
19	Su	42,98	810,56	67,82
20	Su	49,09	374,88	32,48
21	Su	41,82	749,77	32,48
22	Su	49,4	277,62	123,10
23	Su	49,9	587,66	123,10
24	Su	42,28	506,60	67,82
25	Su	41,32	303,96	32,48
26	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	6,25
27	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	5,00
28	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	35,73
29	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	35,73
30	Jeo. Akışkan	43,61	547,13	35,73
31	Jeo. Akışkan	26,00	101,32	35,73

3.2.3 Güre Jeotermal Sahası

Anadolu'nun Kuzey Batı bölgesinde yer alan Güre jeotermal sahasının temelini Paleozoyik yaşlı Kazdağ Grubu'na ait kayalar oluşturmaktadır. Aktif fay hatlarından olan Edremit Fay

Zonu'nun doğusunda bulunan Güre jeotermal alanı Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu ve güney eğimli fay sistemi tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 3.10) [36].



Şekil 3.10: Güre bölgesi jeoloji haritası

Bölgedeki jeotermal kaynakların çıkışları tektonik hatların, basamak şeklinde sıralanan normal fayları ve bu faylarla oluşan çatlak sistemleri ile gerçekleşmektedir. Bölgenin kayaç yapısı derinlere süzülen akışkanların depolanabileceği gözenekli ve geçirimli özelliğe sahiptir. Derinlerde biriken ve ısınan sular fay ve çatlak yapısı vasıtasıyla yeryüzüne çıkmaktadır [36].

Jeotermal Kuyular

Güre jeotermal sahasında çeşitli derinliklere sahip ve muhtelif dönemlerde açılan 10 adet jeotermal üretim kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyulardan 6 tanesi (Güre-2, Güre-3, IGJ-1, G1, G3 ve V4) ömrünü tamamlayarak kullanılamaz hale gelmiştir. Hali hazırda sistem kullanımında bulunan 4 adet jeotermal üretim kuyusuna (IGJD-1, IGJ-2, IGJ-3 ve IGJ-4) ait bilgiler sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

IGJD-1 Jeotermal Kuyusu

Isıtma sezonu boyunca kullanımda bulunan aktif jeotermal üretim kuyularından bir tanesidir. 2017 yılı itibariyle sondajı tamamlanarak sistem kullanımına verilmiştir. 1350 metre derinliğe ve 30 litre/saniye debi değerine sahip olan kuyunun rezervuar sıcaklığı 96 °C'dir (Şekil 3.11).

Jeotermal akışkanın üretim kuyusundan yeryüzüne çıkarılması, dikey eksenli yapıdaki derin kuyu pompası ile sağlanmaktadır. Kuyu sahip olduğu rezervuar sıcaklığı ve kütleli üretim kapasitesi nedeniyle, bölgesel ısıtma sisteminin ısıtma kapasitesini en çok arttıran aktif üretim kuyusu konumundadır.

IGJD-1 üretim kuyusundan elde edilen jeotermal akışkan, yerin ortalama 1,5 metre derinliğine döşenen yalıtımlı boru hattı vasıtasıyla ortalama 350 metre uzaklıkta bulunan ısı merkezine taşınmaktadır.



Şekil 3.11: IGJD-1 jeotermal kuyusu

IGJ-2 Jeotermal Kuyusu

Isıtma sezonu dışındaki dönem boyunca jeotermal turistik tesislerin kullanımında bulunan aktif jeotermal üretim kuyusudur. 2011 yılı itibariyle sondajı tamamlanarak sistem kullanımına verilmiştir. 250 metre derinliğe ve 41 litre/saniye debi değerine sahip olan kuyunun rezervuar sıcaklığı 56 °C'dir (Şekil 3.12) [37].

Jeotermal akışkanın üretim kuyusundan yeryüzüne çıkarılması, dalgıç tipteki derin kuyu pompası ile sağlanmaktadır.

IGJ-2 üretim kuyusundan elde edilen jeotermal akışkan, yerin ortalama 1,5 metre derinliğine döşenen yalıtımlı boru hattı vasıtasıyla ortalama 20 metre uzaklıkta bulunan ısı merkezine taşınmaktadır.



Şekil 3.12: IGJ-2 jeotermal kuyusu

IGJ-3 Jeotermal Kuyusu

Isıtma sezonu boyunca kullanımda bulunan aktif jeotermal üretim kuyularından bir tanesidir. 2011 yılı itibariyle sondajı tamamlanarak sistem kullanımına verilmiştir. 206 metre derinliğe ve 50 litre/saniye debi değerine sahip olan kuyunun rezervuar sıcaklığı 67 °C'dir (Şekil 3.13).

Jeotermal akışkanın üretim kuyusundan yeryüzüne çıkarılması, dalgıç tipteki derin kuyu pompası ile sağlanmaktadır.

IGJ-4 üretim kuyusundan elde edilen jeotermal akışkan, yerin ortalama 1.5 metre derinliğine döşenen yalıtımlı boru hattı vasıtasıyla ortalama 590 metre uzaklıkta bulunan ısı merkezine taşınmaktadır.



Şekil 3.14: IGJ-4 jeotermal kuyusu

3.2.4 Isı Merkezi

Güre JBIS konut ısıtması ihtiyacı bulunan kış döneminde 3 ayrı ısıtma bölgesinin ısıtma ihtiyacını karşılamasının yanında, eşanjör dönüşlerinde soğuyan akışkan ile civarda bulunan turistik jeotermal tesislerin jeotermal sıcak su ihtiyacını da karşılamaktadır (Tablo 3.8).

Isıtma sürecinde herhangi bir otomasyon cihazı kullanılmamaktadır. Isı merkezinde görevli personel tarafından akışların debi ile sıcaklık kontrolleri manuel olarak gerçekleştirilmekte ve ihtiyaç halinde sisteme gerekli müdahaleler yapılmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16: Isı merkezinin içeriden görünümü

Sistemde Emek Evler Bölgesi Isıtma Hattı ile Sıra Evler – Melek Hanım Bölgesi Isıtma Hattına sıvı akışının sağlanması amacıyla 3’er tane sirkülasyon pompası, Hattuşa Bölgesi Isıtma Hattında ise 1 adet sirkülasyon pompası çalışmaktadır. Emek Evler Bölgesi Isıtma Hattında bulunan 3 sirkülasyon pompasından 1 tanesi sistem yedeği olarak bulundurulmaktadır. Isıtma hatlarını destekleyen sirkülasyon pompalarının tamamı aynı tip ve modelde olup değişken debi sağlayabilmek amacıyla frekans kontrollü motorlara sahiptir (Tablo 3.9).

Tablo 3.9: Konut ısıtma hatlarını destekleyen sirkülasyon pompalarının özellikleri

Sirkülasyon Pompa No	Desteklediği Isıtma Hattı	Adedi	Güç Faktörü [cos φ]	Güç [kW]	Devir [d/dak]
1	Emek Evler Bölgesi Isıtma Hattı	3 (1 tanesi yedek)	0,87	75	1475
2	Sıra Evler – Melek Hanım Bölgesi Isıtma Hattı	3			
3	Hattuşa Bölgesi Isıtma Hattı	1			

Eşanjörlerde ısı transferleri neticesinde ilk durumdaki ısı enerjisini kaybeden jeotermal akışkanların toplandığı toplam 5 ton kapasiteye sahip bir jeotermal depo mevcuttur. Kalın metal sac malzemeden imal edilen jeotermal depo, ısı izolasyonu sağlaması amacıyla yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: Jeotermal depo

Jeotermal depoda toplanan ortalama 45 °C'deki jeotermal akışkan, değişken debi sağlayabilme özelliğine sahip aktif 5 adet sirkülasyon pompası vasıtasıyla turistik jeotermal tesislere iletilmektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18: Turistik jeotermal tesisleri destekleyen sirkülasyon pompaları

Jeotermal turistik tesisleri destekleyen sirkülasyon pompalarının tamamı aynı tip ve modelde olup değişken debi sağlayabilmek amacıyla frekans kontrollü motorlara sahiptir. Jeotermal deponun çıkışından aldığı jeotermal akışkanın turistik tesislere ulaşması amacıyla çalışan sirkülasyon pompalarına ait bilgiler Tablo 3.10’da sunulmuştur.

Tablo 3.10: Turistik jeotermal tesisleri destekleyen sirkülasyon pompalarının özellikleri

Desteklediği Isıtma Hattı	Adedi	Güç Faktörü [cos φ]	Güç [kW]	Devir [d/dak]
Turistik Jeotermal Tesisler Hattı	5	0,90	7,5	2920

3.2.5 Boru Hatları

Dağıtım ağını oluşturan boru hatları, jeotermal akışkanın üretim kuyulardan ısı eşanjörlerine taşınması ve ardından ısınan kalorifer tesisat hattı suyunun kullanıcılara dağıtılması için gerekli bileşenlerdir.

Sistemde bulunan boru hatlarının tamamı ısı kaybının önlenmesi amacıyla farklı çaplardaki izolasyonlu borulardan oluşmaktadır. Toplamda 50271 metre uzunluğunda bulunan boru hattı, ortalama 1,5 metre derinliğinde toprağa gömülü vaziyettedir (Tablo 3.11).

Tablo 3.11: Güre JBIS boru hattı bilgileri ve uzunlukları

Anma Çapı	Dış Çap	Et Kalınlığı (min)	Boru Cinsi	Boru Hattı Uzunluğu
DN	mm	mm		m
Ø 200	219,10	4,50	Ön İzolasyonlu Paket Boru	5399
Ø 170	190,70	4,00	Ön İzolasyonlu Paket Boru	911
Ø 160	179,50	4,00	Ön İzolasyonlu Paket Boru	567
Ø 150	168,30	4,00	Ön İzolasyonlu Paket Boru	305
Ø 125	139,70	3,60	Ön İzolasyonlu Paket Boru	8314
Ø 110	125,70	3,60	Ön İzolasyonlu Paket Boru	8729
Ø 100	114,30	3,60	Ön İzolasyonlu Paket Boru	2848
Ø 80	88,90	3,20	Ön İzolasyonlu Paket Boru	2630
Ø 65	76,10	2,90	Ön İzolasyonlu Paket Boru	8208
Ø 50	60,30	2,90	Ön İzolasyonlu Paket Boru	3746
Ø 40	48,30	2,60	Ön İzolasyonlu Paket Boru	2212
Ø 32	42,40	2,60	Ön İzolasyonlu Paket Boru	4564
Ø 25	33,70	2,30	Ön İzolasyonlu Paket Boru	1838

3.3 Analizde Kullanılan Veriler ve Temel Varsayımlar

Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalar, Güre JBIS ısı merkezinin 28.01.2023 tarihli gerçek operasyonel ölçüm verileri temel alınarak, referans ortam koşulları olarak dış hava sıcaklığı ve basınç değerlerinin ise sırasıyla 8.39 °C ve dış 101.32 kPa olduğu kabullerine göre yapılmıştır.

Çalışmada, sistemin enerji kaynağını oluşturan jeotermal akışkanın kimyasal özelliği ile ilgilenilmemiş ve termodinamik olarak saf su özelliklerini taşıdığı kabul edilerek hareket edilmiştir.

2023 yılı itibariyle elektrik enerjisi maliyetinin kW başına 0,1474 \$/h olduğu ile Güre JBIS’de kullanılan sistem bileşenlerinin genel ekonomik kullanım ömürlerinin 25 yıl olduğu kabulü yapılmıştır [38] [39].

Çalışmada gerçekleştirilen ekonomik hesaplamalarda kullanılmak üzere kabul edilen değerler Tablo 3.12’de sunulmuştur.

Tablo 3.12: Ekonomik hesaplamalarda kullanılmak üzere kabul edilen değerler

İfade	Açıklama	Matematiksel Değer	Hesaplama/ Verinin Kaynağı
r	Enflasyon oranı (yıllık)	0,041 (%4.1)	2023 yıllık ortalama TÜFE artışı [40].
i_n	Nominal faiz oranı (yıllık)	0,0568 (%5,68)	Yaklaşık ABD 10 yıllık hazine tahvili getirisi, 2023 [41].
i	Reel faiz oranı	0,015 (%1,5)	$i = \frac{1 + i_n}{1 + r} - 1 = \frac{1.0568}{1.041} - 1 = 0,0151$
n	Sistemin ekonomik ömrü	25 yıl	Jeotermal ısıtma sistemi için genel kabul görmüş ekonomik ömür süresi olarak kabul edilmiştir.
τ	Sistemin yıllık çalışma saati	5535 saat	Gerçekleştirilen ölçümler neticesinde elde edilen, 2022-2023 ısıtma sezonunda Güre JBIS’inin aktif olarak çalıştığı saat değeridir.

Jeotermal üretim kuyusundan elde edilen jeotermal akışkanın kaynağının güneş ile yer kabuğu içerisinde meydana gelen radyoaktif bozunmalar olduğu bilinen ve yerin derinliklerinden gelen yenilenebilir bir enerji kaynağı olan jeotermal akışkanın birim enerji maliyetinin, onun yeryüzüne çıkarılmasında kullanılan kuyu pompası tarafından harcanan elektrik tüketim maliyetine eş değer olduğu kabul edilmiştir.

Bu nedenle ısıtma sezonunda üretimin sağlandığı IGJD-1 ve IGJ-3 kuyularının rezervuarında durgun halde bulunan jeotermal akışkanın sistem üzerine bir maliyet etkisi bulunmamaktadır. Ancak kuyu pompaları vasıtasıyla yeryüzüne çıkarıldığı anda, kuyu pompalarının harcamış olduğu elektrik enerjisi nedeniyle jeotermal akışkana ait ekonomik bir maliyetten söz edilebilir olacaktır.

Bu sebeple jeotermal üretim kuyularında işlenmemiş vaziyette bulunan jeotermal akışkanın 1 ve 3 numaralı durum noktaları için birim ekserji maliyetlerinin sırasıyla $c_1 = 0$ (\$/GJ) ve

$c_3 = 0$ (\$/GJ) olduğu kabulleri yapılmıştır. Böylece 2023 yılı elektrik maliyeti ile pompalarının güç değerleri kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Güre JBIS; vakıf, kamu kurumu ve özel iştiraklerin yoğun destekleri ile bir nevi imece usulü bir yöntem ile kuruluşunu gerçekleştirdiği için, kurulum maliyetlerine ilişkin net verilere ulaşılması mümkün olmamıştır. Bu sebeple ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek olan eksergoekonomik analize kaynak oluşturan ekonomik maliyet değerlerinin belirlenmesi amacıyla; öncelikli olarak sistem işleyişinde görev alan tüm bileşenlerin etiket bilgileri vasıtasıyla 2025 yılındaki güncel maliyetlerinin tespiti sağlanmıştır. Ardından Amerika Birleşik Devletleri Tüketici Fiyat Endeksi (ABD PPI-Produce Price Index) verilerinden faydalanılarak güncel maliyetlerin, kurulum yılı olan 2002 yılı değerlerine dönüşümü ile analizin yapıldığı 2023 yılı maliyet değerlerine dönüşümleri gerçekleştirilmiştir.

3.4 Maliyet Hesaplamaları

Güre GJBIS için sisteminin ilk kurulumu esnasında harcanan sermaye yatırımı maliyetine dair geçmişe dönük bir veri bulunmaması sebebiyle, sistemde yer alan bileşenlere ait güncel satın alma maliyetleri 2025 yılı mart ayı dönemi için üretici ve satıcı firmalardan temin edilmiştir (Tablo 3.13 ve Tablo 3.14).

Tablo 3.13: Mart-2025 dönemi için geçerli ekipman satın alma maliyetleri

Ekipman	Güncel Satın Alma Maliyeti, <i>PEC</i>₂₀₂₅ (\$)
Eşanjör-1	13550
Eşanjör-2	13550
Eşanjör-3	15525
Eşanjör-4	17580
Pompa-1	2250
Pompa-2	1580
Pompa-3	3050
Pompa-4	1150
Pompa-5	3050
Pompa-6	1150
Kollektör-1	825
Kollektör-2	475
Jeotermal Depo	5275

Tablo 3.14: Mart-2025 dönemi için geçerli boru hattı satın alma maliyetleri

Anma Çapı (DN)	Boru Cinsi	Hat Uzunluğu (m)	Birim Fiyat (\$/m)	Toplam Satın Alma Maliyeti, PEC ₂₀₂₅ (\$)
Ø 200	Ön İzolasyonlu Paket Boru	5399	45,19	243986
Ø 170	Ön İzolasyonlu Paket Boru	911	35,60	32432
Ø 160	Ön İzolasyonlu Paket Boru	567	32,86	18632
Ø 150	Ön İzolasyonlu Çelik Boru	305	54,79	16712
Ø 125	Ön İzolasyonlu Paket Boru	8314	27,38	227638
Ø 110	Ön İzolasyonlu Paket Boru	8729	23,35	203781
Ø 100	Ön İzolasyonlu Paket Boru	2848	21,91	62401
Ø 80	Ön İzolasyonlu Paket Boru	2630	19,17	50418
Ø 65	Ön İzolasyonlu Paket Boru	8208	16,43	134859
Ø 50	Ön İzolasyonlu Paket Boru	3746	13,69	51283
Ø 40	Ön İzolasyonlu Paket Boru	2212	10,95	24221
Ø 32	Ön İzolasyonlu Paket Boru	4564	8,90	40620
Ø 25	Ön İzolasyonlu Paket Boru	1838	7,53	13840
			TOPLAM	1120748

Eksergoekonomik analiz kapsamında uygulanan denge eşitlikleri arasında sistem ve bileşen bazında sermaye yatırım bedellerine ait ekonomik değerlere ihtiyaç duyulması sebebiyle, 2025 yılı mart ayı satın alma değerleri olarak temin edilen maliyetlerin kurulum yılı olan 2002 yılı ocak ayına ve analiz tarihi olan 2023 yılı ocak ayına dönüştürülmesi gerekmektedir.

Bu sebeple aşağıda açıklanan adımlar takip edilerek maliyet değerlerinin dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu işlemde ana yol gösterici olarak, Amerika Birleşik Devletleri Çalışma Bakanlığı tarafından hesaplanan ve satın alınan malların veya sağlanan hizmetlerin zaman içerisindeki fiyat dönüşümlerinin yapılmasına imkân tanıyan ABD-PPI verilerinden faydalanılmıştır [40].

ABD-PPI değerleri, temel alınan yıla ait mali değerlerin hesap yılı olarak belirlenen döneme dönüşümünün yapılabilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada sistemin sermaye yatırım maliyetinin ciddi bir kısmını teşkil eden ürünler olan eşanjörler, pompalar, boru hattı, termal depo ve kolektörlere tüketici fiyat dönüşüm

endeksinin uygulanması gerekmektedir. Bu dönüşüm işlemi, ABD Çalışma Bakanlığının 1913'ten günümüze kadar kaydettiği tüketici fiyat endeksi verilerine dayanarak, kullanıcının belirlediği yıl ve ay değerleri arasında otomatik hesaplama yapan çevrimiçi bir dönüşüm robotu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Örnek olması açısından 1 numaralı eşanjörün 2025 yılı mart ayı döneminde sahip olduğu maliyet değeri olan 13550 \$'lık fiyatının, 2023 yılı ocak ayı dönemi ve 2002 yılı ocak ayı dönemlerine dönüşümlerinin gerçekleştirilmesine dair işlemleri özetleyen ekran alıntılarını Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de sunulmuştur [40].

The screenshot shows a web interface titled "CPI Inflation Calculator". It features a blue header with the title. Below the header, there is a text input field with a dollar sign (\$) and the value "13,550.00". To the left of this field is the word "in". Below the input field, there are two dropdown menus: the first is set to "March" and the second is set to "2025". In the center of the interface, a yellow box displays the calculated value "\$12,675.94". Below this, there are two more dropdown menus: the first is set to "January" and the second is set to "2023". At the bottom of the interface is a blue button labeled "Calculate".

Şekil 3.19: 1 numaralı eşanjörün 2025 yılındaki maliyetinin 2023 yılına dönüştürülmesi

The screenshot shows a web interface titled "CPI Inflation Calculator". It features a blue header with the title. Below the header, there is a text input field with a dollar sign (\$) and the value "13,550.00". To the left of this field is the word "in". Below the input field, there are two dropdown menus: the first is set to "March" and the second is set to "2025". In the center of the interface, a yellow box displays the calculated value "\$7,503.79". Below this, there are two more dropdown menus: the first is set to "January" and the second is set to "2002". At the bottom of the interface is a blue button labeled "Calculate".

Şekil 3.20: 1 numaralı eşanjörün 2025 yılındaki maliyetinin 2002 yılına dönüştürülmesi

Tablo 3.13 ve Tablo 3.14'te verilen sermaye yatırımı maliyet değerlerinin 2025 yılı güncel fiyatlarına göre belirlendiği göz önüne alınarak, sistemin 2023-Ocak ayı dönemi ile 2002-

Ocak ayı dönemindeki kurulum maliyetlerinin tespiti yapılmış ve kurulumla ait sermaye yatırım maliyetleri tablosu oluşturulmuştur (Tablo 3.15).

Tablo 3.15: Kurulumla ait sermaye yatırım maliyetleri tablosu

Ekipman	Güncel Satın Alma Maliyeti, PEC_{2025} (\$)	Analiz Yılı Satın Alma Maliyeti, PEC_{2023} (\$)	Kurulum Yılı Satın Alma Maliyeti, PEC_{2002} (\$)
Eşanjör-1	13550	12675	7503
Eşanjör-2	13550	12675	7503
Eşanjör-3	15525	14523	8597
Eşanjör-4	17580	16445	9735
Pompa-1	2250	2104	1246
Pompa-2	1580	1478	874
Pompa-3	3050	2853	1689
Pompa-4	1150	1075	636
Pompa-5	3050	2853	1689
Pompa-6	1150	1075	636
Kollektör-1	825	771	456
Kollektör-2	475	444	263
Jeotermal Depo	5275	4934	2921
Boru Hattı	1120748	1048452	620653

3.5 Kütle, Enerji ve Ekserji Denge Eşitlikleri

Bu çalışmada kütle, enerji ve ekserji denge eşitlikleri kullanılarak enerji ve ekserji akımları bulunmuştur. Jeotermal akışkanın kimyasal yapı özellikleri ihmal edilerek termodinamik açıdan saf su olarak değerlendirilmiştir. Termodinamik özellikler EES Programı aracılığıyla elde edilmiştir.

Kütle denge denklemi:

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (3.1)$$

Güre JBIS için kütle dengesi ise:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_{jeo,i} - \dot{m}_{dışarı} = 0 \quad (3.2)$$

Genel enerji denge denklemi:

$$\dot{E}_{giren} = \dot{E}_{çıkan} \quad (3.3)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Enerji denge eşitliği daha açık bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{giren} h_{giren} = \dot{W} + \sum \dot{m}_{çıkan} h_{çıkan} \quad (3.4)$$

Burada:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{net,giren} = \dot{Q}_{giren} - \dot{Q}_{çıkan} : \text{net ısı akısı},$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{net,giren} = \dot{W}_{giren} - \dot{W}_{çıkan} : \text{birim zamandaki net iş (güç)},$$

h : birim kütlenin entalpisidir.

Kinetik, potansiyel ve küçük ısı ve iş transfer akımlarının ihmal edildiği kabul edilirse, (3.4)'te verilen enerji denge eşitliği (3.5)'deki gibi basitleştirilebilir:

$$\sum \dot{m}_{giren} h_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} h_{çıkan} \quad (3.5)$$

Jeotermal akışkanın enerji değeri n sayıdaki kuyu için (3.6)'daki eşitlikten bulunabilmektedir.

$$\dot{E}_{jeo} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{jeo,i} (h_{jeo,i} - h_0) \quad (3.6)$$

Ekserji, ideal kabul edilen tersinir prosesler haricinde dönüşüm yasasına uymamaktadır. Daha açık şekilde ifade etmek gerekirse ekserji, herhangi bir gerçek süreçte tüketilir ya da tahrip olur. Ekserji tüketimi proses esnasında meydana gelen tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropi ile orantılıdır. Jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerinde proseslerin genelini fiziksel ekserji oluşturmaktadır.

Birim zaman başına genel ekserji denge eşitliği (ekserji akımları olarak):

$$\dot{E}x_{kayıp} = \dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{çıkan} \quad (3.7)$$

veya

$$\dot{E}x_{kayıp} = \dot{E}x_{ısı} - \dot{E}x_{iş} + \dot{E}x_{k\u00fctle,giren} - \dot{E}x_{k\u00fctle,\u00e7ıkan} \quad (3.8)$$

şeklindedir. Eşitlik (3.8)'den faydalanarak genel ekserji dengesi:

$$\dot{E}x_{kayıp} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\u00e7 \psi_\u00e7 \quad (3.9)$$

ayrıca akışın özgül ekserjisi ise:

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (3.10)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada:

\dot{Q}_k : k noktasından ve T_k sıcaklığında sistem sınırından gerçekleşen ısı transfer akımı,

\dot{W} : işi,

ψ : akışın özgül ekserjisini,

h : entalpiyi,

s : entropiyi ve sıfır alt indisi ise P_0 ve T_0 koşullarındaki referans çevre sıcaklığındaki özellikleri ifade etmektedir.

Ekserji akımı ise eşitlik (3.10)'da verilen özgül ekserji ifadesinin kütleli debi ile çarpılması sonucunda elde edilmektedir:

$$\dot{E}x = \dot{m}[(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (3.11)$$

Jeotermal akışkanın ekserji değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$\dot{E}x_{jeo} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{jeo,i} [(h - h_0) - T_0 (s_{jeo,i} - s_0)] \quad (3.12)$$

Eşanjörlerdeki ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_{kayıp,Eş} = \dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{\u00e7ıkan} \quad (3.13)$$

Pompalardaki ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_{kayıp,Pompa} = \dot{W}_{pompa} - (\dot{E}x_{\u00e7ıkan} - \dot{E}x_{giren}) \quad (3.14)$$

Sistemdeki toplam ekserji kaybı:

$$\dot{E}x_{kayıp,Sis} = \sum \dot{E}x_{kayıp,Eş} + \sum \dot{E}x_{kayıp,Boru} + \sum \dot{E}x_{kayıp,Pompa} \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Ayrıca sistemin enerji verimi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{E}_{yararlı}}{\dot{E}_{jeo}} \quad (3.16)$$

Eşanjörün ekserji verimi, soğuk akışkandaki ekserji değişiminin sıcak akışkandaki ekserji değişimine oranıdır.

$$\varepsilon_{Eş} = \frac{\dot{m}_{soğuk}(\psi_{soğuk,çıkan} - \psi_{soğuk,giren})}{\dot{m}_{sıcak}(\psi_{sıcak,giren} - \psi_{sıcak,çıkan})} \quad (3.17)$$

Sistemin ekserji verimi ise aşağıdaki denklem aracılığıyla hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_{Sistem} = \frac{\dot{E}x_{kullanışlı,Eş}}{\dot{E}x_{jeo}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{kayıp,Sis} + \dot{E}x_{reen} + \dot{E}x_{dışatım}}{\dot{E}x_{jeo}} \quad (3.18)$$

Jeotermal kuyulardan elde edilen ısı gücü:

$$\dot{Q}_{üretim} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i C_p (T_{üretim} - T_{atık}) \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada:

\dot{m} : Üretim kuyularının kütleli debisini (kg/s),

C_p : Suyun özgül ısısını (kJ/kgK),

$T_{üretim} - T_{atık}$: Sıcaklık farkı ise atık termal su eşanjör giriş-çıkış su sıcaklık farkını (K) ifade etmektedir.

3.6 SPECO Denklem Eşitlikleri

Bu çalışmada SPECO metodu denklemleri kullanılarak işlem adımları takip edilmiş ve analiz sonucunda; akışa dair bilinmeyenler olan yakıt, ürün, yıkım ve kayıplar ile ilişkili maliyetler ile göreceli maliyet farkı ve eksergoekonomik faktör gibi karar verme odaklı araçlar elde edilmiştir.

Eksergoekonomik analiz için seçilen yöntem olan SPECO metodu ile ilişkili denklemler aşağıda sunulmuştur [22]. Bir ekonomik analiz için kararlı durumda çalışmakta olan sistemin maliyet dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\dot{C}_{\text{Ürün,Top}} = \dot{C}_{\text{Yakıt,Top}} + \dot{Z}_{\text{Top}} \quad (3.20)$$

Yukarıdaki denklemde:

$\dot{C}_{\text{Ürün,Top}}$: Ürünün maliyet oranını,

$\dot{C}_{\text{Yakıt,Top}}$: Yakıtın maliyet oranını ve

\dot{Z}_{Top} : Sermaye yatırımı maliyeti ile işletme ve bakım maliyetleri toplamını

ifade etmektedir.

Ancak bu eşitliği sağlayan bileşenlere ait maliyet değerleri, bileşenin kullanım ömrü boyunca kayda değer ölçülerde değişiklik gösterebilmektedir.

Bu sebeple sisteme uygulanacak olan ekonomik analizde seviyelendirilmiş yıllık maliyetlerin kullanılması gerekmektedir. Seviyelendirilmiş maliyet [42]:

$$C\dot{A}_{\text{Sistem}} = P\dot{W}_{\text{Sistem}} CRF \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir. Burada CRF aşağıdaki gibi yazılabilirken:

$$CRF = i \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.22)$$

$$1+i = \frac{(1+i_n)}{1+r} \quad (3.23)$$

i : reel faiz oranını,

n : yıl cinsinden ömrü,
 i_n : nominal faiz oranını ve
 r : enflasyonu ifade etmektedir.

Sistemin bugünkü değeri:

$$PW_{Sistem} = C_{Sistem} - S_{Sistem} PWF(i, n) \quad (3.24)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada:

S_{Sistem} : hurda maliyetini,
 PWF : bugünkü değer faktörünü ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$PWF = \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (3.25)$$

Seviyelendirilmiş maliyet (CA_{Sistem}), sermaye yatırımı maliyeti (Z_{Sistem}^{CI}) ile işletme ve bakım maliyetleri (Z_{Sistem}^{OM}) için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bunlar aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$Z_{Sistem}^{CI} = \frac{CA_{Sistem}}{\tau} \quad (3.26)$$

ve

$$Z_{Sistem}^{OM} = \frac{CA_{Sistem}}{\tau} \quad (3.27)$$

Burada:

τ : sistemin yıllık çalışma saatini ifade etmektedir.

Bileşen düzeyindeki yıllık seviyelendirilmiş sermaye maliyeti ile işletme ve bakım maliyetleri:

$$Z_k^{CI} = Z_{Sistem}^{CI} \frac{PEC_k}{\sum_{Sistem} PEC_k} \quad (3.28)$$

ve

$$\dot{Z}_k^{OM} = \dot{Z}_{Sistem}^{OM} \frac{PEC_k}{\sum_{Sistem} PEC_k} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada:

PEC_k : sistemdeki k 'inci bileşen için satın alınan ekipman maliyetini ifade etmektedir.

Kararlı şekilde çalışan bir sistemde çevre ile gerçekleşen ısı ve iş etkileşimlerine ilave olarak giren veya çıkan birçok akış olabilmektedir. Bu nedenle eksergoekonomik analizlerde ekserjiler maliyetlendirilirken:

- giren ve çıkan madde akışları için ekserji transfer oranları ($\dot{E}x_{giren}$ ve $\dot{E}x_{çikan}$),
- güç (\dot{W}) ve
- ısı transferine bağlı olarak gerçekleşen ekserji transfer oranı ($\dot{E}x_{ısı}$) dikkate alınarak, her bir ekserji akışı ile ilgili maliyetler sırasıyla aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\dot{C}_{giren} = c_{giren} \dot{E}x_{giren} \quad (3.30)$$

$$\dot{C}_{çikan} = c_{çikan} \dot{E}x_{çikan} \quad (3.31)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (3.32)$$

$$\dot{C}_{ısı} = c_{ısı} \dot{E}x_{ısı} \quad (3.33)$$

Burada:

c : birim maliyeti ve alt simge olarak gösterilen w alt indisi işi ifade etmektedir.

Buna göre, sistemin bileşen düzeyindeki ekserji maliyet denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [43]:

$$\sum \dot{C}_{çikan,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum \dot{C}_{giren,k} + \dot{C}_{ısı,k} + \dot{Z}_k \quad (3.34)$$

daha açık olarak yazılacak olursa:

$$\sum (c_{\text{çıkan}} \dot{E}x_{\text{çıkan}})_k + c_{w,k} \dot{W}_k = \sum (c_{\text{giren}} \dot{E}x_{\text{giren}})_k + c_{\text{isl},k} \dot{E}x_{\text{isl},k} + \dot{Z}_k \quad (3.35)$$

ayrıca denklemde ifade edilen \dot{Z}_k ise:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (3.36)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Sistemde yer alan bir bileşenden çıkan toplam ekserji akışlarının sayısı, bilinmeyenlerin sayısına eşit olup yalnızca bir denklem olarak ekserji maliyet dengesi bulunmaktadır. Bu nedenle yeterli sayıda yardımcı denklemin türetilmesi gerekmektedir. Bu işlem ise SPECO metodunun F-P prensipleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

F (Yakıt) prensibi, bir yakıt akışından ekserjinin uzaklaştırılmasıyla ilişkilendirilen birim maliyetin (ekserji başına düşen birim maliyetin), bu ekserjinin sonraki akış bileşenlerinde aynı akışa sağladığı ortalama birim maliyete eşit olması gerektiğini tanımlarken;

P (Ürün) prensibi ise, bir ürünle ilişkilendirilen herhangi bir akışa sağlanan her bir ekserji biriminin, aynı ortalama maliyetle sağlanması gerektiğini ifade etmektedir.

Çıkan her bir ekserji akışı ya bir yakıt ile veya bir ürünle ilişkilendirildiğinden, toplam çıkan akışların sayısı (x) ise:

- bir bileşenin “yakıt” olarak tanımlanan çıkan ekserji akışlarının sayısı (x_F) ile,
- “ürün” tanımına dâhil edilen çıkan akışlarının sayısının (x_P)’nin toplamına eşittir.

Bu nedenle, F ile P prensipleri bir araya gelerek gerekli olan ($x - 1$) adet yardımcı denklemi sağlamaktadır.

Bilinen ve bilinmeyen denklemler sisteminin çözülmesi ile sistemdeki maliyeti bilinmeyen akışların maliyetleri elde edilmektedir. Bu maliyetler ise şunlardır:

$c_{F,k}$: yakıtın birim maliyetini,

$c_{P,k}$: ürünün birim maliyetini,

$c_{D,k}$: ekserji yıkımının maliyet oranını ve

$c_{L,k}$: ekserji kaybının maliyet oranını ifade etmektedir.

Matematiksel olarak gösterimleri ise:

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (3.37)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (3.38)$$

$$\dot{C}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k \quad (3.39)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (3.40)$$

$$\dot{C}_{L,k} = c_{F,k} \dot{E}_{L,k} \quad (3.41)$$

şeklindedir.

Burada alt indis olarak verilen P, F, D ve L sırasıyla ürün (ekserji ürünü), yakıt (ekserji yakıtı), ekserji yıkımı ve genel sistemin kaybı ile ilişkilendirilmektedir.

Ekseregoekonomik bir analizde, ürünün birim ekserji başına ortalama maliyeti ile yakıtın birim ekserji başına ortalama maliyeti arasındaki fark göreceli maliyet farkı (r_k) olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{c_{F,k} \dot{E}_{D,k} + \dot{Z}_k}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{\dot{Z}_k}{c_{F,k} \dot{E}_{P,k}} \quad (3.42)$$

Sistemin iyileştirilmesine yönelik olarak önemli kararlar alınmasında etkili olarak kullanılan ekseregoekonomik faktör (f_k) ise aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k}} \quad (3.43)$$

Akışa dair bilinmeyenler olan yakıt, ürün, yıkım ve kayıplarla ilgili maliyetler ile göreceli maliyet farkı ve ekseregoekonomik faktör gibi karar verme odaklı araçların tespit

edilmesi neticesinde sistem ve bileşenlerin performansları hakkında somut veriye dayalı yorumların yapılabilmesi imkânına sahip olunmaktadır.

Eksergoekonomik analiz sonuçlarının yorumlanması ile amaçlanan, ürün maliyetini arttıran bileşenleri tespit etmek ve sistemin daha maliyet etkin şekilde çalışması için gerçekleştirilmesi gereken iyileştirmelere karar vermektir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde Güre JBIS'nin Bölüm 3.3'te belirtilen dış ortam koşullarındaki ölçümlerine dayalı olarak kritik durum noktaları için Tablo 3.7'de elde edilen verilere ilave olarak EES programı aracılığıyla hesaplanan termodinamik özellikler de kullanılarak sistemin enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen bulgular sırasıyla paylaşılmıştır.

4.1 Enerji Analizi

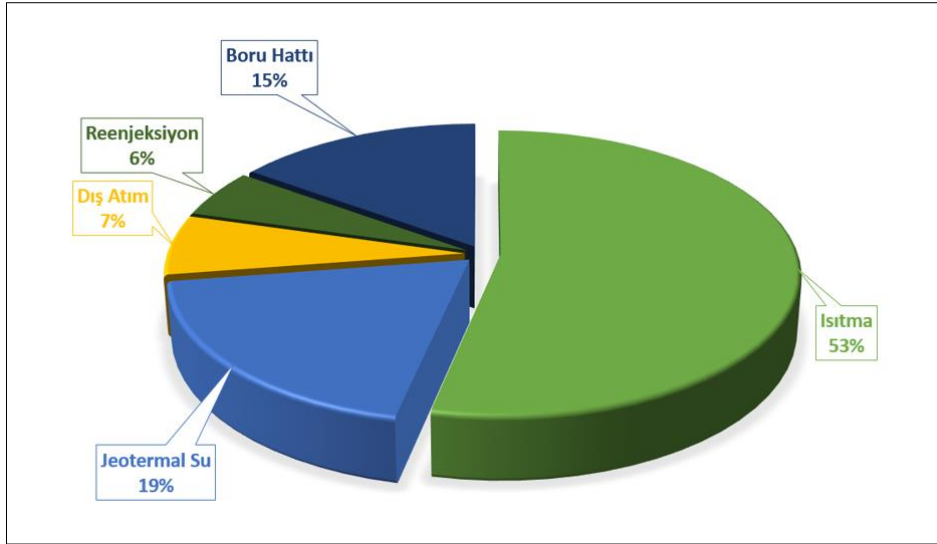
Sistemin enerji analizi eşitlik (3.6) ve (3.16) ile sistemin kritik durum noktalarındaki ölçüm verilerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir.

Analiz neticesinde sistem enerjisinin %53'lük oranı ile en büyük kısmının kapalı mekân ısıtılmasında, ardından %19'luk kısmı ile de jeotermal tesislerin sıcak su ihtiyacının karşılanması amacıyla harcadığı görülmektedir. Sistemin enerji dağılımındaki faydalı yararlanma oranının görece yüksekliği nedeniyle enerji veriminin %72,61 seviyesinde gerçekleşmesi mümkün olmuştur (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: Güre JBIS'nin enerji analizi sonuçları

Referans Sıcaklık (°C)	Toplam Enerji Girdisi ¹ [kW]	Kullanılan Güç [kW]		Enerji Kayıpları [kW]			Enerji Verimi [%]
		Isıtma	Jeotermal Su	Dış Atım	Reenjeksiyon	Boru Hattı	
8,39	13326	7118	2558	908	726	2016	72,61

Gerçekleşen enerji girişinin sistemde değerlendirilme şekilleri ve kayıp miktarlarının oransal olarak grafik gösterimi Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1: Toplam enerji girişinin kullanım ve kayıp oranlarının grafiksel gösterimi

4.2 Ekserji Analizi

(3.11) eşitlikliği ve sistemin kritik durum noktalarındaki ölçüm verilerinin kullanılması neticesinde hesaplanan ekserji değerleri Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2: Güre JBIS ekserjik performans analiz değerleri

Durum Noktası	Akışkan Tipi	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Kütleli Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg,K)	Ekserji (kW)
0	Su	8,39	101,32	-	35,34	0,1271	-
1	Jeo. Akışkan	89,17	101,32	20,57	373,5	1,183	840,941
2	Jeo. Akışkan	89,67	151,98	20,57	375,6	1,189	849,390
3	Jeo. Akışkan	65,55	101,32	26,21	274,4	0,9003	560,193
4	Jeo. Akışkan	66,05	162,11	26,21	276,6	0,9064	572,843
5	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	46,98	320,2	1,033	1400,611
6	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	9,61	320,2	1,033	286,502
7	Jeo. Akışkan	42,33	101,32	9,61	177,3	0,6032	76,100
8	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	17,11	320,2	1,033	510,099
9	Jeo. Akışkan	42,19	101,32	17,11	176,7	0,6014	133,896
10	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	13,48	320,2	1,033	401,878
11	Jeo. Akışkan	45,58	101,32	13,48	190,9	0,6461	127,261
12	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	6,78	320,2	1,033	202,132
13	Jeo. Akışkan	41,65	101,32	6,78	174,5	0,5942	51,885
14	Su	41,67	344,49	51,50	174,8	0,5944	406,662
15	Su	48,04	283,70	51,50	201,4	0,6782	561,520
16	Su	50,33	273,56	71,60	210,9	0,7079	862,176
17	Su	42,14	344,49	71,60	176,8	0,6006	583,598
18	Su	49,12	607,92	67,82	206,2	0,6921	799,591
19	Su	42,98	810,56	67,82	180,7	0,6116	607,251
20	Su	49,09	374,88	32,48	205,8	0,6918	372,687
21	Su	41,82	749,77	32,48	175,8	0,5962	272,494
22	Su	49,4	277,62	123,10	207,0	0,6958	1421,584
23	Su	49,9	587,66	123,10	209,4	0,7022	1495,215
24	Su	42,28	506,60	67,82	177,5	0,6024	565,893
25	Su	41,32	303,96	32,48	173,3	0,5898	249,818
26	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	6,25	180,6	0,6136	51,817
27	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	5,00	180,6	0,6136	41,454
28	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	35,73	180,6	0,6136	296,230
29	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	35,73	180,6	0,6136	296,230
30	Jeo. Akışkan	43,61	547,13	35,73	183,1	0,6200	321,175
31	Jeo. Akışkan	26,00	101,32	35,73	109,0	0,3809	78,790

Her bir akış noktası için hesaplanan ve Tablo 4.2’de sunulan ekserji akış değerlerinin her bir sistem bileşeni üzerine olan etkisine göre yakıt, ürün, yıkım ve kayıp olarak ayrıştırılması ile elde edilen değerler Tablo 4.3’te sunulmuştur.

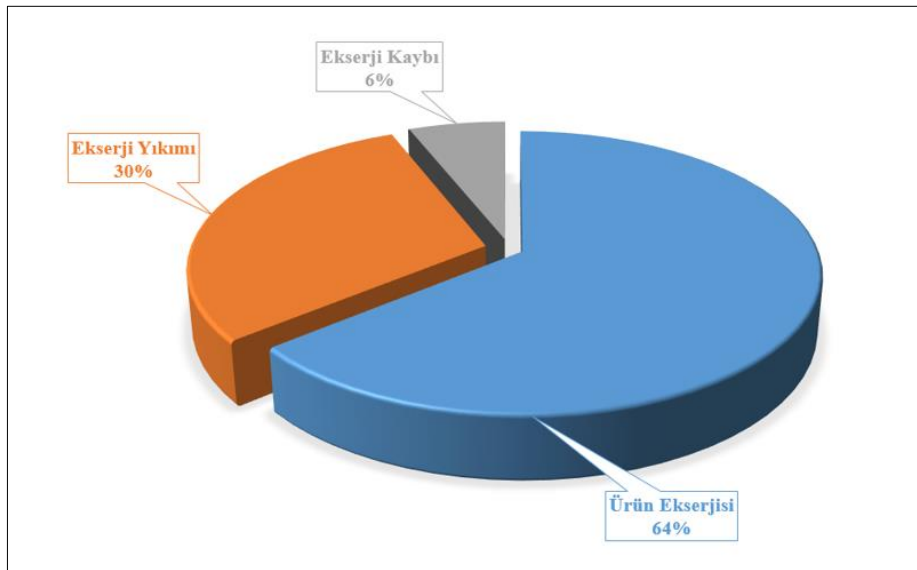
Tablo 4.3: Yakıt, ürün, yıkım ve kayıp ekserji değerleri

Ekipman	$Ex_{F,k}$ (kW)	$Ex_{P,k}$ (kW)	$Ex_{D,k}$ (kW)	$Ex_{L,k}$ (kW)
Eşanjör-1	210,402	154,858	55,545	-
Eşanjör-2	376,203	278,578	97,625	-
Eşanjör-3	274,617	192,340	82,277	-
Eşanjör-4	150,246	100,194	50,053	-
Pompa-1	160	8,449	151,551	-
Pompa-2	92	12,649	79,351	-
Pompa-3	150	73,632	76,368	-
Pompa-4	225	41,359	183,641	-
Pompa-5	75	22,676	52,324	-
Pompa-6	37,5	24,945	12,555	-
Tüm Sistem	2823,367	1810,015	841,291	172,061

Tablo 4.3 incelendiğinde, toplam 2823,367 kW olan sistem ekserji girişinin (yakıt ekserjisi, $Ex_{F,k}$):

- 1810,015 kW ile %64,11'ini sistemin ürün ekserjisine ($Ex_{P,k}$),
- 841,291 kW ile %29,80'ini sistemin ekserji yıkımına ($Ex_{D,k}$),
- 172,061 kW ile %6,09'unu ise sistemin kayıp ekserjisine ($Ex_{L,k}$)

ayrıldığı görülmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Sisteme giren ekserjinin kullanım oranlarının grafiksel gösterimi

Ekserji analizi neticesinde elde edilen ekserji yıkım değeri sürtünme, ısı transferi kayıpları vb. gibi tersinmezlikler dolayısıyla sistem tarafından dış ortama bir ekserji aktarımı olduğunu göstermektedir. Meydana gelen yıkımlar, fiziki durumlar dışında gelişen doğal geri dönüşsüzlüklerin bir sonucudur.

Fakat kayıp ekserjinin pozitif bir değere sahip olması; kapalı devre olarak çalışmakta olan ısıtma sisteminin maruz kaldığı ekserji yıkımlarından farklı olarak, proses esnasında sistem dışına doğru gerçekleşen fiziksel bir akışın olduğuna işaret etmektedir.

Sistem akış şeması incelendiğinde, gerçekleştirilen analizin jeotermal üretim kuyularından ile ısı merkezi arasındaki akışları içerdiği yani enerji tüketim çevrimini içeren boru hatlarını kapsamadığı görülmektedir. Bu netice ile oluşan ekserji kaybı; jeotermal akışkanın reenjeksiyon hattı, doğal atım hattı ve termal kaplıca kullanımını sonrasındaki tahliyesi ile doğrudan ilişkilendirilebilir

Ayrıca soğuk akışkandaki ekserji değişiminin sıcak akışkandaki ekserji değişimine oranı olarak tanımlanan eşanjörlerin ekserji verimleri eşitlik (3.17) ve sistem bütününe ekserji verimi ise eşitlik (3.18) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan ekserjik verimler Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4: Eşanjörler ve sistem bütününe ait ekserji verim değerleri

Ekipman	Ekserji Verim Değeri
Eşanjör-1	%74
Eşanjör-2	%74
Eşanjör-3	%70
Eşanjör-4	%67
Tüm Sistem	%64

4.3 Eksergoekonomik Analiz

Sistem Bileşenlerine Ait Seviyelendirilmiş Maliyetlerin Belirlenmesi

SPECO yönteminde maliyetleri, sermaye yatırımı ($Z_{k,ilk\ yatırım}$) ile işletme bakım giderleri ($Z_{k,işletme}$) olmak üzere iki başlık altında toplamak mümkündür.

JBIS’ler gibi ısı enerji sistemlerinin ekonomik analizlerinde sisteme ait tüm giderlerinin yıllık değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak ifade edilen bu gider kalemleri sistemin ekonomik kullanım ömrü boyunca, farklı dönemler için farklı değerlere sahip olabilmektedir.

Bu nedenle gerçekleştirilmekte olan analizde, sağlıklı sonuçlara ulaşılması ve değişkenlik gösteren ekonomik değerlerin ömür çevrimi içerisindeki optimizasyonunun sağlanması amacıyla SPECO metodunun da benimsediği bakış açılarından olan seviyelendirilmiş maliyetler kullanılmıştır.

Sistemin seviyelendirilmiş maliyet değeri ($C\dot{A}_{Sistem}$) eşitlik (3.21) ile hesaplanmaktadır.

Tablo 3.12’de verildiği üzere analizin gerçekleştirildiği 2023 yılındaki ABD ekonomik verilerine göre; nominal faiz oranının (i_n) 0,0568 olduğu, enflasyon oranının (r) 0,041 olduğu, reel faiz oranının (i) 0,015 olduğu ve sistemin yıl cinsinden ekonomik ömrünün (n) ise 25 olduğu bilgilerine dayalı olarak $CRF = \frac{i(1+r)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0,015 \cdot 1,4596}{1,4596 - 1} = 0,04763$ şeklinde bulunur.

Bu çalışmada \dot{C}_{Sistem} değeri sistem üreticilerinden edilen 2025 yılı için güncel maliyetler halinde mevcuttur ve ABD-PPI dönüşüm endeksleri vasıtasıyla 2023 ve 2002 yıllarına dair satın alma maliyetlerine dönüştürülmüştür. Ayrıca işletme koşullarındaki maliyetinin çok büyük bir kısmını teşkil eden boru hatları, sistemin devreden çıkarılarak kullanımının terk edilmesi halinde sistemin elden çıkarılması ile elde edilecek gelir kalemi olan \dot{S}_{Sistem} ’in tamamına yakını oluşturacaktır. Ancak ele alınan sistemin JBIS olması sebebiyle, sistemin hurdaya ayrılması nedeniyle ortaya çıkacak gelir kaleminin genel olarak tamamına yakın kısmını oluşturan boru hatları toprak altında gömülü vaziyette bulunduğu için yeryüzüne çıkarılması için harcanması gereken maliyetin altında bir gelir oluşturacaktır. Bu nedenle sistemin gelir oluşturma potansiyeli olan bir \dot{S}_{Sistem} değeri yoktur.

Bu sebeple bu çalışmadaki \dot{S}_{Sistem} değeri “0” olarak kabul edilmiştir. Böylece eşitlik (3.21) ile tanımlanan, seviyelendirilmiş maliyet ifadesi aşağıdaki hale getirilmiş olur.

$$C\dot{A}_{Sistem} = \dot{C}_{Sistem} CRF$$

Sistemin seviyelendirilmiş yıllık işletme ve bakım maliyeti denklemde bilinenlerin yerlerine yazılması ile $C\dot{A}_{OM,Sistem,2023} = 639490 \times 0,04763 = 30459$ \$ olarak elde edilir.

Ayrıca sistemin seviyelendirilmiş yıllık kurulum maliyeti ise yine aynı denklemde bilinenlerin yerlerine yazılması ile $C\dot{A}_{CI,Sistem,2023} = 1284526 \times 0,04763 = 61182$ \$ olarak elde edilir.

Sonraki aşamada sistemin 2022-2023 ısıtma sezonundaki çalışma saati olan 5535 (τ) değeri, eşitlik (3.26) ve (3.27) kullanılarak sistemin seviyelendirilmiş saatlik kurulum maliyeti (11,05 \$/saat) ve işletme ile bakım maliyeti (5,50 \$/saat) hesaplanır.

Bundan sonraki aşamada ise, bileşen bazındaki saatlik sermaye yatırımı maliyetleri (\dot{Z}_k^{CI}) ile işletme ve bakım maliyetleri (\dot{Z}_k^{OM}) denklem eşitlikleri (3.28) ve (3.29) tüm bileşenlere uygulanarak hesaplanır. Ayrıca (3.36) eşitliği ile her bir bileşen için toplam maliyet (\dot{Z}_k) ifadesine de ulaşılır.

Tanımlanan tüm ifade ve eşitlikler için gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen 2025, 2023 ve 2002 yılındaki satın alma maliyetleri ile sistem bileşenlerine ait saatlik işletme maliyetleri Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Tablo 4.5: Satın alma ve seviyelendirilmiş maliyet değerleri

Ekipman	2025 Satın Alma Maliyeti (\$)	2023 Satın Alma Maliyeti (\$)	2002 Satın Alma Maliyeti (\$)	$Z_{k,ilk\ yatırım}$ (\$/h)	$Z_{k,işletme}$ (\$/h)	$Z_{k,toplam}$ (\$/h)
Eşanjör-1	13550	12675	7503	1,90	0,94	2,84
Eşanjör-2	13550	12675	7503	1,90	0,94	2,84
Eşanjör-3	15525	14523	8597	2,17	1,08	3,25
Eşanjör-4	17580	16445	9735	2,46	1,22	3,68
Pompa-1	2250	2104	1246	0,31	0,16	0,47
Pompa-2	1580	1478	874	0,22	0,11	0,33
Pompa-3	3050	2853	1689	0,43	0,21	0,64
Pompa-4	1150	1075	636	0,16	0,08	0,24
Pompa-5	3050	2853	1689	0,43	0,21	0,64
Pompa-6	1150	1075	636	0,16	0,08	0,24
Kolektör-1	825	771	456	0,12	0,06	0,17
Kolektör-2	475	444	263	0,07	0,03	0,10
Jeotermal Depo	5275	4934	2921	0,74	0,37	1,11
Toplam Ekipman Satın Alma Maliyeti	79010	73905	43748	11,05	5,50	16,55
Boru Hattı Maliyeti	1120748	1048452	620653			
Kuyu Açma Maliyeti	85076	79588	47113			
İlave Ekipman Maliyetleri	6897	6452	3819			
Mühendislik Maliyetleri	34483	32258	19096			
Diğer Maliyetler	46897	43871	25970			
Toplam Sistem Kurulum Maliyeti	1373110	1284526	760399			
Toplam Sistem Yıllık İşletme Gideri	683586	639490	378559			

F-P Kuralı ve Yardımcı Denklemlerin Türetilmesi

SPECO metodu ile analizin gerçekleştirildiği bu çalışmada temel olarak, sistemde yer alan tüm ekserji akışlarına ekonomik maliyetlerin atanması böylelikle de en çok ekserji yıkımının olduğu sistem bileşenlerinin tayin edilmesi hedeflenmektedir. Ardından ise ekserjik maliyetin etkin kullanılmadığı tespit edilen öncelikli bileşenlerden başlayarak çeşitli

optimizasyon alternatifleri ile sistemin verimliliğini arttırırken maliyetleri de düşürülmesi doğrultusunda kararlar verilmesine kaynaklık edilmesi planlanmaktadır.

Bu sebeple sistem çalışma akışındaki kritik noktalar olan, sistem bileşenlerine giriş ve çıkış noktalarındaki akış maliyetlerinin elde bulunan ekonomik parametreler vasıtasıyla belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için de sistemde yer alan her bir bileşen için ayrı ayrı ekserjik denge denkleminin oluşturulması ile bu denklem sisteminin çözülmesi ile sistemde bulunan her bir nokta için birim ekserji maliyetlerinin elde edilmesi gerekmektedir.

Ele alınan Güre JBIS, 31 akış ile termodinamik açıdan sisteme etki potansiyeli yüksek 13 bileşenden oluşmaktadır. Her bir bileşenin giren ve çıkan akışlarına odaklanılarak hazırlanan 13 ayrı denge denkleminin birleştirilmesi ile oluşan denklem sisteminin çözülmesi için ekserji analizine kadar olan süreçte elde edilen verilere ilave olarak yardımcı denklemlerin türetilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu aşamada SPECO metodunun F-P kuralından yola çıkarak her bir bileşenin yakıt ve ürün tanımı kapsamına giren akışları ile eşit birim ekserji maliyeti ile üretilen akışlar yardımcı denklemler olarak atanır. Bu prensiplerden birincisine göre, bir bileşene yakıt olarak giren tüm ekserji akışlarının eşit ortalama birim maliyetlere sahip olduğudur. İkincisi ise bileşenin ürün ekserjisi ile yakıt ekserjisinin birim maliyetleri arasındaki oran bileşenin maliyet artışını yansıttığıdır.

F-P kuralı tanımlamaları neticesinde sistem akış şemasında birim ekserji maliyetlerinin eşit olduğu yardımcı denklemler ile her bir bileşen için hazırlanan ekserjik denge denklemlerinden oluşan denklem sistemi Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6: Ekserjik denge denklemleri ve yardımcı denklemler

Ekipman	Ekserjik Denge Denklemleri	Yardımcı Denklemler
Pompa-1	$C_1 + C_{w,PM-1} + Z_{k,PM-1} = C_2$	$c_5 = c_6$
Pompa-2	$C_3 + C_{w,PM-2} + Z_{k,PM-2} = C_4$	$c_6 = c_7$
Kollektör-1	$C_2 + C_4 + Z_{k,Kol-1} = C_5$	$c_8 = c_9$
Eşanjör-1	$C_6 + C_{14} + Z_{k,Eş-1} = C_7 + C_{15}$	$c_{10} = c_{11}$
Eşanjör-2	$C_8 + C_{17} + Z_{k,Eş-2} = C_9 + C_{16}$	$c_{12} = c_{13}$
Eşanjör-3	$C_{10} + C_{19} + Z_{k,Eş-3} = C_{11} + C_{18}$	$c_{14} = c_{23}$
Eşanjör-4	$C_{12} + C_{21} + Z_{k,Eş-4} = C_{13} + C_{20}$	$c_{17} = c_{23}$
Kollektör-2	$C_{15} + C_{16} + Z_{k,Kol-2} = C_{22}$	$c_{18} = c_{24}$
Pompa-3	$C_{22} + C_{w,PM-3} + Z_{k,PM-3} = C_{23}$	$c_{20} = c_{25}$
Pompa-4	$C_{24} + C_{w,PM-4} + Z_{k,PM-4} = C_{19}$	$c_{26} = c_{27}$
Pompa-5	$C_{25} + C_{w,PM-5} + Z_{k,PM-5} = C_{21}$	$c_{27} = c_{28}$
Jeotermal Depo	$C_{28} + Z_{k,Depo} = C_{29}$	
Pompa-6	$C_{29} + C_{w,PM-6} + Z_{k,PM-6} = C_{30}$	

Akışların Maliyet Akış Hızları ve Birim Ekserji Maliyetlerinin Belirlenmesi

Denklemler sisteminin çözülmesi için birim maliyet değeri tanımlanan akışlara ihtiyaç duyulmaktadır. Jeotermal üretim kuyularından elde edilen jeotermal akışkanın yenilenebilir bir kaynak olması ve kaynağının önceki bölümlerde de açıklandığı üzere güneş ve radyoaktif bozunmalar olduğundan sonuçla, jeotermal üretim kuyusundan çıkarıldığı ilk andaki maliyeti kullanılan kuyu pompası tarafından tüketilen elektrik enerjisinin maliyetine eşit olduğu bilgisi ile denklem sistemi çözülür. Denklem sistemi çözümü ile elde edilen maliyet akış hızları (\dot{C}) ile birim ekserji maliyetleri (c) Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7: Maliyet akış hızları ve birim ekserji maliyetleri

Durum Noktası	Akışkan Tipi	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Kütleli Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg,K)	Ekserji (kW)	Birim Ekserji Maliyeti c (\$/Gj)	Maliyet Akış Hızları Ć (\$/h)
0	Su	8,39	101,32	-	35,34	0,1271	-	-	-
1	Jeo. Akışkan	89,17	101,32	20,57	373,5	1,183	840,941	0	0
2	Jeo. Akışkan	89,67	151,98	20,57	375,6	1,189	849,390	7,861	24,037
3	Jeo. Akışkan	65,55	101,32	26,21	274,4	0,9003	560,193	0	0
4	Jeo. Akışkan	66,05	162,11	26,21	276,6	0,9064	572,843	6,745	13,910
5	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	46,98	320,2	1,033	1400,611	7,668	38,664
6	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	9,61	320,2	1,033	286,502	7,668	7,909
7	Jeo. Akışkan	42,33	101,32	9,61	177,3	0,6032	76,100	7,668	2,101
8	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	17,11	320,2	1,033	510,099	7,668	14,081
9	Jeo. Akışkan	42,19	101,32	17,11	176,7	0,6014	133,896	7,668	3,696
10	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	13,48	320,2	1,033	401,878	7,668	11,094
11	Jeo. Akışkan	45,58	101,32	13,48	190,9	0,6461	127,261	7,668	3,513
12	Jeo. Akışkan	76,47	101,32	6,78	320,2	1,033	202,132	7,668	5,580
13	Jeo. Akışkan	41,65	101,32	6,78	174,5	0,5942	51,885	7,668	1,432
14	Su	41,67	344,49	51,50	174,8	0,5944	406,662	12,460	18,241
15	Su	48,04	283,70	51,50	201,4	0,6782	561,520	13,297	26,880
16	Su	50,33	273,56	71,60	210,9	0,7079	862,176	12,721	39,484
17	Su	42,14	344,49	71,60	176,8	0,6006	583,598	12,460	26,178
18	Su	49,12	607,92	67,82	206,2	0,6921	799,591	13,192	37,974
19	Su	42,98	810,56	67,82	180,7	0,6116	607,251	12,398	27,103
20	Su	49,09	374,88	32,48	205,8	0,6918	372,687	19,229	25,799
21	Su	41,82	749,77	32,48	175,8	0,5962	272,494	18,313	17,965
22	Su	49,4	277,62	123,10	207,0	0,6958	1421,584	12,967	66,361
23	Su	49,9	587,66	123,10	209,4	0,7022	1495,215	12,460	67,069
24	Su	42,28	506,60	67,82	177,5	0,6024	565,893	13,192	26,875
25	Su	41,32	303,96	32,48	173,3	0,5898	249,818	19,229	17,294
26	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	6,25	180,6	0,6136	51,817	7,668	1,430
27	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	5,00	180,6	0,6136	41,454	7,668	1,144
28	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	35,73	180,6	0,6136	296,230	7,668	8,177
29	Jeo. Akışkan	43,11	101,32	35,73	180,6	0,6136	296,230	8,706	9,284
30	Jeo. Akışkan	43,61	547,13	35,73	183,1	0,6200	321,175	8,237	9,524
31	Jeo. Akışkan	26,00	101,32	35,73	109,0	0,3809	78,790	-	-

Sistem Bileşenlerine Ait Maliyet Oranlarının Belirlenmesi

Ekseregoekonomik bir analizde, ürünün birim ekserji başına ortalama maliyeti ile yakıtın birim ekserji başına ortalama maliyeti arasındaki farkı gösteren göreceli maliyet farkı (r_k) (3.42)'deki denklem, sistemin iyileştirilmesine yönelik olarak önemli kararlar alınmasında

etkili olarak kullanılan eksergoekonomik faktör (f_k) ise (3.43)'deki eşitlikler ile hesaplanır. Verilen denklemlere ilave olarak (3.38) ve (3.40)'da yer alan eşitliklerin çözümünün yapılması ile elde edilen değerler Tablo 4.8'de sunulmuştur. Bu sayede akışa dair bilinmeyenler olan yakıt, ürün, yıkım ve kayıplarla ilgili maliyetler ile göreceli maliyet farkı ve eksergoekonomik faktör gibi karar verme odaklı araçların tespit edilmesi neticesinde sistem ve bileşenlerin performansları hakkında somut veriye dayalı yorumların yapılabilmesi imkânına sahip olunmaktadır.

Tablo 4.8: Eksergoekonomik değerlendirme kriterleri

Ekipman	Yakıt Ekserjisinin Birim Maliyeti $c_{f,k}$ (\$/GJ)	Ürün Ekserjisinin Birim Maliyeti $c_{p,k}$ (\$/GJ)	Ekserji Yıkımı Maliyeti $\dot{C}_{D,k}$ (\$/h)	Toplam Maliyet \dot{Z}_k (\$/h)	Toplam Eksergo-Ekonomik Maliyet $\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/h)	Göreceli Maliyet Farkı r_k (%)	Eksergo-Ekonomik Faktör f_k (%)
Eşanjör-1	7,943	15,88	1,59	2,84	4,43	36,10	64,12
Eşanjör-2	7,943	13,56	2,79	2,84	5,63	35,17	50,42
Eşanjör-3	7,943	16,04	2,35	3,25	5,60	42,99	58,02
Eşanjör-4	7,943	22,12	1,43	3,68	5,11	50,42	72,01
Pompa-1	40,94	790,25	22,34	0,47	22,81	18,31	2,07
Pompa-2	40,94	305,03	11,70	0,33	12,03	6,45	2,75
Pompa-3	40,94	85,81	11,26	0,64	11,89	1,10	5,37
Pompa-4	40,94	224,34	27,07	0,24	27,31	4,48	0,88
Pompa-5	40,94	143,24	7,71	0,64	8,35	2,50	7,65
Pompa-6	40,94	64,23	1,85	0,24	2,09	0,57	11,51

Burada elde edilen verilerden olan $c_{f,k}$ (\$/GJ), bileşene giren yakıt ekserjisinin birim maliyetidir. Yani bileşen tarafından tüketilen ekserjinin maliyetidir. Bileşenin ekserji kaynağını hangi maliyetle temin ettiğini ifade etmektedir.

$c_{p,k}$ (\$/GJ), bileşenden ürün olarak çıkan ekserjinin birim maliyetidir. Bu değer bileşenin ürettiği faydalı ekserjinin maliyetini ortaya koymaktadır. $c_{p,k}$ değerlerinin $c_{f,k}$ değerlerinden büyük olması normal ve beklenen bir durumdur. Bu durum temelde, bileşenin çalışması için ihtiyaç duyduğu yakıt ekserjisine ek olarak bileşenin sermaye yatırımı ve işletme ile bakım maliyeti kalemlerinin akışa yüklediği ilave giderlerden kaynaklanmaktadır. $c_{p,k}$ değerlerinin $c_{f,k}$ değerlerinden çok fazla büyük olması ise, bileşenin ya çok pahalıya mal edildiği ve yüksek sahip olma-işletme (\dot{Z}_k) maliyetine sahip olduğunu ya da bileşenin ekserjik açıdan

çok verimsiz çalıştığı ve yüksek ekserji yıkım maliyetine ($\dot{C}_{D,k}$) sahip olduğunu göstermektedir.

$\dot{C}_{D,k}$ (\$/h), bileşende gerçekleşen ekserji yıkımının parasal büyüklüğü olarak tanımlanmaktadır. Yüksek ekserji yıkım değerine sahip olan bileşenler enerji kayıplarının oluşmasında birincil sebeplerdir. Yüksek $\dot{C}_{D,k}$ değerlerine sahip bileşenlerde tersinmezlikler nedeniyle yaşanan ekserji yıkımları fazladır. Bu durum bileşenin verimsizliğine ve optimizasyon potansiyelinin yüksekliğine işaret etmektedir.

Elde edilen verilerden bir diğeri olan ve sermaye yatırım maliyeti ile işletme-bakım maliyetleri toplamını ifade eden saatlik maliyet oranı (\dot{Z}_k), doğrudan bileşenin satın alınması ve işletilmesi ile ilgilidir. Yüksek \dot{Z}_k değerlerine sahip olan bileşenlerin kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ (\$/h) değeri, bileşene ait ekserji yıkım maliyeti ile sermaye ve işletme-bakım maliyetlerinin toplamıdır ve toplam eksergoekonomik maliyeti ifade eder. Bu değer bileşenin toplam maliyetini ve iyileştirme potansiyelini değerlendirmede kritik bir gösterge sunmaktadır. Yüksek $\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ değerlerine sahip bileşenlerin hem operasyonel olarak ekserji verimsizliğine sahip olduğunu hem de maliyet olarak sisteme ekonomik bir külfet oluşturduğunu bildirmektedir.

Göreceli maliyet farkı (r_k), bileşenden geçen akışa ait ekserjinin birim maliyetinde meydana gelen artışı ifade etmektedir. Yakıt olarak bileşene giren bir akışın, bileşen çıkışındaki birim ekserji maliyetinin ilk duruma göre yüzdelik olarak ne kadar arttığının ölçüsüdür. Göreceli maliyet farkının (r_k) yüksek çıkması, ürünün “pahalı” olarak elde edildiği anlamına gelmektedir. İdeal olarak, bu değer düşük olması istenmektedir.

Eksergoekonomik faktör (f_k), bileşene ait toplam maliyetin oluşmasında sermaye maliyetlerinin, ekserji yıkımına göre görece önemini sunan bir araçtır. Eksergoekonomik faktörün yüksek bir değere sahip, olması o bileşenin maliyetinin oluşmasında yatırım maliyetlerinin daha etkili olduğunu tersi durumun ise ekserji yıkım maliyetlerinin daha etkili olduğunu göstermektedir. Yani yüksek eksergoekonomik faktör değeri (f_k), bileşenin seçiminde maliyet-etkinliğin yakalanmadığını ve iyileştirme odak noktasının daha ucuz ve

az bakım gerektiren ekipman seçimi sayesinde mümkün olabileceğini; düşük (f_k) değeri ise bileşenin ekserji yıkım maliyetlerinin yüksekliği sebebiyle ekserjik olarak verimsiz çalıştığını ve iyileştirme odak noktasının bileşenin ekserji verimliliğinin artırılması amacıyla daha verimli teknoloji ve işletme koşullarının sağlanması olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Balıkesir'in Güre Mahallesinde bulunan ve içerisinde kamu binalarının da yer aldığı toplamda 1000 bağımsız abonenin ısıtma ihtiyacının karşılanmasına ilave olarak, civarda bulunan özel sektöre ait 13 adet turistik jeotermal tesisin de jeotermal su ihtiyacının karşılanmasını gerçekleştiren Güre JBIS ele alınmıştır. Ele alınan sistemin öncelikli olarak enerji analizi, ardından ise ekserji temeline dayalı olarak eksergoekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Ekserji analizinde kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserjiler ile ilgili durumlar kapsam dışında tutularak, sistemin yalnızca fiziksel ekserjisi üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Eksergoekonomi analizinde metot olarak SPECO yöntemi kullanılmıştır.

Enerji analizi sonucunda sisteme sağlanan enerjinin; kapalı mekân ısıtılması, jeotermal kaplıca suyu kullanımı, boru hatlarında meydana gelen kayıplar, dışarıya atımdan kaynaklanan ve reenjeksiyon hattından kaynaklanan kayıplar olmak üzere sırasıyla %53, %19, %15, %7 ve %6 oranlarında dağılmış olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen bu tespite dayalı olarak enerjiden faydanmanın sağlandığı yararlı kısımlar olan kapalı alan ısıtması ile jeotermal kaplıca ısıtma paylarının oransal büyüklüğü sistemin enerji verimliliğinin %72,61 oranında görece büyük bir değere sahip olmasında etkili olmuştur. Sistemin sahip olduğu düşük olmayan enerji verimlilik oranına rağmen daha enerji verimli çalışmasının sağlanması için kayıpların meydana geldiği işletim süreçlerine (boru hattı kayıpları başta olmak üzere) odaklanılması gerektiği ve iyileştirme seçeneklerinin değerlendirilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Ekserji analizi sonucunda, sistemde yer alan 4 adet ısı eşanjörüne ait ekserji verimleri sırasıyla %74, %74, %70 ve %67 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin genel ekserji veriminin de %64 olduğu görülmüştür. Hesaplanan bu değerler neticesinde; eşanjörlerin ekserjik açıdan bireysel olarak oldukça verimli çalışmakta olduğu, sistemin genel ekserji veriminin eşanjörlere oranla daha düşük olmasının sebebinin ise ekserji kayıplarının eşanjörler dışındaki bileşenlerde (jeotermal depo, pompalar, boru hattı, kollektörler) meydana geldiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Güre JBIS'nin sistemin toplam ekserji girişinin %64,11'inin ürün ekserjisine ayrıldığı ve bu nedenle sistemin ekserjik açıdan oldukça verimli çalıştığı görülmüştür. Ayrıca %29,80'inin

ise ekserji yıkımına ayrılmasının sistemin hala iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Son olarak ise %6,09'luk kısmının kayıp olarak sistemden uzaklaşmasının, enerji kaynağı olarak kullanım potansiyeli bulunan jeotermal akışkanın sistem dışına reenjeksiyonu ve dışarıya atımından kaynaklandığı, bu nedenle ekserji optimizasyonu için sistemden tahliyesi yerine farklı alternatif sistemlere aktarılarak kullanılmasının sistemin ekserji verimliliğini arttıracakları değerlendirilmiştir.

Eksergoekonomik analiz sonucuna göre elde edilen sonuçlar ise aşağıda sıralanmıştır.

1 ve 4 numaralı pompaların eksergoekonomik faktörlerinin (f_k) sırasıyla %2,07 ve %0,88'lik oranları ile sistem bileşenleri arasındaki en düşük değerlere sahip olması, toplam eksergoekonomik maliyetlerinin ($\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$) büyük çoğunluğunun termodinamik kaynaklı ekserji yıkımları neticesinde oluştuğunu açıkça göstermektedir. 27,07 \$/h ile sistem bileşenleri arasındaki en yüksek ekserji yıkım maliyeti ($\dot{C}_{D,k}$) değerine sahip olan 4 numaralı pompa ile %18,31'lik değeri ile pompalar arasındaki en yüksek göreceli maliyet farkına (r_k) sahip olan 1 numaralı pompa sistemin eksergoekonomik açıdan en zayıf halkalarını oluşturmaktadır. Bu nedenle sistem ekserji verimliliğinin düşmesinde ve buna bağlı olarak maliyet artışlarının yaşanmasında yüksek etkileri bulunan iki pompanın birincil öncelikle iyileştirilmesi gerekmektedir.

1 ve 4 numaralı pompaların iyileştirilmesindeki odak noktasının ekserjik açıdan verimlilik artışını sağlama amacı taşıması nedeniyle, öncelikli olarak pompaların aşırı boyutlandırılmış veya düşük kapasitede çalışıp çalışmadığı değerlendirilmelidir. İkinci aşamada ise pompaların gereksiz yere yüksek basınçta çalışmalarına neden olabilecek boru hatlarındaki sürtünme kayıplarının (korozyon, tortu birikimi vb.) kontrolü ve pompa valf ayarlarının kontrolü sağlanmalıdır. İlk iki aşamadan sonuç alınamaması halinde ise, pompaların daha az enerji ile aynı debi ve basma yüksekliğini mümkün kılan daha verimli yeni modeller ile değiştirilmesi hususu değerlendirilmelidir.

3 ve 4 numaralı eşanjörlerin sahip oldukları eksergoekonomik faktörler (f_k) sırasıyla %58,02 ve %72,01'lik oranları ile sistemdeki en yüksek değerler olarak kabul edilebilecek büyüklükte olmaları, toplam eksergoekonomik maliyetlerinin ($\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$) büyük çoğunluğunun bileşenlere ait sermaye ve işletme ile bakım giderlerinden (\dot{Z}_k)

kaynaklandığını açıkça göstermektedir. Kontrol edildiğinde ise, 3 ve 4 numaralı eşanjörlerin sermaye ve işletme ile bakım maliyetlerinin (Z_k) sırasıyla 3,25 \$/h, 3,68 \$/h ile sistem bileşenleri arasındaki en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, getirdikleri ilave yüksek maliyetler nedeniyle, sistem çalışmasının maliyet-etkin bir biçimde gerçekleşmesine engel oluşturan bu eşanjörlerin ikincil öncelikle iyileştirilmesi gerekmektedir.

3 ve 4 numaralı eşanjörün iyileştirilmesinde odak noktasının sistemin maliyet-etkin bir çalışmasını sağlama amacı taşıması nedeniyle, öncelikli olarak sermaye yatırım maliyetleri ve yıllık işletme ve bakım giderleri detaylıca incelenmelidir. İnceleme neticesinde maliyetlerin güncel piyasa koşullarına göre yüksek olduğunun tespit edilmesi halinde ikinci olarak; işletme ve bakım maliyetlerini düşürmek amacıyla bakım programlarının optimizasyonu (yedek parça tedarik zincirinin iyileştirilmesi, daha dayanıklı ekipman tercih edilmesi vb.) hususları araştırılmalıdır. İlk iki adımın uygulanması neticesinde istenilen sonuçlara ulaşılamaması halinde ise, eşanjörlerin uygun maliyetli ve verimli yeni eşanjörler ile değiştirilmesi seçeneği değerlendirilmelidir.

JBIS'leri gibi ısı enerjisi üretimi gerçekleştiren karmaşık yapıdaki sistemlerde, sistemin kritik durum noktalarındaki birim maliyetlerinin belirlenmesi oldukça karmaşık süreçlerden oluşmaktadır. Bu karmaşık maliyet belirleme süreci eksergoekonomik analiz çerçevesinde mümkün olmaktadır.

Eksergoekonomik analiz, sistem ekipmanları arasındaki “zayıf halkaları” ekonomik maliyet açısından belirlemede oldukça önemli bir yöntemdir. Bu analiz yöntemi ile yalnızca enerji/ekserji verimliliğine odaklanmak yerine, bileşenlerin termodinamik performanslarının yanında ekonomik maliyetlerine de bağlı sonuçlar elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Gerçekleştirilen analizde, iyileştirilme önceliği verilen pompaların yüksek ekserji yıkımları nedeniyle verimsizlikleri ve buna bağlı olarak operasyonel maliyete getirdikleri artışlar ile eşanjörlerin ise yüksek sermaye ve işletme-bakım giderleri sebebiyle sistemin genel maliyet-etkinliğini düşürdükleri açıkça görülmektedir. Bu nedenle öncelikli olarak pompaların verimliliklerinin artırılmasına yönelik yatırımlar ve operasyonel iyileştirmeler yapılmalı, ardından eşanjörlerin sermaye yatırımı ve bakım maliyetlerini düşürmeye yönelik stratejiler

uygulanmalıdır. Bu yaklaşım ile sistemin toplam maliyet etkinliğin daha yüksek seviyelere çıkarılabileceği değerlendirilmektedir.

- [16] **Tsatsaronis, G.** (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 32(4), 249-253.
- [17] **Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G.** (2006). SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31(8-9), 1257-1289.
- [18] **Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. J.** (1995). *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons.
- [19] **Keçebaş, P., Gökgedik, H., Alkan, M. A., Keçebaş, A.** (2014). An economic comparison and evaluation of two geothermal district heating systems for advanced exergoeconomic analysis. *Energy conversion and management*, 84, 471-480.
- [20] **Arslan, O., Ozgur, M. A., Kose, R., Tugcu, A.** (2009). Exergoeconomic evaluation on the optimum heating circuit system of Simav geothermal district heating system. *Energy and Buildings*, 41(12), 1325-1333.
- [21] **Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Rosen, M. A.** (2007). Exergoeconomic analysis of geothermal district heating systems: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1303-1310.
- [22] **Alkan, M. A., Keçebaş, A., Yamankaradeniz, N.** (2013). Exergoeconomic analysis of a district heating system for geothermal energy using specific exergy cost method. *Energy*, 60, 426-434.
- [23] **Keçebaş, A.** (2013). Effect of reference state on the exergoeconomic evaluation of geothermal district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 462-469.
- [24] **Oktay, Z., Dincer, I.** (2009). Exergoeconomic analysis of the Gonen geothermal district heating system for buildings. *Energy and Buildings*, 41(2), 154-163.
- [25] **Baldvinsson, I., Nakata, T.** (2014). A comparative exergy and exergoeconomic analysis of a residential heat supply system paradigm of Japan and local source based district heating system using SPECO (specific exergy cost) method. *Energy*, 74, 537-554.
- [26] **Yücer, C. T., Hepbasli, A.** (2014). Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of a building heating system using SPECO and Lowex methods. *Energy and Buildings*, 73, 1-6.
- [27] **Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I.** (2007). A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1675-1697.

- [28] **Keçebaş, A., Hepbasli, A.** (2014). Conventional and advanced exergoeconomic analyses of geothermal district heating systems. *Energy and Buildings*, 69, 434-441.
- [29] **Arat, H., Arslan, O.** (2017). Exergoeconomic analysis of district heating system boosted by the geothermal heat pump. *Energy*, 119, 1159-1170.
- [30] **Tan, M., Keçebaş, A.** (2014). Thermodynamic and economic evaluations of a geothermal district heating system using advanced exergy-based methods. *Energy conversion and management*, 77, 504-513.
- [31] **Laf Sözlük**, “Balıkesir [Online]”, (20 Nisan 2025), <https://www.lafsozluk.com/2009/01/balikesir-ilinin-ilceleri-ve-nufus-saylari.html>, (2025).
- [32] **MGM**, “Meteorolojik Veri Bilgi Satış Ve Sunum Sistemi (Mevbis) [Online]”, (15 Kasım 2024), <https://mevbis.mgm.gov.tr/mevbis/ui/index.html#/Workspace>, (2024).
- [33] **TSE**, TS 2164: Kalorifer Tesisatı Projelendirme Kuralları, Ankara, (1983).
- [34] **Kayadibi, Ö., Gürboğa, Ş., Akıllı, H., Arıkan, S., et al.** (2023). Integration of structural, hydrogeological and thermal remote sensing data for the determination of geothermal capacity A case study of the Edremit (Balıkesir) Basin. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 171(171), 1-32.
- [35] **Hattuşa Vacation Thermal Club**, “Hattuşa Kazdağları [Online]”, (16 Mayıs 2025), <https://www.hattusa.com.tr>, (2025).
- [36] **Kaçar, B., Özden, S., Ateş, Ö.** (2017). Güre (Balıkesir) Jeotermal Alanının Jeolojisi, Hidrojeokimyası ve Aktif Tektonikle İlişkisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(2), 243-258.
- [37] **Akyol, T.** (2016). Bigadiç-balıkesir jeotermal bölgesel ısıtma sisteminin enerji ve ekserji analizi (Order No. 31287463). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (3139064081).
- [38] **EPDK**, “Elektrik ve Doğal Gaz Faturalarına Esas Tarife Tabloları [Online]”, (20 Nisan 2025), <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>, (2025).
- [39] **TCMB**, “Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları [Online]”, (20 Nisan 2025), <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/doviz+kurlari/gosterge+niteligindeki+merkez+bankasi+kurlarii>, (2025).
- [40] **United States Bureau of Labor Statistics**, “CPI Inflation Calculator [Online]”, (20 Nisan 2025), <https://www.bls.gov/>, (2025).
- [41] **United States Department of the Treasury**, “10 Years Treasury Bond Yield [Online]”, (20 Nisan 2025), <https://home.treasury.gov/>, (2025).

- [42] **Abusoglu, A., Kanoglu, M.** (2009). Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1–Formulations. *Applied Thermal Engineering*, 29(2-3), 234-241.
- [43] **Yucer, C. T., Hepbasli, A.** (2012). Exergoeconomic analysis of a central heating system from the generation stage to the building envelope. *Energy and buildings*, 47, 592-599.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Musa DEVECİ

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	Selçuk Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Bölümü	2015
Lise	Akşehir Anadolu Lisesi	2008